

Rúbia Cecília Augusta Francisco

**CLIMA URBANO: UM ESTUDO APLICADO A BELO
HORIZONTE, MG**

**Belo Horizonte
Escola de Arquitetura da UFMG
2012**

Rúbia Cecília Augusta Francisco

**CLIMA URBANO: UM ESTUDO APLICADO À BELO
HORIZONTE, MG**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Área de concentração: Bens Culturais, Tecnologia e Território

Orientadora: Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis

Belo Horizonte
Escola de Arquitetura da UFMG
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

F818c

Francisco, Rúbia Cecília Augusta.

Clima urbano: um estudo aplicado a Belo Horizonte, MG
[manuscrito] / Rúbia Cecília Augusta Francisco. - 2012.
122f. : il.

Orientadora: Eleonora Sad de Assis.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Arquitetura.

1. Planejamento urbano - fatores climáticos. 2. Climatologia urbana. 3. Belo Horizonte (MG) - Clima. I. Assis, Eleonora Sad de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.

CDD 720.47

RÚBIA CECÍLIA AUGUSTA FRANCISCO

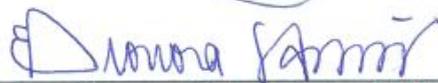
"Clima Urbano: um estudo aplicado a Belo Horizonte, MG"

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Amauri Pereira de Oliveira (USP/IAG)



Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis (EAUFMG - orientadora)



Profa. Dra. Roberta Vieira Gonçalves de Souza (EAUFMG)

Belo Horizonte, 04 de maio de 2012

Dedicatória

Dedico este trabalho aos
meus pais por tudo.

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a contribuição destas pessoas, sendo assim gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos:

À professora Eleonora Sad de Assis por sua dedicada orientação, pelo apoio constante e exemplo de determinação e profissionalismo.

Aos colegas e amigos do Sisema em especial à Elisete Gomides Dutra por quem sempre terei enorme admiração, pelo incentivo ininterrupto, por seu entusiasmo e otimismo contagiante; ao Edwan Fernandes Fioravante que esteve presente em várias etapas desse trabalho, agradeço por todos os ensinamentos, pelas valiosas conversas e sugestões; ao Antonio Alves dos Reis por sempre ter demonstrado interesse pelo meu estudo, agradeço a grande ajuda para que fosse possível a instalação da torre meteorológica; ao Charles Coelho pelo auxílio nos procedimentos de aferição das estações automáticas de monitoramento; ao Leonardo Pita pelo auxílio no levantamento de medidas do terreno destinado à implantação da torre meteorológica; à Zuleika Torquetti pelo incentivo aos estudos; Juliana Oliveira pela amizade e companheirismo; ao Raimundo Nonato pelas informações sobre torres meteorológicas. À Flávio, Lucas, Márcia Costa, Márcia Leão, Thiago, Felipe, Nathalia e Diego que acompanharam esta trajetória.

Aos professores e funcionários do Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável e do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética nas Edificações – LABCON da Escola de Arquitetura da UFMG em especial à professora Grace Cristina Gutierrez pelo auxílio no entendimento da operação da estação meteorológica automática ELE e as professoras Roberta Vieira Gonçalves de Souza e Stael de Alvarenga Pereira Costa pelas importantes contribuições durante a qualificação.

À professora Magda Luzimar de Abreu que contribui para a base do meu conhecimento em climatologia.

Ao professor Wellington Lopes Assis pelo fornecimento de informações sobre abrigos meteorológicos.

À professora Ilka Afonso Reis por ter me aceitado como aluna da disciplina de Iniciação à Estatística e pela disponibilidade em ajudar.

Ao professor Amauri Pereira de Oliveira pelas importantes contribuições para este trabalho.

Ao 5°. Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5° DISME/INMET) em especial aos senhores Lisandro Gemiacki, Jorge Luiz Batista Moreira, Marco Túlio Araújo e Sílvio Dias de Alkmim pela cessão de dados climáticos, colaboração durante os procedimentos de aferição da instrumentação utilizada neste estudo e esclarecimento de dúvidas sempre que necessário.

Ao Sr Rui e Sra. Jassira que colaboraram com a pesquisa, oferecendo o espaço de sua casa para a instalação da torre meteorológica.

Ao Sr. Reginaldo Junqueira, diretor de Gestão Operacional da Fundação de Parques Municipais e ao Sr. Julio, gerente do Parque Lagoa do Nado pela autorização para instalação dos termo-higrômetros no Parque.

Aos senhores Gleisson, Luciano e Ronaldo pela autorização para instalação dos termo-higrômetros em seus estabelecimentos.

Aos profissionais da empresa Engefame por terem se disponibilizado a instalar os sensores na torre meteorológica.

Aos colegas do mestrado em especial à Ana Carolina Veloso pelas ótimas conversas e por sempre se mostrar disposta a ajudar com muita simpatia.

À Jussara Grosch, Daniele Ferreira, Jacqueline Vilela e Simone Hirashima pelas colaborações constantes.

À Camila Nakata pelo esclarecimento de dúvidas sobre o ENVI-Met©.

Ao bolsista de iniciação científica Márcio Assunção pelo trabalho realizado com as estações meteorológicas automáticas.

Aos amigos Miguel e Paola pela colaboração nas etapas de seleção da área de estudo de caso e dos pontos de monitoramento, com vocês estes trabalhos de campo foram muito mais divertidos.

Aos meus pais e à minha irmã Lillian por estarem sempre presentes, pelo carinho e dedicação.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da forma urbana no clima local, através do monitoramento climático e da simulação numérica em um modelo microclimático (ENVI-Met©), em estudo de caso na cidade de Belo Horizonte, MG. A área selecionada para o estudo corresponde a um fragmento do bairro Planalto, localizado na região norte do município de Belo Horizonte, em zona de adensamento preferencial do município. Para o monitoramento de dados climáticos na área de estudo de caso foram selecionados pontos em um parque (Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado) e em seu entorno urbanizado visando analisar o comportamento das áreas verdes e das áreas construídas. Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento monitorados por uma torre meteorológica implantada próxima a área de estudo de caso serviram como entrada no modelo ENVI-Met© e os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar registrados por termo-higrômetros implantados na área de estudo de caso serviram como referência para comparação com os resultados do modelo. A metodologia foi desenvolvida de forma a permitir a simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo de caso e para dois cenários hipotéticos visando explorar as implicações de alterações na área de estudo nas variáveis climáticas por meio das respostas do ENVI-Met©. Um dos cenários corresponde à verticalização das edificações do recorte de estudo e o outro corresponde à substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por grama. Como resultados, o monitoramento em campo permitiu identificar as diferentes características climáticas geradas pelo desenho urbano da área de estudo e as simulações mostraram as novas condições climáticas locais resultantes das intervenções realizadas. Concentrando-se nessa abordagem, busca-se compor uma base de informações e procedimentos que sirvam para uma proposta de metodologia de investigação do clima urbano que possa vir a ser utilizada como subsídio pelos planejadores, tendo em vista a preservação de melhores condições de conforto térmico urbano.

Palavras-chave: clima urbano, simulação numérica, planejamento urbano.

ABSTRACT

This work aims at analyzing the influence of the urban form and land use in the local climate using climate monitoring and numerical simulation through the microclimatic model ENVI-Met©. A selected area in the city of Belo Horizonte, Brazil, was taken as case study. This area is located at the Northern region of Belo Horizonte, in the Planalto district, considered as a region for increasing the density and land occupation. Points for climate monitoring were set within a local green park (the city park Lagoa do Nado) and in its surrounding urban area in order to compare the thermo-hygrometric behavior of green and constructed areas. Data of air temperature, relative humidity, wind speed and direction were collected by a meteorological tower near the area and served as input and calibration for the ENVI-Met© model. Data of air temperature and relative humidity registered by the digital thermo-hygrometers set within and around the park served as references for comparison with the model results. The methodology was developed for observing the local thermal environment applying the simulation methods in architecture and urban planning: the calibrated case study area was compared to two hypothetical scenarios with changes in land use. One of them corresponds to increasing the heights of buildings and the other scenario replaced the arboreal vegetation of the Park Lagoa do Nado for grass. As a result, different microclimatic conditions were observed in the two hypothetical scenarios when compared to the calibrated case study. This clearly showed that urban design can produce diverse microclimatic conditions. Field monitoring helped to identify different climatic characteristics within green and built areas, becoming reference to the process of calibrating the micrometeorological model. This methodology may be used by planners in order to test design solutions and to preserve better quality of urban thermal comfort.

Keywords: urban climate, numerical simulation, urban planning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: ESQUEMA DE CIRCULAÇÃO DE VENTO NOS CANYONS URBANOS SEGUNDO OKE	8
FIGURA 2: ESQUEMA DAS ESCALAS CLIMÁTICAS E DAS CAMADAS VERTICAIS NAS ÁREAS URBANAS	10
FIGURA 3: MAPA DE ORVILLE WRIGHT PARK INCLUINDO OS PONTOS DE OBSERVAÇÃO DO BALANÇO ENERGÉTICO DA SUPERFÍCIE (SEB) DURANTE AGOSTO DE 1991, BEM COMO OS LOCAIS DE OBSERVAÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR E SUPERFÍCIE DURANTE AGOSTO DE 1993	14
FIGURA 4: ESTRUTURA DETALHADA DO MODELO ENVI-MET	21
FIGURA 5: ESQUEMA GERAL DO MODELO ENVI-MET	22
FIGURA 6: ÁREA DE TRABALHO PARA EDIÇÃO DE ÁREA DE ENTRADA NO ENVI-MET©	23
FIGURA 7: METODOLOGIA ADOTADA	27
FIGURA 8: ÁREA SELECIONADA NO MUNICÍPIO DE BAURU	28
FIGURA 9: DIVISÃO ADMINISTRATIVA DO MUNICÍPIO DE BELO HORIZONTE ADOTADA PELA PREFEITURA MUNICIPAL (À ESQUERDA) E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA REGIONAL NORTE (À DIREITA) 29	29
FIGURA 10: LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO	30
FIGURA 11: IMAGENS DA ÁREA DE ESTUDO	31
FIGURA 12: TORRE TRELIÇADA AUTOPORTANTE; À DIREITA UMA VISTA DA SUA BASE TRIANGULAR.....	32
FIGURA 13: FUNDAÇÃO DA TORRE METEOROLÓGICA.....	33
FIGURA 14: SISTEMA USADO NO PRESENTE ESTUDO	34
FIGURA 15: SERVIDOR TORREMET, USADO NO MONITORAMENTO DOS SENSORES E	35
FIGURA 16: TELA DO PROGRAMA QUE RODA NO SERVIDOR TORREMETSERVER.....	36
FIGURA 17: DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO	39
FIGURA 18: LOCAIS SELECIONADOS PARA IMPLANTAÇÃO DOS TERMO-HIGRÔMETROS	40
FIGURA 19: BRAÇOS TELESCÓPICOS PARA INSTALAÇÃO DE SENSORES	41
FIGURA 20: DISTANCIAMENTO ENTRE OS SENSORES DE VENTO	42
FIGURA 21- SIMULAÇÃO PARA 21 DE JUNHO- 9 AM.....	42
FIGURA 22- SIMULAÇÃO PARA 22 DE DEZEMBRO-3 PM.....	42
FIGURA 23: TORRE METEOROLÓGICA IMPLANTADA NO BAIRRO SÃO JOÃO BATISTA	43
FIGURA 24: ÁREA DE ESTUDO DE 720 X 720 METROS (DESTAQUE VERMELHO: ÁREA TESTE DE 60 X 60 M)..	47
FIGURA 25: JANELA DE CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS BÁSICOS NA EDIÇÃO DE ÁREA DO ENVI-MET ...	48
FIGURA 26: VISUALIZAÇÃO DA EDIÇÃO DA ÁREA DE 720 X 720 M NO ENVI-MET	49
FIGURA 27- VISUALIZAÇÃO DA EDIÇÃO DA	49
FIGURA 28: VISUALIZAÇÃO DA EDIÇÃO DA ÁREA DO CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO	50
FIGURA 29: VISUALIZAÇÃO DA EDIÇÃO DA ÁREA DO CENÁRIO DE SUBSTITUIÇÃO DA VEGETAÇÃO DE PORTE ARBÓREO	51
FIGURA 30: CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO BÁSICAS (INPUT) USADAS PARA OS ESTUDOS DE CASO	52
FIGURA 31: CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO USADAS PARA OS ESTUDOS DE CASO	55
FIGURA 32: PONTOS DE MONITORAMENTO: P1-MATA, P2-QUADRA, P3-ACADEMIA, P4-OFICINA, P5-BAR, P6-TORRE METEOROLÓGICA	59

FIGURA 33: PONTO P5 COM DESTAQUE PARA ÁREA VERDE (EM AMARELO)	61
FIGURA 34: CASO REAL ÀS 07:00 HORAS	82
FIGURA 35: CASO REAL ÀS 15:00 HORAS	82
FIGURA 36: CASO REAL ÀS 07:00 HORAS	84
FIGURA 37: CASO REAL ÀS 15:00 HORAS	84
FIGURA 38: CASO REAL ÀS 07:00 HORAS.....	85
FIGURA 39: CASO REAL ÀS 15:00 HORAS.....	85
FIGURA 40: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 07:00 HORAS	92
FIGURA 41: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 15:00 HORAS	92
FIGURA 42: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 07:00 HORAS	93
FIGURA 43: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 15:00 HORAS	93
FIGURA 44: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 07:00 HORAS	94
FIGURA 45: CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO ÀS 15:00	95
FIGURA 46: CENÁRIO PARQUE ÀS 07:00 HORAS	100
FIGURA 47: CENÁRIO PARQUE ÀS 15:00 HORAS	101
FIGURA 48: CENÁRIO PARQUE ÀS 07:00 HORAS	101
FIGURA 49: CENÁRIO PARQUE ÀS 15:00 HORAS	102
FIGURA 50: CENÁRIO PARQUE ÀS 07:00 HORAS	102
FIGURA 51: CENÁRIO PARQUE ÀS 15:00 HORAS	103
FIGURA 52: COLETA DE DADOS DAS ESTAÇÕES AUTOMÁTICA SOLAR E ELE NO 5ºDISME	117
FIGURA 53: PROCEDIMENTO DE AFERIÇÃO DOS TERMO-HIGRÔMETROS NO LABCON.....	119
FIGURA 54: LOCALIZAÇÃO DOS DATA LOGGERS NO INTERIOR DO ABRIGO METEOROLÓGICO DO 5ºDISME/ INMET.....	120
FIGURA 55: ABRIGO METEOROLÓGICO CONFECCIONADO AO LADO DO ABRIGO DO5ºDISME/ INMET COM OS DATA LOGGERS NOS SEUS INTERIORES	120
TABELA 1: ANÁLISE DESCRITIVA PARA A TEMPERATURA DO AR (°C) DOS PONTOS MONITORADOS, AGOSTO DE 2011.	60
TABELA 2: ANÁLISE DESCRITIVA PARA A UMIDADE RELATIVA DO AR (%) DOS PONTOS MONITORADOS, AGOSTO DE 2011.....	61
TABELA 3: ANÁLISE DESCRITIVA PARA A UMIDADE ABSOLUTA DO AR DOS PONTOS MONITORADOS, AGOSTO DE 2011	63
TABELA 4: TEMPERATURA DO AR OBTIDA NA SIMULAÇÃO E NO MONITORAMENTO.	68
TABELA 5: UMIDADE ABSOLUTA DO AR SIMULADA E CALCULADA.	74
TABELA 6: UMIDADE RELATIVA DO AR OBTIDA NA SIMULAÇÃO E NO MONITORAMENTO.....	79
GRÁFICO 1: DADOS DE TEMPERATURA REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO SOLAR NA TORRE (A 11,5 METROS) NO MÊS DE AGOSTO DE 2011 COM DESTAQUE PARA OS DIAS SELECIONADOS PARA A SIMULAÇÃO (RETÂNGULO DE LINHA VERMELHA)	53

GRÁFICO 2: DADOS DE UMIDADE RELATIVA REGISTRADOS PELA ESTAÇÃO SOLAR NA TORRE METEOROLÓGICA (A 11,5 METROS), NO MÊS DE AGOSTO DE 2011 COM DESTAQUE PARA OS DIAS SELECIONADOS PARA A SIMULAÇÃO (RETÂNGULO DE LINHA VERMELHA)	54
GRÁFICO 3: TEMPERATURA DO AR MONITORADA NOS PONTOS P1 A P6 EM AGOSTO DE 2011	59
GRÁFICO 4: UMIDADE RELATIVA DO AR MONITORADA NOS PONTOS P1, P2, P3, P4, P5 E P6	60
GRÁFICO 5: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA MENOR DE TESTE) PARA O PONTO ACADEMIA (P3).....	65
GRÁFICO 6: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA P3	66
GRÁFICO 7: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA P5	66
GRÁFICO 8: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA P4	66
GRÁFICO 9: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO ÁREA TOTAL) PARA.....	67
GRÁFICO 10: TEMPERATURA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO ÁREA TOTAL) PARA.....	67
GRÁFICO 11: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO AR MONITORADA NO PONTO BAR (P5) E NA TORRE METEOROLÓGICA.....	70
GRÁFICO 12: CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE RELATIVA DO AR NO MONITORADA NO PONTO BAR (P5) E NA TORRE METEOROLÓGICA.....	70
GRÁFICO 13: TEMPERATURA DO AR MEDIDA A 11,5 M E SIMULADA A 10,5 M (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL)	70
GRÁFICO 14: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO ACADEMIA-P3)	71
GRÁFICO 15: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO ACADEMIA-P3).....	71
GRÁFICO 16: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO BAR-P5)	71
GRÁFICO 17: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO BAR-P5).....	71
GRÁFICO 18: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO OFICINA –P4).....	71
GRÁFICO 19: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO OFICINA- P4)	71
GRÁFICO 20: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO QUADRA-P2)	72
GRÁFICO 21: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO QUADRA)	72
GRÁFICO 22: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO MATA –P1)	72
GRÁFICO 23: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO MATA- P1).....	72
GRÁFICO 24: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (TORRE METEOROL. 11,5 M).72	
GRÁFICO 25: SIMULAÇÃO COM ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (TORRE 11,5 M).....	72
GRÁFICO 26: UMIDADE ABSOLUTA DO AR CALCULADA PARA OS PONTOS P1 A P5.....	73
GRÁFICO 27: UMIDADE ABSOLUTA DO AR SIMULADA PARA OS PONTOS P1 A P5	73
GRÁFICO 28: H, LE E G SIMULADOS PARA P1(MATA)	75
GRÁFICO 29: H, LE E G SIMULADOS PARA P2(QUADRA)	75
GRÁFICO 30:H, LE E G SIMULADOS PARAP3(ACADEMIA)	75
GRÁFICO 31: H, LE E G SIMULADOS PARA P4(OFICINA).....	75
GRÁFICO 32: H, LE E G SIMULADOS PARA P5 (BAR)	75
GRÁFICO 33: UMIDADE RELATIVA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DO RECORTE TESTE) PARA O PONTO ACADEMIA (P3).....	76

GRÁFICO 34: UMIDADE RELATIVA DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA O PONTO ACADEMIA (P3).....	76
GRÁFICO 35: UR DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA P5(BAR)	77
GRÁFICO 36: UR DO AR MEDIDA E SIMULADA (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL) PARA P4	77
GRÁFICO 37: UR DO AR DO AR MEDIDA E SIMULADA (ÁREA TOTAL) PARA P2.....	77
GRÁFICO 38: UR MEDIDA E SIMULADA (ÁREA TOTAL) PARA O PONTO MATA (P1).....	78
GRÁFICO 39: UMIDADE RELATIVA DO AR MEDIDA A 11,5 M E SIMULADA A 10 M (SIMULAÇÃO DA ÁREA TOTAL).....	79
GRÁFICO 40: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO ACADEMIA-P3)	80
GRÁFICO 41: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO ACADEMIA-P3)	80
GRÁFICO 42: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO BAR P5)	80
GRÁFICO 43: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO BAR)	80
GRÁFICO 44: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO OFICINA-P4)	80
GRÁFICO 45: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO OFICINA).....	80
GRÁFICO 46: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO QUADRA- P2).....	81
GRÁFICO 47: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO QUADRA-P2)	81
GRÁFICO 48: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO MATA P1)	81
GRÁFICO 49: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (PONTO MATA P1)	81
GRÁFICO 50: SIMULAÇÃO COM SOLO ARGILOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (TORRE METEOROL. 11,5 M). 81	
GRÁFICO 51: SIMULAÇÃO COM SOLO ARENOSO NA ÁREA DE ANINHAMENTO (TORRE METEOROL. 11,5 M).. 81	
GRÁFICO 52: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E PARA O CENÁRIO DE	86
GRÁFICO 53: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (BAR- P5).....	87
GRÁFICO 54: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (OFICINA- P4)	87
GRÁFICO 55: TEMP. DO AR SIMULADA PARA CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (QUADRA- P2).....	87
GRÁFICO 56: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (MATA-P1).....	88
GRÁFICO 57- UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E PARA O CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (ACADEMIA-P3)	89
GRÁFICO 58: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (BAR- P5)	90
GRÁFICO 59: UR DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (OFICINA- P4)	90
GRÁFICO 60: UR DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (QUADRA-P2)	90
GRÁFICO 61: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO (MATA-P1)	91

GRÁFICO 62: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (PONTO ACADEMIA- P3).....	96
GRÁFICO 63: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (BAR- P5)....	96
GRÁFICO 64- TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (OFICINA- P4)	96
GRÁFICO 65: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (QUADRA-P2)	97
GRÁFICO 66: TEMPERATURA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (MATA-P1)..	97
GRÁFICO 67: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (ACADEMIA-P3)	98
GRÁFICO 68: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (BAR- P5)	98
GRÁFICO 69: UMIDADE RELATIVA SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (OFICINA- P4)99	
GRÁFICO 70: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (QUADRA-P2).....	99
GRÁFICO 71: UMIDADE RELATIVA DO AR SIMULADA PARA O CASO EXISTENTE E CENÁRIO PARQUE (MATA- P1).....	99
GRÁFICO 72: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO AR DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL E DA ESTAÇÃO AUTOMÁTICA ELE.....	118
GRÁFICO 73: CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE RELATIVA DO AR DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL E DA ESTAÇÃO ELE	118
GRÁFICO 74: CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL E DA ESTAÇÃO SOLAR. 118	
GRÁFICO 75: CORRELAÇÃO ENTRE UMIDADE REL. DO AR DA EST. CONVENCIONAL E DA ESTAÇÃO SOLAR 118	
GRÁFICO 76: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA DO AR (°C), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904040.....	121
GRÁFICO 77: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR (%), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904040.....	121
GRÁFICO 78: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA DO AR (°C), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904036.....	121
GRÁFICO 79: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR (%), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904036.....	121
GRÁFICO 80: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA DO AR (°C), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904037.....	122
GRÁFICO 81: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR (%), PELO DATA LOGGER IDENTIFICADO PELO NÚMERO DE SÉRIE 904037.....	122
GRÁFICO 82: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE TEMPERATURA DO AR (°C), PELO DATA LOGGER NÚMERO DE SÉRIE 963870	122
GRÁFICO 83: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MEDIDOS DE UMIDADE RELATIVA DO AR (%), PELO DATA LOGGER NÚMERO DE SÉRIE 963870	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATU - Ambiente Térmico Urbano

CLA- Camada Limite Atmosférica

CLP- Camada Limite Planetária

CLS - Camada Limite Superficial

CLU- Camada Limite Urbana

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISL - Subcamada Inercial

LABCON- Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética nas Edificações

P1- ponto mata de monitoramento

P2- ponto quadra de monitoramento

P3- ponto academia de monitoramento

P4- ponto oficina de monitoramento

P5- ponto bar de monitoramento

P6- torre meteorológica

RSL- sub camada de rugosidade

UBL - Urban Boundary Layer (camada limite urbana)

UCL - Urban Canopy Layer (camada limite abaixo do “dossel” urbano)

WMO- World Meteorological Organization

5° DISME/INMET- 5° Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 O CLIMA URBANO	5
2.1.1 <i>As escalas do clima urbano.....</i>	<i>9</i>
2.2 PLANEJAMENTO E CLIMA URBANO	10
2.2.1 <i>Vegetação em espaços urbanos abertos.....</i>	<i>13</i>
2.3 AS ABORDAGENS SOBRE O CLIMA URBANO	16
2.4 O MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO - ENVI-MET VERSÃO 3.1.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 FASE PREPARATÓRIA.....	28
3.1.1 <i>Definição e caracterização da área de estudo.....</i>	<i>28</i>
3.1.2 <i>Instrumentação</i>	<i>31</i>
3.1.2.1 <i>Confecção da torre meteorológica e abrigos para os termohigrômetros</i>	<i>32</i>
3.1.2.2 <i>Adequação das estações automáticas ELE e Solar para aquisição de dados na torre meteorológica</i>	<i>33</i>
3.1.3 <i>Teste de instrumentos.....</i>	<i>37</i>
3.1.4 <i>Monitoramento de dados climáticos</i>	<i>37</i>
3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	43
3.2.1 <i>Organização dos dados para simulação.....</i>	<i>45</i>
3.2.1.1 <i>Configuração de escalas do ENVI-Met©.....</i>	<i>45</i>
3.2.1.2 <i>Modelagem da área de estudo e dos cenários</i>	<i>47</i>
3.2.1.3 <i>Condições iniciais das simulações.....</i>	<i>51</i>
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58
4.1 DADOS MONITORADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE CASO.....	58
4.2 DADOS CALCULADOS À PARTIR DOS DADOS MONITORADOS	62
4.3 SIMULAÇÃO - CASO DE REFERÊNCIA.....	64
4.3.1 <i>Temperatura do ar</i>	<i>65</i>
4.3.2 <i>Umidade absoluta do ar.....</i>	<i>73</i>
4.3.3 <i>Umidade relativa do ar.....</i>	<i>76</i>
4.3.4 <i>Mapas gerados para toda a área de estudo de caso</i>	<i>82</i>
4.4 SIMULAÇÃO - CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO	86
4.4.1 <i>Temperatura do ar</i>	<i>86</i>
4.4.2 <i>Umidade Relativa do ar</i>	<i>89</i>
4.4.3 <i>Mapas gerados para toda a área de estudo de caso.....</i>	<i>91</i>
4.5 SIMULAÇÃO – SUBSTITUIÇÃO DA COBERTURA VEGETAL DO PARQUE.....	95

4.5.1 Temperatura do ar	95
4.5.2 Umidade Relativa do ar	98
4.5.3 Mapas gerados para toda a área de estudo de caso	100
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
REFERÊNCIAS	109
APÊNDICES	116
APÊNDICE A: AFERIÇÃO DAS ESTAÇÕES SOLAR E ELE	117
APÊNDICE B: AFERIÇÃO DOS TERMO-HIGRÔMETROS.....	119

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da urbanização é crescente e global. O intenso crescimento demográfico nas cidades tem provocado uma contínua sobrecarga na infra-estrutura urbana além de profundos impactos ao ambiente natural.

Hogan e Marandola (2009) apontam que os estilos de vida urbana são um dos principais motores da mudança climática sendo que a expansão urbana transforma e fragmenta a paisagem, comprometendo a capacidade de ecossistemas de amortizar as conseqüências da atividade humana. Höppe (2002, *apud* MONTEIRO, 2008) constata que do ponto de vista bioclimatológico a poluição do ar e as alterações microclimáticas são as principais conseqüências provocadas pela ação do homem sobre o meio.

As condições climáticas urbanas resultam de alterações da paisagem natural e da substituição desta por um ambiente construído, gerando mudanças em certos termos do balanço de energia. Muitos fatores da cidade, relacionados a sua forma e tipo de ocupação, são capazes de influenciar os elementos do clima. Pode-se citar: o aumento desmesurado da malha urbana, excessiva impermeabilização, redução dos espaços verdes intra-urbanos, verticalização e uso intensivo do solo nas áreas centrais, entre outros.

Dessa forma, conforme apontado por Lombardo (1985) fenômenos inter-relacionados como a ilha de calor, poluição do ar, chuvas intensas, inundações, desabamentos passam a fazer parte do cotidiano urbano, sobrepondo mais um fenômeno aos demais, fazendo com que a população se defronte com essa natureza alterada e conviva diariamente com os problemas dela decorrentes.

Muitos destes problemas poderiam ser reduzidos caso não existisse uma grande deficiência na aplicação das informações da climatologia urbana às atividades de planejamento e aos projetos urbanos. Katzschner (1997) ressalta a importância do estudo do clima urbano como um instrumento para o planejamento urbano visando à preservação do chamado “clima urbano ideal” durante o processo de crescimento das cidades.

Segundo Assis (2011) a deficiência na aplicação dos estudos de clima urbano às atividades de planejamento é creditada à relativa juventude dessa ciência, à abordagem fragmentada entre os campos de conhecimento e à falta de um consenso quanto a um quadro conceitual norteador para a elaboração de metodologias integradas, inclusive na abordagem das bases de dados e dos recursos — métodos empíricos, de modelagem física e numérica. Isso tem dificultado o desenvolvimento da capacidade preditiva na climatologia urbana, elemento fundamental para a consideração de diferentes propostas na prática de planejamento das cidades e dos edifícios.

Considerando esses fatos, constata-se a necessidade de análise de ferramentas que possam vir a auxiliar o desenvolvimento de projetos de espaços urbanos que valorizem os aspectos da diversidade ambiental, proporcionando proteção contra os aspectos negativos e mobilização dos aspectos positivos do clima. Monteiro (1986) chama a atenção para a necessidade do desenvolvimento de simulação a partir de situações observadas, fortalecendo as bases de previsão para subsidiar o planejamento das cidades.

A modelagem numérica do clima tende a ser uma abordagem promissora para aplicação no planejamento e desenho dos espaços urbanos, tendo em vista que auxilia no entendimento da relação entre a atmosfera e a superfície, e na previsão de cenários futuros eventualmente adversos relacionados às mudanças causadas pela urbanização local, o que poderia ser evitado e/ou mitigado pelas ações de planejamento e projetos urbanos.

Diante do contexto exposto o presente estudo tem como objetivo geral analisar a influência da forma urbana no clima local, através do monitoramento climático e da simulação numérica em programa computacional microclimático, em estudo de caso na cidade de Belo Horizonte, MG. Para o monitoramento de dados climáticos em campo foram selecionados pontos em um parque (Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado) e em seu entorno urbanizado visando analisar o comportamento das áreas verdes e das áreas construídas.

O modelo adotado foi o ENVI-Met© projetado para simular as interações entre o solo, a superfície urbanizada e a atmosfera. Ele possibilita gerar resultados para diversos parâmetros climatológicos (temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, etc.) tendo por base a configuração de uma área da cidade. A modelagem é baseada nas leis fundamentais da dinâmica de fluidos e da termodinâmica. Dessa forma, os dados climáticos monitorados na área de estudo serviram de referência para comparação com os resultados do ENVI-Met©.

A metodologia foi desenvolvida de forma a permitir a simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo e para dois cenários visando explorar as implicações nas variáveis climáticas em função de alterações na forma urbana. Um dos cenários corresponde à verticalização das edificações do recorte de estudo e o outro corresponde à substituição da vegetação de porte arbóreo do parque por grama.

Este estudo está ligado ao Projeto de Pesquisa Ambiente Térmico Urbano, que envolve pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP e visa o desenvolvimento de estudos integrados sobre a influência das estruturas urbanas no clima local. A idéia consiste na utilização de uma mesma metodologia de abordagem do clima urbano em três municípios diferentes: Bauru (SP), Campinas (SP) e Belo Horizonte (MG) para possibilitar a comparação dos resultados obtidos.

Este trabalho foi estruturado em mais quatro capítulos, além das referências e apêndices. Neste primeiro capítulo introdutório, apresentou-se o contexto em que o trabalho encontra relevância e seus objetivos principais.

O capítulo 2 “Revisão Bibliográfica e Fundamentos Teóricos” apresenta a fundamentação teórica para auxiliar o entendimento do conceito de clima urbano e suas escalas de abordagem, a questão da inserção do clima urbano no planejamento do espaço urbano, o papel exercido pelas áreas verdes em espaços urbanos abertos, as abordagens de clima urbano ao longo dos tempos e as contribuições destas abordagens

para inserção da questão climática no planejamento urbano e o modelo numérico adotado no presente estudo.

O capítulo 3 “*Materiais e Métodos*” apresenta a metodologia e materiais utilizados para a condução do estudo climático no recorte urbano selecionado e pode ser dividido em duas fases: fase preparatória que engloba a definição e caracterização da área de estudo de caso, a confecção de uma torre meteorológica e de abrigos para termohigrômetros, a adequação de duas estações meteorológicas automáticas para implantação na torre meteorológica confeccionada, o teste da instrumentação antes da implantação na área de estudo de caso e culmina com os levantamentos de dados meteorológicos para a simulação; e a fase da simulação computacional que engloba a modelagem da área de estudo e dos cenários e a organização dos dados meteorológicos coletados em campo para a simulação no ENVI-Met©.

O capítulo 4 “Apresentação e Análise dos resultados” reúne os resultados obtidos para os dados monitorados na área de estudo de caso, para a simulação da situação real da área de estudo de caso e dos cenários estabelecidos.

O capítulo 5 “Conclusões e Considerações Finais” apresenta as conclusões do estudo e as considerações finais. Neste capítulo, discutem-se os resultados obtidos com base nas premissas, nos objetivos e na metodologia empregada, apontando-se as limitações do trabalho realizado e sugerindo-se trabalhos futuros.

Nas referencias são listados os livros, os artigos, os sites consultados. Por fim são apresentados os apêndices para elucidar os detalhes metodológicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este item do trabalho apresenta a revisão dos estudos que auxiliam o entendimento do clima urbano e suas escalas de abordagem, a questão da inserção do clima urbano no planejamento do espaço urbano, o papel exercido pelas áreas verdes como fator modificador do clima local e as abordagens de clima urbano ao longo dos tempos.

2.1 O CLIMA URBANO

Conforme Freitas e Lombardo (2007) a cidade atua como fator modificador do clima regional e cria condições ambientais diferenciadas definindo o chamado “clima urbano”. Assis (2011) observa que muitos estudos realizados têm demonstrado que a forma urbana, as propriedades térmicas dos materiais de construção e a proporção entre área verde e área construída são os principais fatores ligados à cidade responsáveis pela mudança climática local.

A noção de que o homem, por meio da construção do espaço físico da cidade, produz meios para alterar as características locais do clima, motivou a criação de um ramo específico da climatologia denominado *climatologia urbana*. Esta aborda os efeitos da urbanização no clima da cidade.

A origem da climatologia urbana reside no início do século XIX, na Europa, com o trabalho de Luke Howard sobre o clima da cidade de Londres, publicado pela primeira vez em 1818. Ele foi o primeiro a observar que as temperaturas do ar são freqüentemente mais altas na cidade que na área rural à sua volta. Estudos como esse se multiplicaram na segunda metade do século XIX na França e na Alemanha, em virtude da expansão das redes de observação meteorológica (LANDSBERG, 1981).

Durante os anos 1930 ocorre a emergência da micrometeorologia, especialmente na Alemanha e na Áustria, sendo sua ênfase em pequenas escalas de espaço e de tempo. De acordo com um dos principais estudiosos da micrometeorologia, o alemão Rudolf Geiger (1961) a causa das características peculiares do clima urbano está na alteração dos balanços térmico e hídrico, e é ocasionada, em primeiro lugar, pela substituição do

solo natural pelos materiais de construção, sobre os quais, ainda por cima, a água da chuva escoava rapidamente; e pelos edifícios, que em conjunto aumentam a rugosidade da superfície. Acrescenta-se a estes fatos a fonte de calor constituída pelas atividades urbanas e pela indústria, e finalmente o aumento das poeiras na atmosfera urbana e a sua poluição com os gases de escape dos motores dos veículos e da indústria.

Após a 2ª Grande Guerra muitos trabalhos foram desenvolvidos na América do Norte e no Japão concentrando-se na distribuição horizontal de vários elementos climáticos, sendo a temperatura a variável dominante. Havia também um enfoque na relação da temperatura com o uso do solo urbano; nas relações estatísticas entre as diferenças urbano-rurais e as condições predominantes de tempo; na exploração do efeito do tamanho da cidade em tais diferenças e na investigação da extensão vertical da influência urbana. Muitos destes trabalhos foram feitos por meteorologistas, mas havia uma crescente expansão da participação de geógrafos climatologistas (ASSIS, 2005).

No final dos anos 1960 e início dos 1970, ocorreu um forte aumento do interesse e do número de trabalhos sobre a atmosfera urbana, originados provavelmente da maior consciência do papel do ser humano na mudança ambiental, especialmente sobre a poluição atmosférica. Houve uma grande ênfase no estudo dos processos atmosféricos e na construção de modelos, a partir da contribuição dos meteorologistas. Paralelamente, desenvolvia-se uma nova climatologia física no exterior, onde os conceitos de balanço energético e hidrológico tornaram-se temas centrais (ASSIS, 2005).

O trabalho de Tony Chandler (1965) realizado em Londres foi uma das primeiras pesquisas sobre a caracterização climática de uma metrópole. Seus experimentos apontaram diferenças significativas de temperatura e umidade entre o centro da capital britânica e o meio rural circundante. Esse estudo destacou também a existência de alterações na composição química da atmosfera e abordou o problema da concentração de poluentes atmosféricos em cidades industrializadas. Chandler (1976) constatou que a direção e velocidade dos ventos são controladas pela forma e disposição dos edifícios, padrão de arruamento e espaços abertos, além, das condições topográficas do sítio urbano e que a velocidade dos ventos no meio urbano cai em relação ao meio rural em

baixas altitudes (menos de 100 m). Quanto mais reduzida a velocidade dos ventos, mais tempo é necessário para deslocar os poluentes da atmosfera urbana.

No final dos anos 70, os vários estudos de caso desenvolvidos, principalmente em cidades de latitudes médias, serviram de base para a identificação das muitas variáveis envolvidas e sua inter-relação, tais como as condições sinóticas e geográficas do sítio de assentamento, o tamanho da cidade e de sua população, o calor antropogênico, o grau de poluição do ar, além dos aspectos ligados à forma urbana e suas características de ocupação do solo. Esses estudos originaram os primeiros modelos descritivos do clima urbano, propiciando os avanços na modelagem numérica do balanço de energia urbano. A partir dos anos 80, as cidades tropicais passaram a ser mais estudadas, contribuindo também para o desenvolvimento desses modelos (ASSIS, 2005).

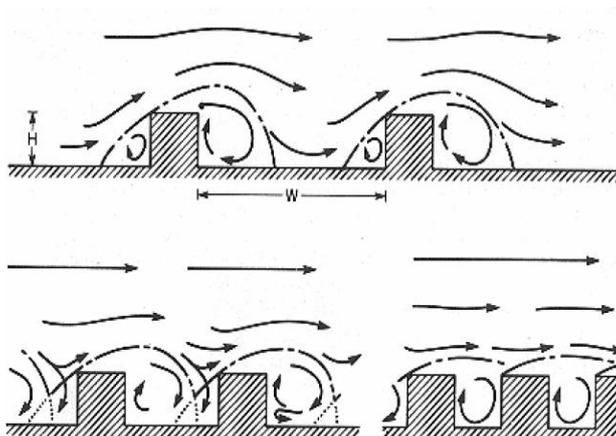
No Brasil, os estudos de clima urbano iniciaram-se a partir da década de 1970. Examinando a produção brasileira, observa-se que boa parte dos estudos sobre o clima urbano, especialmente os realizados por geógrafos, partem da contribuição teórica de Carlos Augusto Monteiro (1976). Ele propôs um modelo descritivo baseado na Teoria Geral dos Sistemas (TGS) de Ludwig Von Bertalanffy e organizado segundo os canais de percepção humana, portanto, com um grande potencial para a integração interdisciplinar com a área de planejamento urbano, uma vez que aborda o ser humano como referencial para questões referentes ao espaço urbano.

Internacionalmente, alguns dos principais estudos a esse respeito foram realizados pelo prof. Dr. Timothy R. Oke e seus colaboradores e alunos da University of British Columbia no Canadá, nas décadas de 70 e 80. Oke inovou a abordagem da questão com base no conceito de ilha de calor, conceito esse comprometido com a compreensão do fenômeno meteorológico e sua modelagem. Segundo Oke (1982) o clima da cidade é produto fundamentalmente da transformação da energia a partir da interação entre o ar atmosférico e o ambiente construído. Este autor demonstrou que a diferença primária entre os processos térmicos “rural” e “urbano” está na repartição entre as magnitudes do fluxo turbulento de calor sensível e do fluxo turbulento de calor latente no balanço energético local. Nas cidades, onde predominam superfícies impermeáveis, a maior parte do fluxo térmico é de calor sensível. A grande capacidade calorífica dos materiais

umenta o potencial de estoque de calor no tecido urbano, provocando um aumento da temperatura do ar, devido à irradiação do calor acumulado. Essa visão colocou em evidência o papel da geometria urbana e da inércia térmica dos materiais de construção no processo de mudança climática local.

Tomando como unidade o “canyon urbano” entendido como uma forma de disposição espacial das edificações quando estas estão enfileiradas ao longo de ambos os lados de uma rua (FIGURA 1), Oke discute as relações dimensionais entre os edifícios e os efeitos no clima. Para Oke, a relação geométrica entre as edificações é um fator decisivo na interação do espaço construído com o clima, especialmente a razão altura/largura do canyon. Essa razão configura um fator de obstrução que diminui as trocas térmicas por radiação de onda longa para o céu, que atua como corpo negro à noite, alterando a taxa de resfriamento da massa construída urbana e se tornando um dos principais causadores da ilha de calor.

Figura 1: esquema de circulação de vento nos canyons urbanos segundo Oke



Fonte: Santamouris, 2006.

Ferreira et al (2011) em um estudo referente ao balanço de radiação na superfície da Cidade de São Paulo observaram que esta cidade induz uma ilha de calor urbano com a máxima intensidade durante o dia variando de 2,6°C em julho (16:00 LT) a 5,5°C em Setembro (15:00 LT). As análises das propriedades radiométricas realizadas indicam

que esta máxima durante o dia é uma resposta primária à variação sazonal dos valores diários de radiação solar líquida na superfície.

Nas duas últimas décadas do século XX, os trabalhos consolidaram métodos e técnicas de pesquisa e monitoramento do clima urbano, focalizando os processos e estados atmosféricos sobre a cidade como base para a modelização física e numérica (ASSIS, 2005). Atualmente observa-se o aumento do número de trabalhos não somente em regiões temperadas, mas também em áreas tropicais, direcionados para métodos que envolvem simulações físicas ou numéricas para aplicação ao planejamento urbano.

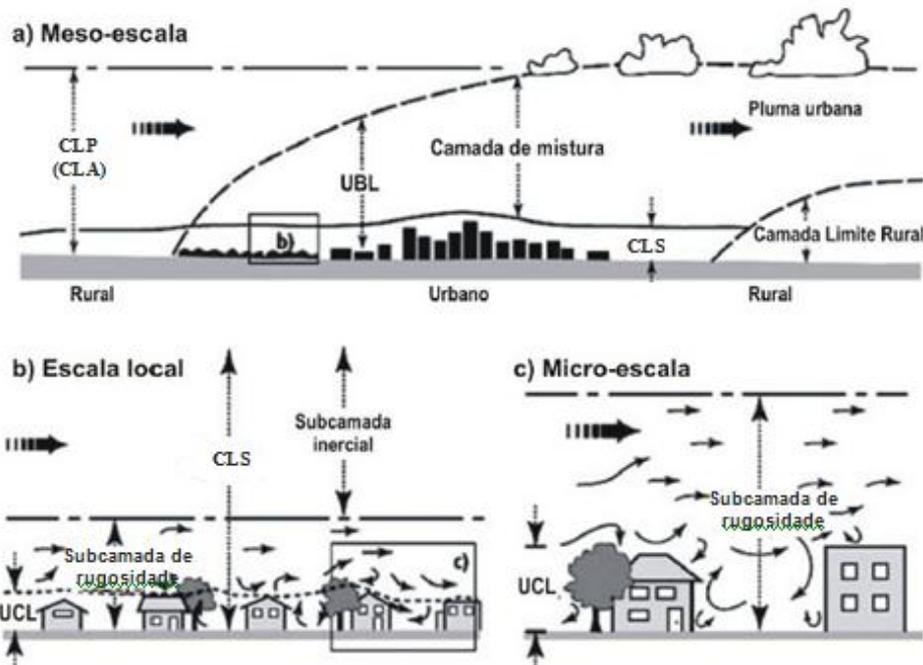
2.1.1 As escalas do clima urbano

As modificações do clima sobre áreas urbanas são bastante variáveis, ou seja, não ocorrem de forma homogênea, assim como não são homogêneas as tipologias de ocupação e uso do solo nas cidades. Essas alterações climáticas podem ser observadas em diferentes escalas climáticas. As escalas de abordagem constituem uma das discussões mais importantes e menos consensuais nos trabalhos sobre o clima urbano. A organização do clima em escalas possibilita um maior entendimento dos fenômenos e a seleção de métodos e técnicas adequados para trabalhar cada grau de urbanização, pois a cada nível escalar deve corresponder uma abordagem específica. É apresentada aqui basicamente a abordagem meteorológica do clima de acordo com Oke, pelo fato deste trabalho utilizar um modelamento micrometeorológico.

Oke (2004) propõe uma estrutura quadridimensional para a abordagem dos fenômenos climáticos que ocorrem nas áreas urbanas. Essa estrutura engloba tanto a escala espacial (horizontal e vertical), quanto à escala temporal, agregando ao conceito de clima uma concepção dinâmica (FIGURA 2).

Oke propõe quatro escalas de abordagem horizontal que se superpõem entre si: micro (de 10^{-2} a 10^3 m), local (de 10^2 a 5×10^4 m), meso (de 10^4 a 2×10^5 m), macro (10^5 a 10^8 m). Isto coloca a cidade entre a escala local e mesoclimática, se for considerada como um todo, e na escala microclimática ou local, se for trabalhada em partes aproximadamente do tamanho de bairros.

Figura 2: esquema das escalas climáticas e das camadas verticais nas áreas urbanas



Fonte: Adaptado de Oke, 2004.

O modelo de divisão da Camada Limite Planetária (CLP) ou Atmosférica (CLA) proposto por Oke considera dois níveis no interior da CLA: a camada limite superficial (CLS) e a camada de mistura.

A camada limite superficial está dividida em duas regiões: subcamada de rugosidade (RSL) e subcamada inercial (ISL). A extensão vertical da camada do dossel urbano (UCL) é indicada por meio da altura média dos elementos de rugosidade. A extensão vertical da camada limite urbana (UBL) corresponde à extensão vertical da camada de mistura (FERREIRA, 2010).

A subcamada de rugosidade se estende do nível do solo até a altura de mistura, onde a ação de mistura é completa e os efeitos individuais dos obstáculos são percebidos. A subcamada inercial tem sua altura determinada pela altura de mistura e estende-se até o topo da camada limite superficial. Nesta camada, há uma mescla do efeito individualizado dos obstáculos pela ação dos vórtices turbulentos.

Segundo Oke (1987 apud ANDRADE, 2005) a necessidade de dispor de um corpo de conceitos e de uma terminologia simples levou a distinção de categorias espaciais

discretas, sempre arbitrárias e artificiais, pois os fenômenos atmosféricos são, por natureza, contínuos.

2.2 PLANEJAMENTO E CLIMA URBANO

O desenho físico urbano pode ter fortes repercussões nas condições climáticas locais. Conforme apontado por Barbirato (2010) o microclima de uma área urbana pode ser modificado com planejamento correto do sítio urbano e do entorno natural e construído, para que se tenha resultados mais favoráveis no que diz respeito ao conforto térmico humano. Steemers e Steane (2004) argumentam que o projeto cuidadoso dos espaços abertos, ao proporcionar a diversidade de ambientes (acesso ao sol assim como à sombra, exposição às brisas, bem como proteção contra o vento) e, conseqüentemente, a diversidade térmica, possibilita que escolhas possam ser percebidas e potencialmente exercidas, aumentando a adaptação (física e psíquica) dos usuários dos espaços. Entretanto, a aplicação da climatologia ao planejamento das áreas urbanas ainda é limitada.

Lombardo (1985) explica que se deve levar em consideração a extensão e a densidade da área construída, a disposição dos elementos componentes da estrutura urbana, as propriedades dos materiais de construção, as cores das superfícies exteriores, as condições de sombra nas ruas e estacionamentos, a distribuição das áreas verdes, a relação entre índice de área construída e espaços livres.

Katzschner (1997) ressalta a importância do estudo do clima urbano como um instrumento para o planejamento das cidades. O autor propõe que condições climáticas locais, tais como, os padrões de vento, a distribuição de temperatura e dados de poluição atmosférica, sejam utilizadas como base para a definição de diretrizes de projeto e planejamento. Sugere ainda que os condicionantes geocológicos do meio urbano em escala local sejam identificados, de modo a definir áreas que precisam ser melhoradas ou preservadas para garantir as condições de qualidade e conforto ambiental para as cidades.

Bitan (1998) propõe uma metodologia para a aplicação da climatologia em todos os níveis de planejamento, abrangendo desde o contexto regional até o projeto urbano e do edifício conforme apresentado a seguir:

- no planejamento regional (correspondente à escala mesoclimática) os dados climáticos podem ser utilizados na seleção de novas localizações, no planejamento do uso do solo (rural e urbano) e na minimização dos riscos ambientais;
- no planejamento urbano (correspondente ao clima local) os dados climáticos podem ser utilizados na seleção da forma urbana geral, na definição de funções e usos do solo urbano, no dimensionamento e localização de áreas verdes, na manutenção de corredores de circulação;
- o nível do edifício e seu entorno (corresponde à escala microclimática) é mais explorado pela arquitetura bioclimática.

O roteiro metodológico de Bitan aplica-se mais ao planejamento de cidades novas e, portanto, não aborda a questão da gestão de qualidade ambiental urbana que o processo de planejamento deve prever.

Em se tratando de melhoria da qualidade ambiental de cidades existentes Emmanuel *et al* (2007) apontam que a abordagem convencional para mitigação de ilhas de calor é diferenciada pelos graus de intervenção no espaço urbano. Em se tratando da escala local (bairros) e micro-escala (vários edifícios de ruas inteiras) as estratégias de mitigação são principalmente centradas em três aspectos: aumento do albedo, o aumento da cobertura vegetal e resfriamento dos telhados. O objetivo é reduzir a resposta da urbanização sobre a temperatura do ar. Outras estratégias de mitigação a nível local e mesoescala incluem a melhoria da ventilação urbana. Dentro da camada abaixo do “dossel” urbano (UCL), especialmente ao nível da rua (altura dos pedestres), o foco tem sido o sombreamento.

Emmanuel (2011) destaca que a melhoria do clima urbano nos trópicos cada vez mais aponta para a necessidade de sombreamento de locais públicos. O autor argumenta que por muito tempo a ênfase tem sido dada somente à ventilação para alcançar o conforto desejado e que o potencial de resfriamento do vento é muito maior se for acompanhado de sombra. Brandão (2009) observa que o sombreamento das edificações no meio

urbano proporcionado pelo entorno reduz a carga de condicionamento artificial nas edificações, mas prejudica a iluminação natural, forçando a utilização de iluminação artificial. Dessa forma, o importante é saber definir uma proposta de desenho urbano em que a forma das edificações e o uso de vegetação produzam o sombreamento desejado sem prejuízo de outros aspectos como ventilação e iluminação naturais. A legislação urbanística de uso e ocupação do solo, sob essa perspectiva, pode ser um importante elemento estruturador de novas condições ambientais para a cidade. Por esse motivo é importante que ela reflita a necessidade dos habitantes e não de agentes da especulação e do mercado imobiliário.

2.2.1 Vegetação em espaços urbanos abertos

A vegetação é um fator modificador do clima local. Conforme apontado por Ali Toudert (2005) a vegetação possui três principais propriedades que afetam o clima: sombreamento, umidificação (evapotranspiração) e quebra-vento. Indiretamente, atua como um meio para reter água no interior do solo. Qualquer uso da vegetação para a melhoria do microclima deve explorar essas propriedades. A vegetação urbana também pode atuar na minimização de ruídos e como filtro natural na retenção de particulados.

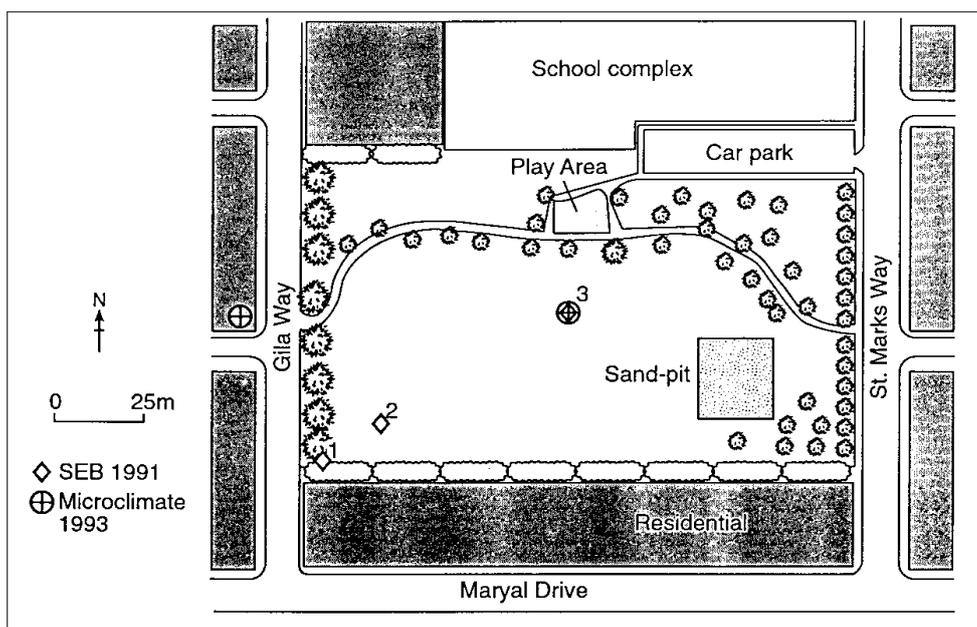
Bach (1970 *apud* ASSIS, 1990) constatou que as áreas verdes urbanas têm sido utilizadas para modificar as temperaturas da cidade. O autor pesquisou um parque pequeno em Cincinnati (cerca de 3400 m²) com o objetivo de determinar qual seria o tamanho de um parque a partir do qual se produziriam diferenças na temperatura e umidade em relação ao entorno, em situação de calma. Concluiu que as condições no pequeno parque eram bem melhores, tanto de dia quanto de noite, em relação às ruas e passeios adjacentes.

Lombardo (1985) verificou, para a cidade de São Paulo, que o fenômeno da ilha de calor tem menor intensidade em áreas com índices elevados de vegetação arbórea. Conforme apresentado pela autora a maior quantidade de vegetação implica na mudança do balanço de energia, tendo em vista que a vegetação contribui com as trocas úmidas

de calor (evapotranspiração). Através da evapotranspiração, ocorre o resfriamento e umidificação do ar adjacente.

Oke *et al* (2000) realizaram medidas de temperatura e umidade relativa do ar em Orville Wright Park no subúrbio de Mission Oaks, Sacramento e sobre a calçada de concreto de uma residência localizada a oeste deste parque, para avaliar diferenças de temperatura entre o parque e seus arredores. As observações de campo no parque foram realizadas em três locais, ao longo de um transecto alinhado com o vento (FIGURA 3). O ponto 1 está na borda do parque a 4 m a partir do limite de barlavento. A diferença de temperatura do ar entre o parque e o ponto da residência é de 1 a 2°C, o parque é sempre mais frio em todos os momentos do dia.

Figura 3: mapa de Orville Wright Park incluindo os pontos de observação do balanço energético da superfície (SEB) durante agosto de 1991, bem como os locais de observação de temperatura e umidade relativa do ar e superfície durante agosto de 1993



Fonte: Oke et al (2000).

Mascaró (2004) constatou que, sob agrupamentos arbóreos, a temperatura é de 3°C a 4°C menor que nas áreas expostas à radiação solar e que a diferença se acentua com o aumento do porte da vegetação. De acordo com a autora, o sombreamento talvez seja o efeito mais procurado, pelo fato de proteger o recinto urbano de insolação indesejada, reduzindo o consumo de energia para resfriamento ao longo do período quente. A

redução na temperatura de superfície das paredes sombreadas pela vegetação tem uma influência na temperatura interna do edifício, proporcionando uma redução no uso dos sistemas artificiais de condicionamento do ar. As árvores também podem ser utilizadas no sombreamento de vias e estacionamentos, evitando o aquecimento excessivo de materiais como asfalto e concreto e a liberação do calor acumulado durante a noite.

Mascaró (2004) também argumenta que a vegetação junto às edificações pode ainda controlar a ventilação dos ambientes, dirigir o sentido do fluxo de ar e amenizar a ação dos ventos frios de inverno. Robinette (*apud* MASCARÓ, 2004) aponta que os efeitos básicos da vegetação como barreira aos ventos são quatro: obstrução, deflexão, filtragem e condução. A obstrução bloqueia o fluxo de ar. A deflexão desvia a direção do fluxo de ar e, conseqüentemente, sua velocidade. A filtragem reduz a velocidade do vento conforme a permeabilidade da barreira. A condução direciona o fluxo de ar, modificando sua velocidade.

Conforme apresentado por Ali Toudert (2005), dentro de uma estrutura urbana, a eficácia climática da vegetação depende da relação entre área verde e área construída, bem como do tamanho, localização e características próprias das plantas (espécie, densidade, forma, tamanho, volume, idade, etc.).

Assis (2010) explica que, em geral, a vegetação absorve uma maior quantidade de radiação solar e irradia uma quantidade menor de calor do que qualquer superfície construída. A energia absorvida pelas folhas é utilizada em processos metabólicos, enquanto que para outros materiais, especialmente os utilizados nas edificações, toda energia absorvida é transformada em calor sensível.

Diante do exposto, conclui-se que a vegetação deve ser vista como um dos instrumentos de desenho urbano no controle e prevenção de efeitos adversos do clima urbano. Ressalta-se que a utilidade das áreas verdes nas cidades está intimamente relacionada com a quantidade, a qualidade e a distribuição das mesmas dentro da malha urbana. Por esse motivo, faz-se necessária uma mudança de mentalidade quanto à criação destas áreas na maioria das cidades brasileiras, onde os espaços destinados à implantação de vegetação são insuficientes para a promoção de algum benefício microclimático.

2.3 AS ABORDAGENS SOBRE O CLIMA URBANO

A revisão da literatura sobre clima urbano, tanto no Brasil como no exterior, mostra grande diversidade de enfoques, metodologias e objetivos variados, em várias escalas de trabalho, ainda que o principal objetivo seja a procura do entendimento dos fatores contribuintes para as alterações climáticas verificadas no meio urbano.

No intuito de compreender os fenômenos envolvidos na interação entre os assentamentos urbanos e a atmosfera foram desenvolvidos alguns modelos - construções conceituais, físicas ou matemáticas através dos quais são levantadas as características da realidade relevantes à resolução de um determinado problema.

Assis (2005) ressaltou a pertinência do conceito de modelo apresentado por Echenique (1975) para a abordagem de planejamento urbano. Segundo esse autor, um modelo de planejamento só pode ser elaborado a partir de modelos preditivos e exploratórios de futuros possíveis, o que requer uma evolução quanto à simples abordagem de descrição da realidade observada.

O desenvolvimento da capacidade preditiva na climatologia urbana, elemento fundamental para a etapa de planejamento e, portanto, para as aplicações no planejamento das cidades e dos edifícios pode se dar através do desenvolvimento de métodos para se conjugarem dados medidos em campo e simulação exploratória capaz de se ajustar ao balanço de energia na escala da camada do dossel urbano. Assim pode-se explorar soluções de ocupação urbana para um determinado sítio.

Oke (1984) alega que nos estágios iniciais do desenvolvimento da climatologia urbana uma grande quantidade de medições e levantamentos foi realizada sem que generalizações fossem obtidas, ou dados para o planejamento urbano fossem efetivamente produzidos. O autor critica o caráter descritivo destes estudos iniciais pela sua falta de aplicação prática. O limite das abordagens descritivas é que não possibilitam indicações objetivas para a ordenação do espaço urbano, tais como o melhor arranjo dos edifícios, o tamanho e disposição das áreas verdes, etc.

Os primeiros modelos que tentaram superar o caráter descritivo destas abordagens foram elaborados a partir de bases de dados empíricos com o objetivo de correlacionar variáveis de planejamento urbano com as condições térmicas da cidade (BRANDÃO, 2009). Os estudos baseados em modelos empíricos têm a vantagem de serem fundamentados em condições reais através de medições climáticas em campo associando-as ao tratamento estatístico dos dados, mas sua validade se restringe à base de dados que lhes deu origem, o que pode torná-los inadequados para generalizações e previsões de estados futuros.

Um dos modelos empíricos clássicos, formulado por Oke (1973) relaciona o parâmetro população com a intensidade máxima da ilha de calor urbana. O modelo foi posteriormente criticado pelo próprio Oke (1976) por sua origem puramente empírica e sua falta de coerência dimensional. Givoni (1998) propôs substituir o parâmetro população por densidade construída, por esta apresentar uma relação causal mais forte com o aquecimento urbano.

Dentre as abordagens baseadas em modelos empíricos é possível destacar a experiência alemã com práticas bem sucedidas de integração das abordagens de clima e planejamento urbano. A escola alemã de climatologia urbana tem a tradição de trabalhar com mapeamentos conceituais e análises qualitativas, confirmadas por medições de campo. As trajetórias de vento, por exemplo, são mapeadas para antecipar futuras conseqüências da ocupação da cidade, e assim, determinar verdadeiros corredores de vento que devem permanecer desobstruídos para a melhoria das condições de conforto ou para a dispersão de poluentes. Nessas áreas a arborização é mantida para produção de ar limpo e fresco.

Há similaridades entre a proposta de Monteiro (1976) e a alemã de planejar com o clima, visto que ambas tem como princípio norteador a promoção de qualidade e conforto ambiental para as cidades, tendo como referencial o ser humano.

No Brasil os primeiros estudos usando modelos empíricos começaram a aparecer em meados dos anos 1990, sendo que boa parte deles baseia-se na abordagem descritiva

(ASSIS, 2006). Duarte *et al* (2007) analisaram espaços abertos com diferentes configurações em São Paulo e concluíram que soluções de adensamento construtivo possivelmente permitiriam maiores períodos em conforto em situações quentes, pela diminuição do fator de visão de céu e conseqüente sombreamento da área, e que a utilização de áreas verdes densas apresenta resultados ainda mais significativos, pelo impacto do sombreamento e da evapotranspiração na sensação de conforto térmico.

Vilela (2007) analisou os impactos gerados pela intensa verticalização no comportamento térmico na região do bairro Belvedere III, em Belo Horizonte, MG. Os resultados apontaram para uma tendência de mudanças significativas nas variáveis climáticas nos locais onde o adensamento e a verticalização são mais vigorosos, porém, observou-se que a manutenção da permeabilidade aos ventos poderia mitigar esta tendência.

Na literatura internacional houve um certo investimento nos modelos empíricos até os anos 80, quando o uso de modelo de balanço de energia mostrou-se uma abordagem mais adequada. As abordagens baseadas na modelagem numérica ou física mostram-se mais adequadas para o desenvolvimento de estudos exploratórios devido ao potencial para antecipar impactos da ocupação do solo.

Ali Toudert (2005) ao abordar a modelagem numérica do microclima urbano explica que os modelos variam substancialmente de acordo com sua base física e sua definição temporal e espacial. Em microescala, os modelos de fluxo tridimensionais do vento (3D) são os mais bem fundamentados, enquanto aqueles incluindo todos os processos hidrológico, térmico e de energia, por serem muito complexos, são muito demorados de executar. Tais modelos são muitas vezes simplificados, assumindo várias parametrizações e limitações, a fim de economizar tempo e resolver problemas ligados a variáveis difíceis de determinar. Normalmente, esses modelos utilizam sistemas de turbulência simplificados. Os modelos de canyon urbano são exemplos típicos: 2D, em vez de 3D eles se concentram sobre o prognóstico dos fluxos de energia e assumem configurações predefinidas de rua, com edifícios de forma e altura uniformes, superfícies secas, sem vegetação (sem calor latente) e nenhum armazenamento de calor na estrutura do edifício. Alternativamente, os modelos que combinam modelagem de

fluxo 3D e modelagem de energia em 2D são mais rápidos e precisos. Além disso, muitos destes modelos tratam o volume do canyon como um todo, ou seja, todos os cálculos são feitos para um ponto no nível da rua, e as diferenças espaciais dentro de um canyon não são consideradas.

Ali Toudert (2005) destaca dentre os modelos numéricos o ENVI-Met©, que é um modelo microclimático tridimensional projetado para simular as interações entre a superfície urbanizada e a atmosfera. A principal vantagem do ENVI-Met© é que é um dos primeiros modelos que procura reproduzir os principais processos na atmosfera que afetam o microclima em uma bem fundamentada base física (ou seja, as leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e termodinâmica), para aplicação em área urbana.

Santos *et al* (2004) fazem a aplicação do ENVI-Met© para verificar o efeito da vegetação sob três situações distintas: as observadas no dia de estudo e as situações hipotéticas de ausência de vegetação e de presença de vegetação densa. Suas simulações permitiram observar que a vegetação, em particular a existente junto a vias de tráfego, influencia na qualidade do ar, contribuindo no aumento da velocidade do vento nas faixas de circulação, conduzindo a um aumento da dispersão de monóxido de carbono (CO). O modelo numérico ENVI-Met© foi aplicado na estimativa dos campos de vento e de concentração de CO com origem nas emissões do tráfego de automóvel.

Ali Toudert (2005) realizou um estudo sobre o microclima das ruas e o conforto para os pedestres. A autora usou o modelo ENVI-Met© para um dia típico de verão na cidade de Ghardaia na Algeria que possui um clima quente e seco. A autora encontrou um contraste térmico entre as ruas ladeadas com altas e baixas construções e segundo diferentes orientações. Observou também que as maiores diferenças de temperatura estão relacionadas à forma e direção da rua, indicando ser necessário um melhor planejamento do parcelamento do solo na construção de cidades.

Johansson (2006) estudou as cidades de Fez no Marrocos e Colombo no Sri Lanka, ambas situadas em áreas de grande desconforto climático (climas quente, seco e úmido respectivamente) e com problemas provocados pelo rápido crescimento da população e expansão urbana acelerada. A metodologia incluiu a combinação de medidas de

variáveis climáticas nas cidades, simulação numérica através do ENVI-Met© e estudos sobre o processo de planejamento urbano adotado. O autor verificou que, em climas quentes e secos, um desenho urbano com canyons profundos e compactos é desejável, pois promovem o conforto térmico através das sombras, que reduzem a radiação solar incidente sobre as superfícies. Todavia, para as estações frias é desejável incluir ruas largas e espaços abertos para possibilitar o acesso do sol.

Emmanuel *et al* (2007) realizaram um estudo de microclima urbano em Colombo, Sri Lanka, utilizando o modelo ENVI-Met© para simular o efeito dos diferentes desenhos urbanos, na temperatura e no conforto térmico. Relacionaram a razão altura (h) e largura (w), ou seja, a altura dividida pela largura, dos canyons urbanos com valores de temperatura. Observaram que a temperatura máxima diária diminui com o aumento da razão h/w. Os autores chamam a atenção para o fato de que em cidades tropicais, um grande problema é o aquecimento durante o dia, dificultando a realização de atividades em espaços urbanos abertos e sugerem a valorização da sombra como uma estratégia de projeto importante para melhoria do conforto térmico ao ar livre.

2.4 O MODELO NUMÉRICO DE SIMULAÇÃO - ENVI-MET VERSÃO 3.1

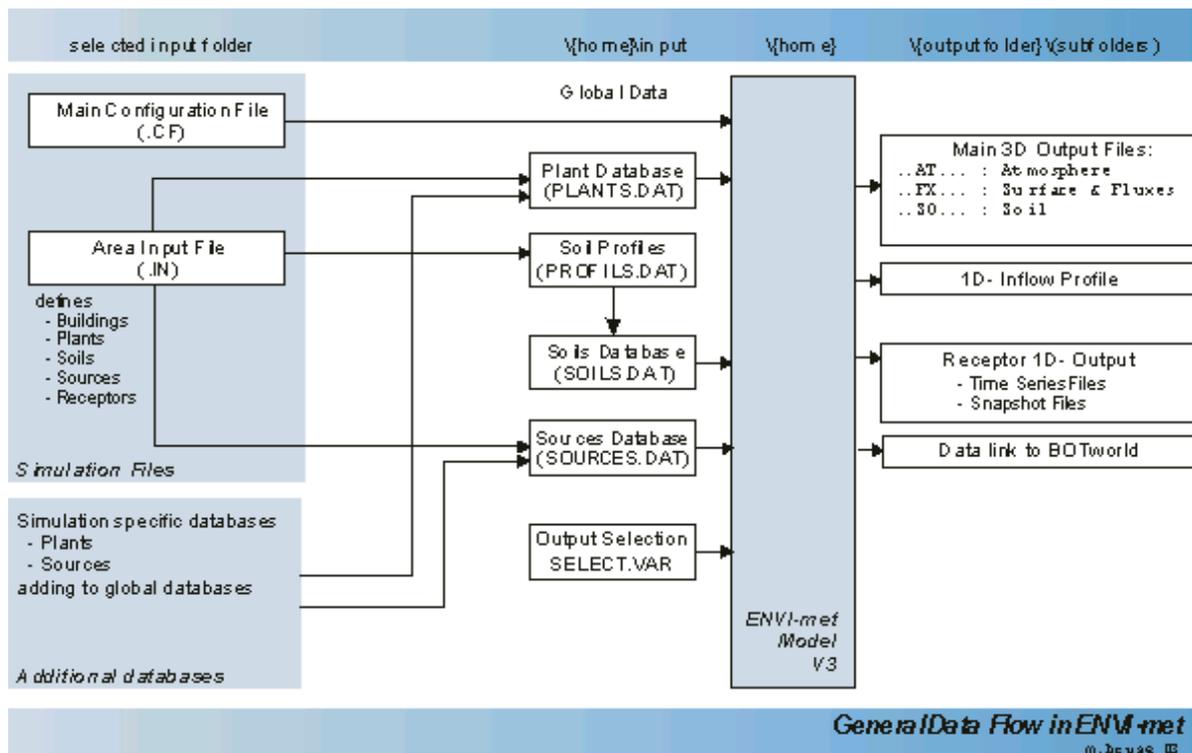
O ENVI-Met© é um *freeware* desenvolvido por Michael Bruse e equipe, do Instituto de Geografia da Universidade de Mainz – na Alemanha e configura-se como um modelo tridimensional de clima urbano, que simula a interação superfície - planta - atmosfera no ambiente urbano (FIGURA 4).

O modelo é projetado para a escala micro, com uma resolução típica horizontal 0,5 a 10 m e um período de tempo típico de 24 a 48 horas, com um intervalo de tempo de 10 segundos no máximo. Segundo Bruse (2011), ele é capaz de lidar com os aspectos de fluxo de ar em torno de edifícios, turbulência e dispersão de partículas.

Esse modelo numérico possibilita gerar resultados para diversos parâmetros tendo por base a configuração da cidade. Dentre as opções há parâmetros climatológicos (temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, radiação solar, etc.), referentes a tipos diferentes de plantas (quantidade de água armazenada nas folhas, temperatura

destas, resistência dos estômatos, etc.), referentes à composição atmosférica (concentração de gases e partículas) e índices de conforto (PMV, etc.). Pode-se escolher aqueles parâmetros para os quais se deseja obter dados.

Figura 4: estrutura detalhada do modelo ENVI-Met



Fonte: www.envi-met.com (acesso: 10/06/2011).

A modelagem é baseada nas leis fundamentais da dinâmica de fluidos e da termodinâmica. O modelo combina o cálculo dos parâmetros da mecânica dos fluidos, como a forma de escoamento e a ocorrência de turbulências, com os processos termodinâmicos que ocorrem nas superfícies dos solos, das construções e das plantas para prever o fluxo de ar entre as edificações.

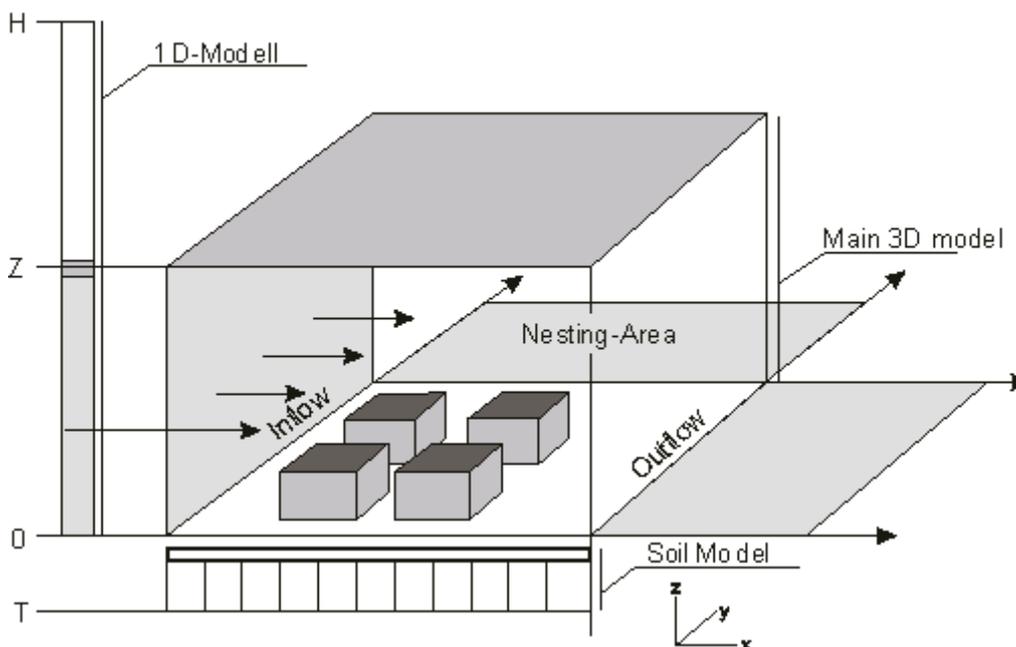
O ENVI-Met© simula a camada limite urbana. Ele consiste em um modelo tridimensional no núcleo ligado a um modelo unidimensional na fronteira (FIGURA 5). A área do núcleo a ser simulada é traçada em módulos de grade, sendo que cada módulo

pode ser tanto uma parte de um edifício, de vegetação, ou de um espaço aberto, como por exemplo, uma rua (ALI TOUDERT,2005).

O modelo de núcleo (modelo 3D) em geral se estende a uma altura de pelo menos o dobro do maior obstáculo. Acima da altura do modelo 3D o ENVI-Met© usa 14 camadas adicionais no modelo 1D para alcançar a altura de 2500 m (profundidade média da camada limite atmosférica a partir do nível do mar). A tarefa do modelo 3D é simular todos os processos dentro da área de estudo.

O modelo de fronteira unidimensional transfere para os limites superiores do volume 3D todos os valores iniciais necessários para a simulação da área “real”. Conforme apontado por Ali Toudert (2005), a transição de 1D para regimes de 3D de um meio urbano não homogêneo necessita de um ajuste. Isto é resolvido através da utilização da área de aninhamento.

Figura 5: esquema geral do modelo ENVI-Met



Fonte: www.envi-met.com.

O ENVI-Met© necessita de duas etapas básicas antes de executar a simulação. A primeira é a edição da planta baixa da área urbana. Na tela principal do programa (FIGURA 6), é apresentada a área de inserção dos dados, e, na lateral esquerda ficam os elementos básicos que configuram a área a ser simulada, como a vegetação, tipo de solo e gabarito das edificações. Para a construção do arquivo referente à área a ser estudada, são necessários os seguintes dados:

- projeção em planta e altura dos edifícios, bem como a localização das vias existentes e dos espaçamentos entre as edificações;
- localização e tipo da vegetação existente;
- tipos de solos e de pavimentos (asfalto, concreto etc) e sua distribuição pela área;
- orientação da área com relação ao norte.

Figura 6: área de trabalho para edição de área de entrada no ENVI-Met©



Para cada ponto de grade, uma estrutura de solo pode ser escolhida. Este é composto por três camadas de profundidade (0-20 cm, 20-50 cm e 50-175 cm), podendo-se especificar a temperatura e umidade de cada camada. Vários tipos naturais e artificiais de composição de solo estão disponíveis em um banco de dados. O modelo leva em conta o processo hidrológico que varia de acordo com as propriedades individuais do solo (ALI TOUDERT, 2005).

A vegetação também é tratada como um sistema de várias camadas, com suas próprias trocas radiativas, balanços de energia e temperaturas médias. As plantas estão esquematizadas como uma coluna 1D, com altura e profundidade da raiz. Esta "coluna" consiste de dez nós igualmente distantes acima do solo, bem como na parte da raiz. Para cada camada corresponde uma densidade de área foliar e uma densidade de área de raízes. Este esquema é utilizado para todos os tipos de vegetação. O modelo assume a vegetação como homogênea, o que significa que apenas um tipo de vegetação pode ser considerada na vertical. Já na direção horizontal pode-se utilizar vários tipos de vegetação (ALI TOUDERT, 2005).

A fim de evitar perturbações numéricas, ou seja, efeitos de borda que podem distorcer os dados de saída, o modelo utiliza uma área de pontos de grade de aninhamento em torno do núcleo do modelo para mover o limite do modelo para longe da área de interesse. A área de aninhamento pode ser composta por dois tipos de solos e se estende, pelo menos, pelo dobro dos maiores obstáculos da área 3D do modelo (ALI TOUDERT, 2005).

A segunda etapa antes de executar a simulação consiste em editar o arquivo de configuração, onde são inseridos dados meteorológicos relativos à data e ao horário do início da simulação, temperatura e umidade do solo nas alturas de 0 a 20 cm, de 20 a 50 cm e abaixo de 50 cm, albedo médio de paredes e telhados, fração de nuvens baixas, medias e altas, fator de ajuste solar, etc.

Para a configuração básica, são necessários os seguintes dados:

- velocidade dos ventos (m/s) a 10 m;
- direção dos ventos (0:N..90:E..180:S..270:W..) a 10 m;

- coeficiente de rugosidade da superfície;
- temperatura do ar (K);
- umidade relativa do ar (%) a 2 m.
- umidade específica (g água/Kg de ar) a 2500 m de altitude;

A umidade específica a 2500 m de altitude é um dado de macroescala que gera dados para a escala microclimática local. Portanto, este modelo considera as características dos processos de macro e meso escalas para fornecer dados de microescala, relativos às especificidades do ambiente urbano. Ressalta-se que as forçantes externas são mantidas constantes durante a simulação, o que representa uma limitação do modelo.

A simulação é então processada usando a planta baixa da área de estudo e o arquivo de configuração. Os resultados são gerados para cada ponto de grade da área de estudo em um único arquivo. Podem ser utilizados pontos “receptores”, na construção da área, para os quais são gerados arquivos separados contendo os valores do resultado final para aquele determinado ponto da área de estudo.

Além da limitação já apontada com relação às forçantes externas, Emmanuel *et al* (2007) destacam outras limitações do modelo:

- não considera massa térmica na fachada dos edifícios. Este fato subestima o efeito do fluxo da radiação de onda longa, uma vez que não existe o acúmulo de calor pelas construções;
- a temperatura interna dos edifícios se mantém constante durante todo o período de simulação. Esta limitação do programa afeta diretamente os resultados da temperatura de superfície das fachadas e indiretamente a temperatura média radiante e temperatura do ar;
- os desenhos das áreas urbanas no ENVI-Met© devem seguir o formato da grade ortogonal. Assim o formato das quadras e ruas precisa ser adaptado, sem considerar as curvas e linhas com inclinações diferenciadas. Em função do grau de detalhe, a distorção da área pode ser significativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo está ligado ao Projeto Institucional “Ambiente Térmico Urbano”, que envolve pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP e visa o desenvolvimento de estudos integrados sobre a influência das estruturas urbanas no clima local através do monitoramento de dados climáticos e da comparação entre área construída e área verde, em estudo de caso.

A ideia consiste na utilização de uma mesma metodologia de abordagem do clima urbano em três municípios diferentes: Bauru (SP), Campinas (SP) e Belo Horizonte (MG) para possibilitar a comparação dos resultados obtidos.

Neste capítulo são apresentados a metodologia e procedimentos adotados visando analisar a influência da forma urbana no clima local, através do monitoramento climático e da simulação numérica em modelo computacional microclimático, usando um caso de estudo na cidade de Belo Horizonte, MG.

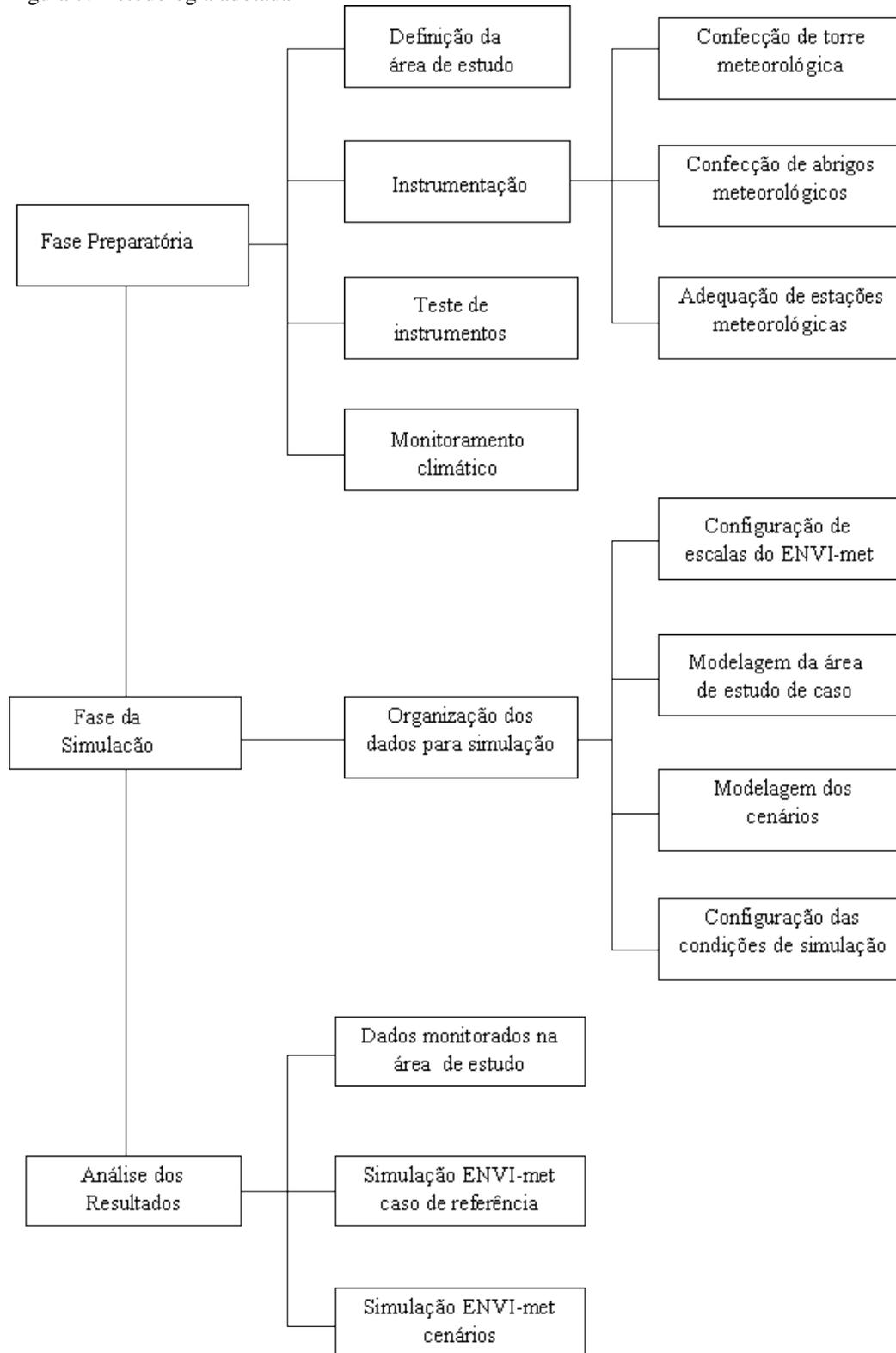
Para o monitoramento de dados climáticos em campo foram selecionados pontos em um parque - o Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado - e em seu entorno urbanizado visando analisar o comportamento das áreas verdes e das áreas construídas. Os dados climáticos monitorados na área de estudo serviram de referência para comparação com as saídas do modelo adotado ENVI-Met©.

A metodologia foi desenvolvida de forma a permitir a simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo e para dois cenários visando explorar as implicações nas variáveis climáticas em função de alterações na forma urbana. Um dos cenários corresponde à verticalização das edificações do recinto urbano de estudo e o outro corresponde à substituição da vegetação de porte arbóreo do parque por um gramado.

A metodologia adotada engloba fases que podem ser divididas em: fase preparatória, que implicou no monitoramento de dados climáticos (utilizados como entrada no ENVI-

Met© e também para comparação com as saídas do programa) e fase da simulação numérica (FIGURA 7).

Figura 7: metodologia adotada



Fonte: elaboração própria, 2011.

3.1 FASE PREPARATÓRIA

Neste item serão apresentados os estudos que compõem a fase preparatória da pesquisa. Serão abordadas a definição e caracterização da área do estudo de caso, a instrumentação utilizada na pesquisa, o teste dos instrumentos e o monitoramento de dados climáticos na área de estudo.

3.1.1 Definição e caracterização da área de estudo

A definição da área do estudo de caso buscou seguir alguns critérios estabelecidos no Projeto Ambiente Térmico Urbano (ATU) para todas as áreas de estudo nos municípios de Bauru, Campinas e Belo Horizonte: a área deveria ser plana, ter residências térreas ou de poucos pavimentos e uma área verde significativa para fins de análise comparativa. O primeiro critério (área plana) deve-se ao fato do ENVI-Met®, versão 3.1, não oferecer a possibilidade de inserção de área com diferenças topográficas em sua extensão. Uma nova versão do programa já possibilita esta inserção, mas é uma versão ainda em fase de desenvolvimento. O segundo critério (predominância de edificações baixas) teve por objetivo uma maior padronização entre as áreas de estudo do Projeto ATU para fins de comparação dos resultados. O terceiro critério (presença de área verde) visa a possibilidade de análise da diferença climática entre uma área arborizada e em pontos sem essa característica, rodeados apenas por edificações e asfalto. Na figura 8 é possível observar aspectos da urbanização da área selecionada para o município de Bauru vinculada ao Projeto ATU.

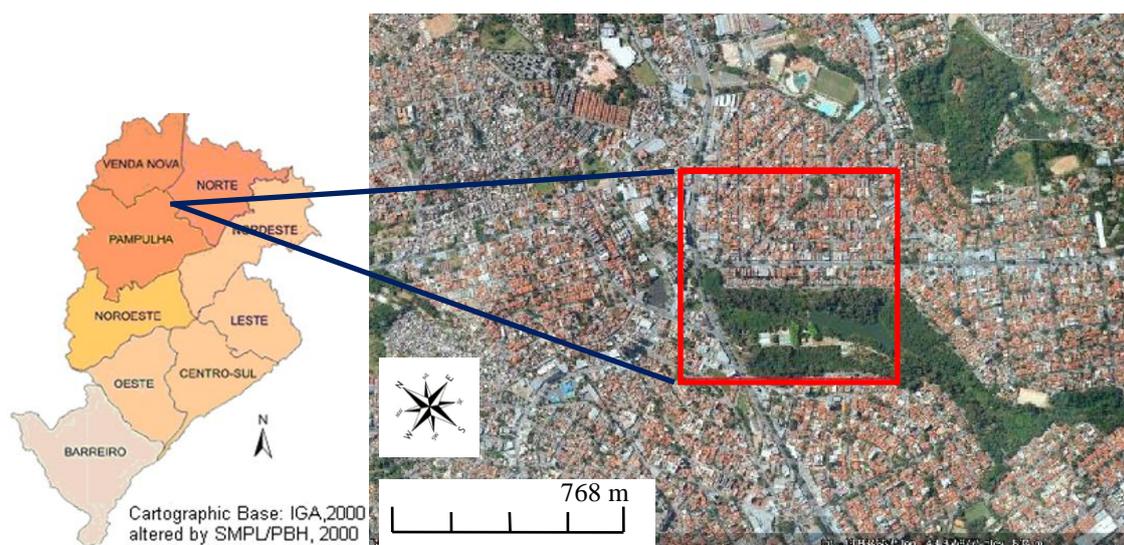
Figura 8: área selecionada no município de Bauru



Fonte: Nakata, 2010.

Neste estudo escolheu-se um recorte urbano na cidade de Belo Horizonte, capital de Minas Gerais, localizada a 19°55' de latitude sul e 43°56' de longitude oeste, a uma altitude média de 875 m. O clima da região é tropical chuvoso, com distinto período seco no inverno e temperatura média do mês mais frio abaixo dos 18°C (Cwa, de acordo com a classificação de Köppen). O vento predominante é de direção leste. Segundo as Normais Climatológicas (INMET, 1992), a temperatura média anual é em torno de 21,1°C, a média anual de precipitação total é de 1.491,3mm, a média anual da umidade relativa é de 72,2%, a insolação total anual é de 2.566,0 horas e a nebulosidade média anual é 5,2, para dados obtidos no período de 1961 a 1990. A área total do município corresponde a 331 km² e a divisão administrativa deste o divide em nove regionais e 148 bairros. O recorte urbano selecionado está situado no bairro Planalto, que se localiza a 13 km do centro de Belo Horizonte (FIGURA 9). Este bairro encontra-se na região norte do município, em zona de adensamento preferencial (ZAP) de acordo com a Lei de Uso e Ocupação do Solo. Belo Horizonte apresenta uma tendência de crescimento na porção norte em função de investimentos públicos do porte da Cidade Administrativa do Estado de Minas Gerais. Paixão e Abramo (2008) apontam a região norte como o novo vetor de expansão da cidade.

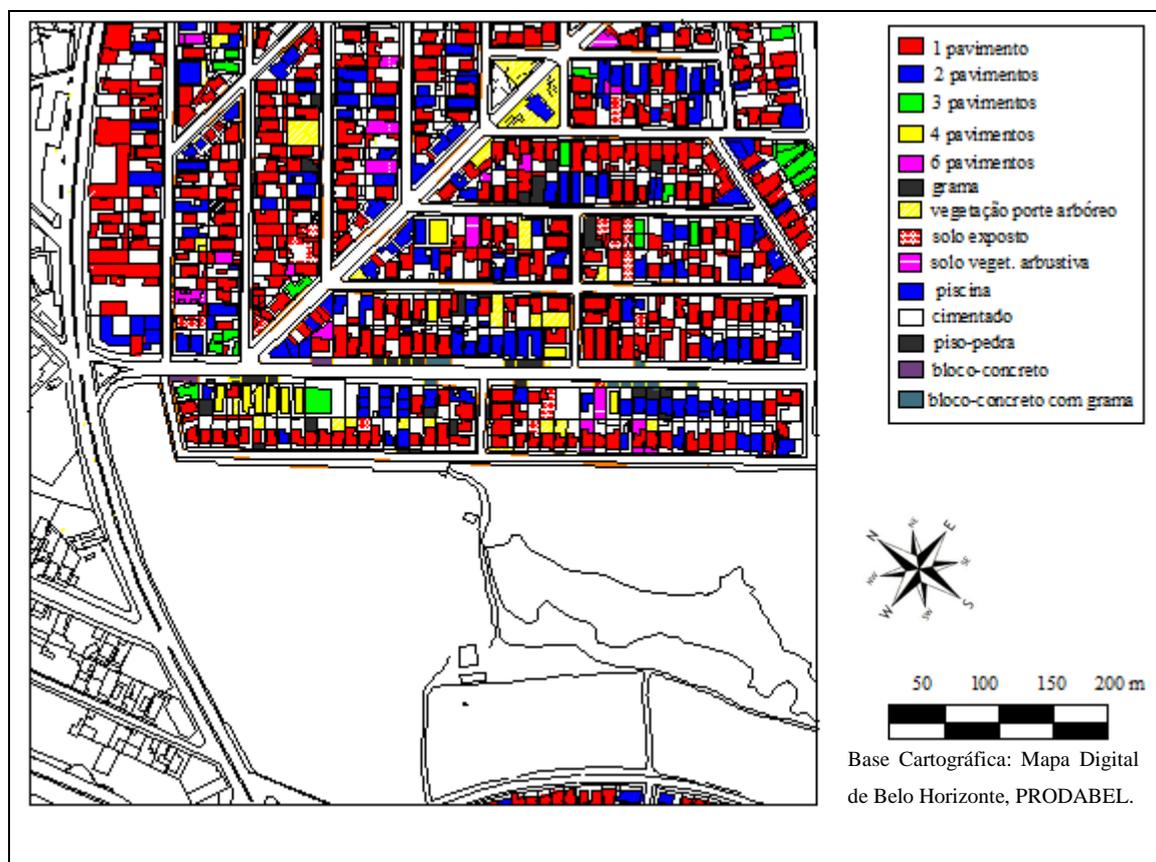
Figura 9: divisão administrativa do município de Belo Horizonte adotada pela Prefeitura Municipal (à esquerda) e localização da área de estudo na regional norte (à direita)



Fonte das imagens: BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. Disponível em: <http://www.pbh.gov.br>. Acesso em: jul. 2011; GOOGLE EARTH, [2011]. Imagem adaptada pela autora para composição da figura, 2011.

O recorte adotado define-se como um fragmento de um bairro residencial que possui uma avenida de comércio (avenida General Olímpio Mourão Filho) onde ocorre a maior circulação de veículos e pedestres. Possui topografia pouco acidentada, uma ocupação mais horizontalizada, com edificações de um e dois pavimentos em sua maioria e uma área verde significativa pertencente ao Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado. O Parque está contido em uma área de 30 hectares entre os bairros Planalto e Itapoã, a uma altitude de 770 metros. A sua vegetação pode ser dividida em três formações básicas: uma área de cerrado, um trecho de mata ciliar circundando uma lagoa de 2,2 hectares e algumas áreas de eucaliptal com sub-bosques. Foi realizado um levantamento do número de pavimentos das edificações, localização da vegetação de porte arbóreo e identificação das superfícies de recobrimento da área de estudo para a modelagem no ENVI-Met©. Este levantamento pode ser visualizado na figura 10. A figura 11 apresenta imagens referentes à área de estudo.

Figura 10: levantamento de informações da área de estudo



Fonte: Produzido pela autora, 2010.

Figura 11: imagens da área de estudo



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2010.

Para melhor obter dados representativos das diferenças térmicas intra-urbanas, principalmente as diferenças entre a área verde representada pelo Parque Lagoa do Nado e o entorno edificado, a montagem experimental objetivou o monitoramento das variáveis temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) na área de estudo de caso. Além dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foram coletados dados de velocidade do vento (m/s) e direção do vento em uma torre meteorológica implantada próxima a área de estudo de caso. Os instrumentos e os procedimentos utilizados para o monitoramento das variáveis climáticas são detalhados nos próximos itens.

3.1.2 Instrumentação

De acordo com Oke (2004) os instrumentos e as unidades de medida utilizados em áreas urbanas são os mesmos de outros ambientes. Os aspectos que são únicos para áreas urbanas e que podem se tornar difíceis de lidar devido à natureza das cidades são a

escolha do local e a exposição dos instrumentos. Para este estudo duas estações meteorológicas automáticas estavam disponíveis – uma da marca Solar, com um sensor de temperatura (precisão de $\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ e na faixa de 5°C a 35°C de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (precisão de $\pm 2\%$) e um sensor de direção e velocidade horizontal do vento e outra da marca ELE International, com um sensor de temperatura (precisão de $0,2^{\circ}\text{C}$ em 20°C) e umidade relativa do ar (precisão de 2%) e um sensor de direção e velocidade horizontal do vento, além de termo-higrômetros data logger da marca ONSET, modelo HOBO U12-012 para registro móvel de dados de temperatura (precisão de $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ de 0 a 50°C) e umidade relativa (precisão de $\pm 2,5\%$ de 10% to 90%) . As duas estações meteorológicas automáticas foram ajustadas para serem implantadas em uma torre meteorológica.

3.1.2.1 Confeção da torre meteorológica e abrigos para os termohigrômetros

Para a instalação dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar, direção e velocidade horizontal do vento das marcas ELE International e Solar foi confeccionada uma torre metálica com as seguintes características: 20 metros de altura para o registro de dados acima e abaixo do “dossel” urbano, autoportante modular- uma vez que na área urbanizada não há espaço suficiente para mastros estaiados, seção transversal triangular, sistema de balizamento diurno - pintura da torre nas cores laranja e branco e balizamento noturno, sistema de pára-raios composto por captor de quatro pontas. Nas figuras 12 e 13 podem ser visualizadas imagens da torre na fábrica e de sua fundação.

Figura 12: torre treliçada autoportante; à direita uma vista da sua base triangular



Fonte: Arquivo pessoal da autora, 2011.

Figura 13: fundação da torre meteorológica



Fonte: Arquivo pessoal da autora, 2011.

Também foram confeccionados abrigos meteorológicos para os termo-higrômetros a fim de protegê-los dos efeitos da radiação solar direta e da radiação proveniente de objetos aquecidos em seu entorno imediato. Os abrigos foram feitos de madeira compensada com placa de isopor situada entre a parede de fixação e a caixa de madeira e perfurada de forma a permitir a ventilação do equipamento interno. Para aumentar a reflexão (albedo) da radiação solar incidente os abrigos foram pintados de branco.

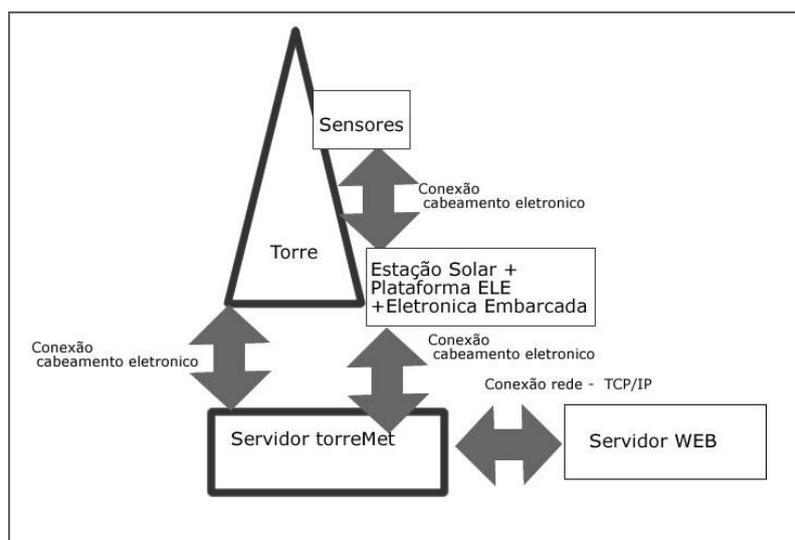
3.1.2.2 Adequação das estações automáticas ELE e Solar para aquisição de dados na torre meteorológica

Devido a necessidade de aquisição de dados meteorológicos em diferentes altitudes, as estações Solar e ELE *International* tiveram que ser adaptadas para funcionar mantendo o mesmo padrão de operação. Foi elaborado um projeto de integração de sistemas, visando dotar o sistema de instrumentação de recursos computacionais para operação automática. Um sistema automático de pequeno porte foi embutido para garantir a operação automática. A sua função é receber os dados dos sensores das estações *ELE* e Solar, e enviar para um servidor. Um servidor local acoplado à torre recebe os dados dos sensores, e os envia para um servidor WEB, cuja função é permitir armazenar esses dados e disponibilizá-los via rede através da Internet. Além disso, ele permite um mínimo de recuperação dos dados, fornecendo curvas da dinâmica dos sensores.

Há um software que cuida da conexão com os sensores da estação *ELE*, similar ao software de configuração da estação *Solar*. Esse software também é responsável pelo envio dos dados para o servidor *WEB*, e fornece um mínimo de visualização do sistema como um todo. Através dele estão disponíveis: níveis de tensão dos circuitos, tempo de operação e desligamento do sistema caso ocorra, valores dos sensores, entre outros.

Uma das funções do sistema de integração de dados é tornar o sistema capaz de ser operado remotamente – via internet, e ter o mínimo de automação para evitar a interferência constante no ambiente de estudo. O sistema de integração de dados pode ser entendido segundo a figura 14. Há 3 elementos que merecem destaque: a torre, o servidor, os sensores das estações.

Figura 14: sistema usado no presente estudo



Fonte: arquivo pessoal do bolsista de iniciação científica Márcio Assunção, Engenharia de Automação, UFMG, 2011.

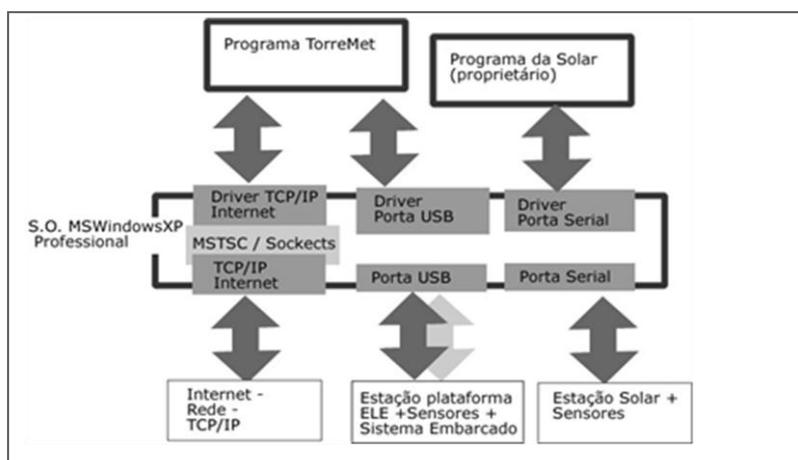
A torre representa o elemento físico. Foi necessário estudar estruturas de circuitos eletrônicos que permitissem fazer com que os sinais de instrumentação chegassem ao servidor sem a perda da qualidade causada por interferências – vibração, efeito térmico e interferência eletromagnética. A principal imposição foi o aumento do comprimento dos cabos para medir nas alturas determinadas, sendo que normalmente estes são menores nas instrumentações meteorológicas disponíveis no mercado. A interferência causada pela estrutura metálica exigiu um estudo para avaliar o grau de interferência

eletromagnética nos sinais, por exemplo; a vibração no topo da torre, e o efeito térmico uma vez que os cabos, mesmo que isolados, poderiam sofrer interferências devido o comprimento dos mesmos – quanto mais extenso um cabo mais ele está susceptível a interferências térmicas e eletromagnéticas.

O servidor é um PC adaptado (sem teclado, mouse e monitor) que permanece ligado 24 horas. Está ligado à estação Solar e aos sensores da Estação *ELE*, e à eletrônica embarcada elaborada para aquisição dos dados meteorológicos.

Algumas alterações foram feitas no sistema operacional *MS Windows XP Professional*, para priorizar a execução do programa *TorreMet* – elaborado no presente estudo. Dessa forma, o PC é transformado em um servidor, pois se dedica a uma tarefa específica, a aplicação *TorreMet*. A figura 15 apresenta o diagrama do servidor *TorreMetSever*.

Figura 15: servidor TorreMet, usado no monitoramento dos sensores e dados coletados



Fonte: arquivo pessoal do bolsista de iniciação científica Márcio Assunção, Engenharia de Automação, UFMG, 2011.

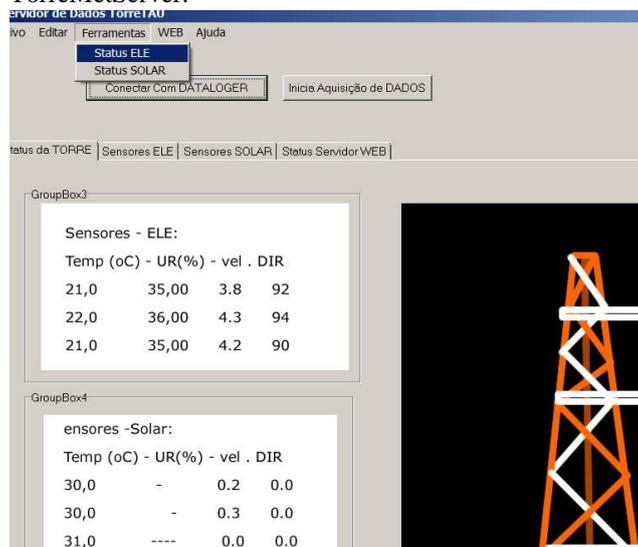
Quanto aos sensores, sua montagem foi feita com cabo par-trançado e blindado por circuitos eletrônicos. Os sensores da Estação Solar foram usados em altitudes maiores, pois apresentam mais robustez e tecnologia na transmissão dos dados suficientes para garantir transmissão com mínimo de ruído. A relação Sinal/Ruído é insignificante. Os sensores da estação ELE International Instrument têm os sinais tratados por circuitos de

instrumentação fornecidos por DataSheets. Eles foram escolhidos para trabalhar na altura de 1,5 m, com medição de temperatura e umidade relativa do ar, e a 10 m estão instalados seus sensores de velocidade e direção do vento.

Outro fator que contou na disposição dos sensores foi o tempo de operação do equipamento e a sua disponibilidade no mercado. A estação *Solar* é de fabricante nacional, e usa tecnologia eletrônica mais recente. A Estação *ELE* e os seus sensores são mais antigos em termos de tecnologia da instrumentação, mesmo tendo os mesmos transdutores nos sensores. Contudo, os sensores da Estação *ELE* são linearizados eletronicamente, e apresentam comportamento dinâmico mais sensível – acomodam para valores de temperatura e umidade relativa do ar em menor tempo.

Foi preciso criar um software de integração de dados, uma vez que cada estação tem a sua forma de enviar os dados. Cada estação tem o seu programa de configuração, mas a estação *ELE* fornece uma interface que permite fazer a configuração via protocolo *terminal remoto*, já a estação *Solar* não possui esse recurso. Assim o sistema de cada plataforma precisa passar por uma equalização para que os dados sejam comparados. Devido ao grande volume de dados, tornou-se necessário colocá-los dentro de uma mesma organização de arquivo. A figura 16 traz uma das telas do programa. Ele se destina a fazer todo o serviço de integração de dados para o servidor.

Figura 16: tela do programa que roda no servidor TorreMetServer.



Fonte: arquivo pessoal do bolsista Márcio Assunção, Engenharia de Automação, UFMG, 2011.

3.1.3 Teste de instrumentos

Os pré-testes de instrumentos e de procedimentos para coleta de dados representam uma etapa fundamental do estudo experimental, tendo em vista que é de suma importância certificar-se de que esses instrumentos e procedimentos estão contribuindo para a obtenção de dados confiáveis.

Desta forma, todos os equipamentos utilizados nos levantamentos de campo foram devidamente aferidos. Nos APÊNDICE A e B descrevem-se os procedimentos utilizados nas aferições, assim como os resultados dos procedimentos de aferição. Tanto as estações automáticas quanto os termo-higrômetros foram aferidos contra a estação-padrão do Instituto Nacional de Meteorologia conforme indicado na literatura consultada.

3.1.4 Monitoramento de dados climáticos

Segundo Oke (2004), as recomendações da World Meteorological Organization (WMO) com relação à exposição e montagem dos instrumentos devem ser observadas também nas estações urbanas. No entanto, chama a atenção para a necessidade de flexibilização, para assegurar observações significativas em áreas urbanas devido as suas especificidades. Com relação ao vento, por exemplo, o autor aponta ser impossível encontrar locais na área urbana que atendam a condição para instalação do anemômetro de dez vezes a altura da obstrução. O autor ainda explica que se tal local existisse não seria representativo da zona urbana.

Oke (2004) aponta que primeiro é necessário estabelecer claramente o propósito da estação, ou seja, se o objetivo é monitorar o maior impacto da cidade ou se é para caracterizar um determinado local. Desta forma, é de grande importância a avaliação das escalas do clima urbano (micro, local, meso-escala) para adequação dos métodos de medição.

Segundo Oke (2004), para o monitoramento na escala local existem duas abordagens viáveis:

- localizar os sensores na UCL em um local cercado por condições típicas de terreno urbano e colocar os sensores em patamares semelhantes aos utilizados em locais não urbanos ou;
- montar os sensores em uma torre na altura acima da sub-camada de rugosidade e obter valores combinados que podem ser extrapolados para baixo na UCL.

Segundo o autor, a primeira abordagem funciona melhor para a temperatura e a umidade do ar e a segunda abordagem para a velocidade e direção do vento e precipitação. Para a radiação solar a exigência é apenas um horizonte desimpedido.

Conforme estabelecido pela WMO as observações da temperatura do ar devem ser representativas das condições de ar livre ao redor da estação sobre o máximo de área possível, a uma altura de entre 1,2 e 2,0 m acima do nível do solo. Com relação à umidade relativa do ar, os requisitos gerais para a exposição dos sensores são semelhantes aos de sensores de temperatura. Requisitos específicos incluem: proteção contra radiação solar direta, contaminantes atmosféricos, chuva e vento; evitar a criação de um microclima local dentro da estrutura da caixa do sensor ou dispositivo de amostragem.

Segundo Assis (2010) não existe um número específico de pontos amostrais para coleta das informações sobre o clima urbano. Este levantamento depende das características e do porte da cidade, bem como do número de equipamentos e do corpo técnico capacitado à realização dos trabalhos de campo.

Neste estudo foram selecionados 6 pontos para monitoramento de dados climáticos, sendo 5 deles na área de estudo no bairro Planalto (2 no Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado e 3 na área urbana) e 1 em uma área próxima a esta área de estudo, no bairro São João Batista para implantação de uma torre meteorológica. Ressalta-se que foram realizadas tentativas para implantação da torre meteorológica no recorte de estudo - a implantação chegou inclusive a ser iniciada, mas houve impedimento da utilização do terreno. Desta forma, optou-se por um local acessível e seguro, próximo ao

recorte de estudo e com características semelhantes de ocupação urbana. A figura 17 mostra a distribuição espacial dos pontos selecionados. No recorte de estudo - área urbana e Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado foram dispostos termo- higrômetros data logger registrando dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) a 1,5 metros do solo – na UCL (pontos P1, P2, P3, P4 e P5), portanto, de acordo com as recomendações de Oke para levantamento de dados de temperatura e umidade à escala local.

Figura 17: distribuição dos pontos de monitoramento



Fonte: GOOGLE EARTH, [2011]. Imagem adaptada pela autora para composição da figura.

No Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado os 2 pontos escolhidos para medição de temperatura e umidade relativa do ar representam diferentes situações em termos de revestimento superficial: uma área de mata recoberta com vegetação de porte arbóreo (ponto P1) e uma área mais impermeabilizada onde se encontram quadras de esportes e edificações de suporte do parque (ponto P2). Os três pontos selecionados para medição de temperatura e umidade relativa do ar no entorno do parque (pontos P3, P4 e P5) são representativos ou “típicos” da área urbana. Buscou-se distribuir os termo-higrômetros

nas bordas da área de estudo e em um ponto próximo ao parque. A figura 18 apresenta imagens dos pontos selecionados para implantação dos termo-higrômetros.

Figura 18: locais selecionados para implantação dos termo-higrômetros



Ponto P1



Ponto P2



Ponto P3



Ponto P4



Ponto P5

Fonte: arquivo pessoal da autora, 2011.

Com relação à torre meteorológica (ponto P6 da FIGURA 17), a montagem foi realizada visando obter medidas acima e abaixo da camada de dossel urbano (UCL) tendo em vista que o ENVI-Met© calcula os perfis verticais das variáveis na área 3D. Deste modo há possibilidade de avaliar se as condições de simulação estão coerentes com os dados medidos e com a física da atmosfera. Para a determinação das alturas de medição dos dados meteorológicos na torre, a partir das recomendações de Oke (2004), adotou-se a altura média das edificações do entorno da torre correspondente a 9 metros de altura (3 pavimentos). Sendo assim, foram dispostos sensores de temperatura e umidade relativa do ar da marca *ELE International* a 1,5 metro do solo (na UCL) e da marca Solar a 11,5 metros do solo (acima da UCL). Os sensores de direção e velocidade do vento da *ELE International* foram dispostos a 10 metros do solo (acima da UCL) e o sensor de vento da Solar foi implantado a 20 metros do solo (acima da UCL). Recomenda-se a instalação dos sensores meteorológicos em braços telescópicos, para não sofrer influência de outras estruturas, inclusive da torre. Os braços podem ser puxados para realização da manutenção e limpeza dos instrumentos e depois recolocados no lugar. A figura 19 mostra suportes instalados para esta finalidade.

Figura 19: braços telescópicos para instalação de sensores

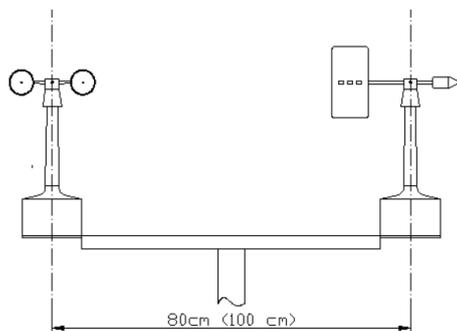


Fonte: arquivo pessoal do professor Humberto Rocha, IAG USP, 2011.

Sendo assim, foram fabricados 4 suportes para fixação dos sensores da torre meteorológica, possibilitando que estes em vez de ficarem presos à estrutura da torre, ficassem presos a estes suportes a uma distância de 1 metro da torre, evitando

interferências da sua estrutura nas medições das variáveis meteorológicas. Com relação aos sensores de direção e velocidade do vento a recomendação é para que o distanciamento entre eles seja de 80 a 100 cm (FIGURA 20).

Figura 20: distanciamento entre os sensores de vento

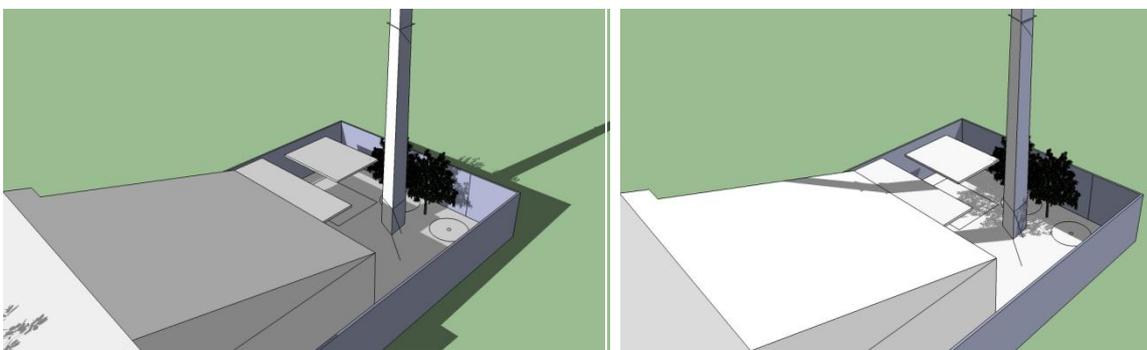


Fonte: 5º DISME/INMET, 2011.

O programa SketchUp© foi utilizado para a confecção de um modelo digital 3D do terreno destinado à implantação da torre meteorológica, visando simular a trajetória aparente solar e visualizar a incidência de sombras durante o ano (os solstícios de verão - 22 de dezembro - e de inverno - 21 de junho – estão representados nas figuras 21 e 22. Observou-se a incidência de sombras no local destinado à instalação dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar à altura de 1,5 metros do solo, mas isto não foi considerado um problema pelo fato da intenção ser justamente a de analisar a interferência da ocupação urbana nas variáveis climáticas.

Figura 21- simulação para 21 de junho- 9 am

Figura 22- simulação para 22 de dezembro-3 pm



A figura 23 mostra imagens da implantação da torre meteorológica. Após montados e dispostos os equipamentos no local, estes foram programados para registrar os valores instantâneos das variáveis microclimáticas de segundo em segundo. No caso dos termohigrômetros estes foram programados para registrar de 15 em 15 minutos.

Figura 23: torre Meteorológica implantada no bairro São João Batista



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2011.

3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

De acordo com Groat e Wang (2002) a pesquisa através de simulação é caracterizada pela geração de dados que podem ser aplicados de volta ao contexto do mundo real em

seu benefício. Segundo os autores a simulação ocorre quando uma réplica de um contexto do mundo real contém dentro de si interações dinâmicas que são reflexo de interações que ocorrem realmente no mundo real, e um projeto de pesquisa de simulação é aquele que é capaz de coletar dados sobre estas interações para aplicação no contexto do mundo real.

As pesquisas de simulação computacional podem fornecer vários tipos de informações sobre condições futuras, sendo assim, podem constituir-se em um importante instrumento para o processo de planejamento, gestão, políticas públicas e intervenções urbanas.

Conforme apontado por Wardoyo et al (2011), numerosos programas de simulação foram desenvolvidos para conduzir pesquisas sobre a relação entre arquitetura ou forma urbana e microclima, sendo que a base de cálculo desses modelos varia de cálculo empírico até o cálculo numérico e /ou matemático.

As vantagens principais de utilização do modelo ENVI-Met© neste estudo são sua acessibilidade, facilidade de uso e abordagem fenomenológica da dinâmica climática dentro de um ciclo diário em complexas estruturas urbanas, superando o problema da aplicação de modelos empíricos simples derivados da descrição de situações muito específicas ou locais, como já foi anteriormente comentado.

Os experimentos de simulação realizados para a área de estudo de caso selecionada tiveram o objetivo de analisar a influência da forma urbana no clima local (principalmente as diferenças entre a área verde e o entorno edificado) por meio das respostas do ENVI- Met©. Dessa forma, a área de estudo de caso foi modelada no ENVI-Met© e os dados climáticos monitorados em campo (no interior do Parque Lagoa do Nado e no seu entorno edificado) foram comparados com as saídas do modelo. Além da simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo foram realizados dois cenários visando explorar as implicações nas variáveis climáticas em função de alterações na área de estudo de caso. Sendo assim, foram realizados os seguintes experimentos:

- CASO 1: caso de referência, área como está hoje.
- CASO 2: verticalização das edificações da área de estudo com base na Lei de Uso e Ocupação do Solo mantendo a área verde e a arborização existente, visando analisar a influência da verticalização nas variáveis climáticas.
- CASO 3: substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por um gramado visando analisar a influencia desta alteração no entorno edificado e no interior do parque.

3.2.1 Organização dos dados para simulação

As etapas que antecedem as simulações computacionais envolvem a configuração de escalas do ENVI-Met©, a modelagem da área de estudo, do cenário de verticalização e do cenário de substituição da vegetação de porte arbóreo do parque por grama e a configuração das condições da simulação (incluindo os dados meteorológicos coletados em campo) abordados a seguir.

3.2.1.1 Configuração de escalas do ENVI-Met©

No ENVI-Met© a discretização da atmosfera é feita através de uma malha estruturada, escolhida a priori, sobre a qual são dispostas as edificações, os materiais do solo e a vegetação. As células são cúbicas, com dimensões determinadas pelo usuário (BRANDÃO, 2009)

O ENVI-Met© simula em diferentes escalas e versões de grade. Deve-se escolher a versão a ser utilizada para cada trabalho específico, dependendo do tamanho da área estudada. Para a escolha da resolução da grade deve-se considerar o tamanho da área de estudo e a altura das edificações.

As mudanças de escalas implicam em maior ou menor resolução do desenho e, além disso, influenciam no número de pontos de grade a ser utilizado quando se tem o perímetro de área já determinado. Não é recomendado utilizar resolução de grade muito grande visto que simplifica por demasiado os detalhes do meio urbano.

O ENVI-Met©, versão 3.1 possibilita simulações em três diferentes versões de grade: 100x100x30, 180x180x30 e 250x250x30, valores esses que correspondem a largura x comprimento x altura do modelo, em pontos de grade. Quanto maior a versão, maior é a capacidade em grades, entretanto, maior também é o tempo de simulação gasto, em função do incremento do número de dados.

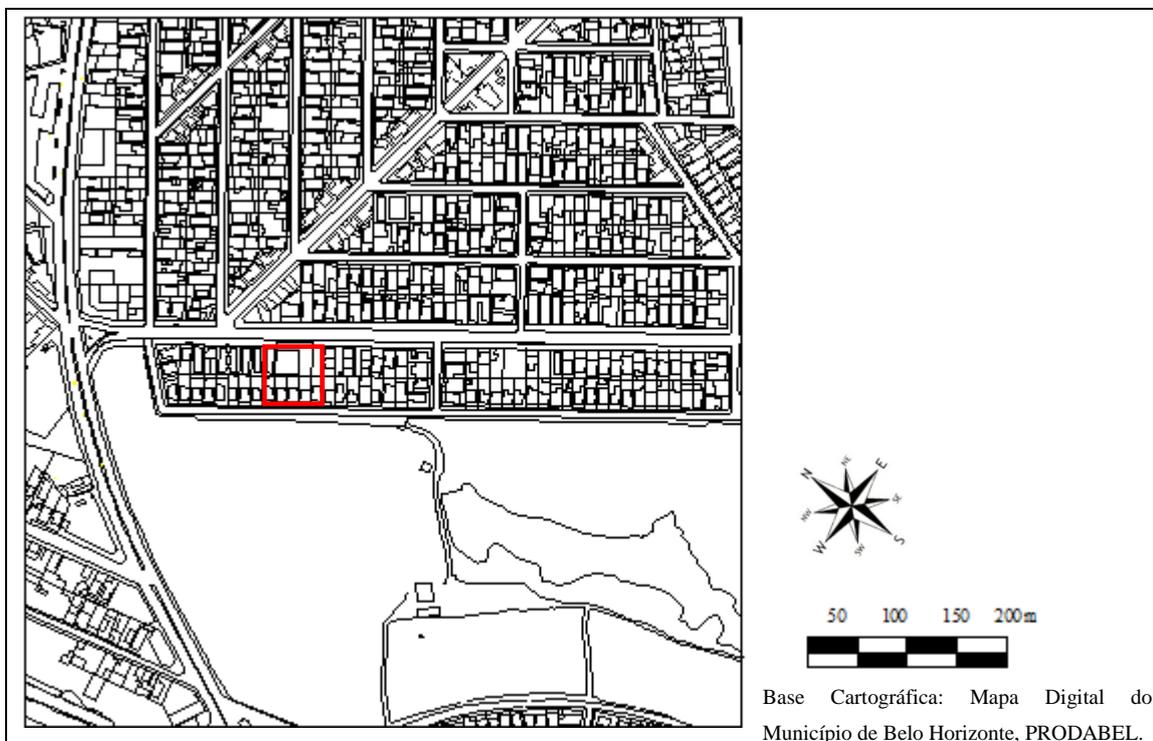
A dimensão vertical das células merece consideração especial. Recomenda-se que a altura do modelo seja sempre superior a 2 vezes a altura do maior edifício, o que provavelmente se deve à utilização de um modelo unidimensional como condição limite do topo da atmosfera. Baseando-se nas recomendações de Oke (2004) pode-se inferir que esta é uma distância razoável para que as condições da camada abaixo do nível das coberturas se misturem, produzindo valores médios representativos da área como um todo, que possam interagir com o modelo unidimensional (BRANDÃO, 2009).

Neste estudo, após serem realizados testes selecionando grades de 2x2 e 3x3 metros para uma área de 500 x 500 metros, observou-se que com a utilização da grade de 2x2 ocorreriam menos distorções na área de estudo. Para que fosse possível trabalhar uma área de 720 x 720 m que abrangesse uma porção maior do Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado e da área urbana realizou-se outro teste utilizando grade de 4 x 4 (4m de largura por 4m de comprimento) onde verificou-se que também ocorreriam poucas distorções. Desta forma optou-se por trabalhar uma área de 720 x 720 metros, na versão 180 x 180 x 30 pontos de grade do modelo, utilizando uma grade de 4 x 4 m. A figura 24 ilustra o recorte de 720 x 720 metros adotado para a área de estudo de caso.

As simulações mais simples do ENVI-Met© para uma área deste tamanho duram entre 24 e 72 horas, as mais complexas chegam a durar uma semana. Além disso, o programa não permite a retomada do processo em caso de interrupção. Deste modo, devido ao tempo de simulação exigido para a área de 720 x 720 metros na versão 250x250x30, optou-se por realizar as primeiras simulações para validação do modelo utilizando um recorte da área total com a dimensão de 60 x 60 metros, na versão 100x100x30, grade de 3x3 m. Este recorte abrange o ponto para levantamento de dados climáticos “P3” indicado na figura 17. Este ponto foi selecionado para validação do modelo pelo fato de

ser o ponto que recebe maior influência da ocupação urbana do recorte de estudo, levando em consideração a direção preferencial do vento - quadrante leste.

Figura 24: área de estudo de 720 x 720 metros (destaque vermelho: área teste de 60 x 60 m)



Fonte: arquivo pessoal da autora, 2011.

3.2.1.2 Modelagem da área de estudo e dos cenários

A área de estudo de caso deve ser desenhada no próprio ENVI-Met©. Na edição de área configuram-se primeiramente alguns parâmetros (FIGURA 25) como:

- Número de pontos de grade do modelo nos eixos 'x', 'y' e 'z';
- Número de pontos de grade de aninhamento (*nesting grids*);
- Tamanho da célula da grade em metros;
- Método de geração de grade vertical (equidistante e telescópico);
- Rotação do modelo em relação ao norte;
- Localização (cidade, país, latitude e longitude);
- Referência do fuso horário.

Figura 25: janela de configuração de parâmetros básicos na edição de área do ENVI-Met

Change or create model Domain

Number of grids and nesting properties

Main model area:
 x-Grids: 180 y-Grids: 180 z-Grids: 16

Nesting grids around main area:
 Nr of nesting grids: 10
 Soil profil ID for nesting grids:
 Soil A: sd
 Soil B: p

Grid size and structure in main area

Size of grid cell in meter:
 dx= 4.00 dy= 4.00 dz= 3.00 (base height)

Method of vertical grid generation:
 equidistant (all dz are equal except lowest grid box)
 telescoping (dz increases with height)
 Telescoping factor (%): 0
 Start telescoping after height (m): 0.00

Geographic Properties

Model rotation out of grid north: 45.00

Location on earth

Name of location: Belo Horizonte/Brazil +
 Position on earth: Latitude (deg. +N, -S): -19.83
 Longitude (deg. -W, +E): -43.95

Reference time zone:
 Name: CET/GMT-3
 Reference longitude: -45.00

Georeference

Co-ordiante of lower right grid x-value: 0.00
 y-value: 0.00

Reference system: <plane>

Model area description: A brave new area

Buttons: Create new area, Apply changes, Cancel

Após essa configuração, realiza-se a representação da área de estudo. A grade é representada somente em planta e para cada célula horizontal é informado o tipo de cobertura: pavimentação, vegetação e edifícios.

Os edifícios são representados de forma simplificada. Todos eles são compostos do mesmo material e apresentam o mesmo albedo, um valor médio para a área de estudo (área 3D do modelo). Conforme apresentado por Brandão (2009) a temperatura interna é constante e a troca por condução desconsidera o acúmulo de calor na estrutura do edifício. A modelagem, no entanto é eficiente quando trata das trocas radiativas no *canyon* urbano, calculando as interreflexões da radiação de onda curta e as trocas de onda longa por aquecimento das superfícies.

Neste estudo, para facilitar o trabalho de desenhar a área de estudo de caso no ENVI-Met®, o arquivo de AutoCAD® da área foi convertido para *bitmap* e esta figura foi inserida no ENVI-Met® para servir de fundo para o desenho no editor do programa. Assim, desenhou-se por cima da figura que foi inserida. O desenho da área foi rotacionado para que as edificações encaixassem da melhor forma possível na grade, alinhando-se a direção de suas linhas e posteriormente rotacionou-se o norte. Nos pontos da área de estudo de caso em que foi realizado monitoramento de dados climáticos foram inseridos os “receptores” com o objetivo de comparar os dados medidos em campo com os dados de resposta do modelo.

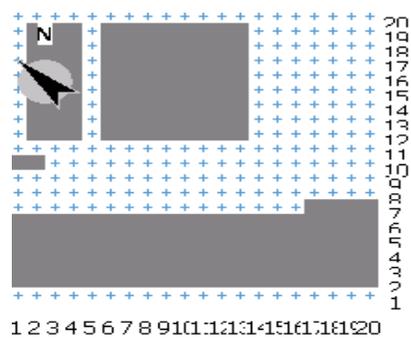
As formas de representação das áreas de 720 x 720 metros e de 60 x 60 metros (ponto academia), indicando as edificações e área verde, encontram-se nas figuras 26 e 27.

Figura 26: visualização da edição da área de 720 X 720 m no ENVI-Met



Fonte: Produzido pela autora, 2011.

Figura 27- Visualização da edição da área de 60 X 60 m no ENVI-Met.



Fonte: produzido pela da autora, 2011.

Analisados os parâmetros urbanísticos para o bairro Planalto (coeficiente de aproveitamento igual a 1,7; taxa de permeabilização de 20%) foi estabelecido o cenário hipotético baseado na possibilidade de verticalização das edificações da área de 720 x 720 metros permitida pela Lei de Uso e Ocupação do Solo, mantendo a área verde e a arborização existente (FIGURA 28). Na primeira simulação utilizou-se a altura real dos edifícios que possuem em sua maioria 3 m, e na segunda a altura média utilizada foi de 18 m (correspondente a edifícios de 6 andares).

Figura 28: visualização da edição da área do cenário de verticalização



Fonte: produzido pela autora, 2011.

A figura 29 apresenta o cenário de substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por grama. Quanto aos dados de configuração de entrada, todos os parâmetros foram mantidos iguais para as simulações.

Figura 29: visualização da edição da área do cenário de substituição da vegetação de porte arbóreo do parque por grama



Fonte: produzido pela autora, 2011.

3.2.1.3 Condições iniciais das simulações

O ENVI-Met© necessita de alguns dados para simular as condições térmicas de determinada área. Os arquivos de configuração contêm as informações para as condições climáticas de inicialização e de contorno do modelo. As condições de simulação básicas exigidas usadas para os estudos de casos relatados neste trabalho estão listados na figura 30.

Figura 30: condições de simulação básicas (input) usadas para os estudos de caso

```

Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):      =12.08.2011
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):      =21:00:00
Total Simulation Time in Hours:           =25.00
Save Model State each ? min               =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]      =2.5
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =90
Roughness Length z0 at Reference Point    =0.01
Initial Temperature Atmosphere [K]        =294.23
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7.00
Relative Humidity in 2m [%]               =42.72

```

O dia e a hora da simulação são definidos de acordo com a estação do ano que se deseja simular. Neste estudo o horário de 21:00 horas foi escolhido para início das simulações. Buscou-se sempre iniciar as simulações no período noturno, minimizando a possibilidade de erros de convergência devido à existência de radiação de onda curta nas primeiras horas da simulação. Além disso, os dados de sondagem atmosférica que incluem a umidade específica são coletados apenas às 12 e 21 horas (hora local).

Para identificar os melhores dias para simulações com o ENVI-Met© no período de inverno (dias estáveis) realizou-se uma análise dos dados de nebulosidade referentes ao ano de 2011 da estação-padrão do 5° Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5° DISME/INMET) localizada no bairro Santo Agostinho em Belo Horizonte. À partir desta análise foram selecionados os dias 12 a 14-08-11 (das 21:00 horas do dia 12 às 21:00 horas do dia 14) e os dias 16 a 19-08-11 (das 21:00 horas do dia 16 às 21:00 horas do dia 19) tendo em vista que nestes dias (para todos os horários UTC) o registro de nebulosidade foi igual a zero. Ressalta-se que nesses dias a torre meteorológica e os termo-higrômetros implantados na área de estudo de caso já estavam registrando os dados meteorológicos.

Os valores de temperatura do ar (K), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s) e direção do vento utilizados para a simulação foram os obtidos na torre meteorológica implantada próxima a área de estudo de caso (ponto P6 indicado na FIGURA 17). Os dados utilizados foram os de direção e velocidade do vento registrados a 20 metros de altura e os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar registrados a 11,5 metros, acima da camada de “dossel” urbano. Dessa forma, dos dados registrados pela torre, foram selecionados os dias 12 a 14-08-11 e 16 a 19-08-11 e calculadas as médias horárias. As médias dos valores registrados de temperatura e umidade relativa do ar para o horário de 21:00 horas foram os valores utilizados como

entrada para a simulação. Os gráficos 1 e 2 mostram os dados de temperatura e umidade relativa registrados pela estação Solar na torre meteorológica com destaque para os dias selecionados para a simulação. O valor da velocidade do vento para entrada da simulação corresponde a uma média dos valores registrados nos dias 12 a 14-08-11 e 16 a 19-08-11. Observou-se durante as simulações de teste que velocidades de vento abaixo de 0,8 m/s causam instabilidade no modelo. O valor da direção do vento utilizado como entrada corresponde a direção mais frequente (moda) entre os dias 12 a 14-08-11 e 16 a 19-08-11. Conforme apontado por Brandão (2009) a temperatura do ar e a umidade relativa servem como situação de inicialização do modelo, enquanto os demais parâmetros se mantêm constantes durante toda a simulação.

Observa-se que o ideal seria que houvessem dados destes dias (e horários) para vários anos e desta forma seriam calculadas médias dos valores para entrada na simulação à partir de uma série maior e portanto mais representativa. Entretanto, a torre meteorológica implantada somente começou a registrar dados no mês de julho de 2011, desta forma só haviam disponíveis dados da estação de inverno de um ano.

Gráfico 1: dados de temperatura registrados pela estação solar na torre (a 11,5 metros) no mês de agosto de 2011 com destaque para os dias selecionados para a simulação (retângulo de linha vermelha)

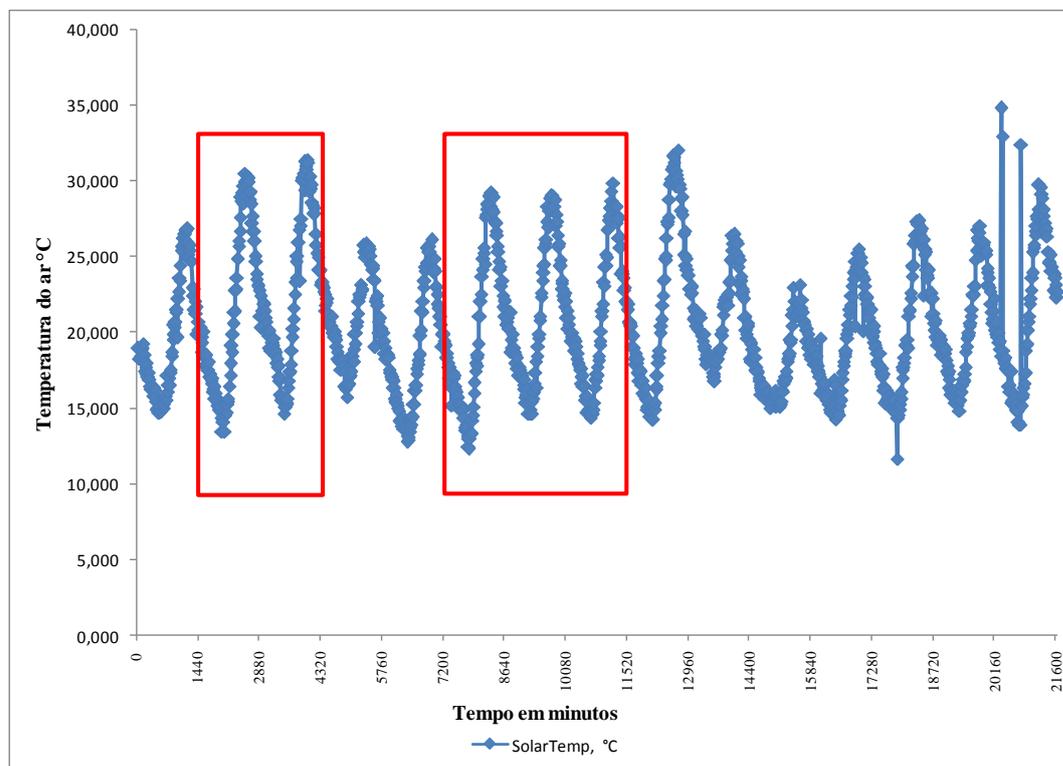
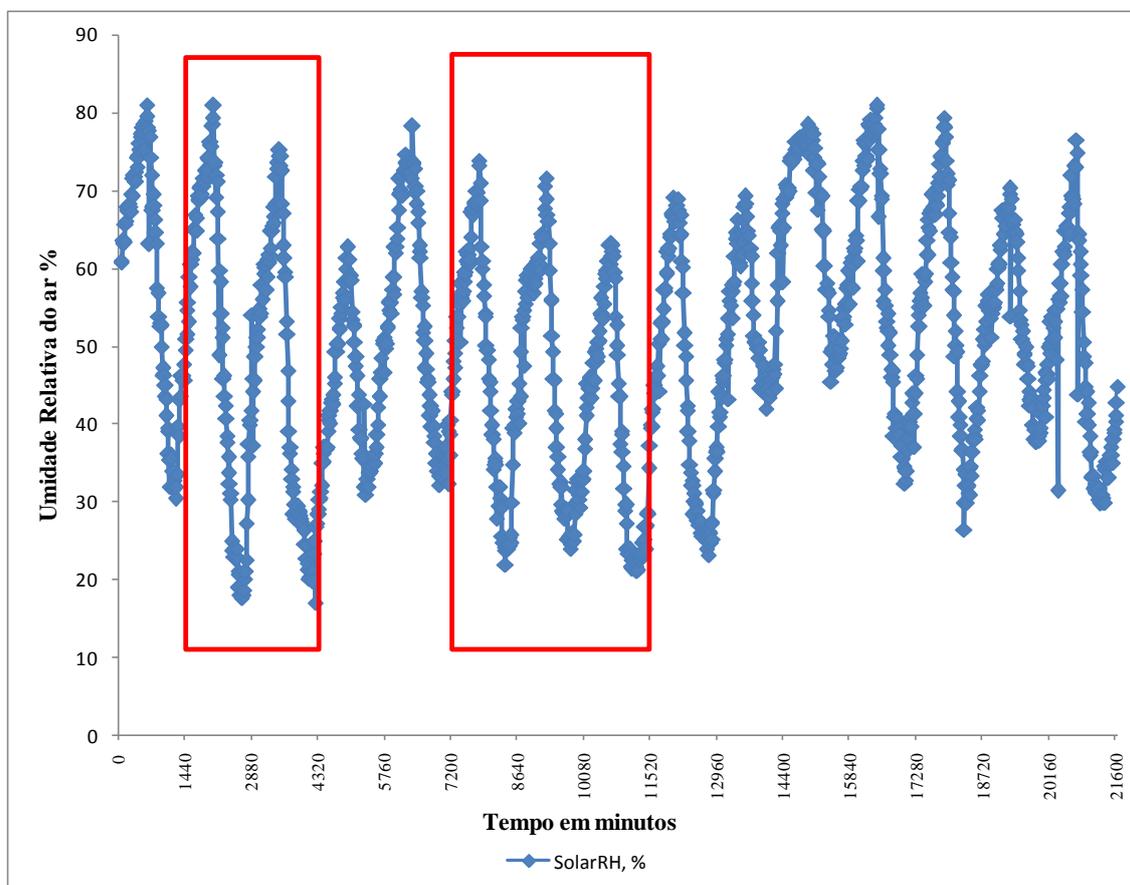


Gráfico 2: dados de umidade relativa registrados pela estação solar na torre meteorológica (a 11,5 metros), no mês de agosto de 2011 com destaque para os dias selecionados para a simulação (retângulo de linha vermelha)



Fonte: produzido pela autora.

Os dados de umidade específica foram acessados pelo site da *University of Wyoming* (<http://weather.uwyo.edu/uppeair>) e correspondem a dados de radiosondagens para a estação meteorológica do Aeroporto de Confins na Região Metropolitana de Belo Horizonte. No site foram selecionados os dados de umidade específica para o mês de agosto de 2011, para 00Z (UTC) que corresponde a 21:00 horas local (horário determinado para início da simulação) e em alturas próximas a 1715 metros (correspondente à diferença entre a altitude do topo do modelo e a altitude do terreno onde foi implantada a torre meteorológica) e a partir destes dados foram calculados os valores para a umidade específica a 1715 metros. Foram observados os valores de umidade específica para os dias estáveis do mês, para encontrar a faixa média de variação. Observou-se que a maior parte dos valores no mês de agosto com o

comportamento esperado (diminuição da umidade com a altitude) encontrava-se na faixa entre 6 e 8 g/kg.

A rugosidade determina o atrito entre as superfícies e o ar. O valor solicitado pelo modelo corresponde à rugosidade da superfície logo abaixo do anemômetro, neste caso, um pavimento liso de concreto, com rugosidade típica de 0,01. Aos dados requeridos para a configuração básica citados acima devem ser acrescentados outros, como mostra a figura 31.

Figura 31: condições de simulação usadas para os estudos de caso

```

[SOILDATA] _____ Settings for Soil
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]=293.17
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]=292.83
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm) [K]=293
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm) =25
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm) =19
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm) =15
[TIMING] _____ Update & Save Intervals
Update Surface Data each ? sec =30.0
Update Wind field each ? sec =900
Update Radiation and Shadows each ? sec =600
Update Plant Data each ? sec =600
[TIMESTEPS] _____ Dynamical Timesteps
Sun height for switching dt(0) -> dt(1) =40
Sun height for switching dt(1) -> dt(2) =50
Time step (s) for interval 1 dt(0) =10.0
Time step (s) for interval 2 dt(1) =5.0
Time step (s) for interval 3 dt(2) =2.0
[TURBULENCE] _____ Options Turbulence Model
Turbulence Closure ABL (0:diag.,1:prognos.) =1
Turbulence Closure 3D Modell (0:diag.,1:prog)=1
Upper Boundary for e-epsilon (0:clsd.,1:op.) =0
[RECEPTORS] _____
RECEPTOR 1 Co-ordinate =1,1
* --remove line above if your receptors are in the area input file--
Save Receptors each ? min =30.0
[BUILDING] _____ Building properties
Inside Temperature [K] =293
Heat Transmission Walls [W/m²K] =2.5
Heat Transmission Roofs [W/m²K] =2.5
Albedo Walls =0.2
Albedo Roofs =0.12
[NESTINGAREA] _____ Settings for nesting
Use aver. solar input in nesting area (0:n,1:y) =1
Include Nesting Grids in Output (0:n,1:y) =0
[PLANTMODEL] _____ Settings for plant model
Stomata res. approach (1=Deardorff, 2=A-gs) =2
Background CO2 concentration [ppm] =350
[LBC-TYPES] _____ Types of lateral boundary conditions
LBC for T and q (1:open, 2:forced, 3:cyclic) =2
LBC for TKE (1:open, 2:forced, 3:cyclic) =3
[CLOUDS] _____
Fraction of LOW clouds (x/8) =
Fraction of MEDIUM clouds (x/8) =1
Fraction of HIGH clouds (x/8) =
[SOLARADJUST] _____
Factor of shortwave adjustment (0.5 to 1.5) =0.96

```

Os dados de temperatura e umidade do solo para as alturas de 0-20 cm, de 20 -50 cm e abaixo de 50 cm foram obtidos no Sistema Nacional de Dados Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram considerados os municípios com dados disponíveis mais próximos a Belo Horizonte, com o mesmo tipo de solo, e valores de temperatura e umidade relativa do ar semelhantes aos da cidade. O município selecionado foi Santa Maria Madalena (RJ) localizado a cerca de 300 km de Belo Horizonte, que também possui solo argiloso. Foi realizada uma média dos valores obtidos para o dia 12 de agosto as 21:00 horas nos últimos 6 anos (2006 a 2011).

Os valores para transmitância térmica (U) de paredes e telhados foram obtidos na Norma Brasileira NBR-15220. Conforme já dito, os edifícios são representados de forma simplificada. Todos eles são compostos pelos mesmos materiais e apresentam o mesmo albedo, um valor médio para o modelo.

O ajuste das nuvens (cobertura e tipo de nuvens) foi realizado visando obter um valor de radiação difusa do modelo próximo ao valor calculado para o horário de meio-dia do dia da simulação. O valor adotado foi 1 para nuvens médias (em oitavas), é coerente com o valor da média de nebulosidade para o mês de agosto de 2011 da estação convencional do INMET que corresponde a 1,4 (em oitavas).

A radiação solar pode ser ajustada pela multiplicação por um fator entre 0,5 e 1,5. O ajuste solar foi realizado na rotina do preview do ENVI-Met©. Foi comparado o valor da radiação difusa “medida”¹ com a radiação difusa calculada pelo ENVI-Met© (para o dia 13 de agosto de 2011 ao meio-dia). As nuvens foram ajustadas até conseguir o melhor resultado para o horário de meio-dia entre a radiação solar difusa “medida” e calculada. Nesta fase não houve alteração no fator de radiação que continuou igual a 1. Uma vez ajustada a radiação difusa, foi verificado se havia diferença entre a radiação global medida (correspondente aos valores da estação automática do INMET localizada no campus da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG) e a radiação global calculada pelo ENVI-Met©. Como havia diferença, o valor medido (para o dia 13 de

¹ O valor da radiação difusa “medida” corresponde ao valor calculado para o dia 13 de agosto ao meio-dia, pelo fato de não haver este dado disponível.

agosto de 2011 ao meio-dia) foi dividido pelo valor (também do meio-dia) calculado pelo ENVI-Met© chegando-se a um fator de ajuste de 0,96. Este valor foi inserido no campo “Solar Adjust” do arquivo de configuração. Foi selecionado o melhor resultado final do meio-dia para ambas as radiações difusa e global. Todas as simulações foram realizadas com o valor obtido para o Solar Adjust (0,96) e o item “nuvens” com a configuração que teve o melhor resultado para a radiação difusa (valor 1 em nuvens médias).

Depois de fixados os valores para nuvens, fator solar e vento (direção e velocidade) foram realizadas diversas simulações testando variações na composição da área de aninhamento (pavimentos de concreto, argiloso, arenoso) e na entrada de umidade específica (variando entre a faixa encontrada de 6 a 8 g/kg).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados, tanto para a situação real da área de estudo, quanto para os cenários de verticalização e de substituição da cobertura vegetal do parque com o objetivo de analisar a influência da forma urbana nas variáveis climáticas de temperatura e umidade do ar. Os resultados obtidos são apresentados na seguinte ordem:

- análise dos dados dos pontos monitorados na área de estudo de caso;
- análise dos resultados da simulação com o modelo ENVI-Met© para os pontos monitorados e análise dos mapas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento gerados para toda área de estudo à partir da extensão Leonardo© do modelo ENVI-Met© na situação real da área de estudo;
- análise dos resultados da simulação no cenário de verticalização das edificações existentes na área de estudo de caso;
- análise dos resultados da simulação no cenário de substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por um gramado.

4.1 DADOS MONITORADOS NA ÁREA DE ESTUDO DE CASO

Conforme descrito na metodologia os dados foram monitorados na área de estudo de caso (Parque Lagoa do Nado e na área urbana adjacente) usando 5 termo-higrômetros (pontos P1, P2, P3, P4 e P5) e no entorno próximo através de uma torre meteorológica (ponto P6, FIGURA 32). O monitoramento no parque Lagoa do Nado (pontos P1 e P2) teve início no dia 30 de junho de 2011; no ponto mais próximo ao parque (P3) no dia 09 de agosto de 2011; nos pontos oficina (P4) e bar (P5) no dia 11 de agosto de 2011 e na torre meteorológica (P6) no dia 28 de julho de 2011. Os dados registrados pela torre meteorológica acima da camada de “dossel” urbano (temperatura do ar e umidade relativa do ar a 11,5 metros e direção e velocidade do vento a 20 metros) serviram para entrada no modelo ENVI-Met© e os dados registrados pelos termo-higrômetros serviram para comparar com os resultados das simulações do ENVI-Met© para os mesmos pontos (validação).

Figura 32: pontos de monitoramento: P1-mata, P2-quadra, P3-academia, P4-oficina, P5-bar, P6-torre meteorológica



Os gráficos 3 e 4 a seguir referem-se aos dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%) monitorados nos pontos P1 a P6 durante o mês de agosto de 2011 (a partir do dia 11), com destaque para os dias estáveis selecionados para a entrada (*Config*) no modelo de simulação e para comparação com as saídas da simulação. A partir desses dias selecionados, foram calculadas as médias horárias dos dados para entrada no modelo.

Gráfico 3: temperatura do ar monitorada nos pontos P1 a P6 em agosto de 2011

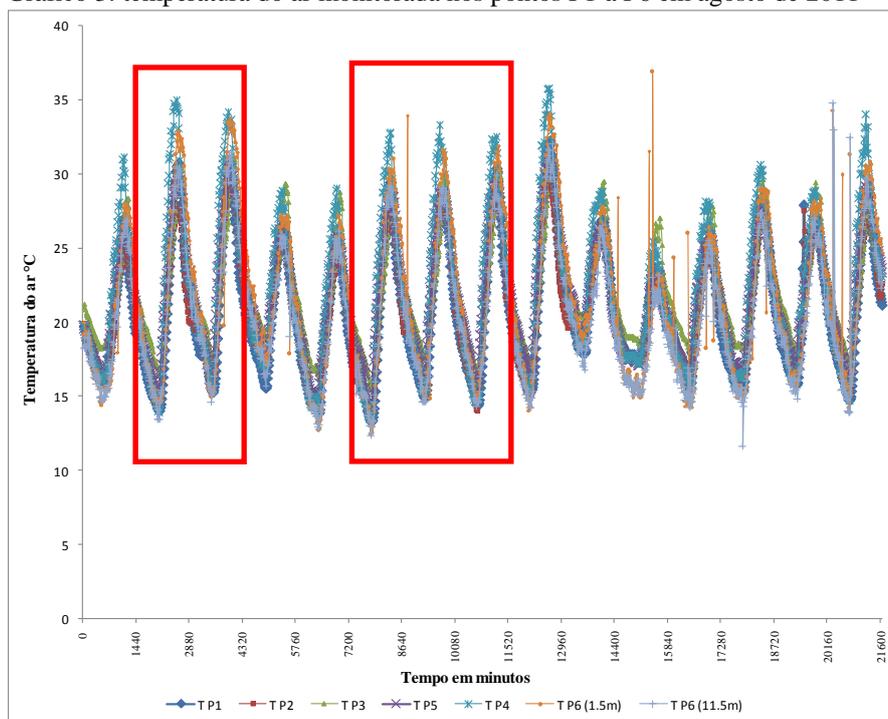
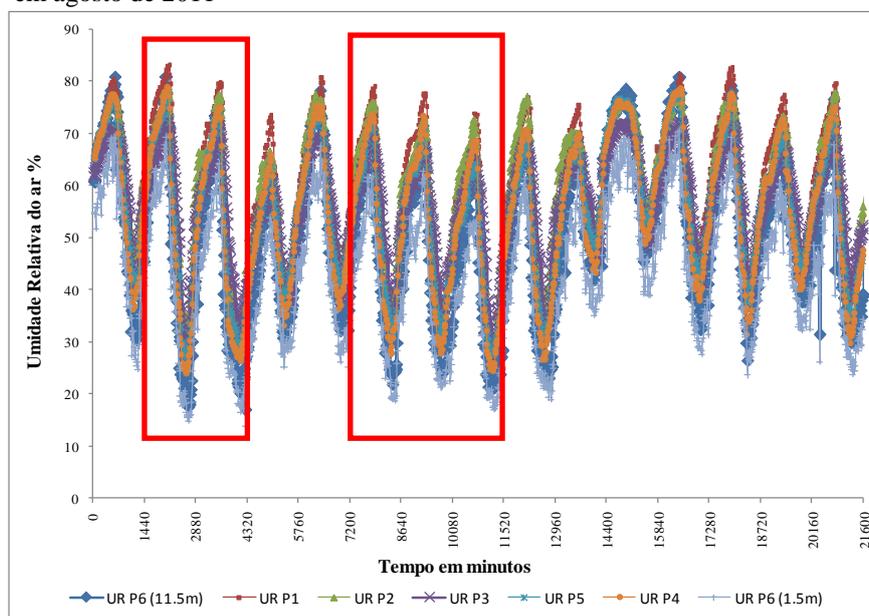


Gráfico 4: umidade relativa do ar monitorada nos pontos P1, P2, P3, P4, P5 e P6 em agosto de 2011



Fonte: produzido pela autora.

As tabelas 1 e 2 apresentam a análise descritiva dos valores de temperatura e umidade relativa do ar monitorados naqueles pontos durante o mês de agosto de 2011. A tabela 1 mostra que os valores da temperatura do ar variaram de 12,3°C a 36,9°C ao longo do período. Os maiores valores de temperatura máxima foram obtidos nos pontos oficina (P4) e na torre meteorológica (P6) a 1,5 m de altura. O menor valor de temperatura mínima foi de 12,3°C, obtido no ponto da torre meteorológica acima da camada de “dossel” urbano (a 11,5 m). Os menores valores médios da temperatura foram obtidos para a torre meteorológica (P6) a 11,5 m e para os pontos localizados no parque (P1 e P2), e o maior valor médio da temperatura foi obtido para o ponto oficina (P4).

Tabela 1: análise descritiva para a temperatura do ar (°C) dos pontos monitorados, agosto de 2011.

	N	Mínimo	Maximo	Media	Desvio
P1	1406	13,3	32,3	20,7	4,3
P2	1406	13,7	29,8	20,7	3,8
P3	1406	15,6	31,3	22,0	3,6
P4	1406	13,4	35,8	22,3	5,3
P5	1406	14,1	31,4	21,7	4,1
P6 a 1.5	1406	12,4	36,9	21,6	5,2
P6 a 11.5m	1406	12,3	34,8	20,4	4,4

Fonte: produzido pela autora.

Tabela 2: análise descritiva para a umidade relativa do ar (%) dos pontos monitorados, agosto de 2011.

	N	Minimo	Maximo	Media	Desvio
P1	1406	26,6	82,9	59,9	13,7
P2	1406	28,1	78,5	59,3	12,7
P3	1406	27,4	72,6	56,0	10,8
P4	1406	24,0	79,0	54,5	14,7
P5	1406	26,6	77,7	55,4	13,1
P6 a 1.5	1406	14,9	70,6	43,0	13,5
P6 a 11.5m	1406	17,5	80,9	50,6	15,9

Fonte: produzido pela autora.

O ponto P4 apresenta temperatura do ar um pouco maior e umidade relativa do ar um pouco menor que os pontos academia (P3) e bar (P5). Estes dois últimos pontos encontram-se próximos a áreas verdes, P3 encontra-se próximo ao parque Lagoa do Nado e à montante de P5 há uma mata, sendo que este ponto encontra-se na direção preferencial do vento (leste) após passar por esta mata (FIGURA 33).

Figura 33: ponto P5 com destaque para área verde (em amarelo)



Fonte: GOOGLE EARTH, [2011]. Imagem adaptada pela autora para composição da figura, 2011.

Observa-se que as menores temperaturas foram registradas no interior do parque Lagoa do Nado, sendo que a diferença entre os valores médios registrados no parque (pontos P1 e P2) e na área urbana (ponto P4) chega a 1,6°C. Este resultado é congruente com a literatura sobre o tema. Bowen apud Santamouris (1997) aponta que pode ocorrer uma redução de 2 a 3°C na temperatura de parques, devido à evapotranspiração das plantas. OKE et al (2000) ao realizar medidas de temperatura e umidade relativa do ar em

Orville Wright Park no subúrbio de Mission Oaks, Sacramento e sobre a calçada de concreto de um residência concluiu que a diferença de temperatura do ar entre o parque e o ponto da residência era de 1-2°C, o parque sempre mais frio em todos os momentos do dia. Conforme apresentado na tabela 2 os valores da umidade relativa variaram de 14,9% a 82,9% sendo que os maiores valores médios foram obtidos nos pontos localizados no interior do parque (P1 e P2) e no ponto P3 que é o ponto localizado na área urbana que está mais próximo ao parque.

4.2 DADOS CALCULADOS À PARTIR DOS DADOS MONITORADOS

Realizou-se uma análise da umidade absoluta do ar para os pontos onde foi realizado o monitoramento, pelo fato desta, ao contrário da umidade relativa do ar, retratar o real estado de umidade presente na atmosfera. A umidade relativa está diretamente relacionada à temperatura, o valor pode variar se houver uma mudança na temperatura, mesmo que não tenha havido nenhum aumento ou diminuição em seu conteúdo de umidade.

A umidade absoluta em g H₂O/kg Ar Seco foi calculada segundo Alucci (1992) por meio da expressão:

$$UA = (UR/100) * (622 * P_{sat}) / (P_{atm} - P_{sat})$$

“UR” é a umidade relativa do ar em % monitorada nos pontos P1, P2, P3, P4 e P5 durante o mês de agosto de 2011. “P_{atm}” é a pressão atmosférica em mmHg e corresponde a média dos valores registrados pela estação meteorológica automática do 5º DISME entre os dias 12 a 19/08/2011 às 21 horas. “P_{sat}” é a pressão de saturação em mmHg e foi calculada por meio da equação de Tetens. Nesta equação, “T” corresponde a temperatura do ar, em °C, monitorada nos pontos P1 a P5 em agosto de 2011.

$$P_{sat} = 4,58 \times 10^{7,5 \times T / 237,3 + T}$$

A tabela 3 apresenta a análise descritiva dos valores de umidade absoluta calculados.

Tabela 3: análise descritiva para a umidade absoluta do ar dos pontos monitorados, agosto de 2011

	N	Mínimo	Maximo	Media	Desvio
P1	1406	7,59	14,03	9,88	0,97
P2	1406	7,50	13,54	9,78	0,87
P3	1406	8,03	13,36	10,13	0,90
P4	1406	7,33	12,67	9,78	1,11
P5	1406	7,40	12,40	9,70	0,93

Fonte: produzido pela autora.

Os valores de umidade absoluta variaram de 7,33 g/Kg a 14,03 g/Kg. Os valores de UA calculada para os pontos P1 a P5 são próximos aos valores encontrados por Tatsch (2006) para o período seco (junho a agosto de 2005) comparando áreas de cana, cerrado e eucalipto no estado de São Paulo. Neste estudo, os valores médios da umidade específica do ar (q) em g.kg^{-1} foram de 9,5 para a cana; 9,1 para o cerrado e 9 para o eucalipto.

As diferenças dos valores calculados para os P1 a P5 são pequenas, sendo que o ponto P3 (Academia) é o com a maior média, seguido pelo ponto P1 (Mata). Ressalta-se que os pontos P1(Mata) e P2 (Quadra) foram os que registraram as maiores médias de umidade relativa e as menores médias de temperatura durante o período monitorado. A menor média de UA calculada é a do ponto P5 (Bar).

Barbosa (2005) ao realizar um estudo em microclimas de Maceió também observou que dentre os nove pontos monitorados, os ambientes amostrais com vegetação não apresentaram diferença considerável quanto aos valores de umidade absoluta do ar.

Duarte (2010) ao realizar um estudo do comportamento microclimático em um recorte urbano em João Pessoa (PB) verificou que a presença de vegetação em dois dos pontos analisados, não foi suficiente para aumentar o valor de vapor d'água existente no ambiente. Segundo a autora este fato comprova que o principal efeito para a redução em suas temperaturas foi o sombreamento provocado pelas árvores.

4.3 SIMULAÇÃO - CASO DE REFERÊNCIA

Conforme apresentado no capítulo anterior, foram realizadas diversas simulações com uma área menor de teste (validação) contendo o ponto P3 - academia (FIGURA 27) e depois com toda a área de estudo de caso (FIGURA 26). Depois de fixados os parâmetros de entrada, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, umidade específica, direção e velocidade do vento, cobertura de nuvens e fator de radiação, foram realizados testes alterando a composição da área de aninhamento do modelo. Como apontado no capítulo 2 a área de aninhamento (que representa um contexto maior no entorno da área de estudo) é composta por dois tipos de solo. Sendo assim, foram testadas as seguintes opções: solo arenoso e pavimentado; solo argiloso e pavimentado, e somente solo pavimentado (impermeável).

Durante os testes observou-se que houve maior aproximação com os dados medidos quando o solo utilizado na área de aninhamento é o arenoso ao invés do argiloso, que é o solo típico da região de Belo Horizonte. Talvez a cidade imponha, em função do seu tecido, uma característica genérica de solo seco tendo em vista que a pavimentação e a drenagem diminuem a disponibilidade de água para evaporação. Isso poderia justificar a adoção, também genérica, do solo arenoso. Entretanto, considerando que não há comprovação para tal suposição e que o solo predominante no município é o argiloso, selecionou-se aquela configuração de simulação para a qual houve maior correspondência com os dados medidos, utilizando na área de aninhamento o solo argiloso junto com o pavimentado.

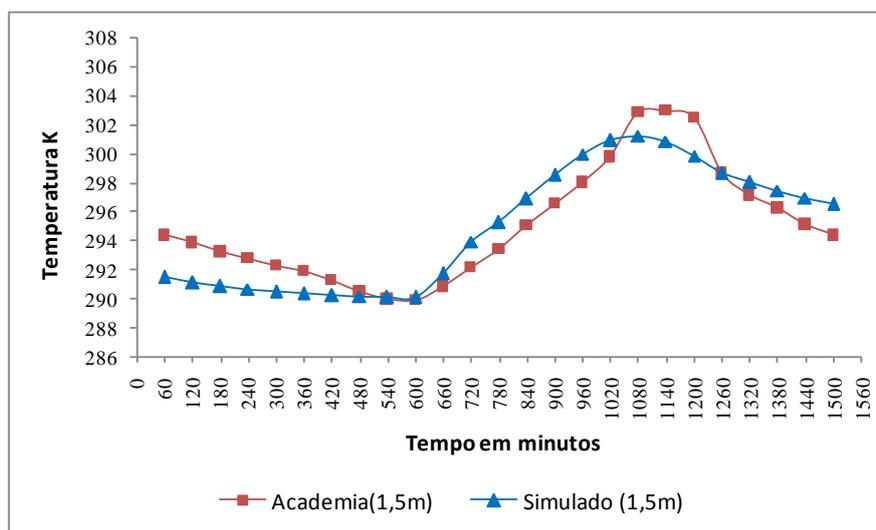
As curvas de temperatura do ar, umidade absoluta e relativa do ar medidas e simuladas foram comparadas para todos os pontos monitorados na área de estudo de caso, a fim de verificar o ajuste do programa quanto às condições reais (validação). A seguir são apresentados esses resultados, além de uma comparação entre as simulações com solo argiloso e arenoso na área de aninhamento e mapas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento gerados para toda a área de estudo de caso pela interface Leonardo© do modelo ENVI-Met©. Como a interface Leonardo© possibilita a representação de mapas a partir de várias alturas de seção vertical, para melhor

correspondência com a altura dos dados medidos na área de estudo de caso (1,5 m), os mapas gerados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram analisados em planta, a partir de seção de 1,2 m de altura (de acordo com a modulação da grade vertical do programa). Foram escolhidos para análise os horários locais de mínima (07:00) e máxima (15:00) temperatura do ar.

4.3.1 Temperatura do ar

Os gráficos 5, 6, 7, 8, 9 e 10 mostram a evolução da temperatura do ar medida e simulada para a altura de 1,5 metros para todos os pontos monitorados, sendo que o gráfico 5 refere-se ao resultado da simulação para a área menor de teste e os demais para toda a área de estudo de caso. O ENVI-Met© mostrou uma tendência a subestimar as amplitudes diárias. Enquanto o modelo indica uma amplitude térmica para os pontos que varia de 7 a 10 °C, os dados medidos indicam uma amplitude que varia de 13 a 18°C.

Gráfico 5: temperatura do ar medida e simulada (simulação da área menor de teste) para o ponto Academia (P3)



Nota referente aos Gráficos 5 a 10: eixo x- 0 à partir de 22 horas.
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 6: temperatura do ar medida e simulada (simulação da área total) para P3

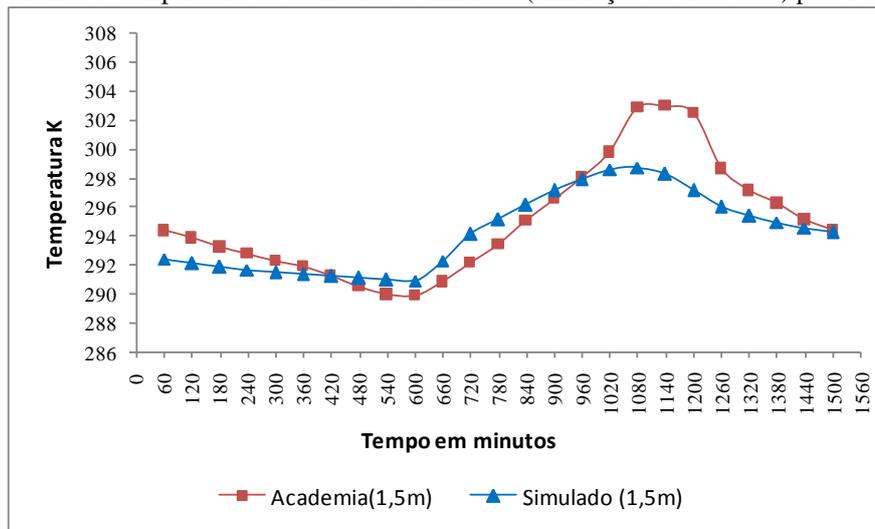


Gráfico 7: temperatura do ar medida e simulada (simulação da área total) para P5

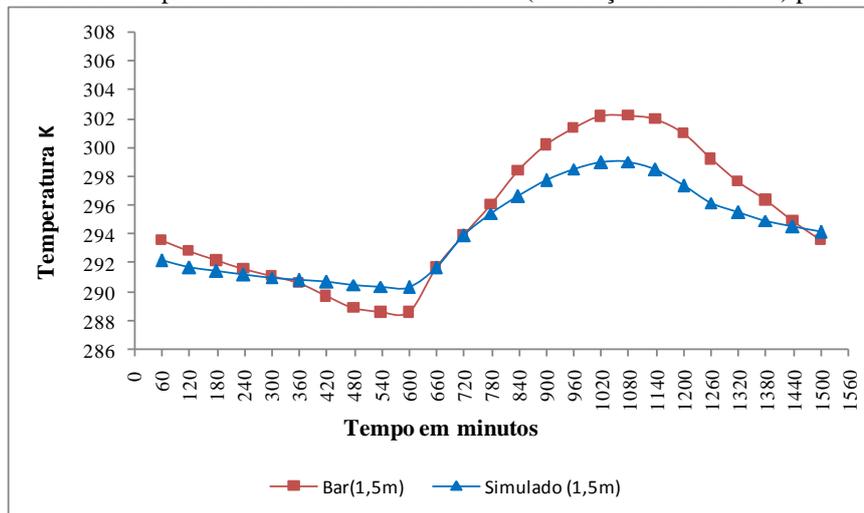


Gráfico 8: temperatura do ar medida e simulada (simulação da área total) para P4

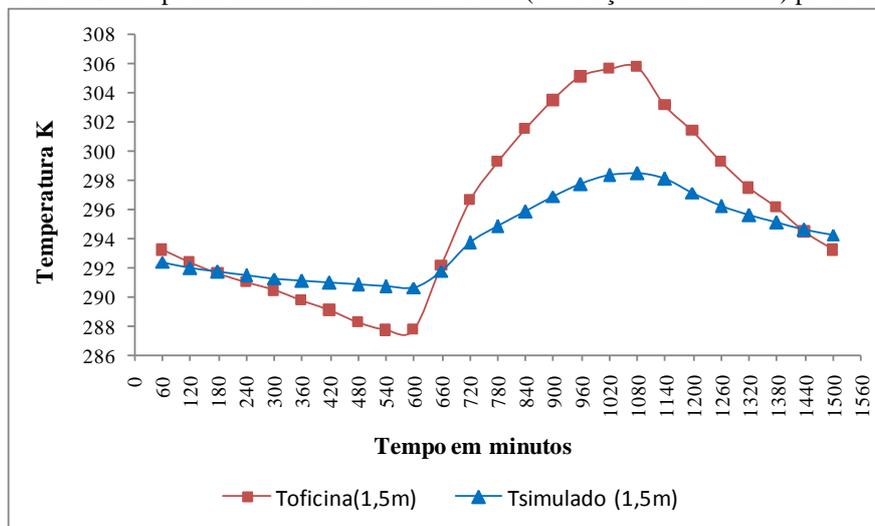
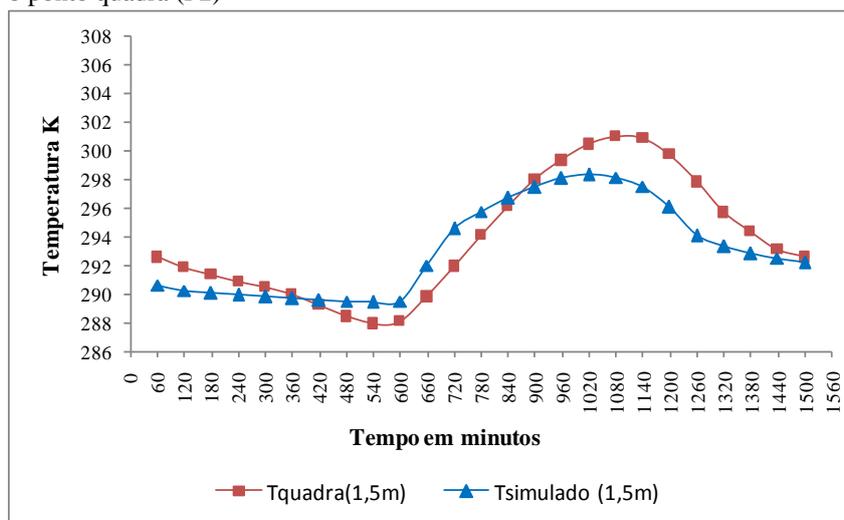
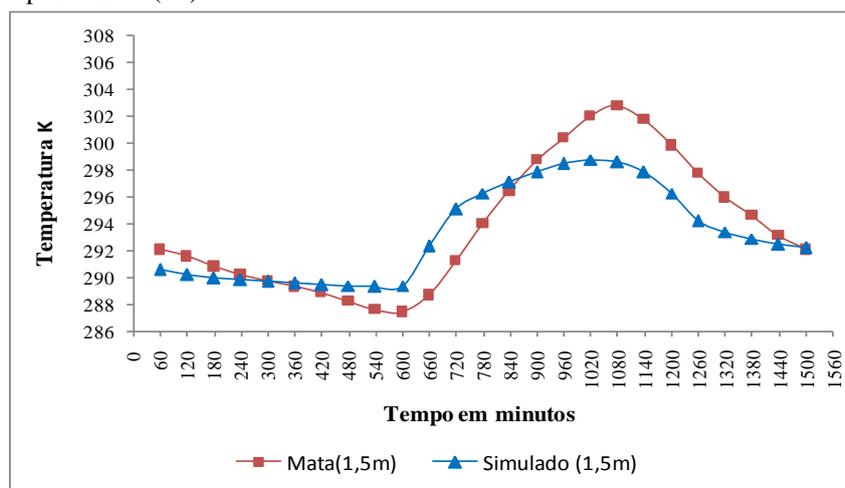


Gráfico 9: temperatura do ar medida e simulada (simulação área total) para o ponto quadra (P2)



Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 10: temperatura do ar medida e simulada (simulação área total) para o ponto mata (P1).



Fonte: produzido pela autora.

Observa-se que as maiores diferenças entre dados medidos e simulados são observadas no horário da temperatura máxima (que é mais elevada nos valores medidos do que nos simulados) ou nos horários próximos ao da temperatura máxima. Essa diferença chega a 4°C para os pontos mata (P1), quadra (P2) e bar (P5); a 5 °C para o ponto academia (P3) e a 7°C para o ponto oficina (P4). Emmanuel *et al* (2007) já haviam apontado o fato de o ENVI-Met© subestimar a temperatura máxima. Segundo o autor, a razão para isso pode estar ligada às limitações do modelo. Entretanto, o comportamento da temperatura

medida e simulada é semelhante, apresentando um pico no intervalo entre 14 e 16 horas, e a partir deste horário começa a declinar.

A análise descritiva da temperatura do ar obtida na simulação e no monitoramento (TABELA 4) demonstra que existe concordância quando comparados os pontos que apresentaram as menores médias, sendo os dois pontos localizados no parque – Mata (P1) e Quadra (P2) e o valor mínimo, sendo o ponto Mata (P1). Já o ponto que apresentou a maior média na simulação foi o Academia (P3), mas no monitoramento foi o ponto Oficina (P4).

Tabela 4: temperatura do ar obtida na simulação e no monitoramento.

Ponto	N	Minimo	Máximo	Média	Desvio
Tsimul. P1 (mata)	25	289,00	299,00	293,24	3,60
Tsimul. P2(quadra)	25	289,00	298,00	293,20	3,21
Tsimul. P3(academia)	25	291,00	299,00	294,20	2,74
Tsimul. P4(oficina)	25	291,00	298,00	294,12	2,67
Tsimul. P5(bar)	25	290,00	299,00	294,16	3,12
T P1 (mata)	25	287,00	303,00	293,84	4,96
T P2 (quadra)	25	288,00	301,00	293,84	4,27
T P3 (academia)	25	290,00	303,00	295,04	4,04
T P4 (oficina)	25	287,72	305,77	295,84	6,01
T P5 (bar)	25	289,00	302,00	295,20	4,46

Fonte: produzido pela autora.

O ponto Oficina (P4) apresenta em média temperatura um pouco maior que os pontos Academia (P3) e Bar (P5), entretanto a temperatura simulada para este ponto é em média menor que a temperatura simulada para os pontos Academia e Bar. A aproximação de valores entre pontos simulados e medidos é maior para os pontos Academia (P3) e Bar (P5) do que para o ponto Oficina (P4).

Dentre estes três pontos localizados na área urbana (P3, P4 e P5) dois deles estão na borda do recorte de estudo e, portanto, mais próximos da área de aninhamento - ponto Oficina (P4) e ponto Bar (P5). Levando em consideração a direção preferencial do vento-leste (que é mantida constante durante toda a simulação), supõe-se que os pontos Oficina (P4) e Bar (P5) recebam uma contribuição maior da área de aninhamento e o ponto Academia (P3) recebe a contribuição maior da porção urbana da área de estudo de caso, onde se procurou representar o melhor possível a condição de ocupação real.

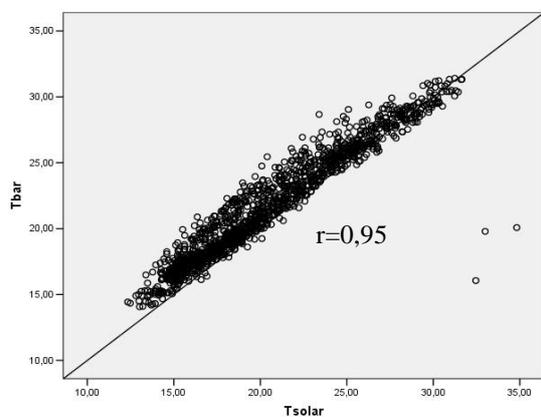
A característica da área de aninhamento (composta por solo pavimentado e argiloso numa razão de meio a meio tendo em vista que no modelo é elaborado um “xadrez” com estes dois tipos de solo) se aproxima mais do entorno do ponto Bar (P5) do que do entorno do ponto Oficina (P4), sendo o ponto Bar (P5) caracterizado por uma porção de solo impermeável, mas também uma expressiva área verde que possivelmente influencia este ponto (FIGURA 33). Já o ponto Oficina (P4) é o único que não se encontra próximo à área verde, próximo a este ponto há uma via de tráfego intenso, o que pode contribuir para uma maior temperatura do ar. No entanto, esta configuração do entorno não aparece na modelagem, pois não faz parte da área de estudo e não é possível inserí-la na área de aninhamento, ou seja, não é possível inserir estas informações- edificações, traçado das vias, etc. na área de aninhamento. Isto justificaria o fato da temperatura simulada para o ponto Oficina ser a que mais se distancia da temperatura monitorada em relação aos outros dois pontos na área urbana.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos acima da camada de “dossel” urbano (a 11,5 metros) foram comparados com as saídas do modelo a 10,5 metros, tendo em vista que estes dados foram coletados somente na torre meteorológica que não esta inserida na área de estudo. Foi selecionado o ponto de medição na área de estudo com maior coeficiente de correlação de Pearson com os dados da estação Solar (que, como se viu, foi instalada na torre meteorológica para coleta de dados de temperatura e umidade a 11,5 metros de altura). O ponto selecionado foi o P5 com coeficiente de correlação de 0,93 para temperatura do ar e 0,98 para umidade relativa do ar (GRÁFICOS 11 e 12).

Supõe-se que a razão do ponto P5 ser o que possui maior correlação com o ponto da torre meteorológica (P6) poderia estar ligada ao fato de ele receber influencia da área verde apresentada na figura 35, assim como o ponto da torre meteorológica provavelmente recebe alguma influencia do Parque Lagoa do Nado.

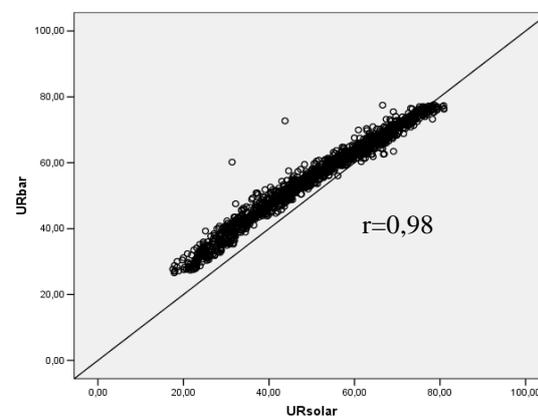
O gráfico 13 mostra a comparação entre os dados medidos a 11,5 metros e o simulado a 10,5 metros. O horário da temperatura máxima simulada coincide com a temperatura máxima medida (15 horas) assim como o horário de temperatura mínima (6 horas), no entanto a amplitude térmica simulada é menor do que a monitorada.

Gráfico 11: correlação entre temperatura do ar monitorada no ponto bar (P5) e na torre meteorológica



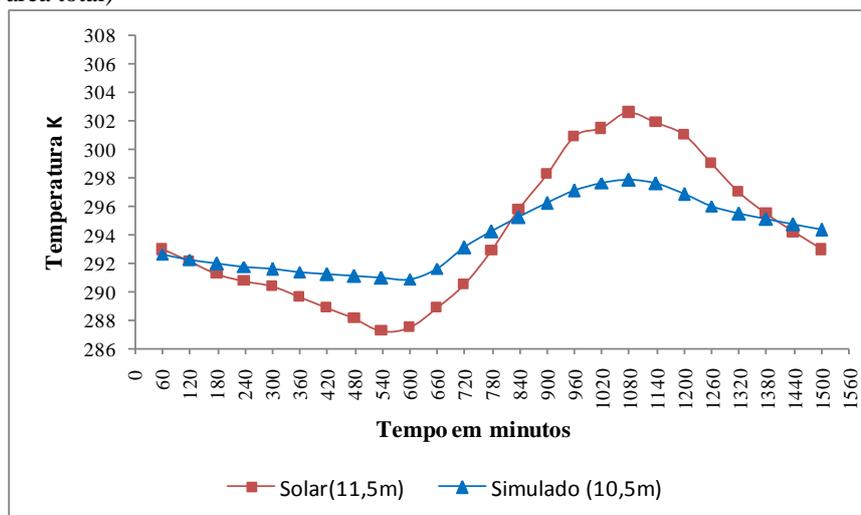
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 12: correlação entre umidade relativa do ar no monitorada no ponto bar (P5) e na torre meteorológica



Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 13: temperatura do ar medida a 11,5 m e simulada a 10,5 m (simulação da área total)



Nota referente aos Gráficos 13 a 25: eixo x: 0 à partir de 22 horas.

Fonte: produzido pela autora.

Conforme dito anteriormente, também foram realizadas simulações utilizando o solo arenoso na área de aninhamento. Os gráficos 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25 mostram a comparação entre as simulações com argiloso e arenoso na área de aninhamento, sendo que para estes últimos, a aproximação entre dados simulados e

medidos é maior. Esta comparação evidencia o fato de diferentes composições da área de aninhamento poderem influenciar as respostas do modelo.

Gráfico 14: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto academia-P3)

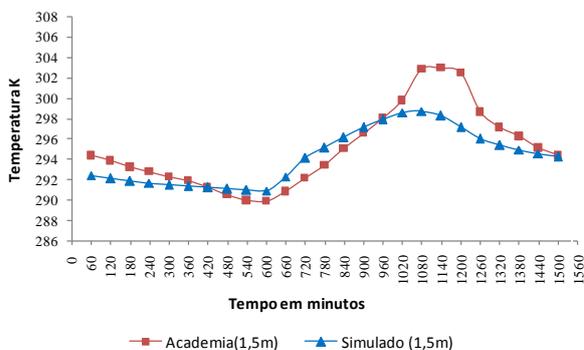


Gráfico 15: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto academia-P3)

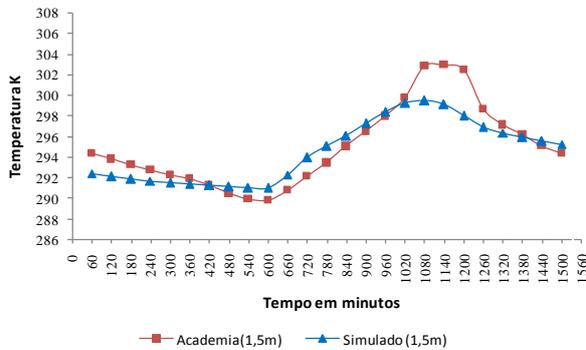


Gráfico 16: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto bar-P5)

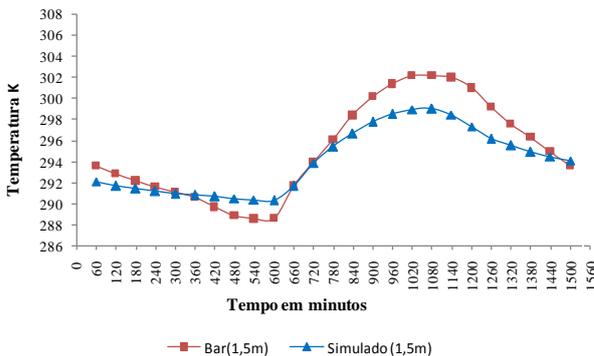
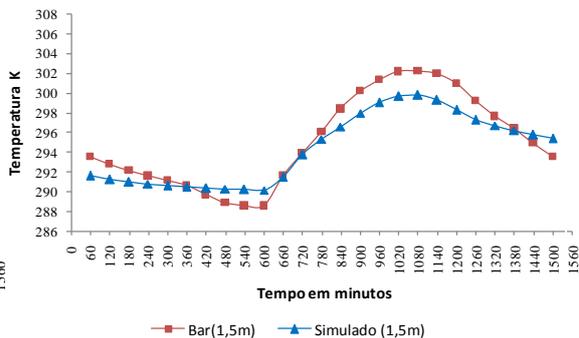


Gráfico 17: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto bar-P5)



Fonte: produzido pela autora.

Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 18: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto oficina -P4)

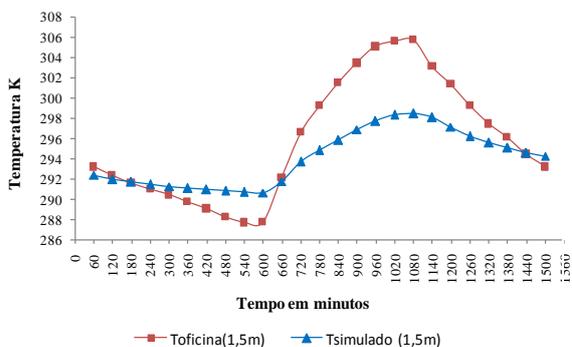
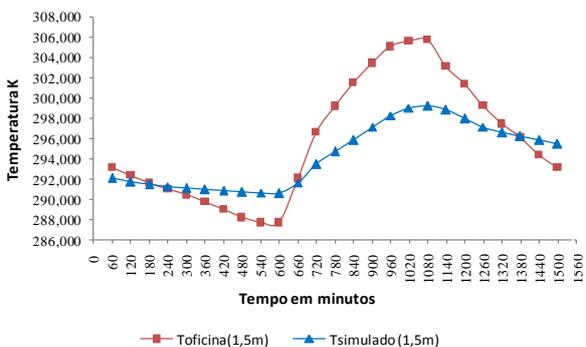


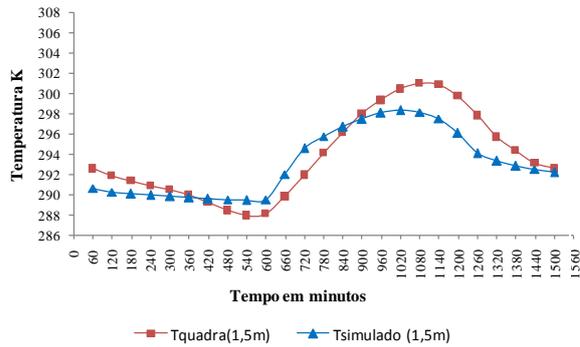
Gráfico 19: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto oficina- P4)



Fonte: produzido pela autora.

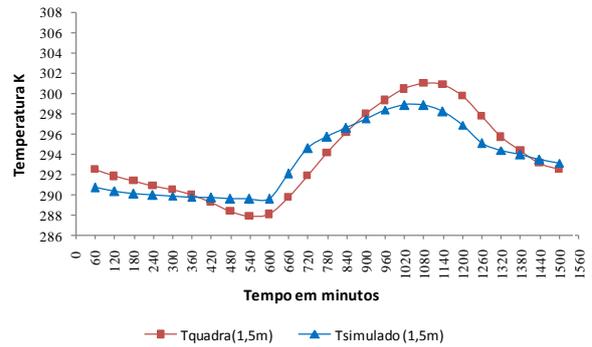
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 20: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto quadra-P2)



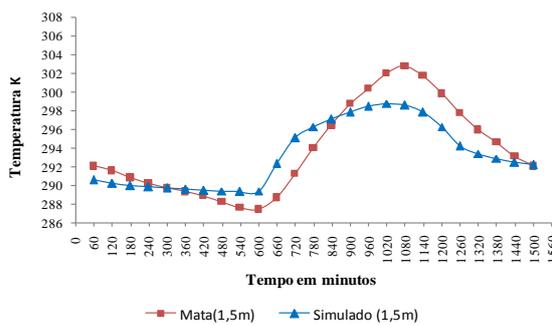
Fonte: produzido pela autora, 2012.

Gráfico 21: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto quadra)



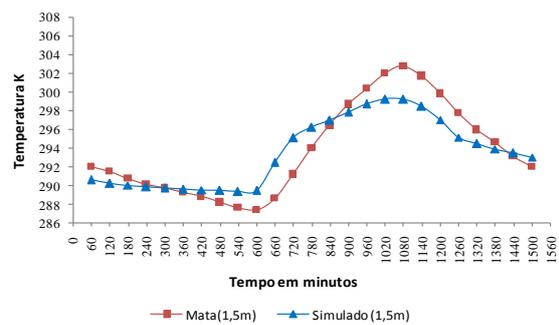
Fonte: produzido pela autora, 2012.

Gráfico 22: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto mata -P1)



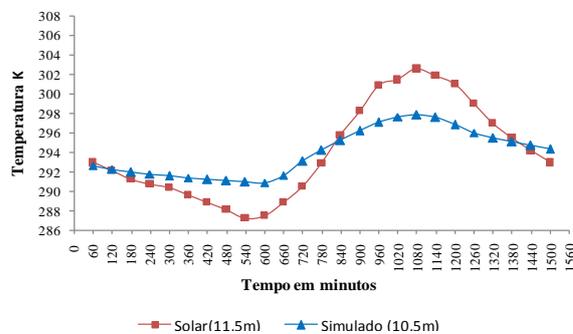
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 23: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto mata- P1)



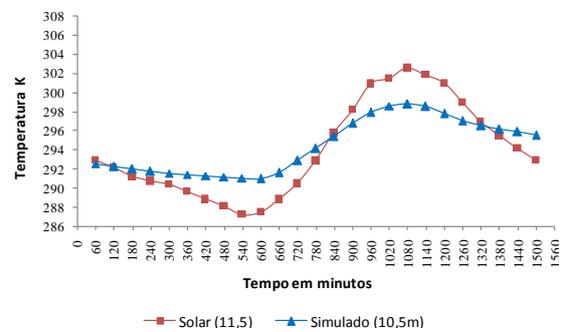
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 24: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (Torre meteorol. 11,5 m)



Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 25: simulação com arenoso na área de aninhamento (Torre 11,5 m)

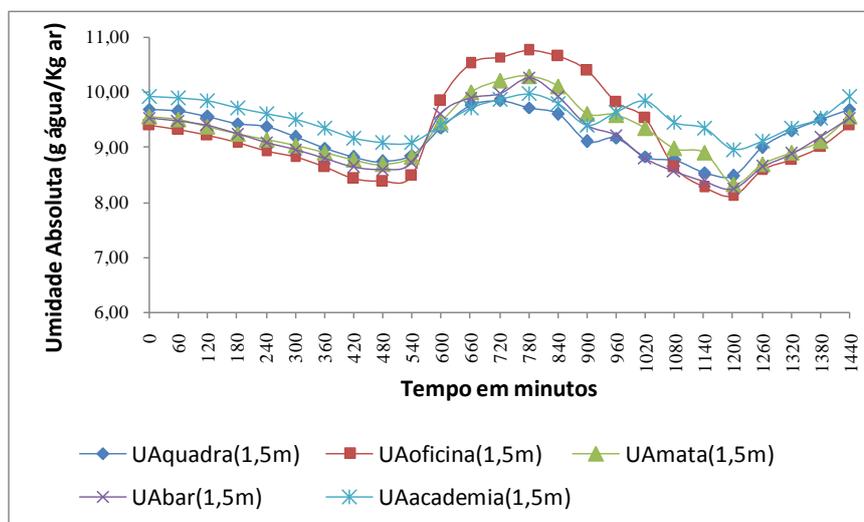


Fonte: produzido pela autora.

4.3.2 Umidade absoluta do ar

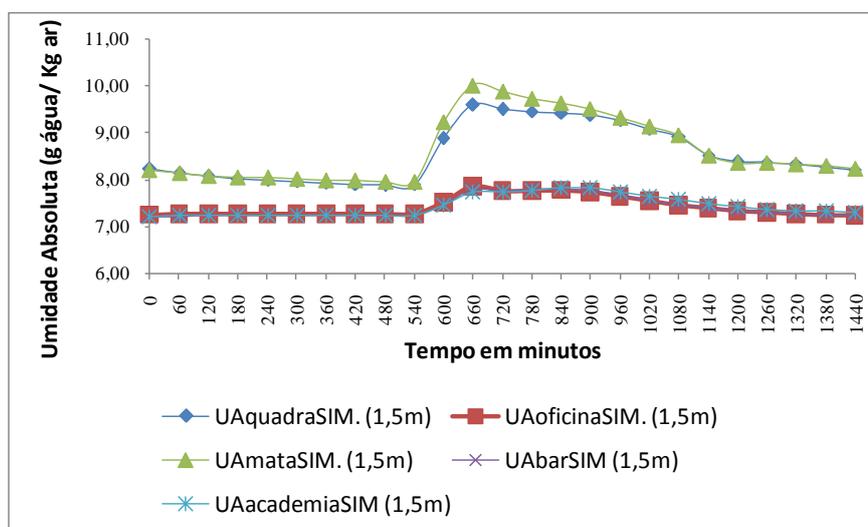
O gráfico 26 mostra os valores de umidade absoluta do ar calculados para os pontos P1 (mata), P2 (quadra), P3 (academia), P4 (oficina) e P5 (bar) e o gráfico 27 mostra os valores simulados para estes pontos. Observa-se que para os dados simulados houve uma maior diferença entre os valores dos pontos localizados no parque (P1 e P2) e na área urbana (P3, P4 e P5) em relação aos dados calculados.

Gráfico 26: umidade absoluta do ar calculada para os pontos P1 a P5



Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 27: umidade absoluta do ar simulada para os pontos P1 a P5



Fonte: produzido pela autora.

Em se tratando dos horários de máxima umidade absoluta simulada, este correspondeu à 12 horas para os pontos P3 (Academia) e P5 (Bar) e a 9 horas para os pontos P1 (Mata), P2 (Quadra) e P4 (Oficina). Com relação aos horários de máxima umidade absoluta calculada, observou-se um máximo às 11 horas para quase todos os pontos – P1 (Mata), P3 (Academia), P4 (Oficina) e P5 (Bar).

Saad e Rocha (2006) analisando os padrões de estado à superfície associados ao início de formação de nuvens observaram que durante a manhã ocorre aquecimento do ar e, com concorrente aumento da umidade específica o que provoca um substancial aumento da temperatura potencial equivalente. A umidade do ar alcança um máximo por volta das 11h, quando começa a diminuir. Enquanto isso, a temperatura continua a subir e conseqüentemente a temperatura potencial equivalente aumenta apenas levemente. Durante a noite a umidade praticamente não varia, e a temperatura cai. Este padrão é observado mês após mês, no Cerrado, com notável sazonalidade e deslocamento da estação úmida para a estação seca. No caso da Floresta, observa-se que somente os meses da estação seca têm um modo de variação semelhante.

A TABELA 5 apresenta a análise descritiva da umidade absoluta do ar obtida na simulação e a calculada.

Tabela 5: umidade absoluta do ar simulada e calculada.

Ponto	N	Mínimo	Máximo	Média	Desvio
UAsimul. P1 (mata)	25	7,95	10,01	8,63	0,70
UAsim. P2 (quadra)	25	7,87	9,59	8,53	0,60
UAsimul. P3 (academia)	25	7,19	7,81	7,43	0,22
UAsim.P4 (oficina)	25	7,22	7,85	7,41	0,21
UAsim.P5 (bar)	25	7,19	7,80	7,39	0,23
UAlc. P1 (mata)	25	8,32	10,30	9,28	0,51
UAlc.P2 (quadra)	25	8,47	9,84	9,24	0,41
UAlc.P3 (academia)	25	8,96	9,97	9,54	0,31
UAlc.P4 (oficina)	25	8,12	10,76	9,26	0,82
UAlc.P5 (bar)	25	8,25	10,26	9,16	0,54

Fonte: produzido pela autora.

Observa-se que quanto aos dados calculados, o ponto P3 (Academia) foi o que apresentou maior média e depois dele o ponto P1 (Mata), sendo que a diferença entre

este ponto e os pontos P2 (Quadra) e P4 (Oficina) é muito pequena. O ponto P5 (bar) foi o que apresentou a menor média. Em se tratando dos dados simulados, os pontos localizados no parque, P1 (Mata) e P2 (Quadra) foram os que registraram as maiores médias de UA. Ressaltasse que estes dois pontos também foram os que apresentaram as menores médias de T simuladas. Assim como para os dados calculados, o ponto P5 (Bar) foi o que apresentou a menor média de UA. A partir dos gráficos 28, 29, 30, 31 e 32 que apresenta os fluxos de calor latente (LE), fluxos de calor sensível (H) e fluxos de calor na superfície do solo (G), percebe-se que o fluxo de calor latente (LE) simulado foi zerado para os pontos localizados na área urbana (P3, P4 e P5), mas não para os pontos P1 e P2 localizados no parque.

Gráfico 28: H, LE e G simulados para P1(mata)

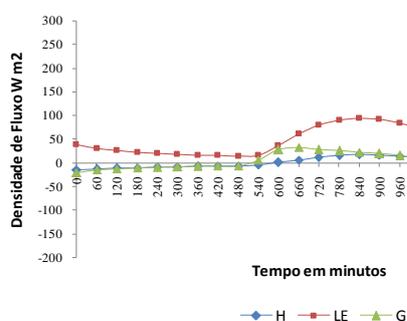


Gráfico 29: H, LE e G simulados para P2(quadra)

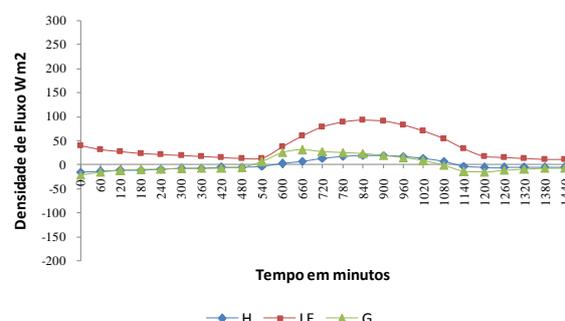


Gráfico 30: H, LE e G simulados para P3(academia)

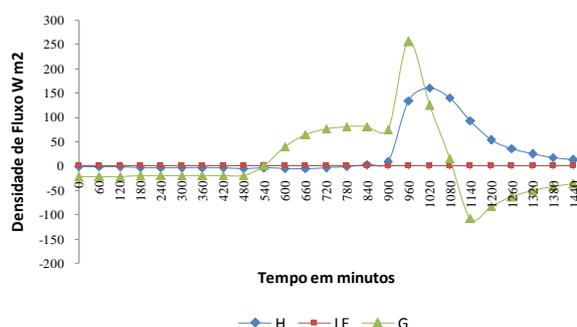


Gráfico 31: H, LE e G simulados para P4(oficina)

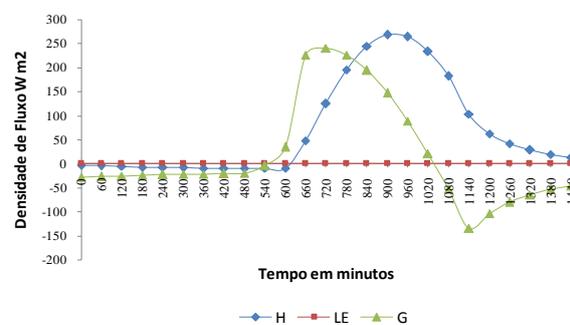
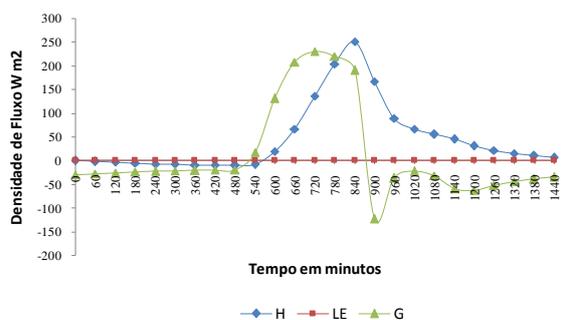


Gráfico 32: H, LE e G simulados para P5 (bar)

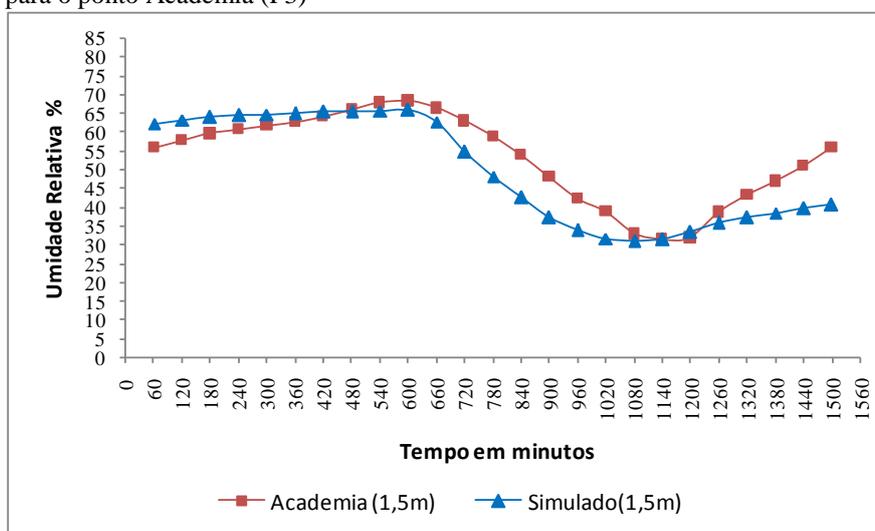


Fonte: produzido pela autora.

4.3.3 Umidade relativa do ar

Os gráficos 33, 34, 35, 36, 37 e 38 mostram a umidade relativa do ar medida e simulada para a altura de 1,5 metros para todos os pontos monitorados. O gráfico 26 refere-se ao resultado da simulação para a área menor de teste e os demais para toda a área de estudo de caso.

Gráfico 33: Umidade Relativa do ar medida e simulada (simulação do recorte teste) para o ponto Academia (P3)



Nota referente aos Gráficos 33 a 38: eixo x- 0 à partir de 22 horas.
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 34: Umidade Relativa do ar medida e simulada (simulação da área total) para o ponto Academia (P3)

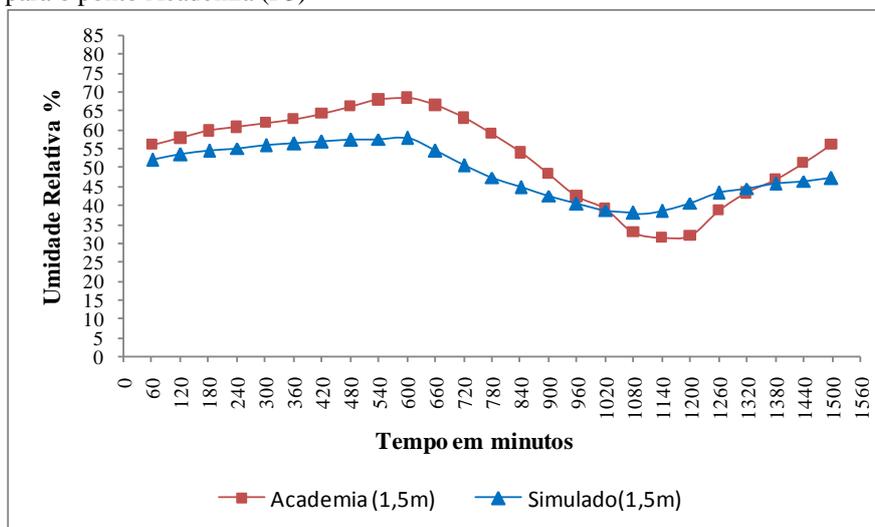


Gráfico 35: UR do ar medida e simulada (simulação da área total) para P5(Bar)

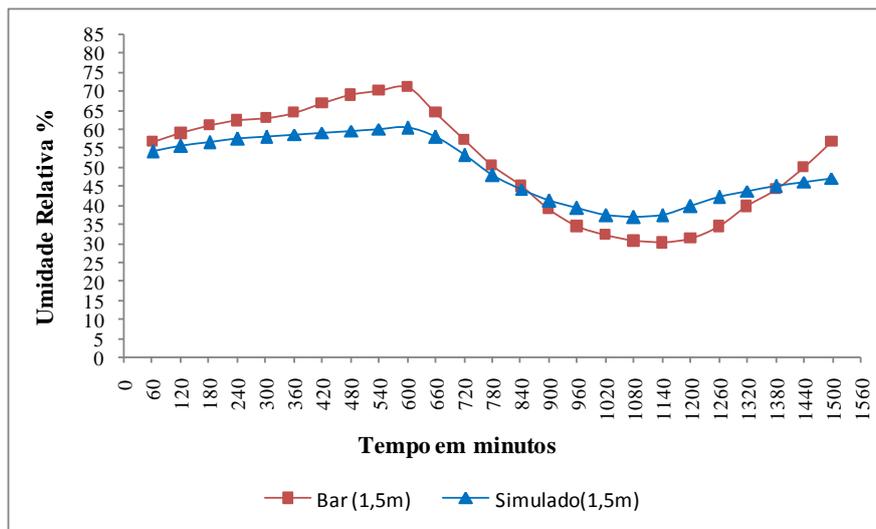


Gráfico 36: UR do ar medida e simulada (simulação da área total) para P4

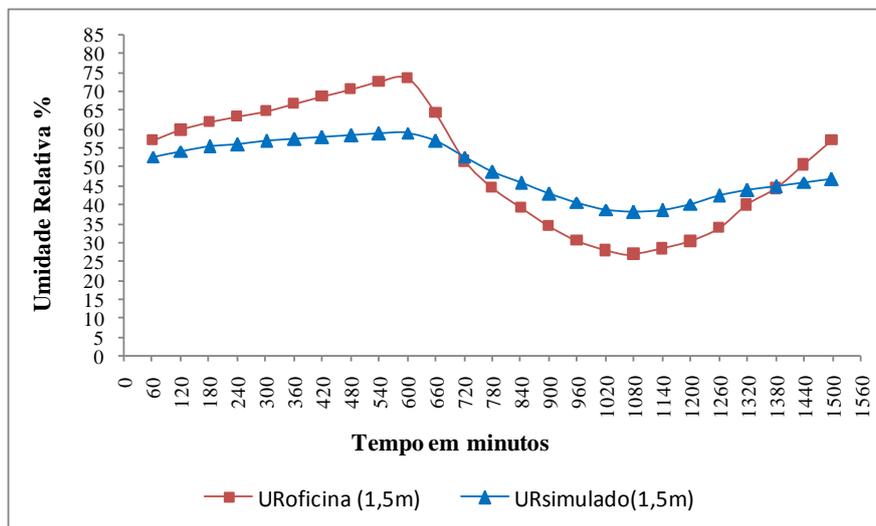


Gráfico 37: UR do ar do ar medida e simulada (área total) para P2

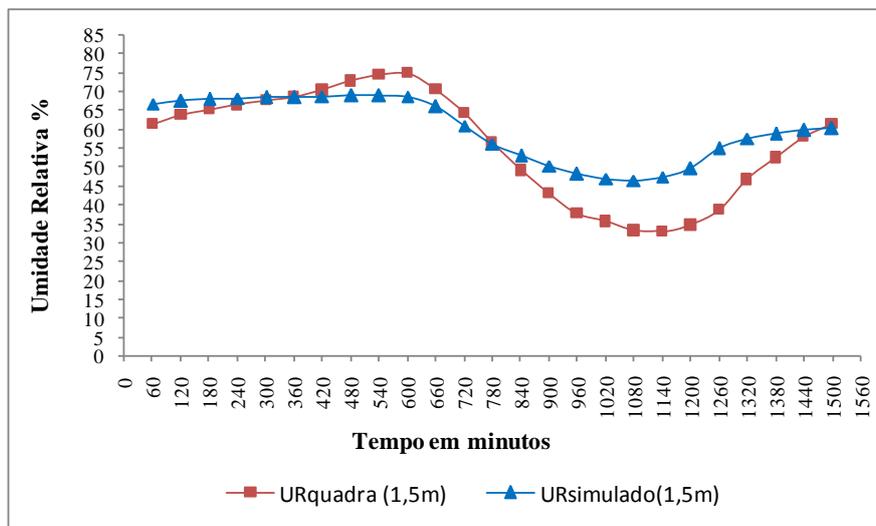
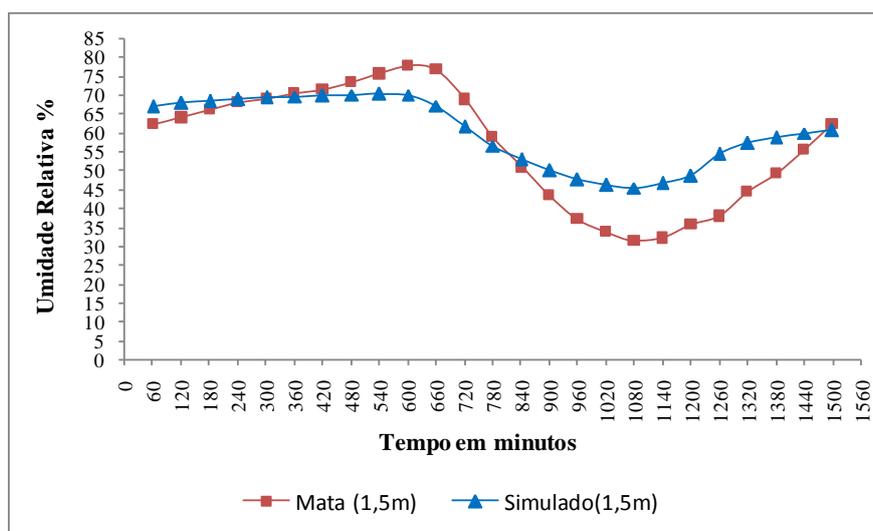


Gráfico 38: UR medida e simulada (área total) para o ponto mata (P1)



Fonte: produzido pela autora.

As maiores diferenças entre dados medidos e simulados são observadas no horário de umidade relativa mínima (que é mais baixa para os valores medidos do que para os simulados) para os pontos localizados na área urbana (P3, P4 e P5). Para os pontos localizados no Parque Lagoa do Nado (P1 e P2) a maior diferença é observada às 18 horas. O comportamento da umidade relativa do ar simulada é semelhante ao da umidade medida, apresentando valor máximo no horário de 6 ou 7 horas e valor mínimo no horário de 15 ou 16 horas.

A partir da análise descritiva da umidade relativa do ar obtida na simulação e no monitoramento (TABELA 6) é possível observar que existe concordância quando comparados os pontos que apresentaram as maiores médias, sendo os dois pontos localizados no Parque Lagoa do Nado – Mata (P1) e Quadra (P2) e o valor máximo, sendo o ponto Mata (P1). Entretanto, o ponto que apresentou menor média na simulação foi o Academia (P3) e no monitoramento foi o ponto Oficina (P4) e o ponto que apresentou valor mínimo na simulação foi o ponto Bar (P5) e no monitoramento foi o ponto P4.

O fato da umidade relativa média simulada do ponto Academia (P3) ser menor que a dos outros dois pontos localizados na área urbana talvez possa ser explicado por este ponto ser o que recebe maior contribuição da área urbana na modelagem tendo em vista

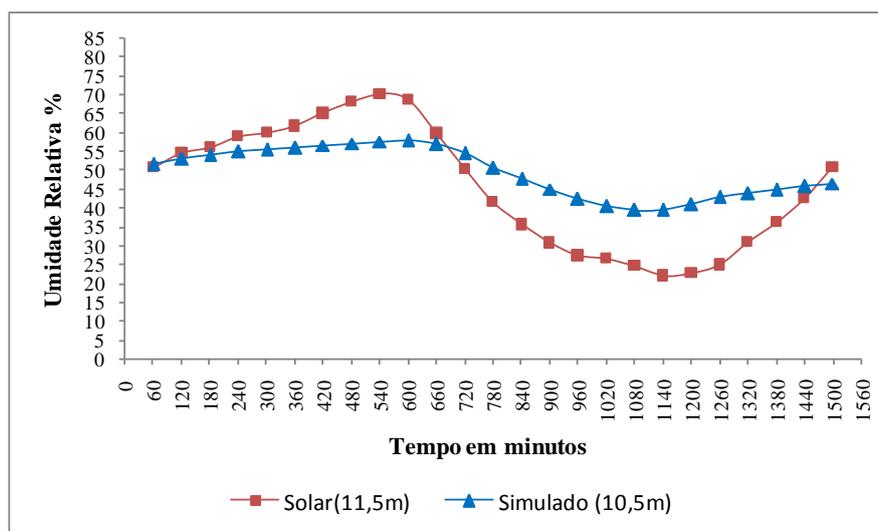
a disposição dos pontos na área de estudo de caso conforme já comentado ao abordar a questão da temperatura.

Tabela 6: Umidade Relativa do ar obtida na simulação e no monitoramento

Ponto	N	Minimo	Máximo	Média	Desvio
URsimul. P1(mata)	25	46,00	71,00	60,44	9,05
URsimul. P2(quadra)	25	47,00	69,00	60,12	8,38
URsimul.P3(academia)	25	38,00	58,00	49,00	6,85
URsimul. P4(oficina)	25	38,00	59,00	49,36	7,44
URsimul.P5(bar)	25	37,00	61,00	49,68	8,49
UR P1 (mata)	25	31,00	78,00	56,76	15,78
UR P2 (quadra)	25	33,00	75,00	56,12	14,37
UR P3 (academia)	25	31,00	68,00	53,16	11,88
UR P4 (oficina)	25	27,00	73,00	50,52	16,00
UR P5 (bar)	25	30,00	71,00	51,32	14,01

O gráfico 39 abaixo mostra a comparação entre os dados medidos a 11,5 metros e o simulado a 10,5 metros. O valor máximo de umidade relativa do ar corresponde a 7 horas na simulação e a 6 horas no monitoramento, e o valor mínimo na simulação corresponde a 15 horas e no monitoramento 16 horas.

Gráfico 39: Umidade Relativa do ar medida a 11,5 m e simulada a 10 m (simulação da área total)



Nota referente aos Gráficos 39 a 51: eixo x- 0 à partir de 22 horas.

Fonte: produzido pela autora.

Os gráficos 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 e 51 mostram a comparação entre as simulações com solo argiloso e arenoso na área de aninhamento, sendo que para estes últimos a aproximação entre dados simulados e medidos é maior.

Gráfico 40: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto academia-P3)

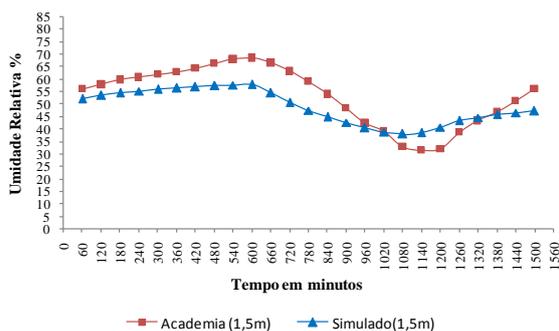


Gráfico 41: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto academia-P3)

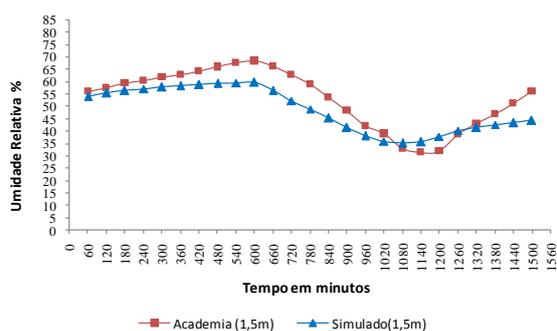


Gráfico 42: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto bar P5)

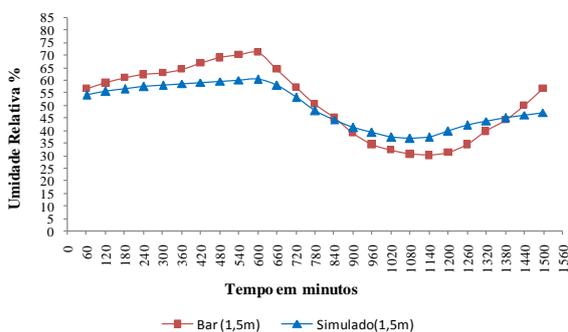


Gráfico 43: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto bar)

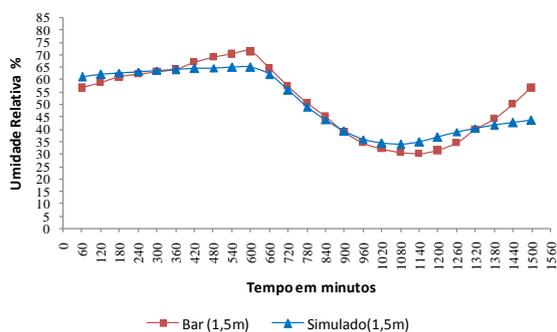


Gráfico 44: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto oficina-P4)

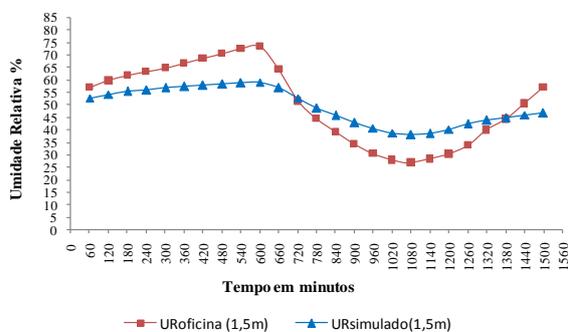
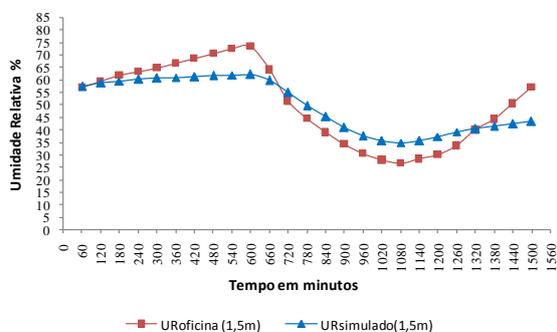


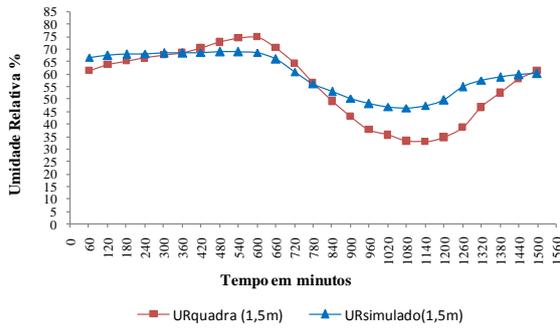
Gráfico 45: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto oficina)



Fonte: produzido pela autora.

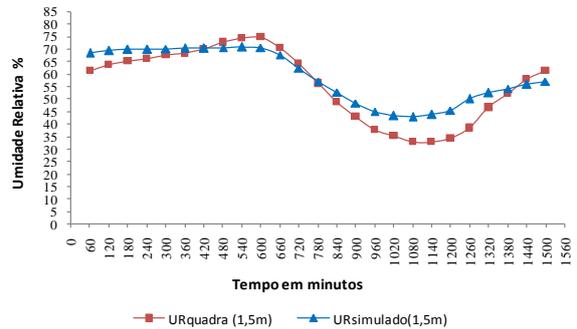
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 46: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto quadra- P2)



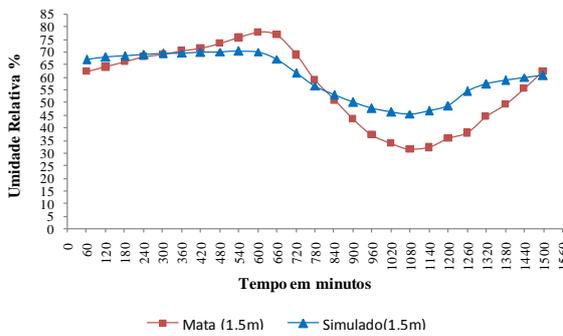
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 47: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto quadra-P2)



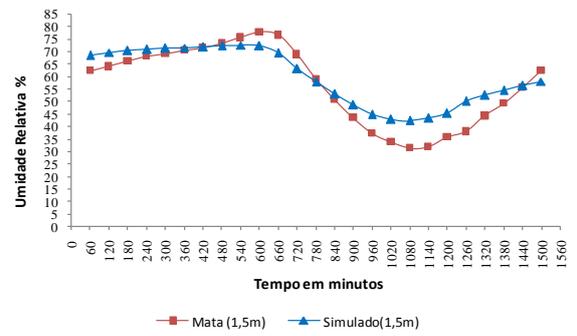
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 48: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (ponto mata P1)



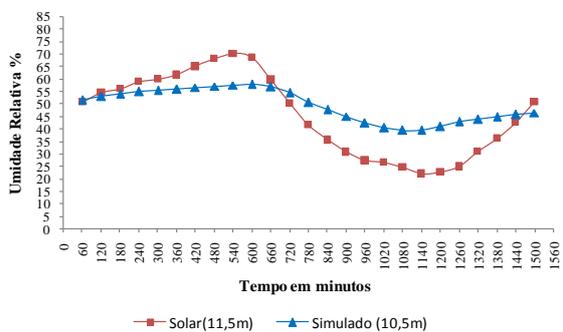
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 49: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (ponto mata P1)



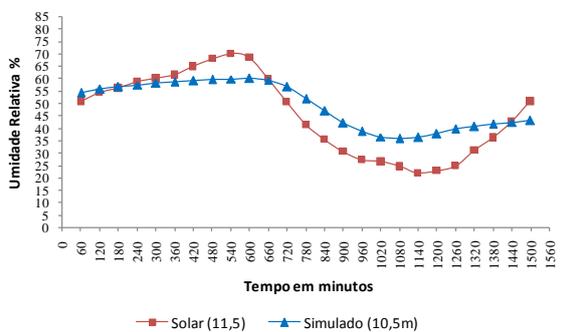
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 50: simulação com solo argiloso na área de aninhamento (Torre meteorol. 11,5 m)



Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 51: simulação com solo arenoso na área de aninhamento (Torre meteorol. 11,5 m)

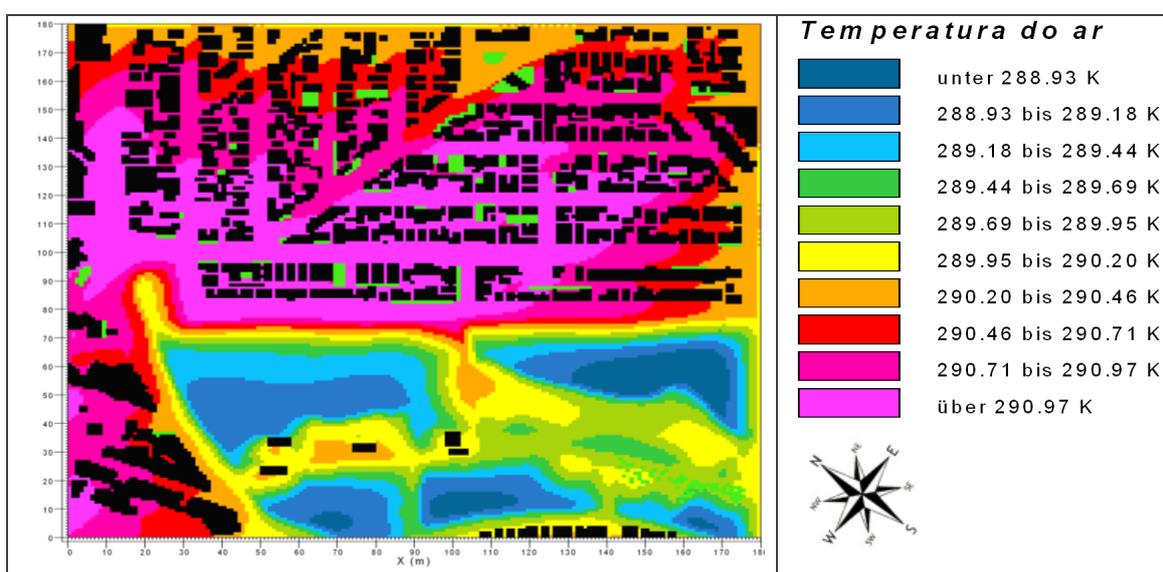


Fonte: produzido pela autora.

4.3.4 Mapas gerados para toda a área de estudo de caso

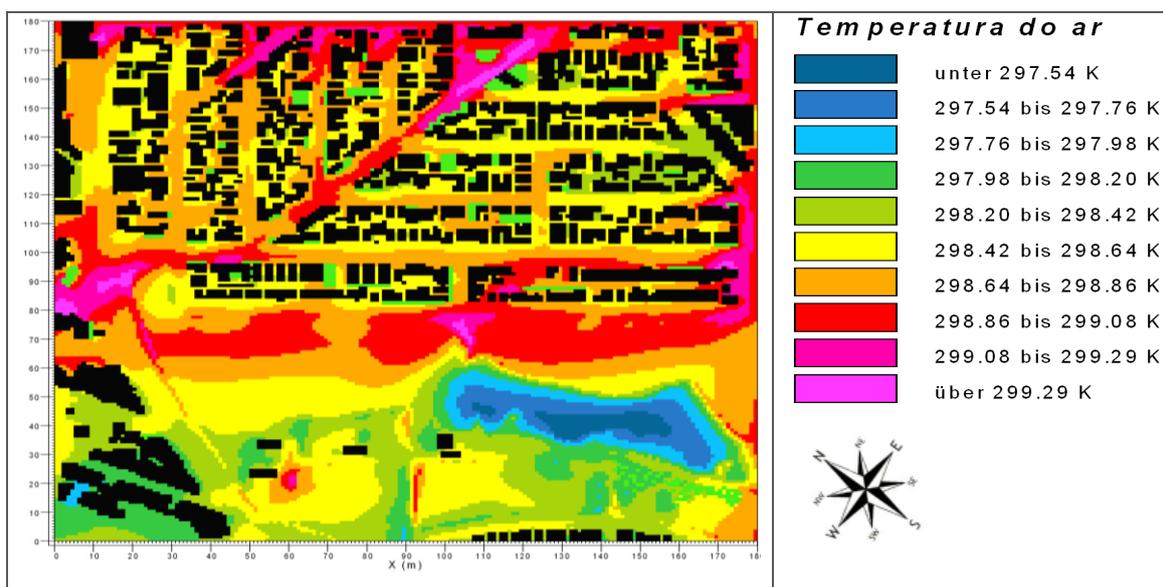
As figuras 34 e 35 apresentam os mapas de temperatura do ar simulada gerados pela ferramenta Leonardo© com corte na altura de 1,20 m, às 7 horas da manhã e às 15 horas. As temperaturas do ar previstas para o horário de 7 horas variaram de 288,93 K (15,93°C) a acima de 290, 97 K (17,97°C), e para o horário de 15 horas variaram de 297, 54 K (24, 54 °C) a acima de 299, 29 K (26, 29 °C).

Figura 34: Caso Real às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Figura 35: Caso Real às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Tanto às 7 horas quanto às 15 horas, os menores valores de temperatura são observados no Parque Lagoa do Nado. Observa-se que os menores valores dentro do parque concentram-se principalmente na região da lagoa e os maiores valores nas áreas pavimentadas próximas às edificações. Ressalta-se que as temperaturas monitoradas nestes horários também são menores no parque em relação ao entorno urbanizado.

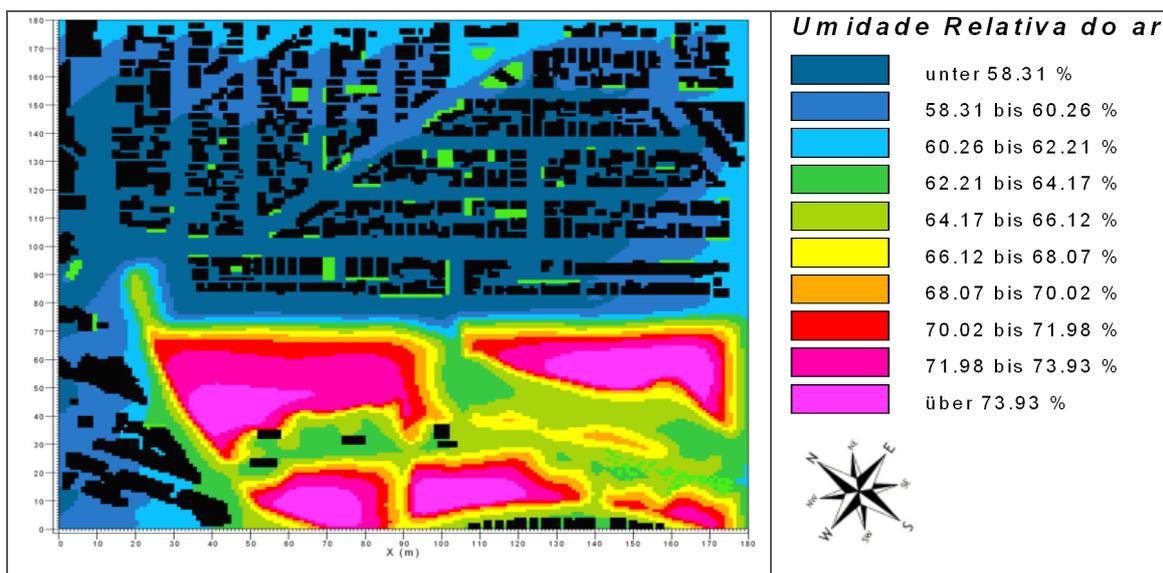
Quanto aos maiores valores de temperatura, para o horário de 7 horas estes são observados em todo o entorno urbanizado do parque, sendo que as bordas da área de estudo a nordeste e a noroeste apresentam temperaturas um pouco menores, talvez por influencia da área de aninhamento e um trecho da ocupação urbana a jusante do parque também apresenta temperaturas um pouco menores do que a maior parte da área urbana o que poderia ser justificado pela influência do parque.

Já para o horário de 15 horas as maiores temperaturas concentram-se nas bordas da área de estudo a nordeste e a noroeste, nas vias de direção leste – oeste e na região onde se localiza uma avenida- entre o parque e a área urbana. As temperaturas das áreas entre as edificações são um pouco menores que as temperaturas das vias, possivelmente em função do sombreamento entre edificações. Neste horário a ocupação urbana a jusante do parque apresenta temperaturas menores em relação a ocupação a montante do parque (com diferenças de até 1,5°C). Isso pode ser um indício da influencia do parque na minimização da temperatura nesta porção da área de estudo.

As figuras 36 e 37 abaixo apresentam mapas de umidade relativa do ar. As umidades previstas para o horário de 7 horas variaram de 58,31% a acima de 73,93% e para o horário de 15 horas variaram de 37,40% a acima de 47,62%.

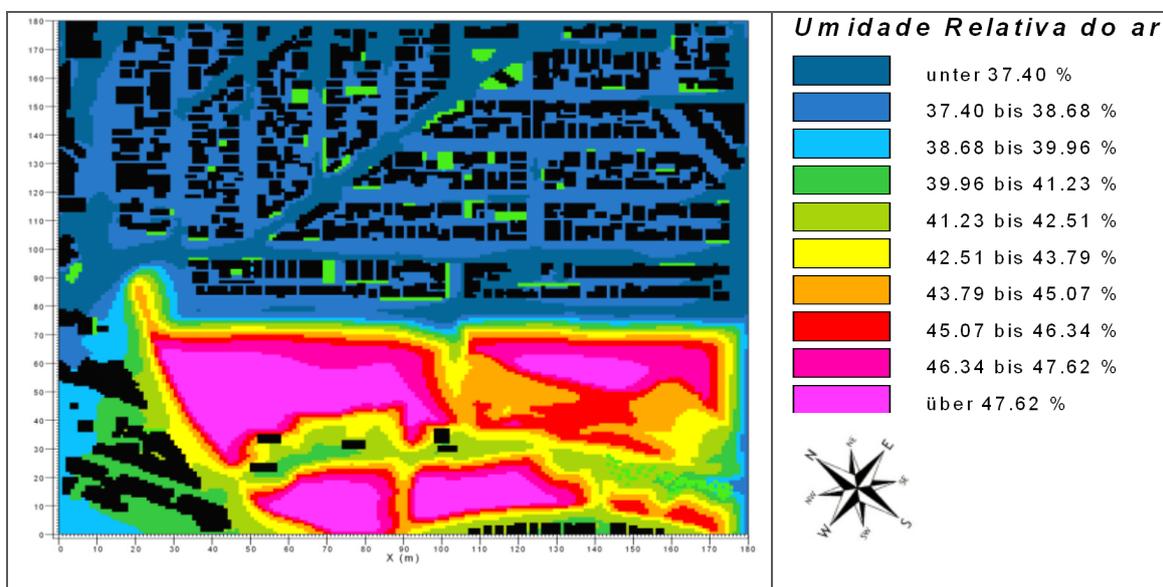
As maiores taxas de umidade relativa do ar se concentram na área do Parque Lagoa do Nado. Observa-se que para o horário de 15 horas toda a área a jusante do parque apresenta valores superiores à área urbana a montante do parque, o que conforme já dito, pode ser um indício da influencia do parque. Nas áreas localizadas entre as edificações concentram-se valores maiores do que nas vias possivelmente em função do sombreamento das edificações.

Figura 36: Caso Real às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

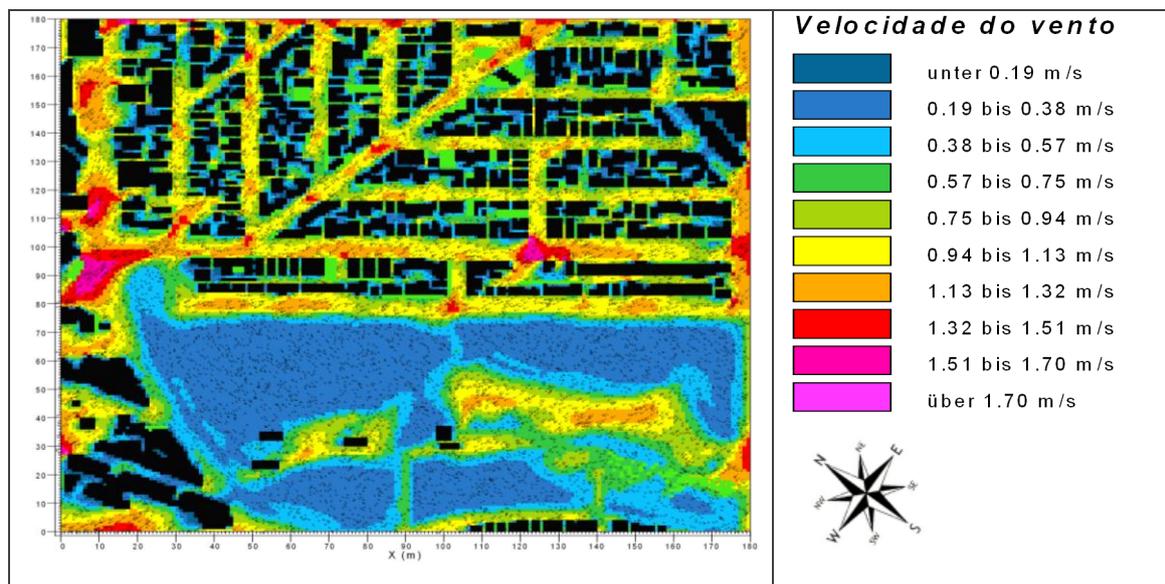
Figura 37: Caso Real às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

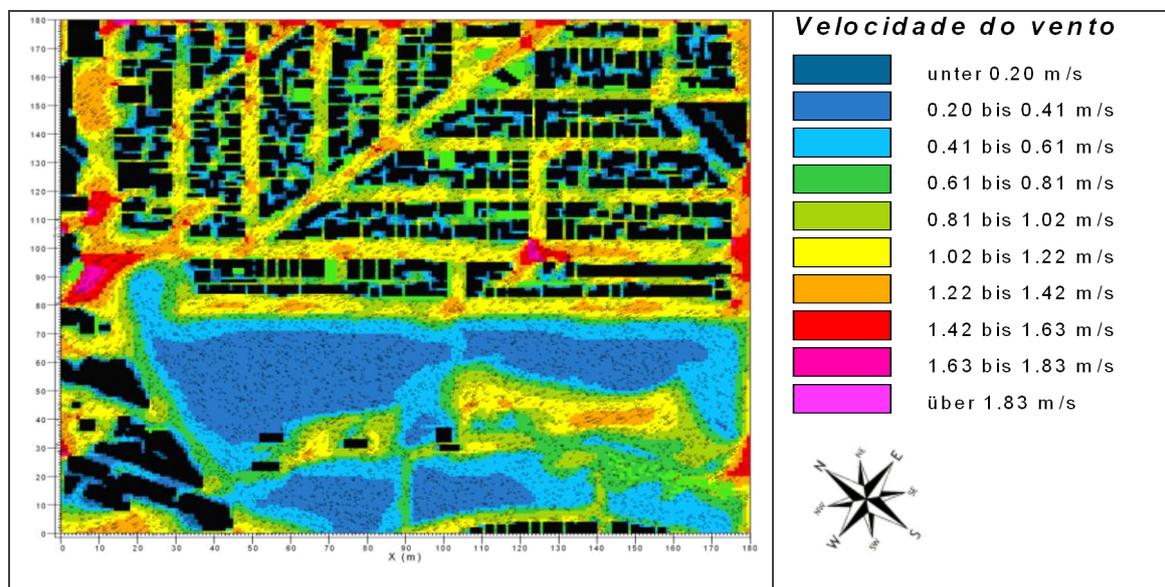
As figuras 38 e 39 referem-se aos mapas de velocidade do vento. A questão do vento no ambiente urbano é complexa e uma análise detalhada dos mecanismos de fluxo de vento não foi possível no âmbito do presente estudo. No entanto, observa-se que os valores são menores quando há obstáculos como as edificações e massas arbóreas.

Figura 38: Caso real às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Figura 39: Caso real às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

A seguir são apresentados os resultados dos cenários de verticalização e de substituição da cobertura vegetal do Parque Lagoa do Nado para se verificar o impacto destas

alterações nas respostas do modelo para temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

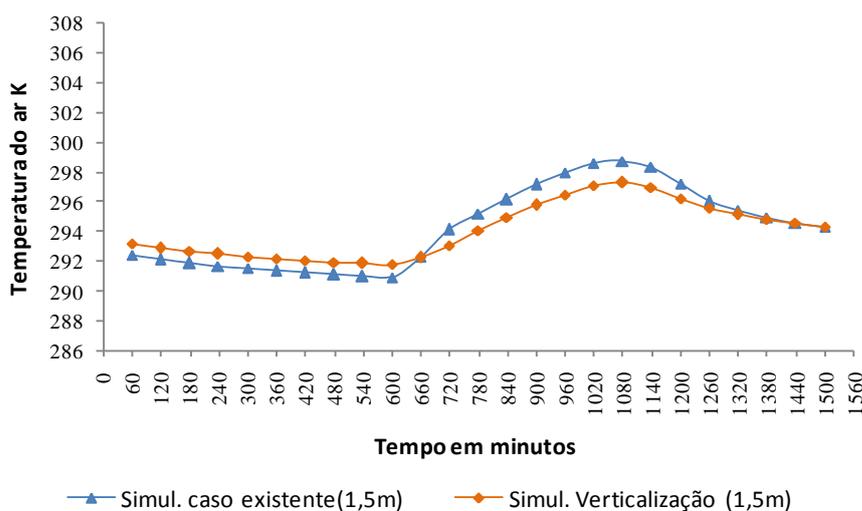
4.4 SIMULAÇÃO - CENÁRIO DE VERTICALIZAÇÃO

Esse cenário corresponde à verticalização das edificações da área de estudo de caso, substituindo a altura real dos edifícios (que em sua maioria possuem 3 metros) pela altura de 18 metros (correspondente a edifícios de 6 andares). Quanto aos dados de configuração de entrada, todos os parâmetros foram mantidos iguais ao da simulação para o caso de referência.

4.4.1 Temperatura do ar

A comparação entre a temperatura do ar obtida para os pontos de monitoramento na simulação da área real e na simulação do cenário de verticalização pode ser visualizada nos gráficos 52, 53, 54, 55 e 56.

Gráfico 52: temperatura do ar simulada para o caso existente e para o cenário de verticalização (ponto academia- P3)



Nota referente aos gráficos 52 a 61: eixo x- 0 à partir de 22 horas.
Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 53: temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (bar- P5)

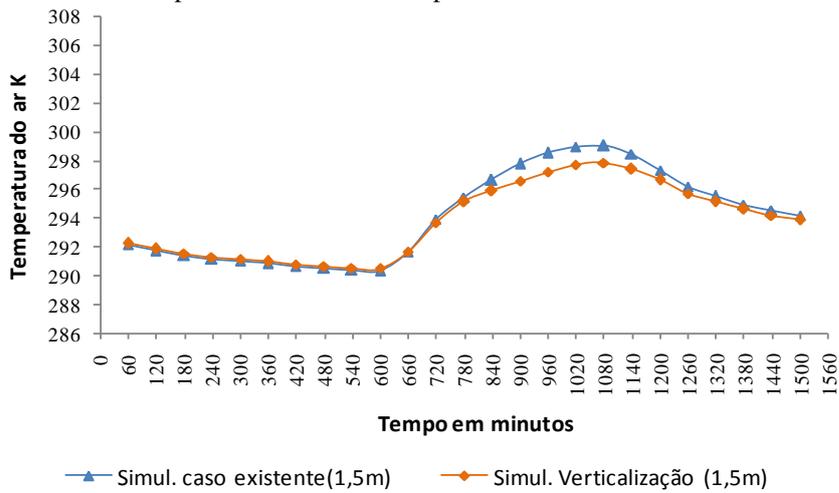


Gráfico 54: temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (oficina- P4)

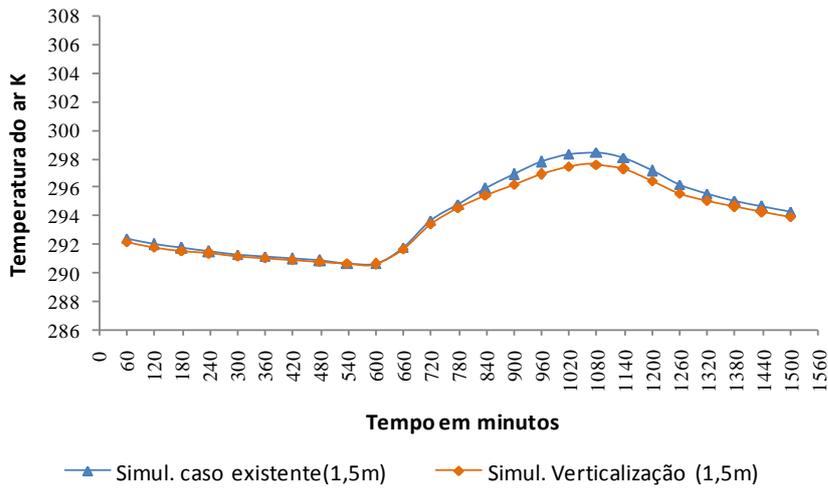


Gráfico 55: temp. do ar simulada para caso existente e cenário de verticalização (quadra- P2)

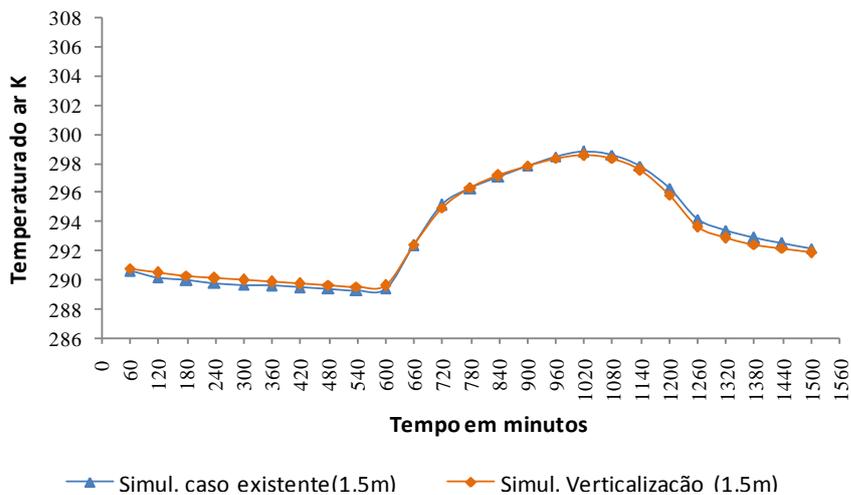
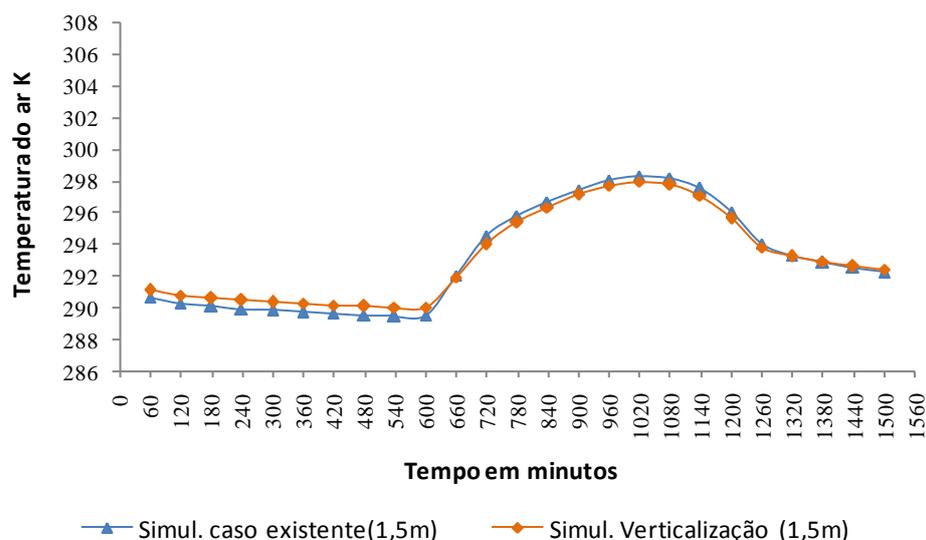


Gráfico 56: temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (mata-P1)



Com a verticalização das edificações da área de estudo de caso, para os dois pontos localizados no parque (P1 e P2) e para dois dos pontos localizados na área urbana-Academia (P3) e Bar (P5), observa-se o aumento de temperatura no período noturno até 7 ou 8 horas da manhã, atingindo o valor máximo de aumento de $0,3^{\circ}\text{C}$ para o ponto Mata (P1) 1 hora, $0,6^{\circ}\text{C}$ para o ponto Quadra (P2) às 5 horas, $0,9^{\circ}\text{C}$ para o ponto Academia às 6 horas e $0,2^{\circ}\text{C}$ para o ponto Bar às 7 horas. A partir de 7 ou 8 horas observa-se a redução da temperatura do ar atingindo o valor máximo de redução de $0,6^{\circ}\text{C}$ às 9 horas para o ponto Quadra (P2), $0,6^{\circ}\text{C}$ às 18 horas para o ponto Mata (P1), $1,5^{\circ}\text{C}$ às 14 horas para o ponto Academia (P3) e $1,3^{\circ}\text{C}$ às 13 horas para o ponto Bar (P5). Para o ponto Oficina ocorre redução da temperatura do ar nos períodos diurno e noturno, atingindo o valor máximo de redução de $0,9^{\circ}\text{C}$ às 14 horas.

O fato destes valores (aumento de temperatura no período noturno de $0,9^{\circ}\text{C}$ e redução da temperatura no período diurno de $1,5^{\circ}\text{C}$) terem sido maiores para o ponto academia pode estar ligado ao fato dele ser o mais cercado pela porção urbana da área de estudo de caso (conforme a distribuição dos pontos no recorte selecionado para a modelagem) e receber uma maior influência desta porção urbana considerando a direção preferencial do vento. Os outros dois pontos na área urbana possivelmente recebem uma maior influência da área de aninhamento.

O aumento da temperatura do ar no período noturno com a verticalização das edificações poderia ser justificado pela diminuição do fator de visão do céu e, portanto, das trocas por radiação de onda longa durante a noite. Conforme apontado por Brandão (2009), no modelo ENVI-Met© a temperatura interna dos edifícios é mantida constante e a troca por condução desconsidera o acúmulo de calor na estrutura do edifício. No entanto, a modelagem é eficiente quando trata das trocas radiativas, calculando as interreflexões da radiação de onda curta nos *canyons* e as trocas de onda longa por aquecimento das superfícies. Considerando o que foi apontado por Brandão, este aumento de temperatura observada no período noturno com a verticalização das edificações poderia ser ainda maior caso o modelo considerasse as trocas por condução entre o edifício e o ambiente externo. Quanto à redução da temperatura no período diurno em função da verticalização, esta já havia sido apontada em resultados obtidos com a modelagem numérica (Nakata, 2010). Este fato poderia se justificar pelo fato das edificações, mais altas no cenário hipotético, aumentarem a área de sombreamento no bairro, o que faz com que as temperaturas também decaiam.

4.4.2 Umidade Relativa do ar

Os gráficos 57, 58, 59, 60 e 61 mostram a comparação dos resultados para umidade relativa do ar na simulação do caso real e no cenário de verticalização.

Gráfico 57- Umidade relativa do ar simulada para o caso existente e para o cenário de verticalização (academia-P3)

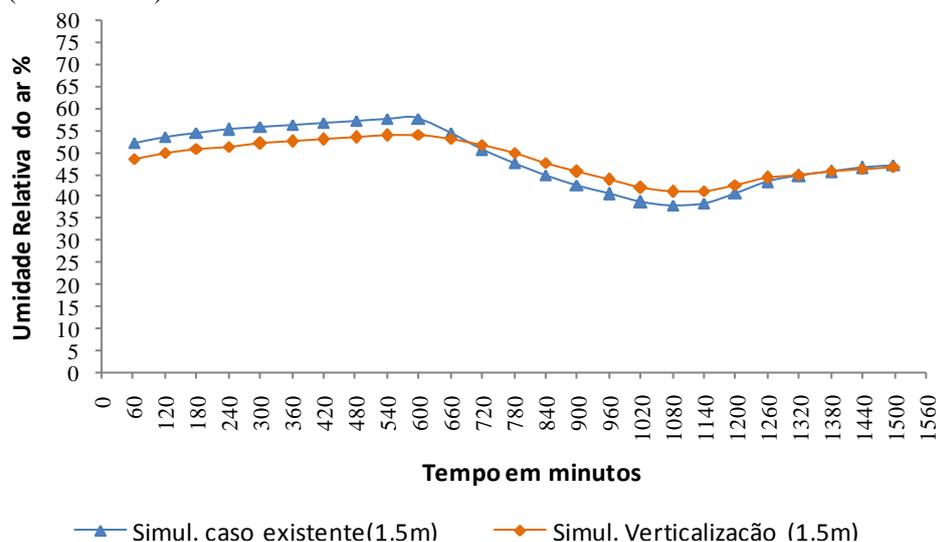


Gráfico 58: Umidade Relativa do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (bar- P5)

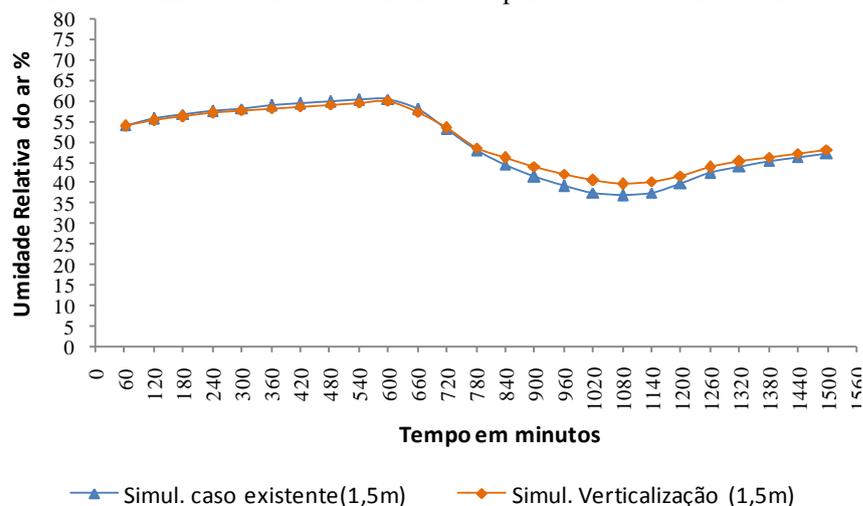


Gráfico 59: UR do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (oficina- P4)

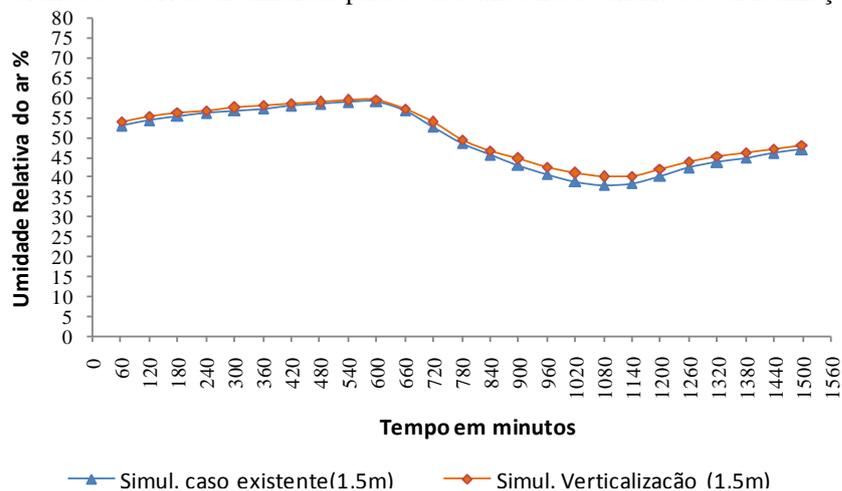


Gráfico 60: UR do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (quadra-P2)

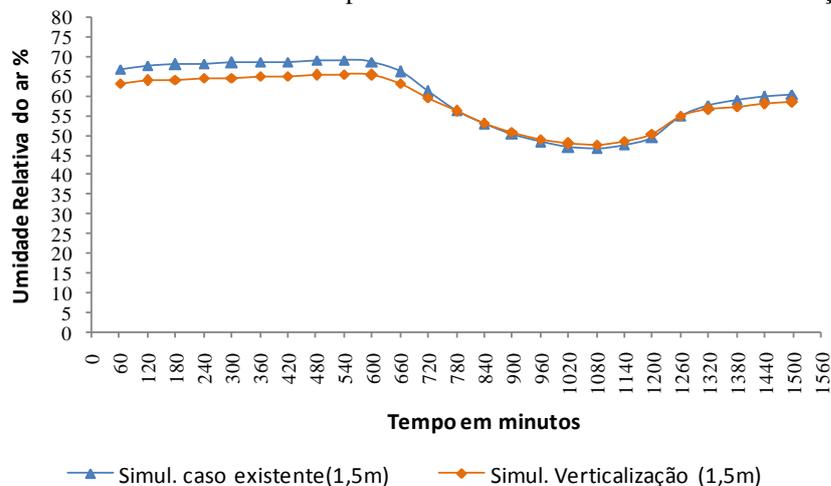
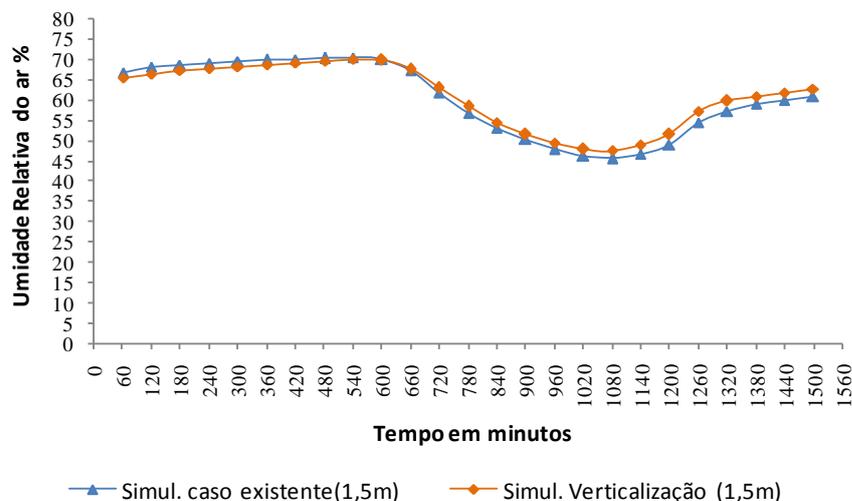


Gráfico 61: Umidade Relativa do ar simulada para o caso existente e cenário de verticalização (mata-P1)



Observa-se que com a verticalização das edificações na área de estudo há redução da umidade relativa do ar no período noturno e aumento durante o dia para os pontos Mata (P1), Quadra (P2), Academia (P3) e Bar (P5) e para o ponto Oficina (P4) o aumento da umidade relativa do ar no período diurno e noturno.

4.4.3 Mapas gerados para toda a área de estudo de caso

As figuras 40 e 41 representam os mapas de temperatura do ar simulada gerados com corte na altura 1,20 m às 7 e às 15 horas. A temperatura do ar prevista para o horário de 7 horas varia de 289 K a acima de 291,50 K no cenário hipotético enquanto na simulação do caso real varia de 288,93 K a acima de 290,97 K, ou seja, com a verticalização das edificações as temperaturas são mais elevadas.

Já para o horário de 15 horas a temperatura do ar no cenário varia de 297,09 K a acima de 298,74 K e para o caso real varia de 297,54 K a acima de 299,29 K, indicando a redução da temperatura no período da tarde com a verticalização. Como pode ser visto no mapa das 7 horas o aumento da temperatura do ar é bem evidente na porção mais impermeabilizada do parque que recebe influência da área urbana à montante (considerando a direção preferencial do vento) e no mapa das 15 horas observa-se que a

redução da temperatura do ar é bem evidente na porção urbana a montante do parque, possivelmente, como já comentado, em função do sombreamento das edificações.

Figura 40: Cenário de Verticalização às 07:00 horas

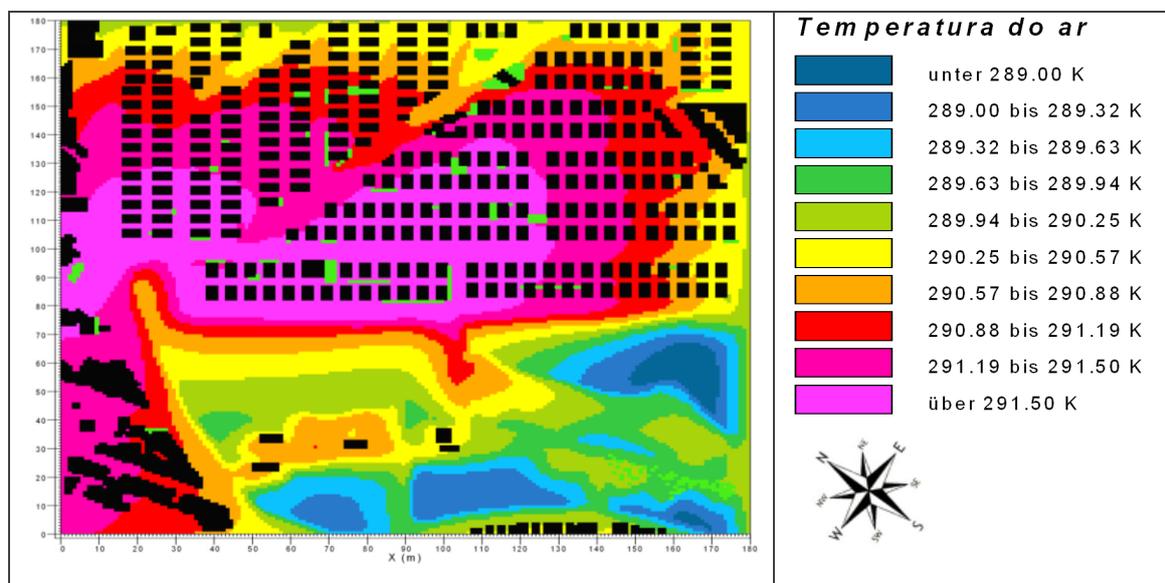
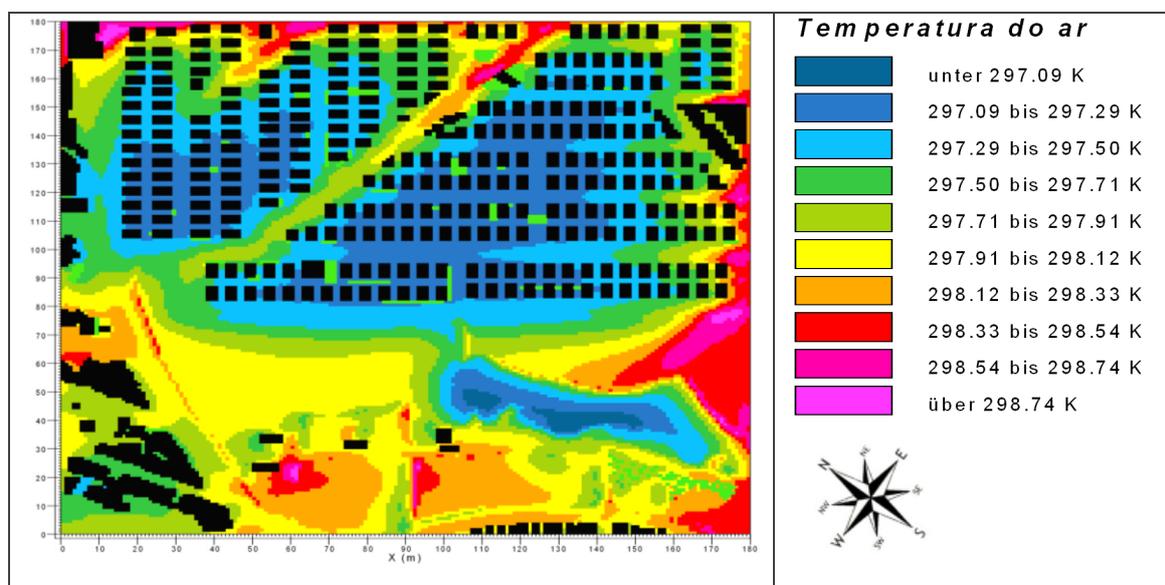


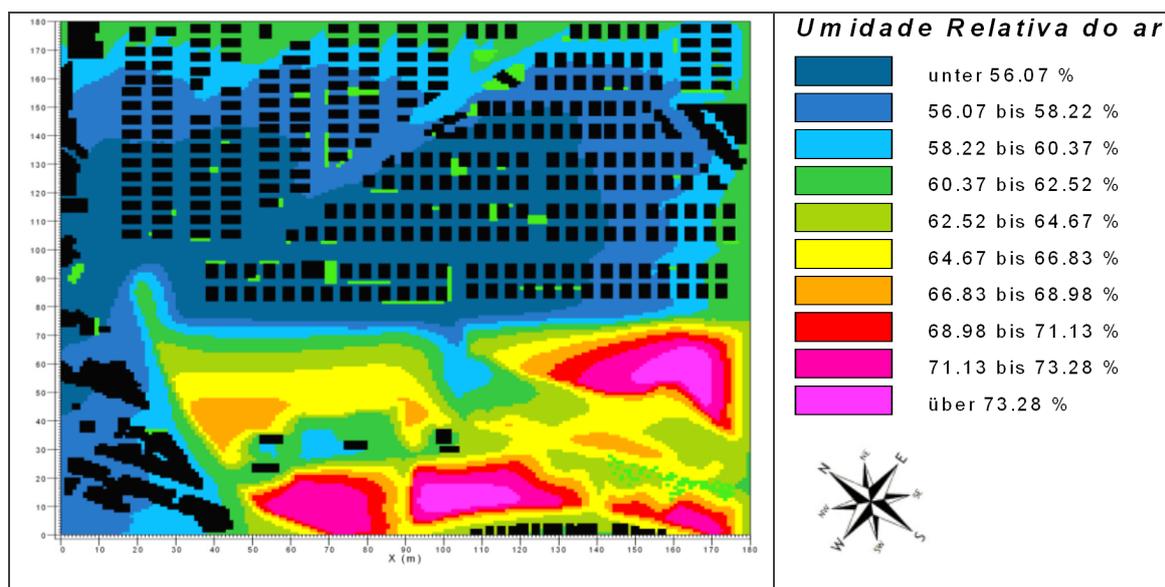
Figura 41: Cenário de Verticalização às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

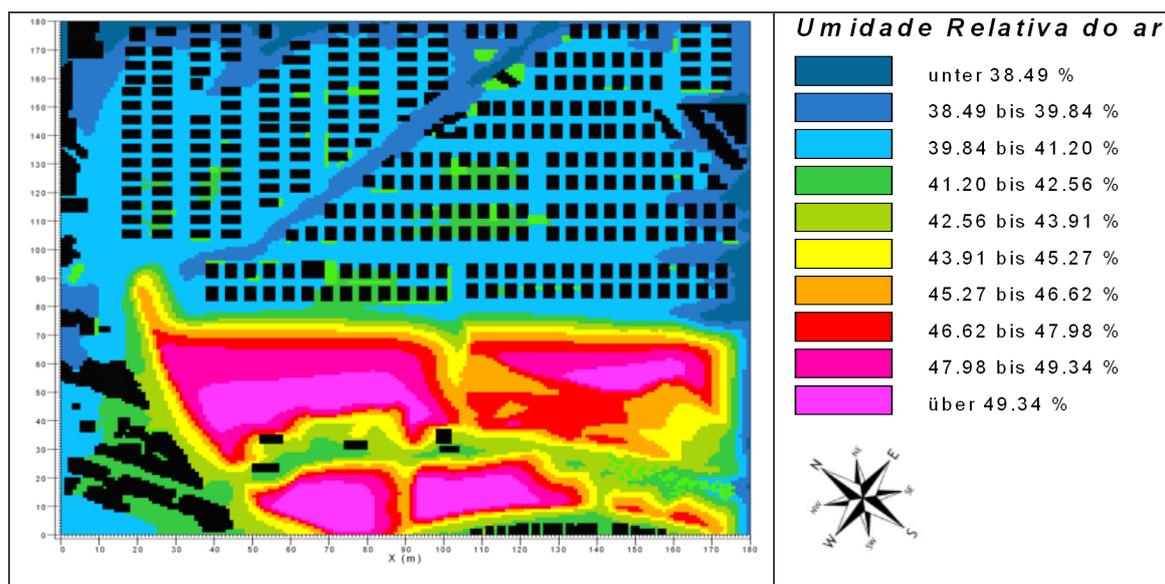
As figuras 42 e 43 representam os mapas de umidade relativa do ar às 7 e às 15 horas. Às 7 horas observam-se valores mais baixos de umidade relativa do ar em relação à simulação para o caso real e às 15 horas os valores de umidade relativa do ar são mais altos que na simulação para o caso real.

Figura 42: Cenário de Verticalização às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Figura 43: Cenário de Verticalização às 15:00 horas



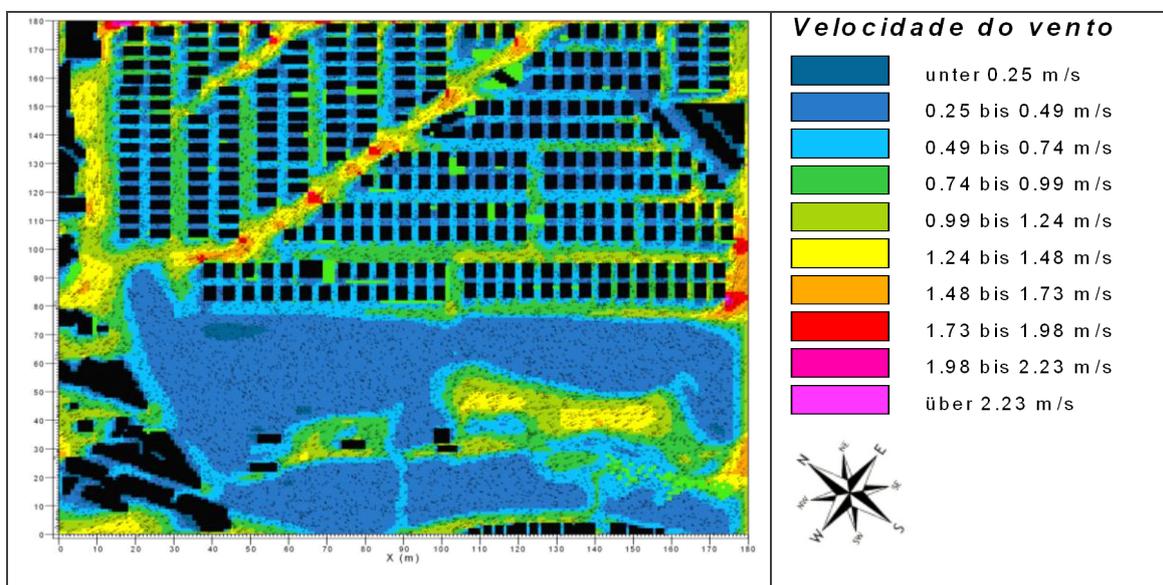
Fonte: produzido pela autora.

As figuras 44 e 45 referem-se aos mapas de velocidade do vento às 7 e as 15 horas. Nota-se que com a verticalização, nas áreas entre as edificações ocorre redução da velocidade do vento.

Emmanuel *et al* (2007) aponta que a alta proporção de altura do edifício e largura da rua (H/W) pode ser favorável, pois proporciona menor temperatura do ar durante do dia e mais sombra ao nível da rua. No entanto o cuidado deve ser tomado ao permitir uma forma urbana mais compacta, com canyons profundos de rua, especialmente em áreas residenciais, porque a possibilidade de ventilação natural e resfriamento noturno dos edifícios diminui com uma maior relação H/W.

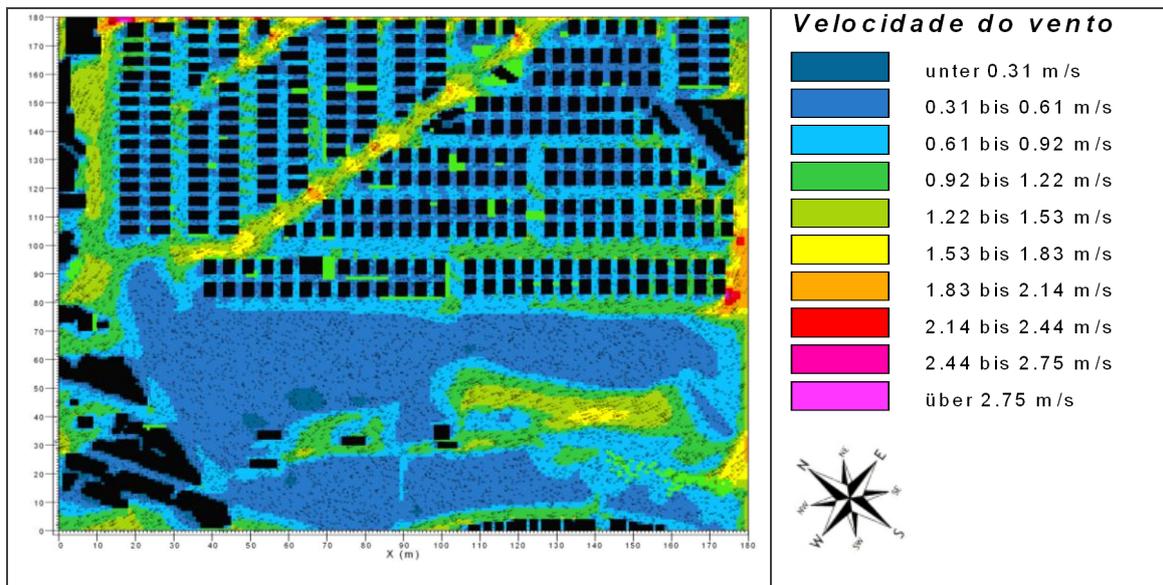
Estratégias de sombreamento devem considerar a necessidade de promover a ventilação na escala de bairro, o que é necessário não só para o conforto térmico, mas também para a melhoria da qualidade do ar.

Figura 44: Cenário de Verticalização às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Figura 45: Cenário de Verticalização às 15:00



Fonte: produzido pela autora.

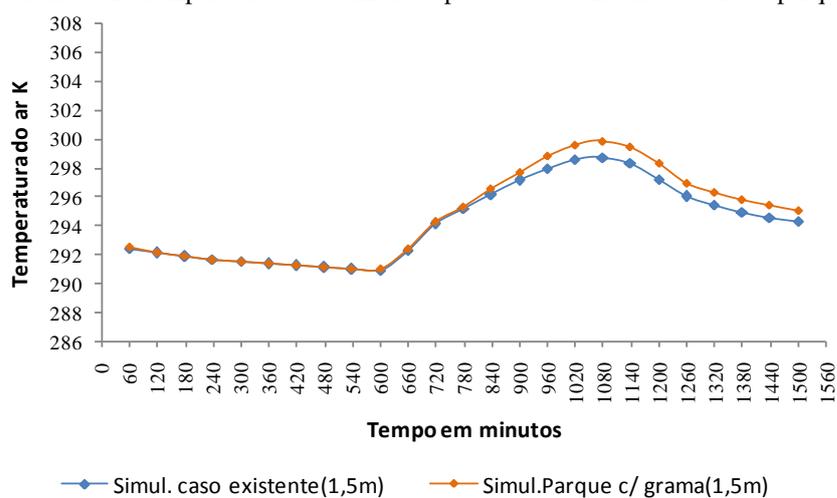
4.5 SIMULAÇÃO – SUBSTITUIÇÃO DA COBERTURA VEGETAL DO PARQUE

Conforme mencionado no capítulo 3 o cenário de substituição da cobertura vegetal do parque corresponde à substituição da vegetação de porte arbóreo por grama. Conforme apontado na simulação anterior os dados de configuração de entrada foram mantidos iguais ao da simulação para o caso de referência.

4.5.1 Temperatura do ar

Os gráficos 62, 63, 64, 65 e 66 mostram a evolução da temperatura do ar simulada para o caso de referencia e para o cenário de substituição da vegetação de porte arbóreo do parque por grama para todos os pontos monitorados.

Gráfico 62: Temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário parque (ponto academia- P3)



Nota referente aos Gráficos 62 a 71: eixo x- 0 à partir de 22 horas.

Fonte: produzido pela autora.

Gráfico 63: Temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário parque (bar- P5)

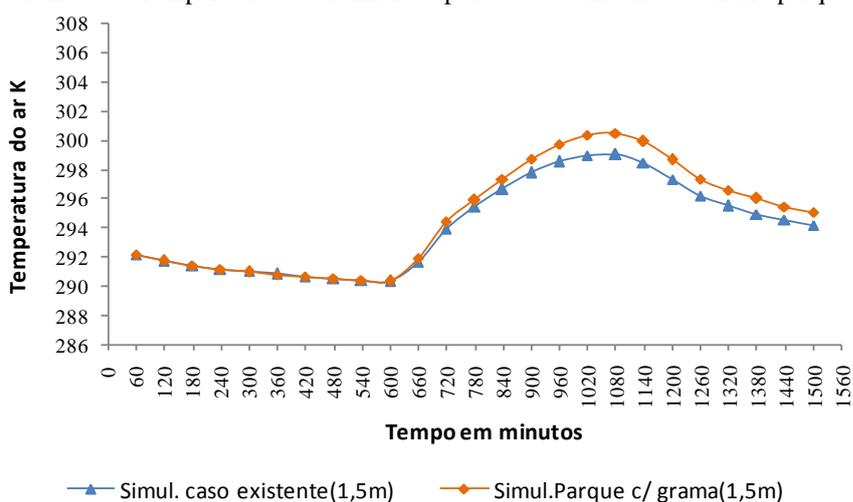


Gráfico 64- Temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário parque (oficina- P4)

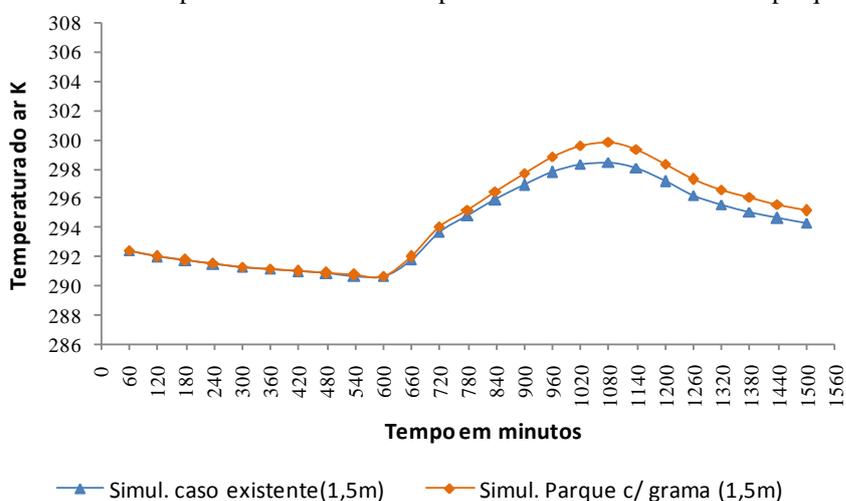


Gráfico 65: temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário parque (quadra-P2)

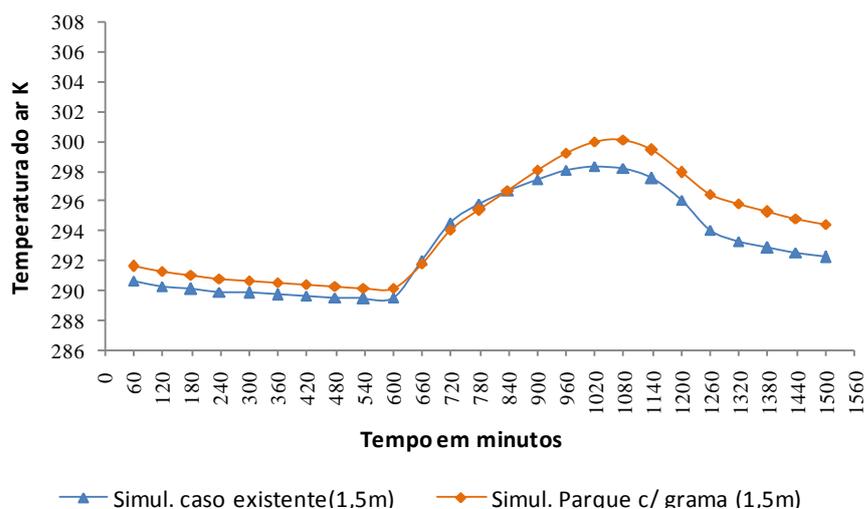
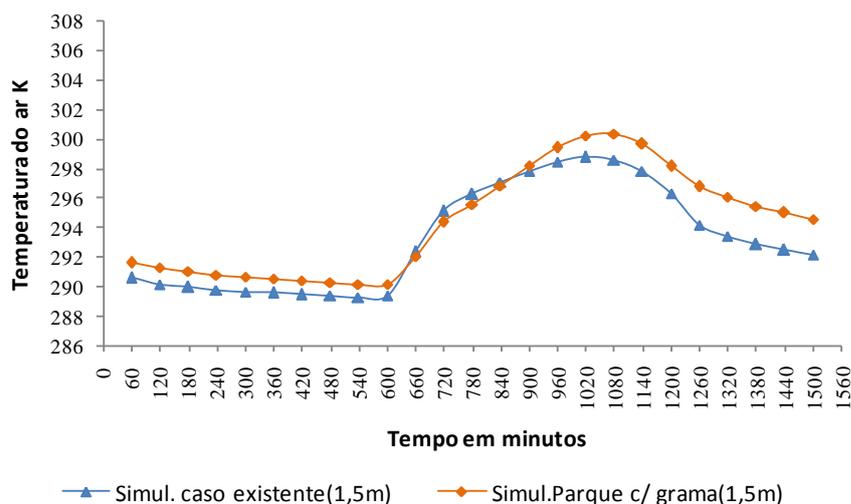


Gráfico 66: Temperatura do ar simulada para o caso existente e cenário parque (mata-P1)



Como pode ser observado nos gráficos acima, os resultados para a simulação de substituição da vegetação de porte arbóreo por grama indicam um aumento da temperatura do ar em relação a simulação para o caso real tanto para os pontos de monitoramento situados no Parque Lagoa do Nado quanto para a área urbana.

Esse aumento de temperatura é maior no período da tarde, à partir das 13 horas. As maiores diferenças de temperatura entre as duas situações foram de 2,5°C para o ponto Quadra (P2), 2,6°C para o ponto Mata (P1), 1,4°C para o ponto Oficina (P4), 1,5°C para

o ponto Bar (P5) e 1,2°C para o ponto Academia (P3). Essas maiores diferenças são no horário de 15 horas (no horário de temperatura máxima) para os pontos localizados na área urbana e no horário de 19 horas para os pontos localizados no parque.

4.5.2 Umidade Relativa do ar

Como mostram os gráficos 67, 68, 69, 70 e 71 ocorre uma redução generalizada da umidade relativa do ar para todos os pontos da área de estudo, sendo os maiores valores nos dois pontos localizados no Parque Lagoa do Nado. As maiores reduções ocorrem no período da tarde, à partir das 13 horas.

Gráfico 67: Umidade relativa do ar simulada para o caso existente e cenário parque (academia-P3)

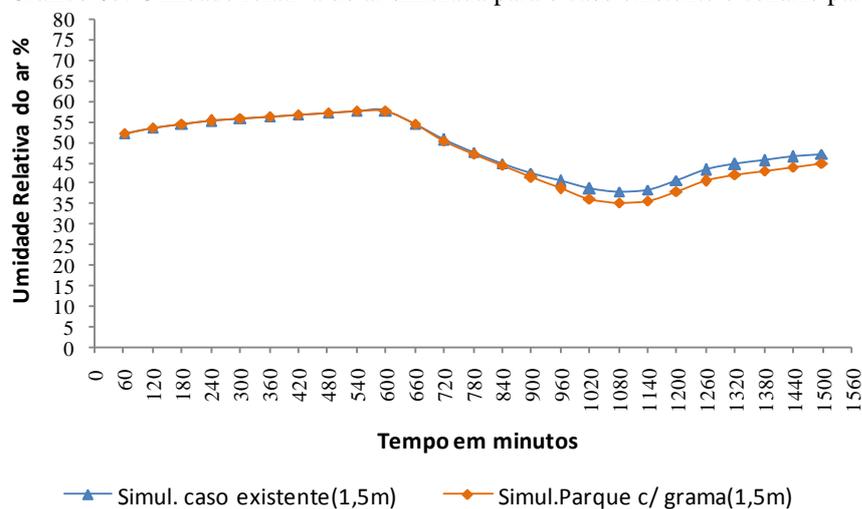


Gráfico 68: Umidade relativa do ar simulada para o caso existente e cenário parque (bar- P5)

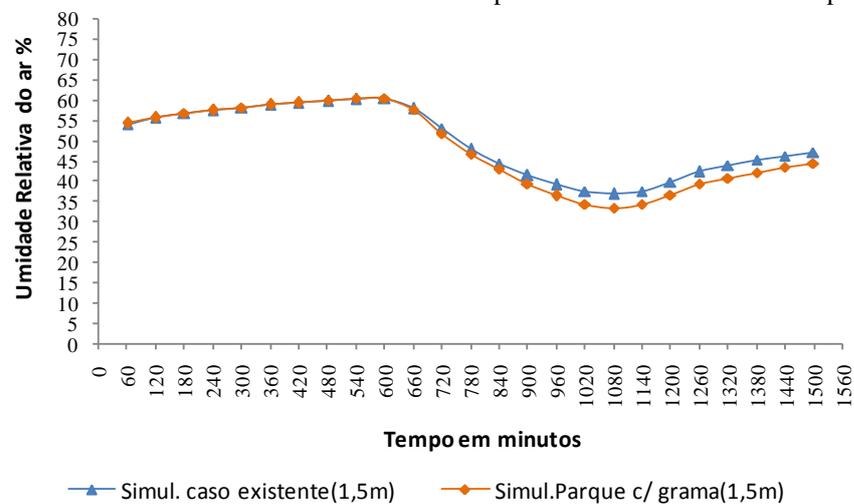


Gráfico 69: Umidade relativa simulada para o caso existente e cenário parque (oficina- P4)

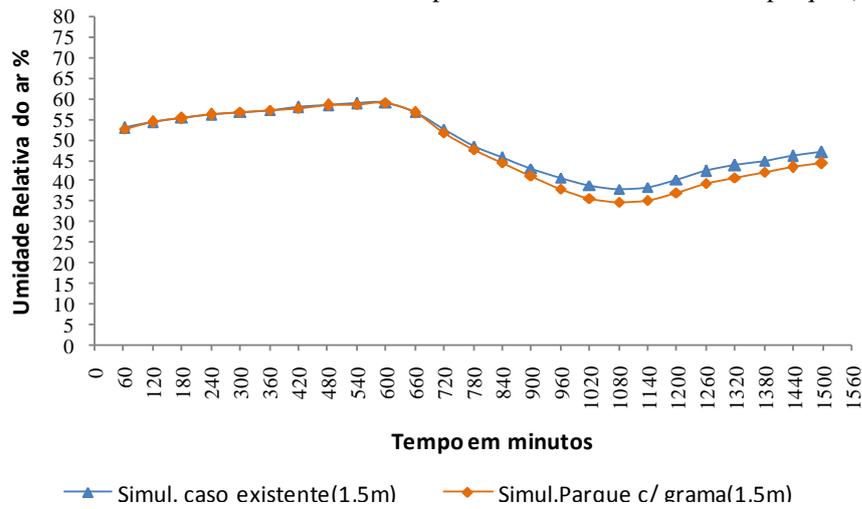


Gráfico 70: Umidade relativa do ar simulada para o caso existente e cenário parque (quadra-P2)

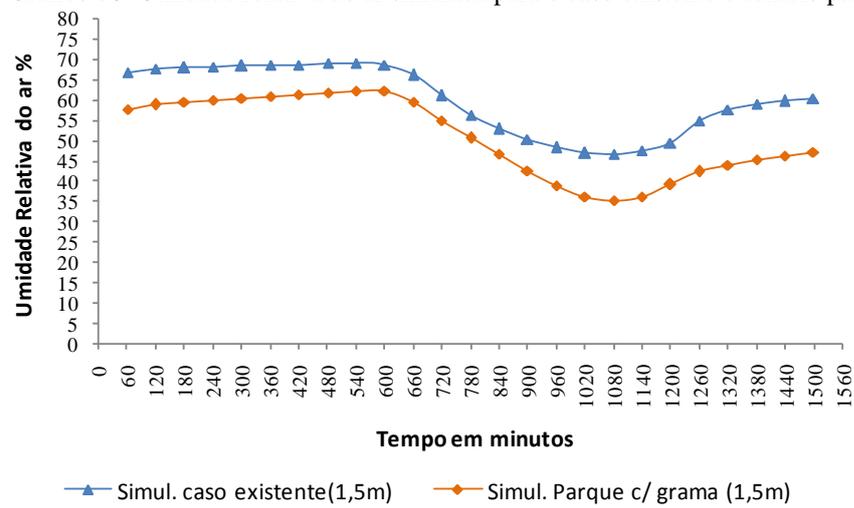
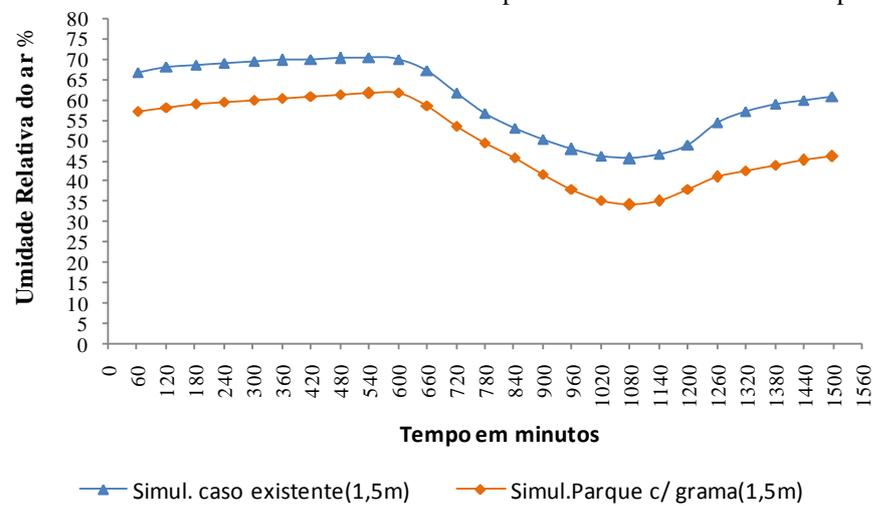


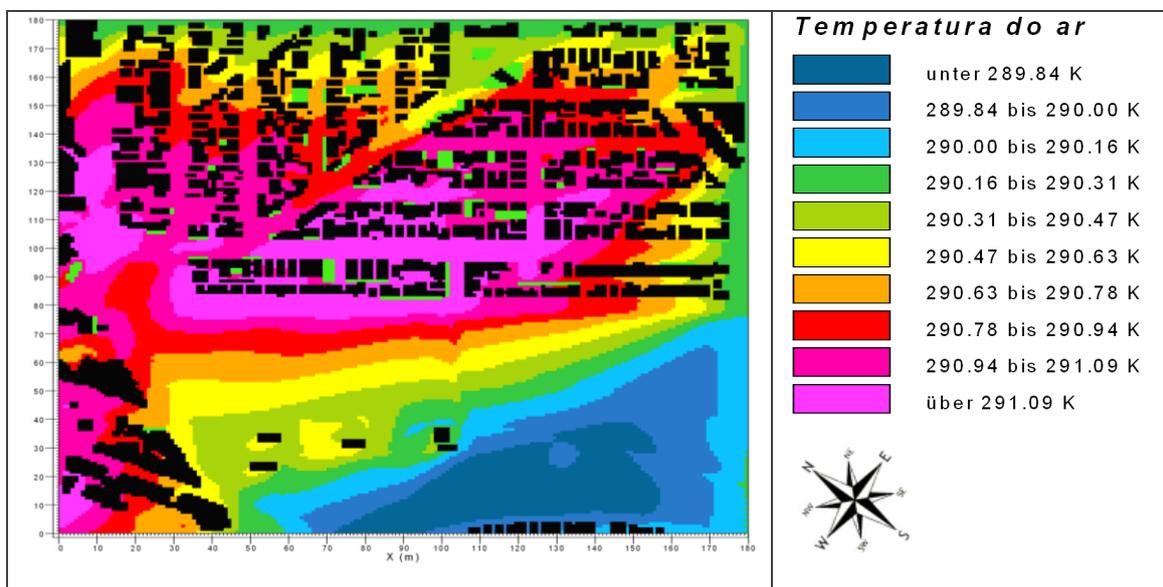
Gráfico 71: Umidade Relativa do ar simulada para o caso existente e cenário parque (mata-P1)



4.5.3 Mapas gerados para toda a área de estudo de caso

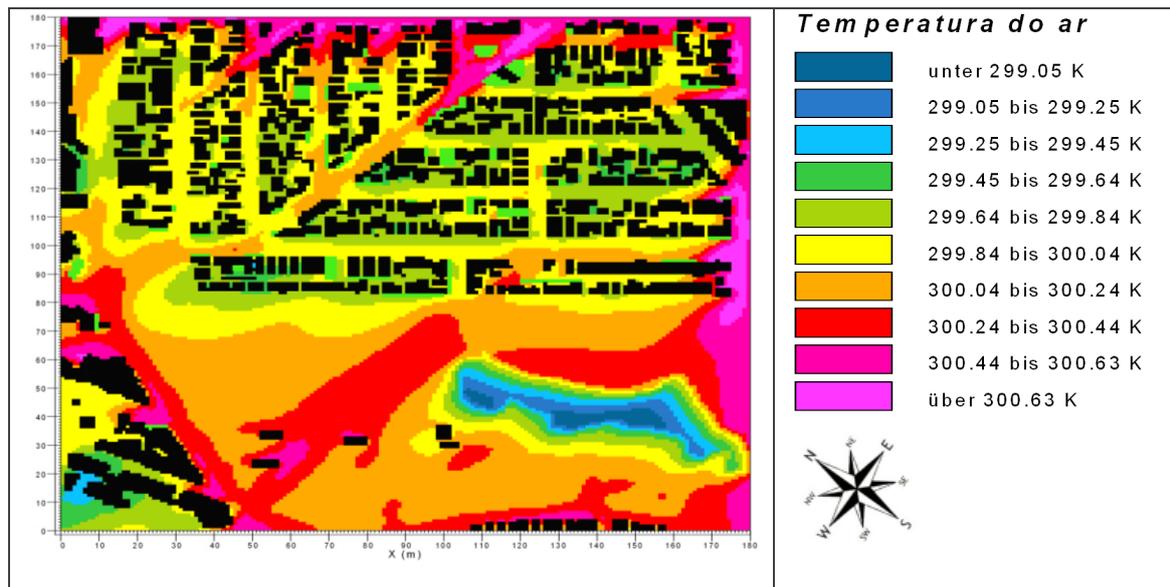
As figuras 46 e 47 apresentam os mapas de temperatura do ar simulada gerados com corte na altura 1,20 m às 7 horas da manhã e às 15 horas. A temperatura do ar prevista para o horário de 7 horas varia de 289,84 K (16,84°C) a acima de 291,09 K (18,09°C) e para o horário de 15 horas varia de 299,95K (26,95°C) a acima de 300,63K (27,63°C). Observa-se que para o caso de referencia às 7 horas a temperatura do ar varia de 288,93 K (15,93°C) a acima de 290,97 K (17,97°C) e para o horário de 15 horas varia de 297,54 K (24,54°C) a acima de 299,29 K (26, 29°C) indicando o aumento de temperatura no cenário de substituição da cobertura vegetal do parque. Este aumento é observado em toda a área de estudo, com valores maiores no Parque Lagoa do Nado conforme já mencionado.

Figura 46: Cenário Parque às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

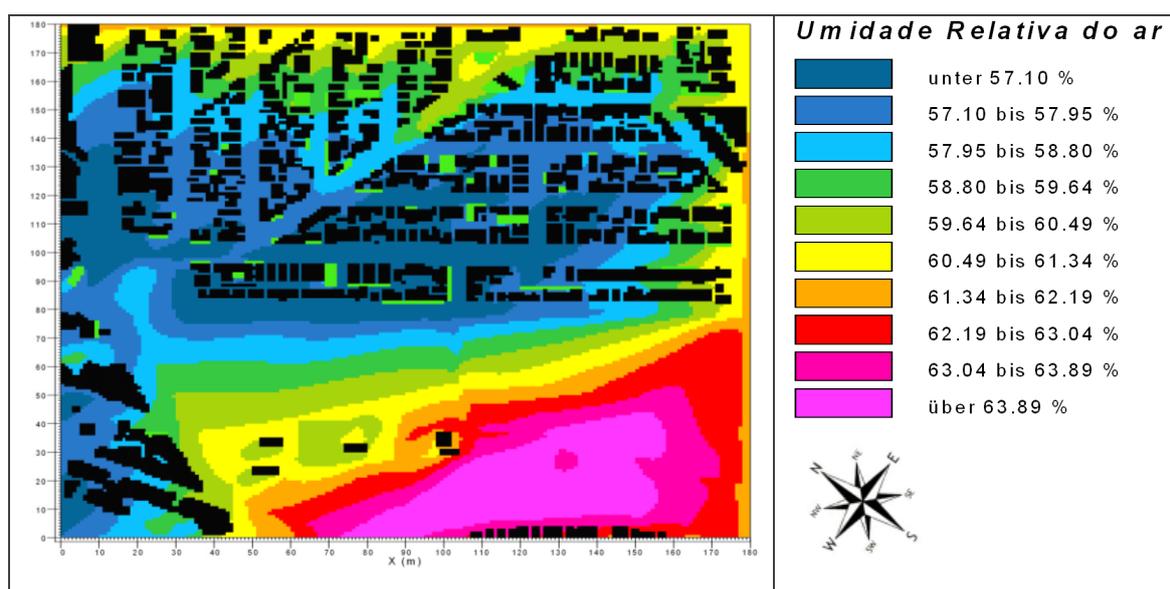
Figura 47: Cenário Parque às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

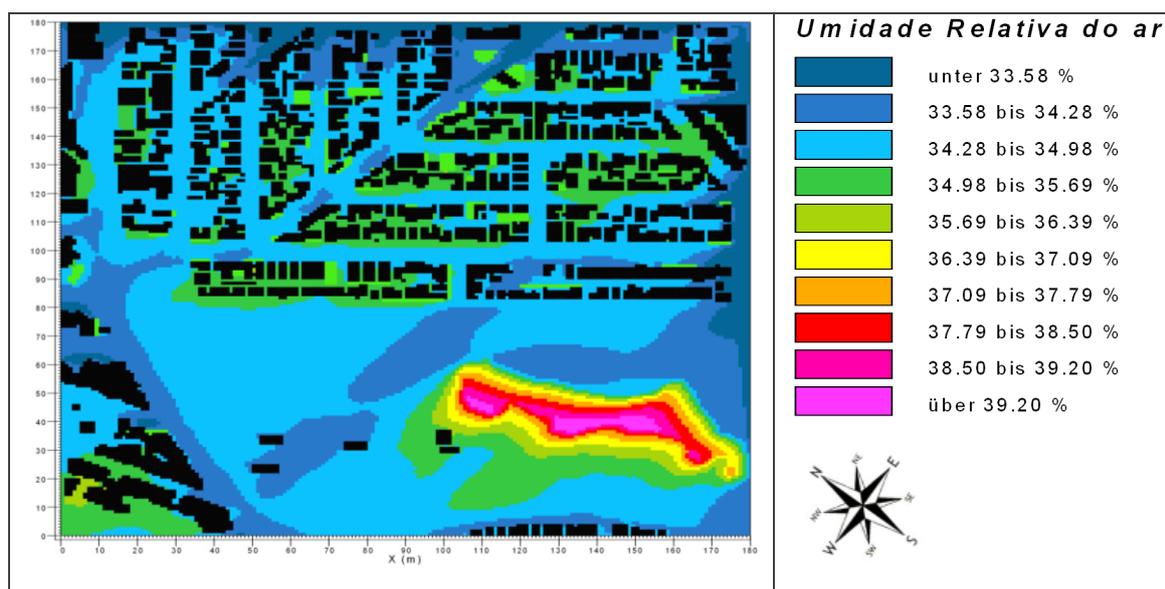
As figuras 48 e 49 apresentam os mapas de umidade relativa do ar às 7 e às 15 horas. Nota-se que com a substituição da cobertura vegetal do parque ocorre redução da umidade relativa do ar em toda a área de estudo de caso, especialmente no parque.

Figura 48: Cenário Parque às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

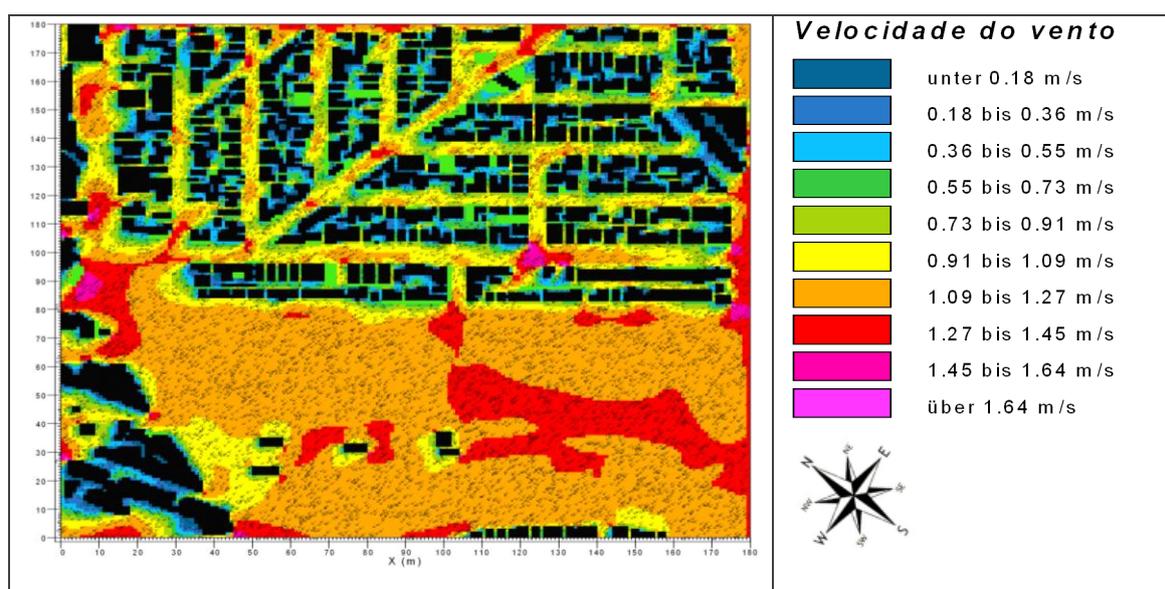
Figura 49: Cenário Parque às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

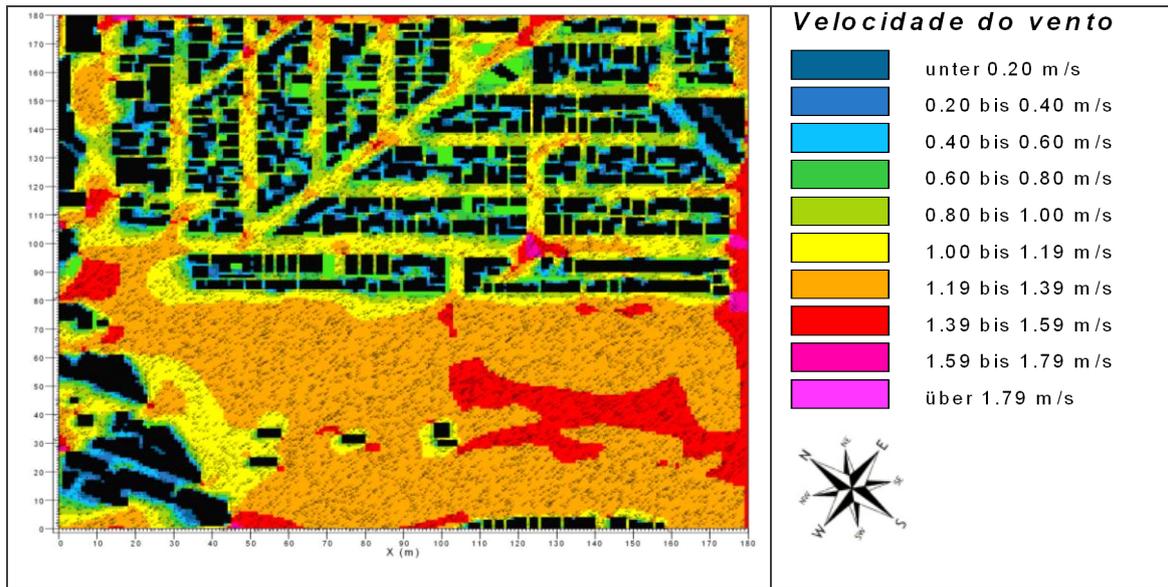
Quanto à velocidade do vento, as figuras 50 e 51 indicam um aumento da velocidade do vento na área do Parque Lagoa do Nado para o cenário hipotético, o que se justifica pelo fato de não existirem neste cenário os obstáculos representados pela vegetação de porte arbóreo.

Figura 50: Cenário Parque às 07:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

Figura 51: Cenário Parque às 15:00 horas



Fonte: produzido pela autora.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da forma urbana no clima local, através do monitoramento climático e da simulação numérica com o modelo ENVI-Met©, em estudo de caso na cidade de Belo Horizonte, MG. Para a obtenção de dados climáticos em campo foram selecionados pontos em um parque (Parque Municipal Fazenda Lagoa do Nado) e em seu entorno edificado visando analisar o comportamento das áreas verdes e das áreas construídas. Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento monitorados por uma torre meteorológica implantada próxima a área de estudo de caso serviram como entrada no ENVI-Met© e os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar registrados por termo-higrômetros implantados na área de estudo de caso serviram como referência para comparação com os resultados do modelo. Também foram comparados os dados de umidade absoluta do ar calculados à partir dos dados monitorados e os simulados.

Além da simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo de caso foram realizadas pesquisas de simulação com a finalidade de avaliar o impacto de alterações na área de estudo nas variáveis climáticas por meio das respostas do ENVI-Met©, tendo sido então estabelecidos dois cenários. Um dos cenários corresponde a verticalização das edificações da área de estudo de caso e o outro corresponde a substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por grama.

Além da comparação entre os dados monitorados e simulados para os pontos de monitoramento distribuídos na área de estudo de caso foram gerados mapas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento para toda a área de estudo de caso pela extensão Leonardo do modelo ENVI-Met©. Para melhor correspondência com a altura dos dados medidos na área de estudo de caso (1,5 m), os mapas foram analisados em planta, a partir de seção de 1,2 m de altura, tendo sido escolhidos para análise os horários de mínima (07:00) e máxima (15:00) temperatura do ar.

Conforme os resultados dos dados monitorados em campo os maiores valores médios de umidade relativa do ar e os menores valores médios da temperatura do ar foram obtidos

para os pontos localizados no Parque Lagoa do Nado, sendo que a diferença entre os valores médios de temperatura registrados no parque e na área urbana chega a 1,6°C. Este resultado está em congruência com a literatura sobre o tema.

Quanto aos valores de umidade absoluta do ar calculados à partir dos dados de temperatura e umidade relativa do ar monitorados, observou-se pequenas diferenças entre os pontos localizados no parque e na área urbana, e desta forma supoe-se que a menor da temperatura no parque (e conseqüente maior umidade relativa) seja em função do sombreamento das árvores.

As simulações realizadas com o ENVI-Met© mostraram que a composição da área de aninhamento influencia consideravelmente as respostas do modelo, o que foi observado à partir da comparação entre uma simulação utilizando na área de aninhamento solo pavimentado e argiloso (que é o solo predominante para o município de Belo Horizonte) e outra utilizando solo pavimentado e arenoso. Na simulação com solo arenoso houve maior aproximação entre dados medidos e simulados. Talvez a cidade imponha uma característica genérica de solo seco tendo em vista que a pavimentação e a drenagem diminuem a disponibilidade de água para evaporação e isso poderia justificar a adoção, também genérica, do solo arenoso. Entretanto não há comprovação para esta suposição e desta forma selecionou-se aquela simulação para a qual houve maior correspondência com os dados medidos utilizando na área de aninhamento o solo argiloso junto com o pavimentado.

A simulação para a situação real da área de estudo de caso mostrou que o ENVI-Met© apresenta uma tendência para subestimar as amplitudes diárias o que já havia sido observado por Emmanuel *et al* (2007). Entretanto, o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar medida e simulada é semelhante, havendo concordância em relação aos horários de mínimo e máximo valores. A análise descritiva da temperatura e da umidade relativa do ar obtidas na simulação para os pontos na área de estudo de caso demonstra que existe concordância com os resultados do monitoramento quando comparados os pontos que apresentaram as menores médias de temperatura e as maiores médias de umidade relativa do ar, sendo os dois pontos localizados no Parque Lagoa do Nado. Quanto ao ponto que apresentou maior média de temperatura do ar e menor

média de umidade relativa do ar houve discordância entre os resultados do monitoramento e da simulação. De acordo com os dados monitorados este ponto é aquele em cujo entorno não há nenhuma área verde -ponto oficina (P4) conforme já apontado. De acordo com o modelo é o ponto localizado mais próximo ao parque, mas que na modelagem é o mais cercado pela área urbana do recorte de estudo - ponto academia (P3), que de acordo com os dados monitorados no mês de agosto é o ponto que possui maior umidade relativa do ar. Acredita-se que esta resposta do modelo se deva ao fato do ponto oficina estar muito próximo a área de aninhamento e receber maior influência desta considerando a direção preferencial do vento. O fato de não ser possível inserir edificações, arborização, etc na área de aninhamento limita a caracterização do entorno da área de estudo de caso podendo influenciar as respostas do modelo. Quanto aos dados simulados de umidade absoluta do ar, observou-se que houve maior diferença entre os valores obtidos no parque e na área urbana (os valores maiores pertencendo ao parque) do que nos dados monitorados. O fluxo de calor latente simulado foi zerado para os pontos na área urbana ao contrário dos dois pontos no parque.

Os mapas de temperatura do ar e umidade relativa do ar para a situação real da área de estudo de caso mostraram que tanto às 7 quanto às 15 horas os menores valores de temperaturas e as maiores taxas de umidade relativa são observados no Parque Lagoa do Nado. Quanto à área urbana, a ocupação a jusante do parque que encontra-se na direção preferencial do vento apresenta taxas maiores de umidade relativa do ar e temperaturas menores em relação a ocupação a montante do parque com diferenças de até 1,5°C. Isso pode ser um indício da influência do parque nesta porção do recorte de estudo.

Quanto à simulação para o cenário hipotético de verticalização, observou-se para os pontos de monitoramento que com a verticalização ocorre aumento de temperatura do ar e redução da umidade relativa do ar no período noturno indo até por volta de 7 ou 8 horas da manhã e à partir daí a redução da temperatura do ar e aumento da umidade relativa do ar.

Os mapas de temperatura do ar e umidade relativa do ar para a situação hipotética de verticalização mostram que para o horário de 7 horas os valores de temperatura do ar são mais elevados e os valores de umidade relativa do ar são menores em relação aos valores da simulação para o caso real da área de estudo. Já para o horário de 15 horas ocorre redução da temperatura do ar e aumento da umidade relativa do ar no cenário hipotético. Para este mesmo horário de 15 horas a comparação entre os mapas de velocidade do vento para o caso real e para o cenário de verticalização mostram que com a verticalização, ocorre redução da velocidade do vento nas áreas entre as edificações. À partir destes resultados observa-se que um cuidado deve ser tomado ao permitir uma forma urbana mais compacta tendo em vista que foi mostrado que a verticalização pode atuar na redução da temperatura do ar em função do sombreamento, mas não em todos os horários, além disso, a possibilidade de ventilação natural e resfriamento noturno diminui.

A simulação para o cenário hipotético de substituição da vegetação de porte arbóreo do Parque Lagoa do Nado por grama mostra por meio da comparação entre os resultados da simulação do caso real que com a substituição da cobertura vegetal do parque ocorre redução da umidade relativa do ar e aumento da temperatura do ar, chegando ao valor máximo de aumento de temperatura de 2,6 °C no parque e 1,5°C na área urbana. Esses resultados mostram que a vegetação de porte arbóreo tem um importante papel como fator modificador do clima local e que deve ser vista como um dos instrumentos de desenho urbano no controle e prevenção dos efeitos adversos do clima urbano. No entanto na maioria das cidades brasileiras os espaços destinados à implantação de vegetação são constantemente reduzidos, insuficientes para promoção de algum benefício.

Os resultados do monitoramento em campo e das simulações com o modelo ENVI-Met© apresentados podem contribuir para futuras pesquisas da área com a preocupação de avaliar a influência da forma urbana nas variáveis climáticas. É importante que o modelo seja avaliado sob várias condições antes de ser definitivamente aplicado na orientação da legislação urbanística.

Com relação à metodologia adotada observa-se que medições de campo são necessárias para a avaliação dos resultados numéricos. O desenvolvimento de maneiras para se conjugarem medições em campo e simulações computacionais pode se constituir em um caminho para o desenvolvimento da capacidade preditiva na climatologia urbana, elemento fundamental para a consideração de diferentes propostas na prática de planejamento das cidades.

Quanto ao modelo ENVI-Met© foram identificadas as seguintes potencialidades deste: facilidade de inserção de dados de entrada; fornecimento de diversas variáveis de saída, possibilitando vários tipos de estudos em planejamento urbano; possui uma extensão - Leonardo representa os dados por meio de mapas, com cortes que podem ser determinados pelo pesquisador. Entre as suas limitações inclui-se o fato de não ser possível inserir edificações, vegetação etc, na área de aninhamento o que possivelmente influencia as respostas das simulações; o tempo longo de processamento chegando a demorar dias; a não possibilidade de pausar o processo de simulação e, na ocorrência de algum erro, a simulação ter que ser reiniciada.

O ENVI-Met© mostrou uma tendência a subestimar as amplitudes diárias. Entretanto o comportamento dos dados medidos e simulados é semelhante havendo concordância em relação aos horários de mínimo e máximo valores. O modelo mostrou-se sensível às configurações urbanas distintas, podendo ser útil no teste de soluções e previsões dentro do planejamento e controle térmico de ambientes urbanos.

Diante do exposto, constata-se a necessidade de estudos mais aprofundados sugerindo-se: a realização de testes alterando a composição da área de aninhamento; a utilização de uma série de dados climáticos para entrada no ENVI-Met© abrangendo um período maior, o que provavelmente contribuirá para uma maior aproximação entre dados simulados e medidos; realização de simulações para o município de Belo Horizonte no período de verão com o intuito de avaliar as respostas do ENVI-Met© para esta estação, realização de simulações para áreas com diferentes características morfológicas avaliando as respostas das variáveis climáticas em função dos diversos aspectos urbanísticos.

REFERÊNCIAS

ALI TOUDERT, F. **Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate**. 224f. Dissertation - Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg, Freiburg, 2005.

ALUCCI, M. P. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica: procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projeto de edificações**. (Tese, doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

ANDRADE, H. **O Clima Urbano – natureza, escalas de análises e aplicabilidade**. Revista Finisterra, n. 80, p.67-91, 2005.

ASSIS, E. S. **Mecanismos de desenho urbano apropriados à atenuação da ilha de calor urbana: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical**. (Dissertação, Mestrado em arquitetura e urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

ASSIS, E. S. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória**. In: Encontro Nacional e IV Encontro Latino-Americano sobre conforto no ambiente construído, Maceió. Anais... Maceió: ANTAC, p. 92-101, 2005.

ASSIS, E. S. **Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros**. Revista rua. Salvador, n. 9, p. 20–25, 2006.

ASSIS, E. S. **Estudo integrado da ilha de calor em área urbanas e sua contribuição ao planejamento: o caso de Belo Horizonte, MG**. Fórum Patrimônio, v.5, n. 1, 2011. Disponível em: <[http:// www.forumpatrimonio.com.br](http://www.forumpatrimonio.com.br)>. Acesso em: 15 jul.2011.

ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial**. 299f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

ASSOCIA O BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: desempenho térmico de edifica es: parte 2: métodos de cáculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edifica es**. Rio de Janeiro, 2005.

BACH, W. **Urban Climate: air Pollution and Planning**. In: DETWYLER, T. R.; MARRCUS, M.G. (ed.). *Urbanization and Environment*. Belmont: Duxbury, 1970.

BARBIRATO, G.M. **Modelo de balanço de energia aplicado ao caso da cidade de Maceió-AL, e suas implica es para o planejamento urbano**. Fórum Patrimônio, v.3, n. 2, 2010. Disponível em: <[http:// www.forumpatrimonio.com.br](http://www.forumpatrimonio.com.br)>. Acesso em: 11 mai. 2011.

BARBOSA, R.V.R. ** reas verdes e qualidade térmica em ambientes urbanos: estudo em microclimas de Maceió (AL)**. (Disserta o, Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BITAN, A. **The methodology applied climatology in planning and building**. *Energy and Buildings*, v. 11, p. 1-10, 1998.

BRANDÃO, R. S. **As intera es espaciais urbanas e o clima: incorpora o das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano**. Tese (doutorado –  rea de concentra o: Tecnologia da Arquitetura) – FAU-USP. São Paulo, 2009.

BRUSE, M. ENVI-met 3.1: **Online Manual**. Disponível em: <http://www.envi-met.com/>. Acesso em: 04 fev. 2011.

CHANDLER, T.J. **The climate of London**. London: Hutchinson University Library Publishers, 1965.

CHANDLER, T. J. **Urban Climatology and its relevance in urban design**. Geneva: WMO, 1976. (Technical Note 149)

DUARTE, D; GONÇALVES, J; MONTEIRO, L. **Desenho urbano e conforto térmico: avaliação dos espaços abertos da Barra Funda, em São Paulo, por meio de levantamentos de campo e simulação preditiva**. In: IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Ouro Preto, 2007. Anais São Paulo: ANTAC/UFMG, 2007 (CD-ROM).

DUARTE, L.F. **Comportamento microclimático urbano: um estudo de caso de um recorte urbano em João Pessoa – PB**. (Dissertação, Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

ECHENIQUE, M. **Modelos: una discusión**. In: MARTIN, L. MARCH L.; ECHENIQUE M. La estructura del espacio urbano. Barcelona: G. Gili, p. 235-248, 1975.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. **Urban shading – a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka**. International Journal of Climatology, v. 27, p. 1995-2004, 2007.

EMMANUEL, R. **Urban climate design in the equatorial megalopolis: key challenges to effective adaptive action**. Fórum Patrimônio, v.4, n. 1, 2011. Disponível em: <[http:// www.forumpatrimonio.com.br](http://www.forumpatrimonio.com.br)>. Acesso em: 12 dez. 2011.

FERREIRA, M. J. **Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. (Tese, Doutorado em Ciências Atmosféricas). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FREITAS, M. K. & LOMBARDO, M. A. **O Uso de Imagem Termal Gerada pelos Satélites da Série LANDSAT e NOAA para Estudo de Ilha de Calor: estudo de caso de São Paulo**. Geografia, v. 32, n. 3, p. 645-656, Rio Claro, 2007.

GEIGER, R. **Manual de microclimatologia: o clima da camada de ar junto ao solo**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1961.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

GOOGLE EARTH. [**Imagem da área de estudo de caso no bairro Planalto**], 2011. Disponível em < <http://www.googleearth.com>>. Acesso em: 05 jul. 2011.

GROAT, L.; WANG, D. **Architectural research methods**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

HOGAN, D. J; MARANDOLA JR, E. (Orgs.). **População e mudança climática: Dimensões humanas das mudanças ambientais globais**. Campinas: Núcleo de Estudos de População (NEPO/UNICAMP), 2009.

HÖPPE, P.R. **Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort**. Energy and Buildings, p. 661-665, 2002.

Instituto Nacional de Meteorologia- INMET. **Normais Climatológicas - Brasil- de 1961 a 1990**. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária- Departamento Nacional de Meteorologia, 1992.

Instituto Nacional de Meteorologia- INMET [**Dados de nebulosidade**]. Belo Horizonte: 5°. Distrito, 2011.

Instituto Nacional de Meteorologia- INMET [**Dados de radiação global**]. Belo Horizonte 5°. Distrito, 2011.

JOHANSSON, E. **Urban Design and Outdoor Thermal Comfort in Warm Climates: Studies in Fez and Colombo**. Suecia: Grahns Tryckeri AB, 2006.

KATZSCHNER, L. **Urban Climate Studies as tools for urban planning and architecture**. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Anais... Salvador, 1997.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. New York: Academic Press, 1981.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metr6poles – O Exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 244p, 1985.

MASCARÓ, Lucia. **Ambiência Urbana**. Porto Alegre: Masquatro, 2005.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. (Tese, livre- docência em Geografia). Faculdade de Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C. A. F. **Some aspects of the urban climate of tropical South America: the Brazilian contribution**. In: Technical conference on urban climatology and its applications with special regard to tropical areas, Cidade do México. *Proceedings*. Geneva, WMO No. 652, p. 166-197, 1986.

MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos**. 378p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NAKATA, C. **Comportamento do pedestre e ambiente térmico urbano**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, 2010.

OKE, T. R. **City size and the urban heat island**. Atmospheric Environment. London, Pergamon, v.7, p. 769-779, 1973.

OKE, T. R. **The distinction between canopy and urban layer urban island.** Atmosphere v-14, p.268-277, 1976.

OKE, T.R. **The energetic base of urban heat island.** Quartely Journal of the Royal Meteorological Society. London, Elsevier Science, v.108, p.1-24, 1982.

OKE, T.R. **Towards a prescription of the greater use of climatic principles in settlement planning.** Energy and Buildings. London, Elsevier Science, 7, p.1-10, 1984.

OKE, T.R. **Boundary layer climates.** Routledge, London, 1987.

OKE, T. R; SPRONKEN-SMITH, R. A; LOWRY, W. P. **Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park.** International Journal of Climatology, 1033-1047, 2000.

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

PAIXÃO, L.A; ABRAMO, P. **Os vetores de expansão da atividade imobiliária em Belo Horizonte: 1994-2003.** Nova Economia (UFMG), v.18, p. 229-263, 2008.

SAAD, S.I; ROCHA, H.R. **Padrões de estado à superfície associados ao início da formação de nuvens: uma investigação com medidas de torres de fluxo.** Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET), Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://www.cbmet.com/edicoes.php?pageNum_Recordset_busca=14&totalRows_Recordset_busca=1006&cgid=14>. Acesso em: 05 fev. 2012.

SANTAMOURIS, M. **Energy and indoor climate in urban environments: recent trends.** In: IV Encontro Nacional de conforto no ambiente construído, Salvador. *Anais.* FAU/UFBA — ANTAC, p. 15-24, 1997.

SANTAMOURIS, M. **Environmental Design of Urban Buildings.** James and James Science Publishers, London, 2005.

SANTOS, J; TAVARES, R; AMORIM, J. H; MIRANDA, A. I. **Estudo do efeito da vegetação na dispersão de poluentes em zonas urbanas**. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. 8ª Conferência Nacional de Ambiente. Lisboa, Portugal. 2004. Disponível em:< <http://www2.dao.ua.pt/gemac/resources/8aCNA>>. Acesso em: 15 jul.2011.

STEEMERS, K; STEANE, M. A. **Environmental Diversity in Architecture**. London, 2004.

TATSCH, J.D. **Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais**. (Dissertação, Mestrado em Ciências). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

University of Wyoming. **Dados de umidade específica**. Disponível em: <http://weather.uwyo.edu/uppeair>. Acesso em: 23 ago. 2011

VILELA, J. **Variáveis do clima urbano: análise da situação atual e prognósticos para a região do bairro Belvedere III, Belo Horizonte, MG**. 213f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

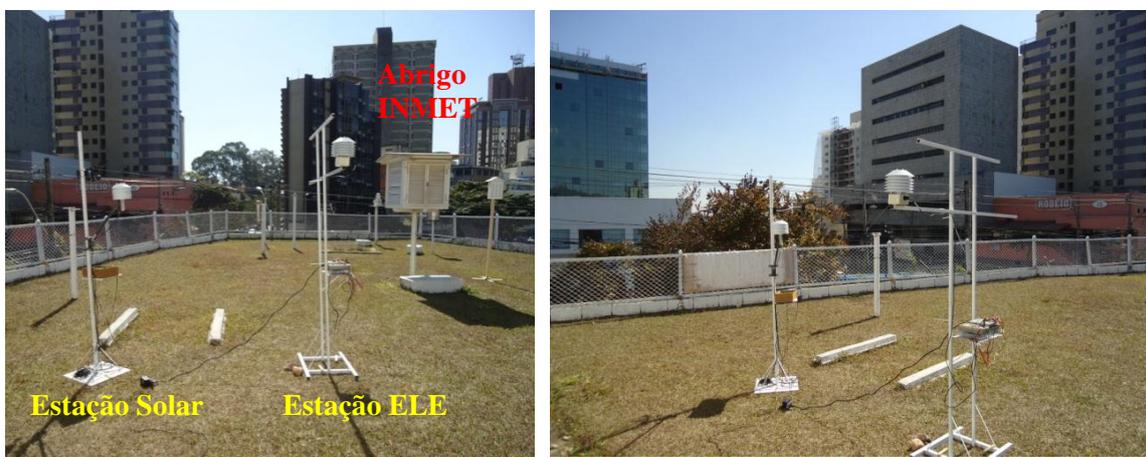
WARDOYO, J; BUDIARDJO, E; PRIANTO, E; NUR, M. **Trees Configuration Model for Hot Humid Tropic Urban Parks**. Paper Presented on 12th International Seminar on Sustainable Environmental and Architecture (SENVAR), 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A: AFERIÇÃO DAS ESTAÇÕES SOLAR E ELE

No dia 21-06-11 as estações Solar e ELE foram montadas no 5° Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia – DISME/INMET, localizado no bairro Santo Agostinho em Belo Horizonte para o procedimento de aferição. Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar e direção e velocidade do vento da estação Solar e o sensor de temperatura e umidade relativa do ar da estação ELE foram montados em um suporte confeccionado a 1,5 metros do solo (FIGURA 52). Foram realizados registros de meia em meia hora no intervalo entre 09:00 e 21:00 horas. Os dados medidos pelo par psicrométrico (TBS e TBU) também foram anotados de meia em meia hora entre 09:00 e 21:00 horas para posterior comparação com os dados das estações. Efetuaram-se vinte e seis leituras, dezoito a mais do que o número de observações mínimas estabelecidas pela WMO.

Figura 52: Coleta de dados das estações automática Solar e ELE no 5°DISME

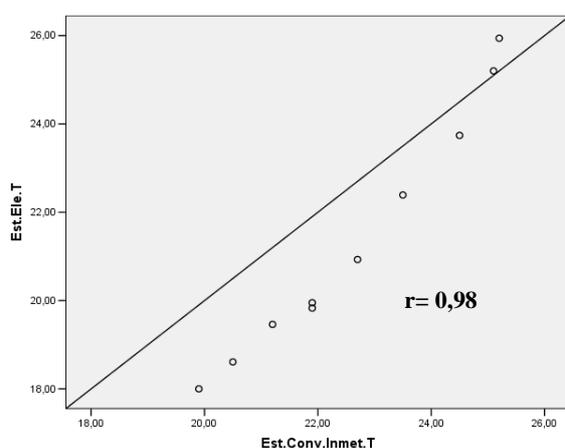


Fonte: Arquivo pessoal da autora, 2011.

A comparação entre os dados obtidos pelas estações automáticas e a estação convencional do 5° DISME foi realizada por meio de correlação linear de Pearson e mostrou uma forte correlação entre os mesmos. Observou-se que os dados das primeiras leituras realizadas (de 09:00 a 12:00) estavam interferindo para que o coeficiente de correlação entre a temperatura das estações automáticas e a estação convencional do INMET fosse um pouco menor em função possivelmente de influências externas. Com a exclusão destes dados a correlação entre as estações automáticas e a estação

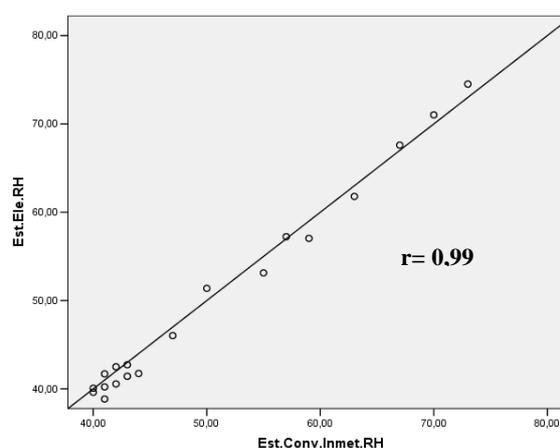
convencional INMET, bem como a correlação entre a estação Solar e a estação ELE são bastante altas. No gráfico 72 observa-se que a temperatura do ar registrada pela estação ELE apresentou forte correlação de Pearson com a variável temperatura do ar da estação convencional do INMET ($r=0,98$). O mesmo pode ser observado (GRÁFICO 73) para a umidade relativa do ar registrada pela estação ELE com a variável umidade relativa do ar da estação do INMET ($r=0,99$). O mesmo pode ser dito para a estação Solar (GRÁFICOS 74 e 75) com relação à temperatura do ar ($r=0,99$) e umidade relativa do ar ($r=0,99$).

Gráfico 72: Correlação entre temperatura do ar da estação convencional e da estação automática ELE



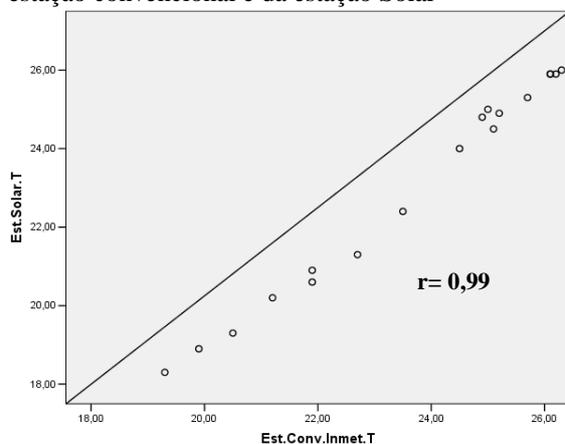
Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (12:30 às 21:00 horas).

Gráfico 73: Correlação entre umidade relativa do ar da estação convencional e da estação ELE



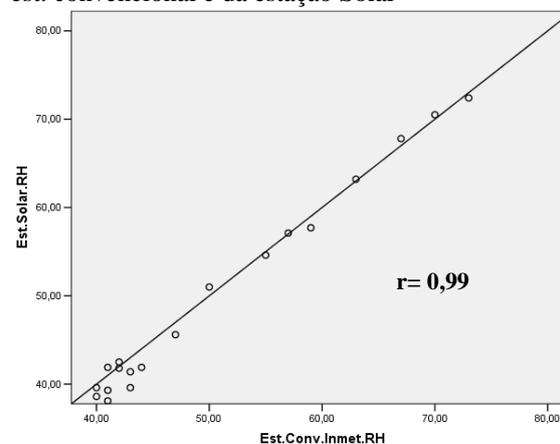
Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (12:30 às 21:00 horas).

Gráfico 74: Correlação entre Temperatura da estação convencional e da estação Solar



Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (12:30 às 21:00 horas).

Gráfico 75: Correlação entre umidade rel. do ar da est. convencional e da estação Solar



Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (12:30 às 21:00).

APÊNDICE B: AFERIÇÃO DOS TERMO-HIGRÔMETROS

Antes dos trabalhos de campo todos os termo-higrômetros *data loggers* utilizados foram aferidos. Em junho de 2011, procedeu-se à aferição, em duas etapas, dos valores de temperatura do ar e umidade relativa medidos pelos equipamentos. A primeira etapa foi realizada no Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética nas Edificações (LABCON), da UFMG, e a segunda etapa, no 5º DISME/INMET.

Na primeira etapa, dez termo-higrômetros *data loggers*, modelo HOBO U12, marca ONSET foram colocados em uma sala de bolsistas do LABCON. Durante a aferição, visando minimizar as influências dos ambientes externos e a estabilizar o máximo possível as condições atmosféricas internas, a iluminação artificial permaneceu desligada, o ambiente foi mantido sem ventilação, com as frestas das janelas e das portas vedadas com fita crepe, e sem insolação direta, com as venezianas fechadas.

Os equipamentos foram identificados pelos respectivos números de série, configurados para iniciar a medição às 21h do dia 17.06.2011, com registro de valores instantâneos a cada intervalo de 30 minutos, e organizados sobre uma mesa disposta no centro da sala (FIGURA 53). Este procedimento finalizou às 08 h do dia 20.06.2011 e possibilitou a comparação dos valores registrados pelos dez equipamentos.

Figura 53: Procedimento de aferição dos termo-higrômetros no Labcon



Fonte: arquivo pessoal da autora.

Em uma segunda etapa, após a aferição realizada no LABCON, os equipamentos selecionados foram levados ao 5º DISME/INMET para uma aferição contra os

termômetros-padrão de mercúrio. A aferição teve início no dia 21.06.2011, às 9h, e término no mesmo dia às 21 h, com registro de dados de meia em meia hora. Quatro termo-higrômetros cujos valores medidos se assemelhavam bastante foram os selecionados para serem utilizados no procedimento. Seus números de série são: 904036, 904037, 904040 e 963870. Os três termo-higrômetros de número de série 904036, 904037 e 963870 foram utilizados no interior do abrigo do 5° DISME/INMET e o termo-higrômetros de número de série 904040 foi utilizado no interior do abrigo confeccionado para o levantamento de dados climáticos (FIGURAS 54 e 55).

Figura 54: Localização dos data loggers no interior do abrigo meteorológico do 5°DISME/ INMET



Fonte: arquivo pessoal da autora.

Figura 55: Abrigo meteorológico confeccionado ao lado do abrigo do 5°DISME/ INMET com os data loggers nos seus interiores



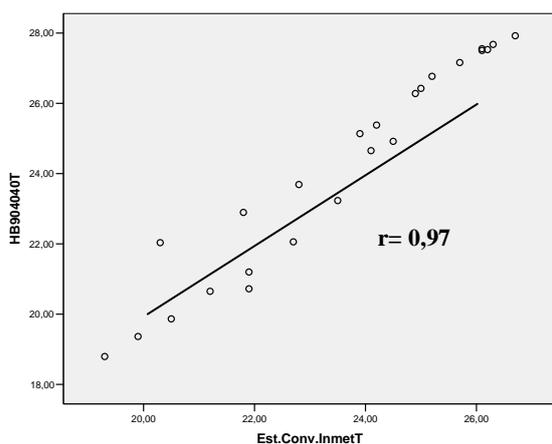
Fonte: arquivo pessoal da autora.

A comparação entre os dados obtidos pelos termohigrômetros e a estação convencional do 5° DISME foi realizada por meio de correlação linear de Pearson e mostrou uma forte correlação entre eles. Os resultados da comparação entre os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar medidos por esses equipamentos são apresentados nos gráficos 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82 e 83. Os resultados demonstram que os valores medidos pelos termo-higrômetros *data loggers* estão coerentes com os valores medidos pelos termômetros-padrão de mercúrio, e que, portanto, não precisam ser corrigidos. Todos os coeficientes de correlação foram maiores que 0,97.

Quanto ao abrigo confeccionado concluiu-se que sua utilização nos levantamentos de campo seria satisfatória, tendo em vista que não houve diferença significativa entre os

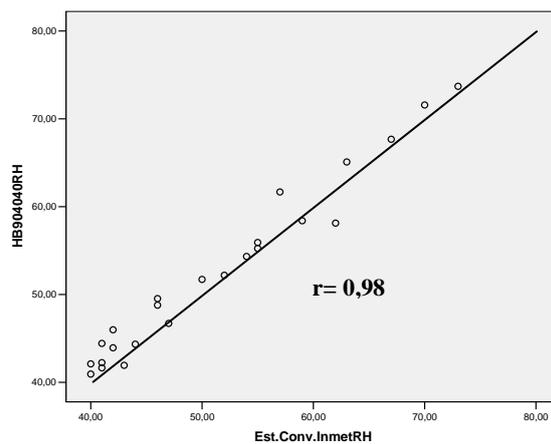
valores registrados pelo termo-higrômetro *data logger* que se encontrava no interior do abrigo confeccionado (904040) e aqueles que se encontravam no interior do abrigo meteorológico do 5º DISME/INMET conforme os gráficos 76 a 83 e os coeficientes de correlação de Pearson (com nível de significância 0,05).

Gráfico 76: Comparação entre os valores medidos de temperatura do ar (°C), pelo data logger identificado pelo número de série 904040



Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (09:00 às 21:00 horas); não foi possível igualar a escala, pois os dados não estão mais disponíveis.

Gráfico 77: Comparação entre os valores medidos de umidade relativa do ar (%), pelo data logger identificado pelo número de série 904040



Nota: dados referentes à medição realizada a 1,5 m no dia 21-06-11 (09:00 às 21:00 horas)

Gráfico 78: Comparação entre os valores medidos de temperatura do ar (°C), pelo data logger identificado pelo número de série 904036

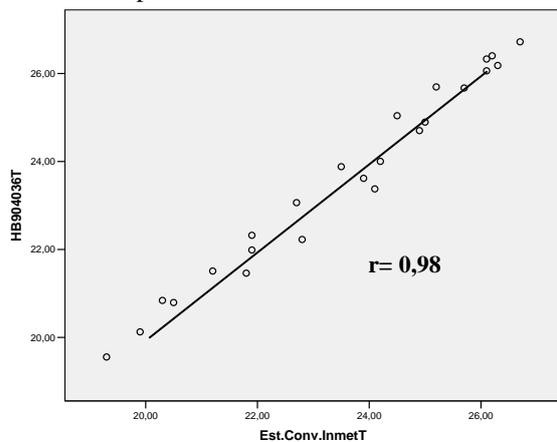


Gráfico 79: Comparação entre os valores medidos de umidade relativa do ar (%), pelo data logger identificado pelo número de série 904036

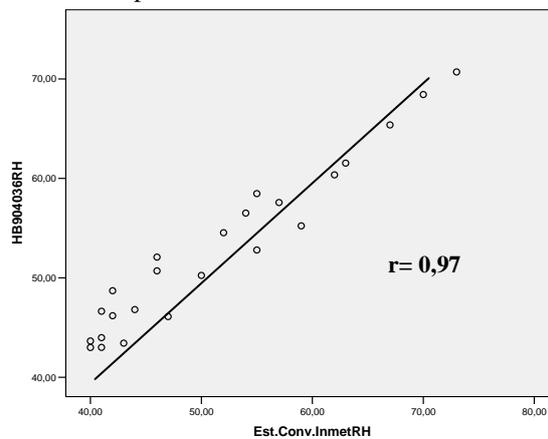


Gráfico 80: Comparação entre os valores medidos de temperatura do ar (°C), pelo data logger identificado pelo número de série 904037

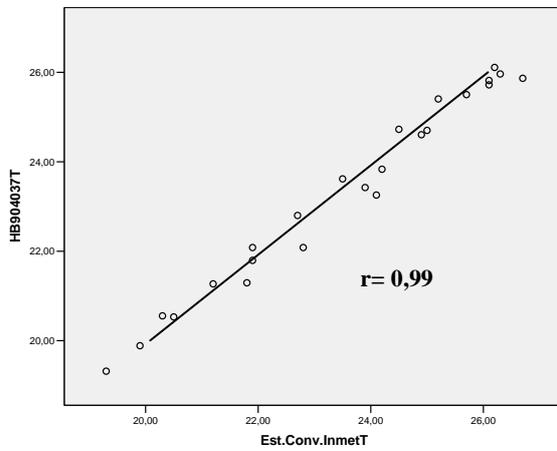


Gráfico 81: Comparação entre os valores medidos de umidade relativa do ar (%), pelo data logger identificado pelo número de série 904037

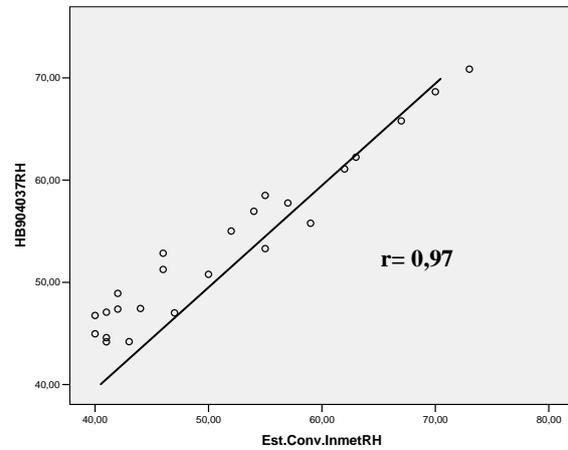


Gráfico 82: Comparação entre os valores medidos de temperatura do ar (°C), pelo data logger número de série 963870

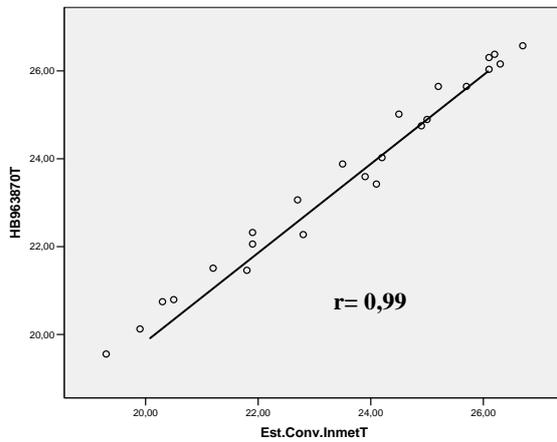


Gráfico 83: Comparação entre os valores medidos de umidade relativa do ar (%), pelo data logger número de série 963870

