

Daniele Gomes Ferreira

**O USO DO SOLO E OS PADRÕES DE VENTO:
O CASO DA CIDADE DE BELO HORIZONTE, MG**

Belo Horizonte
Escola de Arquitetura da UMFG
2009

Daniele Gomes Ferreira

**O USO DO SOLO E OS PADRÕES DE VENTO:
O CASO DA CIDADE DE BELO HORIZONTE, MG**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável 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. Eleonora Sad de Assis
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte
Escola de Arquitetura da UMFG
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira, Daniele Gomes
F383u O uso do solo e os padrões de vento : o
caso da cidade de Belo Horizonte, MG / Daniele Gomes
Ferreira - 2009.

135f. : il.

Orientadora: Eleonora Sad de Assis
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Planejamento urbano – Belo Horizonte (MG) -
Fatores climáticos. 2. Climatologia urbana. 3.
Urbanização – Influência do clima. 4. Crescimento
urbano - Influência do clima. I. Assis, Eleonora Sad de.
II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de
Arquitetura. III. Título.

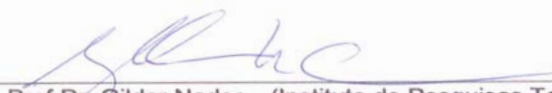
CDD : 711.42

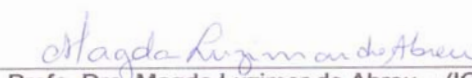
DANIELE GOMES FERREIRA

**O USO DO SOLO E OS PADRÕES DE VENTO: O CASO DA CIDADE DE 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. Gilder Nader – (Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo)


Profa. Dra. Magda Luzimar de Abreu – (IGC/UFMG)


Profa. Dra. Eleonora Sad de Assis – (TAU/EAUFG)

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2009.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o auxílio de instituições e pessoas as quais dedico estes agradecimentos:

Ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET), em especial aos meteorologistas Anete S. Fernandes, Alexandre Augusto Lopes Gadelha e Jorge Luiz Batista Moreira que disponibilizaram os dados de estações meteorológicas, gentilmente compareceram a seções de entrevista e sempre que necessário esclareceram dúvidas recorrentes no decorrer do trabalho;

Aos professores Jorge Alberto Gil Saraiva, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) e Maria João Alcoforado do Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa por me receberem e fornecerem referências bibliográficas que serviram de base para este trabalho;

À profa. Magda Luzimar de Abreu do Instituto de Geociências da UFMG (IGC/UFMG) que contribui para a base do meu conhecimento em meteorologia, incentivou o avanço nos estudos e forneceu dados da estação meteorológica de Belo Horizonte;

À Prodabel, Empresa de informática da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, por autorizar a utilização de sua base cartográfica;

À profa. Ana Clara Mourão Moura do Instituto de Geociências da UFMG pela formação e encaminhamento nas técnicas de geoprocessamento, além dos estudantes de mestrado do IGC/UFMG, Vladimir Diniz V. Ramos, por auxiliar na operacionalização de ferramentas computacionais de geoprocessamento e Sheyla Aguilar de Santana por fornecer bases cartográficas de Belo Horizonte;

Ao Sr. Michael Brower por disponibilizar o programa WindMap™ e à empresa Camargo Schubert, na pessoa do Sr. Odilon Camargo do Amarante, por prestar informações do programa;

Ao Sr. João Viljoen de Vasconcelos da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, aos professores Jorge Lassig e Cláudia Palese, ambos da Faculdade de Engenharia da Universidad Nacional del Comahue, na Argentina, que forneceram informações importantes para as simulações computacionais no WindMap™;

À pós-doutoranda Alessandra Rodrigues Prata e ao doutorando Rafael Silva Brandão, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo pelo fornecimento de dados de suas pesquisas sobre vento na cidade de São Paulo;

À Profa. Sue Grimmond, da Universidade de Londres, por esclarecimento de dúvidas sobre artigo utilizado como referência para o cálculo de parâmetros de rugosidade;

À Taíza Pinho Barroso, do IGC/UFMG, por fornecer informações sobre tratamento de dados de vento;

Ao doutorando Wellington Lopes Assis, do IGC/UFMG, por encaminhar informações sobre o período de funcionamento da estação meteorológica principal de Belo Horizonte;

Aos Srs. Antonio Luiz Pacifico e Gilder Nader do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, por fornecerem informações e se disponibilizarem para realizar ensaio de modelo físico em túnel de vento;

Aos Drs. José Celso Thomaz Júnior, do Laboratório de Instrumentação Meteorológica do CPTEC/INPE, Gilberto Fish, do INPE, Edmilson Dias de Freitas, do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG/USP, António Manuel Saraiva Lopes, do Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, por fornecerem informações sobre medições de vento utilizando balão cativo;

Ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por fornecer referências bibliográficas e pelo auxílio em terminologia sobre aerodinâmica;

Às bolsistas de iniciação científica Clara Máira Oliveira Ferreira e Suéllen Mota Marques Costa pelas atividades realizadas e pelo acompanhamento durante o trabalho;

Aos professores e funcionários do Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável e do Departamento de Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Escola de Arquitetura da UFMG pelo apoio e colaboração;

À profa. Eleonora Sad de Assis pela orientação não apenas na dissertação, mas também na vida profissional, pelo seu incentivo em seguir os caminhos da pesquisa e pelo apoio constante nas decisões;

Aos amigos e colegas do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética da Escola de Arquitetura da UFMG, em especial Camila e Rejane pelo apoio e compreensão;

À minha família pelo carinho e apoio incondicional em todas as decisões da minha vida e ao Gustavo pelo amor, atenção e colaboração constantes, pessoas que a todo instante me ajudaram a trilhar este caminho com maior tranquilidade.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo verificar a influência da ocupação urbana sobre os padrões de vento para o caso do município de Belo Horizonte, como auxílio à prática do planejamento urbano, a partir de uma perspectiva cronológica da evolução da ocupação do território e utilizando técnica de simulação computacional. Três variáveis constituíram os parâmetros de entrada do programa utilizado, o WindMapTM: a topografia, a ocupação urbana e o vento. A topografia foi reproduzida por um Modelo Digital de Terreno. A ocupação urbana, por sua vez, foi representada pelo parâmetro comprimento de rugosidade (z_0), determinado por método morfométrico aliado à classificação de imagens de satélite Landsat em três momentos que caracterizam a evolução da cidade, correspondentes aos anos de 1987, 1996 e 2006. A aplicação destas técnicas permitiu a criação de um Modelo Digital de Elevação para os respectivos períodos de evolução urbana. Já a caracterização do vento fundamentou-se na abordagem da climatologia dinâmica, baseada na seleção de episódios capazes de demonstrar as particularidades dos fenômenos da circulação atmosférica em escala local. Foram selecionados episódios característicos de estabilidade e instabilidade atmosféricas nos anos de 1987, 1997 e 2007. Estes correspondem, respectivamente, à condição média de vento durante todo o ano e à variação verificada no verão. Através de dados de velocidade e direção do vento de estações meteorológicas fixas e de vento geostrófico, extraído de sondagens do Aeroporto Internacional de Confins, foi possível caracterizar os episódios selecionados. A partir da coleta e tratamento dos dados de entrada do WindMapTM foram feitas simulações dos episódios selecionados, comparando o comportamento do vento considerando apenas a influência da topografia e analisando o efeito da ocupação urbana. Como resultado foi possível observar a variação da velocidade do vento diante da evolução da cidade e da condição de estabilidade atmosférica. Em grande parte do território analisado houve redução das velocidades quando comparados os testes realizados com a presença da ocupação e aqueles considerando apenas a topografia. Também se verificou o aumento de áreas em que houve redução das velocidades ao longo tempo, acompanhando a expansão urbana de Belo Horizonte. Além disso, foi possível notar que as altas densidades urbanas provocam maior redução da velocidade do vento quando comparada às médias densidades urbanas. Assim, concluiu-se que a metodologia aplicada produziu resultados satisfatórios da análise dos padrões de vento para aplicação em planejamento urbano.

Palavras-chave: Vento. Simulação computacional. Planejamento urbano.

ABSTRACT

This work investigated land use impact on wind patterns in the city of Belo Horizonte. Applying computational simulation techniques and a temporal view of urban increase, it is expected that the methodology of this study could be used in urban planning. Three parameters were considered important for input simulation, using the software WindMapTM: terrain, land use and wind. The terrain was reproduced through a digital terrain model. Roughness length (z_0), determined by morphometric methods, was used to demonstrate aerodynamic characteristics of land use. A satellite image classification was utilized to identify land use classes in the city in three different moments of urban increase: 1987, 1996 and 2006. All these data produced a digital elevation model of each year. Wind could be characterized by episodes which establish different conditions of atmospheric circulation in local scale. They show stable and unstable atmospheric situations which are representative of annual mean wind and summer conditions, respectively. Meteorological stations data and soundings described wind direction and speed. Computational simulations were performed to compare land use influence and terrain effects on wind patterns. Results pointed out slow wind speed in testes with digital elevation model. Also, they showed that urban surfaces with high density buildings present higher wind speed reductions than those with medium density. In addition, it is possible to conclude that the methodology applied in this study produced satisfactory results of wind patterns analysis and could be used in urban planning practices.

Key-words: Wind. Computer simulation. Land use.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Modelo de circulação meridional da atmosfera, mostrando os ventos à superfície e áreas de alta (A) e baixa (B) pressão.	22
FIGURA 2 Modelos de sistemas frontais. As setas indicam seu deslocamento.	23
FIGURA 3 Espectro de vento e escalas atmosféricas.....	24
FIGURA 4 Escalas espaciais e temporais de fenômenos atmosféricos.....	25
FIGURA 5 Camada limite atmosférica e seu desenvolvimento no ciclo de um dia.....	27
FIGURA 6 Esquema das camadas verticais nas áreas urbanas.....	27
FIGURA 7 Subcamadas da CLA propostas por Gandemer (1978).	28
FIGURA 8 Estrutura da CLA em condições de estabilidade neutra	29
FIGURA 9 Esquema das escalas climáticas e das camadas verticais nas áreas urbanas.....	30
FIGURA 10 Perfil genérico de velocidade média do vento ($\bar{u}$) em uma área urbana densamente ocupada. Linha tracejada: extrapolação do perfil da subcamada inercial; Linha cheia: perfil real.....	30
FIGURA 11 Classificação de Estabilidade pelo método da parcela.....	32
FIGURA 12 Perfis típicos de vento sobre vários tipos de superfície	35
FIGURA 13 Definição das dimensões de superfície utilizadas como medida de densidade urbana	35
FIGURA 14 Valores normalizados para deslocamento do plano zero (z_0/z_H) e para comprimento de rugosidade (z_0/z_H). As linhas contínuas representam a curva ideal e as tracejadas os limites inferiores e superiores, plotados em função de λ_P (a) e λ_F (b). A área sombreada determina o limite da “cidade real”.	36
FIGURA 15 Domínio tridimensional de cálculo no WindMap™.....	54
FIGURA 16 Modelo básico da metodologia utilizada para produção de mapas de potencial	54
FIGURA 17 Localização da cidade de Belo Horizonte (à esquerda) e.....	56
FIGURA 18 Topografia da cidade de Belo Horizonte.....	57
FIGURA 19 Manchas de ocupação urbana em Belo Horizonte. A linha mais grossa, ao centro.....	61
FIGURA 20 Fluxograma esquemático da metodologia adotada	65
FIGURA 21 Localização das estações meteorológicas.....	67
FIGURA 22 Localização das amostras de áreas urbanas.....	73
FIGURA 23 Tipologias urbanas de Belo Horizonte mostradas em imagens aéreas e esquema das fachadas das áreas urbanas escolhidas para determinação dos parâmetros de rugosidade.....	73
FIGURAS 24 e 25 Telas de opções do programa WindMap™.....	77
FIGURA 26 Localização dos pontos selecionados para análise dos resultados.....	79
FIGURA 27 Velocidade média mensal do vento, em Belo Horizonte, em 1987, 1997 e 2007	80

FIGURA 28 Direção predominante do vento mensal. A cor azul representa o ano de 1987, preto, 1997 e vermelho, 2007. Os meses que apresentam uma seta há coincidência de direção.	81
FIGURA 29a a c Frequência de ocorrência anual da direção do vento, em Belo Horizonte	81
FIGURA 30 Registros de velocidade do vento nos horários sinóticos, média da velocidade e incerteza decorrente da leitura dos registros anemométricos nos episódios de período instável	82
FIGURA 31 Registros de velocidade do vento nos horários sinóticos, média da velocidade e incerteza decorrente da leitura dos registros anemométricos nos episódios de período estável	83
FIGURA 32a a c Classificação das imagens de satélite de 1987, 1996 e 2006, respectivamente. A linha tracejada preta representa o limite da cidade de Belo Horizonte.	86
FIGURA 33a a c Porcentagem de área correspondente às classes de cobertura do solo das imagens classificadas.	87
FIGURA 34a e b Valores de z_d/z_H e z_0/z_H para áreas em Belo Horizonte. As linhas contínuas representam a curva ideal em função de z_d e z_0 e as tracejadas os limites inferiores e superiores, plotados em função de λ_P (A) e λ_F (B). A área sombreada determina o limite da “cidade real”. Estes limites foram compilados por Grimmond e Oke (1999).	89
FIGURA 35a a f Simulação da velocidade do vento em episódios de atmosfera instável	91
FIGURA 36a a c Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação e com a influência apenas da topografia para os episódios instáveis.....	91
FIGURA 37a a f Simulação da velocidade do vento em episódios de atmosfera estável	91
FIGURA 38a a c Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação e com a influência apenas da topografia para os episódios estáveis	91
FIGURA 39a a d Simulação da velocidade do vento considerando atmosfera neutra para episódios do ano de 2007.	93
FIGURA 40a e b Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação que consideram a variação da estabilidade da atmosfera e com estabilidade neutra, para os episódios de 2007.	94
FIGURA 41 Correlação entre a redução da velocidade do vento e z_0 para episódios instáveis.....	101
FIGURA 42 Correlação entre a redução da velocidade do vento e z_0 para episódios estáveis.....	101
FIGURA 43a e b Diferença de velocidade para os pontos.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Camadas, dimensões e escalas em clima urbano	31
TABELA 2 Classes de estabilidade de Pasquill (1961)	34
TABELA 3 Valores de z_0 para diferentes tipos de superfície.....	38
TABELA 4 Propriedades de rugosidade típicas adimensionais e	39
TABELA 5 Resolução espacial dos sensores de satélites	50
TABELA 6 Seleção dos episódios para cada ano de estudo	66
TABELA 7 Dados sobre as estações meteorológicas utilizadas	67
TABELA 8 Parâmetros estatísticos e valores de correção das imagens de satélite de 1987 e 1996 para correção radiométrica.....	70
TABELA 9 Descrição das classes de cobertura do solo	71
TABELA 10 Parâmetros de rugosidade para cada amostra de tecido urbano em Belo Horizonte	74
TABELA 11 Dados de sondagem e carta Skew-T utilizados para cada episódio	75
TABELA 12 Parâmetros de simulação	77
TABELA 13 Velocidades médias e direção predominante do vento das estações meteorológicas utilizadas nas simulações computacionais para cada episódio	83
TABELA 14 Altura da CLA para as sondagens correspondentes aos episódios	84
TABELA 15 Valores calculados de z_0 para as amostras urbanas em Belo Horizonte .	88
TABELA 16 Erros de predição das simulações computacionais.....	95
TABELA 17 Porcentagem de área equivalente a cada intervalo de redução de velocidade, considerando apenas a influência ocupação do solo nos episódios instáveis.....	96
TABELA 18 Porcentagem de área equivalente a cada intervalo de redução de velocidade, considerando apenas a influência ocupação do solo nos episódios estáveis.....	97
TABELA 19 Valor do comprimento de rugosidade (z_0) para cada ponto analisado	99
TABELA 20 Velocidade do vento (m/s) para cada ponto nas simulações realizadas, considerando testes apenas com terreno (terr.) e com o Modelo Digital de Elevação (ocup.).....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Classe de cobertura do solo – Água
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
AU1	Classe de cobertura do solo – Área urbana residencial
AU2	Classe de cobertura do solo – Área urbana densa de altura média
AU3	Classe de cobertura do solo – Área urbana de alta densidade
Ce	Amostra urbana no bairro Centro para estimativa de z_0
CLA	Camada Limite Atmosférica (<i>Planetary Boundary Layer</i>)
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Mudanças Climáticas
ENOS	El Niño Oscilação Sul
IGC/UFMG	Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISL	Subcamada de inércia (<i>Inertial Sublayer</i>)
Jk	Amostra urbana no bairro Presidente Jk para estimativa de z_0
Le	Método morfométrico de cálculo de z_0 – Lettau
Lo	Amostra urbana no bairro de Lourdes para estimativa de z_0
Ma	Método morfométrico de cálculo de z_0 – Macdonald <i>et al.</i>
MDE	Modelo digital de elevação
MDT	Modelo digital de terreno
NOAA	Administração Nacional de Atmosfera e Oceano dos Estados Unidos
Pa	Amostra urbana no bairro Pampulha para estimativa de z_0
PLAMBEL	Superintendência de Desenvolvimento da Região Metropolitana
Pr	Amostra urbana no bairro Prado para estimativa de z_0
Prodabel	Empresa de informática da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
RSL	Subcamada rugosa (<i>Roughness Sublayer</i>)
Rt	Método morfométrico de cálculo de z_0 – Regra Prática
S	Classe de cobertura do solo – Solo exposto
SIG	Sistema Geográfico de Informação
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UBL	Camada limite urbana (<i>urban boundary layer</i>)
UCL	Camada urbana ao nível das coberturas (<i>urban canopy layer</i>)
UTC	Tempo Universal Coordenado ou Tempo Médio de Greenwich (GMT)
VA	Classe de cobertura do solo – Vegetação arbórea
VR	Classe de cobertura do solo – Vegetação rasteira
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_*	temperatura de fricção
A_F	área frontal de obstáculos
A_P	área de projeção dos edifícios
A_T	área total
C_d	coeficiente de arrasto
c_p	calor específico à pressão constante
D	espaçamento entre elementos de rugosidade
g	aceleração da gravidade
k	constante de von-Karman
L	comprimento de Monin-Obukhov
q	fluxo de calor na superfície
T_*	escalas de temperatura
T_0	temperatura da superfície do solo
T_v	temperatura virtual
u^*	velocidade de fricção
u_z	velocidade do vento a uma determinada altura z
W_*	velocidade convectiva
z	altura acima do solo
z_0	comprimento característico da rugosidade
z_d	deslocamento do plano zero
z_g	topo da camada limite
z_H	altura dos obstáculos
z_i	altura da UBL
z_r	altura de mistura
α	coeficiente empírico
β	coeficiente empírico
λ_F	razão de área frontal
λ_P	razão de área plana

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 O vento e a circulação atmosférica	21
2.2 A Camada Limite Atmosférica	26
2.3 Parâmetros que interferem no comportamento da CLA em escala local	31
2.3.1 A estabilidade atmosférica.....	32
2.3.2 O efeito das cidades no interior da CLA	34
2.3.3 Parâmetros de rugosidade	36
2.4 Estado da arte dos estudos do vento em cidades.....	41
2.5 Técnicas de representação de variáveis e de simulação computacional.....	49
2.5.1 MDE e classificação de cobertura do solo.....	50
2.5.2 Simulação computacional.....	52
3 CASO DE ESTUDO: A CIDADE DE BELO HORIZONTE	56
3.1 Aspectos físicos e climáticos	56
3.2 Evolução urbana.....	59
3.3 Delimitação da área de estudo	62
4 METODOLOGIA.....	64
4.1 Coleta e tratamento de dados	66
4.1.1 Dados de vento.....	66
4.1.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)	68
4.1.3 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	69
4.1.3.1 Classificação de imagens de satélite.....	69
4.1.3.2 Determinação dos valores de comprimento de rugosidade (z_0).....	72
4.2 Simulação computacional.....	74
4.2.1 Parâmetros de entrada no modelo computacional.....	75
4.2.2 Procedimentos da simulação.....	76
4.2.3 Comparação dos resultados da simulação.....	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1 Análise dos dados de vento.....	80
5.2 Resultado da determinação dos parâmetros de entrada da simulação	84
5.3 A ocupação urbana e as estimativas de z_0	85
5.3.1 Demonstração da evolução urbana da área de estudo.....	85
5.3.2 Resultados da estimativa do comprimento de rugosidade (z_0).....	87
5.4 Análise das simulações computacionais	90

5.4.1 Resultados correspondentes à área de estudo	90
5.4.2 Erros de predição das simulações.....	95
5.4.3 Influência da ocupação do solo	96
5.4.4 Análise dos pontos: relação entre comprimento de rugosidade e velocidade do vento.....	98
 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	 104
 REFERÊNCIAS.....	 107
 GLOSSÁRIO	 115
Termos do programa Windmap™	116
 APÊNDICES	 117
APÊNDICE A: Matriz e erro de classificação das imagens de satélite.....	118
APÊNDICE B: Amostras de áreas urbanas para cálculo de z_0	119
APÊNDICE C: Perfil vertical de velocidade do vento extraído de sondagens do Aeroporto Internacional de Confins	123
APÊNDICE D: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da altura de simulação.....	125
APÊNDICE E: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da variação da altura da CLA	126
APÊNDICE F: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da variação de estimativa de z_0 para a amostra Lo	127
 ANEXOS	 128
ANEXO A: Perfil vertical de velocidade do vento extraído de sondagens do Aeroporto Internacional de Confins	129
ANEXO B: Dados das estações meteorológicas.....	132

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e a concentração desta em áreas urbanas provocam a expansão das cidades e alteração constante de sua paisagem. Em decorrência deste processo, vem ocorrendo a ampliação da preocupação com os impactos da ação humana sobre o ambiente natural e com a melhoria da qualidade de vida dos habitantes¹. Um dos fatores que pode contribuir para promover maior qualidade ambiental às cidades é a incorporação de estudos relativos ao clima no planejamento urbano.

Os estudos climáticos são usualmente focados nas anomalias causadas pela área urbana nas variáveis do clima, ou seja, têm como foco a descrição dos fenômenos atmosféricos. A atividade de planejamento de cidades, por sua vez, pretende antever processos futuros para prevenir contra prováveis problemas e se ocupa do direcionamento da evolução espacial das áreas urbanas (SOUZA, 2003). Desta forma, o foco descritivo da investigação do clima não satisfaz às demandas dos técnicos responsáveis pela tomada de decisão. Page (1970) aponta que a abordagem preditiva tem maior aplicabilidade para os planejadores se comparada aos estudos descritivos, já que estes profissionais se preocupam com as propriedades de um artefato que será criado no futuro e que somente pode ser estudado no presente, através de modelos teóricos preditivos.

A construção de modelos teóricos permite a compreensão da realidade observada através da expressão de certas características relevantes. Tem como propósito fornecer um quadro simplificado e inteligível da realidade tal como ela se constitui e, a partir de então, permitir a simulação dos efeitos de decisões que podem ser tomadas (ECHENIQUE, 1975). Segundo o mesmo autor, em um processo ideal de elaboração de modelos, primeiramente descreve-se a realidade com base nas relações entre variáveis conhecidas no passado e no presente. A partir do conhecimento desta realidade, é possível, então, partir para a construção de modelos preditivos e exploratórios que darão subsídio para o planejamento de um cenário futuro.

No caso do estudo da relação entre o clima e as cidades, o processo de investigação por modelos teóricos poderia auxiliar na previsão do comportamento das variáveis climáticas a partir da previsão de novos cenários urbanos. Assim, seria possível

¹ A disseminação de fóruns e publicações acerca do impacto da ação humano no meio ambiente é crescente e um dos exemplos desta ampliação das discussões em nível mundial são as reuniões do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e fóruns locais que abordam esta temática.

mitigar impactos na atmosfera urbana decorrentes da implantação das cidades.

Especificamente no que diz respeito ao vento, a previsão do escoamento dos fluxos de ar diante da mudança do uso do solo poderia evitar os efeitos negativos de uma ocupação urbana inadequada tais como a ocupação e o adensamento de áreas que naturalmente não apresentam boa ventilação, a implantação de áreas industriais e equipamentos de grande porte e a alteração de padrões de uso do solo.

Uma das estratégias para a verificação das condições do vento é a identificação das particularidades de seu comportamento através da análise de episódios representativos da circulação atmosférica de uma região (MONTEIRO, 1969). A representatividade dos episódios garante a validade dos modelos construídos por meio deste método e reduz a necessidade de se examinar uma série longa de dados meteorológicos, a qual demanda experiência dos técnicos envolvidos em sua análise. Além disso, diminui o tempo despendido nos estudos descritivos, já que o foco do planejamento é a previsão de cenários e a dinâmica da cidade exige uma agilidade na tomada de decisão.

Em clima tropical, o vento desempenha papel importante na qualidade e conforto ambiental das cidades. Além de ser responsável pela dispersão de poluentes, em áreas urbanas tropicais os fluxos de ar favorecem as trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente, sendo a ventilação uma estratégia bioclimática eficiente para a obtenção do controle térmico e conforto humano (BITTENCOURT *et al.*, 2006).

Diante da necessidade de representação da cidade enquanto um modelo para auxílio à prática do planejamento, aliada à necessidade de investigação do clima para a melhoria da qualidade de vida no ambiente urbano, pretende-se, no presente trabalho verificar a influência da cidade sobre uma das variáveis climáticas, o vento. A partir de uma perspectiva cronológica da evolução da ocupação do território, objetiva-se identificar uma relação entre a mudança da ocupação do solo e a alteração dos padrões de vento para o caso da cidade de Belo Horizonte, utilizando técnica de simulação computacional.

A ocupação urbana foi representada pelo comprimento de rugosidade (z_0), parâmetro que demonstra a influência da superfície sobre o escoamento dos fluxos de ar, sendo que sua evolução foi demonstrada pela ampliação da malha urbana em três épocas de ocupação: 1987, 1996 e 2006.

O vento, por sua vez, foi descrito por episódios representativos das condições típicas de períodos de estabilidade e instabilidade atmosférica. Em Belo Horizonte, o primeiro ocorre principalmente no inverno, em condições de céu claro e ausência de chuvas, e os registros de média de velocidade e direção predominante do vento é representativo das médias mensais e anuais. Já a condição instável acontece predominantemente no verão e, no caso deste trabalho, optou-se por selecionar episódios caracterizados pela atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), em que a direção predominante dos ventos tem seu quadrante alterado (LUCAS e ABREU, 2004).

Os objetivos específicos foram:

- analisar a diferença do comportamento do vento nos episódios selecionados para os três anos;
- verificar a alteração da ocupação do solo neste mesmo período;
- verificar o melhor método de determinação do comprimento de rugosidade para as diferentes tipologias de ocupação urbana em Belo Horizonte;
- verificar a possibilidade de utilização do programa computacional WindMapTM, desenvolvido para previsão de potencial eólico, para aplicações em planejamento urbano;
- desenvolver mapas de velocidade do vento considerando diferentes condições de estabilidade atmosférica;
- analisar pontos específicos onde houve substituição de ocupação urbana ao longo do tempo, em Belo Horizonte.

O desenvolvimento do trabalho foi norteado pelas seguintes premissas:

- Os padrões locais de vento são influenciados pela alteração da ocupação do solo;
- A diferença das características entre os episódios de condição estável e instável da atmosfera pode provocar resposta diferenciada em relação ao comportamento típico dos ventos diante da ocupação urbana.
- Métodos de simulação computacional das condições de circulação de ar podem ser aplicados para a definição de orientações para o planejamento urbano.

Assim, procurou-se abordar as particularidades do comportamento do vento através da tipicidade dos episódios, em Belo Horizonte, adotando uma metodologia que pode ser aplicada na prática do planejamento urbano. Além disso, a representatividade dos resultados, demonstrando que variados tipos de ocupação interferem de forma

diferenciada no escoamento de ar, pode ser um subsídio para a tomada de decisão em cidades.

A organização deste trabalho foi feita em seis capítulos, além do item introdutório. O capítulo 2 (Revisão bibliográfica e fundamentação teórica) apresenta a revisão bibliográfica e a fundamentação que auxiliam no entendimento do comportamento do vento nas diferentes escalas de abordagem climática. Também são descritos parâmetros que interferem no escoamento do ar junto ao solo. Além disso, é feita uma compilação de estudos de vento em cidades e de métodos e técnicas de abordagem das variáveis que compõem os procedimentos de simulação computacional.

O capítulo 3 (Caso de estudo: a cidade de Belo Horizonte) foi dedicado a apresentação do caso de estudo, mostrando aspectos físicos e climáticos de Belo Horizonte, sua evolução urbana com indicação dos eixos de expansão desde a época da fundação do município até a atualidade. Ao final deste item, faz-se a delimitação da área de estudo.

No capítulo 4 (Metodologia) são apresentados os métodos e técnicas empregados no trabalho, subdividindo-se em coleta e tratamento de dados de vento, topografia e ocupação urbana e os procedimentos utilizados na simulação computacional.

O capítulo 5 (Resultados e discussões) reúne os resultados obtidos e sua discussão com base nas premissas levantadas no início do trabalho. São analisados os dados de vento de cada episódio, os resultados obtidos na determinação dos parâmetros de simulação, a variação da ocupação urbana nos três anos que caracterizam a evolução da cidade e uma discussão sobre as estimativas do comprimento de rugosidade (z_0). Posteriormente são apresentados os resultados das simulações computacionais, analisados através da observação da área de estudo como um todo e pela escolha de pontos específicos em que ocorreram alterações da ocupação urbana em Belo Horizonte.

No capítulo 6 (Conclusão e considerações finais) são feitas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, identificando as limitações e a aplicabilidade dos resultados obtidos diante dos objetivos aqui colocados.

O capítulo 7 (Referências) apresenta as referências utilizadas no decorrer do trabalho. Em seguida, foi organizado um glossário geral e de termos específicos do programa WindMapTM para facilitar o entendimento do texto e da operacionalidade do aplicativo computacional.

Por fim, são apresentados apêndices e anexos que contém a matriz de erros de classificação das imagens de satélite, as amostras de áreas urbanas para cálculo de z_0 , as sondagens do Aeroporto Internacional de Confins, simulações paramétricas no WindMapTM para teste de sensibilidade da variação de z_0 e da altura da Camada Limite Atmosférica e tabelas com os dados de direção e velocidade do vento fornecidos pelo 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de urbanização causa alterações no comportamento das variáveis climáticas em âmbito local, produzindo condições atmosféricas que definem o clima urbano. Em latitudes tropicais e subtropicais, tal processo vem se tornando cada vez mais acelerado e é acompanhado pelo aumento de problemas severos associados à deterioração ambiental, condições de vida insalubres, escassez de energia e água e aumento da exposição da população a enchentes e ventos extremos. Muitos destes problemas poderiam ser reduzidos se o planejamento urbano incorporasse estudos relativos ao clima (TAESLER, 1986). O que se percebe, contudo, é que pesquisas com esta abordagem ainda são pouco aplicadas ao zoneamento das cidades.

Uma das razões geralmente apontadas (PAGE, 1970; TAESLER, 1986; MILLS, 2006) está na dificuldade de comunicação entre pesquisadores e planejadores. Assim, as informações produzidas pelos primeiros não conseguem ser aplicadas em atividades de planejamento, sendo necessária uma aproximação entre ambas as abordagens. Outra questão está na inexistência de diretrizes claras de como incorporar os fatores climáticos ao processo de decisão no ambiente urbano. Em relação à realidade brasileira, Monteiro (2006) coloca que ainda é preciso convencer os tomadores de decisão da importância dos estudos do clima urbano no planejamento de cidades. Neste sentido, os resultados de pesquisas nesta área devem ser apresentados de forma clara e acessível para que o poder público e a sociedade possam compreender, aceitar e implementar corretamente as propostas de planejamento.

Outra dificuldade de aplicação dos estudos climáticos está na abordagem realizada nas pesquisas. Muitas vezes as análises descrevem a ocorrência de fenômenos causados pela urbanização, ou seja, é uma ciência descritiva. Para fins de planejamento, no entanto, é necessário um enfoque na previsão de cenários futuros, verificando o impacto da atmosfera urbana no ambiente construído e analisando seus efeitos na saúde e conforto dos ocupantes (PAGE, 1970; TAESLER, 1986).

As pesquisas que tratam da questão da climatologia urbana comumente empregam dois tipos de tratamento das variáveis climáticas, os quais são o tratamento estático e o dinâmico (MONTEIRO, 1969). O tratamento estático tem como propósito a descrição genérica do comportamento atmosférico, sem revelar suas particularidades, realizada através de longos períodos de observações climáticas. A climatologia dinâmica, por sua vez, pretende expressar as variações no tempo e as particularidades dos fenômenos por meio de amostragem de individualidades que sejam expressões reais

dos mecanismos de circulação atmosférica de uma região. O autor aponta que a melhor compreensão do clima em determinada região se dá quando este é analisado através da dinâmica dos fenômenos atmosféricos, pois assim pode-se ter noção da sucessão dos tipos de tempo atmosférico.

Tendo como foco o estudo dos ventos em ambiente urbano, cabe verificar, então, como é a dinâmica do comportamento dos escoamentos de ar com o objetivo de prever possíveis alterações diante do crescimento das cidades. Primeiramente, contudo, é necessário entender como ocorre o escoamento do ar nos vários níveis da atmosfera e quais os elementos que podem influenciar a sua dinâmica, objetivo que se pretende atingir neste capítulo, tendo como enfoque principal a relação entre a cidade e o vento.

2.1 O vento e a circulação atmosférica

Ventos são escoamentos de massas de ar orientados por diferença de pressão e temperatura (LOPES, 2003). A caracterização e a distribuição destes movimentos, que se dirigem dos centros de alta pressão para os de baixa pressão, são influenciadas por fatores globais e locais que determinam sua duração e suas extensões horizontal e vertical.

Na escala planetária, padrões globais de vento e pressão que se mantêm durante o ano, ou são produzidos sazonalmente, definem a circulação geral da atmosfera (BARRY e CHORLEY², 1976 *apud* AYOADE, 1998). Nesta escala, três mecanismos regem o movimento das massas de ar: o movimento de rotação da Terra (Força de Coriolis); a força centrífuga, relacionada com a curvatura da trajetória da Terra, e o gradiente de pressão, causado pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre (SILVA, 1999). Em altitudes onde o efeito do atrito pode ser desprezado, há um equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis, definindo a aceleração das partículas de ar. Nesta região, o fluxo de ar é denominado vento geostrófico.

A circulação geral da atmosfera, de maneira genérica, pode ser representada por um modelo composto por três células de circulação meridional para cada hemisfério da Terra (VAREJÃO-SILVA, 2006, FIGURA 1):

² BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosphere, Weather and Climate*. London: Methuen, 3ª ed, 1976.

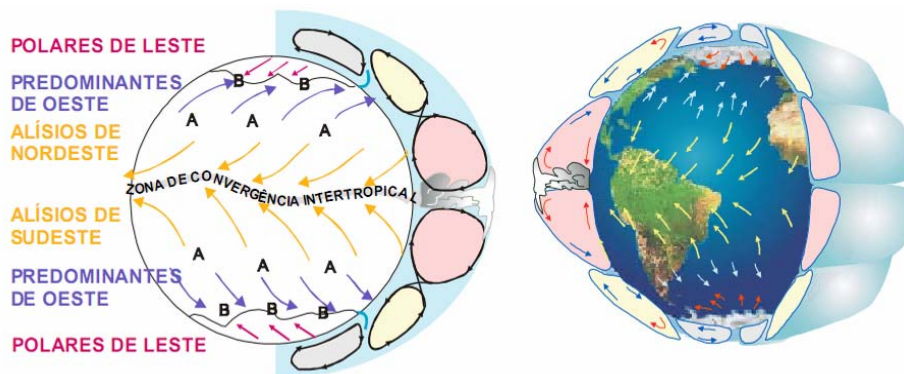


FIGURA 1 Modelo de circulação meridional da atmosfera, mostrando os ventos à superfície e áreas de alta (A) e baixa (B) pressão.
 *Nota: a espessura da troposfera está representada em escala exagerada.
 Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2006.

- Faixa tropical, que se estende do Equador até 30° de latitude, denominada Célula de Hadley, onde predominam os ventos alísios;
- Zona de latitudes médias, conhecida como Célula de Ferrel, entre as latitudes 30° e 60°, onde atuam os ventos de oeste;
- Região polar, que está entre a latitude 60° e os pólos.

A atuação destas células está restrita à troposfera, camada atmosférica que se estende até 10 km acima da superfície terrestre (OKE, 1978). Neste modelo tricelular, os ventos provenientes das regiões subtropicais de alta pressão convergem para a zona equatorial de baixa pressão. Estes são impulsionados pela força do gradiente de pressão e têm sua direção alterada devido à força de Coriolis. Tal comportamento justifica a existência, nos ramos inferiores das células de Hadley, dos ventos alísios de nordeste e de sudeste, respectivamente nos Hemisférios Norte e Sul (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Na circulação geral, sistemas circulatórios secundários produzem variações diárias ou periódicas na atmosfera. Tais variações determinam as condições de tempo, que são padrões e tipos característicos que definem um estado médio da atmosfera em um intervalo temporal e em determinado local (AYOADE, 1998). Alguns tipos de sistemas produtores de tempo são os anticlones e ciclones, as massas de ar, as linhas de instabilidade e os sistemas frontais.

Os ciclones e anticlones são circulações caracterizadas pelo seu sentido no plano horizontal. Os ciclones, sistemas de baixa pressão atmosférica, têm circulação anti-horária no Hemisfério Norte e horária no Hemisfério Sul. Os anticlones, ao contrário,

são áreas de alta pressão que se movem no sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul.

As massas de ar são grandes porções da atmosfera que apresentam distribuição vertical de temperatura e umidade aproximadamente uniformes (VAREJÃO-SILVA, 2006), podendo ter origem tropical ou polar. Já os sistemas frontais ou frentes (FIGURA 2), são zonas-limites que separam massas de ar de propriedades diferentes (AYOADE, 1998). Denomina-se frente fria quando a massa de ar frio avança na direção da massa de ar quente. A frente quente, por sua vez, ocorre quando a massa de ar quente avança na direção da massa de ar frio (CPTEC/INPE)³.

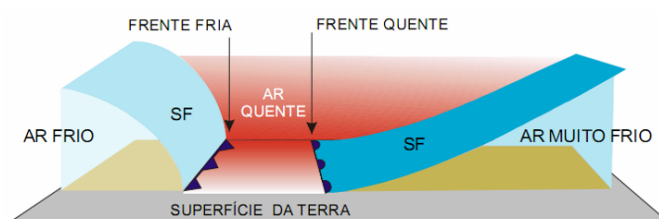


FIGURA 2 Modelos de sistemas frontais. As setas indicam seu deslocamento.
Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2006.

Outros tipos de sistema de circulação podem ser observados em extensões menores de território e com duração que compreende o ciclo de um dia. Tais fenômenos são provocados por características próprias da superfície como topografia e tipo de cobertura superficial (água ou terra) que geram circulações locais, tais como brisas terrestres e marítimas e ventos de vale e de montanha (AYOADE, 1998).

O comportamento do sistema climático pode sofrer alterações nos processos de troca de energia e umidade entre a superfície dos oceanos e a atmosfera adjacente, o que pode mudar o clima de determinada região ou até mesmo do planeta como um todo. Alguns tipos de fenômenos atmosféricos responsáveis por esta alteração são conhecidos como El Niño e La Niña, caracterizados pelo aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico Tropical e que acompanham uma tendência de alternância de ocorrência a cada 3 a 7 anos. Também denominado ENOS (El Niño Oscilação Sul), representam alterações dos padrões normais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região equatorial (OLIVEIRA, 2001).

Nota-se que os movimentos atmosféricos ocorrem em diversos períodos de tempo e em extensões horizontais e verticais distintas. Quando se considera estudos em clima urbano, torna-se importante a definição de escalas de abordagem, questão

³ Definição disponível em <<http://www7.cptec.inpe.br/glossario>>. Acesso em 03/12/2008.

considerada básica para a determinação da abrangência do objeto de estudo e para seleção adequada de métodos e técnicas, segundo Assis (2000). Esta autora fez uma revisão das escalas climáticas propostas por diversos autores e aponta divergência em taxonomias apresentadas por eles. Observa-se também que nem sempre a componente vertical é considerada.

Monteiro (1976), por exemplo, define as escalas de abordagem em sete níveis de “espaços climáticos”⁴: zonal, regional, sub-regional, local, mesoclima, topoclima e microclima. Para cada nível, é feita uma articulação entre a organização climática e o clima urbano, trazendo propostas de escalas cartográficas de análise, extensão territorial dos espaços urbanos em cada nível (megalópole, cidade, bairro, edificação) e as estratégias de abordagem (meios de observação dos fenômenos meteorológicos, fatores de organização e técnicas de análise). Contudo ele não propõe uma divisão vertical das diferentes escalas.

Saraiva (1983), analisando especificamente o vento a partir da teoria estatística da turbulência, define escalas de movimento atmosférico baseadas no espectro do vento atmosférico. Este espectro é constituído pela representação das características de variação do vento quanto às escalas de freqüência, representadas pelo inverso das escalas de tempo. Foram definidas três escalas atmosféricas para representar esta variação de freqüência (FIGURA 3):

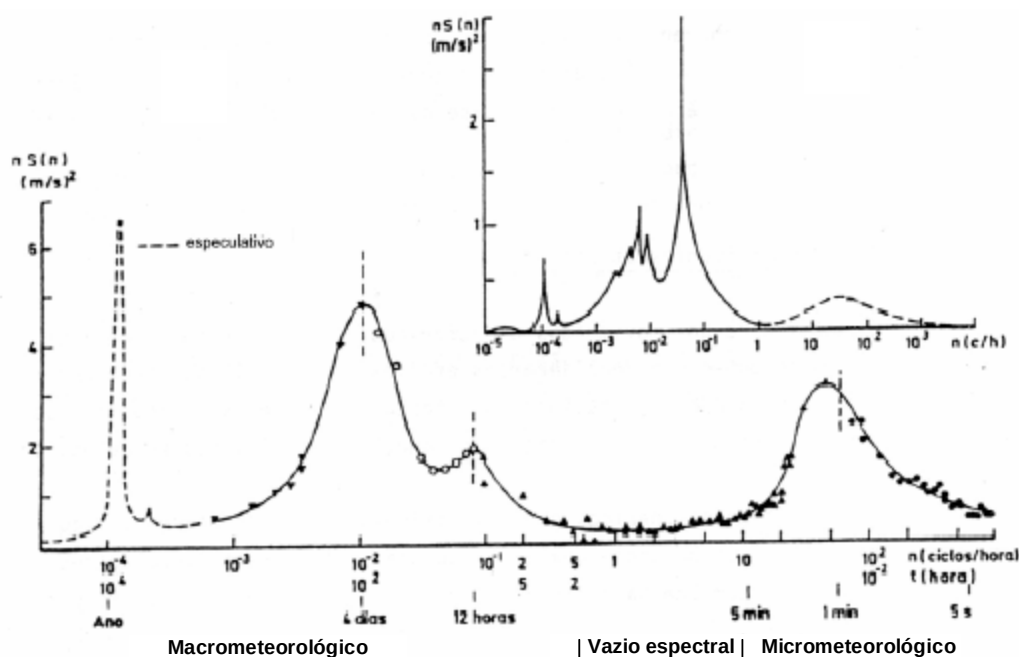


FIGURA 3 Espectro de vento e escalas atmosféricas

Fonte: SARAIVA, 1983.

⁴ Denominação utilizada pelo autor para se referir às escalas, baseado na divisão proposta por Cailleux e Tricart.[CAILLEUX, A; TRICART, J. *Introduction a la géomorphologie climatique*. Paris: SEDES, 1965]

- escala macrometeorológica ou sinótica: dimensões superiores a 500 km ou períodos de tempo superiores a 2 dias.
- escala meso-meteorológica: representada pelo vazio espectral, estendendo-se de 1 a 8 horas. Corresponde a efeitos de circulações locais.
- escala micrometeorológica ou local: movimentos de dimensão característica inferior a 20 km ou escalas de tempo inferiores a 1 hora.

Os picos presentes no espectro de vento correspondem a fenômenos físicos marcantes, como o movimento de translação da Terra (1 ano), a variação de inclinação do eixo terrestre (6 meses), a passagem dos sistemas frontais (4 a 7 dias), a sucessão dos dias (1 dia), a sucessão dos dias e das noites (12 horas) e rajadas (5 minutos).

Oke (1978) faz uma proposta de escalas climáticas semelhante à de Saraiva (1983), baseada também no comprimento horizontal e no tempo de duração dos fenômenos atmosféricos. Sua representação (FIGURA 4) é mais clara no que diz respeito à extensão horizontal se comparada ao espectro de vento, pois este apresenta apenas uma ordem de grandeza do comprimento horizontal quando faz a definição das escalas, mas não o representa de forma gráfica.

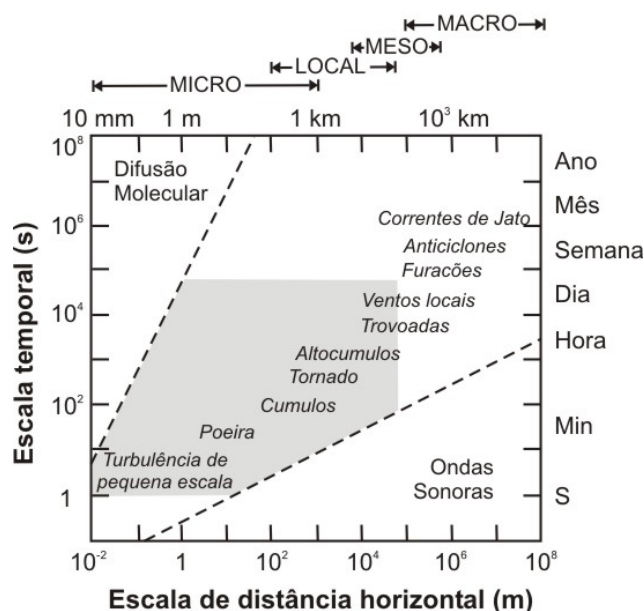


FIGURA 4 Escalas espaciais e temporais de fenômenos atmosféricos
Fonte: Adaptado de OKE, 1978.

Na proposta de Oke (1978), a distância horizontal dos fenômenos pode variar de milímetros a quilômetros. Os anticiclones, por exemplo, podem ter duração de 1

semana e se estender horizontalmente por 1.000 km, já os ventos locais ocorrem durante 1 dia e se estendem por 10 a 100 km.

As escalas climáticas apresentadas acima, apesar de apresentarem taxonomia semelhante, não apresentam consonância quanto às distâncias horizontais e duração temporal. Além disso, não consideram a componente vertical em sua classificação, dimensão que é de extrema importância na análise do vento devido à variação do seu comportamento em altura. Tal escoamento pode ser do tipo turbulento em camada mais próxima à superfície, ou laminar em alturas mais elevadas.

Neste sentido, outros modelos conceituais foram propostos para representar verticalmente o escoamento dos fluxos de ar e as forças que interferem no seu movimento. A seguir, estes modelos são apresentados.

2.2 A Camada Limite Atmosférica

A atmosfera sofre influência da superfície nos primeiros 10 km de sua extensão vertical, na camada denominada troposfera. No interior desta camada, em termos de altura, duas zonas distintas podem ser consideradas: a camada limite e a zona exterior. Na zona exterior, o ar se comporta como um fluido ideal. Já a camada limite, também denominada camada limite atmosférica (CLA), é aquela onde as forças de origem viscosa são relevantes (SARAIVA, 1983).

Na CLA, o escoamento das massas de ar é diretamente afetado pela superfície terrestre e sofre influência de forçantes superficiais como arrasto, evaporação e evapotranspiração, transferência de calor, emissão de poluentes e modificações do escoamento induzidas pela topografia (LOREDO-SOUZA *et al.*, 2004). Sua espessura é definida como a altura acima do solo onde a velocidade atinge 99% da magnitude do escoamento não perturbado.

Stull (1988) descreve o ciclo diário de desenvolvimento da camada limite atmosférica para regiões de alta pressão em condição de estabilidade atmosférica (FIGURA 5). Ao nascer do sol, o aquecimento da superfície motiva o surgimento de vórtices turbulentos que produzem uma camada de mistura no interior da CLA, cuja altura máxima é atingida no fim da manhã. No pôr do sol, o resfriamento da superfície cria uma camada noturna estável, acima da qual está uma camada residual, que é basicamente uma parte restante da camada de mistura diurna. Durante todo o ciclo, uma camada superficial ocupa uma pequena porção da CLA junto ao solo, onde os

fluxos verticais são aproximadamente constantes. Assim, em função do horário do dia e da condição de estabilidade atmosférica, sua altura sofre alterações, sendo que durante o dia, pode variar entre 1 e 2 km e à noite não ultrapassa os 100 m (OKE, 1978). Já em condições de instabilidade atmosférica, a CLA pode atingir de 2 a 3 km (LOPES, 2003).

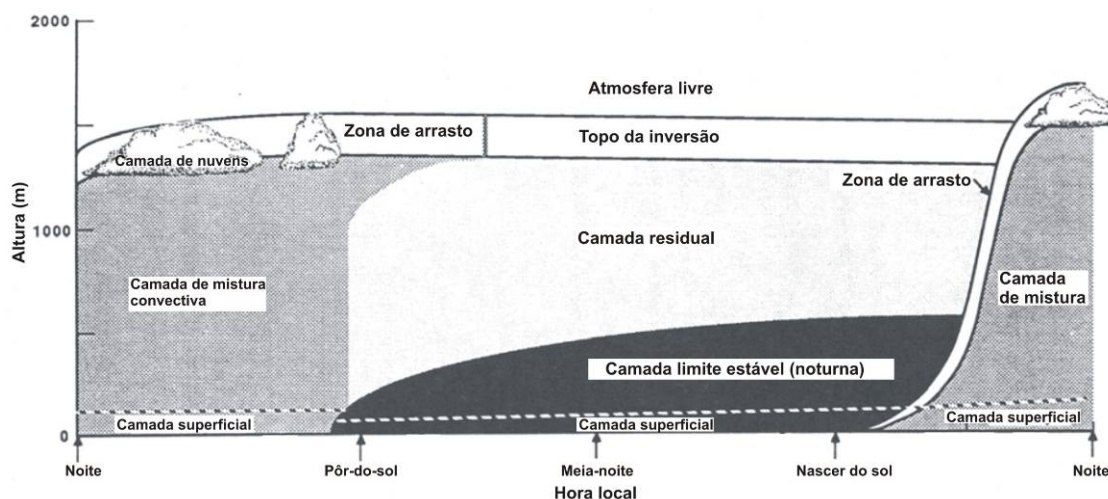


FIGURA 5 Camada limite atmosférica e seu desenvolvimento no ciclo de um dia
Fonte: Adaptado de STULL, 1988.

Na literatura, nomenclaturas e formas de abordagem distintas incorrem em divisões internas diferentes para a camada limite atmosférica. Oke (1978) propõe a divisão da CLA em dois níveis (FIGURA 6): a camada urbana ao nível das coberturas (*urban canopy layer* - UCL) e a camada limite urbana (*urban boundary layer* - UBL). A UBL é definida como a camada acima das coberturas das edificações e se estende até o nível onde a influência do atrito é nula, cujas características são afetadas pela presença da superfície urbana abaixo dela. Nesta região, os fenômenos locais e de meso-escala são controlados por processos que operam em macro-escalas espaciais e temporais (ARNFIELD, 2003).

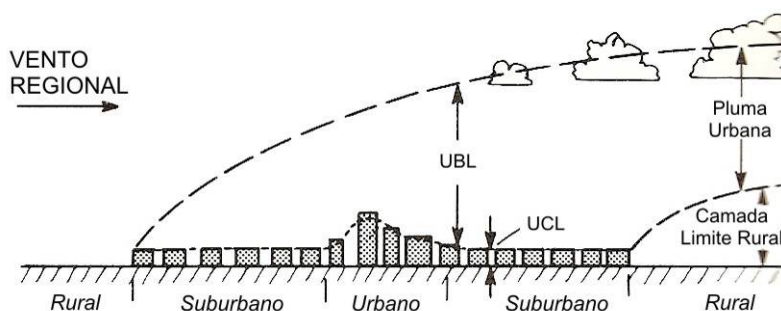


FIGURA 6 Esquema das camadas verticais nas áreas urbanas
Fonte: Adaptado de OKE, 1978.

A UCL abrange a extensão do solo até a altura média dos elementos de rugosidade (z_H). Nesta camada, os processos de fluxo de ar e troca térmica são controlados pela micro-escala, ou seja, por trocas e processos realizados no nível dos edifícios e das ruas.

Gandemer *et al.*⁵ (1978 *apud* SILVA, 1999) sugerem a separação da CLA em duas subcamadas (FIGURA 7): a primeira, denominada logarítmica ou zona de parede, e outra denominada camada exterior. Silva (1999) coloca que a espessura da CLA pode variar entre 350 m, para superfícies lisas e em torno de 1 km em áreas muito adensadas com obstáculos altos. Já a zona de parede tem espessura média de 150 m. Nesta abordagem busca-se o entendimento da atmosfera para verificar o efeito do vento em relação aos edifícios, aplicação realizada na Engenharia de Vento. Assim, é possível fazer simplificações da estrutura interna da camada, podendo considerar os escoamentos como bidimensionais e desprezando as forças de Coriolis (SARAIVA, 1983).

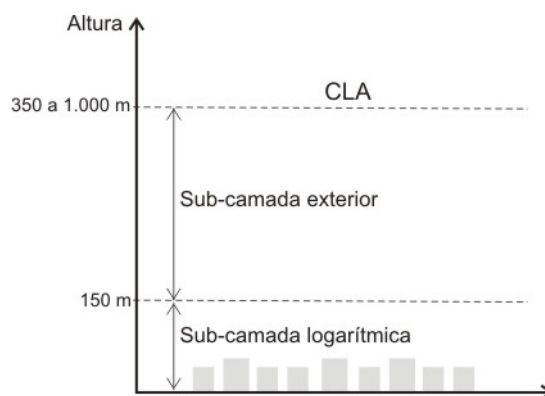


FIGURA 7 Subcamadas da CLA propostas por Gandemer (1978).
As alturas das camadas foram compiladas de Silva (1999).
Fonte: Produzido pela autora.

Garra⁶ (1994 *apud* LOPES, 2003), apresenta a divisão da CLA, em condições de estratificação neutra da atmosfera, composta por duas camadas (FIGURA 8): a camada interna (ou de superfície) e a camada externa (ou de Ekman). A camada externa é dominada pela convecção livre e corresponde a 90% da altura total da camada limite. A camada interna é a região da CLA próxima à superfície onde dominam os movimentos turbulentos de pequena escala. Esta camada pode ser dividida em outras duas subcamadas:

⁵ GANDEMER *et al.*. *Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles, application à la conception des installations de ventilation*. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. n° 187, 1978.

⁶ GARRAT, J. R. *The atmospheric boundary layer*. New York: Cambridge University. 1994

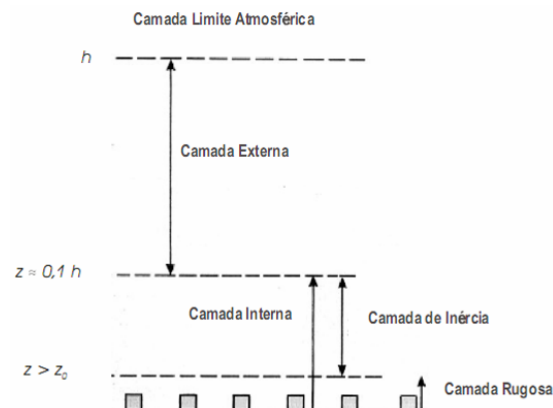


FIGURA 8 Estrutura da CLA em condições de estabilidade neutra

Fonte: LOPES, 2003.

- a rugosa ou interfacial, onde o fluxo de ar origina-se da interação produzida individualmente pelos elementos de rugosidade (ARNFIELD, 2003), sendo que o transporte molecular domina frente ao transporte turbulento;
- a subcamada de inércia, cuja característica é apresentar um perfil de vento logarítmico e onde o efeito individualizado dos obstáculos não é mais significativo.

Tal classificação considera um maior número de divisões para a CLA, porém ainda não faz uma relação direta da altura das subcamadas internas com os obstáculos que compõem a superfície do solo no caso das cidades, elementos que influenciam fortemente a espessura dos níveis da CLA.

Um outro modelo de divisão da camada limite atmosférica (OKE, 2006A), apresentado nas FIG. 9 e 10, também considera dois níveis no interior da CLA: a camada superficial (*surface layer*) e a camada de mistura (*mixing layer*). Estas parecem se equivaler às definições de camada interna e externa, respectivamente, apresentadas por Lopes (2003), assim como a proposição da subdivisão da camada interna nas subcamadas rugosa e inercial. O diferencial do modelo de Oke (2006A) está na relação proposta entre os parâmetros de rugosidade e sua influência no escoamento, além de referir-se a estes parâmetros como limites das alturas das camadas.

De acordo com esta proposta (OKE, 2006A), a subcamada rugosa (RSL) se estende do nível do solo até a altura de mistura (z_r), onde a ação de mistura é completa e os efeitos individuais dos obstáculos são percebidos. Esta altura de mistura pode ser determinada por:

- | | |
|--------------------|---|
| $z_r \leq 1,5 z_H$ | Áreas urbanas densas, com pequenos espaçamentos |
| $z_r \geq 4,0 z_H$ | Áreas urbanas de baixa densidade |

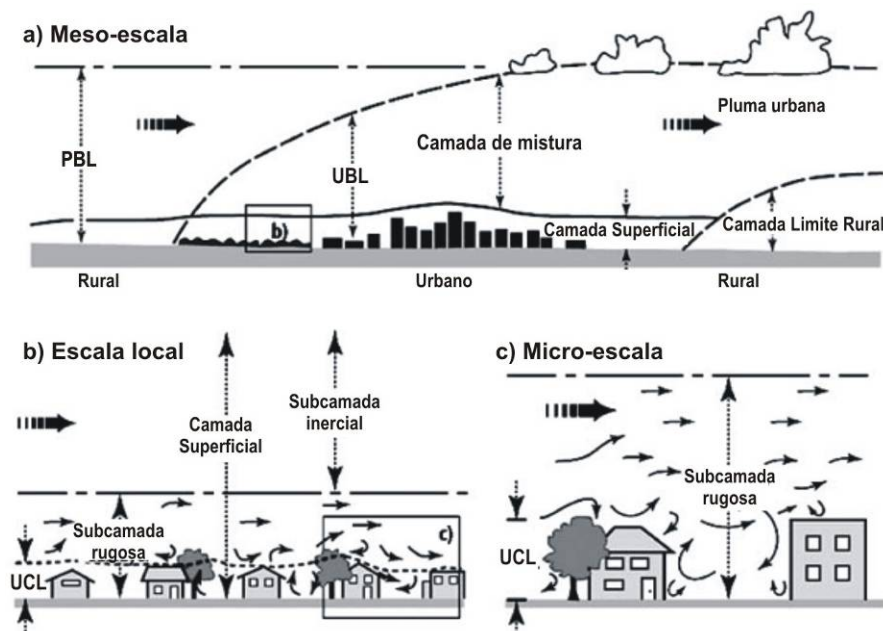


FIGURA 9 Esquema das escalas climáticas e das camadas verticais nas áreas urbanas
Fonte: Adaptado de OKE, 2006a.

A subcamada inercial tem sua altura determinada pela altura de mistura (z_r) e estende-se até o topo da camada limite interna. Nesta camada, há uma mescla do efeito individualizado dos obstáculos pela ação dos vórtices turbulentos.

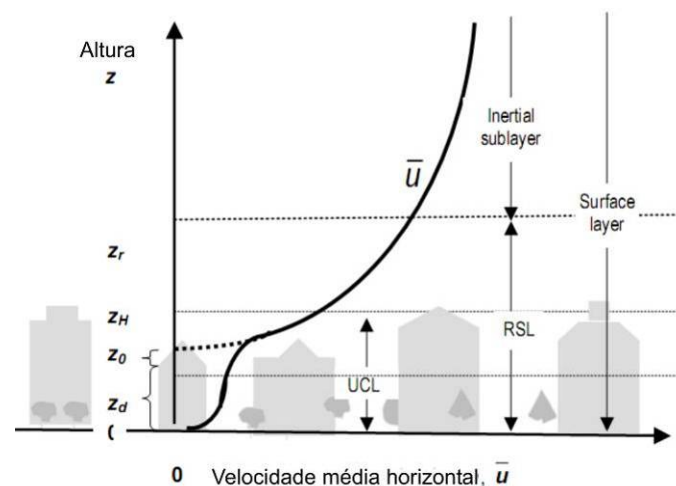


FIGURA 10 Perfil genérico de velocidade média do vento ($\bar{u}$) em uma área urbana densamente ocupada. Linha tracejada: extrapolação do perfil da subcamada inercial; Linha cheia: perfil real.
Fonte: Adaptado de OKE, 2006a.

Oke (2006b), com o objetivo de padronizar nomenclaturas, propõe uma nova padronização de camadas, dimensões verticais e sua relação com as escalas climáticas (TABELA 1). Esta taxonomia será utilizada no decorrer do presente trabalho quando se referir a escalas e camadas internas da CLA.

TABELA 1 Camadas, dimensões e escalas em clima urbano

Nome da camada	Dimensões verticais típicas	Parâmetros de escala	Escala
UCL			
Camada das coberturas	$\sim 10^1$ m	z_H, D, L	Micro
Camada de rugosidade	$\sim 10^1$ m	z_H, D, L	Micro
UBL			
Camada inercial	$\sim 10^2$ m	z, L, u_*, θ_*	Local
Camada de mistura	$\sim 10^3$ m	z_i, L, W_*, T_*	Meso

Fonte: Oke, 2006b

D : espaçamento entre elementos de rugosidade; L : Comprimento de Monin-Obukhov; T_* : escalas de temperatura; u_* : velocidade de fricção; z : altura acima do solo; z_H : altura dos obstáculos; z_i : altura da UBL; W_* : velocidade convectiva; θ_* : temperatura de fricção.

Diante deste contexto de modelos de divisão vertical da camada limite atmosférica, a proposta de Oke (2006a) parece ser a mais completa, pois incorpora tanto as escalas climáticas de análise do clima urbano como os parâmetros de rugosidade. Contudo, os modelos de estudo não conseguem simular a complexidade do comportamento do vento, sendo necessárias simplificações da realidade. Assim, modelos mais simplificados como o apresentado por Lopes (2003) geralmente são aplicados nas análises em escala local⁷, que abrangem uma cidade, por exemplo. Cabe reforçar que, em cada escala de abordagem do clima urbano, devem ser consideradas as variáveis que afetam o comportamento dos escoamentos de ar e, a partir de então, escolher o modelo que melhor represente o objeto de estudo.

2.3 Parâmetros que interferem no comportamento da CLA em escala local

Na escala local, as características da camada limite atmosférica e a espessura de suas camadas internas são afetadas concomitantemente por fenômenos de macro-escala e por circulações desenvolvidas localmente. Os perfis verticais de temperatura e velocidade do vento são, então, influenciados por questões relativas à estabilidade atmosférica. Ao mesmo tempo, o vento sofre a ação dos obstáculos naturais e construídos que compõem a superfície. Assim, estes parâmetros precisam ser considerados na caracterização do escoamento de ar em determinada região.

⁷ A nomenclatura para as escalas climáticas adotada neste trabalho foi definida por Oke (2006a).

2.3.1 A estabilidade atmosférica

As condições de estabilidade estática da atmosfera estão associadas à distribuição vertical da temperatura do ar. Um método utilizado na verificação de tais condições é o método da parcela, em que se observa o movimento vertical de uma porção de ar em relação ao gradiente vertical de temperatura. Considerando movimentos adiabáticos, este método caracteriza a atmosfera em três condições: estável, instável e neutra. A primeira ocorre quando os movimentos atmosféricos ascendentes estão ausentes ou definitivamente inibidos; a atmosfera instável, por sua vez, acontece quando prevalecem os movimentos verticais; já o estado neutro ocorre quando o gradiente vertical de temperatura coincide com a razão adiabática seca, como mostra a FIG. 11 (VIANELLO e ALVES, 1991).

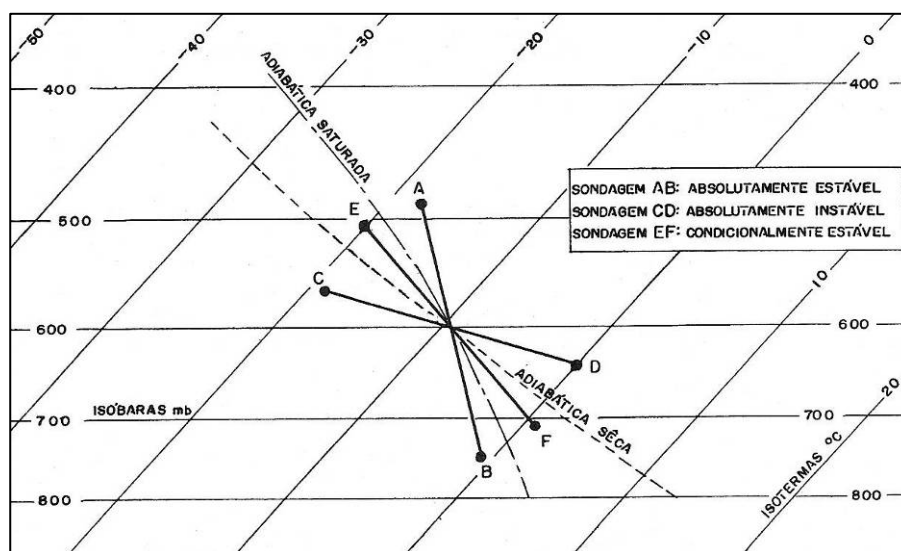


FIGURA 11 Classificação de Estabilidade pelo método da parcela
Fonte: BRASIL, 1969.

É possível associar as condições de estabilidade a processos atmosféricos e com a temperatura da superfície na camada de ar mais próxima ao solo. Neste sentido, o comportamento **estável** favorece a formação de inversão térmica, quando as parcelas de ar que se deslocam para regiões acima ou abaixo de um determinado nível z , respectivamente com temperaturas mais frias e mais quentes, tendem a voltar para a posição inicial z (OKE, 1978). Lopes (2003) aponta que a estabilidade está associada a ventos fracos e a casos em que a temperatura de uma superfície é inferior à temperatura do ar.

O estado atmosférico **instável** ocorre tipicamente em dias de verão, na camada próxima ao solo, em que o aquecimento da superfície faz ascender parte do escoamento (OKE, 1978). Dias sem nebulosidade e com ventos fracos ou quando a

superfície é mais quente que o ar adjacente são representativos desta condição (LOPES, 2003).

A atmosfera **neutra**, segundo Oke (1978), é recorrente em condição de céu nublado e de ventos fortes, já que as nuvens restringem o aquecimento da superfície diminuindo, assim, o desenvolvimento da estratificação da temperatura vertical. Além disso, o vento auxilia na homogeneização da temperatura por intensa convecção mecânica.

Nas cidades, a energia produzida pelo homem e a poluição alteram o balanço energético local e, por isso, as condições de estabilidade e instabilidade atmosférica da camada limite são facilmente modificadas (LOPES, 2003). Na camada de ar inferior a 2 metros de altura, os efeitos da convecção forçada são dominantes mesmo em condições de não-neutralidade. Acima desta altura, a convecção livre aumenta, assim como a possibilidade de atuação dos efeitos de estabilidade na transferência de momentum (OKE, 1978).

Os valores de gradiente vertical de temperaturas, que indicam a estabilidade estática da atmosfera, não incorporam os efeitos mecânicos da turbulência, o que é considerado importante nos modelos de dispersão de poluentes e de previsão de potencial eólico, por exemplo. Assim, uma outra forma de determinar a estabilidade atmosférica é através do Comprimento de Monin-Obukhov (L), que pode ser interpretado como a altura na CLA onde os efeitos da turbulência mecânica se equivalem aos efeitos da turbulência convectiva. Um dos modelos matemáticos que definem L é dado por (ABBOUD *et al.*, 2004):

$$L = \frac{-\rho c_p T_0 u_*}{k g q} \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do ar; c_p é o calor específico à pressão constante; T_0 é a temperatura da superfície do solo; u_* é a velocidade de fricção; k é a constante de von-Karman; g é a aceleração da gravidade; q é o fluxo de calor na superfície.

Para os valores obtidos do Comprimento de Monin-Obukhov, considera-se que a atmosfera é estável quando este for positivo, quando negativo a atmosfera é instável e neutra quando L tende para um valor infinito. Para facilitar a identificação da estabilidade atmosférica a partir de dados meteorológicos, Pasquill⁸ (1961 *apud* ABBOUD *et al.*, 2004) propôs classes de estabilidade relacionando-a a velocidade dos

⁸ PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, 90. 33-49.

ventos e radiação solar (TABELA 2), fatores que influenciam a turbulência induzida mecanicamente e por efeitos convectivos, respectivamente.

TABELA 2 Classes de estabilidade de Pasquill (1961)

Velocidade do vento (m/s) a 10 m	Dia Radiação solar (W/m ²)			Noite Cobertura de nuvens (cn)	
	$R > 700$	$350 \leq R \leq 700$	$R < 350$	$cn \geq 4/8$	$cn \leq 3/8$
< 2	A	A - B	B	-	-
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Onde A=extremamente instável, B=moderadamente instável, C=fracamente instável, D=neutra, E=fracamente estável, F=moderadamente estável.

Fonte: ABBOUD *et al.*, 2004.

O método de parcela e o Comprimento de Monin-Obukhov são, então, métodos de se identificar o comportamento da atmosfera em termos de estabilidade. A adoção dos métodos depende do tipo de objeto de estudo.

2.3.2 O efeito das cidades no interior da CLA

Na camada limite atmosférica, o campo de vento é controlado pelo balanço das forças de atrito provocadas pela superfície e pelo gradiente de pressão atmosférica. O atrito reduz o movimento das partículas de ar próximas ao solo e tem como consequência a redução da velocidade média do vento na superfície. A rugosidade da superfície determina a influência do atrito na CLA quando não há efeitos térmicos intensos e, além disso, delimita a espessura desta camada (OKE, 1978).

Em condição de atmosfera neutra, a velocidade do vento em altura, na subcamada inercial, é representada por um perfil logarítmico determinado pela Equação 2 e demonstrado na FIG. 10:

$$u_z = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

Onde u_z é a velocidade do vento a uma determinada altura z e z_0 é o comprimento de rugosidade.

Dependendo da superfície de contato dos fluxos de ar, há uma variação dos perfis verticais quando em condição de estabilidade neutra. Em áreas planas, o topo da camada limite (z_g) é inferior à altura da camada sobre as regiões rurais, pois estas

apresentam maior rugosidade que as áreas planas. Nas cidades, esta altura é ainda mais elevada (LOPES, 2003). Quanto maior é a rugosidade, menor é o gradiente vertical da velocidade média do vento (FIGURA 12).

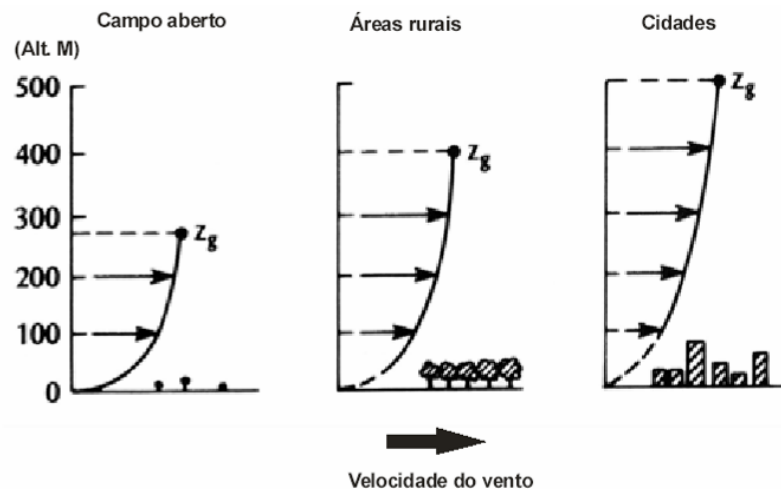


FIGURA 12 Perfis típicos de vento sobre vários tipos de superfície
Fonte: LOPES, 2003.

O escoamento dos fluxos de ar também varia em função do tipo de superfície e conforme o adensamento das áreas urbanas. Alguns parâmetros da forma das cidades foram descritos por Grimmond e Oke (1999) para dimensionar o grau de adensamento de determinada porção do território, tais como a razão de área plana ($\lambda_p = A_p/A_T$) e a razão de área frontal ($\lambda_f = A_f/A_T$). Nestes modelos numéricos, A_T equivale à área total em planta da superfície analisada, A_p à área de projeção dos edifícios em planta e A_f à área total das fachadas voltadas para o vento dominante (FIGURA 13).

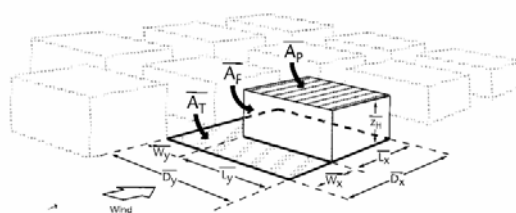


FIGURA 13 Definição das dimensões de superfície utilizadas como medida de densidade urbana
Fonte: GRIMMOND e OKE, 1999.

Através de argumentos heurísticos é possível explicar o que ocorre quando elementos rugosos são adicionados a uma superfície lisa, processo que pode ser comparado ao crescimento de uma cidade (Grimmond e Oke, 1999). Quando obstáculos são adicionados ao solo, a rugosidade aumenta. Contudo, a partir de uma determinada densidade (λ_p), os elementos não representam mais obstáculos isolados e estes trabalham apenas para reduzir a resistência aerodinâmica. Em um limite teórico, em

que $\lambda_p = 1$, os elementos estão tão próximos que se fundem formando uma nova superfície (FIGURA 14).

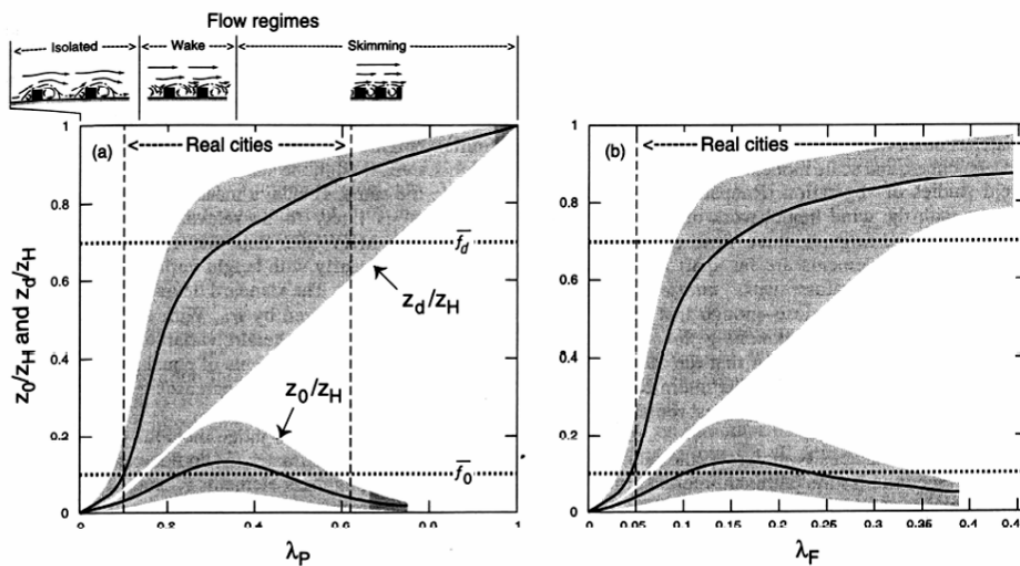


FIGURA 14 Valores normalizados para deslocamento do plano zero (z_d/z_H) e para comprimento de rugosidade (z_0/z_H). As linhas contínuas representam a curva ideal e as tracejadas os limites inferiores e superiores, plotados em função de λ_p (a) e λ_F (b). A área sombreada determina o limite da "cidade real".

Fonte: GRIMMOND e OKE, 1999.

A partir desta representação teórica, três tipos de regime de vento podem ser definidos:

- escoamento livre (*isolated flow*): os elementos atuam individualmente como obstáculo ao vento;
- escoamento de interferência de esteiras (*wake interference flow*): os elementos geram interferência nos obstáculos do entorno devido ao pequeno espaçamento entre eles;
- escoamento de mistura (*skimming flow*): o adensamento entre os elementos é tão grande que o fluxo de ar principal passa por cima dos elementos rugosos.

Assim, mostra-se importante mensurar os parâmetros de rugosidade para se conseguir definir o comportamento do vento sobre uma dada superfície.

2.3.3 Parâmetros de rugosidade

Os parâmetros de rugosidade são variáveis que determinam a eficiência de uma área da superfície para transformar a energia do vento médio que circula sobre ela em movimento turbulento na camada limite inferior (WIERINGA *et al.*, 2001). Geralmente

são representados pelo comprimento de rugosidade (z_0) e pelo deslocamento do plano zero (z_d). No caso de ambientes urbanos, estas variáveis estão relacionadas com a forma, altura, densidade de distribuição dos elementos na superfície, dentre outras variáveis.

Considerando o modelo logarítmico de variação da velocidade média do vento em altura (FIGURA 10, p. 30), z_0 corresponde à altura a partir do solo (em metros) onde a velocidade do vento (u_z) é igual a zero (LOPES, 2003). Contudo, isso só é verdade algebricamente, sendo que z_0 é derivado da extrapolação do perfil vertical do vento até que este atinja velocidade zero, partindo do princípio de que seu comportamento é logarítmico. O deslocamento do plano zero, z_d , por sua vez, representa o nível onde o fluxo médio de quantidade de movimento é absorvido (LOPES, 2003).

A mensuração de z_0 é considerada difícil e ainda não há um consenso de qual o melhor método utilizado para sua determinação. Este parâmetro depende do tipo de cobertura do solo e alguns autores propõem classes de rugosidade e valores tabelados em função do tipo de superfície.

Em 1960, Davenport (WIERINGA *et al.*, 2001) publicou a primeira revisão de estimativas de rugosidade determinadas por observações do vento e por valores tabelados em literatura. Sua classificação, revista por Wieringa *et al.* (2001), apresenta oito classes de z_0 que abrangem desde as superfícies menos rugosas, representadas pelos corpos d'água, até os terrenos mais rugosos, que são as cidades. Uma limitação desta classificação para as áreas urbanas é a determinação de apenas duas classes para este tipo ocupação. Além disso, para a classe que representa os centros de cidades, os autores sugerem que o valor de z_0 seja determinado por experimentos em túnel de vento.

Outras publicações também propõem classes de rugosidade e seus respectivos valores, entretanto nem sempre apresentam valores consoantes. A TAB. 3 apresenta tipos de superfícies e seus respectivos z_0 , segundo a revisão de Davenport e dados publicados no manual do programa WindMapTM (SPERA⁹, 1994) e no Atlas Europeu de Vento¹⁰ (1989 *apud* MORTENSEN *et al.*, 1993). Estes últimos correspondem a publicações relacionadas a programas computacionais, respectivamente, norte-americano e europeu, para estimativa de potencial eólico.

⁹ SPERA, David A. *Wind Turbine Technology*. New York: ASME Press, 1994. p. 393.

¹⁰ TROEN, I. PETERSEN, E. L. *European Wind Atlas*. Roskilde: Riso National Laboratory, 1989.

Grimmond e Oke (1999) classificam os métodos de determinação de rugosidade em dois tipos: morfométricos (ou geométricos) e anemométricos. Os modelos anemométricos utilizam observações do campo de vento para determinar os parâmetros aerodinâmicos através de relações teóricas derivadas do comportamento logarítmico do vento. No Brasil, estudos aplicando esta metodologia foram realizados no litoral do estado do Maranhão, na base de lançamentos de veículos espaciais (ROBALLO, 2007). Medições realizadas em seis níveis em uma torre de 70 metros de altura durante o período de 1995 a 1999 apontaram comportamento diferenciado da variável z_0 no decorrer do ano, demonstrando a sazonalidade do parâmetro de rugosidade em terreno sem ocupação urbana.

TABELA 3 Valores de z_0 para diferentes tipos de superfície

Tipo de cobertura	z_0 (m)		
	Davenport	Spera	Atlas Europeu
Mar aberto ou corpos d'água	0,0002	0,0001 a 0,001	0,0001
Praias, áreas planas sem obstáculos, solo coberto por neve	0,005	0,0001 a 0,002	-
Pradarias, tundra e aeroportos	0,03	-	0,01
Áreas com plantas baixas e poucos obstáculos	0,10	0,002 a 0,30	0,03 a 0,10
Culturas agrícolas de altura variável e obstáculos dispersos	0,25	-	0,15 a 0,30
Áreas intensamente cultivadas com muitos obstáculos agrupados, separados por espaços abertos, ou áreas com edifícios baixos (subúrbios)	0,50	0,40	0,50
Áreas ocupadas por obstáculos regulares e de mesma altura (áreas florestadas, áreas urbanas densamente ocupadas com prédios com pouca variação altimétrica)	1,0	1,2	-
Centros de cidades com edifícios de diferentes alturas	$\geq 2,0$	3,0	1,0

Fonte: Produzido pela autora

O método morfométrico, por sua vez, usa algoritmos que relacionam parâmetros aerodinâmicos com medidas da morfologia da superfície. Grimmond e Oke (1999) propõem um esquema simplificado para a estimativa dos parâmetros de rugosidade em cidades, utilizando fotografias aéreas e características de densidade e forma urbana (FIGURA 13). Quando não é possível realizar medições ou análises morfométricas no tecido urbano, estes autores recomendam o uso de valores típicos das propriedades aerodinâmicas, conforme apresentadas na TAB. 4.

TABELA 4 Propriedades de rugosidade típicas adimensionais e propriedades aerodinâmicas de zonas homogêneas em áreas urbanas

Classificação de densidade e altura	Propriedades de rugosidade			Propriedades aerodinâmicas		
	$\overline{\lambda_p}$	$f_d = \overline{z_d} / \overline{z_H}$	$f_0 = \overline{z_0} / \overline{z_H}$	$\overline{z_H}$ (m)	$\overline{z_d}$ (m)	$\overline{z_0}$ (m)
Baixa	0,05-0,40	0,35-0,50	0,06-0,10	5-8	2-4	0,3-0,8
Média	0,30-0,50	0,55-0,70	0,08-0,16	7-14	3,5-8	0,7-1,5
Alta	0,50-0,80	0,60-0,85	0,07-0,12	11-20	7-15	0,8-1,5
Elevada	>0,40	0,50-0,70	0,10-0,20	>20	>12	>2,0

Fonte: adaptado de GRIMMOND e OKE, 1999.

Apesar da dificuldade na generalização dos métodos de estimativa do comprimento de rugosidade em função da complexidade dos tecidos urbanos, Grimmond e Oke (1999) fizeram uma revisão de modelos morfométricos disponíveis para sua determinação. Dentre os modelos analisados, três foram considerados de aplicação ampla, apresentados por Bottema¹¹ (1995a, 1995b) e Raupach¹² (1994).

O modelo de Macdonald *et al.* (1998) também foi considerado satisfatório, sendo uma boa alternativa pela utilização de dados de fácil aquisição (EQUAÇÕES 3 e 4). O modelo de Lettau¹³ (1969), extensamente utilizado em estudos urbanos, também foi analisado (EQUAÇÃO 5). Este resulta em boas estimativas quando a razão de área frontal, λ_F , é inferior a 0,25, ou seja, quando os elementos de rugosidade não interferem fortemente uns nos outros. Para valores de λ_F superiores a 0,25, a expressão falha.

$$\text{Macdonald et al. (Ma)} \quad \frac{z_d}{z_H} = 1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \quad (3)$$

$$\frac{z_0}{z_H} = \left(1 - \frac{z_d}{z_H} \right) \exp \left\{ - \left[0,5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{z_H} \right) \lambda_F \right]^{-0,5} \right\} \quad (4)$$

$$\text{Lettau (Le)} \quad z_0 = 0,5 \overline{z_H} \lambda_F \quad (5)$$

$$\text{Regra Prática (Rt)} \quad z_0 = f_0 \overline{z_H} \quad (6)$$

¹¹ BOTTEMA, M. Parameterisation of aerodynamic roughness parameters in relation to air pollutant removal efficiency of streets. *Computational Mechanics*, p. 235–242, 1995.

BOTTEMA, M. *Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups: Part 2: Results* Document SUB-MESO 23. École Centrale de Nantes, France: 1995. Disponível em Equipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée, Laboratoire de Mécanique des Fluides, École Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44072 Nantes Cedex 03, France.

¹² RAUPACH, M. R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 71, p. 211–216, 1994.

¹³ LETTAU, H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness element description. *J. Applied Meteorology*, v. 8, p. 828-832. 1969.

Os autores também apresentam uma regra prática (R_t) para estimativa de z_0 e z_d . Contudo, consideram que no cálculo de z_0 (Equação 6), esta regra superestima valores em baixas e médias densidades e não reconhece os efeitos do adensamento urbano, já que o modelo contempla apenas uma relação com a altura média das edificações. A seguir são apresentadas as equações propostas por Macdonald *et al.* (1998), Lettau e a Regra Prática extraídas de Grimmond e Oke (1999).

O estudo realizado por Prata (2005) para uma região da cidade de Santos, no estado de São Paulo, aplica o modelo de Lettau no cálculo da rugosidade média. Grimmond e Oke (1999) não consideram este modelo como satisfatório para ampla utilização, no entanto, a área de análise da cidade de Santos, onde tal método morfométrico foi aplicado, corresponde a alguns quarteirões e a simulação computacional é utilizada comparativamente a outros métodos de previsão de ventilação natural, de modo que parece não haver problema na aplicação deste modelo, quando há outros meios de controle dos resultados.

Palese *et al.* (2008) adotaram diferentes métodos para atribuir valores às classes de cobertura do solo natural e urbana para a cidade de Neuquén, na Argentina, usando uma classificação de imagem de satélite aliada a uma delimitação manual das classes de rugosidade. Para as classes que representaram vegetação, água e algumas tipologias urbanas de pequena e grande densidade, utilizaram valores tabulados de z_0 . No caso de classes que correspondiam a edificações de até 9 metros de altura, ou seja, densidade média, aplicaram o método de Lettau.

Este mesmo modelo morfométrico foi utilizado por Lopes (2003) para estimar valores de z_0 para áreas urbanas em Lisboa, além de empregar valores constantes em Mortensen *et al.* (1993) no caso da presença de água. Para construir um mapa de rugosidade envolvendo todo o município, o autor considerou que a altura média dos edifícios é o parâmetro mais importante nesta escala de análise, sendo que a largura das ruas, por exemplo, praticamente não influencia no índice de rugosidade.

Diante da variabilidade de modelos morfométricos, é preciso considerar os limites de sua aplicação e analisar a consonância das estimativas de rugosidade de acordo com os valores estabelecidos na literatura. Além disso, é preciso considerar quais variáveis são importantes no escoamento dos fluxos de ar nas diferentes escalas de abordagem e estas determinarão o melhor método para se definir os parâmetros de rugosidade.

2.4 Estado da arte dos estudos do vento em cidades

Os efeitos da urbanização nas condições da atmosfera adjacente ao solo não é tema de investigação recente. Os primeiros registros desta alteração foram publicados em 1818 por Luke Howard, quando este observou que as temperaturas do ar na área urbana de Londres eram frequentemente mais altas que aquelas registradas na zona rural circundante à cidade. Apesar de constatações como esta terem sido realizadas ainda no século XIX, a magnitude dos seus efeitos e as causas das alterações climáticas eram consideradas de difícil determinação (LANDSBERG, 1981).

Somente a partir das décadas de 60 e 70 do século XX houve um aumento significativo dos trabalhos em clima urbano. Segundo Assis (2000), este incremento pode ter origem na tomada de consciência do papel do ser humano na mudança ambiental¹⁴. Neste período, a abordagem desta temática começa a ser amparada pela Teoria Geral de Sistemas, em que se considera que teorias e enunciados validados em um campo de conhecimento muitas vezes podem ser transportados para outras áreas de investigação (MONTEIRO, 2003).

Um dos modelos sistêmicos de clima urbano foi proposto por Monteiro (1976), que o apresenta dividido em três canais de percepção humana: qualidade do ar, conforto térmico e impacto meteórico. A qualidade do ar estaria associada ao canal de percepção físico-químico e teria efeito direto em problemas sanitários. A análise do vento associada ao conforto térmico, por sua vez, teria relação com as componentes termodinâmicas do clima e estaria relacionada com o uso do solo em escala urbana. Já o canal de percepção de impacto meteórico estaria associado a eventos específicos da circulação atmosférica que causariam efeitos calamitosos sobre os assentamentos humanos – por exemplo, as chuvas extremas –, atacando a integridade da cidade.

Seguindo a abordagem sistêmica, mas com enfoque diferente de Monteiro (1976), Oke¹⁵ (1982 *apud* ASSIS, 2000), propõe um modelo de análise do clima urbano baseado no conceito de “ilha de calor”. Segundo Assis (2000), esta vertente tem maior comprometimento com a “*compreensão do fenômeno meteorológico e sua modelagem do que com a perspectiva de intervenção humana*”, um dos aspectos que o difere da

¹⁴ Neste sentido, cabe ressaltar a ampliação de conferências, comissões e tratados internacionais com enfoque na questão ambiental (Clube de Roma em 1968; Conferência de Estocolmo, 1972; Relatório Brundtland, 1987; Rio 92 e várias outras que se seguiram).

¹⁵ OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, v. 108, p. 1-24, 1982.

proposta de Monteiro (1976), que pretende fornecer subsídios ao planejamento urbano a partir da compreensão das particularidades do clima da cidade.

Do ponto de vista do estudo do vento em áreas urbanas, as abordagens utilizadas são diversas variando desde sua escala mais ampla, verificando a alteração da atmosfera a partir da ocupação do solo pelas cidades, até o efeito da circulação de ar entre os edifícios. Novamente, o conceito de escala é fundamental no entendimento de como os elementos da superfície urbana se relacionam com a atmosfera, assim como na tomada de decisão e de planejamento das cidades.

Seguindo o princípio de escalas de abordagem do estudo do clima urbano e utilizando o modelo de classificação de escalas temporais e espaciais proposto por Oke (2006A, vide FIGURAS 4 e 9), serão apresentados estudos nacionais e internacionais voltados à investigação do vento em áreas urbanas. Tem-se como objetivo mostrar a diversidade de escalas de análise e de técnicas aplicadas sobre esta temática. Concomitantemente, será feita uma reflexão de como as pesquisas podem ser apropriadas para a tomada de decisão em planejamento urbano.

Partindo da escala mais ampla, a macro-escala, o enfoque geralmente está voltado para aspectos meteorológicos quando se considera parâmetros que influenciam a circulação do vento. No que diz respeito aos estudos nesta escala, Lucas e Abreu (2004), fizeram uma análise de eventos de chuva associados a ventos predominantes do quadrante Norte/Oeste em Belo Horizonte, relacionando-os com processos atmosféricos. A partir de série histórica de dados meteorológicos, verificaram uma conexão entre a mudança de direção predominante do vento e eventos extremos de chuva decorrentes da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Sua contribuição está na identificação da alteração do padrão de vento associada a fenômenos da circulação geral da atmosfera. Apesar de não ser um estudo com enfoque específico em clima urbano, a descrição do fenômeno pode ser um subsídio para mapeamento futuro dos padrões de vento na cidade, considerando que há uma mudança de direção predominante associada a fenômenos atmosféricos que ocorre regularmente nessa região.

Na meso-escala, algumas investigações se direcionam para a verificação da influência da ocupação e da topografia na alteração do comportamento da atmosfera adjacente ao solo. Sousa (2006) investigou a evolução da Camada Limite Atmosférica em período diurno a partir da influência da topografia e do uso do solo para a cidade de São Paulo. Partindo da simulação computacional de modelos teóricos e

representativos da realidade¹⁶ para um único dia do ano – validadas a partir de dados meteorológicos registrados na Região Metropolitana de São Paulo e no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) – observou-se a tendência do aumento da turbulência e da circulação do tipo vale-montanha em situação de topografia real, sem a presença da ocupação urbana. Em modelo com a representação da mancha urbana paulistana, os efeitos de turbulência mostraram-se mais intensos. Apesar de o estudo considerar a ocupação urbana, esta é modelada de forma homogênea, sendo necessária uma representação mais detalhada da cidade para que os efeitos urbanos possam ser demonstrados na escala apropriada para a aplicação em planejamento. Além disso, a simulação de um único dia do ano não permite a extrapolação dos resultados para outros períodos, o que representa outra limitação da aplicação dos resultados.

França (2007) também realizou uma análise comparativa em escala mesoclimática de dois momentos de ocupação do solo na região de São José dos Campos (1970 e 2004) para avaliar as mudanças ocorridas e suas implicações climáticas, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e simulação computacional em modelo atmosférico de meso-escala. Como resultado, observou-se que a ampliação das áreas de cobertura florestal, zona urbana e corpos d'água alteraram aspectos climáticos em escala local. Foi possível notar um aumento da temperatura, da umidade e da magnitude dos ventos na região dos corpos d'água existentes no cenário de 2004 se comparado ao cenário de 1970. Este estudo também se limita à descrição da alteração do comportamento de variáveis climáticas a partir da mudança do uso do solo, indicando que a metodologia utilizada poderia ser empregada em estudos de planejamento, contudo não faz recomendações de como os resultados poderiam ser incorporados à legislação urbana.

Com outro foco de análise, a qualidade do ar, Romero *et al.* (1999) e Flocas *et al.* (2007), estudando respectivamente as cidades de Santiago do Chile e Thessaloniki, na Grécia, mostraram uma relação entre eventos sinóticos associados à circulação geral da atmosfera, à circulação local e ao uso do solo na concentração de poluentes em áreas urbanas.

Romero *et al.* (1999) utilizaram imagens de satélite na identificação da alteração da ocupação do solo, integradas a modelo digital de terreno que reproduziu o relevo da

¹⁶ Os modelos teóricos foram representados por topografia plana e ocupação do solo homogênea (uso do solo rural ou urbano), enquanto o modelo real foi elaborado com topografia realística e ocupação do solo heterogênea (rural e urbana).

área de estudo. Já a caracterização das condições climáticas e da poluição foi feita através de imagens termais e de dados meteorológicos de poluição do ar. Uma das conclusões foi que a poluição do ar é potencializada pela alta frequência de dias de ocorrência de inversão térmica associada ao efeito de anticiclones. Além disso, a concentração de material particulado é maior no inverno e em locais onde são predominantes o uso do solo industrial, áreas de solo exposto e encostas desmatadas.

Flocas *et al.* (2007) mostraram uma relação entre a circulação atmosférica e episódios em que a concentração de gases poluentes excedia os limites de qualidade do ar na cidade litorânea de Thessaloniki, no período entre 1989 e 2004. Utilizaram dados de estações de monitoramento da qualidade do ar; mapas de média de pressão ao nível do mar para caracterização do evento sinótico de circulação atmosférica, além de dados de direção e magnitude dos ventos e da brisa marítima para análise da circulação local. Concluíram que a maior frequência dos episódios caracterizados por poluição ocorre no período frio. Quanto aos efeitos da circulação local, o desenvolvimento de brisas marítimas, no sentido mar-terra, caracterizou mais de 70% dos períodos registrados como de baixa qualidade do ar.

Ainda sob a perspectiva da qualidade do ar, mas em escala local, em 1977 surge uma das primeiras iniciativas de análise climática vinculada ao planejamento urbano a partir da constatação da má ventilação e poluição do ar na cidade de alemã de Stuttgart (LAZAR e PODESSER, 1999). Medições sistemáticas foram realizadas através de estações fixas pelo Departamento de Climatologia Urbana desta cidade até 1982, quando um veículo foi equipado para fazer medições em vários pontos da área urbana podendo caracterizar melhor o clima local. Posteriormente a este estudo, o governo alemão produziu cartilhas com diretrizes para a consideração das condições climáticas no zoneamento e planejamento urbanos, sendo que a última versão deste manual (Baden-Württemberg INNENMINISTERIUM, 2004) apresenta metodologia para análise de variáveis climáticas e sua inserção nas práticas de planejamento, dedicando capítulo específico para a relação entre zoneamento integrado à higiene do ar e ao clima.

Na Áustria, na cidade de Graz, os primeiros esforços foram feitos ainda em 1974 com um programa de tráfego, também associado à poluição atmosférica. Somente em 1990, uma base de dados consistente, representada em forma de mapas, serviu como apoio para a lei de uso e plano de desenvolvimento urbano (LAZAR e PODESSER, 1999).

Em Lisboa, Portugal, as investigações da aplicação da climatologia ao planeamento tiveram início na década de 1980, através do projeto CLIMLIS (*Princípios climáticos para o planeamento urbano. Aplicação a Lisboa*) e se concretizaram em 2005 com um relatório de orientações climáticas para o planeamento e ordenamento (ALCOFORADO *et al.*, 2006). Este trabalho apresenta a caracterização geral do clima da cidade, a partir da análise de dados de estações meteorológicas, mostrando a influência das estações do ano na variação das condições climáticas médias. Além disso, demonstra grande enfoque na caracterização e análise dos ventos diante da evolução da ocupação urbana, baseado em estudo desenvolvido por Lopes (2003). Este autor utiliza simulação computacional para demonstrar a variação do comportamento dos ventos em momentos distintos: considerando apenas a topografia, avaliando a situação atual de ocupação e modelando cenários de ocupações futuras. A partir de mapas de velocidade dos ventos e de perfis verticais de velocidade, foi possível visualizar as áreas com potencial de expansão quanto aos aspectos de ventilação e outras que não são propícias ao adensamento diante de condições naturais ou da atual ocupação.

Com enfoque semelhante ao caso de Lisboa, Katzschner (2005) apresenta uma metodologia para avaliação das condições climáticas por áreas homogêneas para fins de planeamento urbano. A metodologia baseia-se na avaliação concomitante do uso do solo e de aspectos geográficos (topografia e dados meteorológicos), utilizando um sistema geográfico de informação (SIG). Os dados de temperatura, umidade, direção e velocidade dos ventos são provenientes de estações meteorológicas próximas à área de estudo ou de dados medidos em campo. No caso da ventilação, utilizou-se também o comprimento de rugosidade, parâmetro que caracteriza cada tipo de uso do solo em termos aerodinâmicos. Posteriormente os dados foram cruzados e foi feita a classificação da área de estudo conforme a homogeneidade das características microclimáticas, produzindo mapas denominados de “mapas de funções climáticas urbanas”.

Esta metodologia foi aplicada às cidades de Kassel (Alemanha), Salvador e João Pessoa (KATZSCHNER, 2005) e a sete vilas na China (KATZSCHNER e MÜLDER, 2008), sendo que para todas estas áreas foram produzidos mapas climáticos e recomendações para o planeamento urbano. Apesar do esforço realizado nestas pesquisas, as cidades brasileiras e vilas chinesas ainda não incorporaram recomendações climáticas em suas legislações urbanísticas.

As metodologias adotadas por Alcoforado *et al.* (2006) e Katzschner (2005) utilizam o conceito de *climatopes* ou climatopos¹⁷, definida por Scherer *et al.* (1999) como áreas geográficas com características microclimáticas similares que atuam em seu entorno de forma análoga e podem atingir escalas espaciais que variam de dezenas a centenas de metros, também entendido como unidades de resposta atmosférica. Através da combinação da topografia e da morfologia urbana são determinadas as classes de ventilação, já que estes são fatores que distinguem as condições típicas de ventilação, posteriormente são produzidos os mapas de síntese das funções climáticas (*synthetic climate-function maps*) e, finalizando, são formuladas as diretrizes de planejamento, representadas em mapas de recomendações. Estes tipos de mapas são comumente adotados nas cidades alemãs, onde a aplicação da climatologia urbana é recorrente.

Esta metodologia também foi introduzida em estudo na região de Basel, através do projeto KABA (*Klimaanalyse der Region Basel*), realizado entre 1995 e 1997. Esta região correspondente a uma área de 51 km x 33 km e faz parte do território de três países (Suíça, Alemanha e França). O objetivo deste projeto foi produzir mapas de análise climática e de recomendações para o planejamento, a fim de incorporar aspectos do clima local e da qualidade do ar no planejamento urbano e regional desta localidade (FEHRENBACH *et al.*, 2001).

No Brasil, além das cidades de Salvador e João Pessoa, alguns estudos em escala local foram iniciados por Sartori (1984), contudo restringe-se a uma abordagem teórica. Para a cidade de Santa Maria (RS), a partir de observações do comportamento diário local do vento e comparando-os a outros estudos semelhantes, a autora faz apontamentos sobre a relação dos ventos com efeitos locais provocados pela topografia que alteram os padrões de circulação geral da atmosfera. Além disso, também faz indicações teóricas sobre o posicionamento do centro urbano face à topografia e do posicionamento dos edifícios e a possibilidade de estes canalizarem o vento através das ruas. A amplitude quanto às escalas de análise – desde a questão local até a análise microclimática – não propiciou apresentação de resultados conclusivos que pudessem ser aplicados ao planejamento urbano.

Ferreira (2004), estudando o caso de Belo Horizonte também em escala local, partiu da análise de séries de dados de estações meteorológicas fixas da cidade e de seu

¹⁷ Os trabalhos de Katzschner e Mulder (2008), Katzschner (1997) e Katzschner (2005), apesar de não utilizarem a nomenclatura “climatopo”, usam uma metodologia que reconhece áreas homogêneas quanto ao clima.

entorno para fazer uma estimativa do comportamento médio dos ventos. Paralelamente, através de simulação qualitativa em túnel de vento da topografia da cidade, observou áreas naturalmente prejudicadas em relação à ventilação, concentradas principalmente a sotavento dos morros e montanhas. Pelos dados de estações meteorológicas, concluiu-se que as velocidades de vento mais baixas se concentram na região sul, onde a topografia é mais acidentada. Neste caso, os resultados foram apenas qualitativos e a questão da ocupação urbana não foi abordada.

Analisando especificamente a relação entre espaços urbanos e o vento em escala microclimática¹⁸, alguns estudos brasileiros verificam como a alteração do arranjo e altura de edifícios pode modificar a ventilação natural urbana. Com enfoque em cidades litorâneas e comparando hipóteses distintas de ocupação, as pesquisas foram desenvolvidas para as cidades de João Pessoa (SILVA, 1999), Maceió (BITTENCOURT *et al.*, 1997), e Santos (PRATA, 2005).

Silva (1999), através de medições anemométricas, modelos numéricos, simulação computacional e em túnel de vento, desenvolveu uma metodologia para obtenção de padrões gerais de vento e perfis de velocidade através de estudo de caso de parte da área urbana de João Pessoa. A partir de simulação física, fez-se uma análise comparativa entre a situação real de ocupação do solo, a configuração com o total aproveitamento da área permitido pela legislação em vigor e situações criadas considerando as características dos ventos dominantes. Na situação de ocupação real, observou-se uma redução das velocidades até a altura de um pavimento, sendo que na configuração permitida por lei, este decréscimo foi ainda maior. O autor constatou a fragilidade do planejamento vigente na cidade em relação à ventilação, se comparado a outros padrões de ocupação simulados.

Na orla marítima de Maceió, Bittencourt *et al.* (1997) utilizaram a técnica de simulação computacional em um programa de CFD (*Computer Fluid Dynamics*) para analisar duas alternativas de implantação de um edifício em lote típico da região. Comparando a ocupação típica permitida pelo Código de Obras do município com uma situação considerada de maior permeabilidade aos ventos para as direções predominantes, concluíram que a elevação da altura dos edifícios combinada à redução na taxa da ocupação do lote permitiria melhor distribuição do fluxo de ar nos ambientes internos e externos. Esta tese contraria o pensamento da legislação em vigor, constatando ser

¹⁸ Cabe ressaltar que a nomenclatura adotada para as escalas climáticas foi definida por Oke (2006a).

mais importante para a ventilação urbana o recuo entre as edificações que a delimitação da altura destas.

Na cidade de Santos, Prata (2005) verificou a alteração do campo de vento decorrente da mudança de gabarito dos edifícios e avaliou o impacto destas transformações no conforto no nível dos pedestres para um conjunto de 21 quadras. Por meio de medições *in loco* de temperatura do ar, umidade relativa e velocidade dos ventos, simulação em programa CFD e ensaios em túnel de vento, comparou-se a ocupação atual com alterações propostas em função da tendência de verticalização da cidade com a inserção de edifícios de 26 pavimentos. Foram observados movimentos de ar decorrentes da presença de edifícios mais altos, como canalização e efeitos de borda e alteração do padrão de vento no nível dos quarteirões.

No que concerne à investigação da qualidade ambiental de espaços urbanos abertos, o projeto RUROS (*Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces*) se dispõe a investigar diferentes espaços públicos através de monitoramento microclimático e modelagem computacional em sete cidades européias¹⁹. As informações produzidas por este trabalho, compiladas em um guia de princípios bioclimáticos (NIKOLOPOULOU, 2004), contêm ferramentas e diretrizes aplicáveis por arquitetos e urbanistas em projetos urbanos para a avaliação dos impactos ambientais no nível dos pedestres. Especificamente com relação ao vento, este guia apresenta uma metodologia que deve ser seguida em projetos de desenho urbano que inclui levantamento de dados estatísticos de vento coletados por estações meteorológicas e de acordo com perfis verticais de velocidade produzidos para o local analisado, simulação computacional ou testes em túnel de vento para verificar as alterações dos padrões de vento devido às condições de entorno, definição de critérios de conforto apropriados ao espaço urbano e análise do projeto frente a estes critérios.

Ainda no nível dos pedestres, Prata *et al.* (2008) investigaram a influência do efeito do vento nos usuários de espaços externos através de levantamento de dados climáticos e de ensaios em túnel de vento, verificando também a possibilidade de aplicar o índice de Temperatura Fisiologicamente Equivalente (PET) para verificar o conforto ambiental dos pedestres. Para o caso do bairro de Moema, área de estudo na cidade de São Paulo, considerou-se que a técnica de figuras de erosão no teste em túnel de vento aliada à aplicação do índice PET auxilia na tomada de decisão do projetista quanto ao conforto externo em projetos de desenho urbano.

¹⁹ As cidades investigadas são: Atenas e Thessaloniki, na Grécia; Milão, na Itália; Fribourg, na Suíça; Cambridge e Sheffield, no Reino Unido e Kassel, na Alemanha.

Os casos apresentados apontam uma diversidade de abordagens e a segmentação das pesquisas em diversas áreas de conhecimento. Em todas as escalas os autores constataam a influência da ocupação urbana na ventilação. Contudo, o grau de detalhamento dos estudos nem sempre é compatível com as aplicações em planejamento de cidades.

É notável que as decisões na escala do planejamento e do desenho urbano podem criar climas locais e microclimas, respectivamente, que modificam as propriedades climáticas existentes anteriormente à implantação de assentamentos humanos. Neste sentido, a compreensão da forma urbana e a interpretação das observações climatológicas integradas às diferentes escalas permitiriam o entendimento da heterogeneidade e complexidade das cidades (ARNFIELD, 2003) e a previsão do comportamento de assentamentos futuros quanto ao clima.

2.5 Técnicas de representação de variáveis e de simulação computacional

O estudo dos ventos em cidades pode empregar diferentes técnicas de representação da realidade que variam conforme a resposta que se pretende obter e a escala que se quer atuar. No caso do estudo do vento em escala urbana para fins de planejamento, sabe-se que a representação da forma urbana e da topografia é essencial na formulação do comportamento dos fluxos de ar.

O relevo pode ser descrito por um modelo digital de terreno (MDT). Os modelos digitais são representações matemáticas da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real (CAMARA *et al.*, 1996). No caso da topografia, associa-se, a um ponto de coordenadas x e y , um valor de altitude no eixo z . Este tipo de modelo também pode ser utilizado para representação da forma urbana, sendo denominados então modelos digitais de elevação (MDE). Neste caso, ao eixo z é associado o valor do comprimento de rugosidade, definido pelas classes de cobertura do solo.

Os modelos digitais de terreno e de elevação constituem parâmetros de entrada para programas computacionais de simulação de vento para previsão de potencial eólico de determinada área (AMARANTE *et al.*, 2001; CAMARGO *et al.*, 2002; PEDRO *et al.*, 2006). Outros inputs utilizados nestes modelos são dados de vento de superfície e de vento geostrófico. A seguir, serão detalhadas técnicas que podem ser empregadas na

construção de mapas de classes de uso do solo e programas computacionais que auxiliam na previsão de padrões de vento.

2.5.1 MDE e classificação de cobertura do solo

No estudo dos ventos, a rugosidade da superfície é parâmetro importante na conformação dos fluxos de ar. A representação dos diferentes valores de rugosidade pode ser realizada por meio do reconhecimento de classes de cobertura do solo, sendo o uso de imagens orbitais de sensoriamento remoto uma das fontes mais tradicionais de dados aplicados na confecção de mapas de cobertura do solo (PINHO e KUX, 2004).

As imagens provenientes de satélites apresentam diferentes resoluções espaciais que dependem da sensibilidade dos sensores presentes nas plataformas orbitais. A TAB. 5 apresenta um resumo das resoluções de alguns satélites existentes.

TABELA 5 Resolução espacial dos sensores de satélites		
Satélite	Sensor	Resolução espacial
Landsat	TM (<i>Thematic Mapper</i>)	30 m (bandas 1 a 5 e 7)
		120 m (banda 6)
	ETM (<i>Enhanced TM</i>)	15 m (banda pan-X)
		30 m (multiespectral)
		60 m (IV térmico)
Spot	HRV (<i>Haute Resolution dans le Visible</i>)	20 m (multiespectral)
		10 m (pancromático)
CBERS 2	CCD (<i>Couple Charged Device</i>)	20 m
	IRMSS (<i>InfraRed MultiSpectral Scanner</i>)	80 m
	WFI (<i>Wide Field Imager</i>)	260 m
IKONOS II	WFI (<i>Wide Field Imager</i>)	4 m (multiespectral)
		1 m (pancromático)

Fonte: MAILLARD, 2000. INPE (Catálogo de imagens) Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 03 dez. 2008.

A decisão de se empregar este tipo de imagem para classificação de cobertura do solo pode se dar em função da disponibilidade da informação espacialmente distribuída em malhas regulares, e da possibilidade de atualização periódica de bancos de dados que contém estas informações (PARLOW *et al.*, 1997).

De acordo com Pinho e Kux (2004), duas categorias podem ser estabelecidas quanto ao procedimento de extração de informações das imagens de satélite: uma que utiliza

técnicas de fotointerpretação e outra que emprega métodos de classificação automática. A técnica de fotointerpretação exige que intérpretes realizem tarefas tais como detecção, reconhecimento e identificação, análise, dedução, classificação, idealização e determinação da exatidão. O processo de reconhecimento está relacionado aos elementos da interpretação visual, constituídos pela forma, textura, tamanho, cor, tonalidade, sombra e contexto dos elementos que compõem a imagem (NOVO e PONZONI, 2001).

Na classificação automática, o programa computacional é responsável pela identificação dos alvos, ou seja, realiza a extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos. Os métodos de classificação são usados para mapear áreas da superfície terrestre que apresentam um mesmo significado em imagens digitais (CAMARA *et al.*, 1996).

Quando se pretende extrair informações de imagens para grandes áreas, como no caso de uma cidade, a interpretação visual torna-se inviável, pois demanda grande quantidade de mão-de-obra especializada. As técnicas automáticas, portanto, são mais adequadas para a classificação de cobertura do solo em escala local e para fins de estudo do vento nesta escala.

Para a classificação de imagens orbitais, é necessário o emprego de técnicas de processamento. Estas técnicas podem ser divididas em três fases correspondentes ao pré-processamento, realce e classificação (CAMARA *et al.*, 1996).

Na fase de pré-processamento, são feitas correções dos dados brutos e o georeferenciamento da imagem a ser classificada. Nesta etapa, são realizadas correções radiométrica e geométrica da imagem. A correção radiométrica é um processo usado para compatibilizar os níveis de cinza em cada banda espectral nas diferentes imagens, tomando valores de referência para realizar o ajuste (COTA, 2008). Além disso, pode ser usado para eliminar distorções provocadas pelo desgaste e mau funcionamento dos sensores. A transformação geométrica, por sua vez, relaciona o posicionamento da imagem com as coordenadas de um sistema de referência (CAMARA *et al.*, 1996).

A técnica de realce é o momento em que ocorre a melhoria da imagem e a busca por melhores padrões de reconhecimento. A classificação, por sua vez, é quando se faz o reconhecimento automático dos objetos de cena. Após o reconhecimento de áreas homogêneas, ou seja, após a classificação das imagens, atribui-se valores de

comprimento de rugosidade a cada classe, conformando-se assim um modelo digital de elevação (MDE).

2.5.2 Simulação computacional

A simulação computacional é uma ferramenta que permite o controle das variáveis a serem analisadas. Seu tempo de resposta é relativamente rápido se comparado a experimentos realizados no ambiente real, os quais demandam condições climáticas ideais para a sua execução e que nem sempre são alcançados durante o processo experimental. Além disso, o custo do emprego desta técnica é pequeno, se comparado com outros de simulações ou testes *in loco* ou em modelo reduzido.

Vários são os modelos empregados nas diferentes escalas de análise. Na escala microclimática, em investigações de poluição do ar, conforto de pedestres e fluxo no entorno de edifícios, os programas do tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) são extensamente utilizados (SOUCH e GRIMMOND, 2006). Prata (2005) utilizou esta técnica, aplicando o programa CFX para uma área urbana em São Paulo e Bittencourt *et al.* (1997) fizeram simulação com o programa *Phoenix* em estudo em Maceió, ambos avaliando arranjos de edifícios.

Outros modelos mais sofisticados em termos dos métodos numéricos, da estrutura da malha que os compõem e dos modelos de abordagem de turbulência estão cada vez mais desenvolvidos e são capazes de prever o comportamento do ar em outras escalas. É o caso, por exemplo, dos modelos LES (*Large Eddy Simulation*), RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation*) e MM5 (*Mesoscale Model*). Sousa (2006) fez uso do modelo de meso-escala não-hidrostático²⁰ TVM-NH, desenvolvido para simular os fluxos vertical e horizontal das circulações na camada limite atmosférica em modelo reduzido de cidade. O modelo LES foi aplicado por Marques Filho (2004) para descrever a dispersão de poluentes e sua evolução espacial e temporal na região metropolitana de São Paulo.

Os programas de meso-escala nem sempre conseguem prever o comportamento do vento próximo à superfície devido à resolução mínima da malha ser geralmente

²⁰ Modelo atmosférico que resolve equações de momento vertical e desconsidera o fato de que a atmosfera está em equilíbrio hidrostático. Para escalas horizontais de até 100m, estes modelos são capazes de encontrar soluções para circulações locais tais como brisas terrestres e marítimas. O modelo hidrostático, por sua vez, considera o equilíbrio hidrostático da atmosfera, o que implica que a aceleração vertical é desprezível diante dos gradientes verticais de pressão e das forças verticais. É aplicado para resoluções espaciais de cerca de 10 km e, geralmente é utilizado nas previsões climáticas globais e regionais. Fonte: Glossário de Meteorologia da Sociedade Americana de Meteorologia (MAS). Disponível em <<http://amsglossary.allenpress.com/glossary/>>. Acesso em 15/01/2008.

superior a dezenas de metros, o que dificulta sua utilização para fins de planejamento. Já os modelos de CFD exigem representação detalhada da superfície urbana e reprodução volumétrica dos obstáculos. O tempo de processamento destes programas é elevado e, quanto maior a extensão da área, mais complexa é a solução e mais tempo será despendido no processo, tornando-se inviável sua aplicação para representação da totalidade de uma cidade.

Aplicativos de previsão de potencial eólico e de estimativa das condições de vento também são empregados em análises urbanas. Exemplos destes programas são o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) (LOPES, 2003; PRATA, 2005) e o WindMapTM.

O WindMapTM é um aplicativo desenvolvido pela empresa americana Brower and Company, com interface amigável que não demanda amplos recursos para sua execução. Foi aplicado na elaboração do Atlas do Potencial Eólico do Brasil, assim como em mapeamentos eólicos dos estados brasileiros com potenciais favoráveis de geração de energia eólica²¹. Sua aplicação no caso brasileiro foi para aumentar a resolução espacial em locais específicos dos mapeamentos eólicos a partir de resultados obtidos em programa de meso-escala denominado MesoMap.

Os parâmetros de entrada para a simulação no WindMapTM foram extraídos do programa de meso-escala (AMARANTE *et al.*, 2001). Na Argentina, na Província de Néuquen, este programa também foi utilizado para estudar o potencial eólico, contudo sofreu alterações para se adaptar às condições locais de estudo, passando a denominar-se ArgentinaMap (PEDRO *et al.*, 2006). Este programa computacional calcula o escoamento de ar sobre o terreno através de uma malha tridimensional de elementos finitos com os valores associados aos centros das faces de cada célula (FIGURA 15).

É baseado em modelos de conservação da continuidade (conservação de massa ou escoamento não-divergente), como o NOABL, que resolve equações diferenciais parciais por solução iterativa até que o valor de divergência esteja suficientemente próximo de zero. Através da equação da continuidade, o modelo não reconhece a influência da estratificação térmica da atmosfera no escoamento, contudo estes efeitos são reproduzidos por ferramentas do programa que consideram altura da camada

²¹ A empresa Camargo Schubert foi a responsável pelo desenvolvimento destes estudos, contemplando o mapeamento eólico dos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Paraná, Santo Catarina, Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.camargo-schubert.com/>>. Acesso em dezembro/2008.

limite e características de estabilidade atmosférica baseado na Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (CAMARGO *et al.*, 2002). Como entrada de dados, o programa requer ainda mapas de topografia e de rugosidade.

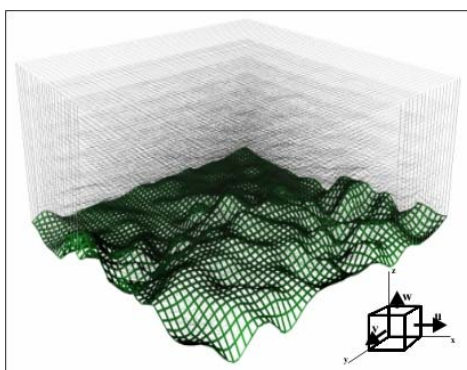


FIGURA 15 Domínio tridimensional de cálculo no WindMap™.
Fonte: CAMARGO *et al.*, 2002.

Os dados de vento necessários para iniciar a simulação são dados de superfície, coletados por estações meteorológicas, e dados de vento geostrófico. Há duas possibilidades de entrada de dados de vento de superfície: como uma média da velocidade e moda da direção para o período analisado ou através de rosa dos ventos que determina a frequência de ocorrência de direção e a velocidade média para cada direção.

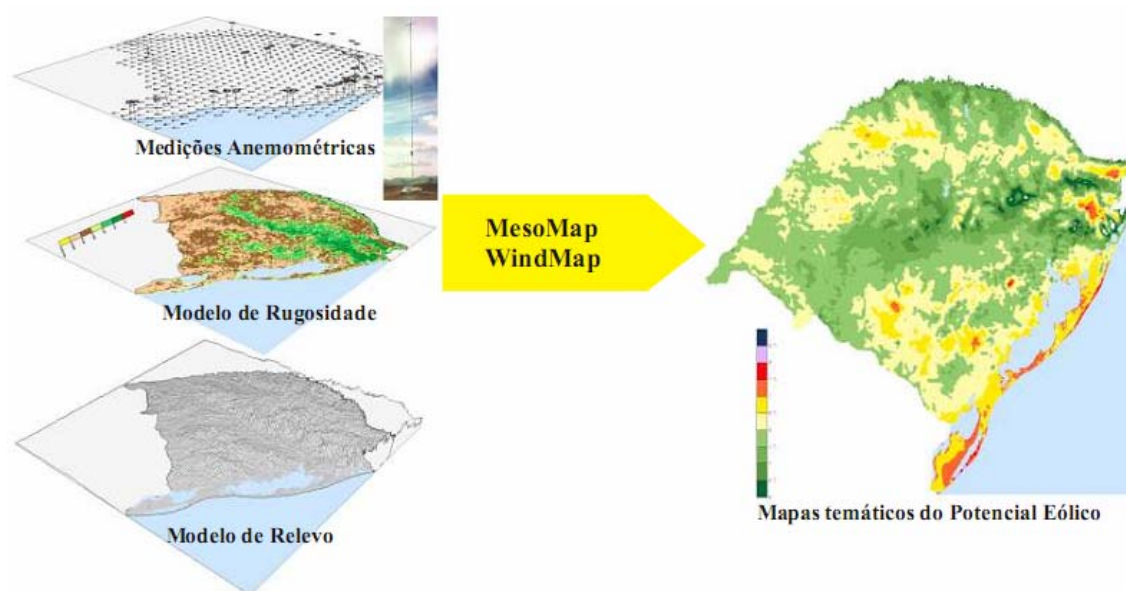


FIGURA 16 Modelo básico da metodologia utilizada para produção de mapas de potencial eólico dos estados brasileiros. Neste caso, está representado o caso do Rio Grande do Sul.
Fonte: CAMARGO *et al.*, 2002.

Em Nêuquen, utilizou-se dados de estações meteorológicas correspondentes a um período de 5 anos, calculando-se a frequência de ocorrência e média de velocidade

para cada direção. O vento geostrófico foi determinado a partir de dados disponibilizados pela NOAA (Administração Nacional de Atmosfera e Oceano dos Estados Unidos), considerando três níveis de sondagem atmosférica que estão acima da CLA (PEDRO *et al.*, 2006).

Os produtos gerados pelo WindMapTM são mapas de velocidade dos ventos e de potencial eólico. Quanto ao vento, o programa permite a simulação de suas condições em diferentes alturas, podendo-se extrair um comportamento vertical desta variável em um dado território. Modificando o tipo de ocupação do solo, ou seja, a rugosidade, é possível prever como o fluxo do vento será alterado, o que permite analisar como a forma urbana pode alterar a ventilação natural na cidade.

No que diz respeito aos valores de comprimento de rugosidade, o WindMapTM apresenta limitações para os valores de entrada deste parâmetro, que devem estar entre 10^{-5} m e 5 m. Neste sentido, para a verificação da influência da ocupação urbana na alteração do vento local, é preciso considerar o intervalo proposto pelo programa, além de verificar a pertinência dos valores de rugosidade em literatura consagrada.

Em estudos urbanos, este programa foi utilizado por Vasconcelos (2006) para simular cenários de expansão da cidade de Lisboa, Portugal, com enfoque na verificação da influência da ocupação na alteração da circulação das brisas do estuário do Rio Tejo na cidade. Um modelo não hidrostático, o Meso-NH, serviu para simulação dos efeitos em meso-escala e para estimar parâmetros de entrada do WindMapTM. A velocidade de vento a 10 m de altura foi calculada para condições médias de brisa e para três mapas de rugosidade (2001, 2005 e cenário futuro). Foi identificada uma redução da velocidade média de vento de cerca de 7% entre os cenários de 2005 e 2001 devido ao aumento da rugosidade. Para uma perspectiva de ocupação futura, estimou-se que a velocidade média seria diminuída em 6% face ao cenário considerado atual (2005).

Nota-se assim, que o programa WindMapTM apresenta aplicação em estudos urbanos que consideram a evolução da ocupação urbana no tempo, revelando uma outra possibilidade de uso do aplicativo além da previsão de potencial eólico.

3 CASO DE ESTUDO: A CIDADE DE BELO HORIZONTE

A cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, está delimitada pelas latitudes 19°46'35" e 20°03'34" Sul e longitudes 43°51'27" e 44°03'47" Oeste de Greenwich. O município tem área equivalente a 331 km² e faz parte da Macrorregião Central do estado. A população da cidade, em 2007, era de 2.412.937 habitantes²² e a densidade populacional atingiu cerca de 7.290 habitantes por km² neste mesmo período. Sua divisão administrativa consta de nove regionais e 148 bairros.

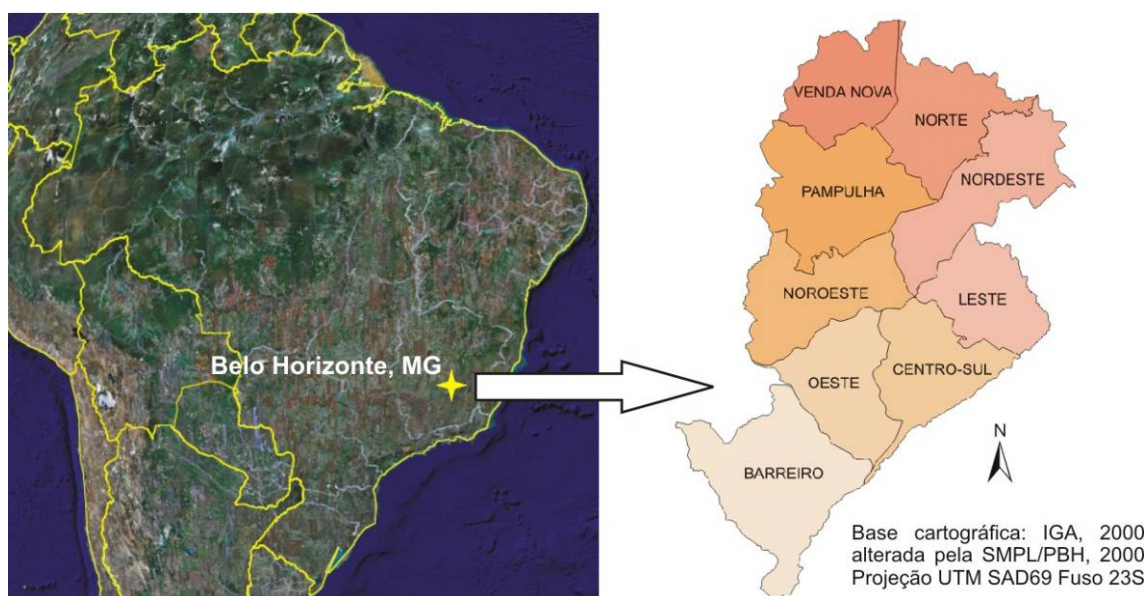


FIGURA 17 Localização da cidade de Belo Horizonte (à esquerda) e divisão administrativa adotada pela Prefeitura Municipal (à direita).

Fonte: Google Earth; Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

Disponível em: <<http://www.pbh.gov.br>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

3.1 Aspectos físicos e climáticos

O território da capital mineira é caracterizado por dois domínios geológicos: o Domínio do Complexo Belo Horizonte e o Domínio das Seqüências Metassedimentares. O primeiro representa cerca de 70% da área da cidade, localizada predominantemente na região norte e central, e integra a unidade geomorfológica denominada Depressão de Belo Horizonte. O relevo neste domínio é formado por espigões, colinas de topo plano a arqueado e encostas policonvexas de várias declividades com altitudes entre 680 e 980 metros.

²² Fonte: Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 15 dez. 2008.

O Domínio das Seqüências Metassedimentares apresenta topografia acidentada cujas maiores altitudes são encontradas na Serra do Curral, limite sul do município, com variações entre 1.100 e 1.500 metros. Outra faixa de cristas ao sul de Belo Horizonte são as áreas de ocorrência de Formação Cercadinho, onde as altitudes estão entre 1.100 e 1.300 metros (BELO HORIZONTE, 1995). Quanto aos aspectos hidrográficos, o município está contido nas micro-bacias dos ribeirões Arrudas e do Onça, afluentes do Rio das Velhas (FIGURA 18).

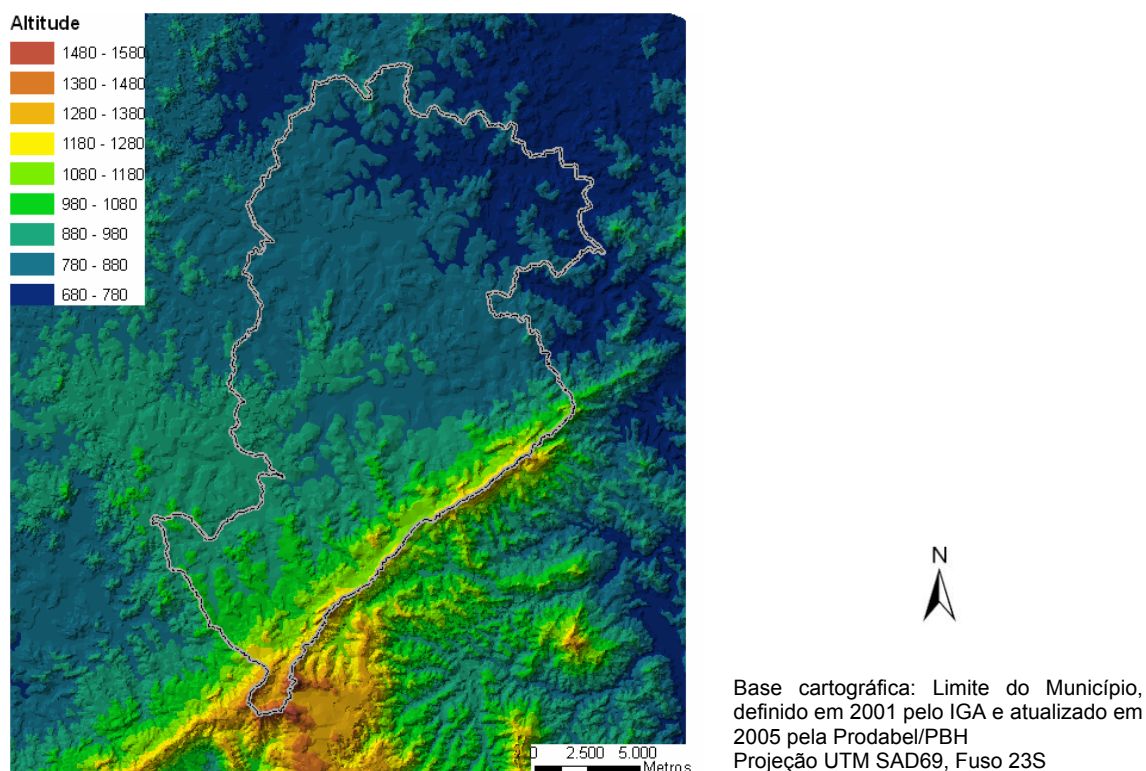


FIGURA 18 Topografia da cidade de Belo Horizonte.
Fonte: Modelo tridimensional cedido pelo IGC/UFMG, 2008.

O clima da cidade pode ser classificado como Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen, marcado pelo período seco no inverno e temperatura média do mês mais frio equivalente a 13,1°C, contudo apresenta características de clima tropical de altitude. A temperatura média local é de 21,1°C no período entre 1961 e 1990. O vento predominante na cidade é de direção leste durante todo o ano e a velocidade média é de 1,4 m/s (ASSIS, 2000)²³. A média de precipitação total é de 1.491,3 mm, sendo a Serra do Curral um elemento natural que favorece as precipitações e funciona como âncora para os maiores totais registrados (MOREIRA, 2002).

²³ Estes valores são resultado da compilação de registros anemométricos do 5º DISME/INMET do período entre 1961 e 1990.

A circulação atmosférica, que determina o escoamento do ar na macro-escala, é regida pela atividade das Células de Hadley e por uma circulação zonal devida às Células de Walker. A existência desta célula é atribuída ao aquecimento diferencial entre continentes e oceanos, que condiciona a circulação na região tropical do planeta (VAREJÃO-SILVA, 2006), e relaciona-se principalmente com as propriedades físicas do Oceano Pacífico. Segundo Moreira (1999), a diferença de aquecimento deste oceano, mais quente a oeste e mais frio a leste, ocasiona uma circulação de sentido leste-oeste influenciada pelos gradientes térmicos e barométricos do oceano.

Os sistemas de circulação secundários também definem o clima de Belo Horizonte, marcando principalmente a diferença entre as estações do ano e as condições de estabilidade atmosférica. Durante o inverno, predomina a influência da Frente Polar Atlântica e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), sendo que este causa forte estabilidade. As características de tempo que caracterizam este fenômeno são condições de céu claro, ventos fracos, baixos valores de umidade à tarde e grande amplitude térmica. No verão, as linhas de instabilidade ocorrem com maior frequência e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), configurada como um amplo eixo de intensa atividade convectiva de orientação NW-SE, contribui para altas taxas de precipitação (MOREIRA, 1999) com dias consecutivos de chuva – 4 dias, no mínimo. Quanto à atuação deste sistema convectivo, Lucas e Abreu (2004) verificaram uma conexão entre a ocorrência de ventos do quadrante Norte/Oeste e eventos extremos de precipitação ocasionados pela atuação da ZCAS, o que mostra alteração na direção predominante do vento sobre a cidade na atuação deste fenômeno.

Diante de variabilidades climáticas provocadas pela influência dos fenômenos de El Niño e La Niña, Oliveira (2001 *apud* LUCAS, 2007) indica que, na ocorrência do primeiro, há um aumento moderado das temperaturas médias de inverno e verão em toda a região Sudeste, atingindo também a cidade de Belo Horizonte. Moreira (2002) aponta indícios de que estes eventos influenciam fortemente a distribuição espacial das chuvas na região metropolitana de Belo Horizonte, passando a ser dominante até mesmo frente ao efeito da topografia local.

Reis (1893) já fazia inferências sobre o comportamento dos ventos para a localidade onde se instalaria a cidade de Belo Horizonte quando descrevia suas condições naturais do sítio:

(...) acresce ainda a circunstancia de, assente sobre a bacia do *ribeirão Arrudas*, apresentar a localidade, em seus principaes lineamentos topographicos, a bella fórma de um vasto e amplo

anphitheatro, aberto para o oriente (...) e encostando-se, ao sul, á *Serra do Curral*, que a protege contra os ventos frios e humidos, que n'essa direcção, atravessam as *Serras do Ouro Branco* e *da Moeda*, e, ao norte, á *Serra da Contagem* que atenua os efeitos dos ventos cálidos que, atravessando as margens pouco salubres do *S. Francisco*, sopram n'essa direcção; ficando, porém, inteiramente desafogada para os ventos – antes brisas – do leste, que a bafejam constantemente, e, tambem, para os do oeste, que sopram algumas vezes do valle do *Paraopeba*, mais elevado que o *rio das Velhas* (...) (REIS, 1893-84: 20)

Segundo as observações climatológicas registradas durante o período de 3 de janeiro a 10 de abril de 1893 e constantes no Relatório de estudos feitos pelo engenheiro civil Samuel Gomes Pereira (REIS, 1893), o vento dominante, medido a cerca de 4 metros de altura, tinha velocidade média de 1 m/s e a direção predominante era leste. Ventos desta direção eram caracterizados como secos e correspondiam ao bom tempo durante o ano. Já os ventos de noroeste estavam associados a chuvas e trovoadas, enquanto os de sul, sudeste e sudoeste eram frios e úmidos.

A predominância dos ventos observada quando da construção de Belo Horizonte vai de encontro com os dados medidos pelo 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5º DISME/INMET). Os ventos de noroeste e sua associação com chuvas podem ter influência do efeito dos períodos de instabilidade freqüentes no verão e, possivelmente com o fenômeno de ZCAS observada por Lucas e Abreu (2004). A topografia mostra-se como fator condicionante no clima belo-horizontino, conforme apontado por Moreira (2002) no que se refere ao regime de chuvas e na descrição de Reis (1893) quanto aos ventos predominantes no município.

3.2 Evolução urbana

Planejada para ser a capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte foi projetada pelo engenheiro Aarão Reis e inaugurada em 1897. Símbolo da modernização urbana do Brasil na passagem do século XIX para o XX e representando a negação das estruturas urbanas coloniais (SEGAWA, 2002), a cidade nasce buscando uma síntese entre os modelos de cidades modernas como Paris e Washington.

O plano da Comissão Construtora revelava preocupações básicas com as condições de higiene e circulação humana²⁴. Era constituído por três zonas: urbana, suburbana e

²⁴ Os princípios de higiene e saneamento vão de encontro com a teoria dos miasmas, vigente desde o final do século XVIII na Europa, em que se acreditava que o ar e a água eram responsáveis pela propagação de doenças. Assim, engenheiros, médicos e sanitaristas propunham soluções urbanas

de sítios. A área urbana seria limitada pela Avenida do Contorno, região planejada, com traçado viário geométrico e regular que, segundo Monte-Mór (1994), expressava a ideologia de ordem e progresso, sem se preocupar com as condições topográficas naturais onde se implantava. A região suburbana envolvia a zona urbana e apresentava plano viário menos elaborado, enquanto a região de sítios ou colônias agrícolas representaria a zona rural municipal, responsável pelo abastecimento de produtos hortifrutigranjeiros.

Inicialmente, o crescimento de Belo Horizonte foi maior ao sul da Avenida do Contorno, indo além de seus limites, situação não prevista pelo plano de Aarão Reis. Em 1912, cerca de 70% da população municipal residia nas zonas suburbana e de sítios. O crescimento da periferia para o centro ainda é visível na década de 20, período em que havia mais cidade fora da área planejada do que dentro dela, sendo a área suburbana ocupada predominantemente por camadas de baixa renda (VILLAÇA, 2001). Em meados dos anos 20, o eixo de expansão dirigiu-se para a região Oeste, ocupando a ex-colônia do Carlos Prates e os bairros Calafate e Barro Preto (SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA - PLAMBEL, 1979).

Durante o período de 1930 a 1945, houve um impulso ainda maior para o crescimento no vetor oeste devido à implantação da Cidade Industrial no município de Contagem, entorno de Belo Horizonte. Neste sentido, a abertura da Avenida Amazonas, principal via de ligação externa da cidade que conectava a estação ferroviária central à Cidade Industrial, foi também fator de propulsão de crescimento nesta região (MONTE-MÓR, 1994). Há também um notável crescimento urbano na região nordeste, com o surgimento de novos bairros como Renascença e Sagrada Família. Além disso, o início de serviços de urbanização em áreas próximas à Lagoa da Pampulha e a abertura da atual Av. Antônio Carlos foram fatores de atração populacional para o norte da cidade (SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA - PLAMBEL, 1979).

Nas duas décadas seguintes, a população na zona suburbana ainda tem seu crescimento superior que aquela da zona urbana. O centro planejado teve sua verticalização intensificada, contudo ainda apresentava terrenos vazios, e novas áreas de ocupação periféricas foram aprovadas. Entre 1950 e 1959, 22 novos loteamentos foram lançados no mercado imobiliário distribuídos em toda a cidade, dentre eles o do

acreditando que a cidade precisava respirar, já que a estagnação dos elementos naturais (água e o ar) seria o foco de propagação das epidemias (MÜLLER, 2002).

bairro Sion e vários na região da Pampulha. Do total de 50 loteamentos aprovados pela prefeitura neste período, alguns deles já se encontravam ocupados como é o caso da Vila Concórdia e Ermelinda (SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA - PLAMBEL, 1979).

Entre os anos 60 e 80, a ocupação urbana estende-se por toda a região de baixas declividades da Depressão de Belo Horizonte, havendo uma consolidação do crescimento nos vetores oeste e norte (ASSIS, 2000). A partir da década de 70, o centro da cidade passa a sofrer um esvaziamento, seguindo uma tendência nacional, enquanto novas áreas de expansão no eixo sul do município começam a atrair população pela beleza natural e paisagística local, processo que se torna mais evidente no decênio seguinte (MENDONÇA e COSTA, 2004).

Cabe ressaltar que neste período foi aprovada a primeira lei de uso e ocupação do solo (LUOS) de Belo Horizonte, Lei nº 2.662, de 29 de novembro de 1976. O zoneamento proposto nesta lei enfatiza o modelo do plano original de Aarão Reis a partir do momento que propõe uma diversidade de usos e tipos de ocupação para a zona central e uma diminuição gradativa desta heterogeneidade em direção à periferia da cidade. Seu modelo é baseado na divisão das funções urbanas, dividindo o município em zonas residenciais, comerciais, industriais, institucionais, de expansão urbana, de uso especial e de setores especiais (SANTOS, 2002).

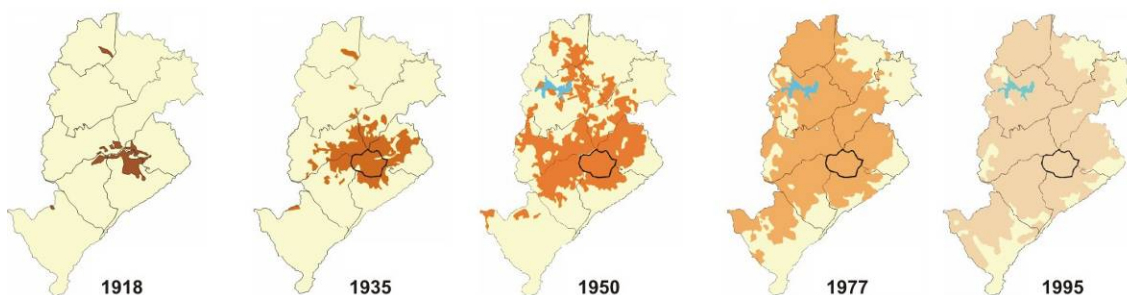


FIGURA 19 Manchas de ocupação urbana em Belo Horizonte. A linha mais grossa, ao centro do mapa, representa os limites da Av. do Contorno e, em azul, a Lagoa da Pampulha.

Fonte: PLAMBEL/SMPL, 2000. Disponível em: <<http://www.pbh.gov.br>>.

Acesso em 17 dez. 2008

Nota-se uma relevante ocupação da cidade neste período, restando poucas áreas desocupadas referentes à zona rural ao longo da Serra do Curral e no extremo nordeste do município. Já em 1985, a segunda lei de uso e ocupação do solo é aprovada (Lei nº 4.034, de 25 de março de 1985), e correspondeu a uma revisão da lei de 1976 (SANTOS, 2002). Nos anos posteriores, houve uma pequena expansão urbana em termos físicos, contudo verifica-se o adensamento de novas áreas e a

verticalização como resultado da permissividade da lei de 1985. Surgem os bairros Belvedere, Buritis, Castelo, Ribeiro de Abreu, Taquaril e Jatobá, a maioria deles localizados na zona sul de Belo Horizonte.

A partir de 1996, todo o território municipal é instituído como área urbana pela nova lei de uso e ocupação do solo (Lei nº 7.166, de 27 de agosto de 1996). Esta legislação é menos rígida quanto à questão do zoneamento por função urbana e incorpora uma perspectiva de descentralização econômica, social e administrativa, pretendendo garantir a função social da propriedade urbana, função esta estabelecida pela Constituição Federal de 1988.

Várias edificações aprovadas pela prefeitura municipal anteriormente a esta lei foram se consolidar apenas nos anos seguintes, imprimindo ainda hoje a verticalização principalmente na região sul do município, como nos bairros Belvedere e Buritis, que têm sua paisagem constantemente modificada como resultado da LUOS de 1985. Quanto à lei de 1996, esta flexibilizou o uso do solo em diversas áreas, podendo-se notar, por exemplo, uma substituição do uso residencial unifamiliar pelo residencial multifamiliar e misto nas regiões lindeiras ao centro, como Prado e Barro Preto. O adensamento e a substituição de edificações de 1 e 2 pavimentos por prédios de múltiplos andares é um fato notado em diversas áreas da cidade, como nas proximidades do centro (bairros de Lourdes, Funcionários e Santo Agostinho) e em parte das regiões Barreiro e Nordeste.

Esta breve descrição da evolução urbana de Belo Horizonte pretendeu mostrar os eixos de crescimento da cidade nas diferentes épocas e apontou também a influência das leis de uso e ocupação do solo na transformação do território municipal nas últimas décadas. Apesar de o território municipal estar praticamente ocupado desde a promulgação da primeira LUOS, o adensamento e a verticalização alteraram a paisagem urbana em período posterior. Além disso, o clima urbano pode ter sofrido alterações, como já ficou constatado por Assis (1990) com relação ao campo térmico, observando que áreas menos adensadas da cidade teriam maior amplitude térmica se comparadas a áreas verticalizadas.

3.3 Delimitação da área de estudo

A área considerada para avaliar os padrões de vento na cidade de Belo Horizonte abrange uma região de cerca 1.150 km² (33,85 x 33,85 km), delimitada pelas

coordenadas UTM, *datum* SAD69, 591057; 7781085, no extremo sul, e 624915; 7814943 a norte. Esta delimitação se justifica pela necessidade de representação de uma área superior aos limites do município, pois as regiões de contorno são importantes para o controle da simulação.

Esta área foi descrita por uma malha regular composta por 298 x 298 pontos, o que representa uma resolução de 114 m para cada intervalo entre os pontos. A determinação da malha é resultado dos limites do programa computacional, que permite a representação de até 300 pontos nos sentidos x e y.

4 METODOLOGIA

O método utilizado para relacionar a alteração dos padrões de vento diante da mudança da ocupação urbana foi o indutivo, método que possibilita a compreensão da realidade a partir da análise de fatos, neste caso, a influência de padrões de uso e ocupação do solo urbano sobre a circulação de ar local. Como técnica, aplicou-se a simulação computacional para se comparar o sítio natural da cidade com modelos de ocupação representativos da evolução de sua mancha urbana.

A definição do recorte temporal levou em consideração quatro critérios básicos: o intervalo de tempo em que as transformações urbanas fossem relevantes e contrastantes, o período comum de localização da estação meteorológica principal de Belo Horizonte, a ocorrência de anomalias climáticas e a disponibilidade de imagens de satélite. Primeiramente, foram observados os períodos de aprovação das leis municipais de uso e ocupação do solo, parâmetro que poderia indicar a alteração do aspecto da mancha urbana e de sua evolução. Constatou-se que os anos de 1977, 1985 e 1996 poderiam ser considerados a partir deste critério. O segundo ponto analisado foi o período de funcionamento da estação de referência em Belo Horizonte, monitorada pelo 5º DISME/INMET. Esta foi instalada no bairro de Lourdes em março de 1986, local em que se encontra até a atualidade. Assim, definiu-se que a determinação do período de análise deveria ser posterior à instalação desta estação.

Em seguida, observou-se a ocorrência de anomalias climáticas durante o período de 1987 e 2007. Alguns anos foram eliminados, como é o caso de 1991, que foi considerado anômalo quanto aos totais de precipitação e ventos associados ao quadrante N/W (ABREU e LUCAS, 2003) e o intervalo entre 1990 e 1995, caracterizado como um longo período de episódio de El Niño (CAVALCANTI, 1996). A ocorrência destes fenômenos altera a distribuição de chuvas em Belo Horizonte (MOREIRA, 2002) e, como não foram encontrados estudos que revelassem a relação de ENOS com o comportamento dos ventos em Belo Horizonte, preferiu-se evitar a seleção de anos que estivessem sobre a influência destas anomalias.

Diante destas constatações, partiu-se para a seleção de períodos considerando a intensidade de ocorrência dos fenômenos El Niño e La Niña²⁵ e, concomitantemente, foi analisada a disponibilidade de imagens de satélite. Os períodos que tiveram melhor

²⁵ A intensidade dos fenômenos foi extraída de quadro resumo disponibilizado pelo CPTEC/INPE em <<http://www.cptec.inpe.br/enos>>. Acesso em 25/03/2008. Nestes quadros há uma referência, em nota, de que a intensidade dos ventos é baseada no padrão e magnitude das anomalias da TSM (Temperatura da Superfície do Mar) do Pacífico Tropical.

correspondência entre os critérios adotados quanto ao comportamento climático e a disponibilidade de dados foram 1987 (El Niño moderado), 1997 (El Niño forte) e 2007 (El Niño fraco). Para a identificação da ocupação do solo, foram utilizadas imagens de satélite Landsat de 1987, 1996 e 2006.

A metodologia adotada posteriormente à seleção dos períodos pode ser sumarizada pela FIG. 20. Partindo de três parâmetros básicos representativos da topografia, da ocupação do solo e do vento, descritos, respectivamente, por um modelo digital de terreno (MDT), um modelo digital de elevação (MDE) e dados de vento de estações meteorológicas, utilizando o programa WindMapTM, foi possível simular as condições de vento em quatro situações: terreno sem ocupação e terreno ocupado nos anos de 1987, 1996 e 2006. Após a calibração do modelo computacional e realização dos testes, foi possível comparar os resultados das diferentes situações e analisar se estes correspondiam às premissas colocadas no início do trabalho.

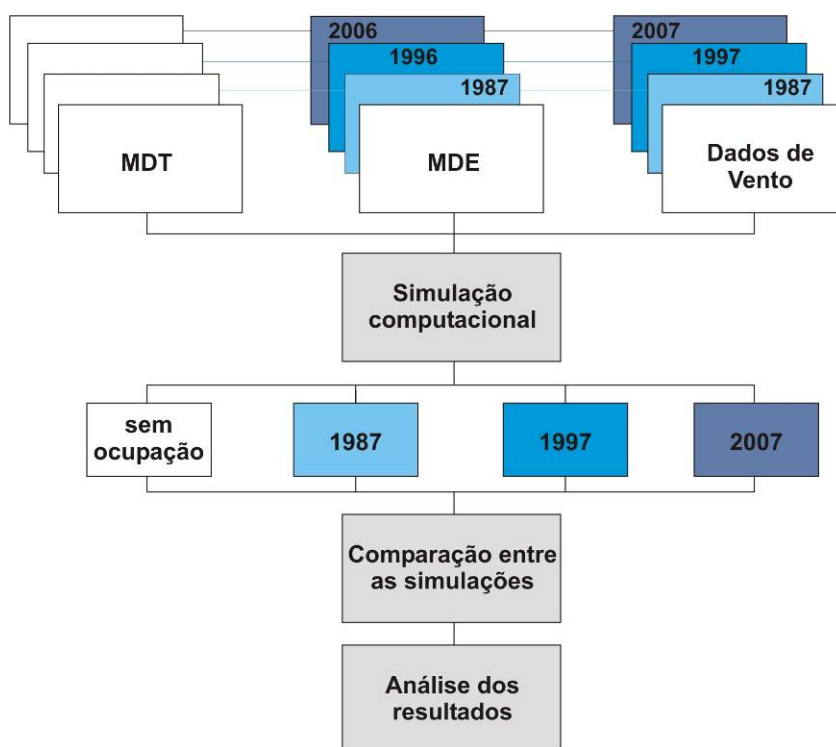


FIGURA 20 Fluxograma esquemático da metodologia adotada
Fonte: Produzido pela autora

Nos itens seguintes serão detalhados os métodos e técnicas utilizados em cada etapa do trabalho. Inicialmente serão descritas as técnicas de coleta e tratamento de dados das três variáveis principais (topografia, ocupação do solo e vento). Em seguida, serão apresentados os métodos empregados na determinação dos parâmetros de suporte à

simulação. Para finalizar, estão discriminados os procedimentos adotados na simulação computacional.

4.1 Coleta e tratamento de dados

4.1.1 Dados de vento

A caracterização do vento e a seleção dos episódios de análise tiveram como base a amostragem de individualidades que expressam a circulação atmosférica da região de Belo Horizonte, com uma abordagem fundamentada na climatologia dinâmica. De acordo com estudos anteriores (MOREIRA, 1999; LUCAS e ABREU, 2004) e empregando técnicas de entrevista semi-estruturada com meteorologistas do 5º DISME/INMET, foi possível identificar dois períodos de comportamento distinto do vento durante o ano, em Belo Horizonte: o período estável e o instável.

Reconhecendo esta dinâmica, foram determinados, então, dois episódios representativos do comportamento atmosférico durante cada ano de estudo. Através da análise de dados da estação padrão de Belo Horizonte, referentes à temperatura, umidade, nebulosidade, precipitação, direção e velocidade dos ventos, foram identificados 5 dias consecutivos que representassem cada episódio.

O período estável foi delimitado por intervalos de dias nos meses de junho e julho constatando-se que não houve ocorrência de chuva em dias anteriores ou posteriores aos períodos escolhidos e que a moda da direção dos ventos correspondia à predominância em Belo Horizonte. Já os episódios de instabilidade foram caracterizados pela atuação da ZCAS, com dias consecutivos de chuvas e alteração no quadrante de direção predominante dos ventos. A atuação da ZCAS foi verificada em estudo realizado por Quadro (1994)²⁶, no caso do ano de 1987, e nos Boletins Climanalise (CAVALCANTI, 1997; CAVALCANTI, 2007) para os demais períodos. A TAB. 6 apresenta os intervalos de dias escolhidos para cada ano.

TABELA 6 Seleção dos episódios para cada ano de estudo

Ano	Período instável	Período estável
1987	09 a 13/01	15 a 19/07
1997	02 a 06/01	06 a 10/07
2007	12 a 16/01	17 a 21/06

Fonte: Produzido pela autora

²⁶ Este trabalho identifica a ocorrência de ZCAS entre 1980 e 1989, período em que não havia disponibilidade de Boletins Climanalise.

A partir da seleção dos episódios, partiu-se para a coleta de dados de direção e velocidade dos ventos de estações meteorológicas fixas de Belo Horizonte e de municípios do entorno, monitoradas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estação principal de Belo Horizonte foi utilizada como estação de referência, por ser a única que apresenta dados completos de todo o período analisado. Os dados das demais estações serviram como parâmetro de entrada do modelo. Já as estações automáticas foram utilizadas apenas como calibração para as simulações, pois, dos episódios analisados, seu tempo de funcionamento correspondeu apenas ao ano de 2007. O período de coleta de dados e a localização das estações são apresentados na TAB. 7 e na FIG. 21.

TABELA 7 Dados sobre as estações meteorológicas utilizadas

Estação meteorológica	Coordenadas (UTM)		Tipo de estação	Período de coleta de dados
	x	y		
Belo Horizonte	611982	7795900	convencional	1987, 1997, 2005, 2007
Pampulha	607800	7801500	automática	2007
Contagem	596300	7793800	automática	2007
Sete Lagoas	578715	7846987	convencional	1987, 1997, 2007
Divinópolis	513584	7769693	convencional	1997, 2007
Florestal	562823	7804998	convencional	1987, 1997

Fonte: Produzido pela autora

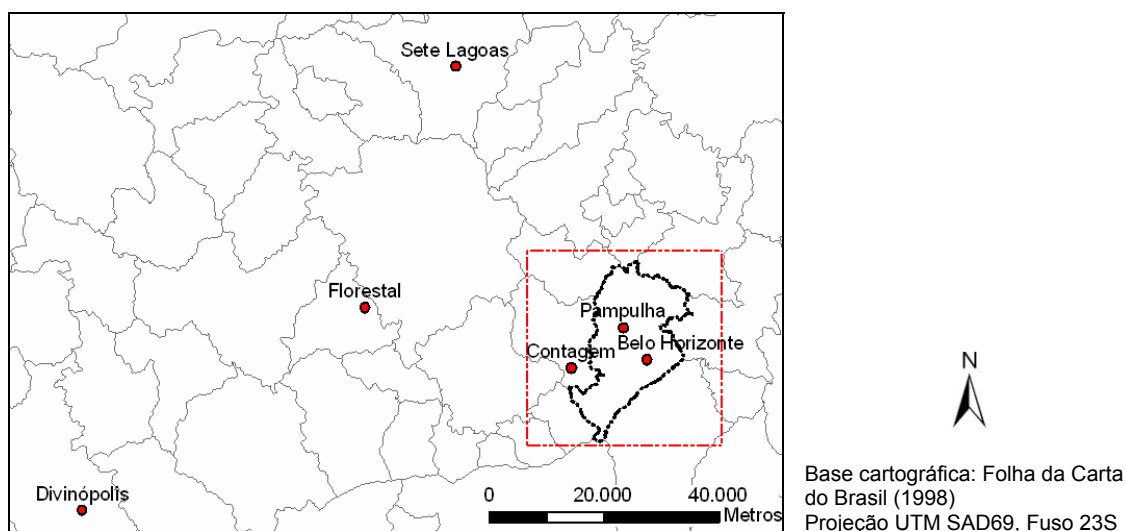


FIGURA 21 Localização das estações meteorológicas.
O retângulo vermelho representa os limites da área de estudo
Fonte: Produzido pela autora

Os dados de Belo Horizonte têm como fonte a base de informações do 5º Distrito de Meteorologia (INMET) e cedidos através do convênio IGC-UGMF/INMET nº

D05/081/2008, datado em 06 de novembro de 2008. No caso das demais estações meteorológicas, os dados foram cedidos diretamente pelo 5º DISME/INMET.

A partir dos dados dos três horários sinóticos de medição da estação meteorológica de Belo Horizonte (12, 18, 24 UTC²⁷), foram feitas análises mensais dos dados de vento da estação principal de Belo Horizonte. Através de tratamento estatístico, foram extraídas médias de velocidade e direção predominante para cada mês nos anos de 1987, 1997 e 2007. Para este mesmo período, calculou-se também a frequência de ocorrência de direção do vento.

No caso do tratamento dos registros anemométricos dos episódios, foram utilizadas as mesmas técnicas estatísticas de média de velocidade e moda da direção do vento para o conjunto de dados relativos aos horários sinóticos de cada período selecionado. Os dados das estações meteorológicas de Sete Lagoas, Divinópolis, Florestal, Contagem e Pampulha também foram submetidos a este tipo de tratamento estatístico das informações. Posteriormente, estes dados foram inseridos como parâmetro de entrada do programa de simulação gerando arquivos de dados de superfície (*surface data*) para cada episódio.

4.1.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)

A topografia foi representada por um Modelo Digital de Terreno (MDT) fornecido pelo Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC/UFMG). Em formato *shapefile*, o modelo foi produzido com base em curvas de nível cedidas pela PRODABEL (empresa de informática da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte) no sistema de coordenadas UTM, *datum* SAD69.

O MDT original teve seus limites redefinidos, sendo que o limite inferior passou a ser representado pelo par de coordenadas (591.057, 7.781.085) e o limite superior igual a (624.915, 7.814.943), delimitação esta que corresponde à área de estudo que extrapola os limites do município de Belo Horizonte, como comentado anteriormente. Em seguida, foi convertido para uma malha regular de pontos conformando um arquivo de extensão *GRD* que é aceito pelo programa WindMapTM.

²⁷ Estes horários correspondem respectivamente a 9, 15 e 21h, horário local, desconsiderando alterações provocadas pelo horário de verão.

4.1.3 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O modelo digital de elevação foi elaborado em duas etapas que ocorreram concomitantemente: a classificação automática de imagens de satélite e a determinação dos valores de comprimento de rugosidade (z_0). A primeira consistiu na identificação de áreas homogêneas a partir da escolha de tecidos urbanos representativos da diversidade de ocupação do solo, ou seja, as classes de cobertura do solo para a área de estudo. Já na etapa de determinação de z_0 foram estabelecidos os valores atribuídos a cada classe de ocupação do solo. A seguir, estas etapas serão detalhadas.

4.1.3.1 Classificação de imagens de satélite

Os procedimentos que compõem a classificação de imagens de satélite foram realizados no programa computacional Spring[®] (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas), versão 5.0.2, plataforma de livre acesso desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), utilizando os seguintes produtos:

- Imagens TM (thematic mapping) do satélite *Landsat 5*²⁸, composta pelas bandas 3, 4 e 5, correspondentes à área do município de Belo Horizonte coletadas nas seguintes datas: 17/07/1987, 23/06/1996, 21/07/2006. As imagens escolhidas foram capturadas em período seco, em que a quantidade de nuvens era praticamente desprezível.
- Base cartográfica contendo mapas de quadras e limite do município em formato vetorial. A base foi elaborada pela PRODABEL e os dados foram disponibilizados pelo IGC/UFMG, que realizou ajuste de localização²⁹ dos componentes presentes nos mapas.

Esta etapa de elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) foi realizada em três fases: pré-processamento, realce e classificação das imagens de satélite.

Na fase de pré-processamento, foram realizadas correções radiométrica e geométrica. A partir de operação aritmética efetuada no programa Spring[®], foi possível aplicar uma

²⁸ Imagens disponíveis em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: jul. 2007.

²⁹ Os mapas cedidos pela PRODABEL são em formato Mapinfo, coordenada UTM SAD 69. Em função do sistema operacional utilizado pela empresa, os componentes das bases cartográficas são suprimidos em sete milhões no eixo das coordenadas.

correção radiométrica para cada banda das imagens *Landsat* de 1987 e 1996. O programa utiliza uma regra matemática para equalizar valores de pixel em relação a uma imagem de referência, utilizando atributos de correção de média e de desvio padrão, conforme apresentado na TAB. 8.

A imagem do ano de 2006 não sofreu correção radiométrica, pois esta técnica não contribuiu para a melhoria da qualidade da imagem se comparada com aquelas relativas aos períodos de 1987 e 1996.

TABELA 8 Parâmetros estatísticos e valores de correção das imagens de satélite de 1987 e 1996 para correção radiométrica

Imagem de referência		
Banda	Média	Desvio Padrão
3	127	47
4	127	47
5	127	47

Imagem Landsat de 17/07/1987		
Banda	Média	Desvio Padrão
3	25,92	10,58
4	37,69	10,04
5	55,23	20,71

Fatores de correção		
Banda	Média	Desvio Padrão
3	11,85	4,44
4	-49,44	4,68
5	1,66	2,27

Imagem Landsat de 23/06/1996		
Banda	Média	Desvio Padrão
3	24,07	9,56
4	33,56	9,27
5	45,12	17,87

Fatores de correção		
Banda	Média	Desvio Padrão
3	8,66	4,92
4	-43,15	5,07
5	8,33	2,63

Equações utilizadas

Fator correção da média = média de referência - (fator correção desvio padrão × média imagem a corrigir)

$$\text{Fator de correção do desvio padrão} = \frac{\text{desvio padrão da imagem de referência}}{\text{desvio padrão da imagem a ser corrigida}}$$

Em seguida, realizou-se o registro das imagens *Landsat*. As imagens disponibilizadas pelo INPE recebem um tratamento prévio de correção geométrica, contudo foi necessário realizar um novo registro para refinar a qualidade de georreferenciamento do sistema, conforme descrição de procedimento apresentada no item 2.5.1, no capítulo de revisão bibliográfica deste trabalho. Posteriormente, seguiu-se para a execução do realce das imagens com o objetivo de melhorar seus padrões de reconhecimento, utilizando a técnica de equalização de histogramas para cada banda das três imagens analisadas.

A fase subsequente consistiu na classificação das imagens de satélite. Foram definidas três classes representativas de áreas urbanas baseadas na descrição das formas da superfície urbana, proposta por Grimmond e Oke (1999), e quatro classes relativas a elementos naturais, correspondentes a divisões presentes em manuais e tabelas que estabelecem valores de z_0 (WIERINGA *et al.*, 2001; MORTENSEN *et al.*, 1993), conforme apresentadas na TAB. 9.

TABELA 9 Descrição das classes de cobertura do solo adotadas na classificação de imagens de satélite

Classes de cobertura do solo	Descrição
Água	Áreas representadas por lagoas e represas
Solo exposto	Regiões não ocupadas por edificações, caracterizadas por extensões de terra sem qualquer tipo de cobertura vegetal.
Vegetação rasteira	Vegetação de pequeno porte ou com obstáculos esparsos em altura que podem ser árvores ou construções.
Vegetação arbórea	Áreas com vegetação arbórea significativa, que podem ser remanescentes de florestas, parques urbanos ou conjunto de árvores de grande porte,
Área urbana residencial	Regiões com edificações de até dois pavimentos, tipologia característica de bairros residenciais.
Área urbana densa de altura média	Áreas compostas por residências unifamiliares e prédios de até 8 pavimentos, com pequenos afastamentos entre eles.
Área urbana de alta densidade	Regiões de densidade elevada que apresentam edificações acima de 10 pavimentos, com pequenos afastamentos entre elas, representadas principalmente pelo centro da cidade de Belo Horizonte.

Fonte: Produzido pela autora

A seleção de amostras de cada classe foi realizada visualmente, observando parâmetros tais como forma, sombras, tonalidade, cor, padrão, textura, localização e contexto espacial, como visto no capítulo 2. O classificador utilizado foi o método estatístico de Máxima Verossimilhança (MAXVER). Para verificação da significância das amostras, observou-se o desempenho médio e a matriz de confusão de cada área escolhida como representativa das classes de cobertura do solo. As amostras que apresentavam alto índice de confusão foram eliminadas, fazendo nova seleção de áreas quando necessário. A matriz de confusão e o erro de classificação de cada imagem estão disponíveis no Apêndice A.

As imagens classificadas foram, então, convertidas em formato compatível com o programa WindMapTM, com tamanho do pixel igual a 114 m, obedecendo os mesmos

limites do Modelo Digital de Terreno. A cada classe foi atribuído um valor para o comprimento de rugosidade, conforme metodologia descrita a seguir, resultando em um Modelo Digital de Elevação (MDE) para cada período de ocupação do solo da área analisada, 1987, 1996 e 2006.

4.1.3.2 Determinação dos valores de comprimento de rugosidade (z_0)

Para atribuição do comprimento de rugosidade no MDE, utilizou-se valores publicados por Wieringa *et al.* (2001) no caso das classes que não representam áreas urbanas. Já para as classes urbanas, foi feito um estudo de tipologias de ocupação do solo que poderiam representar a diversidade da mancha urbana de Belo Horizonte.

Como critérios para seleção dos locais, foram considerados a topografia e o posicionamento das ruas em relação ao vento dominante, seguindo os princípios de determinação de parâmetros de medida de densidade urbana sugeridos por Grimmond e Oke (1999). Os locais deveriam ter topografia praticamente plana para não haver influência das condições do relevo na estimativa da rugosidade. Em relação ao posicionamento das ruas e para efeito de comparação entre as amostras, definiu-se que as vias estariam direcionadas perpendicularmente ao vento dominante. Através de análise visual de imagem aérea³⁰, mapa cadastral e levantamento de campo, foram escolhidas 5 amostras de áreas urbanas (FIGURAS 22 e 23, Apêndice B), localizadas nos bairros Pampulha (*Pa*), Presidente JK (*Jk*), Prado (*Pr*), Lourdes (*Lo*) e Centro (*Ce*).

As amostras *Jk* e *Pa* representam regiões com edificações de até 2 pavimentos, tipologia característica de bairros residenciais, sendo que no bairro Presidente JK tais edifícios têm dimensões e afastamentos pequenos e na Pampulha as edificações têm projeção horizontal maior que em *Jk* e grandes afastamentos. *Pr* é um exemplo de local com densidade e altura mediana composto por um misto de residências unifamiliares e prédios de até 6 pavimentos. *Lo*, por sua vez, é uma amostra cuja densidade urbana e altura média dos edifícios é elevada, pois é uma área com prédios de até 21 pavimentos coexistindo com edifícios de 2 pavimentos. *Ce* representa o centro da cidade de Belo Horizonte, região de densidade elevada que apresenta edificações de 12 andares em média.

³⁰ Imagem disponibilizada pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (PRODABEL), capturada em 1999.

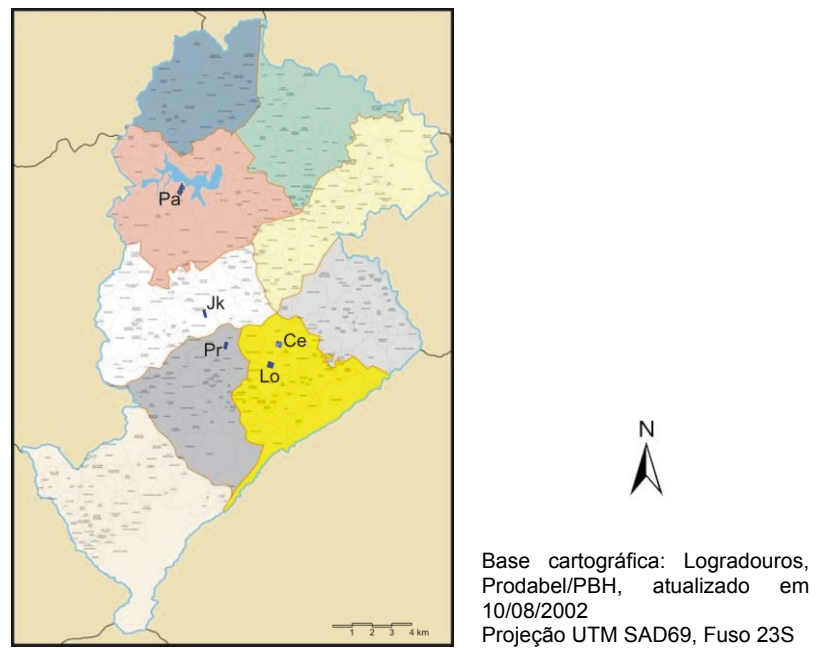


FIGURA 22 Localização das amostras de áreas urbanas
Fonte mapa-base: Prodabel

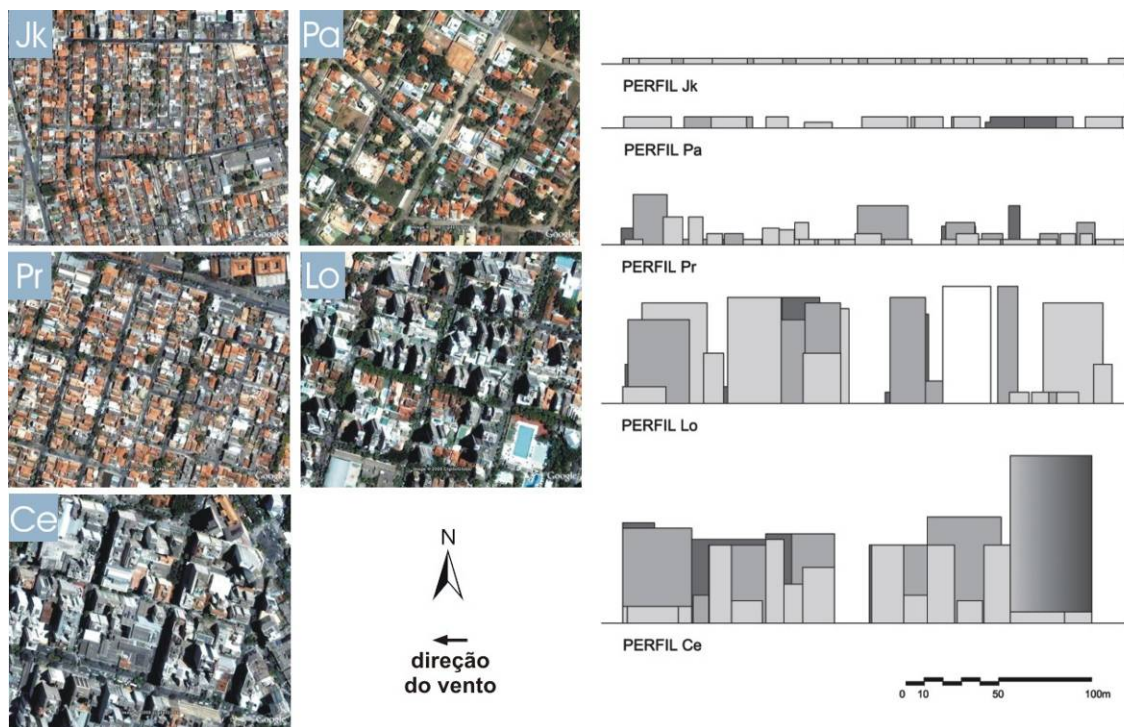


FIGURA 23 Tipologias urbanas de Belo Horizonte mostradas em imagens aéreas e esquema das fachadas das áreas urbanas escolhidas para determinação dos parâmetros de rugosidade
Fonte das imagens aéreas: Google Earth™.

Para cada área urbana foram estimados os parâmetros de rugosidade, em conformidade com metodologia descrita em Grimmond e Oke (1999) e ilustrada na Figura 13. Estes mesmos autores apontaram a dificuldade de estimativa do comprimento de rugosidade e que não há um melhor método para sua determinação.

Neste sentido, procedeu-se ao cálculo desta variável comparando três métodos morfométricos: Regra Prática (Rt), Lettau (Le) e Macdonald *et al.* (Ma), conforme equações 3 a 6 (p. 39). Os parâmetros de cálculo de z_0 constam na TAB. 10.

Os resultados obtidos foram confrontados com os limites heurísticos propostos por Grimmond e Oke (1999), momento em que se definiu o modelo de cálculo de z_0 . Conforme indicado por Ferreira *et al.* (2008)³¹, a Regra Prática foi o que melhor se adequou para a representação da rugosidade no caso da cidade de Belo Horizonte, considerando as limitações de entrada de dados do programa WindMapTM.

TABELA 10 Parâmetros de rugosidade para cada amostra de tecido urbano em Belo Horizonte

Amostra urbana	A_F	A_P	A_T	$\overline{\lambda_F}$	$\overline{\lambda_P}$	$\overline{z_H}$ (m)	$\overline{z_d}$ (m)
Presidente JK	1,15	3,18	21,5	0,05	0,15	3	0,95
Pampulha	2,07	10,53	57,8	0,04	0,19	6	2,25
Prado	2,93	12,10	25,3	0,12	0,49	3,6	2,66
Lourdes	11,65	10,15	40,9	0,28	0,25	17,9	8,60
Centro	13,20	21,80	37,5	0,35	0,58	34,6	28,53

A_F e A_P : área frontal e área de projeção dos obstáculos; A_T : área total; $\overline{\lambda_F}$: razão de área frontal; $\overline{\lambda_P}$: razão de área plana; $\overline{z_H}$: altura dos obstáculos; $\overline{z_d}$: deslocamento do plano zero.

Fonte: Produzido pela autora

As amostras *Pa* e *Lo* foram excluídas da classificação de imagem de satélite por apresentarem matriz de confusão elevada com as classes de uso residencial e de alta densidade. Além disso, a amostra *Lo* é uma tipologia de ocupação recente em Belo Horizonte e de difícil identificação nos períodos correspondentes a 1987 e 1996.

Os valores estimados de z_0 para as áreas *JK*, *Pr*, e *Ce* que correspondem, respectivamente, às classes de cobertura do solo área urbana residencial, área urbana densa de altura média e área urbana de alta densidade foram, então, incorporados à classificação de imagem de satélite, conformando o Modelo Digital de Elevação.

4.2 Simulação computacional

A simulação no programa WindMapTM exige parâmetros de entrada para estimar o comportamento do escoamento do ar nos diferentes níveis da atmosfera. Os *inputs* que permitem a reprodução da variação vertical do escoamento são as alturas das

³¹ Os resultados e a comparação de modelos morfométricos para Belo Horizonte foram publicados no 1º Congresso Latino-americano de Engenharia de Vento, realizado em Montevidéu. No capítulo seguinte os resultados obtidos serão detalhados.

camadas consideradas no modelo e os dados de vento geostrófico. A seguir, serão apresentadas as técnicas utilizadas para determinação destes dados de entrada e, posteriormente, indicada a forma de simulação para cada episódio.

4.2.1 Parâmetros de entrada no modelo computacional

O programa apresenta duas alturas de camada como dado de entrada: *Boundary Layer Height* e *Transition Layer Height*. A primeira equivale à altura da camada interna ou camada de superfície, enquanto que a outra corresponde ao topo da camada limite atmosférica (CLA).

Para a estimativa da altura da CLA, foram utilizados dados de sondagem do Aeroporto de Confins e diagramas Skew-T do horário 12UTC³² disponíveis no *site* do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming³³. A partir de entrevista com meteorologistas do 5º DISME/INMET definiu-se que a melhor representação dos episódios seria através do perfil vertical de velocidade que mais se aproximasse da média do período analisado (Apêndice C), já que as médias dos perfis pode mascarar as variações verticais observadas nas sondagens. Por não haver disponibilidade de dados do ano de 1987 e de junho de 2007, os valores calculados para janeiro de 2007 e junho de 2005³⁴ foram aplicados para os respectivos episódios, já que análises comparativas de episódios de 1997 e 2005 através das cartas Skew-T não demonstraram diferenças significativas do comportamento vertical. A TAB. 11 mostra os dias selecionados para cálculo da espessura da CLA.

TABELA 11 Dados de sondagem e carta Skew-T utilizados para cada episódio

Período	Sondagem e Carta Skew-T
09 a 13/01/1987	16/01/2007
15 a 19/07/1987	12/06/2005
02 a 06/01/1997	03/01/1997
06 a 10/07/1997	09/07/1997
12 a 16/01/2007	16/01/2007
17 a 21/06/2007	12/06/2005

Fonte: Produzido pela autora

³² Os dados de 0UTC não foram utilizados já que as sondagens neste horário não foram realizadas em todos os períodos analisados.

³³ Disponível em <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em julho de 2008.

³⁴ O ano de 2005 foi classificado como um período de ocorrência El Niño de intensidade fraca. O período selecionado para a análise de dados foi de 08 a 12 de junho, sendo que foram consideradas as mesmas características de tempo para a seleção dos demais episódios de estabilidade.

Esta espessura foi determinada pela relação entre a temperatura virtual e a diferença de pressão entre os níveis da sondagem, através da Equação 7 (BRASIL, 1969):

$$Espessura = \frac{R_d}{g} \overline{T_v} L_n \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (7)$$

Onde R_d é a constante do gás para ar seco ($287 \text{ J grau}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), g é a constante da gravidade, $\overline{T_v}$ é a temperatura virtual média entre as duas camadas P_1 e P_2 são as pressões limítrofes da camada e L_n indica o logaritmo natural.

Considerou-se a pressão inicial de sondagem e a pressão de 850 hPa como os limites da CLA. Para cada pressão, foi determinada a temperatura virtual através da Equação 8 (VAREJÃO-SILVA, 2006):

$$T_v = T (1 + 0,6r) \quad (8)$$

Sendo T a temperatura do ar, em Kelvin, e r a razão de mistura.

A razão de mistura foi extraída diretamente da carta Skew-T. A partir da espessura da camada limite atmosférica, determinou-se a altura da camada de superfície, que corresponde a 10% da altura da CLA (LOPES, 2003; PALESE, 2008). Já as velocidades e direções do vento geostrófico foram extraídas das sondagens em alturas correspondentes às pressões de 700, 500 e 400 hPa (PEDRO *et al.*, 2006) para os mesmos perfis utilizados na determinação da altura da CLA.

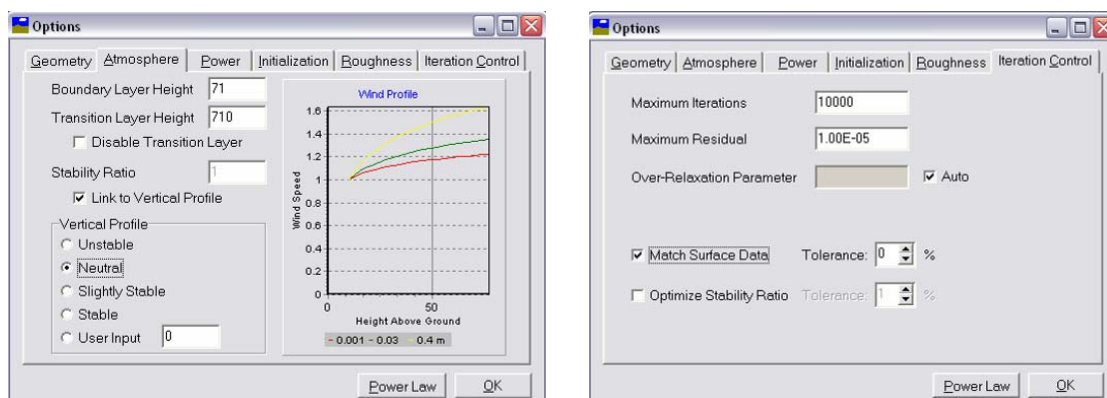
4.2.2 Procedimentos da simulação

As simulações foram realizadas para cada episódio, utilizando dados de vento e rugosidade correspondentes a cada período. Para todas elas, foram selecionadas as opções *Link to vertical profile* e *Match Surface Data*³⁵ (FIGURAS 24 e 25). O tipo de atmosfera foi selecionado conforme o episódio, ou seja, estável ou instável e, além disso, foram feitos testes comparativos utilizando a opção atmosfera neutra, já que estudos de Lopes (2003), Vasconcelos (2006) e Prata (2005) usam esta caracterização atmosférica em seus trabalhos.

Com o objetivo de verificar a influência da altura de simulação na análise do vento em escala local, estabeleceu-se também como parâmetro variável a altura acima do solo (*Height above ground*), testando os níveis de 10, 12, 15, 20 e 30 m (Apêndice D). As

³⁵ Ver glossário de termos do programa WindMap™.

comparações mostraram que a altura de 10 m seria a melhor para visualizar os efeitos da ocupação urbana, adotando-se este valor para todas as simulações que se seguiram.



FIGURAS 24 e 25 Telas de opções do programa WindMap™

Para cada episódio, foi feita a simulação considerando apenas a topografia³⁶ (grupo de controle) e, posteriormente, incorporando o Modelo Digital de Elevação correspondente a cada ano analisado. Foram realizadas, então, um total de 12 simulações, conforme parâmetros de entrada apresentados na TAB. 12.

TABELA 12 Parâmetros de simulação

Teste	Ano	mês	MDE	Condição de estabilidade atmosférica		Ano de utilização dos dados de vento geostrófico e altura da CLA
				estável	instável	
1	1987	janeiro	$z_0 = 0,03$		x	2007
2	1987	janeiro	1987		x	2007
3	1987	julho	$z_0 = 0,03$	x		2005
4	1987	julho	1987	x		2005
5	1997	janeiro	$z_0 = 0,03$		x	1997
6	1997	janeiro	1996		x	1997
7	1997	julho	$z_0 = 0,03$	x		1997
8	1997	julho	1996	x		1997
9	2007	janeiro	$z_0 = 0,03$		x	2007
10	2007	janeiro	2007		x	2007
11	2007	junho	$z_0 = 0,03$	x		2005
12	2007	junho	2007	x		2005

Fonte: Produzido pela autora

³⁶ Neste caso, o valor atribuído ao comprimento de rugosidade (z_0) foi de 0,03m para toda a área de estudo.

4.2.3 Comparação dos resultados da simulação

A análise dos resultados da simulação foi realizada em duas etapas. Na primeira considerou-se a área de estudo como um todo, fazendo comparações entre os episódios com as mesmas condições de estabilidade atmosférica, enquanto que em etapa posterior verificou-se a influência da alteração da ocupação nas condições de vento em pontos específicos.

Para verificar a influência da ocupação urbana em toda a área de estudo, realizou-se uma operação de subtração entre os resultados dos testes que consideravam o Modelo Digital de Elevação e aqueles que consideravam apenas a topografia. Por exemplo, no caso do episódio de janeiro de 1987, subtraiu-se o teste 2 de 1, procedimento realizado consecutivamente para os outros episódios. Assim foi possível isolar o efeito da ocupação urbana sobre a circulação do ar e comparar a alteração da velocidade do vento no tempo.

Na análise pontual, inicialmente foram escolhidos 20 pontos localizados dentro dos limites do município de Belo Horizonte onde se verificou a mudança do tipo de ocupação do solo (FIGURA 26). Esta amostragem foi determinada visualmente através da comparação das imagens de classificação de cobertura do solo. Procurou-se identificar áreas em que classes de solo exposto, água e vegetação foram substituídas por área urbana e também locais onde ocorreu adensamento da ocupação urbana. Em seguida foram extraídos os valores de alteração da velocidade para cada ponto a partir dos arquivos resultantes da operação de subtração, descrita anteriormente. Através de tratamento estatístico, obteve-se uma correlação entre a alteração da velocidade e o comprimento de rugosidade (z_0).

Por fim, foram selecionados dois pontos dentre os citados acima em que se observou que houve substituição de uso residencial de baixa densidade por outras classes urbanas. Os pontos 6 e 14 foram os mais representativos da alteração da ocupação do solo, sendo que o primeiro foi ocupado por classe de cobertura do solo representativa de alta densidade e o segundo por média densidade, ambas as transformações ocorridas em 2007.

O capítulo seguinte apresenta os resultados a partir da aplicação dos métodos e técnicas descritos.

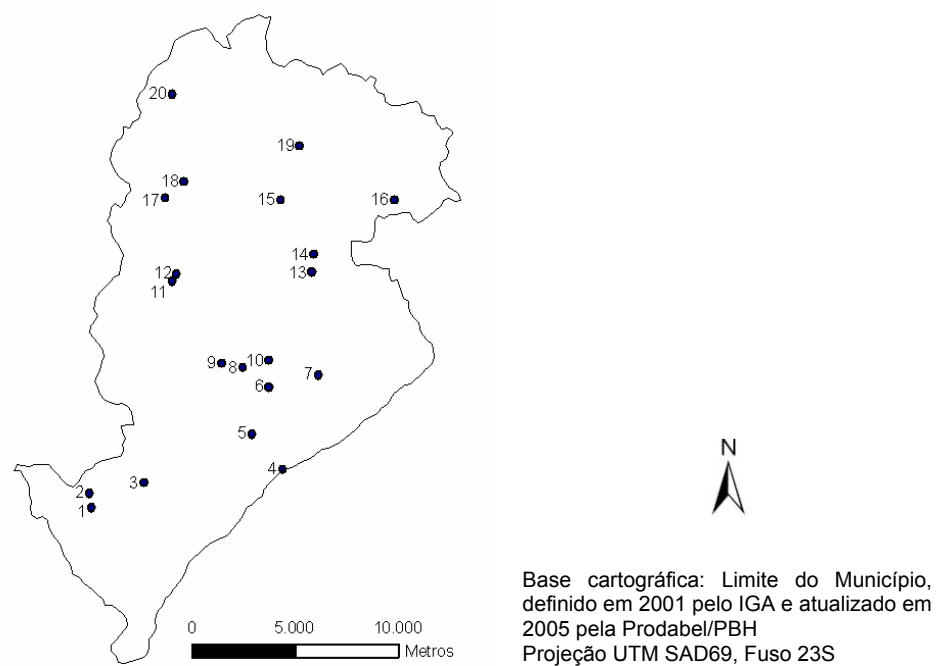


FIGURA 26 Localização dos pontos seleccionados para análise dos resultados
Fonte: Produzido pela autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, são apresentados os resultados quantitativos e qualitativos que comprovam as premissas colocadas no presente do trabalho. Inicialmente, foi feita uma análise dos dados de vento dos anos estudados, verificando seu comportamento mensal e durante os episódios. Em seguida, demonstrou-se a evolução da ocupação urbana a partir da classificação de imagens de satélite, além de mostrar os resultados obtidos na determinação do comprimento de rugosidade (z_0). Posteriormente, são apresentados os resultados da simulação computacional e a correlação entre as variáveis z_0 e velocidade do vento.

5.1 Análise dos dados de vento

O tratamento de dados de vento da estação principal de Belo Horizonte do período analisado (1987, 1997 e 2007) mostra uma diferenciação do comportamento médio mensal da velocidade ao longo do ano e o aumento de sua magnitude nos três anos (FIGURA 27).

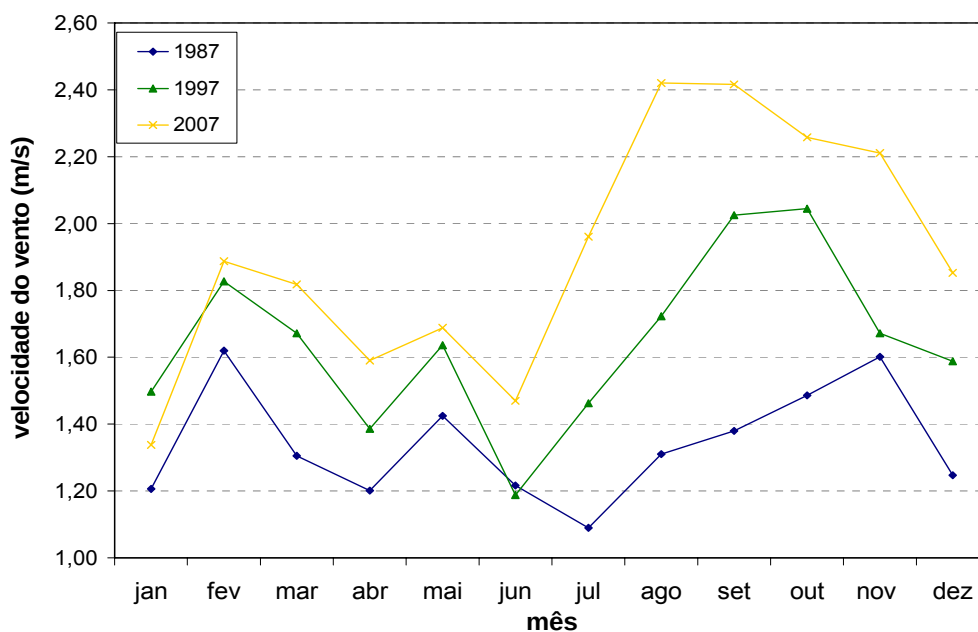


FIGURA 27 Velocidade média mensal do vento, em Belo Horizonte, em 1987, 1997 e 2007
Fonte: Produzido pela autora

Os anos de 1997 e 2007 apresentam comportamento semelhante. O mês de janeiro apresenta velocidades baixas; há um aumento significativo no mês de fevereiro e posteriormente uma redução de sua magnitude, que atinge velocidades mínimas em junho. De julho a setembro os valores médios aumentam gradativamente e, nos

meses seguintes, há uma queda na magnitude do vento. No ano de 1987, a velocidade média máxima ocorre em fevereiro e o menor valor médio foi registrado em julho. Os meses de agosto a novembro apresentam aumento gradativo das médias.

Quanto à moda mensal de direção do vento (FIGURA 28), nota-se que, durante os períodos analisados, predomina a direção leste. Nos anos de 1987 e 2007 há alteração da direção predominante em alguns meses, contudo esta se mantém majoritariamente no quadrante Norte/Sudeste. Se analisarmos a frequência de ocorrência de cada direção para cada ano (FIGURA 29), também se observa que as maiores porcentagens se concentram no quadrante Norte/Sudeste, contudo, mais de 15% das direções ocorre no quadrante Sudoeste/Noroeste, o que torna importante a verificação da alteração do padrão médio do vento.

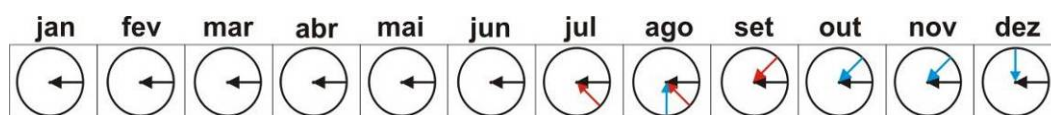


FIGURA 28 Direção predominante do vento mensal. A cor azul representa o ano de 1987, preto, 1997 e vermelho, 2007. Os meses que apresentam uma seta há coincidência de direção.
Fonte: Produzido pela autora

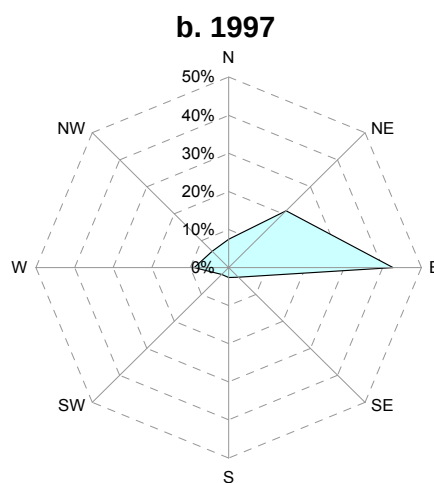
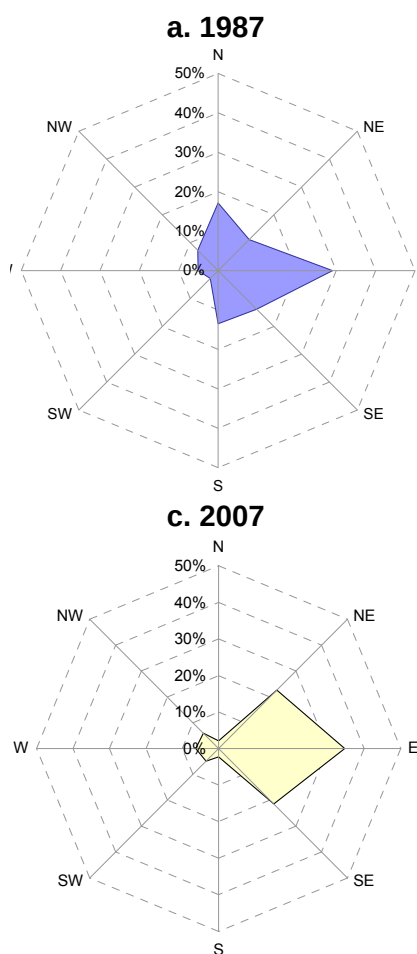


FIGURA 29a a c Frequência de ocorrência anual da direção do vento, em Belo Horizonte
Fonte: Produzido pela autora

Partindo para a verificação específica dos episódios analisados em cada ano, representados por períodos estáveis e instáveis, nota-se que também há uma variação do comportamento médio ao longo do tempo, acompanhando a tendência observada nas análises mensais.

Nos episódios de verão (FIGURA 30), ou seja, de atmosfera instável, há uma variação de cerca de 10% entre a média de magnitude do vento de 1987 e 2007, entretanto, no ano de 1997 houve uma redução da velocidade média se comparada aos demais episódios. Já nos eventos caracterizados pela estabilidade atmosférica (FIGURA 31), ocorreu aumento da velocidade média no período analisado. Pode-se observar que em 2007 as velocidades horárias apresentam amplitudes maiores do que aquelas registradas nos demais anos, contudo, as maiores magnitudes colaboraram para elevar a velocidade média neste episódio.

Se verificarmos as médias em relação à incerteza de leitura dos registros anemométricos, pode-se dizer que os valores são praticamente iguais em todos os episódios, considerando que o anemógrafo existente no 5º DISME/INMET é do tipo Universal, mecânico, cuja escala do diagrama de rajadas é de 1 m/s. Considerando que a inexactidão deste tipo de leitura é equivalente à metade da menor divisão da escala graduada (BENTO *et al.*, s/d), pode-se inferir que o erro dos valores de velocidade do vento registrados manualmente pelos técnicos do distrito de meteorologia é de $\pm 0,5$ m/s.

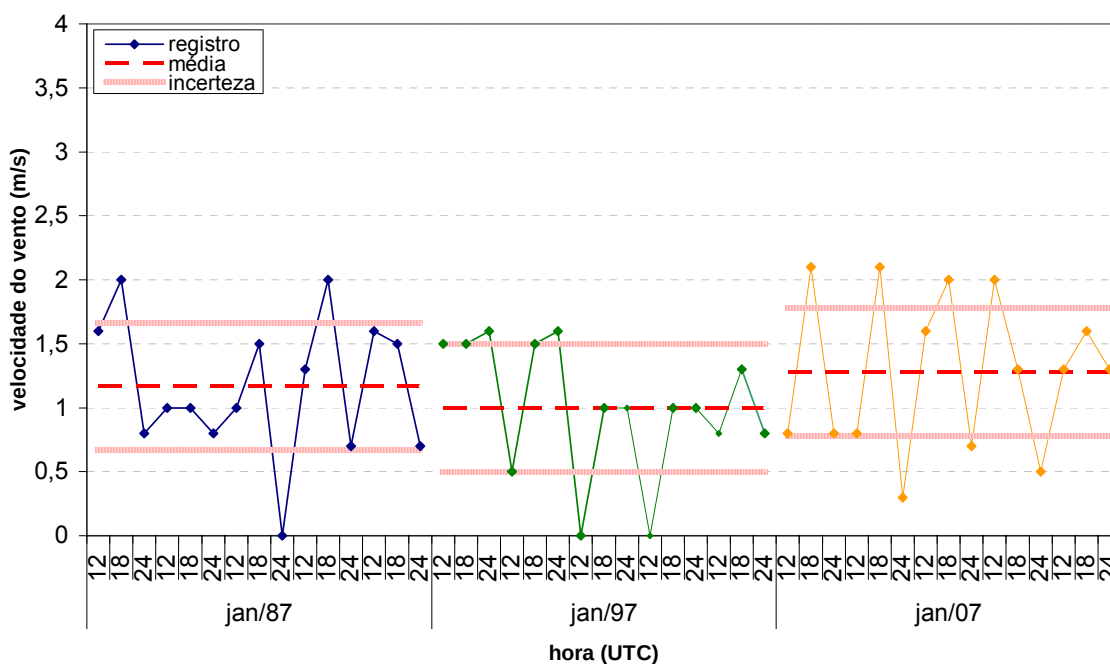


FIGURA 30 Registros de velocidade do vento nos horários sinóticos, média da velocidade e incerteza decorrente da leitura dos registros anemométricos nos episódios de período instável
Fonte: Produzido pela autora

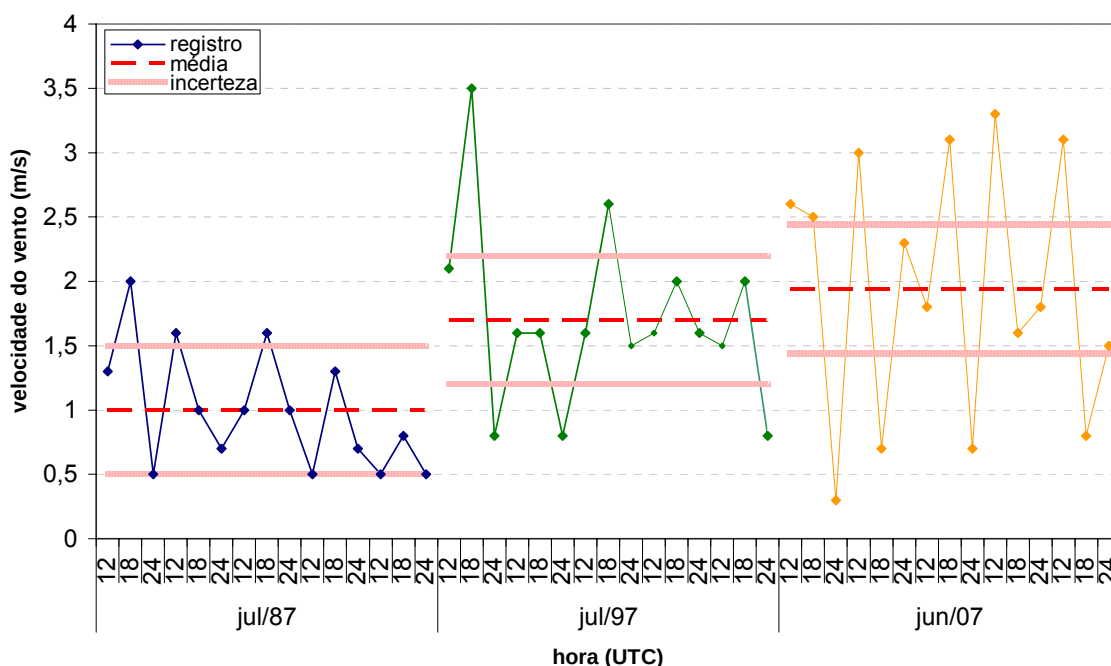


FIGURA 31 Registros de velocidade do vento nos horários sinóticos, média da velocidade e incerteza decorrente da leitura dos registros anemométricos nos episódios de período estável
Fonte: Produzido pela autora

A elevação das velocidades médias dos episódios também ocorre quando são analisados os dados das demais estações meteorológicas utilizadas como parâmetro de entrada nas simulações computacionais, tendência observada principalmente nos eventos de estabilidade atmosférica (TABELA 13). Entretanto, considerando os erros de leitura, as magnitudes de vento tornam-se semelhantes, com exceção da estação de Divinópolis, onde o aumento é superior ao erro.

TABELA 13 Velocidades médias e direção predominante do vento das estações meteorológicas utilizadas nas simulações computacionais para cada episódio

Estação meteorológica	Velocidade do vento (m/s)*					
	*Erros das médias de velocidade são de $\pm 0,5$ m/s.					
	Episódios instáveis			Episódios estáveis		
	1987	1997	2007	1987	1997	2007
Belo Horizonte	1,17	1,00	1,28	1,00	1,70	1,94
Sete Lagoas	1,36	1,50	0,68	1,09	1,69	1,71
Divinópolis	-	1,47	2,47	-	0,60	2,87
Florestal	1,13	1,00	-	1,00	1,33	-
Direção do vento						
Belo Horizonte	NW	NW	NW	E	E	E
Sete Lagoas	S	NW	N	S	E	E
Divinópolis	-	N	N	-	NE	N
Florestal	NW	NW	-	W	NW	-

Fonte: Produzido pela autora

Não é possível extrair conclusões sobre o aumento da magnitude dos ventos pelos três anos analisados. Uma análise da série correspondente ao período 1987 a 2007 poderia indicar se esta variação foi decorrente de anomalias específicas do período estudado ou se realmente há uma tendência de aumento nos valores de velocidade com o tempo. Esta verificação não foi realizada no presente trabalho, no entanto, as observações apontadas auxiliam na justificativa dos resultados das simulações computacionais.

Quanto à representatividade dos episódios, aqueles caracterizados pela estabilidade atmosférica são os que mais se aproximam da média anual de velocidade e da direção predominante do vento para a cidade de Belo Horizonte. Os casos analisados do mês de janeiro representam a alteração do padrão de vento devido a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul, conforme constatado por Lucas e Abreu (2004).

5.2 Resultado da determinação dos parâmetros de entrada da simulação

Na determinação dos parâmetros de entrada no modelo computacional WindMapTM, a altura da Camada Limite Atmosférica (CLA) teve variações conforme as sondagens analisadas. Na TAB. 14 são apresentados os valores encontrados para cada período.

TABELA 14 Altura da CLA para as sondagens correspondentes aos episódios

Data da sondagem (12 UTC)	Altura da CLA
03/01/1997	850 m
09/07/1997	720 m
16/01/2007	670 m
14/01/2005*	625 m
12/06/2005	710 m

*Esta sondagem representa um episódio instável em 2005. Foi utilizada apenas como comparação, para mostrar que tanto neste ano como em 2007 a altura da CLA foi inferior ao episódio estável.

Fonte: Produzido pela autora

As sondagens utilizadas no presente trabalho correspondem ao horário 12UTC, equivalente às 9 horas, no horário local. Esperava-se que, no período instável, a CLA atingisse espessuras maiores do que nos episódios estáveis, conforme apontado por Lopes (2003) e Oke (1978). Em 1997, esta variação ocorre dentro do previsto. No caso do período instável de 2005 (sondagem de 14/01/2005) e, comparativamente, no episódio de janeiro de 2007, a altura da camada limite foi inferior ao valor estimado para o período estável. Tal fato pode estar associado ao desenvolvimento mais lento

da CLA em dias de céu nublado – característica típica da atuação da ZCAS –, já que o aquecimento da superfície é demorado e, conseqüentemente, diminui a intensidade da formação de vórtices turbulentos. Conforme Stull (1988), a CLA atinge altura máxima no fim da manhã.

Testes paramétricos, apresentados no Apêndice E, apontam que a variação da altura da Camada Limite Atmosférica não é fator de grande relevância nas simulações com o WindMapTM. Além disso, os valores estimados encontram-se dentro dos limites apontados por Lopes (2003), Oke (1978) e Stull (1988), podendo variar entre 100 m, à noite, e atingindo de 2 a 3 km ao longo do dia, dependendo da condição de estabilidade atmosférica.

5.3 A ocupação urbana e as estimativas de z_0

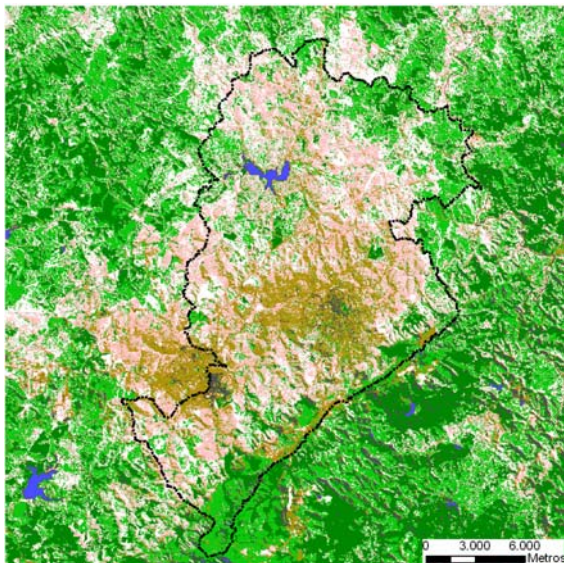
5.3.1 Demonstração da evolução urbana da área de estudo

A classificação de imagens do satélite *Landsat* correspondentes aos anos de 1987, 1996 e 2006 mostra uma ampliação das áreas de cobertura do solo do tipo urbana, conforme apresentado nas FIG. 32 e 33.

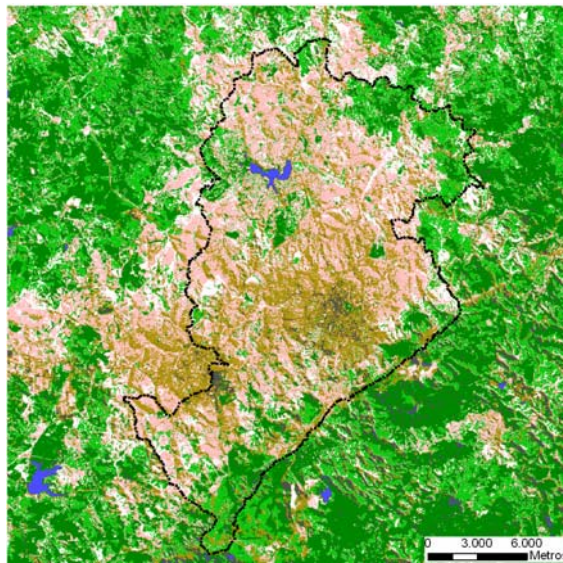
Nota-se que as classes de cobertura relativas a solo exposto e vegetação rasteira sofreram redução significativa no intervalo de aproximadamente 20 anos, sendo que a primeira, concentrada principalmente na porção norte da imagem classificada de 1987, praticamente não existe mais na figura relativa ao ano de 2006. No município de Belo Horizonte, este tipo de cobertura se restringe a uma pequena extensão territorial na região oeste e de forma esparsa no norte e leste da cidade, demonstrando que, atualmente, não há grandes áreas sem ocupação urbana como ainda existiam nos anos de 1987 e 1996.

No que se refere às áreas urbanas, aquela correspondente ao uso residencial foi a que mais sofreu expansão e praticamente dobrou no intervalo de tempo analisado, passando de cerca de 20% para 40% do total da área de estudo. As regiões sul e norte de Belo Horizonte são as que reúnem maior parte deste tipo de classe na imagem de 2006. Em 1987, o uso residencial concentrava-se principalmente ao redor da mancha de densidade urbana de altura média, ou seja, em áreas mais próximas à região central do município. Já em 1996, há maior difusão deste uso urbano por toda a extensão do município, no entanto a maior expansão ocorre nas porções norte e sul da cidade.

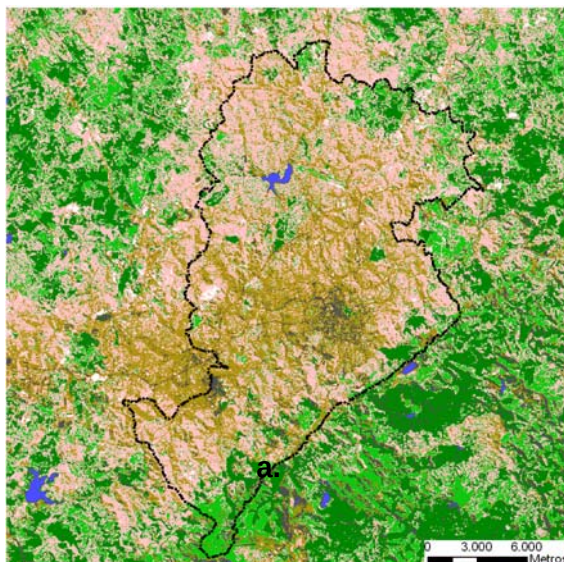
a. 1987



b. 1996



c. 2006



Legenda

	Água (A)
	Solo exposto (S)
	Vegetação rasteira (VR)
	Vegetação arbórea (VA)
	Área urb. residencial (AU1)
	Área urb. altura média (AU2)
	Área urb. alta densidade (AU3)

FIGURA 32a a c Classificação das imagens de satélite de 1987, 1996 e 2006, respectivamente. A linha tracejada preta representa o limite da cidade de Belo Horizonte.

Fonte: Produzido pela autora

Houve também um aumento significativo da área urbana de altura média ao longo do tempo. Inicialmente centralizada em volta da região planejada de Belo Horizonte, tal tipo de ocupação difundiu-se pelo território atingindo a porção oeste do município em 1996 e, posteriormente, estendeu-se no sentido norte, principalmente nas proximidades de vias arteriais como as avenidas Antônio Carlos e Cristiano Machado. Além disso, nota-se um aumento da área relativa a este tipo de classe na porção central da cidade.

Quanto à classe urbana de alta densidade, é possível observar sua ampliação na área central do município e ao longo da Avenida Amazonas, que segue no sentido oeste a

partir do centro de Belo Horizonte. Na FIG. 33b há uma diminuição da porcentagem correspondente a este tipo de cobertura de solo. Tal fato se deve a possíveis erros de classificação que incorre em todas as imagens, pois as áreas sombreadas por obstáculos naturais ou construídos (montanhas e prédios) apresentam a mesma resolução espectral que as áreas de alta densidade. Assim, o horário de captação da imagem também influencia na formação diferenciada de áreas de sombra e, conseqüentemente, na classificação distinta para os anos analisados, já que não foi feito tratamento prévio para eliminar este tipo de erro.

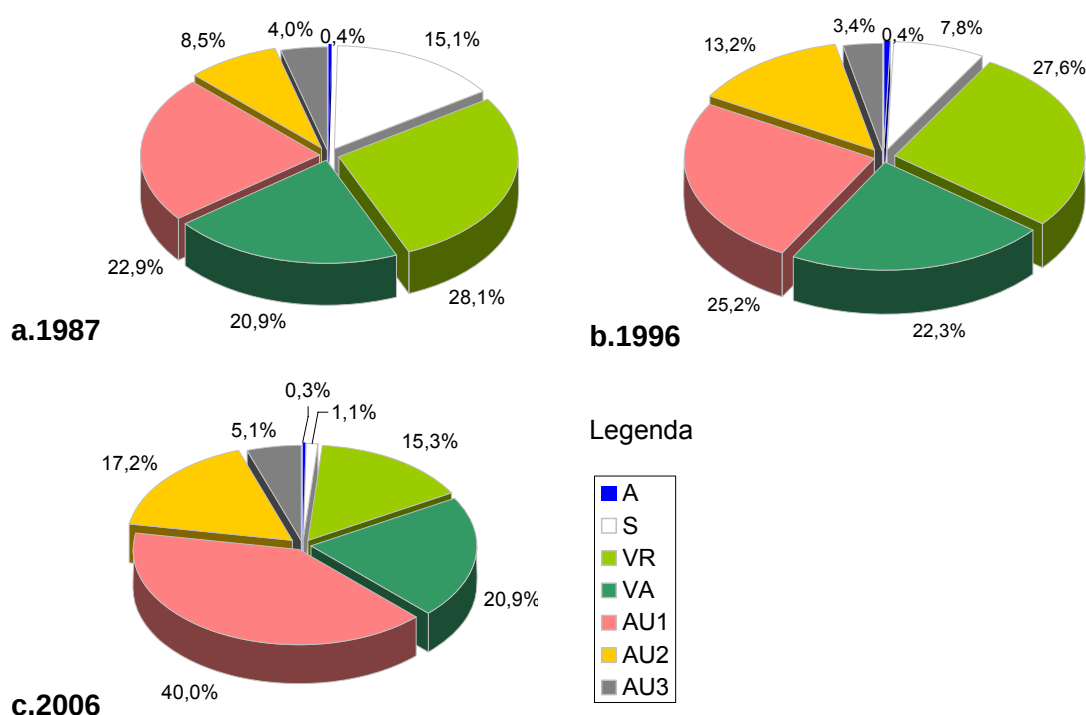


FIGURA 33a a c Porcentagem de área correspondente às classes de cobertura do solo das imagens classificadas.

Fonte: Produzido pela autora

A classificação de imagens de satélite vai de encontro com a descrição de evolução urbana municipal apresentada no Capítulo 3 deste trabalho, mas também demonstra que houve alteração da ocupação ao longo do período analisado. A partir da constatação de tais mudanças, partiu-se para a compilação dos valores estimados de comprimento de rugosidade para cada classe, conforme resultados apresentados a seguir.

5.3.2 Resultados da estimativa do comprimento de rugosidade (z_0)

Os valores calculados para o comprimento de rugosidade em amostras urbanas de Belo Horizonte, através dos métodos morfométricos Regra Prática (R_t), Lettau (L_e) e

Macdonald *et al.* (Ma), são apresentados na TAB. 15. Verifica-se a diversidade de valores encontrados para cada tipologia urbana, necessitando de uma forma de avaliação do melhor método a ser empregado no presente estudo.

TABELA 15 Valores calculados de z_0 para as amostras urbanas em Belo Horizonte

Amostra urbana		z_0 (m)		
		Rt	Le	Ma
Presidente JK	(Jk)	0,33	0,08	0,14
Pampulha	(Pa)	0,66	0,11	0,12
Prado	(Pr)	0,39	0,21	0,05
Lourdes	(Lo)	1,97	2,55	2,43
Centro	(Ce)	3,80	6,09	0,76

Fonte: Produzido pela autora

Segundo Grimmond e Oke (1999), na estimativa de z_0 e z_d , um dos critérios para julgar os métodos de cálculo é que os valores calculados não podem exceder a altura média dos elementos de rugosidade (z_H). Em relação a Belo Horizonte esta afirmativa se confirma se compararmos os valores encontrados àqueles de z_H constantes na TAB. 10 (p. 74). Outro critério que deve ser simultaneamente satisfeito é que as estimativas dos parâmetros de rugosidade devem estar compreendidas nos limites teóricos da FIGURA 34. Estes limites são uma representação conceitual da relação entre valores normalizados em relação ao comprimento de deslocamento do plano zero (z_d/z_H) e do comprimento de rugosidade (z_0/z_H), representados nas ordenadas, e do grau de adensamento dos obstáculos usando λ_P e λ_F , nas abscissas, para descrever a densidade.

Quando os valores normalizados são relacionados com a razão de área plana (λ_P), os valores estimados para a cidade estão dentro dos limites aceitáveis, acompanhando a evolução da curva ideal em relação a z_d , enquanto que em função de z_0 , as estimativas para *Pa*, *Pr* (calculados por Ma) e *Ce* (Le) estão fora do esperado (FIGURA 34a). Em função da área frontal (λ_F), *Pa* e *Lo* ficam fora dos limites em z_d , assim como *Pr* e *Ce* em função de z_0 , estimados respectivamente por Ma e Le (FIGURA 34b).

Em relação a z_0 , as estimativas pelo método de Lettau seguem a tendência da curva até *Pr* e continuam crescendo progressivamente, superestimando os valores em densidade elevada se comparados com os limites teóricos. Pelo método Ma, o valor de z_0 para densidade média (*Pr*) é subestimado e o pico ocorre na amostra *Lo*, decrescendo quando a densidade é elevada (*Ce*).

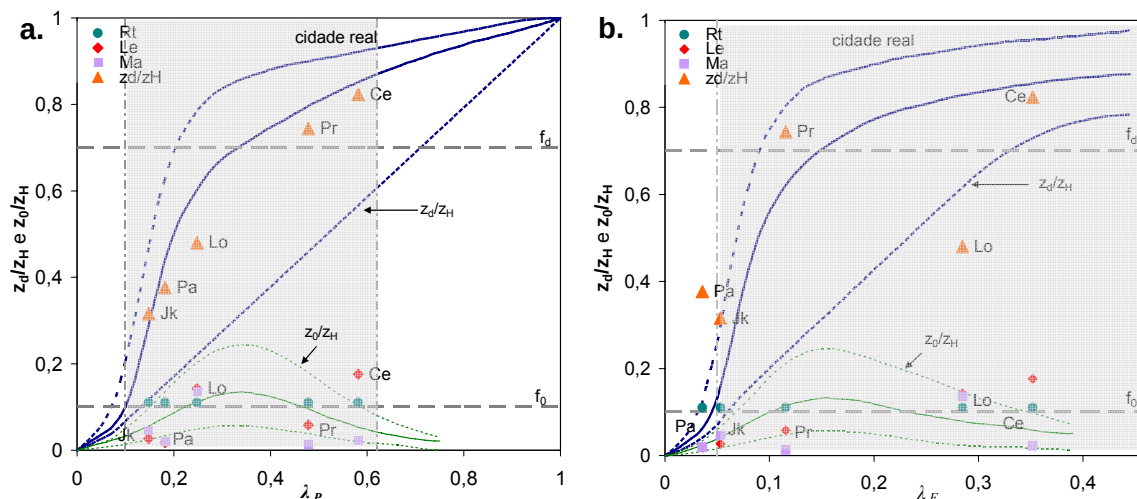


FIGURA 34a e b Valores de z_0/z_H e f_0 para áreas em Belo Horizonte. As linhas contínuas representam a curva ideal em função de z_0 e f_0 e as tracejadas os limites inferiores e superiores, plotados em função de λ_P (A) e λ_F (B). A área sombreada determina o limite da “cidade real”. Estes limites foram compilados por Grimmond e Oke (1999).

Fonte: Produzido pela autora

A amostra que teve maior amplitude de valores de z_0 nos vários métodos de cálculo foi Ce. Neste caso, a densidade urbana é tão elevada que é provável que o regime de vento seja um escoamento de mistura, em que a maior parte do ar escoia acima do topo dos obstáculos. Dentre os métodos pesquisados, o modelo Ma é o único que considera o adensamento urbano em relação à área frontal dos obstáculos e por isso estima baixos valores para esta forma urbana. Grimmond e Oke (1999) sugerem valores de z_0 acima de 2 m para este tipo de arranjo, sendo que as estimativas pelos métodos Rt e Le satisfazem esta indicação.

Simulações paramétricas utilizando o programa WindMapTM foram realizadas para verificar a sensibilidade do programa quanto à variação dos valores calculados (Apêndice F). Considerando uma situação hipotética com a topografia de Belo Horizonte e aplicando um único valor de z_0 para toda a área de estudo, estimados para a amostra de Lourdes (Lo), notou-se que o programa apresentou diferentes respostas para cada valor aplicado sobre o terreno. Assim, é visível que a amplitude de valores de rugosidade encontrada nos modelos resulta em distintos comportamentos de vento sobre a topografia da cidade, sendo necessária a adoção de um método morfométrico para cálculo de z_0 .

O programa WindMapTM apresenta limitações quanto à entrada de dados de comprimento de rugosidade, que devem ser inferiores a 5 m. O método da Regra Prática foi o único cuja aplicação resultou em estimativas que satisfaziam, respectivamente, aos limites do programa e aos critérios estabelecidos por Grimmond

e Oke (1999) e por isso foi o adotado na confecção do Modelo Digital de Elevação (MDE).

5.4 Análise das simulações computacionais

5.4.1 Resultados correspondentes à área de estudo

As simulações computacionais tiveram como resultado mapas de velocidade do vento para cada episódio, primeiramente considerando a influência apenas da topografia, em que se estabeleceu um valor único de comprimento de rugosidade para toda a área de estudo ($z_0 = 0,03$ m) e verificando também os efeitos da ocupação do solo através da inserção do MDE (FIGURAS 35 e 37, ver p. 91).

Analizando genericamente os mapas de velocidade do vento, nota-se que em todas as simulações a topografia é um elemento relevante na determinação da velocidade. As maiores estimativas de magnitude estão concentradas na região sul do município de Belo Horizonte, nos topos dos morros da área geológica do Domínio das Seqüências Metassedimentares, local onde a topografia é acidentada. O relevo nesta região também implica em áreas de baixas velocidades de vento, encontradas principalmente nos fundos de vales. Neste sentido, a região sul e sudeste da área de estudo são as que apresentam maiores amplitudes de velocidade em virtude da topografia acidentada. A porção norte, ao contrário, exibe manchas mais constantes e de intensidades mais baixas se comparadas às áreas mais elevadas do território analisado, não ultrapassando velocidades de 2 m/s em todas as simulações.

Quanto ao comportamento do vento nos episódios, verifica-se que nas simulações do mês de janeiro (FIGURA 35), ou seja, aquelas em que a atmosfera é instável, a faixa de maiores altitudes, localizada no limite sul e sudeste de Belo Horizonte, destaca-se pela concentração das maiores velocidades de vento. As manchas de velocidades mais baixas são homogêneas, se comparadas às simulações dos episódios estáveis, e estão reunidas majoritariamente ao norte e oeste da área de estudo. Em mais de 80% do território foram obtidas velocidade entre 0 e 2 m/s, valor considerado normal para o município de Belo Horizonte, se comparado à média de 1,4 m/s registrada para o período entre 1961 e 1990 (ASSIS, 2000).

Nos testes com atmosfera estável (FIGURA 37), há maior dispersão das manchas de mesma velocidade, mas ainda assim é possível perceber a influência da topografia. Nos anos de 1987 e 1997, cerca de 90% do território analisado apresentou

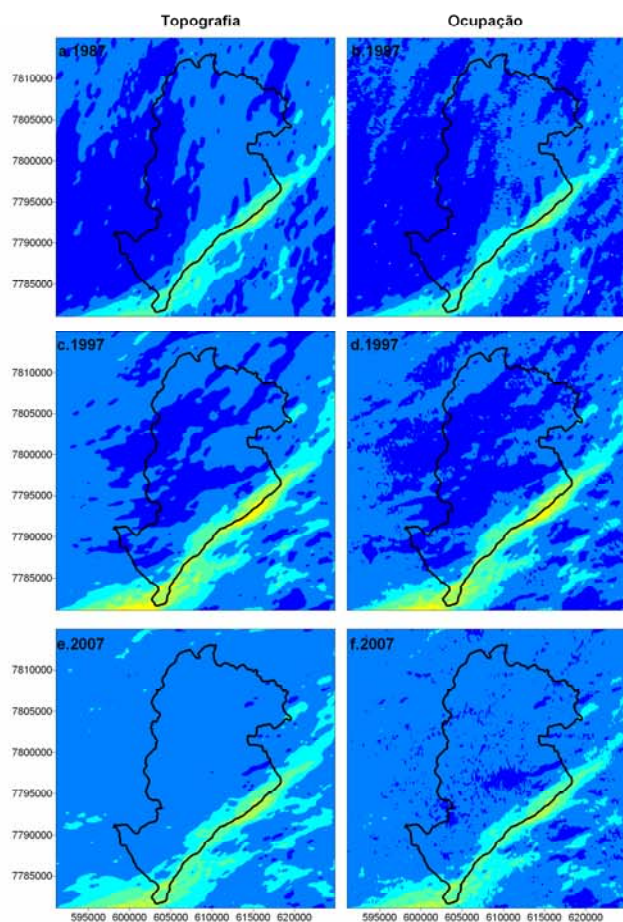


Figura 35a a f: Simulação da velocidade do vento em episódios de atmosfera instável
Fonte: Produzido pela autora

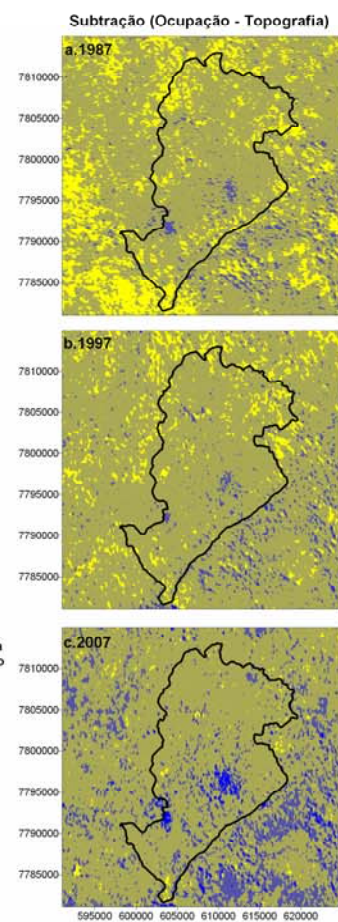


Figura 36a a c: Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação e com influência apenas da topografia para os episódios instáveis.
Fonte: Produzido pela autora

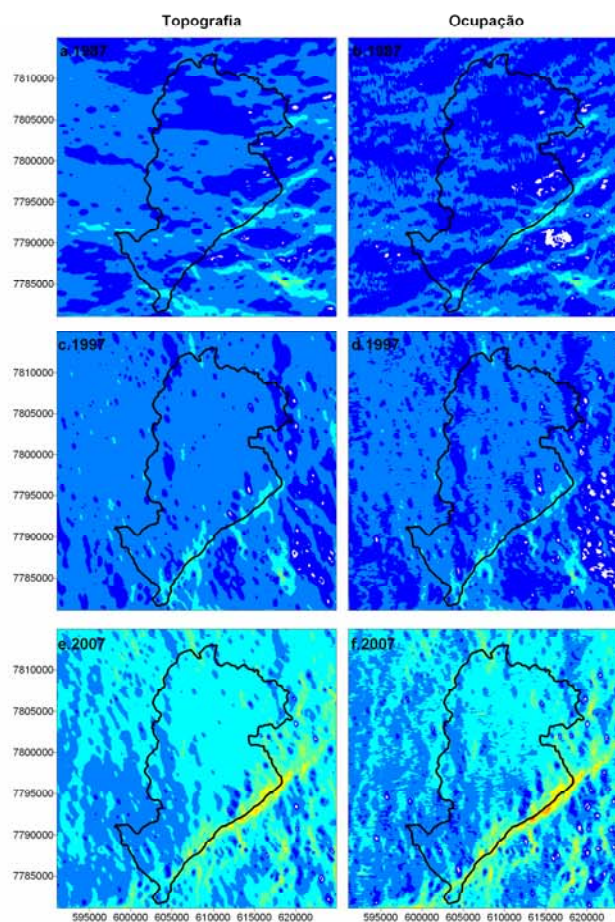


Figura 37a a f: Simulação da velocidade do vento em episódios de atmosfera estável
Fonte: Produzido pela autora

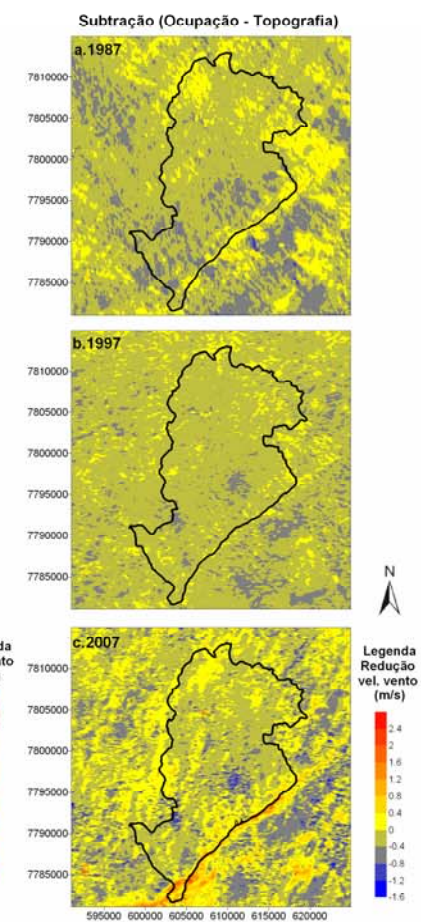


Figura 38a a c: Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação e com influência apenas da topografia para os episódios estáveis.
Fonte: Produzido pela autora

velocidades entre 0 e 2 m/s. No ano de 2007 houve um aumento da magnitude dos ventos em toda a área analisada sendo que mais de 85% desta ficou com velocidades inferiores a 3 m/s e, dentro deste intervalo, cerca de 50% teve como resultado magnitudes entre 2 e 3 m/s. Tal fato pode ser explicado pelo aumento da velocidade média do vento em todas as estações meteorológicas e principalmente na estação de Divinópolis, localizada a oeste da área de estudo, que apresentou diferença de velocidade de 2,27 m/s entre os episódios de 1997 e 2007.

Em algumas regiões, mapeadas pela cor branca, o programa computacional não conseguiu simular o valor da velocidade, atribuindo a elas valores negativos. Isto ocorre, pois o WindMapTM resolve equações diferenciais parciais por solução iterativa até que o valor de divergência esteja suficientemente próximo de zero, a fim de satisfazer a equação da continuidade, podendo encontrar valores negativos. Porém, o modelo não considera as características térmicas da cidade, apenas leva em conta a turbulência mecânica, o que dificulta a estimativa de velocidades em locais de topografia e ocupação do solo complexas.

Não é muito evidente a alteração da direção do vento e sua relação com o padrão de vento na área analisada, já que o programa computacional tem como resposta apenas mapas de velocidade do escoamento do ar. Entretanto, nota-se claramente a diferença da forma das manchas de velocidade, principalmente a leste da Serra do Curral.

Nos testes com atmosfera estável, em que a predominância do vento é leste na estação meteorológica de Belo Horizonte, as áreas de mesma velocidade estão distribuídas de forma esparsa, acompanhando a topografia local com velocidades mais altas nos topos de morro e mais baixas nos vales. Já nas simulações em que a direção do vento é noroeste, predominantemente, ou seja, nos episódios de atmosfera instável, as manchas de velocidade são mais homogêneas à sotavento da Serra do Curral e o efeito individualizado dos morros não é mais percebido. Observa-se, então, que há uma preponderância do efeito desta formação montanhosa em relação aos demais obstáculos naturais a leste.

Assim, é possível perceber que há uma diferenciação do comportamento do vento nos episódios testados com relação à condição de estabilidade atmosférica, já que o modelo depende deste parâmetro para simular a estratificação térmica da atmosfera. Além disso, a direção predominante do vento também altera o padrão de escoamento do ar na área analisada.

Estudos realizados por Lopes (2003), utilizando o programa Wasp®, e Vasconcelos (2006), fazendo simulações com o WindMapTM, também verificaram a influência da ocupação urbana nas condições de vento na cidade de Lisboa (Portugal), contudo os testes foram feitos com a condição neutra de estabilidade atmosférica. Para o caso do presente trabalho, foram feitas simulações para os episódios de 2007, a fim de verificar a diferença no comportamento dos ventos quando esta condição de estabilidade é considerada (FIGURA 39).

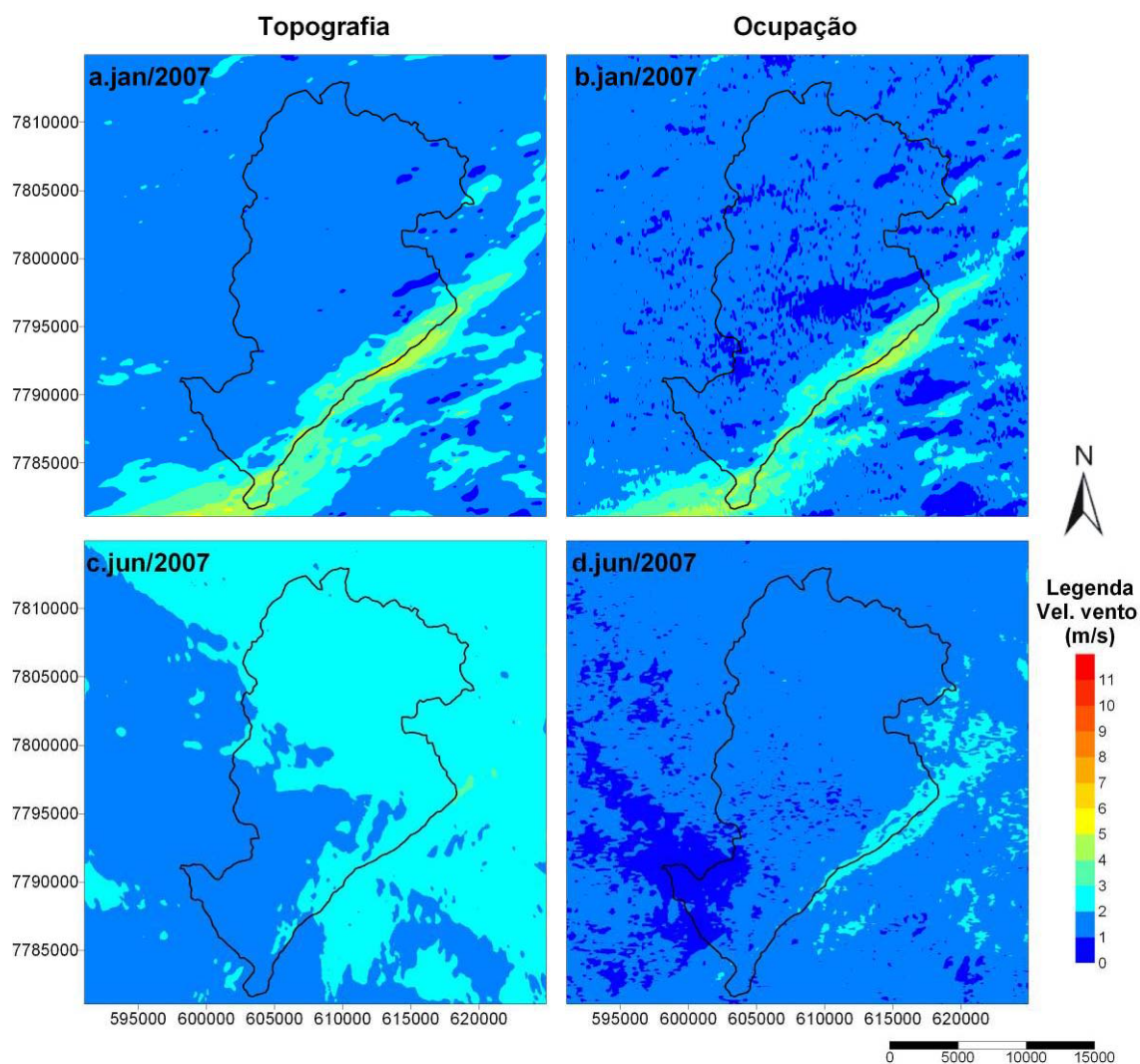


FIGURA 39a a d Simulação da velocidade do vento considerando atmosfera neutra para episódios do ano de 2007.

Fonte: Produzido pela autora

Quando se faz a subtração dos resultados das simulações com a presença da ocupação em que se variou a condição de estabilidade (FIGURAS 35f e 37f) e àquelas em que a atmosfera foi mantida estável (FIGURA 39), nota-se que praticamente não há alteração entre os testes dos episódios de janeiro de 2007, apresentando apenas pontos isolados em que a diferença de velocidade do vento está entre 0 e 1 m/s

(FIGURA 40a). Estes pontos estão localizados em áreas onde a topografia é complexa, como ao sul do município de Belo Horizonte, e em regiões de corpos d'água (como a Lagoa da Pampulha e extremo sudoeste da imagem).

Situação diferente ocorre quando comparados os testes do episódio de junho de 2007 (FIGURA 40b). Nota-se que, quando se considera a condição de atmosfera estável, as velocidades de vento são superiores nos topos de morro e inferiores em fundos de vale se comparadas à simulação com a atmosfera neutra. Em neutralidade atmosférica, a influência do relevo é menos evidente, o que pode incorrer em resultados distantes da realidade em terrenos de topografia complexa.

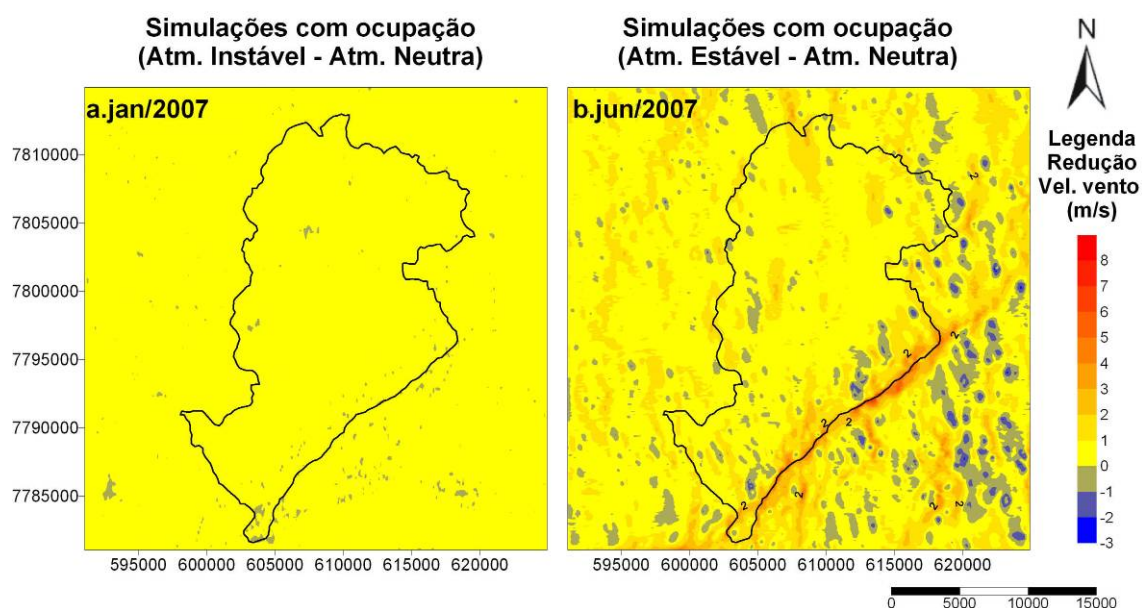


FIGURA 40a e b Diferença de velocidade do vento entre as simulações com Modelo Digital de Elevação que consideram a variação da estabilidade da atmosfera e com estabilidade neutra, para os episódios de 2007.
Fonte: Produzido pela autora

Os testes, então, demonstram a necessidade de se caracterizar a condição de estabilidade atmosférica de acordo com os episódios analisados para o caso de Belo Horizonte, diferentemente do que foi feito no caso de Lisboa (VASCONCELOS, 2006), onde se considerou a atmosfera neutra. A complexidade topográfica de Belo Horizonte e as baixas velocidades de vento contribuem para a estratificação da temperatura vertical, condição que não é observada quando a atmosfera é neutra (OKE, 1978), sendo necessária a diferenciação da condição de estabilidade. Diante desta conclusão, as análises que se seguem consideram apenas os testes com a variação da estabilidade atmosférica de acordo com cada episódio.

5.4.2 Erros de predição das simulações

Analisando os erros de predição das simulações (TABELA 16), verifica-se que os valores estimados pelo programa WindMapTM para a estação meteorológica de Belo Horizonte (ponto de controle dos testes) apresentam erros de até 1 m/s em relação à velocidade média calculada para os episódios. Em 50% dos casos os erros foram equivalentes a $\pm 0,5$ m/s, o que corresponde ao erro de leitura das estações meteorológicas, sendo, portanto, aceitáveis. No ano de 1997, todos os testes apontaram erros superiores à inexactidão dos registros anemométricos. Com exceção deste ano, as melhores respostas obtidas nos testes computacionais foram para os episódios instáveis.

TABELA 16 Erros de predição das simulações computacionais

Teste	Ano	Atmosfera	MDE	Vel. Medida ($\pm 0,5$ m/s)	Vel. Simulada (m/s)	Erro (m/s)	Erro (%)
1	Jan/1987	instável	z0=0,03	1,17	1,22	-0,05	-4%
2	Jan/1987	instável	1987	1,17	1,13	0,04	3%
3	Jul/1987	estável	z0=0,03	1,00	0,98	0,02	2%
4	Jul/1987	estável	1987	1,00	0,41	0,59	59%
5	Jan/1997	instável	z0=0,03	1,94	1,23	0,71	36%
6	Jan/1997	instável	1996	1,94	1,00	0,94	48%
7	Jul/1997	estável	z0=0,03	1,70	1,19	0,51	30%
8	Jul/1997	estável	1996	1,70	1,00	0,70	41%
9	Jan/2007	instável	z0=0,03	1,28	1,48	-0,20	-16%
10	Jan/2007	instável	2007	1,28	1,34	-0,06	-5%
11	Jul/2007	estável	z0=0,03	1,94	1,91	0,03	2%
12	Jul/2007	estável	2007	1,94	0,83	1,11	57%

Fonte: Produzido pela autora

As simulações realizadas com a condição de atmosfera estável e com o Modelo Digital de Elevação foram as que apresentaram maiores divergências de estimativa de velocidade para os episódios de 1987 e 2007. As semelhanças entre estes anos pode ser explicada pela utilização dos mesmos dados de vento geostrófico para ambos os períodos, sendo que esta informação é primordial para a correta previsão da velocidade de vento através do programa WindMapTM.

Os erros das estimativas de velocidade do vento nas simulações, portanto, não podem ser avaliados apenas pelo resultado numérico dos testes, mas também considerando a sensibilidade dos equipamentos de medição das estações meteorológicas e as falhas de leitura dos registros.

5.4.3 Influência da ocupação do solo

Verificando a influência da ocupação urbana, é possível notar que as manchas de velocidades mais baixas aumentam em todos os testes. Esta diferença pode ser observada nas FIG. 36 e 38 (p. 91). Tais imagens são produtos da operação de subtração entre os resultados dos testes que consideravam o Modelo Digital de Elevação e aqueles que consideravam apenas a topografia.

Nas simulações realizadas em janeiro, o efeito da ocupação urbana é nítido (TABELA 17, FIGURA 36). No ano de 1987, em cerca de 80% do território analisado, a velocidade do vento foi reduzida com a inserção do Modelo Digital de Elevação nas simulações. As regiões em que praticamente não houve alteração da velocidade foram na porção norte e sudoeste da área de estudo, onde predominava a classe solo exposto. Nesta classe de cobertura do solo o comprimento de rugosidade (z_0) equivale a 0,03 m, mesmo valor utilizado nos testes de controle (reproduzindo apenas o efeito da topografia).

A área correspondente ao aumento da velocidade, que equivaleu a 18,5% em 1987, foi reduzida a apenas 1% em 2007 devido à expansão de áreas urbanas e o consequente aumento dos valores de z_0 .

TABELA 17 Porcentagem de área equivalente a cada intervalo de redução de velocidade, considerando apenas a influência ocupação do solo nos episódios instáveis

Intervalo de redução de velocidades (m/s)			Porcentagem de área		
			1987	1997	2007
-0,9	a	-0,6	-	0,1%	1,5%
-0,6	a	-0,3	3,5%	4,4%	15,7%
-0,3	a	0	78,0%	88,4%	81,8%
0	a	0,3	18,5%	7,2%	1,0%
0,3	a	0,6	-	0,002%	-

Fonte: Produzido pela autora

Na região central das FIG. 36a a 36b nota-se a presença de uma mancha cujos valores tiveram redução entre 0,3 m/s e 0,6 m/s. Esta zona corresponde ao centro da cidade de Belo Horizonte, que sofreu expansão das áreas de alta densidade com o passar do tempo. A redução de velocidade é ainda maior no ano de 2007 (FIGURA 36c), período em que ocorre o maior adensamento urbano no local e elevação dos valores de z_0 , sendo que as magnitudes de vento sofrem diminuição de até 0,9 m/s.

Neste mesmo período também houve uma diminuição das velocidades na porção sudeste da área de estudo, demonstrando as conseqüências da mudança da ocupação do solo em virtude do crescimento do eixo sul da região de Belo Horizonte e dos municípios limítrofes. Esta porção territorial era originalmente coberta por vegetação rasteira e de grande porte que foi gradativamente substituída por áreas residenciais e por edifícios de múltiplos andares, o que fez elevar os valores de comprimento de rugosidade alterando, conseqüentemente, a magnitude do escoamento de ar.

Nos episódios caracterizados por atmosfera estável, as manchas que apontam redução da velocidade do vento também representam a maior porcentagem de área (TABELA 18, FIGURA 38). Há um aumento destas regiões quando são analisadas as simulações de 1987 e 1997, que equivalem, respectivamente, a 83 e 92% do território analisado. A maior concentração de manchas está nos intervalos que representam a diminuição da magnitude dos ventos entre 0 e 0,8 m/s. No ano de 2007 é possível observar uma redução das áreas de intervalos negativos, o que mostra o aumento de velocidade do vento nesta simulação. As áreas com esta característica situam-se, principalmente nos topos de morro ao sul do município de Belo Horizonte, região em que o aumento da velocidade do vento é mais evidente se comparado aos demais episódios.

TABELA 18 Porcentagem de área equivalente a cada intervalo de redução de velocidade, considerando apenas a influência ocupação do solo nos episódios estáveis

Intervalo de redução de velocidades (m/s)		Porcentagem de área		
		1987	1997	2007
-1,6	a -1,2	-	-	0,03%
-1,2	a -0,8	0,14%	-	1,67%
-0,8	a -0,4	16,44%	8,18%	15,82%
-0,4	a 0	66,01%	83,87%	49,98%
0	a 0,4	16,86%	7,89%	26,85%
0,4	a 0,8	0,55%	0,06%	3,98%
0,8	a 1,2	-	-	0,98%
1,2	a 1,6	-	-	0,50%
1,6	a 2,0	-	-	0,15%
2,0	a 2,4	-	-	0,03%
2,4	a 2,8	-	-	0,002%

Fonte: Produzido pela autora

Observa-se, também no ano de 2007, a ampliação de áreas correspondentes à elevação da magnitude do escoamento dos fluxos de ar, que variaram entre 0,6%, em

1987, a 5,6% da área de estudo com incremento de velocidade acima de 0,4 m/s, em 2007. Na região correspondente à Lagoa da Pampulha, localizada na porção norte de Belo Horizonte, também ocorre aumento da velocidade do vento, já que houve redução do comprimento de rugosidade se comparado aos testes apenas com a topografia (z_0 passa de 0,03 m, em terreno sem ocupação, para 0,002 m, atribuído à classe de cobertura do solo equivalente à água). Esta elevação é mais evidente no ano de 2007, episódio em que a velocidade média do vento das estações meteorológicas atinge valor mais alto do que os períodos analisados anteriormente.

Nas simulações de junho e julho parece ser menos evidente o efeito da ocupação urbana se comparadas com aquelas realizadas com atmosfera instável. O efeito da topografia continua bastante evidente nos períodos de estabilidade, com manchas de elevação de velocidade concentradas nos topos de morro. O mesmo não acontece no ano de 1997 (FIGURA 38b), em que o resultado da operação matemática que isola o efeito da ocupação urbana é semelhante ao encontrado em condição de instabilidade atmosférica.

Esta constatação pode estar relacionada com a limitação do programa em simular as características térmicas da cidade, as quais se tornam mais evidentes em condições de estabilidade atmosférica. O aumento da temperatura da superfície e as trocas térmicas entre esta e a atmosfera contribuem para a formação de vórtices turbulentos próximos aos obstáculos, efeito este desconsiderado pelo programa WindMap™.

Os resultados obtidos nos testes computacionais apontam que o aumento da rugosidade contribui para a redução da magnitude do vento. Ou seja, há uma relação inversa entre z_0 e a velocidade do fluxo de ar, já apontadas por Lopes (2003) e Vasconcelos (2006) para o caso de Lisboa e também verificada por Oke (1978). A análise específica dos pontos, apresentada a seguir, mostra de forma mais clara esta correspondência.

5.4.4 Análise dos pontos: relação entre comprimento de rugosidade e velocidade do vento

A análise de pontos selecionados no município de Belo Horizonte pretende demonstrar como a alteração da ocupação do solo ao longo do tempo pode influenciar a velocidade de vento. A TAB. 19 apresenta a variação dos valores de comprimento de rugosidade para cada ponto.

Na maioria dos pontos nota-se um aumento do valor de z_0 com o tempo, ocorrendo a substituição de áreas de solo exposto por classes urbanas ou mesmo o adensamento de regiões urbanizadas. Entretanto, tal fato não ocorre no ponto 1, onde a vegetação arbustiva existente em 1987 é substituída por ocupação residencial e posteriormente por classe urbana de densidade média, sendo que ambas as tipologias urbanas apresentam rugosidade inferior à classe de vegetação.

O ponto 18 também apresenta uma particularidade que é a substituição da classe de cobertura do solo equivalente à água por área urbana. Este ponto está situado na porção oeste da Lagoa da Pampulha. Fazendo uma comparação entre as imagens classificadas de 1997 e 2007 (FIGURA 32, p. 86) nota-se a redução da área relativa a este tipo de uso do solo devido à implantação do Parque Ecológico da Pampulha (Parque Ecológico Promotor Francisco Lins do Rego) em parte da área assoreada da lagoa, no ano de 2004.

TABELA 19 Valor do comprimento de rugosidade (z_0) para cada ponto analisado

Ponto	Coordenada (UTM)		Comprimento de rugosidade (z_0)			
	x	y	terreno	1987	1996	2006
1	601773	7789179	0,03	1	0,33	0,39
2	601659	7789863	0,03	0,39	0,33	3,8
3	604281	7790319	0,03	0,03	0,33	0,33
4	611007	7791003	0,03	0,1	0,39	3,8
5	609525	7792713	0,03	0,1	0,33	0,33
6	610323	7794993	0,03	0,33	0,33	3,8
7	612717	7795563	0,03	0,1	0,39	0,39
8	609069	7795905	0,03	0,39	0,39	3,8
9	608043	7796133	0,03	0,33	0,39	0,39
10	610323	7796247	0,03	0,39	3,8	3,8
11	605649	7800123	0,03	0,03	0,33	0,39
12	605877	7800465	0,03	0,39	3,8	3,8
13	612375	7800579	0,03	0,33	0,39	3,8
14	612489	7801377	0,03	0,33	0,39	0,39
15	610893	7803999	0,03	0,03	0,33	0,33
16	616365	7803999	0,03	0,1	0,33	0,33
17	605307	7804113	0,03	0,03	0,1	0,33
18	606219	7804911	0,03	0,0002	0,0002	0,39
19	611805	7806621	0,03	0,33	0,33	0,39
20	605649	7809129	0,03	0,03	0,33	0,33

Fonte: Produzido pela autora

A TAB. 20 apresenta os valores de velocidade do vento para cada ponto nas simulações realizadas considerando apenas com o efeito da topografia e com a ocupação urbana.

É possível observar que a maior parte dos pontos apresenta uma redução da velocidade do vento quando comparados os testes apenas com terreno e com ocupação, porém existem exceções. Nos pontos 4, 11 e 16, nas simulações em ambas as condições de estabilidade atmosférica para o ano de 1987, o comportamento foi contrário ao esperado, ocorrendo aumento das velocidades do vento nos testes com a presença do Modelo Digital de Elevação (MDE). O mesmo ocorre nos pontos 17 e 20, em 1987, 18 em 1997, para atmosfera instável, além dos pontos 12 e 19, em 2007, e 18, em 1987, para atmosfera estável.

As diferenças encontradas são inferiores a 0,2 m/s e podem estar associadas aos erros encontrados nas simulações e aos erros de leitura dos registros anemométrico, sendo, portanto, desprezíveis. Conforme analisado anteriormente, nota-se a elevação da velocidade nos episódios mais recentes, não sendo possível perceber a alteração entre as magnitudes do vento com o passar do tempo.

TABELA 20 Velocidade do vento (m/s) para cada ponto nas simulações realizadas, considerando testes apenas com terreno (terr.) e com o Modelo Digital de Elevação (ocup.)

Ponto	Velocidade (m/s)											
	Atmosfera instável						Atmosfera estável					
	1987		1997		2007		1987		1997		2007	
	terr.	ocup.	terr.	ocup.	terr.	ocup.	terr.	ocup.	terr.	ocup.	terr.	ocup.
1	0,60	0,44	1,11	1,04	1,57	1,44	1,53	1,05	1,39	1,30	1,60	1,32
2	0,68	0,58	1,08	1,02	1,51	0,92	1,66	1,27	1,66	1,42	1,78	0,93
3	0,59	0,56	1,05	1,00	1,43	1,34	1,20	0,88	0,88	0,64	1,03	0,83
4	2,93	2,98	4,05	3,95	3,53	2,97	1,96	2,17	1,44	1,32	3,94	3,90
5	1,41	1,33	1,66	1,58	1,77	1,65	1,30	1,15	1,56	1,52	2,18	2,16
6	1,21	1,12	1,44	1,35	1,69	1,06	1,60	1,26	1,44	1,01	1,93	0,90
7	0,96	0,88	1,28	1,19	1,61	1,32	1,22	0,92	0,91	0,66	1,52	1,05
8	1,19	1,05	0,89	0,79	1,21	0,47	1,09	0,67	1,70	1,48	2,44	1,60
9	0,85	0,45	0,56	0,36	1,03	0,93	0,80	0,44	1,13	0,90	1,66	1,44
10	1,16	1,02	0,89	0,45	1,20	0,43	0,91	0,58	1,45	0,91	2,23	1,22
11	0,91	0,97	1,12	1,07	1,52	1,39	1,50	1,57	1,21	1,03	1,89	1,84
12	1,06	1,05	0,98	0,92	1,36	1,25	1,36	1,06	1,68	1,47	2,62	2,70
13	1,17	1,11	1,16	1,08	1,45	0,85	1,21	1,02	1,31	1,11	2,42	1,52
14	1,16	1,05	1,07	0,98	1,36	1,24	1,03	0,85	1,28	1,06	2,39	2,20
15	1,03	0,98	0,79	0,77	1,16	1,04	0,72	0,55	1,16	0,93	2,27	2,03
16	1,24	1,28	1,31	1,25	1,56	1,46	1,16	1,20	1,31	1,23	2,80	1,97
17	0,94	0,95	0,80	0,63	1,23	1,21	0,87	0,83	1,33	1,26	2,36	2,34
18	1,00	0,95	0,86	0,96	1,26	1,14	0,92	1,31	1,38	1,21	2,43	1,97
19	1,17	1,08	1,13	1,07	1,42	1,30	0,91	0,95	1,18	1,15	2,28	2,45
20	1,07	1,10	1,22	1,19	1,51	1,40	0,85	1,04	1,07	0,95	2,35	2,34

Fonte: Produzido pela autora

Através dos valores obtidos pela diferença entre os testes com topografia e com MDE, é possível extrair uma correlação entre a variação da rugosidade (z_0) e da velocidade do vento reduzida para cada condição de atmosfera, apresentadas nas FIG. 41 e 42. O ponto 18, por apresentar um comportamento discrepante dos demais em função do baixo valor de rugosidade nos anos de 1987 e 1997, foi retirado da amostra a fim de se obter melhor correlação entre as variáveis.

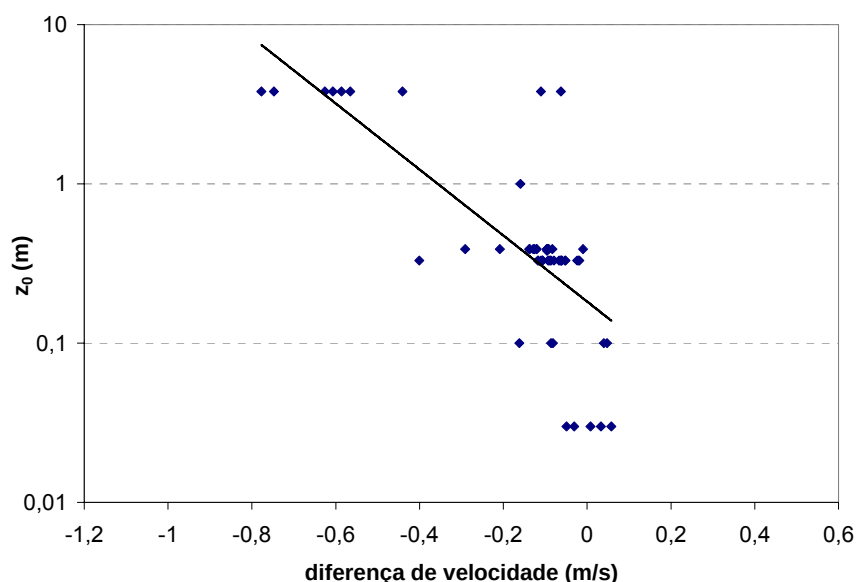


FIGURA 41 Correlação entre a redução da velocidade do vento e z_0 para episódios instáveis
Fonte: Produzido pela autora

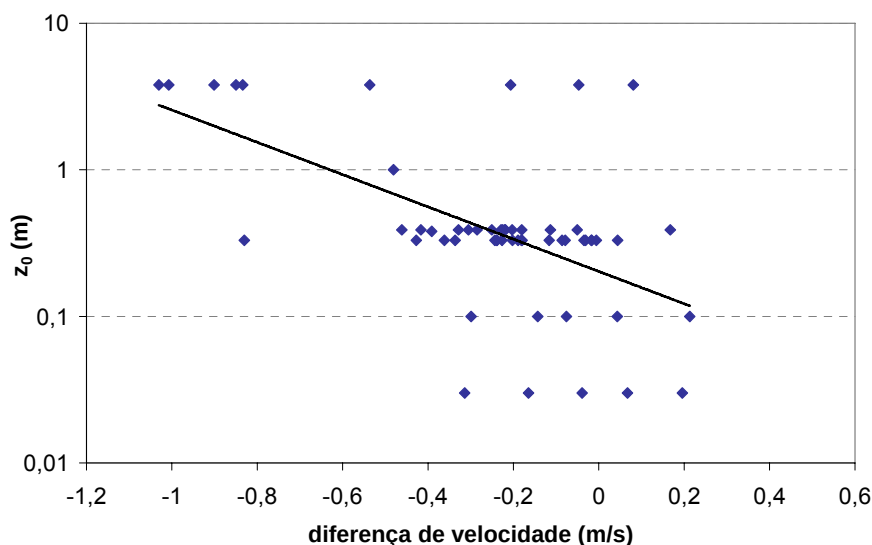


FIGURA 42 Correlação entre a redução da velocidade do vento e z_0 para episódios estáveis
Fonte: Produzido pela autora

A correlação encontrada entre as variáveis foi negativa para ambas as condições de estabilidade atmosférica, representada por 80% em condição instável e 56% para

atmosfera estável. Conforme mencionado anteriormente, esta diferença pode ser causada pela limitação do modelo em considerar as características térmicas das superfícies, propriedades que são mais evidentes quando as condições atmosféricas são estáveis.

Dentre os 20 pontos analisados, foram selecionados 2 para serem verificados com maior profundidade. Nos pontos 6 e 14, a ocupação urbana, do tipo residencial de baixa densidade em 1987 e 1997, foi substituída por classe de cobertura do solo representativa de alta densidade e média densidade, respectivamente, no ano de 2007. O valor do comprimento de rugosidade (z_0) da classe de alta densidade é equivalente a 3,8 m, enquanto que para a média densidade, z_0 é igual a 0,39 m. Comparando o que ocorre com a diferença de velocidade de vento nestes dois pontos (FIGURA 43), nota-se que a maior redução da magnitude do vento ocorre quando o uso residencial é substituído pelo de alta densidade, em ambos as condições de estabilidade atmosférica.

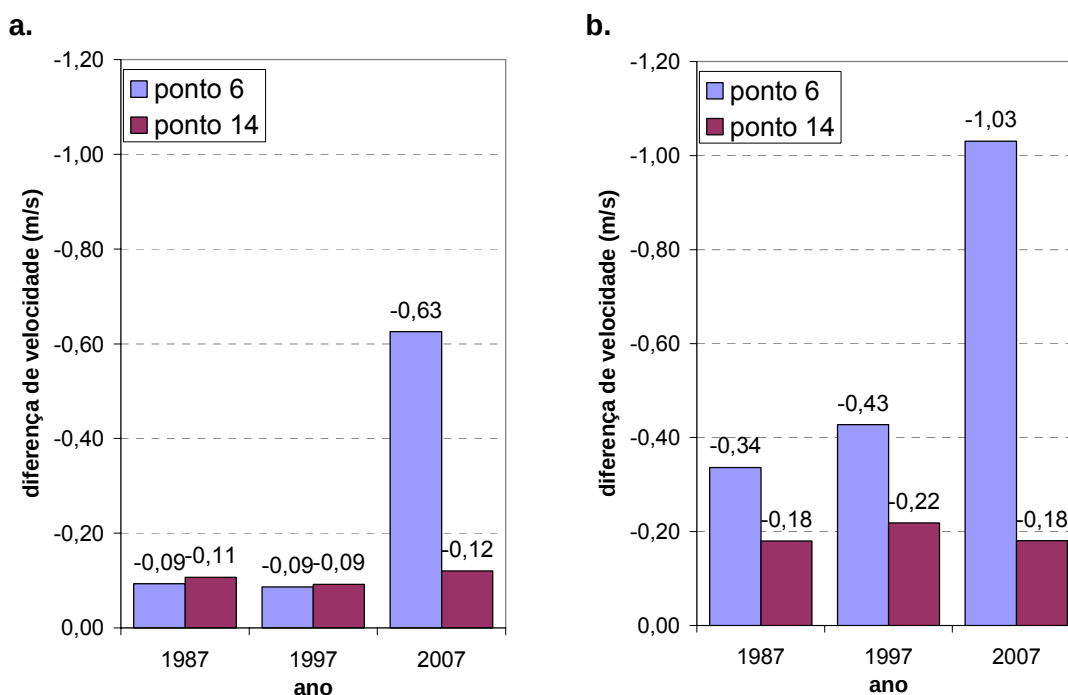


FIGURA 43a e b Diferença de velocidade para os pontos 6 e 14 para os episódios instáveis (a) e estáveis (b)
Fonte: Produzido pela autora

Assim como se verificou na análise dos 20 pontos, em condição de atmosfera estável é mais nítida a diferença entre as reduções de velocidade com o passar do tempo. Contudo, nota-se que o maior contraste entre os diferentes tipos de ocupação ocorreu nos episódios estáveis. O ponto 6, de maior densidade urbana, teve uma redução de velocidade, em 2007, equivalente a 3 vezes o valor de sua redução no ano de 1987.

Neste mesmo período, a alteração da ocupação de baixa para média densidade (ponto 14) manteve-se praticamente constante.

Pode-se inferir, para esta situação, que a mudança do uso do solo residencial para alta densidade causa maiores impactos quanto à redução da velocidade do vento do que a alteração para a classe de média densidade.

6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo verificar a influência da ocupação urbana sobre os padrões de vento para o caso do município de Belo Horizonte, através de uma perspectiva cronológica da evolução da ocupação do território e utilizando a técnica de simulação computacional.

Para a abordagem do comportamento do vento na cidade, escolheu-se o tratamento dinâmico da variável, aplicando-se a técnica de amostragem dos episódios por tipicidade. A identificação de condições de estabilidade e instabilidade atmosféricas permitiu verificar as particularidades da atuação de fenômenos da circulação geral da atmosfera na escala local, considerada aqui como a mais apropriada para o estudo deste parâmetro climático com foco em planejamento urbano. Pode-se concluir que os episódios estáveis foram os que mais se aproximaram da média anual de velocidade e da direção predominante do vento para a cidade de Belo Horizonte. A investigação da condição de instabilidade, por sua vez, demonstrou uma particularidade do comportamento do vento, recorrente nos períodos de verão.

Quanto à representação da ocupação urbana em termos aerodinâmicos, observou-se uma dificuldade na escolha de modelos numéricos para determinação do comprimento de rugosidade (z_0). A aplicação de diferentes métodos morfométricos resultou em valores distintos de z_0 , confirmando conclusões de trabalhos anteriores de que não há um melhor método para sua determinação. A definição do modelo empregado, então, partiu da avaliação da importância das variáveis envolvidas nas diferentes equações matemáticas para o escoamento dos fluxos de ar. No caso da escala local, considerou-se que a altura média dos obstáculos seria o parâmetro relevante a ser considerado. Além disso, teve que se observar as limitações do programa computacional quanto à entrada de dados de rugosidade.

No que se refere às simulações com o programa WindMapTM, foi possível identificar a alteração do comportamento do vento diante da evolução da ocupação urbana. Em grande parte do território analisado houve redução das velocidades de vento quando comparados os testes realizados com a presença da ocupação e aqueles considerando apenas o efeito da topografia. Também foi possível observar o aumento de áreas em que houve redução das velocidades ao longo tempo, acompanhando a expansão urbana verificada na análise da classificação das imagens de satélite. A investigação das modificações quanto à ocupação urbana e quanto ao comportamento do vento em pontos específicos permitiu fazer análises mais conclusivas sobre a

correlação negativa estabelecida entre as variáveis comprimento de rugosidade (z_0) e diferença da velocidade do vento. Mais ainda, foi possível notar discrepâncias quanto ao tipo de densidade urbana em relação à magnitude do vento, demonstrando que as altas densidades provocam maior redução de sua velocidade quando comparada às médias densidades urbanas.

Os testes computacionais mostraram que a caracterização da condição de estabilidade atmosférica é um parâmetro relevante nas simulações com o WindMapTM, observando-se diferenças significativas entre os mapas de velocidade dos ventos dos testes realizados com a atmosfera neutra e com a atmosfera estável para o episódio de 2007. Especificamente no caso de Belo Horizonte, cidade tropical continental em que as velocidades médias do vento são baixas e a topografia é fundamental na determinação do escoamento do ar, a condição de estabilidade atmosférica parece ser determinante para a investigação do comportamento do vento quando a abordagem é realizada na escala local.

Outra questão que merece destaque é a aplicação do programa WindMapTM. O aplicativo foi desenvolvido para fins de avaliação de potencial eólico em uma dada região. Neste sentido, as simulações realizadas com tal objetivo são realizadas em alturas superiores àquela em que foi feito o presente estudo, geralmente a 50 m acima do solo. Como constatado por simulação paramétrica, o efeito da cidade em alturas superiores a 30 m é pouco relevante, no caso de Belo Horizonte. Sendo assim, a representação da cidade é simplificada e os efeitos das trocas térmicas convectivas são desprezados no modelo. Para os testes na escala do planejamento urbano, realizados a 10 m de altura, tais efeitos térmicos podem alterar o comportamento do vento, principalmente considerando os registros de baixas velocidades no município. Portanto, esta é uma das limitações do programa para a aplicação realizada.

Através da revisão da literatura, pode-se perceber que as simulações computacionais na escala local ainda precisam de melhor desenvolvimento. Os modelos são mais bem desenvolvidos para lidar com estudos na microescala, utilizando os CFDs, por exemplo, ou na mesoescala, em aplicações meteorológicas. Na escala microclimática, as simulações exigem um grau de detalhamento muito grande das superfícies, dificultando a execução deste modelo para a extensão de uma cidade. Na mesoescala, por sua vez, os testes apresentam resolução inferior àquela necessária a visualização de diferentes tecidos urbanos. Há, então, uma lacuna quanto ao uso de método de simulação computacional para o planejamento urbano, demandando maior desenvolvimento de ferramentas de abordagem nesta escala.

Quanto aos dados meteorológicos, não se tem uma rede significativa de estações fixas em Belo Horizonte e em seu entorno, problema já constatado em estudos que lidam com este tipo de informação. Contudo, para fins de planejamento urbano, é possível extrair conclusões sobre o comportamento do vento mesmo com a deficiência de dados, já que localmente precisa-se compreender a tipicidade e as particularidades dos fenômenos atmosféricos.

Apesar das limitações do programa de simulação e da insuficiência de dados meteorológicos na região metropolitana de Belo Horizonte, pode-se concluir que a metodologia adotada produz resultados satisfatórios para aplicação em planejamento urbano. Esta não depende de uma grande quantidade de dados de entrada e consegue resolver com rapidez a questão colocada, necessidade intrínseca à prática do projeto de cidades. No entanto ainda precisa de melhor desenvolvimento, deixando aqui pontos norteadores para trabalhos futuros:

- Necessidade de uma análise mais extensiva do período entre 1987 a 2007 para verificar se, para a cidade de Belo Horizonte e entorno, há um aumento da velocidade do vento com o tempo;
- Explorar e manipular os dados dos pontos analisados neste estudo para verificação de outras relações entre a questão da ocupação urbana e a velocidade do vento;
- Realizar estudos comparativos com outros programas computacionais para testar a confiabilidade das simulações com o WindMapTM;
- Realizar estudos preditivos, com a simulação de cenários futuros, como auxílio para a análise do efeito de novas ocupações urbanas e seu respectivo impacto no comportamento do vento.

Quanto à prática da tomada de decisão na escala das cidades, espera-se que estudos que envolvam a análise de variáveis climáticas sejam cada vez mais incorporados visando à melhoria da qualidade de vida urbana.

REFERÊNCIAS

- ABBOUD, H. J.; SILVEIRA, A. B.; PEREIRA, M. M. R.; REIS JR, N. C. Modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos em regiões urbanas de relevo complexo baseada nas equações de conservação. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT, 10., 2004, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM, 2004.
- ABREU, M. L.; LUCAS, T. P. B. Caracterização climática dos ventos associados a eventos de precipitação extrema em Belo Horizonte – MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 10., 2003, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2003.
- ALCOFORADO, M. J.; LOPES, A.; ANDRADE, H.; VASCONCELOS, J. *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa*. Lisboa: Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa, 2006.
- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Brasília: MME; CEPEL; CRESESB, 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 02 dez. 2008.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, v. 23, p. 1-26, 2003.
- ASSIS, E. S. *Mecanismos de desenho urbano apropriados a atenuação da ilha de calor urbana*: análise de desempenho de áreas verdes em clima tropical. 1990. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.
- ASSIS, E. S. *Impactos da forma urbana na mudança climática*: métodos para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano. 2000. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 5.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- BADEN-WÜRTTEMBERG INNENMINISTERIUM. *Climate booklet for urban development*. Stuttgart: Ministry of Economy Baden-Württemberg; Environmental Protection Department of Stuttgart, 2004. Disponível em: <http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/Climate_Booklet/index-1.htm>. Acesso em: dez. 2007.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosphere, Weather and Climate*. London: Methuen, 3ª ed, 1976 *apud* AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. 5.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- BELO HORIZONTE (Prefeitura Municipal). *Plano Diretor de Belo Horizonte: Lei de Uso e Ocupação do Solo - estudos básicos*. Belo Horizonte: Prefeitura Municipal, 1995.
- BENTO, F.; DIAS, N.; LEAL, C.; SILVEIRA, G. *Laboratório de Mecânica Física: elementos de apoio e procedimentos experimentais*. Lisboa: Instituto Politécnico de Lisboa; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, [200-]. Documento eletrônico.

Disponível em: <fatec.org/v02/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=110>. Acesso em: 15 jan. 2009.

BITTENCOURT, L. S.; CRUZ, J. M.; LÔBO, D. G. F. A influência da relação entre taxa de ocupação x nº de pavimentos no potencial de ventilação natural dos ambientes internos e externos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, 4., 1997, Salvador. *Anais...* Salvador, 1997. p. 102-106.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. *Introdução à ventilação natural*. 2. ed. rev. e ampl. Maceió: EDUFAL, 2006.

BLAIR, T. A. *Meteorologia*. Rio de Janeiro, 1964.

BOTTEMA, M. Parameterisation of aerodynamic roughness parameters in relation to air pollutant removal efficiency of streets. *Computational Mechanics*, p. 235–242, 1995 *apud* GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*. v. 38, p. 1262-1292, 1999.

BOTTEMA, M. *Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups: Part 2: Results Document SUB-MESO 23*. École Centrale de Nantes, France: 1995. Disponível em Equipe Dynamique de l'Atmosphère Habitée, Laboratoire de Mécanique des Fluides, École Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44072 Nantes Cedex 03, France *apud* GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*. v. 38, p. 1262-1292, 1999.

BRASIL. Ministério da Aeronáutica. *Manual de análise do Diagrama "Slew-T, Log P"*. Ministério da Aeronáutica / Diretoria de Rotas Aéreas, 1969.

CAMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, v. 20, p. 395-403, 1996.

CAMARGO, O. A.; SILVA, F. J. L.. *Atlas eólico*: Rio Grande do Sul. Porto Alegre: SEMC, 2002. Disponível em: <<http://www.semc.rs.gov.br/>>. Acesso em: 02 dez. 2008.

CAVALCANTI, I. F. A. Episódios El Niño / Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. *Revista Climanalise*. Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, 1996. Edição Especial. Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em fev. 2008.

CAVALCANTI, I. F. A. (Ed.). *Boletim Climanalise*, v. 12, n. 01. CPTEC/INPE, 1997. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: fev. 2008.

CAVALCANTI, I. F. A. (Ed.). *Boletim Climanalise*, v. 22, n. 01. CPTEC/INPE, 2007. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: fev. 2008.

COTA, M. A. *Áreas de preservação permanente (APPs): as resoluções CONAMA e o papel das técnicas de geoprocessamento na delimitação das classes de preservação*. 2008. (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ECHENIQUE, M. Modelos: una discusión. In: MARTIN, L.; MARCH, L.; ECHENIQUE, M. *La estructura del espacio urbano*. Barcelona: Gustavo Gili, 1975.

FERREIRA, D.G. *Estudo da ventilação urbana na cidade de Belo Horizonte, MG*. 2004. Monografia (Iniciação Científica) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, D. G.; FERREIRA, C. M. O.; COSTA, S. M. M.; ASSIS, E. S. Comparação entre métodos morfométricos para determinação de parâmetros de rugosidade para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA DEL VIENTO, 1., 2008, Montevideo. *Anales...* Montevideo, 2008.

FEHRENBACH, U.; SCHERER, D.; PARLOW, E. Automated classification of planning objectives for the consideration of climate and air quality in urban and regional planning for the example of the region of Basel/Switzerland. *Atmospheric Environment*, v. 35, p. 5605–5615, 2001.

FLOCAS, H.; KELESSIS, A.; HELMIS, C.; PETRAKAKIS, M.; ZOUMAKIS, M.; PAPPAS, K. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. *Theoretical and Applied Climatololy*, 2007. Disponível em: <http://www.springerlink.com.w10036.dotlib.com.br/content/101580/?k=flocas&sortorder=asc&v=condensed&o=10>. Acesso em: 20 mar. 2008.

FRANÇA, D. A. *Mudança do uso e cobertura da terra no Vale do Paraíba e vizinhança e seus impactos na circulação atmosférica local*. 2007. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

GANDEMER *et al.* *Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles, application à la conception des installations de ventilation*. Chahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. n. 187, 1978 *apud* SILVA, F. A. G. *O vento como ferramenta no desempenho do ambiente construído: uma aplicação ao nordeste do Brasil*. 1999. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GARRAT, J. R. *The atmospheric boundary layer*. New York: Cambridge University. 1994 *apud* LOPES, A. M. S. *Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético*. 2003. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*. v. 38, p. 1262-1292, 1999.

KATZSCHNER, L. The contribution of urban climate studies to a new urbanity. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC, 8., 2005, Maceió. *Anais...* Maceió, p. 912-920, 2005.

KATZSCHNER, L.; MÜLDER, J. Regional climatic mapping as a tool for sustainable development. *Journal of Environmental Management*. v. 87, p. 262-267, 2008.

LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. New York: International Geophysics Series, 1981.

LAZAR, R.; PODESSER, A. An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austria). *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 4195-4209, 1999.

LETTAU, H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness element description. *J. Applied Meteorology*, v. 8, p. 828-832, 1969 *apud* GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, v. 38, p. 1262-1292, 1999.

LOPES, A. M. S. *Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano: vento, ilha de calor de superfície e balanço energético*. 2003. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. *Turbulência*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004. (Coleção Cadernos de Turbulência, 4).

LUCAS, T. P. B. *Chuvas persistentes e ação da Zona de Convergência do Atlântico Sul na região metropolitana de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, 2007. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

LUCAS, T. P. B.; ABREU, M. L. Caracterização climática dos padrões de ventos associados a eventos extremos de precipitação em Belo Horizonte, MG. *Caderno de Geografia*, v. 14, n. 23, p. 135-152, 2004.

MACDONALD, R. W.; GRIFFITHS, R. F.; HALL, D. J. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, v. 32, p. 1857-1864, 1998.

MARQUES FILHO, E. P. *Investigação da camada limite planetária convectiva com modelo LES aplicado à dispersão de poluentes*. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MENDONÇA, J. G.; COSTA, H. S. M. Entre a homogeneização e a diversidade: segregação sócio-espacial na metrópole belo-horizontina e as especificidades do eixo-sul. *Espaço & Debates*, São Paulo, v. 24, n. 45, p. 45-86, 2004.

MILLS, G. Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, p. 69-76, 2006.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e Clima Urbano: um projeto e seus caminhos. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Org.). *Clima urbano*. São Paulo: Contexto, 2003.

MONTEIRO, C. A. F. *A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul-oriental do Brasil*: (contribuição metodológica a análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil). São Paulo: USP, Instituto de Geologia, 1969 (Série Teses e Monografias).

MONTEIRO, C. A. F. *Teoria e clima urbano*. 1976. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

MONTEIRO, C. A. F. Entrevista com Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. *Rua: Revista de Urbanismo e Arquitetura*, v. 1, n. 9, p. 100-107, 2006. Entrevista concedida a Eleonora Sad de Assis.

MONTE-MÓR, R. L. Belo Horizonte: a cidade planejada e a metrópole em construção. In: MONTE-MÓR, R. L.; LEMOS, C. B.; COSTA, H. S. M.; MARQUES, Y. L. *Belo Horizonte: espaços e tempos em construção*. Belo Horizonte: PBH/CEDEPLAR, 1994.

MOREIRA, A. A. M. *A influência da circulação de macro-escala sobre o clima de Belo Horizonte*. 1999. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

MOREIRA, J. L. B. *Estudo da distribuição espacial das chuvas em Belo Horizonte e em seu entorno*. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

MORTENSEN, N. G.; LANDBERG, L.; TROEN, I.; PETERSEN, E. L. *Wind atlas analysis and application program (Wasp)*. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1993.

MÜLLER, G. R. R. *A influência do urbanismo sanitaria na transformação do espaço urbano em Florianópolis*. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

NIKOLOPOULOU, M. *Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach*, RUROS. Greece: CRES, 2004.

NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J. *Introdução ao sensoriamento remoto*. São José dos Campos: INPE, 2001.

OLIVEIRA, G. S. *O El Niño e você: o fenômeno climático*. São José dos Campos: Editora Transtec, 2001.

OKE, T. R. *Boundary layer climates*. London: Methuen & Co Ltd, 1978.

OKE, T. R. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods. Canadá: WMO/TD, 2006a. (n. 1250, R. n. 81)

OKE, T. R. Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, p. 179–190, 2006b.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, v. 108, p. 1-24, 1982 *apud* ASSIS, E. S. *Impactos da forma urbana na mudança climática: métodos para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano*. 2000. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

PAGE, J. K. The fundamental problems of building climatology considered from the point of view of decision-making by the architect and urban designer. In: SYMPOSIUM ON URBAN CLIMATES AND BUILDING CLIMATOLOGY, 1968, Brussels. *Proceedings....* Geneva: WMO, 1970. p. 10-21.

PALESE, C. (e-mail enviado). *Simulação com Windmap: auxílio mestrado Brasil* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por dani.gferreira@yahoo.com.br em 25 nov. 2008.

PALESE, C.; APCARIAN, A.; LASSIG, J. L. Mapa de rugosidad aerodinámica superficial de la ciudad de Neuquén. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA DEL VIENTO, 1., 2008, Montevideo. *Anales...* Montevideo, 2008.

PARLOW, E.; SCHERER, D.; FEHRENBACH, U. Satellite-based climate analysis of Basel/Switzerland. In: ERS SYMPOSIUM ON SPACE AT THE SERVICE OF OUR ENVIRONMENT, 3., Florence. *Proceedings...* Florence, 1997. p. 271-274.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*, 90. 33-49 *apud* ABOUD, H. J.; SILVEIRA, A. B.; PEREIRA, M. M. R; REIS JR, N. C. Modelagem matemática da dispersão de poluentes atmosféricos em regiões urbanas de relevo complexo baseada nas equações de conservação. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT, 10., 2004, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM, 2004.

PEDRO, G.; MATTIO, H.; PALESE, C.; WARCHOMICKA, N.; LASSIG, J. Recurso eólico de la provincia del Neuquén. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 10, p. 15-21, 2006.

PINHO, C. M. D.; KUX, H. J. H. Dados do Quickbird para subsidiar o planejamento urbano: uma proposta metodológica, município de São José dos Campos, SP, Brasil. In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE PERCEPCIÓN REMOTA Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL, 11., 2004, Santiago, Chile. *Anais...* Santiago: SELPER, 2004.

PRATA, A. R. *Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano*. 2005. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRATA, A. R.; MONTEIRO, L. M.; FROTA, A. B. Ensaio de erosão em túnel de vento e aplicação do índice PET para a avaliação do conforto do pedestre. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERÍA DEL VIENTO, 1., 2008, Montevideo. *Anales...* Montevideo, 2008.

QUADRO, M. F. L. *Estudo de episódios de Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul*. 1994. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

RAUPACH, M. R. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Bound.-Layer Meteor.*, v. 71, p. 211–216, 1994 *apud* GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*. v. 38, p. 1262-1292, 1999.

REIS, A. *Comissão d'estudo das localidades indicadas para a nova capital*: relatório apresentado a S.Ex. o Sr.Dr. Affonso Penna. Rio de Janeiro: 1893-94. 1v. Relatório.

ROBALLO, S. T. *Estudo do escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) através de medidas de torre anemométrica e em túnel de vento*. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

ROMERO, H.; IHL, M.; RIVERA, P.; ZALAZAR, P.; AZOCAR, P. Rapid urban growth, land-use changes and air pollution in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment*. v. 33, p. 4039-4047, 1999.

SANTOS, D. M. P. A. C. Descobrimos aspectos ambientais na legislação urbanística de Belo Horizonte: uma discussão em torno do caso da ZEISs. In: RUGANI, J. M.; FERNANDES, E. (Org.). *Cidade, memória e legislação: a preservação do patrimônio na perspectiva do direito urbanístico*. Belo Horizonte: IAB/MG, 2002.

SARAIWA, J. A. G. *Aerodinâmica dos edifícios altos*: característica do escoamento e resposta à turbulência de formas prismáticas. 1983. Tese (Concurso para Especialista) - Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1983.

SARTORI, M. G. B. Considerações sobre a ventilação nas cidades e sua importância no planejamento urbano. *Ciência e Natura*, v. 6, p. 59-74, 1984.

SEGAWA, H. *Arquiteturas no Brasil: 1900-1990*. São Paulo: Edusp, 2002.

SCHERER, D.; FEHRENBACH, U.; PARLOW, E. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*. v. 33, p. 4185-4193, 1999.

SILVA, F. A. G. *O vento como ferramenta no desempenho do ambiente construído*: uma aplicação ao nordeste do Brasil. 1999. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SOUCH, C.; GRIMMOND, S. Applied climatology: urban climate. *Progress in Physical Geography*, v. 30, n. 2, p. 270-279, 2006.

SOUSA, O. N. P. Investigação do papel da topografia e ocupação do solo na camada limite planetária sobre a cidade de São Paulo. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, M. L. *Mudar a cidade*: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

SPERA, David A. *Wind Turbine Technology*. New York: ASME Press, 1994.

STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.

SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE - PLAMBEL. *O processo de desenvolvimento de Belo Horizonte: 1897-1970*. Belo Horizonte: PLAMBEL, 1979.

TAESLER, R. Urban Climatological Methods and Data. In: TECHNICAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATOLOGY AND ITS APPLICATIONS WITH SPECIAL REGARD TO TROPICAL AREAS. Geneva, 1986. *Proceedings...* Geneva: WMO, 1986. p. 199-236.

TROEN, I. PETERSEN, E. L. *European Wind Atlas*. Roskilde: Risø National Laboratory, 1989 *apud* MORTENSEN, N. G.; LANDBERG, L.; TROEN, I.; PETERSEN, E. L. *Wind atlas analysis and application program (Wasp)*. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1993.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e climatologia*. Recife, 2006. (versão digital 2). Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/>>. Acesso em: nov. 2008.

VASCONCELOS, J. V. *Avaliação climática para o planeamento urbano de Lisboa: Influência do crescimento urbano no sistema de brisas do estuário do Tejo*. 2006. Dissertação (Mestrado em Ordenamento do Território e Planeamento Ambiental). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: UFV - Imprensa Universitária, 1991.

VILLAÇA, F. *Espaço intra-urbano no Brasil*. São Paulo: Studio Nobel / FAPESP, 2001.

WIERINGA, J.; DAVENPORT, A. G.; GRIMMOND, C. S. B.. New revision of Davenport roughness classification. In: EUROPEAN & AFRICAN CONFERENCE ON WIND ENGINEERING, 3., 2001, Eindhoven. *Proceedings...* Eindhoven, 2001. p. 1-8. Disponível em: <<http://www.kcl.ac.uk/ip/suegrimmond/>>. Acesso em: jan. 2008.

GLOSSÁRIO

Altura dos obstáculos (*height of roughness element*) - z_H : altura média dos elementos de rugosidade

Área de projeção dos edifícios - A_P : área de projeção, em planta, dos edifícios

Área frontal de obstáculos (*frontal area of roughness elements*) - A_F : área total das fachadas voltadas para o vento dominante

Área total (*plan area of total surface*) - A_T : área total em planta da superfície de cálculo do comprimento de rugosidade

Clima: totalidade das condições de tempo num período que corresponde a anos (BLAIR, 1964)

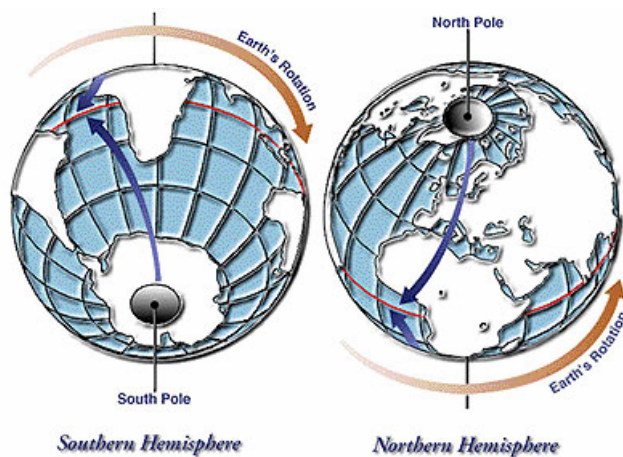
Comprimento de Monin-Obukhov - L : altura na Camada Limite Atmosférica onde os efeitos da turbulência mecânica se equivalem aos efeitos da turbulência convectiva

Força de Coriolis: força aparente, que atua em direção perpendicular ao movimento de rotação dos hemisférios da Terra, que atua sobre um elemento do fluido em deslocamento sobre o planeta. Seu valor é nulo no Equador, positivo no Hemisfério Norte e negativo no Hemisfério Sul (CPTEC/INPE³⁷).

Representação da força de Coriolis.

Fonte: Disponível em:

<http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/circulation/coriolis_and_friction.html>. Acesso em 03/12/2008.



Força de gradiente de pressão: força que atua no fluido devido à variação espacial de pressão (CPTEC/INPE).

Isóbaras: Linhas que unem pontos com igual valor da pressão em uma dada superfície (INMET³⁸).

Massa de ar: grande porção da atmosfera que apresenta distribuição vertical de temperatura e umidade aproximadamente uniformes (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Quantidade de movimento: corresponde ao produto da massa de um corpo pela sua velocidade.

Razão de área frontal (*frontal area aspect ratio*) - λ_F : razão entre área frontal e área total ($\lambda_F = A_F/A_T$), que representa a densidade de rugosidade

Razão de área plana (*plan area aspect ratio*) - λ_P : razão entre área em planta e área total ($\lambda_P = A_P/A_T$), que representa a densidade de rugosidade

Sistema frontal ou frente: zonas-limites que separam massas de ar de propriedades diferentes (AYOADE, 1998). Classicamente, o sistema frontal é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície. Denomina-se frente fria quando a massa de

³⁷ Disponível em <<http://www7.cptec.inpe.br/glossario>>. Acesso em 03/12/2008.

³⁸ Disponível em <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em 03/12/2008.

ar frio avança na direção da massa de ar quente. A frente quente, por sua vez, ocorre quando a massa de ar quente avança na direção da massa de ar frio (CPTEC/INPE).

Tempo: compreende a condição e as características da atmosfera em um dado momento (BLAIR, 1964)

Temperatura Virtual: temperatura do ar absolutamente seco equivalente às mesmas condições de densidade e pressão do ar úmido (CPTEC/INPE; INMET).

Topo da camada limite - z_g : altura acima da qual a velocidade média do vento se mantém constante

Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): fenômeno climatológico, identificado através de composição de imagens de satélite, como uma banda de nebulosidade que se estende desde o sul da região Amazônica até a região central do Atlântico Sul. Também pode ser reconhecido por padrões de distribuição de radiação de onda longa (CPTEC/INPE).

Vento geostrófico: vento horizontal, não acelerado, cujo escoamento é ao longo de trajetórias retilíneas que resulta de um equilíbrio entre a força de gradiente de pressão (horizontal) e a força de Coriolis.

Termos do programa Windmap™

<i>Boundary Layer Height</i>	Altura da camada limite próxima à superfície em que há uma dependência logarítmica entre a velocidade do vento e os elementos de rugosidade e a influência da estabilidade térmica
<i>Elevation</i>	Dados de terreno, cuja altitude é dada em metros acima do nível do mar
<i>Initial Winds</i>	Representa o campo de vento na ausência dos efeitos de terreno
<i>Match surface data</i>	Quando a opção está ativa, o programa ajusta o cálculo continuamente para assegurar que a direção e velocidade igualem à condição inicial das estações meteorológicas
<i>Roughness</i>	Mapa de rugosidade aerodinâmica, que pode variar entre $1,05E-5$ m e 5 m
<i>Stability ratio</i>	Medida de estabilidade térmica da atmosfera. Determina a quantidade relativa em que o programa ajusta a velocidade do vento em direções vertical e horizontal para satisfazer o princípio de conservação da massa
<i>Surface Data</i>	Registros anemométricos de estações meteorológicas (direção e velocidade dos ventos)
<i>Top of Mesh</i>	Topo do domínio do modelo (ou da malha).
<i>Transition Layer Height</i>	Zona onde o programa Windmap mistura a velocidade e direção do vento do topo da camada limite com os dados de perfil vertical, assumindo uma função de mistura logarítmica
<i>Upper-Air Data</i>	Medições de velocidade e direção dos ventos em altitudes elevadas (vento geostrófico)

APÊNDICES

APÊNDICE A: Matriz e erro de classificação das imagens de satélite

Símbolo	Classe de cobertura do solo
A	Água
S	Solo exposto
VR	Vegetação rasteira
VA	Vegetação arbórea
AU1	Área urbana residencial
AU2	Área urbana densa de altura média
AU3	Área urbana de alta densidade

Imagem Landsat de 17/07/1987

Desempenho médio = 94,71%

Confusão média = 5,29%

	A	S	VR	VA	AU1	AU2	AU3
A	100,00	-	-	-	-	-	-
S	-	88,89	2,78	-	8,33	-	-
VR	-	-	92,75	-	2,90	4,35	-
VA	-	-	1,26	98,11	-	-	0,63
AU1	-	20,00	2,86	0,00	77,14	-	-
AU2	-	-	-	-	-	100,00	-
AU3	4,76	-	-	-	-	-	95,24

Imagem Landsat de 23/06/1996

Desempenho médio = 93,30%

Confusão média = 6,70%

	A	S	VR	VA	AU1	AU2	AU3
A	94,03	-	-	-	-	1,49	4,48
S	-	94,44	2,78	-	2,78	-	-
VR	-	-	94,2	-	-	5,8	-
VA	-	-	-	98,04	1,31	-	0,65
AU1	-	-	15,91	2,27	72,73	9,09	-
AU2	-	-	5,88	-	-	94,12	-
AU3	-	-	-	-	-	5,88	94,12

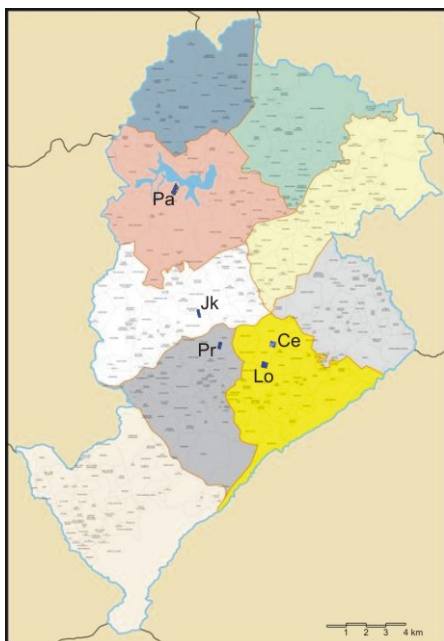
Imagem Landsat de 21/07/2006

Desempenho médio = 93,27%

Confusão média = 6,73%

	A	S	VR	VA	AU1	AU2	AU3
A	100,00	-	-	-	-	-	-
S	-	93,33	-	-	6,67	-	-
VR	-	0,00	95,52	-	4,48	-	-
VA	-	-	-	99,01	0,99	-	-
AU1	-	14,29	6,35	-	74,60	4,76	-
AU2	-	-	-	-	3,85	69,23	26,92
AU3	4,35	-	-	-	-	8,70	86,96

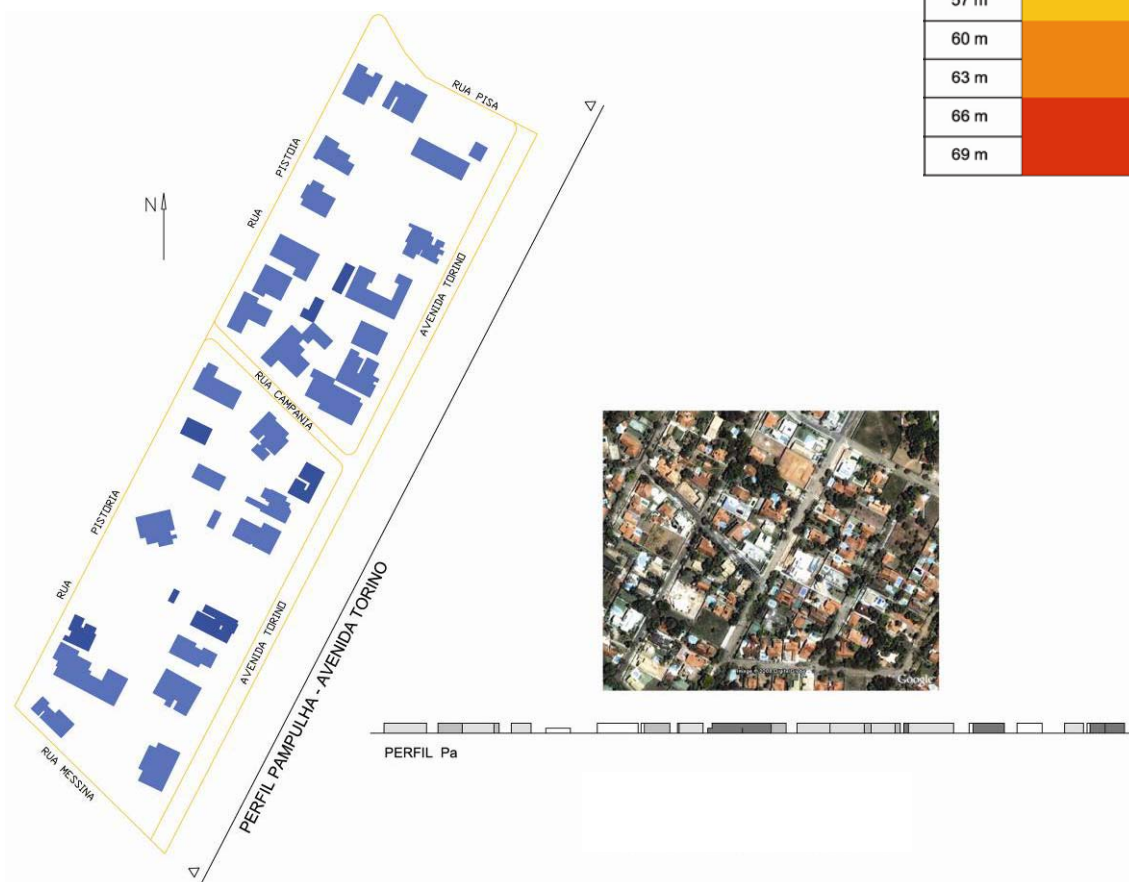
APÊNDICE B: Amostras de áreas urbanas para cálculo de z_0



Localização das amostras urbanas
Fonte mapa-base: Prodabel

Legenda de cores

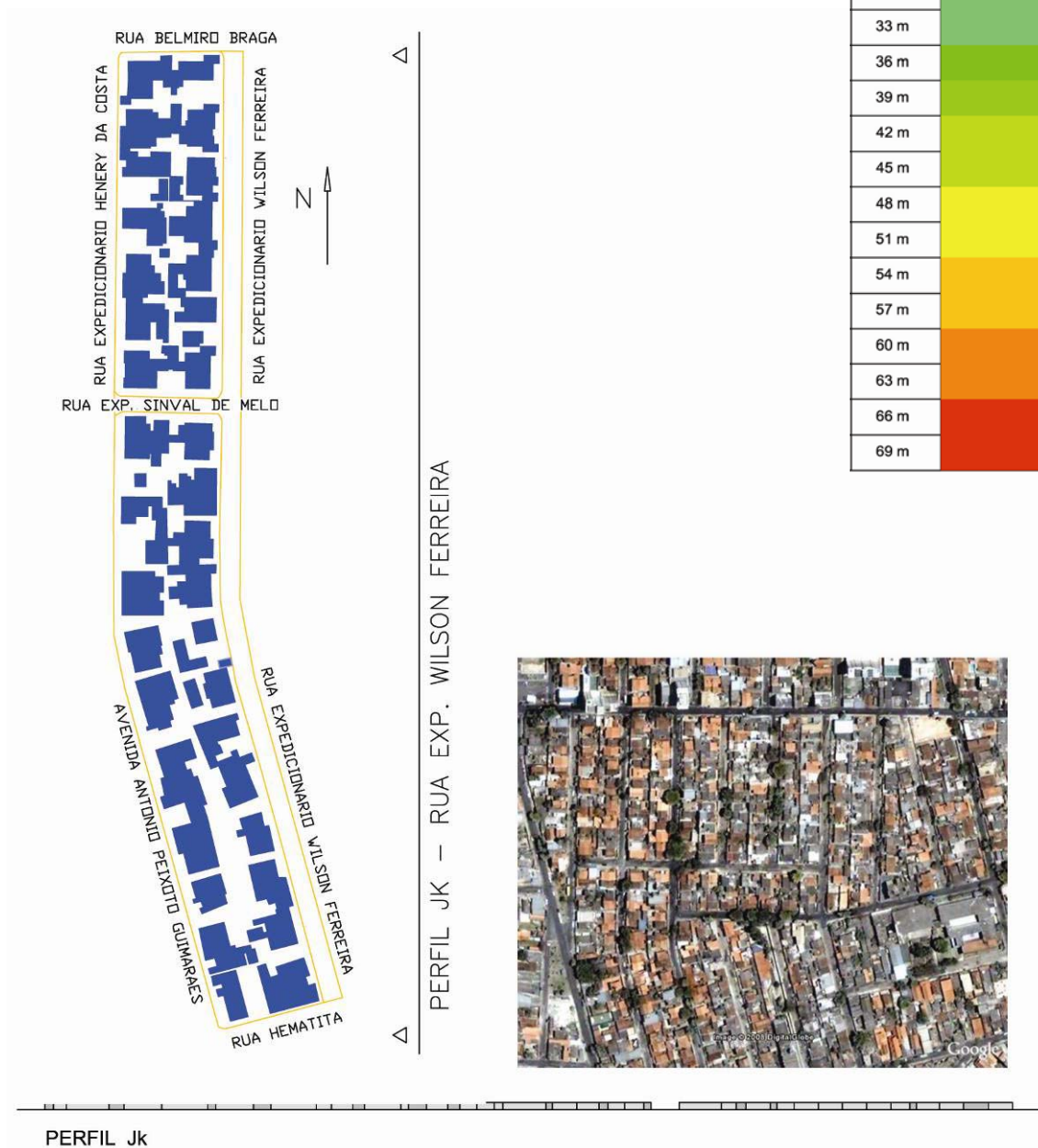
Altura Aprox.	Representação
3 m	
6 m	
9 m	
12 m	
15 m	
18 m	
21 m	
24 m	
27 m	
30 m	
33 m	
36 m	
39 m	
42 m	
45 m	
48 m	
51 m	
54 m	
57 m	
60 m	
63 m	
66 m	
69 m	



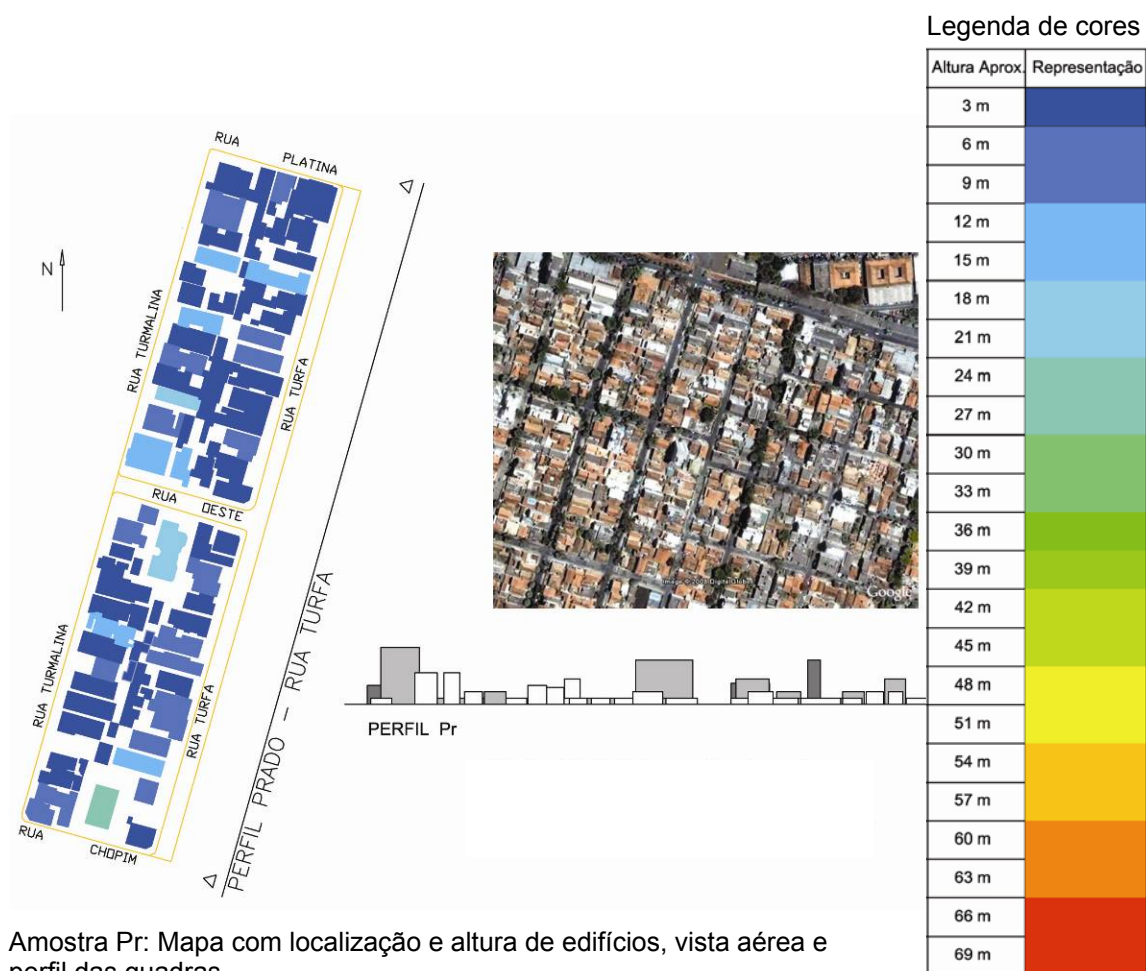
Amostra Pa: Mapa com localização e altura de edifícios, vista aérea e perfil das quadras
Fonte: Prodabel (base cadastral) Google Earth (imagem aérea)

Legenda de cores

Altura Aprox.	Representação
3 m	
6 m	
9 m	
12 m	
15 m	
18 m	
21 m	
24 m	
27 m	
30 m	
33 m	
36 m	
39 m	
42 m	
45 m	
48 m	
51 m	
54 m	
57 m	
60 m	
63 m	
66 m	
69 m	

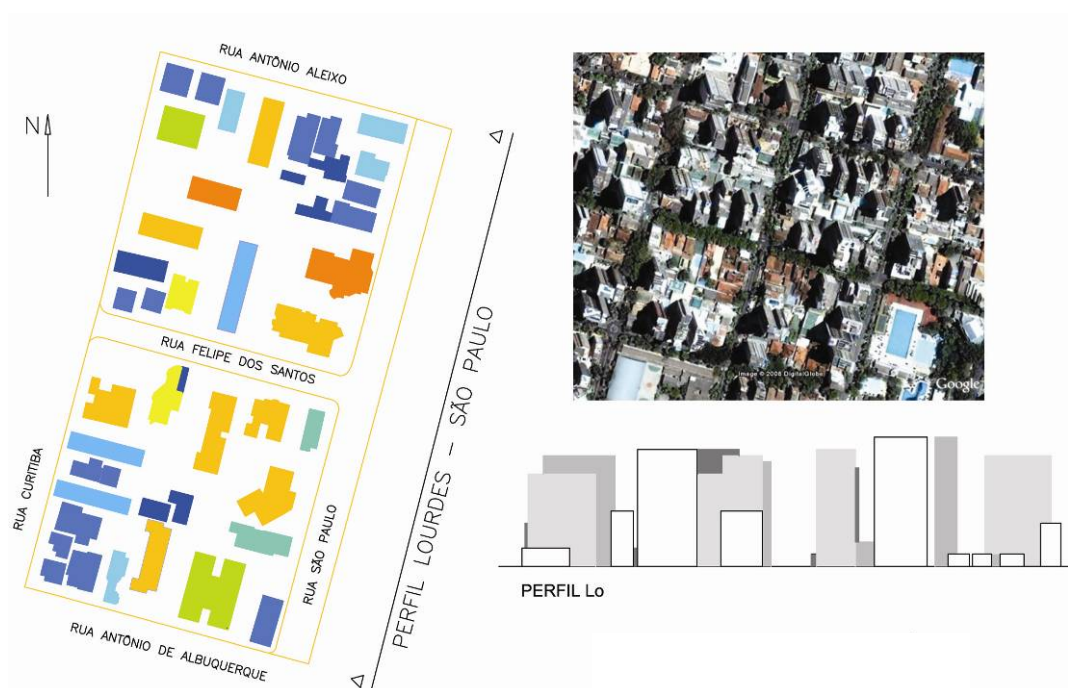


Amostra Jk: Mapa com localização e altura de edifícios, vista aérea e perfil das quadras
 Fonte: Prodabel (base cadastral) Google Earth (imagem aérea)



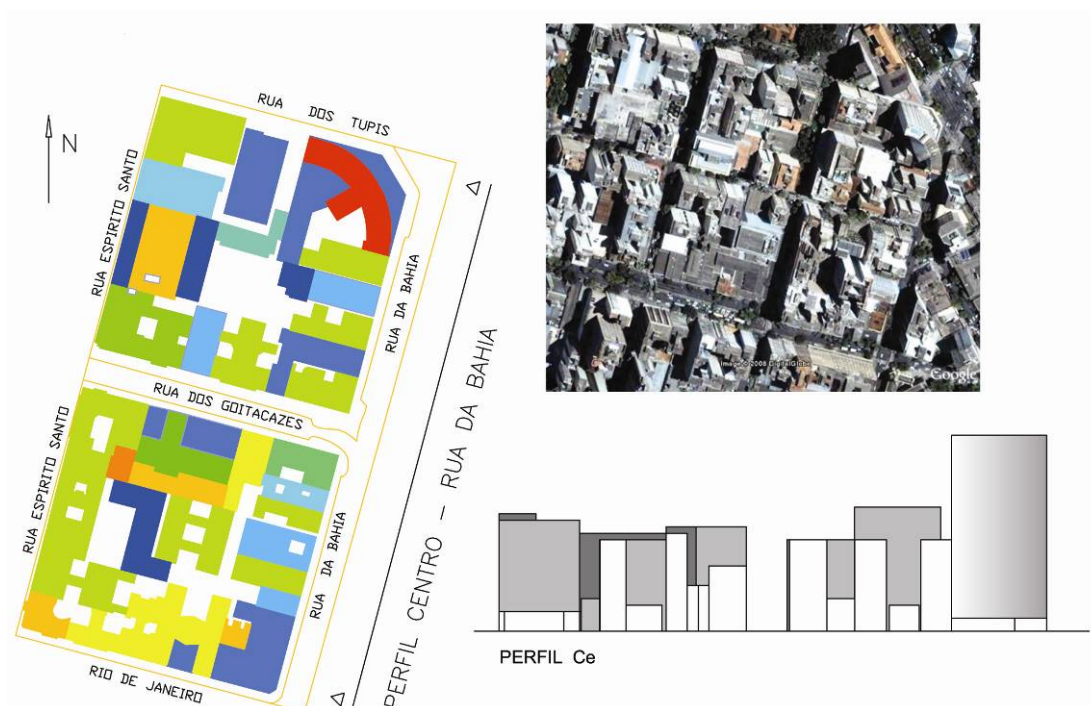
Amostra Pr: Mapa com localização e altura de edifícios, vista aérea e perfil das quadras

Fonte: Prodabel (base cadastral) Google Earth (imagem aérea)



Amostra Lo: Mapa com localização e altura de edifícios, vista aérea e perfil das quadras

Fonte: Prodabel (base cadastral) Google Earth (imagem aérea)



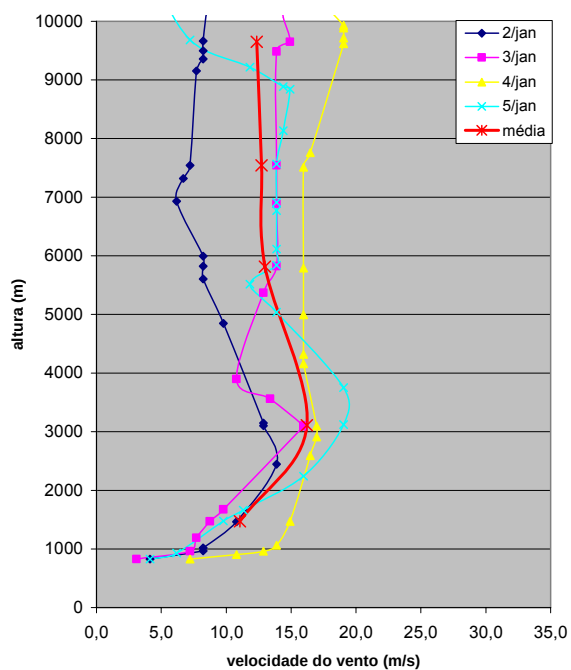
Amostra Ce: Mapa com localização e altura de edifícios, vista aérea e perfil das quadras
 Fonte: Prodabel (base cadastral) Google Earth (imagem aérea)

Legenda de cores

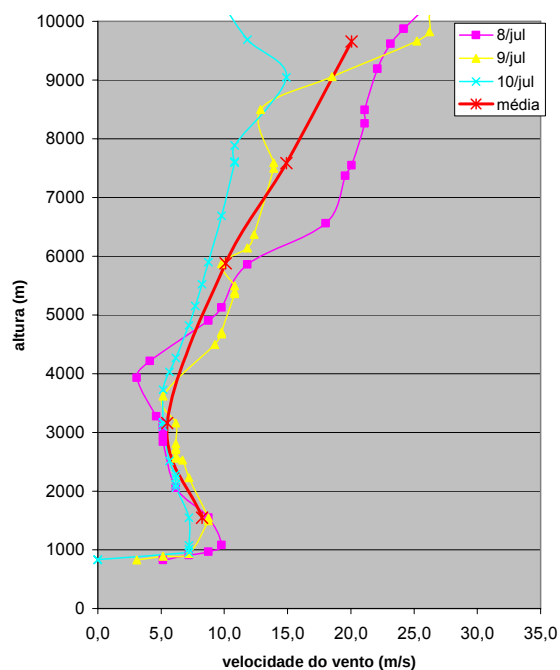
Altura Aprox.	Representação
3 m	
6 m	
9 m	
12 m	
15 m	
18 m	
21 m	
24 m	
27 m	
30 m	
33 m	
36 m	
39 m	
42 m	
45 m	
48 m	
51 m	
54 m	
57 m	
60 m	
63 m	
66 m	
69 m	

APÊNDICE C: Perfil vertical de velocidade do vento extraído de sondagens do Aeroporto Internacional de Confins

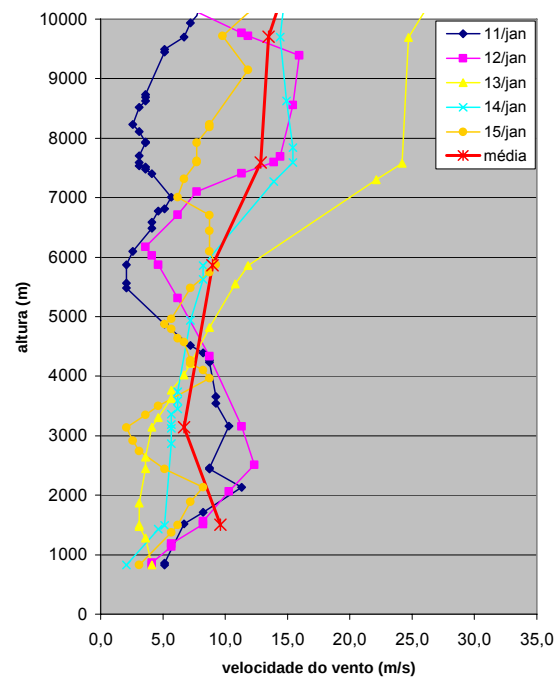
Perfil vertical: 02 a 06/01/1997



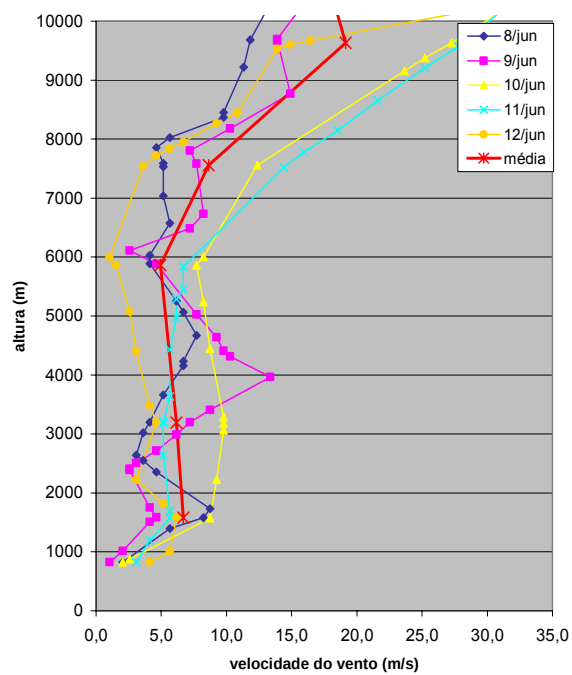
Perfil vertical: 06 a 10/07/1997

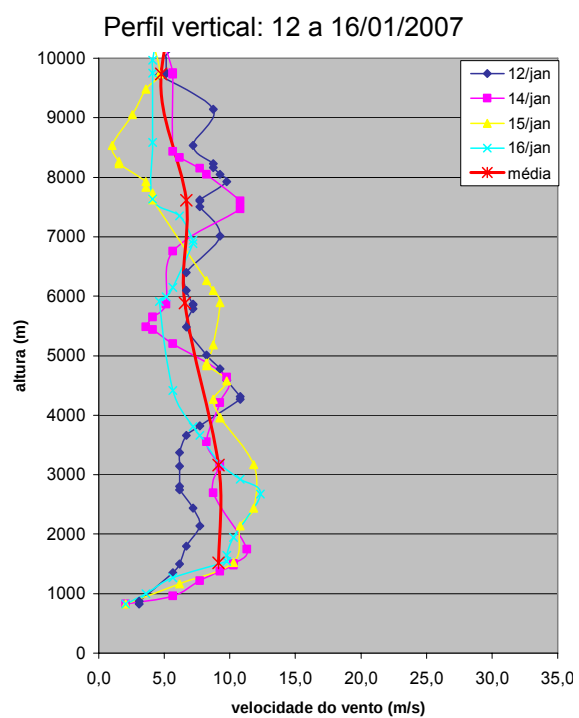


Perfil vertical: 11 a 15/01/2005

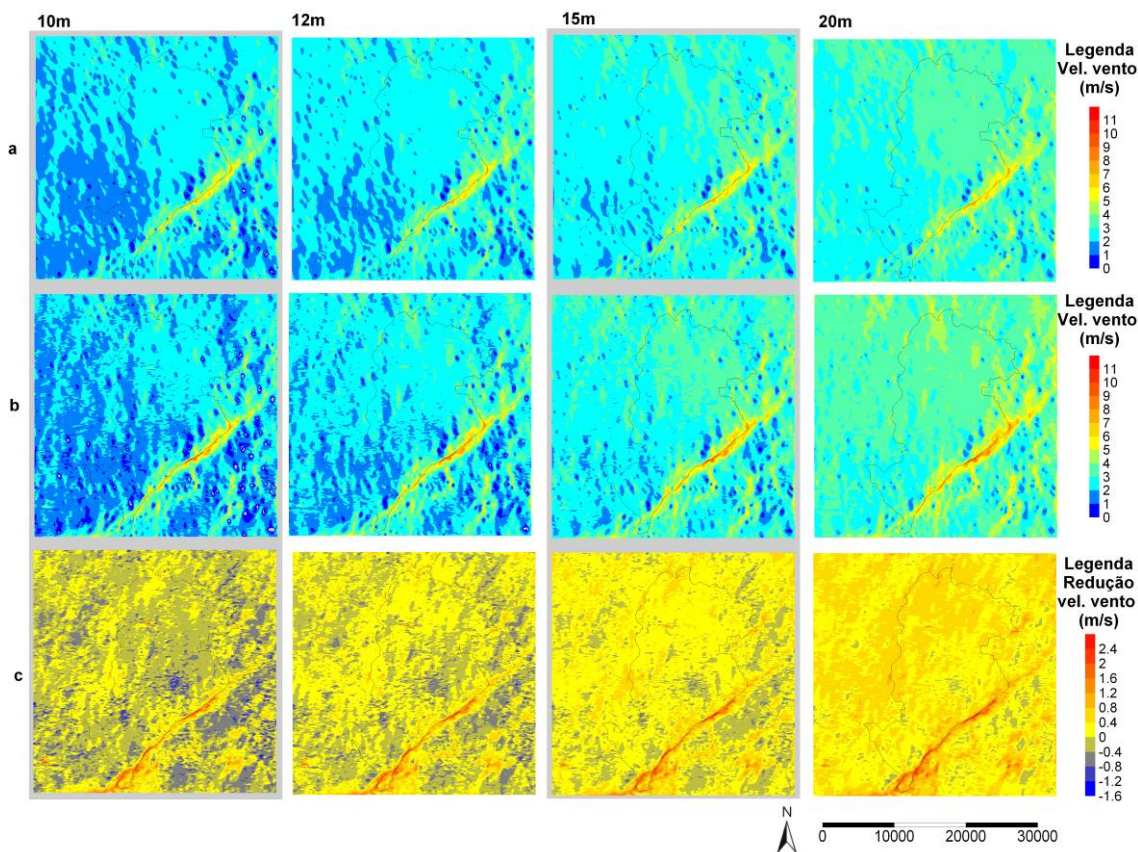


Perfil vertical: 08 a 12/06/2005



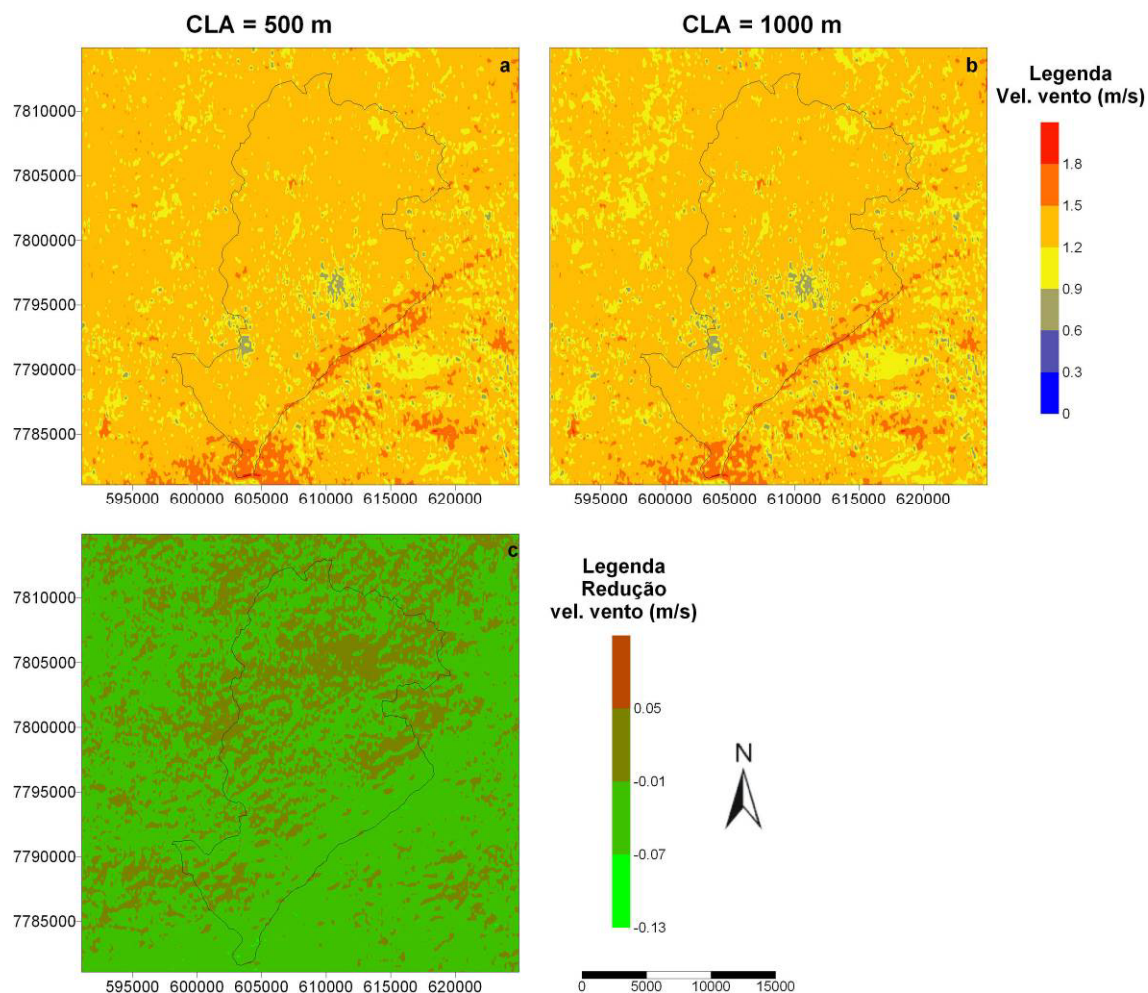


APÊNDICE D: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da altura de simulação



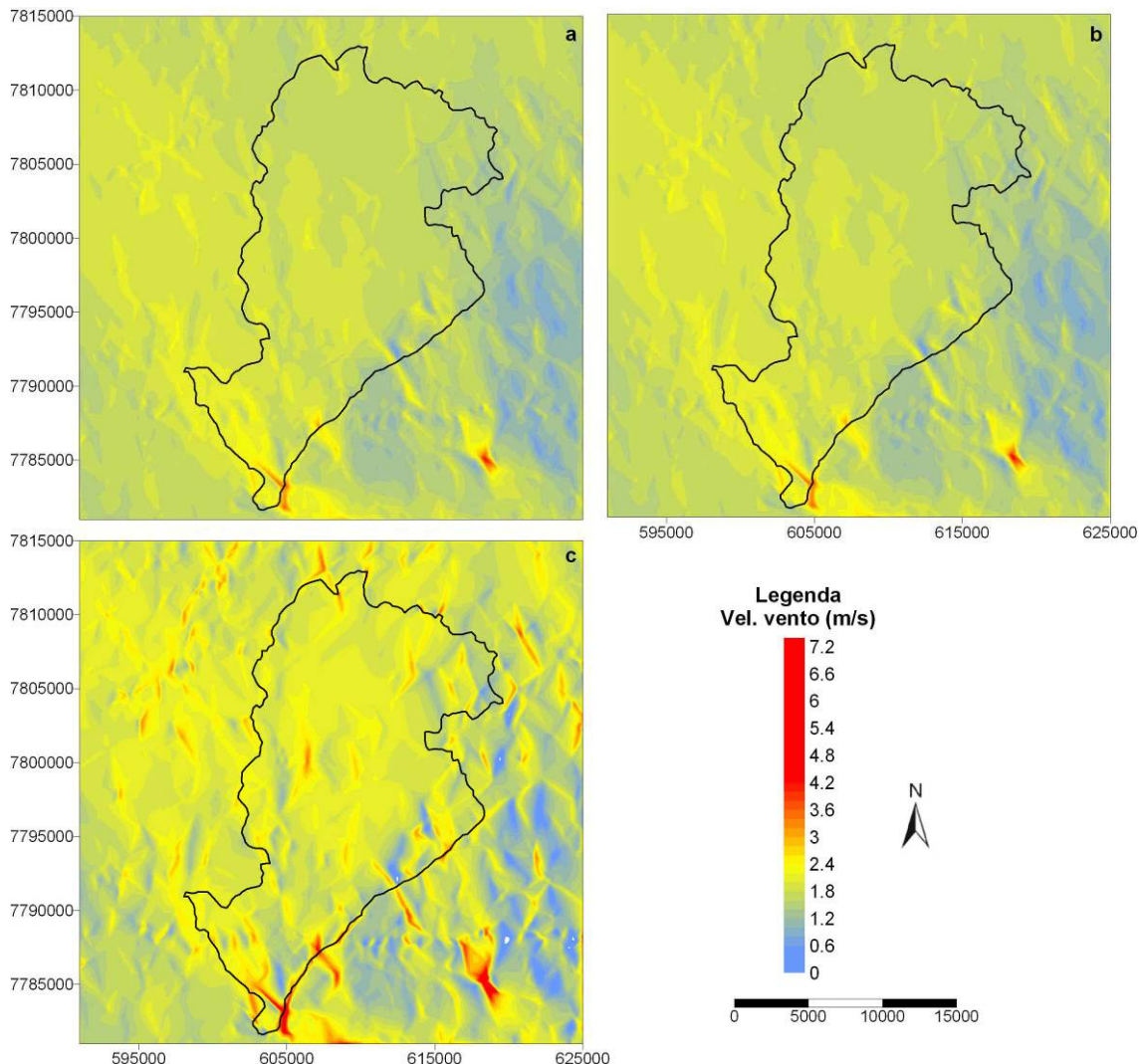
Simulação da velocidade do vento (m/s) no programa WindMap™ com variação da altura dos testes. As colunas representam a altura de simulação. As linhas mostram a definição de parâmetros: em a, a simulação foi feita considerando apenas a topografia ($z_0 = 0.03$ m); em b, considerou-se a ocupação do ano de 2007; c corresponde ao efeito apenas da ocupação, obtido pela diferença entre as velocidades de b e a (subtraíram-se as velocidades de vento de b pela de a).

APÊNDICE E: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da variação da altura da CLA



Simulação da velocidade do vento (m/s) no programa WindMap™ com variação da altura da CLA. Em a, a altura corresponde ao valor padrão do programa (500 m). Em b, a altura equivale a 1000m. A Figura c representa a diferença entre os valores de velocidade entre as Figuras a e b.

APÊNDICE F: Simulação paramétrica utilizando o programa WindMap™ para teste de sensibilidade da variação de estimativa de z_0 para a amostra Lo



Simulação da velocidade do vento (m/s) no programa WindMap™ a partir dos três valores de rugosidade estimados para a amostra Lo : 1,97 m (a), 2,43 (b) e 2,55 (c).

O aumento do valor da rugosidade altera o comportamento do vento na área de estudo. O menor valor de z_0 (1,97 m), estimado pelo modelo Rt , apresenta velocidades em um intervalo entre 0,59 e 4,37 m/s. Magnitudes de vento semelhantes ocorrem quando o valor de rugosidade é de 2,43 m (entre 0,55 e 4,42 m/s). Neste caso, a mudança do padrão das manchas de velocidade é ainda semelhante ao anterior, contudo, nota-se um aumento do tamanho de manchas de magnitudes mais altas principalmente na parte central do mapa. Já a FIG. c mostra um padrão diferenciado dos demais com o aumento da amplitude dos valores. O incremento da velocidade levou a uma intensificação das velocidades mais altas em regiões de maior altitude e a um declínio da magnitude do vento em locais mais baixos.

ANEXOS

ANEXO A: Perfil vertical de velocidade do vento extraído de sondagens do Aeroporto Internacional de Confins

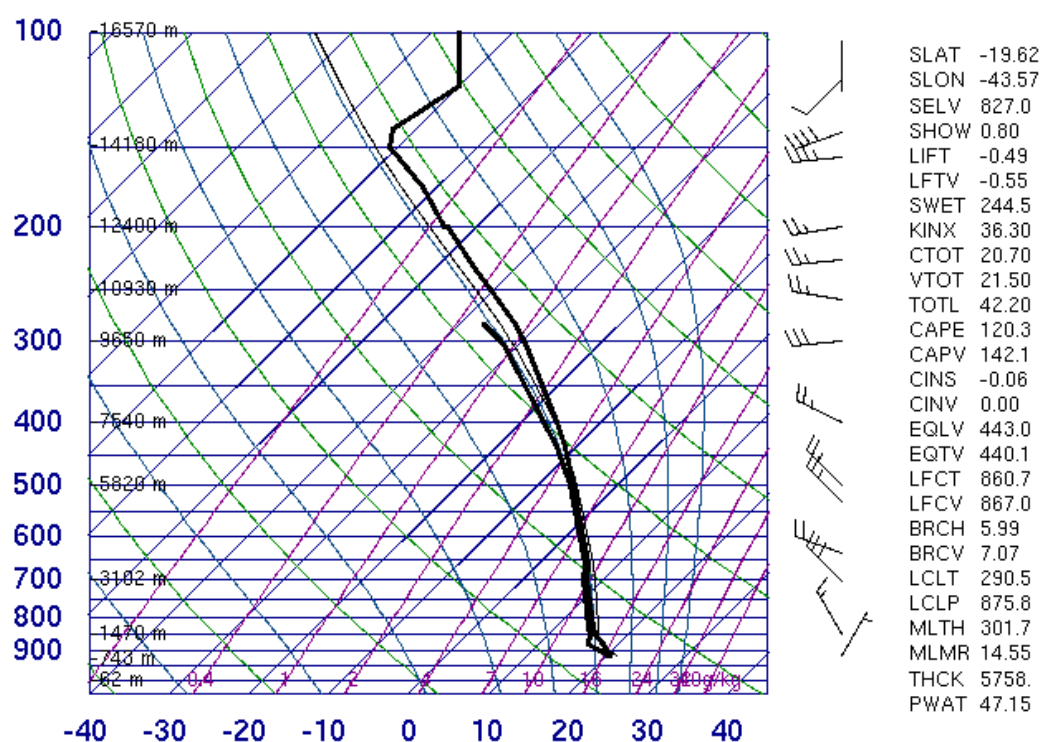


Diagrama Skew-T, Aeroporto Internacional de Confins (03/01/1997 12UTC)
 Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de Wyoming

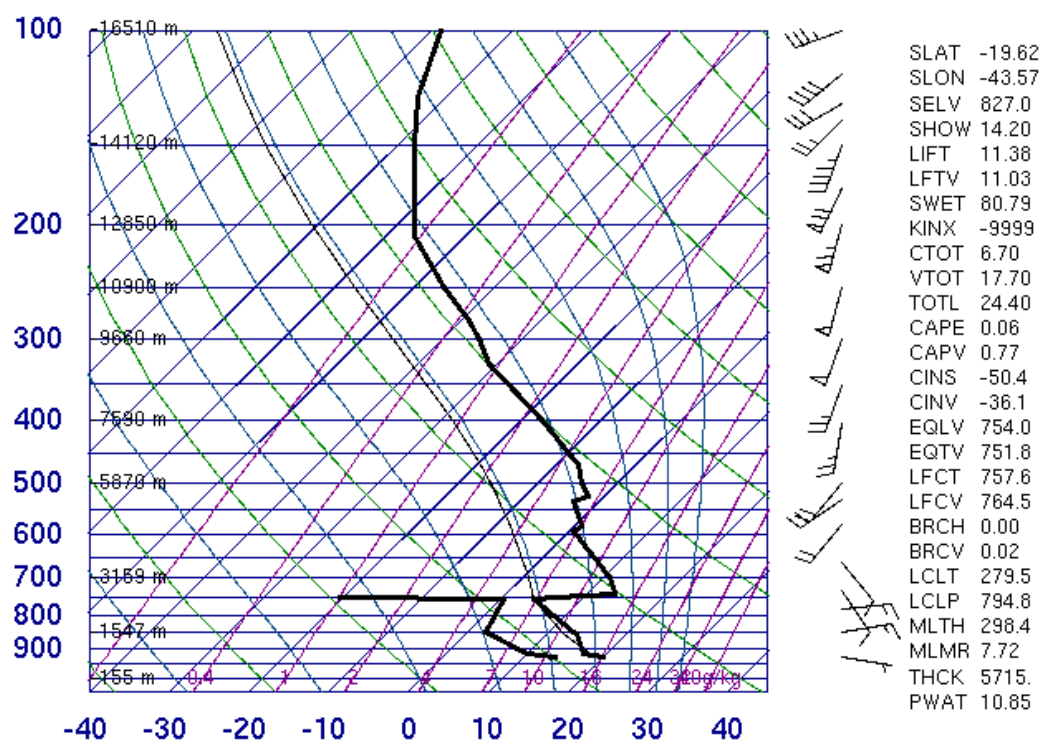


Diagrama Skew-T, Aeroporto Internacional de Confins (09/07/1997 12UTC)
 Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de Wyoming

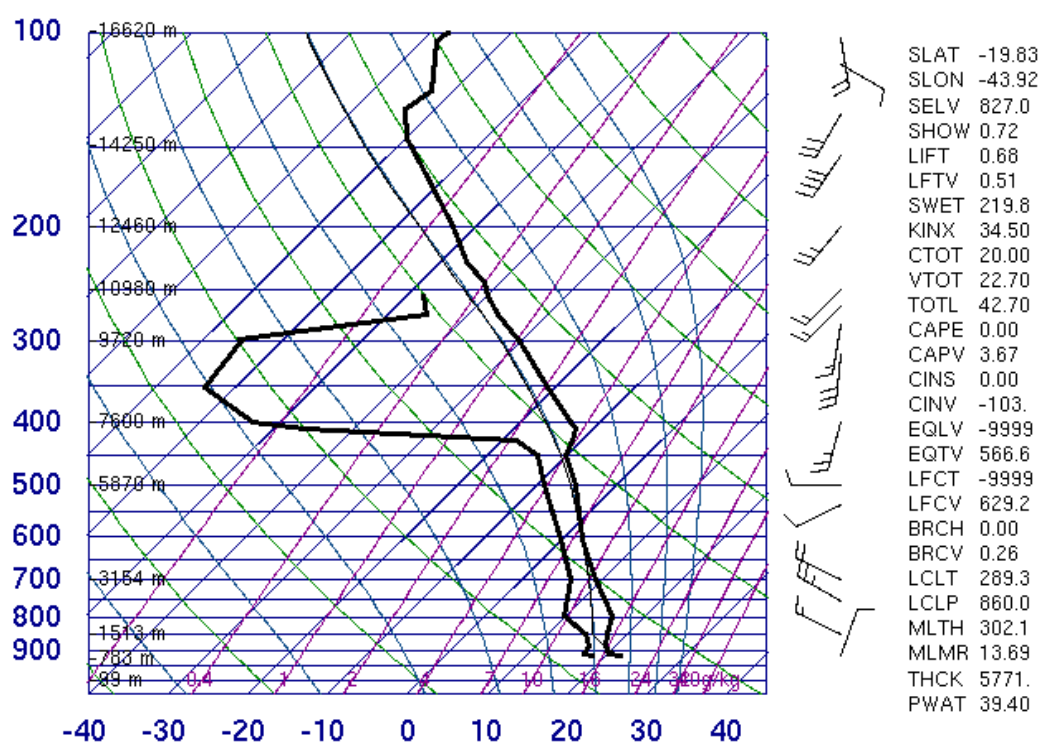


Diagrama Skew-T, Aeroporto Internacional de Confins (12/01/2005 12UTC)
Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de Wyoming

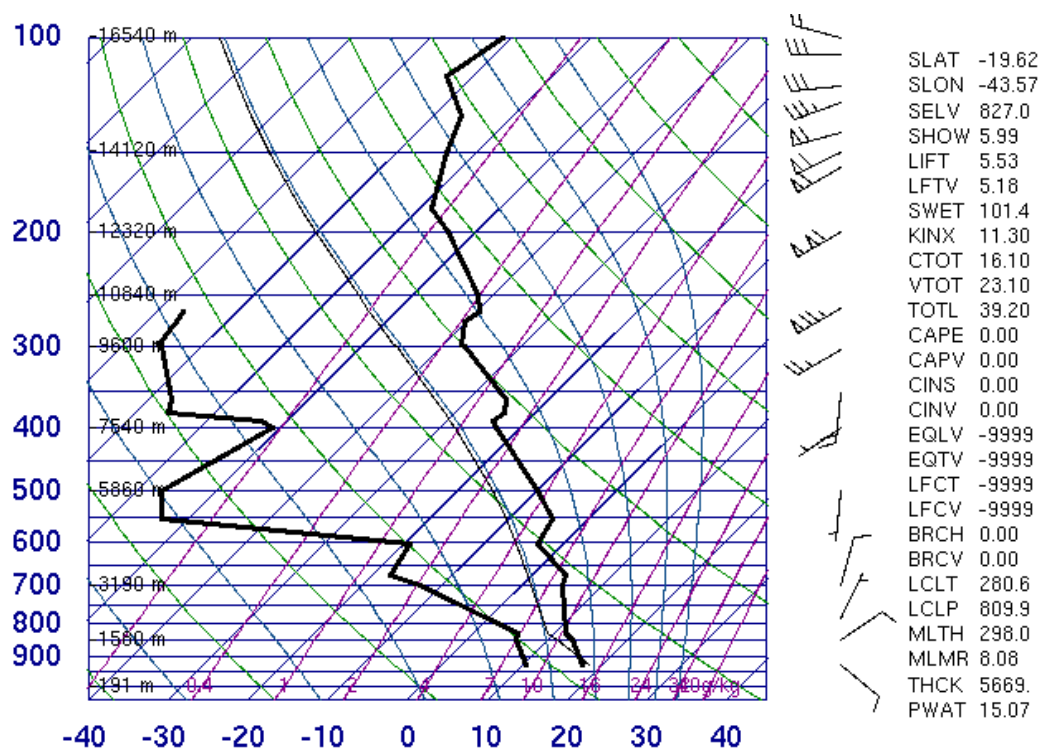
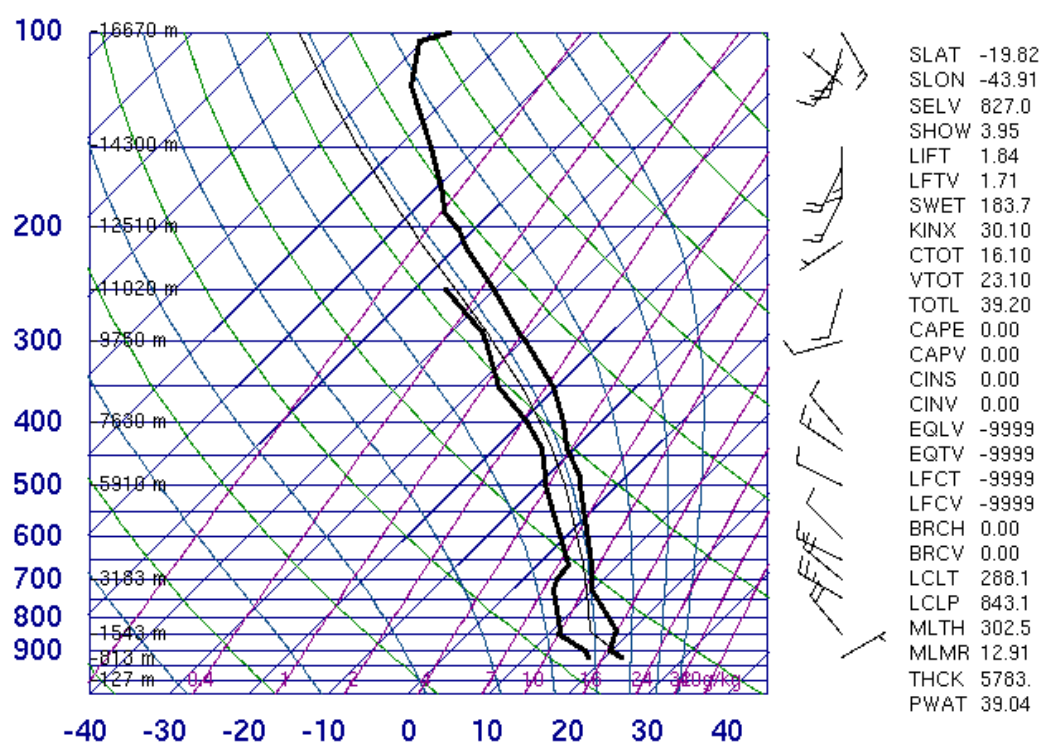


Diagrama Skew-T, Aeroporto Internacional de Confins (12/06/2005 12UTC)
Fonte: Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de Wyoming



ANEXO B: Dados das estações meteorológicas

Dados de direção e velocidade do vento da estação de Lourdes						
Dia	vento			vento		
	direção horária (graus)			velocidade horária (m/s)		
	12:00	18:00	24:00	12:00	18:00	24:00
09/01/1987	315	315	90	1,6	2	0,8
10/01/1987	45	315	270	1	1	0,8
11/01/1987	90	315	0	1	1,5	0
12/01/1987	360	90	360	1,3	2	0,7
13/01/1987	270	315	135	1,6	1,5	0,7
15/07/1987	135	90	90	1,3	2	0,5
16/07/1987	90	315	90	1,6	1	0,7
17/07/1987	90	315	90	1	1,6	1
18/07/1987	90	360	90	0,5	1,3	0,7
19/07/1987	180	90	180	0,5	0,8	0,5
02/01/1997	315	270	45	1,5	1,6	1,5
03/01/1997	90	45	45	1,5	1,6	0,5
04/01/1997	0	315	C	1,0	1,0	0,0
05/01/1997	0	0	C	1,0	1,0	0,0
06/01/1997	270	270	180	1,3	0,8	0,8
06/07/1997	45	45	90	3,5	0,8	2,1
07/07/1997	90	90	45	1,6	0,8	1,6
08/07/1997	90	90	45	2,6	1,5	1,6
09/07/1997	90	90	45	2,0	1,6	1,6
10/07/1997	90	90	45	2,0	0,8	1,5
12/01/2007	360	45	45	0,8	2,1	0,8
13/01/2007	315	315	270	0,8	2,1	0,3
14/01/2007	315	315	270	1,6	2	0,7
15/01/2007	315	45	360	2	1,3	0,5
16/01/2007	315	360	90	1,3	1,6	1,3
17/06/2007	90	90	45	2,6	2,5	0,3
18/06/2007	90	90	90	3	0,7	2,3
19/06/2007	90	90	90	1,8	3,1	0,7
20/06/2007	45	90	90	3,3	1,6	1,8
21/06/2007	135	90	90	3,1	0,8	1,5

Fonte: 5º DISME/INMET

Dados de direção e velocidade do vento da estação de Sete Lagoas						
Dia	vento			vento		
	direção horária (graus)			velocidade horária (m/s)		
	12:00	18:00	24:00	12:00	18:00	24:00
09/01/1987	360	225	135	1,5	1,0	1,0
10/01/1987	180	135	180	1,0	1,0	1,0
11/01/1987	45	225	270	2,1	1,5	1,0
12/01/1987	360	315	C	2,6	2,6	0
13/01/1987	180	225	180	1,0	2,1	1,0
15/07/1987	135	45	90	1,0	2,6	1,0
16/07/1987	90	225	180	0,5	1,0	0,5
17/07/1987	90	315	C	2,1	1,5	0
18/07/1987	180	225	180	1,0	2,1	1,0
19/07/1987	C	180	135	0	1,0	1,0
02/01/1997	315	C	360	1,5	0	2,1
03/01/1997	315	360	225	1,5	3,1	0,5
04/01/1997	315	225	C	1,5	1,5	0
05/01/1997	315	225	45	1,5	2,6	2,6
06/01/1997	45	315	270	2,1	1,5	0,5
06/07/1997	90	360	C	2,6	1,5	0
07/07/1997	180	90	C	0,5	3,1	0
08/07/1997	135	45	C	2,6	3,6	0
09/07/1997	90	45	135	2,1	3,6	1
10/07/1997	90	45	C	2,6	2,1	0
12/01/2007	360	315	360	1,5	0,5	0
13/01/2007	360	360	360	1,0	0,5	0
14/01/2007	360	360	360	1,0	2,6	0
15/01/2007	360	360	360	0,5	0	0
16/01/2007	360	45	360	0	2,6	0
17/06/2007	180	90	360	1,5	3,6	0
18/06/2007	180	180	360	1,0	1,5	0
19/06/2007	135	90	360	1,0	4,6	0
20/06/2007	90	90	360	2,6	4,1	0
21/06/2007	90	90	360	2,6	3,1	0

Fonte: 5º DISME/INMET

Dados de direção e velocidade do vento da estação de Florestal

Dia	vento			vento		
	direção horária (graus)			velocidade horária (m/s)		
	12:00	18:00	24:00	12:00	18:00	24:00
09/01/1987	315	45	315	1,0	1,0	1,0
10/01/1987	315	135	270	1,0	1,0	1,0
11/01/1987	135	45	270	1,0	1,0	1,0
12/01/1987	360	360	315	1,0	1,0	1,0
13/01/1987	135	270	270	3,0	1,0	1,0
15/07/1987	225	45	270	1,0	1,0	1,0
16/07/1987	315	360	315	1,0	1,0	1,0
17/07/1987	315	360	225	1,0	1,0	1,0
18/07/1987	270	45	225	1,0	1,0	1,0
19/07/1987	270	135	270	1,0	1,0	1,0
02/01/1997	315	315	315	1,0	1,0	1,0
03/01/1997	315	315	315	1,0	1,0	1,0
04/01/1997	315	315	315	1,0	1,0	1,0
05/01/1997	360	315	315	1,0	1,0	1,0
06/01/1997	360	45	45	1,0	1,0	1,0
06/07/1997	135	315	225	2,0	1,0	1,0
07/07/1997	90	315	315	1,0	1,0	1,0
08/07/1997	360	315	315	3,0	2,0	1,0
09/07/1997	90	45	45	1,0	2,0	1,0
10/07/1997	135	90	360	1,0	1,0	1,0

Fonte: 5º DISME/INMET

Dados de direção e velocidade do vento da estação de Divinópolis

Dia	vento			vento		
	direção horária (graus)			velocidade horária (m/s)		
	12:00	18:00	24:00	12:00	18:00	24:00
02/01/1997	360	360	C	3,0	2,0	0,0
03/01/1997	135	180	C	3,0	2,0	0,0
04/01/1997	C	360	360	0,0	3,0	2,0
05/01/1997	360	225	C	3,0	2,0	0,0
06/01/1997	360	C	180	1,0	0,0	1,0
06/07/1997	C	C	C	0,0	0,0	0,0
07/07/1997	C	C	C	0,0	0,0	0,0
08/07/1997	C	45	45	0,0	2,0	2,0
09/07/1997	C	90	90	0,0	2,0	1,0
10/07/1997	C	45	C	0,0	2,0	0,0
12/01/2007	360	315	90	4,0	2,0	2,0
13/01/2007	360	360	315	4,0	4,0	1,0
14/01/2007	360	360	360	3,0	4,0	1,0
15/01/2007	360	225	225	2,0	2,0	4,0
16/01/2007	360	45	315	1,0	2,0	1,0
17/06/2007	360	90	360	3,0	4,0	2,0
18/06/2007	360	360	45	3,0	2,0	3,0
19/06/2007	360	360	360	2,0	4,0	3,0
20/06/2007	360	360	45	2,0	2,0	6,0
21/06/2007	360	45	45	2,0	2,0	3,0

Fonte: 5º DISME/INMET