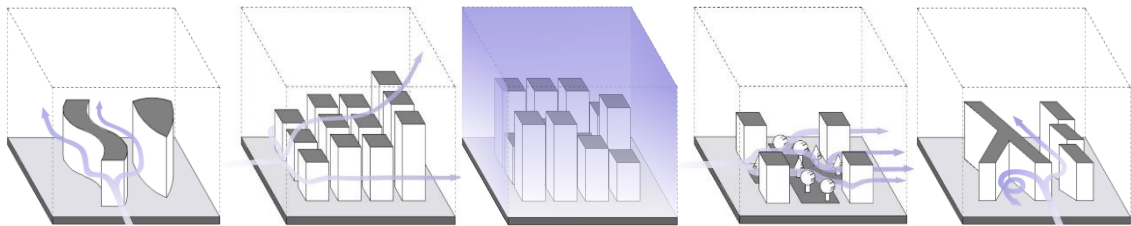




LISBOA

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA



## **Clima Urbano e Ordenamento do Território na Metrópole de São Paulo**

**Rafael Gonçalves Santos**

Orientador(es): Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Prof.ª Doutora Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Prof.ª Doutora Magda Adelaide Lombardo

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia, especialidade de  
Geografia Física



## **Clima Urbano e Ordenamento do Território na Metrópole de São Paulo**

**Rafael Gonçalves Santos**

Orientador(es): Prof. Doutor António Manuel Saraiva Lopes

Prof.<sup>a</sup> Doutora Alessandra Rodrigues Prata Shimomura

Prof.<sup>a</sup> Doutora Magda Adelaide Lombardo

Tese especialmente elaborada para obtenção do grau de Doutor em Geografia, especialidade de Geografia Física.

Júri:

Presidente: Doutor José Luís Gonçalves Moreira da Silva Zêzere, Professor Catedrático e membro do Conselho Científico do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.

Vogais:

- Doutor Francisco de Assis Mendonça, Professor Titular do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná, Brasil;
- Doutor André Naghi Lopes dos Santos Nouri, Assistant Professor, Faculty of Art, Design and Architecture, Bilkent University, Turquia;
- Doutora Maria João Alves Pessanha Alcoforado Calhau, Professora Catedrática Aposentada do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa;
- Doutor Marcelo Henrique Carapito Martinho Fragoso, Professor Auxiliar do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa;
- Doutor António Manuel Saraiva Lopes, Professor Associado do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, orientador.

Esta tese foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) / Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) - Governo do Brasil.



## AGRADECIMENTOS

A minha admiração e os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. António Lopes, pela oportunidade, paciência e compreensão que contribuíram para a realização deste trabalho e por todo apoio em superar meus desafios e expandir meus horizontes do conhecimento.

De igual modo, reconheço e agradeço todo o carinho, paciência e amizade prestada pela Profa. Dra. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura no desenvolvimento desta tese, na pesquisa de campo e na revisão criteriosa do trabalho.

À Profa. Dra. Magda Adelaide Lombardo pela oportunidade, carinho e confiança e por ser a precursora e mediadora da realização deste doutorado em Lisboa.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela oportunidade cedida e o financiamento deste trabalho.

Ao Professor Ezequiel Correia pela amizade e toda a ajuda com a operacionalização técnica em SIG, pelo apoio, sugestões e discussões em temas relevantes desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Dieter Scherer e toda a equipe do Institut für Ökologie der Technischen Universität Berlin, por todo o conhecimento adquirido e a troca de experiências.

À Prof. Dra. Alessandra Battisti e os colegas do Dipartimento di Pianificazione, design, tecnologia dell'architettura Facoltà di Architettura de La Sapienza di Roma, pela oportunidade e conhecimentos adquiridos.

Ao Tiago Faria pelo indispensável apoio técnico e gráfico no decorrer do trabalho. Aos meus queridos amigos que foram fundamentais em todo meu progresso, muito obrigado pelo apoio e por sempre estarem comigo.

Aos meus familiares por todo amor, suporte e compreensão durante toda minha vida em especial minha mãe Vana José Gonçalves Santos.

A todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O acelerado processo de urbanização ocorrido no século XX em São Paulo, transformou a capital da província cafeeira do Brasil na atual maior metrópole do continente americano. Este intenso processo de transformação e a ausência de ordenamento do território com vistas às questões ambientais, fizeram de São Paulo um espaço de intensos contrastes, que resultam atualmente em seus diversos problemas ambientais, dentre eles a questão da Ilha de Calor Urbano, a poluição do ar e os riscos climáticos. Esta tese teve como objetivo contribuir com o ordenamento do território na Metrópole de São Paulo a partir do estudo da morfologia urbana e a relação com a temperatura das superfícies ( $T_{SUP}$ ) e a ventilação natural. A forma urbana (estruturas, tecidos e coberturas) quando planejada em conjunto com as componentes da climatologia urbana pode traduzir-se numa importante ferramenta de gestão do meio urbano e colaborar na redução da  $ICU_{SUP}$ , com reflexos na saúde e qualidade de vida, na eficiência energética e no desenvolvimento sustentável. Os métodos, técnicas e procedimentos aplicados envolveram o tratamento de diferentes tipos de dados, *software* e técnicas para execução de cada análise. Em SIG, os resultados foram extraídos para uma grelha composta por células que possibilitaram reunir diferentes informações em uma mesma unidade de análise. Esta ferramenta permite o monitoramento e atualização dos valores das propriedades morfoclimáticas e a construção de uma base de dados para futuras análises multidisciplinares. Os resultados da  $T_{SUP}$ , ventilação natural e da análise morfoclimática foram discutidos por valores globais e em seguida discutidos de acordo com a delimitação por macroáreas do Plano Diretor Estratégico de São Paulo. A cidade apresenta um núcleo central com elevada  $T_{SUP}$  e baixa capacidade de ventilação natural e os maiores índices para todas propriedades morfoclimáticas. Em regiões próximas a Avenida Paulista, o efeito topográfico e o perfil de adensamento vertical modificam o padrão das  $T_{SUP}$  e a ventilação natural, com reflexos nas áreas envolventes, principalmente nos distritos que compõem o antigo centro da cidade. O atual macrozoneamento generaliza importantes contrastes morfoclimáticos, os quais mesmo ao nível da subdivisão por distritos não seria suficiente, devido a diversidade de combinações morfológicas de espaços urbanos. Um último momento destinou-se a estabelecer uma proposta de ordenamento morfoclimático do território e delimitação das áreas prioritárias em futuras intervenções urbanísticas, áreas de monitoramento e requalificação e áreas de manutenção dos atuais índices morfoclimáticos, relacionados diretamente com o impacto da densidade da forma urbana no clima e as possibilidades de corredores de ventilação para dispersão de poluentes e dissipação de calor. Espera-se que os resultados possam ser utilizados como instrumentos de apoio na formulação de políticas públicas, como por exemplo, na revisão do atual Plano Diretor Municipal (PDE, 2014) e que os modelos apresentados possam vir a integrar futuras análises em outras cidades brasileiras e metrópoles tão complexas como São Paulo.

**Palavras-Chave:** Metrópole de São Paulo; clima urbano, morfologia urbana, temperatura de superfície, ventilação natural; ordenamento do território; orientações climáticas.

## ABSTRACT

The accelerated urbanization process that occurred in the twentieth century in Sao Paulo, transformed the capital of the coffee province of Brazil into the actual largest metropolis of the American continent. This intense transformation process and the lack of spatial planning for environmental issues, made Sao Paulo a space of intense contrasts, which currently result in its several environmental problems, including the questions about Urban Heat Island, air pollution and climate risks. This thesis has as objective to contribute to the spatial planning in the Sao Paulo Metropolis starting from the study of urban morphology and the relationship with surface temperature ( $T_{SUP}$ ) and the natural ventilation. The urban form (structures, fabrics and covers) when planned together with the urban climatology components can be an important tool for urban management and contribute to the reduction of  $ICU_{SUP}$ , with reflection on the health and life quality, energetic efficiency and sustainable development. The applied methods, techniques and procedures involved the treatment of different types of data, software and techniques to perform each analysis. In GIS, the results were extract to a grid composed of cells that made it possible to gather different information in the same unit of analysis. This handy tool allows the monitoring and updating of morphoclimatic property values and the construction of a database for future multidisciplinary analyzes. The results of  $T_{SUP}$ , natural ventilation and morphoclimatic analysis were debate by global values and then discussed according to the macro-area delimitation of Sao Paulo Strategic Director Plan. The city presents a central core with high  $T_{SUP}$ , low natural ventilation capacity and the highest indices for all morphoclimatic properties. In nearest regions of Paulista Avenue, the topographic effect and the vertical density profile modify the  $T_{SUP}$  pattern and natural ventilation, with reflections in the surrounding areas, especially in the districts that compose the old city center. The current macrozoning generalizing important morphoclimatic contrasts, which even at the level of subdivision by districts would not be enough, due to the diversity of morphological urban spaces combinations. A final moment was intend to establish a proposal for territory morphoclimatic planning and delimitation of priority areas in future urban interventions, monitoring and requalification areas and maintenance of current morphoclimatic indices, directly related to the impact of urban shape density on climate and the possibilities of ventilation corridors for pollutant dispersion and heat dissipation. It is expect that the results may be use as a support instrument in the formulation of public policies, such as the revision of the current Municipal Director Plan (PDE, 2014) and that the models presented may integrate future analyzes in other Brazilian cities and complex metropolises as Sao Paulo city.

**Key words:** Metropolis of Sao Paulo; urban climate, urban morphology, surface temperature, natural ventilation; land use planning; climate orientations.

## ÍNDICE GERAL

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
O ESPAÇO URBANO COMO UM PALCO DE TRANSFORMAÇÕES	1
O IMPACTE DA URBANIZAÇÃO NAS QUESTÕES AMBIENTAIS	2
A IDEIA DE CIDADE COMO UM ORGANISMO VIVO EVOLUTIVO	3
AS TRANSFORMAÇÕES URBANAS E A SUSTENTABILIDADE EM FOCO	5
I.1. JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÕES	6
OS DESAFIOS DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO NA METRÓPOLE DE SÃO PAULO	8
O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO PARA FINS CLIMÁTICOS	9
I.2. QUESTÕES DE PESQUISA E HIPÓTESES	10
I.3. OBJETIVO DA PESQUISA	12
I.4. ESTRUTURA DA TESE	13
<b>CAPÍTULO I – A MORFOLOGIA URBANA E O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO</b>	<b>15</b>
1.1. A MORFOLOGIA DOS ESPAÇOS URBANOS	15
1.2. AS ESTRUTURAS URBANAS E OS ELEMENTOS FÍSICOS FUNDAMENTAIS	16
1.2.1. O SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS (SEU)	18
SUBSISTEMA DE ESPAÇOS CONSTRUÍDOS (SEC)	19
SUBSISTEMA DE ESPAÇOS DE INTEGRAÇÃO URBANA (SEIU)	20
SUBSISTEMA DE ESPAÇOS LIVRES DE CONSTRUÇÃO (SELC)	21
1.3. OS TECIDOS URBANOS E A INTERAÇÃO DOS ELEMENTOS FÍSICOS FUNDAMENTAIS DA MORFOLOGIA URBANA	23
1.4. O USO DA FORMA URBANA E A RELAÇÃO FUNCIONAL DOS ESPAÇOS URBANOS	23
1.5. OS TIPOS DE ESTUDOS PRESENTES NA CONSTRUÇÃO DO CAMPO DA MORFOLOGIA URBANA	24
1.6. A DENSIDADE URBANA APLICADA AO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	26
1.7. O SIG NA BASE DAS FUTURAS ABORDAGENS EM MORFOLOGIA URBANA	28
1.8. A MORFOLOGIA URBANA COMO UM CAMPO MULTIDISCIPLINAR FUNDAMENTAL AO ESTUDO DAS CIDADES	29
<b>CAPÍTULO II – O CLIMA URBANO: A RELAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E O VENTO COM A FORMA URBANA</b>	<b>31</b>
2.1. A ATMOSFERA URBANA E AS ESCALAS TEMPORAIS E ESPACIAIS DO CLIMA	31
2.2. A FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANO (ICU)	34
2.2.1. OS CONTROLES DA ICU <sub>SUP</sub> E A RELAÇÃO COM A MORFOLOGIA URBANA EM MESO ESCALA	36
2.3. AS INTERAÇÕES ENTRE A ATMOSFERA E A TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES URBANAS	37
2.4. A VENTILAÇÃO URBANA E O IMPACTO NA DISSIPACÃO DE CALOR E POLUENTES	40
2.5. A IMPORTÂNCIA DA ANÁLISE DA T <sub>SUP</sub> E A VENTILAÇÃO NATURAL PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	42
<b>CAPÍTULO III – A ANÁLISE MORFOCLIMÁTICA DOS ESPAÇOS URBANOS</b>	<b>43</b>
3.1. A RELAÇÃO DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES (T <sub>SUP</sub> ) E A MORFOLOGIA URBANA	43
3.1.1. AS ESTRUTURAS URBANAS E O PAPEL DAS PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E ESPACIAIS NA T <sub>SUP</sub>	43
3.1.2. A RELAÇÃO DO TECIDO URBANO E AS TEXTURAS DAS SUPERFÍCIES COM A T <sub>SUP</sub>	44
3.1.3. AS COBERTURAS URBANAS E O IMPACTE NA T <sub>SUP</sub>	45
3.2. A RELAÇÃO DA MORFOLOGIA URBANA COM VENTILAÇÃO NATURAL EM ESCALAS LOCAIS E MICRO	47
3.2.1. O IMPACTE DAS ESTRUTURAS URBANAS NO FLUXO DE AR	47
3.2.2. O TECIDO URBANO E O EFEITO DAS TEXTURAS NA VENTILAÇÃO NATURAL	49
3.2.3. AS COBERTURAS URBANAS E O IMPACTE NA VENTILAÇÃO NATURAL	50
3.3. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DAS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS	51
3.3.1. AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DAS ESTRUTURAS URBANAS (GEOMETRIAS E ESPACIALIDADES)	52
3.3.2. AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DOS TECIDOS URBANOS (TEXTURAS E AERODINÂMICA)	57

3.3.3.	AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DAS COBERTURAS URBANAS (OCUPAÇÃO E ORGANIZAÇÃO)	63
3.4.	A MORFOLOGIA URBANA APLICADA AO CONTEXTO CLIMÁTICO	69
<b>CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS</b>		<b>71</b>
4.1.	ENQUADRAMENTO ÁREA DE ESTUDOS EM ANÁLISE: METRÓPOLE DE SÃO PAULO - MSP	73
4.1.1.	O CONTEXTO CLIMÁTICO DA METRÓPOLE DE SÃO PAULO	77
4.2.	AQUISIÇÃO E MONTAGEM DE BANCOS DE DADOS	82
4.3.	INFRAESTRUTURAS LABORATORIAIS, MATERIAIS E SOFTWARE UTILIZADOS	83
4.4.	MODELO PARA A ANÁLISE DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES ( $T_{SUP}$ )	83
4.5.	MODELO DA VENTILAÇÃO NATURAL NA METRÓPOLE DE SÃO PAULO	899
4.6.	AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DA FORMA URBANA	93
4.7.	MODELO DE SUSCEPTIBILIDADE AO ESTRESSE TÉRMICO	99
4.8.	MODELO DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA	99
4.9.	MODELO DE CORREDORES DE VENTILAÇÃO URBANA	101
4.10.	CARTOGRAFIA DE SÍNTESE E ORIENTAÇÃO AO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	102
<b>CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>		<b>71103</b>
5.1.	ANÁLISE DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES ( $T_{SUP}$ )	103
5.2.	VENTILAÇÃO NATURAL NA METRÓPOLE DE SÃO PAULO (MSP)	106
5.3.	ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE AO ESTRESSE TÉRMICO	110
5.4.	ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DO SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS DE SÃO PAULO	111
5.5.	ANÁLISE DO ÍNDICE DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA	124
5.6.	ANÁLISE DE CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS	125
5.7.	ANÁLISE DA COINCIDÊNCIA ESPACIAL ENTRE AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS COM A $T_{SUP}$ E VENTILAÇÃO NATURAL	126
5.8.	CARACTERIZAÇÃO MORFOCLIMÁTICA DO MACROZONEAMENTO DO PLANO DIRETOR ESTRATÉGICO DE SÃO PAULO (PDE, 2014)	128
5.9.	CORREDORES DE VENTILAÇÃO URBANA	158
5.10.	CONSIDERAÇÕES A CERCA DOS RESULTADOS	160
<b>CAPÍTULO VI – ORIENTAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO</b>		<b>165</b>
6.1.	SUSCEPTIBILIDADE AO ESTRESSE TÉRMICO	165
6.2.	DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA	166
6.3.	CARTOGRAFIA DE SÍNTESE E ORIENTAÇÕES AO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	169
<b>CONCLUSÕES</b>		<b>175</b>
	PERSPECTIVAS DE INVESTIGAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	177
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>181</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – ELEMENTOS FÍSICOS FUNDAMENTAIS EM MORFOLOGIA URBANA: A) EDIFÍCIOS; B) LOTES OU PARCELAS; C) VIAS E D) ESPAÇOS LIVRES DE EDIFICAÇÃO. ....	17
FIGURA 2 – NÍVEIS DE RESOLUÇÃO DAS ESTRUTURAS FÍSICAS FUNDAMENTAIS DA FORMA URBANA: A) EDIFÍCIOS E BLOCOS; B) LOTES E VIAS; C) REGIÕES OU ZONAS E D) CIDADE. ....	18
FIGURA 3 – EXEMPLOS DE TIPOLOGIAS DO SUBSISTEMA DE ESPAÇOS CONSTRUÍDOS EM SÃO PAULO CONSIDERANDO DIMENSÕES FÍSICAS, GEOMETRIA, DISTRIBUIÇÃO E ORIENTAÇÃO. ....	19
FIGURA 4 – TIPOS BÁSICOS DE ESPAÇOS DE INTEGRAÇÃO URBANA SEGUNDO A TIPOLOGIA ABCD - DE UM CENTRO URBANO (À ESQUERDA) PARA A PERIFERIA (À DIREITA). FONTE: MARSHALL (2004, p. 84). ....	20
FIGURA 5 – TIPOS BÁSICOS DE ESPAÇOS DE INTEGRAÇÃO URBANA EM SÃO PAULO DE ACORDO COM O MODELO DE TIPOLOGIA ABCD DE MARSHALL (2004, p. 84).....	21
FIGURA 6 – TIPOS DE SUBSISTEMAS DE ESPAÇOS LIVRES DE CONSTRUÇÃO (SELC): I) IMAGEM DE SATÉLITE IKONOS DE SÃO PAULO; II) ESPAÇOS LIVRES DE CONSTRUÇÃO; III) ESPAÇOS VERDES E IV) ESPAÇOS LIVRES PÚBLICOS E PRIVADOS. ....	22
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO DOS ESTRATOS DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA. FONTE: FERNANDO, 2010. ....	33
FIGURA 8 – AS ILHAS DE CALOR DO AR E DAS SUPERFÍCIES. FONTE: OKE ET AL., (2017, p. 199). ....	35
FIGURA 9 – DIFERENÇAS DE TEMPERATURAS DO AR ( $T_A$ ) E DAS SUPERFÍCIES ( $T_{sup}$ ) ENTRE A ÁREA URBANA E RURAL (A), PARA PERÍODOS DIURNOS E NOTURNOS (B). FONTE: MODIFICADO DE OKE ET AL. (2017, p. 197). ....	35
FIGURA 10 – BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIE (BES): A) RURAL E B) URBANA. FONTE: OKE ET AL., (2017, p. 157). ....	37
FIGURA 11 – BALANÇO RADIATIVO EM SUPERFÍCIES CONSTRUÍDAS. FONTE: ADAPTADO DE MARTINS (2014, p. 73). ....	37
FIGURA 12 – DIFERENÇAS DE PRESSÃO NO VENTO EM ÁREAS URBANAS E RURAIS. FONTE: FLEMING (2015, p. 51). ....	41
FIGURA 13 – O PERFIL DE VENTO NAS CIDADES E A RELAÇÃO CLI COM A DIMINUIÇÃO SIGNIFICATIVA NA VELOCIDADE DO VENTO. FONTE: NG ET AL., (2011). ....	41
FIGURA 14 – DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE DESACELERAÇÃO (A) E ACELERAÇÃO (B) DO VENTO. FONTE: FLEMING (2015, p. 9). ....	48
FIGURA 15 – EFEITOS DO FLUXO DE AR NOS ESPAÇOS ADJACENTES DE UM OBSTÁCULO CÚBICO ISOLADO: I) VISTA LATERAL COM FLUXO DE AR (A), MOSTRANDO A ZONA DE DESLOCAMENTO (B), A CAVIDADE (C) E A ZONA DE ESTEIRA (D); II) VISTA DOS EFEITOS NO FLUXO DE AR EM PLANTA PRÓXIMA AO NÍVEL DO SOLO; III) VISUALIZAÇÃO DO FLUXO COM O EDIFÍCIO ORIENTADO EM 45° PARA O FLUXO DE AR. FONTE: MODIFICADO DE OKE ET AL. (2017, p. 83). ....	48
FIGURA 16 – ORGANOGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DA ANÁLISE MORFOCLIMÁTICA. ....	52
FIGURA 17 – AUMENTO DA COMPLEXIDADE DA FORMA EM RELAÇÃO AO PERÍMETRO. FONTE: MARCH (2015). ....	53
FIGURA 18 – IMPACTO DE FORMAS COMPLEXAS (A) E REGULARES (B) NA VENTILAÇÃO NATURAL. ....	53
FIGURA 19 – VALORES DE COMPACIDADE RELATIVA DE FORMAS GEOMÉTRICAS. FONTE: PESSENLEHNER E MAHDAVI (2003). ....	54
FIGURA 20 – IMPACTOS DAS FORMAS COMPACTAS (A) E ESPARSAS NA VENTILAÇÃO NATURAL. ....	55
FIGURA 21 – DIFERENTES FORMAS DE ESCOAMENTO DO FLUXO DE AR NOS CANYONS URBANOS EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DAS ESTRUTURAS URBANAS. FONTE: FRANKHAUSER (2005). ....	56
FIGURA 22 – EFEITO DE BARREIRA DOS BLOCOS CONSTRUÍDOS ORIENTADOS NA DIREÇÃO DO VENTO PREDOMINANTE (A) E (B) ORIENTADOS PARA CANALIZAÇÃO E CONTINUIDADE DO FLUXO DE AR. ....	56
FIGURA 23 – RELAÇÃO ENTRE DA BAIXA (A) E ELEVADA (B) SINUOSIDADE DAS ESTRUTURAS CONSTRUÍDAS NO FLUXO DE AR. ....	57
FIGURA 24 – EFEITO DAS TEXTURAS LISAS (A) E RUGOSAS (B) NOS TECIDOS URBANOS NA VENTILAÇÃO NATURAL. ....	58
FIGURA 25 – EFEITOS DE CAPTURA DE RADIAÇÃO SOLAR DENTRO DE UM CANYON URBANO COM BAIXOS VALORES DE ALBEDO E UM ALTO SKY VIEW FACTOR (SVF) E UM CANYON URBANO EM SITUAÇÃO INVERSA. FONTE: CHOI ET AL., (2018). ....	59
FIGURA 26 – FLUXO DE AR EM CONTATO COM TECIDOS BAIXOS (A) E VERTICALIZADOS (B). ....	60
FIGURA 27 – A POROSIDADE E A RELAÇÃO COM A VENTILAÇÃO NATURAL DE ACORDO COM O BAIXO (A) E ELEVADO (B) VOLUME DE ESPAÇOS CONSTRUÍDOS NA CLI. ....	61
FIGURA 28 – EFEITOS DE OCLUSIVIDADE DOS ESPAÇOS URBANOS NO FLUXO DE AR. FONTE: OKE ET AL., (2017, p. 88). ....	62
FIGURA 29 – OCLUSIVIDADE E RELAÇÃO COM A VENTILAÇÃO NATURAL: A) BAIXA OCLUSIVIDADE E B) ELEVADA. ....	63
FIGURA 30 – IMPACTO DAS COBERTURAS PERMEÁVEIS (A) E IMPERMEÁVEIS NO VENTO (B). ....	64
FIGURA 31 – DIFERENTES DIMENSÕES DE INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO DA FORMA URBANA. FONTE: ARANTES (2006, p. 223). ....	65
FIGURA 32 – RELAÇÃO DE BAIXA (A) E ELEVADA (B) INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO COM A VENTILAÇÃO NATURAL. ....	66
FIGURA 33 – BAIXA PROXIMIDADE (A) E ELEVADA PROXIMIDADE DAS COBERTURAS URBANAS E A RELAÇÃO COM O VENTO. ....	67
FIGURA 34 – PADRÕES DE CONECTIVIDADE E ESPRAIAMENTO DAS COBERTURAS URBANAS. FONTE: THOMAS ET AL., (2007). ....	68

FIGURA 35 - NÍVEIS DE CONECTIVIDADE DAS COBERTURAS PRESENTES NOS EDIFÍCIOS E INFLUÊNCIA NOS CAMPOS DE VENTO (A – BAIXA E B – ELEVADA). .....	68
FIGURA 36 - ETAPAS E PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIES, VENTILAÇÃO NATURAL E PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICA. ....	72
FIGURA 37 - ÁREA DE ESTUDOS DA ESQUERDA PARA DIREITA: BRASIL, ESTADO DE SÃO PAULO, REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, DISTRITOS CENTRAIS E ÁREA DO CENTRO ANTIGO DA METRÓPOLE DE SÃO PAULO. ....	73
FIGURA 38 - EXPANSÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO ENTRE 1905 – 2000. FONTE: MEYER ET AL, 2015. ....	75
FIGURA 39 – IMAGENS DO SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS NO CENTRO DE SÃO PAULO. ....	76
FIGURA 40 - UNIDADES CLIMÁTICAS NATURAIS: FONTE: ADAPTADO DO ATLAS DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (2002) E TARIFA E ARMANI, 2001. ....	78
FIGURA 41 - ETAPAS PARA FILTRAGEM E SELEÇÃO DAS IMAGENS LANDSAT: A) DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO; B) DELIMITAÇÃO DA COBERTURA DE NUVENS; C) FILTRAGEM DOS PIXELS; D) EXTRAÇÃO DAS ÁREAS SEM NUVENS. ....	84
FIGURA 42 - PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES. ....	85
FIGURA 43 - PROCESSO DE OBTENÇÃO DA TEMPERATURA DAS SUPERFÍCIES: I) $T_{SUP}$ PARA SENSORES LANDSAT; II) CLASSIFICAÇÃO DOS PIXELS; III) EXTRAÇÃO DOS VALORES POR PONTOS NO CENTROIDE DO PIXEL; E, IV) $T_{SUP}$ NA UNIDADE DE ANÁLISE. ....	88
FIGURA 44 - WORKFLOW PARA ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL EM MEIO URBANO. ....	89
FIGURA 45 - GERAÇÃO DOS INPUTS PARA O WASP: I) INTERFACE DO WASP, CLIMATE ANALYST E MAPEDITOR; II) CURVAS DE NÍVEL; III) ERROS VERIFICADOS NO MAPEDITOR; E IV) BASE DE DADOS CORRIGIDA PARA ANÁLISE DA DIREÇÃO E VELOCIDADE DOS VENTOS. ....	92
FIGURA 46 – HIPSOMETRIA E LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO DO AEROPORTO DE CONGONHAS EM SÃO PAULO.....	93
FIGURA 47 – MÉTRICAS DA ANÁLISE MORFOCLIMÁTICA: I) ALTURA DOS EDIFÍCIOS NO SEC – SUBSISTEMA DE ESPAÇOS CONSTRUÍDOS; II) ÁREAS DOS LOTES DE IMPLANTAÇÃO; III) SELC – SUBSISTEMA DE ESPAÇOS LIVRES DE CONSTRUÇÃO; IV) SEIU – SUBSISTEMA DE ESPAÇOS DE INTEGRAÇÃO URBANA (LOGRADOUROS E ÁREAS NÃO EDIFICADAS); V) ESPAÇOS CONSTRUÍDOS DISSOLVIDOS EM BLOCOS DE CONSTRUÇÃO CONTÍNUOS; VI) BLOCOS CONTÍNUOS REGULARIZADOS EM FORMAS ESFÉRICAS; VII) BLOCOS CONTÍNUOS REGULARIZADOS EM FORMA RETANGULAR; VIII) LINHAS PARALELAS E EQUIDISTANTES A CADA 20 METROS PARA DIREÇÕES CARDEAIS; IX) GRELHA COMO UNIDADES DE ANÁLISE - COMPOSTA CÉLULAS COM AS DIMENSÕES DE 100 DE ALTURA, LARGURA E PROFUNDIDADE. ....	96
FIGURA 48 - CRITÉRIOS PARA DELIMITAÇÃO DOS CORREDORES DE VENTILAÇÃO: I) PERFIL AERODINÂMICO DOS ESPAÇOS CONSTRUÍDOS; II) COMPRIMENTO DOS ESPAÇOS LIVRES DE CONSTRUÇÃO NAS DIREÇÕES CARDEAIS; III) VEGETAÇÃO EM MEIO URBANO COMO OBSTÁCULO PARA PROGRESSÃO DO AR.....	101
FIGURA 49 – MODELO PARA CARTOGRAFIA DE SÍNTESE FINAL AO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO. ....	102
FIGURA 50 - $T_{SUP}$ EM SÃO PAULO PARA O PERÍODO QUENTE E ÚMIDO ENTRE 1984 E 2017. ....	103
FIGURA 51 - $T_{SUP}$ EM SÃO PAULO PARA O PERÍODO FRIO E SECO ENTRE 1984 E 2017. ....	104
FIGURA 52 - MAPA DA $T_{SUP}$ MÉDIA EM SÃO PAULO ENTRE 1984 E 2017.....	105
FIGURA 53 – DADOS DE VENTO DA ESTAÇÃO DE CONGONHAS PARA 8 DIREÇÕES. ....	106
FIGURA 54 - MAPA DA VENTILAÇÃO NATURAL EM SÃO PAULO POR VALORES MÉDIOS PARA TODAS DIREÇÕES.....	107
FIGURA 55 - VENTILAÇÃO NATURAL EM SÃO PAULO COM VENTOS DE SUDESTE.....	108
FIGURA 56 - VENTILAÇÃO NATURAL EM SÃO PAULO COM VENTOS DE SUL.....	109
FIGURA 57 – ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE AO ESTRESSE TÉRMICO EM SÃO PAULO SEGUNDO A $T_{SUP}$ E A VENTILAÇÃO NATURAL....	110
FIGURA 58 - COMPACIDADE (Cp) GEOMÉTRICA DAS ESTRUTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	112
FIGURA 59 - COMPLEXIDADE (Cx) GEOMÉTRICA DAS ESTRUTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	113
FIGURA 60 - SINUOSIDADE (Sn) DAS ESTRUTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	114
FIGURA 61 - DIRECIONALIDADE (Dr) DAS ESTRUTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	115
FIGURA 62 - RUGOSIDADE AERODINÂMICA (Rg) DOS TECIDOS URBANOS EM SÃO PAULO. ....	116
FIGURA 63 - VERTICALIDADE (Vt) DOS TECIDOS URBANOS EM SÃO PAULO.....	117
FIGURA 64 - POROSIDADE (Po) DOS TECIDOS URBANOS EM SÃO PAULO.....	118
FIGURA 65 – OCLUSIVIDADE (Oc) DOS TECIDOS URBANOS EM SÃO PAULO, COM BASE NO RATIO H/W.....	119
FIGURA 66 – IMPERMEABILIDADE (Im) DAS COBERTURAS POR EDIFICADO EM SÃO PAULO.....	120
FIGURA 67 - INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO (Io) DAS COBERTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	121
FIGURA 68 – CONECTIVIDADE (Cn) DAS COBERTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	122
FIGURA 69 – PROXIMIDADE (Px) DAS COBERTURAS URBANAS EM SÃO PAULO. ....	123
FIGURA 70 – ÍNDICE DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA EM SÃO PAULO.....	124

FIGURA 71 – COINCIDÊNCIA ESPACIAL ENTRE A VENTILAÇÃO NATURAL E A $T_{SUP}$ COM AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS.....	127
FIGURA 72 – MACROZONAS (I) E MACROÁREAS (II) ESTABELECIDAS PELO PLANO DIRETOR ESTRATÉGICO DA METRÓPOLE DE SÃO PAULO. FONTE: PLANO DIRETOR ESTRATÉGICO - PDE (2014).....	128
FIGURA 73 – TIPOLOGIAS DE ESPAÇOS URBANOS DA MACROZONA DE ESTRUTURAÇÃO E QUALIFICAÇÃO URBANA (MZ1): I) MEM; II) MCU; III) MQU; E IV) MRVU. FONTE: PLANO DIRETOR ESTRATÉGICO - PDE (2014). ....	129
FIGURA 74 – TIPOLOGIAS DE ESPAÇOS URBANOS NA MACROZONA DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (MZ2): I) MRVRA; II) MCQUA; III) MCUUS; E IV) MPEN. FONTE: PLANO DIRETOR ESTRATÉGICO - PDE (2014).....	129
FIGURA 75 – LOCALIZAÇÃO DA M1 – MACROÁREA DE ESTRUTURAÇÃO METROPOLITANA (MEM). ....	130
FIGURA 76 – $T_{SUP}$ ESTACIONAL NA MACROÁREA DE ESTRUTURAÇÃO METROPOLITANA (MEM).....	130
FIGURA 77 – CLASSES DE VELOCIDADES DO VENTO POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE ESTRUTURAÇÃO METROPOLITANA (MEM). ....	131
FIGURA 78 - EXEMPLOS DE TIPOLOGIAS DO SUBSISTEMA DE ESPAÇOS CONSTRUÍDOS NA M1 – MEM. ....	132
FIGURA 79 – DIRECIONALIDADE (DR) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	132
FIGURA 80 – SINUOSIDADE (SN) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	133
FIGURA 81 – COMPACIDADE (CP) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	134
FIGURA 82 - PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA M1 – MACROÁREA DE ESTRUTURAÇÃO METROPOLITANA ....	135
FIGURA 83 - IMPERMEABILIDADE (IM) DAS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	135
FIGURA 84 - INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO (Io) DAS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	136
FIGURA 85 – LOCALIZAÇÃO DA M2 - MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC).....	137
FIGURA 86 – $T_{SUP}$ ESTACIONAL NA M2 - MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC).....	137
FIGURA 87 - CLASSES DE VELOCIDADES DO VENTO POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC). ....	138
FIGURA 88 - PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA M2 – MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC). ....	139
FIGURA 89 - TIPOLOGIAS SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC). ....	140
FIGURA 90 - RUGOSIDADE AERODINÂMICA (RG) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	140
FIGURA 91 - VERTICALIDADE (VT) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	141
FIGURA 92 - OCLUSIVIDADE (Oc) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	141
FIGURA 93 – POROSIDADE (Po) NO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	142
FIGURA 94 – LOCALIZAÇÃO DA M3 – MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU). ....	143
FIGURA 95 – $T_{SUP}$ NA MZ3 - MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU). ....	144
FIGURA 96 - VENTILAÇÃO NATURAL POR DIREÇÕES NA M3 - MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU). ....	144
FIGURA 97 - TIPOLOGIAS DO SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU).....	145
FIGURA 98 – COMPLEXIDADE (Cx) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	145
FIGURA 99 - PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DOS ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU).....	146
FIGURA 100 – LOCALIZAÇÃO DA M4 – MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU).....	147
FIGURA 101 - $T_{SUP}$ NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	148
FIGURA 102 - CLASSES DE VELOCIDADES DO VENTO POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	149
FIGURA 103 - TIPOLOGIAS DE ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	149
FIGURA 104 - ANÁLISE MORFOCLIMÁTICA NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	150
FIGURA 105 – CONECTIVIDADE (Cn) ENTRE AS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	151
FIGURA 106 – PROXIMIDADE (Px) ENTRE COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO.....	151
FIGURA 107 – LOCALIZAÇÃO DA MACROZONA DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (MPRA). ....	152
FIGURA 108 - $T_{SUP}$ NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (M5 - MRVURA). ....	153
FIGURA 109 - $T_{SUP}$ NA MACROÁREA DE CONTROLE E QUALIFICAÇÃO URBANA E AMBIENTAL (M6 - MCQUA).....	153
FIGURA 110 - CLASSES DE VELOCIDADES DO VENTO POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (M5 - MRVURA). ....	155
FIGURA 111 - CLASSES DE VELOCIDADES DO VENTO POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE CONTROLE E QUALIFICAÇÃO URBANA E AMBIENTAL (M6 - MCQUA).....	155
FIGURA 112 - EXEMPLOS DE TIPOLOGIAS DO SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS DA MACROZONA DE PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL.....	156

FIGURA 113 - PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (M5 - MRVURA).....	157
FIGURA 114 - PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE CONTROLE E QUALIFICAÇÃO URBANA E AMBIENTAL (M6 - MCQUA). ....	157
FIGURA 115 - MAPA DE CORREDORES DE VENTILAÇÃO URBANA EM SÃO PAULO.....	159
FIGURA 116 - SISTEMA DE ESPAÇOS URBANOS COM POSSIBILIDADE DE CORREDORES DE VENTILAÇÃO URBANA EM SÃO PAULO. ....	159
FIGURA 117 – SUSCEPTIBILIDADE AO ESTRESSE TÉRMICO PARA ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO EM SÃO PAULO.....	165
FIGURA 118 - DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA EM SÃO PAULO.....	166
FIGURA 119 - ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA ELEVADA. ....	167
FIGURA 120 - ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA HORIZONTAL ELEVADA. ....	167
FIGURA 121 - ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA VERTICAL ELEVADA. ....	168
FIGURA 122 - ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA MÉDIA. ....	168
FIGURA 123 - ESPAÇOS URBANOS NA MACROÁREA DE DENSIDADE URBANA MORFOCLIMÁTICA BAIXA. ....	169
FIGURA 124 - MAPA DO ZONEAMENTO MORFOCLIMÁTICO PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO EM SÃO PAULO. ....	170

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES URBANAS E SEUS FENÔMENOS CLIMÁTICOS URBANOS. ....	32
TABELA 2 - ALBEDO DE VÁRIOS TIPOS DE SUPERFÍCIES. FONTE: AYOADE (1983, P. 29). ....	39
TABELA 3 – VALORES DE ALBEDO E EMISSIVIDADE DE VÁRIOS TIPOS DE COBERTURAS PRESENTES NOS ESPAÇOS CONSTRUÍDOS E VIÁRIOS. FONTE: TRADUZIDO DE OKE ET AL., (2017, P. 129). ....	46
TABELA 4 - VALORES TÍPICOS DA RUGOSIDADE AERODINÂMICA EM MEIO URBANO. FONTE: (OKE ET AL., 2017, P. 103). ....	58
TABELA 5 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS MIRANTE DE SANTANA (1961 A 1990). FONTE: TARIFA E ARMANI (2001A). ....	79
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS LANDSAT 5 E 8. FONTE: USGS EARTH EXPLORER. ....	84
TABELA 7 – EQUAÇÕES DOS INDICADORES DE DESEMPENHO MORFOCLIMÁTICO. ....	97
TABELA 8 – PESOS UTILIZADOS PARA PONDERAÇÃO NA ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A ICU. ....	99
TABELA 9 - INDICADORES DAS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS DAS CLASSES EM ANÁLISE. ....	100
TABELA 10 – LIMIARES DAS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS PARA A ANÁLISE DE AGRUPAMENTO. ....	101
TABELA 11 – PERCENTAGEM DE VENTO PARA 8 DIREÇÕES DOS DADOS DA ESTAÇÃO DE CONGONHAS NO PERÍODO 2000 – 2010. ....	106
TABELA 12 – VENTILAÇÃO NATURAL POR CLASSE DE VELOCIDADE E DIREÇÃO EM SÃO PAULO. ....	108
TABELA 13 – COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS. ....	125
TABELA 14 - VENTILAÇÃO NATURAL NA M1 – MEM POR CLASSE DE VELOCIDADE E DIREÇÃO. ....	131
TABELA 15 – DIRECIONALIDADE (DR) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	132
TABELA 16 - SINUOSIDADE (SN) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	133
TABELA 17 – COMPACIDADE (CP) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	133
TABELA 18 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA M1 – MACROÁREA DE ESTRUTURAÇÃO METROPOLITANA. ....	134
TABELA 19 – IMPERMEABILIDADE (IM) DAS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	135
TABELA 20 - INTENSIDADE DE OCUPAÇÃO (IO) DAS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	136
TABELA 21 – VENTILAÇÃO NATURAL NA M2 – MUC POR CLASSE DE VELOCIDADE E DIREÇÃO. ....	138
TABELA 22 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA M2 – MACROÁREA DE URBANIZAÇÃO CONSOLIDADA (MUC). ....	139
TABELA 23 – RUGOSIDADE AERODINÂMICA (RG) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	141
TABELA 24 – VERTICALIDADE (VT) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	141
TABELA 25 – OCLUSIVIDADE (OC) DO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	142
TABELA 26 – POROSIDADE (PO) NO TECIDO URBANO POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	142
TABELA 27 – VENTILAÇÃO NATURAL POR DIREÇÕES NA MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU). ....	144
TABELA 28 – COMPLEXIDADE (CX) DAS ESTRUTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	145
TABELA 29 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE QUALIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO (MQU). ....	146
TABELA 30 – VALORES PARA VENTILAÇÃO NATURAL NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	148
TABELA 31 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA (MRVU). ....	150
TABELA 32 – VALORES DE CONECTIVIDADE ENTRE AS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	151
TABELA 33 – VALORES DE PROXIMIDADE ENTRE AS COBERTURAS URBANAS POR MACROÁREAS DE SÃO PAULO. ....	151
TABELA 34 – VENTILAÇÃO NATURAL NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (M5 - MRVURA). ....	154
TABELA 35 – VENTILAÇÃO NATURAL NA MACROÁREA DE CONTROLE E QUALIFICAÇÃO URBANA E AMBIENTAL (M6 - MCQUA). ....	154
TABELA 36 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE REDUÇÃO DA VULNERABILIDADE URBANA E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL (M5 - MRVURA). ....	156
TABELA 37 – PROPRIEDADES MORFOCLIMÁTICAS NA MACROÁREA DE CONTROLE E QUALIFICAÇÃO URBANA E AMBIENTAL (M6 - MCQUA). ....	156

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

Alb – Albedo

BES – Balanço de Energia em Superfície

CE - Camada Externa ou de Ekman

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

CI - Camada Interna

CFC - Camada de Inércia ou de Fluxos Constantes

CLA - Camada Limite da Atmosfera

CLI – Camada Limite Inferior Urbana

CLS – Camada Limite Superior Urbana

Cn – Conectividade das coberturas urbanas

Cp – Compacidade das estruturas urbanas

CO – Monóxido de Carbono

CR - Camada de Atrito ou Rugosa

Cx – Complexidade das estruturas urbanas

Dc – Direcionalidade das estruturas urbanas

DEM - *Digital Elevation Model*

$\epsilon$  - Emissividade

ETM - *Enhanced Thematic Mapper*

GDEM - *Global Digital Elevation Mode*

Ic – Intensidade de ocupação das coberturas urbanas

ICU – Ilha de Calor Urbano

ICU<sub>CLI</sub> - Ilha de Calor Urbano da Camada Limite Inferior

ICU<sub>CLS</sub> - Ilha de Calor Urbano da Camada Limite Superior Urbana

ICU<sub>SUB</sub> - Ilha de Calor Urbano Subsuperficial

ICU<sub>SUP</sub> - Ilha de Calor Urbano de Superfície

IDUM – Índice de Densidade Urbana Morfoclimática

ISET – Índice de Susceptibilidade ao Estresse Térmico

ISF - *Impervious Surface Fraction*

I<sub>p</sub> – Impermeabilidade das coberturas urbanas

K<sub>↓</sub> - Radiação solar incidente (direta e difusa) ou global

K<sub>↑</sub> - Radiação em pequeno comprimento de onda, refletida

L<sub>↓</sub> - Radiação emitida pela atmosfera em grande comprimento de onda

L<sub>↑</sub> - Radiação emitida pela superfície

LSE - *Land Surface Emissivity*

LSTEP - *Land Surface Temperature Estimation Plugin*

MWA - *Mono-Window Algorithm*

MDC – Mapa Digital da Cidade de São Paulo

MSP – MetrÓpole de São Paulo

M1 – MEM - Macroárea de Estruturação Metropolitana

M2 – MUC - Macroárea de Urbanização Consolidada

M3 – MQU - Macroárea de Qualificação da Urbanização

M4 – MRVU - Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana  
M5 - MRVRA - Macroárea de Redução da Vulnerabilidade e Recuperação Ambiental  
M6 – MCQUA - Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental  
MZ1 - Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana  
MZ2 - Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental  
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*  
N<sub>DS</sub> - Números Digitais  
NO - Monóxido de azoto  
NO<sub>x</sub> - Óxidos de azoto  
NO<sub>2</sub> - Dióxido de azoto  
OLI - *Operational Land Imager*  
Oc – Oclusividade do tecido urbano ou H/W  
PDI – Processamento Digital de Imagens  
PM10 – Partículas inaláveis com dimensão inferior a 10 micrômetros de diâmetro  
Po – Porosidade do tecido urbano  
Px – Proximidade das coberturas urbanas  
Q\* - Balanço Radiativo  
Q<sub>E</sub> – Fluxos de calor latente  
Q<sub>F</sub> - Fluxo de calor antropogênico  
Q<sub>G</sub> - Condução do calor  
Q<sub>H</sub> - Fluxos convectivos de calor sensível  
R<sub>D</sub> – Radiância  
R<sub>g</sub> - Rugosidade do tecido urbano ou Z<sub>0</sub>  
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo  
RTE - *Radiative Transfer Equation*  
SCA - *Single Channel Algorithm*  
SEC – Subsistema de Espaços Construídos  
SEIU – Subsistema de Espaços de Integração Urbana  
SELC – Subsistema de Espaços Livres de Construção  
SEU - Sistema de Espaços Urbanos  
SIG – Sistema de Informação Geográfica  
SMDU - Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano  
S<sub>n</sub> – Sinuosidade das estruturas urbanas  
SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre  
T<sub>A</sub> – Temperatura do ar  
T<sub>B</sub> - Temperatura de Brilho  
T<sub>SUP</sub> – Temperatura de Superfície  
TIRS - *Thermal Infrared Sensor*  
TM - *Thematic Mapper*  
USGS - *United States Geological Survey*  
V<sub>t</sub> – Verticalidade do tecido urbano  
ΔQ<sub>S</sub> = Fluxo de calor por armazenamento de calor  
ΔQ<sub>A</sub> = Fluxo de calor por advecção

## INTRODUÇÃO

---

### **O espaço urbano como um palco de transformações**

Harvey (1973, p.34) define a cidade como um sistema dinâmico e complexo no qual a forma espacial e o processo social estão em contínua interação. Para Moudon (1997), a cidade seria vista como a acumulação e a integração de muitas ações individuais e de pequenos grupos, regidos pelas tradições culturais e moldada por forças sociais, políticas e econômicas, as quais ao longo do tempo, refletem as condições de saúde e bem-estar das cidades. Esta dinâmica, desenvolve por fases e resulta na criação de novos modelos urbanos e características, que fazem com que as cidades sejam sempre objetos complexos de análise sob qualquer prisma do conhecimento.

O surgimento das cidades representa um marco histórico, geográfico e, acima de tudo, social no processo de evolução da humanidade, o qual remota a mais de 5.000 anos atrás, nos vales férteis dos rios Tigre e Eufrates, como uma evolução dos conglomerados urbanos precários e não fixos (Mills et al., 2010). No processo evolutivo das civilizações, as formas de planejar as cidades já eram propostas desde a antiguidade e oferecem os primeiros exemplos de cidades planejadas, como demonstraram as publicações das descobertas científicas realizadas na expedição de Napoleão Bonaparte ao Egito em 1839, a escavação em Pompeia, elaborada por M. Bibent em 1825, assim como os planos de Rouen, elaborados por M. Rondeaux de Sêtry em 1781, ou ainda, os planos de Strasbourg elaborados por Barbier e Striedbeck por volta de 1761 (Gauhitez, 2004).

Oliveira (2017, p.10) afirma que os estudos das cidades ideais da Renascença, marcaram um momento de ressonância no planejamento urbano posterior, no qual a geometria, harmonia, ordem, equilíbrio entre simetria e variedade, seriam os pilares que possibilitariam um bom planejamento urbano. Motivados pelas necessidades que as cidades apresentavam de evoluírem horizontalmente e verticalmente, se adaptarem ou sucumbirem frente as novas dinâmicas, funções e os usos, a civilização teria então, passado da fase teológica, através da metafísica para a fase positiva. Essa teoria se tornaria influente no planejamento urbano a partir da segunda metade do século XIX (Oliveira, 2017, p.11).

Nos últimos séculos, a evolução dos assentamentos urbanos para as cidades atuais resultou em grandes transformações na paisagem natural, por meio das modificações nas formas de relevo, na atmosfera, nos cursos d'água, níveis de vegetação natural etc. Estas mesmas modificações advindas do processo de urbanização despertaram a humanidade para alguns dos antigos problemas globais presentes na atualidade (crescimento demográfico, desmatamento, poluição, saneamento, produção de alimentos e aumento progressivo das necessidades energéticas), assim como, para as questões climáticas, que ocupam grande parte das discussões em cursos sobre as cidades do futuro.

## O impacto da urbanização nas questões ambientais

A urbanização moderna teve a sua origem com a Revolução Industrial, no final do século XVIII, um marco que anunciou avanços na tecnologia baseada no uso intensivo de combustíveis fósseis (Mills et al., 2010). Em grande proporção, as cidades até então eram moldadas pelas estruturas precárias da era medieval, desprovidas de infraestrutura para suportar o rápido fluxo de pessoas, atividades e de novas funções que seriam desempenhadas.

As extensas migrações do campo para as cidades, juntamente com a crescente mecanização da agricultura, distorceram as estruturas, tecidos e coberturas urbanas historicamente construídas e provocou diversas mudanças nas esferas ambientais, econômicas e socioculturais, conferindo um novo significado à forma, função e uso dos espaços urbanos preexistentes. Estas transformações criaram tipos inteiramente novos de formas urbanas, em que cidades densas, compactas e contínuas tornaram-se difusas, soltas e descontínuas (Levy, 1999).

Os espaços construídos que caracterizavam o tecido urbano das cidades até meados do século XIX, com seu estoque limitado de habitações, formas irregulares de ruas estreitas, um sistema primitivo de esgoto e mecanismos precários de distribuição de água, tinham de atender às populações até 10 vezes maiores (Oliveira, 2017, p17). As condições insalubres e problemas como superlotação, usos incompatíveis da terra, moradias pobres, expansão urbana, poluição, falta de espaços verdes e congestionamento eram alguns dos aspectos comuns das cidades industriais.

O processo de urbanização iniciado com a Revolução Industrial, manteve-se como uma tendência mundial durante todo o século XX. De acordo com a análise de Mills et al. (2010), este processo é marcado por dois momentos distintos: I) o primeiro atingiu o pico na década de 1950, altura em que 50% da população das regiões mais desenvolvidas (principalmente na Europa, Japão e América do Norte) já viviam em áreas urbanas; e, II) um segundo momento de urbanização, retrata o período mais recente e ocorre a uma taxa sem precedentes em países emergentes e nas regiões mais pobres do planeta.

Atualmente, a transformação urbana que outrora levou mais de 250 anos para se consolidar nas regiões mais desenvolvidas do globo, está a acontecer em menos da metade deste tempo nas regiões menos desenvolvidas, em grande parte devido ao grande aumento da população. Para Mills et al. (2010), a urbanização pode ser entendida como a parte crescente de uma população que vive em áreas urbanas, com reflexos em dois processos distintos: I) nas mudanças dos padrões de vida dos seres humanos - referente ao desempenho das funções urbanas, os padrões de atividades que requerem um fluxo contínuo de materiais e pessoas; e, II) em outro processo que refere-se à transformação física da cobertura natural da paisagem urbana – relacionado a forma urbana, a composição topográfica e materiais da cidade que produzem coberturas urbanas distintas, muitas vezes associada com determinados usos da terra.

Impulsionadas pelo processo de urbanização desprovido de ordenamento do território no último século, as cidades passaram a competir pela atração de investimentos, empresas e dos consumidores em seu espaço comercial. Segundo Gehl (2011, p.6) estas características levaram os espaços urbanos a alterar as formas físicas de edifícios e espaços envolventes, e como consequência as partes das cidades tornaram-se descaracterizadas de sua história e seu meio ambiente.

No que diz respeito ao clima urbano e às alterações climáticas, a Ilha de Calor Urbano (ICU) é considerada o melhor exemplo documentado das modificações climáticas induzidas pelo homem (Oke, 1987, p.288), presente em todas áreas urbanas, devido aos padrões de crescimento urbano (Mills et al., 2010). Segundo Mills (2008), o termo ICU aparece na literatura científica de língua inglesa no final dos anos 50 do século XX, descrito como a diferença de temperatura entre as áreas rurais e urbanas. A forma e o tamanho exato desse fenômeno variam no tempo e no espaço como resultado das características meteorológicas, locais e urbanas (Oke, 1987, p.288)<sup>1</sup>.

Pode-se dizer que os problemas relacionados a concentração de calor, a presença do ozônio estratosférico, o aumento dos gases de estufa, os efeitos da poluição na saúde humana, entre outros, tiveram grandes repercussões na opinião pública mundial e levaram à assinatura de várias convenções e protocolos ao longo do último século (Estocolmo, 1972; Rio de Janeiro, 1992; Berlim, 1995; Kyoto, 1997; Paris, 2016; etc.), mas cuja eficácia ainda não fez-se notar, principalmente nos países em desenvolvimento.

Como é possível verificar na maior parte das cidades, o progressivo processo de urbanização, contribui expressivamente para as mudanças na forma urbana e as questões climáticas locais e globais, constitui-se, portanto, em um dos maiores desafios aos agentes interventores dos espaços urbanos, tanto no âmbito da procura por um desenvolvimento sustentável e qualidade de vida, como também da mobilidade.

### **A ideia de cidade como um organismo vivo evolutivo**

As deliberações em curso sobre o processo de urbanização e evolução das cidades, foram responsáveis por suas falhas, suas potencialidades, seus sucessos, bem como as questões fundamentais ao ordenamento do território, para melhorar o que está funcionando e eliminar o que se tornou disfuncional (Sanders e Schroder, 2008). Cada vez mais ligado ao crescimento econômico e a forma dinâmica de transformação do espaço urbano, o processo de urbanização não tem acompanhado medidas importantes de planejamento e gestão do espaço urbano.

A partir do final do século XX, grande parte das cidades apresentaram problemas de ordem ambiental, de qualidade de vida, mobilidade etc. No processo evolutivo das cidades, a descaracterização

---

<sup>1</sup> Os tipos de Ilhas de Calor Urbano serão tratados com pormenores no Capítulo 2 desta tese.

das estruturas urbanas levou os espaços construídos a sobrecarregar a oferta de terra, energia, ar e de água. Os espaços livres de construção, como marcos da resiliência ecológica, social e estética na paisagem urbana, passaram a sofrer incontestável pressão frente aos processos de urbanização, especulação imobiliária e da gentrificação urbana. O inchaço urbano também atingiu os espaços viários, as redes de transporte tendem a saturar-se, obrigando as cidades a criarem redes extensas, por vezes desconectas.

Como resposta a estes desafios, a eficiência das cidades tornou-se uma das principais tarefas da gestão e ordenamento do território urbano. Nas últimas décadas, o legado das cidades modernas reviveu a procura de uma metodologia alternativa para recuperar o equilíbrio entre a cidade original e um novo modelo de desenvolvimento urbano (Oliveira, 2017, p.10). Este modelo segundo diversos autores passa pela compreensão das cidades como um ecossistema urbano composto por organismos vivos e evolutivos (Sukopp, 1998; Alberti, 1999a; Collins et al., 2000; Grimm et al., 2000; Pickett et al., 2001; Alberti e Marzluff, 2004).

Para Oke et al. (2017, p. 2), o ecossistema urbano seria formado pela população biológica de organismos (vegetação, animais, pessoas) e pelos ambientes abióticos, no qual a presença de pessoas, significa que os ambientes são tanto culturais quanto biofísicos. Como ambiente cultural, compreende-se as atividades das pessoas e seus atributos sociais, políticos, econômicos, assim como os sinais externos, tratados como os artefatos culturais físicos de um subsistema de espaços construídos como edifícios, indústrias, estradas etc. Como ambiente biofísico, este pode ser dividido em subsistemas seguindo as esferas ecológicas clássicas: atmosfera urbana, biosfera, hidrosfera, pedosfera e litosfera.

O ecossistema urbano possui um metabolismo dinâmico e capacidade de transformação de matérias e energia. Os insumos físicos para o ecossistema urbano são a energia, combustíveis e matérias-primas, água, alimentos e ar, que são necessários para alimentar pessoas, operar uma cidade, manter as infraestruturas e gerar serviços. Os principais *outputs* do sistema são poluentes, resíduos sólidos, calor residual de carbono e gases de efeito estufa (Oke et. al, 2017, p. 3).

A avaliação da magnitude e a distribuição espacial da forma urbana e sua relação com o clima e outras esferas ambientais, estão nas bases dos estudos de ordenamento do território voltado para identificação de vulnerabilidades e estratégias de promoção da sustentabilidade e eficiência urbana. A informação climática integrada no planeamento urbano pode ser um primeiro passo para promover melhorias na qualidade do ar, no conforto térmico e na previsão de fenómenos capazes de impactar a vida nas cidades, consolidando um passo importante para os processos de ordenamento do território considerar as características climáticas no momento da tomada de decisão (Scherer et al., 1999; Alcoforado et al., 2009; Grimmond et al., 2010; Ren et al., 2011; Ng et al., 2012).

## As transformações urbanas e a sustentabilidade em foco

Dada a necessidade recorrente de repensar as cidades, é particularmente importante que o ordenamento do território concilie a visão de que as cidades em sua forma física não atuam isoladamente. A visão das cidades como um ecossistema urbano permite a proposição de modelos que podem auxiliar na promoção de melhorias para as questões climáticas, qualidade ambiental, saúde e qualidade de vida, redução da desigualdade social e garantir o desenvolvimento mais sustentável dos recursos.

Compreende-se que para um desenvolvimento sustentável é necessário que haja um sistema de valores que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades (United Nations General Assembly, 1987, p. 43). Como destaca Lopes (2003, p. 10), essa perspectiva tenta conciliar duas posições distintas na sociedade, uma econômica e outra ambiental. Como as evidências sobre as mudanças climáticas globais de origem antrópica têm crescido cada vez mais, a importância do desenvolvimento sustentável também tem ganhado atenção, uma vez que, as mudanças climáticas representam a adição de um novo conjunto de ameaças globais à sustentabilidade e começar a impor encargos ambientais na geração atual.

O desenvolvimento sustentável aplicado ao contexto das cidades (Hopwood et al., 2005; Krueger e Gibbs, 2008), trata os espaços urbanos como um sistema, como se fosse um organismo (exigindo sustento) e com um metabolismo próprio (com entradas, saídas e armazenamentos que permitem que uma cidade funcione). Mills et al. (2010) afirmam que inevitavelmente, as cidades não são sustentáveis como um todo, mas é possível, no entanto, avaliar a intensidade das trocas e a extensão geográfica de captação de recursos. Neste sentido uma cidade pode ser descrita como mais sustentável<sup>2</sup>, quando reduz o uso de recursos e os seus impactos negativos sobre os ecossistemas, sem ameaçar a saúde e o bem-estar dos seus cidadãos.

O espaço urbano como um palco de transformações, apresenta objetos de investigação diversos e surgem constantemente novas abordagens, dados e novas evidências para a construção dos espaços urbanos mais sustentáveis. Esta visão tem ganhado destaque nos projetos modernos de ordenamento do território e é neste sentido que a morfologia<sup>3</sup> urbana e o clima urbano têm-se auto firmado, como campos de investigação que poderiam vir a promover a eficiência energética, a qualidade ambiental urbana, a saúde, o conforto humano etc.

---

<sup>2</sup> Segundo Mills et al. (2010), o termo desenvolvimento sustentável foi adotado na resolução das Nações Unidas que instituiu a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1983.

<sup>3</sup> O conceito de morfologia urbana vem primeiramente do termo morfologia, de origem grega (morphé + lógos + ía) e significa a ciência que estuda a forma ou a ciência que trata da forma (Lamas, 1992, p.37). O termo morfologia é extensivamente utilizado em diferentes disciplinas científicas para referir-se ao estudo das relações estruturais entre as diferentes partes ou aspectos de um objeto de estudo (Alvarez e Ritchey, 2015)

A morfologia urbana, em termos simples, está relacionada ao estudo das formas das cidades ou dos habitats humanos (Moudon, 1997; Gauthier e Gilland, 2006), considerando os assentamentos humanos e o processo de sua formação (Alvarez e Ritchey, 2015). Estuda, portanto, os processos de produção do espaço urbano e os elementos estruturantes da forma urbana (estruturas, tecidos, funções) em suas fases de evolução, transformações e inter-relações (Samuels, 1986, p.2; Del Rio, 2000, p.24). Já o clima urbano como a totalidade dos microclimas provenientes das alterações antrópicas no meio físico, sobretudo devido ao processo de urbanização, tem como objetos de investigação os fenômenos, componentes, riscos e especificidades climáticas que estão em constantes transformações (Sukopp, 1998; Grimmond et al., 2010; Mills et al., 2010).

Portanto, compreender a forma urbana e a relação com os elementos climáticos está na base para repensar as cidades sob o ponto de vista do ordenamento do território voltado à sustentabilidade e a qualidade de vida (Gillen, 2006). As evidências de que os espaços urbanos necessitam de melhorias nas políticas atuais, tendo em consideração as grandes linhas de abordagens sustentáveis e as projeções climáticas, direcionam os estudos atuais para um desafio contínuo frente a tomada de decisão e implementação de políticas públicas a nível do planejamento das cidades que queremos desfrutar.

É com base na premissa, de que a cidade pode ser compreendida através do conhecimento integrado de componentes fundamentais do clima e da morfologia urbana que se centram os esforços de análise, desafios e as motivações desta tese. Assim, do ponto de vista prático, espera-se que este estudo possa contribuir para o enriquecimento de abordagens que tratam o ecossistema urbano por meio da leitura de sua forma física e de suas características climáticas como um aspecto positivo e um princípio orientador do processo de produção e ordenamento dos espaços urbanos.

### **1.1. Justificativas e motivações**

As mudanças ambientais desencadeadas pelo processo de urbanização nos últimos séculos, evidenciaram a transição dos principais paradigmas referentes aos problemas ambientais e o ordenamento dos espaços urbanos. Em termos muito simplificados, Mills et al. (2010) afirmam que as mudanças resultaram de problemas sanitários do século XIX, passando para os problemas de poluição e resíduos no século XX e atualmente para os problemas de sustentabilidade. Essas mudanças também envolveram uma alteração nas escalas de abordagem e de tempo. Por escalas de abordagem compreendem-se desde os perigos dentro e ao redor da casa, aos da região da cidade, para encargos globais de sustentabilidade. Já quanto ao tempo este caracteriza-se desde o impacto à saúde e os efeitos imediatos para a degradação a longo prazo dos sistemas de suporte à vida.

No último século percebeu-se que as áreas urbanas mais prósperas, também foram as que mais sofreram com problemas ambientais urbanos no primeiro ciclo de urbanização (até 1950), de acordo com

Mills et al. (2010), as quais tiveram e ainda têm o desafio de adaptar o espaço urbano para torná-lo mais sustentável (ou menos insustentável). Por outro lado, muitas das cidades localizadas em regiões de baixa renda, ainda estão crescendo, demograficamente e economicamente, e sua forma ainda é emergente (Mills et al., 2010). O desafio do planejamento urbano nestas áreas é de melhorar a vida de seus habitantes, sem seguir a trajetória em termos de problemas ambientais, pela qual passaram as cidades mais ricas.

No contexto brasileiro, o ordenamento territorial historicamente praticado, não é realizado com base em premissas sociais ou ambientais, mas quase exclusivamente a partir de premissas econômicas. Em geral, as cidades brasileiras crescem sem considerar as características climáticas do ambiente em que estão inseridas (Júnior e Amorim, 2016). O processo de verticalização tornou-se uma constante no último século e permanece como um padrão de desenvolvimento na maioria das áreas urbanas no Brasil, muitas vezes associada aos processos econômicos que atuam sobre a forma urbana.

A verticalização acaba por resultar na redução da fração de céu visível, no aumento das superfícies impermeáveis e no uso de coberturas com elevada capacidade térmica (Grimond e Oke, 2002; Masson et al., 2002; Stewart e Oke, 2012). Este é o cenário de várias áreas urbanas no Brasil que alcançaram um grande e rápido crescimento durante o século passado e agora apresentam condições climáticas altamente desfavoráveis, com impactos diversos na qualidade ambiental urbana.

Até meados dos anos de 1950, a maioria da população brasileira era essencialmente rural. Entre 1980 e 2010, data do penúltimo censo demográfico, o crescimento da população urbana foi de 20% aproximadamente, quando 84% da população já vivia em áreas urbanas (IBGE, 2010). A concentração da população nas cidades brasileiras nos últimos 50 anos representa uma expansão predatória desordenada das cidades, tanto em termos ambientais quanto sociais, estéticos e culturais.

Neste contexto, as grandes metrópoles brasileiras, representam os espaços em que este processo de urbanização apresenta maior intensidade, alterando a qualidade ambiental e o clima urbano em sua estrutura e espacialização. Atualmente, cinco das dez maiores cidades da América do Sul estão localizadas no Brasil<sup>4</sup>. Como grandes desafios para o planejamento urbano, as grandes cidades brasileiras têm despertado a atenção da comunidade científica internacional num esforço para analisar e promover medidas de adaptação que contribuam para minimizar os impactos das ações antropogênicas no clima, considerando as projeções climáticas futuras.

---

<sup>4</sup> Segundo o relatório da UN-Habitat (2016), atualmente existem mais de vinte megacidades com mais de dez milhões de habitantes, além de aproximadamente 450 regiões metropolitanas com mais de um milhão de habitantes.

## Os desafios do ordenamento do território na Metrópole de São Paulo

Como expoente máximo da urbanização e da falta ordenamento do território no Brasil, a Metrópole de São Paulo (MSP) e sua região metropolitana (RMSP) têm sido intensivamente investigadas por diversos ramos da ciência que procuraram associar a crescente urbanização com o aumento de eventos climáticos extremos, como inundações, tempestades, temperaturas extremas e o aumento exponencial das descargas elétricas (Naccarato et al., 2003; Farias et al., 2009; Marengo, et al., 2010). Pesquisas como a tese de Lombardo (1985), procuraram compreender a formação, intensidade e distribuição espacial da Ilha de Calor Urbana de Superfície ( $ICU_{sup}$ ), a qual foi retomada quase 20 anos depois por Barros (2016), detalhando a relação com o uso e cobertura do solo e o balanço de energia, e investigada por outra ótica por Ribeiro (1996), que analisou a ICU na cidade de São Paulo e a relação com os efeitos na saúde da população.

Em outras abordagens, Tarifa (1991) analisou a qualidade do ar na MSP, e discutiu os climas na cidade com base no potencial topográfico para então propor as Unidades Climáticas Naturais e Urbanas da Cidade de São Paulo (Tarifa e Armani, 2001 a e b). Freitas (2003) analisou as circulações dos ventos locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes, para além das pesquisas relacionadas ao aumento de episódios pluviométricos, os quais tornaram-se mais severos, com a chuva aumentando cerca de 30% nos últimos 80 anos e diversos problemas de enchentes causadas pelos temporais (Nobre et al., 2010; Pivetta, 2012).

Uma das maiores preocupações para gestão urbana paulista a nível dos problemas ambientais urbanos está relacionada com os elevados níveis de poluição na metrópole paulista. Todos os dias na RMSP, cerca de 2,5 a 3,0 milhões de veículos são responsáveis pela liberação de toneladas de poluentes como foi demonstrado por diversos estudos (Saldiva et al., 1994; Martins et al., 2006; Miranda et al., 2012; Setzer et al., 2015). Estas condições fazem com que se acumulem os números de mortes pelo desenvolvimento de problemas respiratórios na capital paulista, pondo em perigo a saúde, o conforto térmico, a qualidade ambiental e que têm reflexos negativos quanto ao aumento do consumo de energia (Braga et al., 2001; Di Giulio et al., 2017). Andrade et al. (2017) afirmam que embora alguns programas de monitoramento de fontes industriais e veiculares tenham obtido grande sucesso na redução das emissões de poluentes atmosféricos primários como o monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>), onde se incluem o dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) e o monóxido de azoto (NO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e partículas inaláveis (PM<sub>10</sub>), os poluentes secundários, como ozônio e partículas finas, não diminuíram.

Outra preocupação emerge do alto consumo de energia elétrica na RMSP, o qual denota cerca de 35,3 milhões de megawatts / hora (17% do total nacional). A maior parte do consumo é residencial, seguida pelo consumo industrial, concentrados principalmente durante a primavera e o verão, como tentativa de arrefecer o ambiente e melhorar as condições de conforto térmico (MME, 2014 a, b). Ressaltam-se essas e

outras importantes contribuições em termos de avaliação de diferentes campos de investigação que compõem os conceitos estruturantes desta pesquisa. Muitos dos atuais problemas relacionados ao clima urbano e a promoção de uma cidade mais sustentável, poderiam ter encontrados soluções para minimização dos impactos com a integração dessas contribuições aos projetos de planejamento urbano e planos diretores.

### **O ordenamento do território para fins climáticos**

O espaço urbano quando abordado pelo prisma do ordenamento do território para fins climáticos, ainda têm como desafio o diálogo entre os diversos ramos científicos que o analisa. Trata-se de um campo multidisciplinar e complexo, no qual a descontinuidade da informação e a integração dos conhecimentos esbarram em antigas questões conceituais, de transição da informação entre escalas de abordagem e a priorização de soluções reais para problemas recorrentes. Por outro lado, a falta de informações abrangentes e espacialmente distribuídas, torna antigas questões climáticas (como a ICU) problemas complexos de serem abordados principalmente no contexto de grandes cidades.

Parte da relevância teórica desta tese assenta-se neste desafio de reafirmar as pontes entre a morfologia urbana e o clima urbano, como dois campos da ciência que são fundamentais no processo de ordenamento dos espaços urbanos com vista às cidades mais sustentáveis. Os conhecimentos integrados de Processamento Digital de Imagens (PDI) e Sistema de Informação Geográfica (SIG), visam suportar os desafios nesta tese, que discute a relação da forma urbana com componentes climáticas (temperatura de superfície e a ventilação urbana), com base em doze propriedades e indicadores morfoclimáticos.

A constatação de que as políticas e instrumentos de gestão a nível da MSP, ainda carecem de estudos como o que se propõe, não existindo por exemplo, um instrumento e uma ferramenta de referência que permita uma intervenção planificada e coerente quanto à forma dos espaços urbanos e a relação com o clima, também justifica a iniciativa desta tese. Ao mesmo tempo representa uma colaboração metodológica e um modelo final de readequação dos espaços urbanos com base na densidade urbana morfoclimática.

## I.2. Questões de Pesquisa e Hipóteses

Considerando a relação entre o processo de urbanização e as modificações na morfologia dos espaços urbanos e o clima, a primeira questão a ser abordada é relativa a um antigo problema considerado o melhor exemplo documentado das modificações climáticas induzidas pelo homem (Oke, 1987, p. 288), a formação e intensidade das Ilhas de Calor Urbana (ICU). Nesse sentido: “quais seriam as principais componentes que condicionam a sua espacialização e intensidade, e que poderiam integrar um modelo de ordenamento do território para fins climáticos no contexto da Metrópole de São Paulo”?

Como um reflexo da totalidade dos microclimas criados pelas alterações feitas pelo homem em meio urbano (Landsberg, 1981, p. 84), a ICU está presente em todas áreas urbanas (Mills et al., 2010). Diversas publicações estabelecem uma relação direta entre as modificações na morfologia urbana (em termos de estruturas, tecidos, coberturas e funções), com o aumento da intensidade das ICU, a depender ainda, de outros fatores locais como a topografia e formas de relevo associadas (Lombardo, 1985; Parlow, 1998; Mendonça e Monteiro, 2003; Arnfield, 2003; Lopes, 2006).

Oke et al. (2017) afirmam por exemplo que, por vezes mudanças sutis nas propriedades das estruturas urbanas como o ângulo de inclinação, albedo e emissividade, propriedades térmicas, umidade superficial e rugosidade geram uma infinidade de fenômenos atmosféricos, que estabelecem diferentes microclimas urbanos. Os autores referidos, defendem que estas modificações estão associadas principalmente a duas componentes do clima urbano: I) às alterações nos padrões de ventilação natural, por meio do aumento da rugosidade e verticalidade dos elementos presentes em superfície e redução na fração de céu visível; e, II) modificações na componente térmica (ar, superfícies e solo), por meio da ausência de cobertura vegetal, materiais de construção predominantes nos espaços construídos (balanço energético), das condições de penetração, absorção e condução da radiação solar (albedo, capacidade térmica, emissividade).

No entanto, essas duas componentes climáticas enunciadas, não atuam isoladamente nos espaços urbanos, a produção de calor antrópico e a emissão de gases nocivos na atmosfera urbana, também interagem com o clima urbano e produzem reflexos na temperatura (do ar e das superfícies) e na ventilação natural urbana. Em áreas com elevada densidade urbana (populacional e de espaços construídos) a dificuldade de dissipação de calor e dispersão de poluentes presentes na Camada Limite Inferior (CLI), exercem incontestável pressão sobre o conforto bioclimático humano, a qualidade de vida e a sustentabilidade ambiental.

Nesse sentido, os desafios ao ordenamento do território nos espaços urbanos para promover adaptações à ICU, compreendem os controles que atuam na sua intensidade e espacialização, para além do fato de haver uma grande dificuldade de inserção da abordagem climática nos planos diretores e nas perspectivas de gestão urbana. Estes desafios conduzem a uma outra questão: “como definir um modelo

para analisar a morfologia urbana e os elementos do clima urbano e ao mesmo tempo servir como ferramenta ao ordenamento do território?”. Para este propósito o modelo a ser executado, poderia ser elaborado com base nas interações entre as superfícies e atmosfera e permitir a adoção de critérios, propriedades, indicadores, métricas, os quais estabeleceriam a relação da forma urbana em seu contexto espacial, geométrico e aerodinâmico, com os elementos do clima urbano (ventilação natural e a temperatura de superfície).

Dada a complexidade dos fatores que influenciam na formação e espacialização da ICU, há que se pensar na continuidade dos estudos por outras abordagens e outros ramos da ciência, o que seria importante para sustentar a implementação de políticas públicas a curto, médio e longo prazo. Portanto, o modelo desenvolvido nesta tese passa pela definição de uma unidade de análise em comum tanto aos objetos de investigação, quanto a tantos outros elementos do ecossistema urbano e outras ciências que atuem no processo de produção do espaço urbano, de acordo com as necessidades específicas de cada cidade ao definir o ordenamento para fins climáticos de seu território.

Portanto as questões formuladas conduzem a relevância desta tese, pelo fato de a MSP possuir uma grande diversidade de espaços urbanos com características únicas, moldados em diferentes épocas, tendências e necessidades. Por outro lado, ainda permanece o desafio das questões climáticas, em uma metrópole que historicamente sofre com os efeitos do clima (ICU, cheias, inundações, qualidade do ar, tempestades) e da falta de planejamento urbano. Nesta perspectiva, as hipóteses de investigação são:

- A Ilha de Calor de Superfície ( $ICU_{SUP}$ ) em São Paulo não ocorre de modo aleatória, sua intensidade e espacialização é sobretudo condicionada por fatores que envolvem morfologia urbana em suas estruturas, tecidos, coberturas e a topografia local.
- Existe uma propensão elevada do território da Metrópole de São Paulo apresentar condições desfavoráveis a ventilação natural, sendo fraca a capacidade de resposta dos espaços urbanos para dissipar calor e dispersar poluentes.
- O conhecimento dos padrões de intensidade e espacialização dessas componentes climáticas e as propriedades da morfologia urbana podem auxiliar na criação de um conjunto de ferramentas ao ordenamento do território de modo a delimitar os espaços urbanos de acordo com suas características morfoclimáticas.
- É possível sustentar a determinação das adaptações na morfologia urbana para manutenção dos corredores de ventilação natural e urbanos e planejar a disposição dos espaços construídos para minimizar a obstrução do fluxo de ar, permitindo maior capacidade de ventilação natural com potencial de dispersão de poluentes e dissipação de calor.

### I.3. Objetivo da Pesquisa

A presente pesquisa pretende apresentar uma contribuição ao ordenamento do território na Metrópole de São Paulo a partir do estudo da morfologia urbana e a relação com a temperatura das superfícies ( $T_{SUP}$ ) e a ventilação natural, para requalificação dos espaços urbanos do ponto de vista morfoclimático. Parte-se da premissa que compreender a forma urbana em suas estruturas, tecidos e coberturas a serem planejadas em conjunto com as componentes da climatologia urbana pode traduzir-se numa importante ferramenta de gestão do meio urbano e colaborar na redução da  $ICU_{SUP}$ , com reflexos na saúde e qualidade de vida, na eficiência energética e no desenvolvimento sustentável.

Objetivos Específicos:

- Realizar um estudo da  $T_{SUP}$  nas últimas décadas (1984 – 2017), para identificação dos espaços urbanos que historicamente sofrem com o estresse térmico.
- Avaliar a ventilação natural e identificar os possíveis pontos de aceleração e estagnação do fluxo ar, considerando a morfologia urbana e a topografia.
- Analisar o uso e funcionalidade das propriedades da morfologia urbana que apresentam relação com a análise das  $T_{SUP}$  e da ventilação natural.
- Avaliar o potencial morfoclimático dos espaços urbanos em relação aos possíveis corredores de ventilação urbana.
- Avaliar os resultados prévio em conformidade com o atual macrozoneamento definido pelo Plano Diretor Estratégico da Prefeitura de São Paulo (PDE, 2014).
- Desenvolver um modelo de cartografia de síntese voltado das propriedades morfoclimáticas para requalificação e delimitação da densidade dos espaços urbanos.
- Identificar os espaços urbanos críticos do ponto de vista das componentes climáticas analisadas e das propriedades da forma urbana, para proposição de medidas de manutenção, adaptação e intervenção.
- Avaliar o uso potencial dos SIG na criação de ferramentas ao ordenamento do território e que permita a inserção de parâmetros futuros.
- Transpor os resultados obtidos para uma linguagem adaptada aos agentes interventores e elaborar uma síntese de orientações climáticas ao ordenamento do território em São Paulo.

#### I.4. Estrutura da Tese

A primeira etapa deste estudo centrou-se na investigação das articulações e conceitos fundamentais em morfologia urbana e em clima urbano. No primeiro capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica, dos conceitos e definições relacionados à morfologia urbana, com vistas a identificar os elementos básicos, as influências no desenvolvimento deste campo, as possibilidades de estudos multidisciplinares e o uso da morfologia urbana para o ordenamento do território.

Em seguida foi discutida a visão do espaço urbano como um ecossistema e as interações entre as superfícies e a atmosfera. Procurou-se compreender os tipos e principais controles que condicionam a formação e intensidade da Ilha de Calor Urbana (ICU), para então direcionar a investigação em duas componentes fundamentais do clima urbano a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural (Capítulo II). O modo como estas duas componentes climáticas interagem com a morfologia urbana em suas estruturas, tecidos e coberturas urbanas na criação de microclimas, estruturam a escrita do Capítulo III, onde são discutidas doze propriedades da análise morfoclimática urbana.

A segunda etapa da investigação consistiu na construção dos modelos de métodos com base nos critérios e propriedades da análise morfoclimática e os principais indicadores, que auxiliaram no desenvolvimento da tese. Nesta etapa foi necessário o levantamento, aquisição e montagem de extensivo banco de dados sobre a forma urbana e o clima de São Paulo. As contribuições de alguns estudos nas referências bibliográficas mais recentes, percepções da pesquisa de campo, consultas com especialistas em SIG, arquitetos, climatologistas e profissionais de planejamento no Brasil, Portugal, Alemanha e Itália também ajudaram a estruturar os métodos, técnicas e procedimentos (Capítulo IV).

Definidos os conceitos, critérios, indicadores, métodos e a unidade de análise, na terceira etapa da pesquisa foi proposta a aplicação dos métodos, técnicas e procedimentos e espacialização dos resultados em cartografias temáticas. Os resultados da análise foram divididos em três eixos: análise morfoclimática, ventilação natural e  $T_{SUP}$ . Os resultados foram discutidos individualmente e de acordo com o macrozoneamento do PDE (2014). Em seguida a análise da morfologia urbana foi confrontada com os resultados da ventilação natural e da  $T_{SUP}$ , para definir a correlação e coincidência espacial dos indicadores morfoclimáticos utilizados com as componentes climáticas investigadas (Capítulo V).

Conclui-se as etapas de investigação com cartografias de síntese ao ordenamento do território para fins climáticos de São Paulo (Capítulo VI), no qual são delimitadas as áreas mais densas do ponto de vista climático, os espaços urbanos mais vulneráveis ao estresse térmico (devido à baixa capacidade de ventilação natural e propensão ao aquecimento das superfícies), as possibilidades de corredores de ventilação para dispersão de poluentes e dissipação de calor e em seguida são propostas medidas de intervenção, requalificação e manutenção por parte da gestão do município.



### 1.1. A morfologia dos espaços urbanos

As cidades como organismos dinâmicos, apresentam muito de seu atual estado de desenvolvimento concebido e executado sem uma compreensão das características que residem na forma urbana preexistente, ou nos traços da sua evolução, que foram perdidos ao longo do tempo. O uso da geometria como um dos princípios a nortear a criação das cidades, em última análise, como um instrumento para decifrar as regras da criação e planejar as cidades com critérios e ideias, remonta desde à Grécia Antiga, com as obras de Pitágoras, Platão e Vitrúvio (Oliveira, 2017, p. 9).

O desenvolvimento do espaço urbano é referido como o resultado de um conjunto de influências (ambientais, econômicas, culturais, sociais e políticas) de períodos distintos. Isso permite que, em qualquer ponto da história a paisagem urbana seja reconhecida como um símbolo das realizações e investimentos de gerações sucessivas (Larkham, 2006). A compreensão destes modos de simbolização espacial e das configurações dos assentamentos, ou seja, o modo como as formas são estruturalmente resilientes e como compõem a fisionomia específica de uma cidade, são pontos que estão no cerne do campo de estudo da morfologia urbana (Gauthier e Gilland, 2005).

Como um campo de análise chave para detectar princípios, regras e tipos inerentes ao traçado da cidade, a morfologia urbana nos mostra diversas temáticas extremamente válidas para o estudo da cidade como um conjunto coerente de elementos, cuja existência, papel estrutural e inter-relações, são razões importantes na qualidade das formas urbanas (Del Rio, 2000, p. 13). A morfologia urbana constitui um instrumento poderoso no entendimento e no planejamento das cidades e interage com uma ampla gama de disciplinas acadêmicas, tais como a geografia, arquitetura, urbanismo, história, filosofia, arqueologia, antropologia e etnografia (Gauthier e Gilland, 2005).

Embora exista um consenso entre os morfologistas urbanos sobre o que eles estudam, há um debate considerável sobre o modo como as formas urbanas estão a ser estudadas pelos diferentes métodos de análise (histórico, tipológico, métrico, funcional)<sup>5</sup>. Como um campo para estudar e projetar os espaços urbanos, a morfologia urbana considera tanto as componentes físicas e espaciais da estrutura e do tecido urbano (parcelas, blocos, ruas, edifícios e espaços abertos), como os processos evolutivos no seu desenvolvimento (Sanders e Schroder, 2008).

---

<sup>5</sup> O estado dinâmico da cidade e a relação generalizada entre os seus elementos, levaram muitos morfologistas urbanos a preferir o termo morfogênese urbana, para descrever seu campo de estudo (Moudon, 1997). A morfogênese é uma área especializada que envolve a “reconstrução do desenvolvimento histórico das configurações físicas de áreas urbanas” (Whitehand, 1992) através de dados de arquivo, especialmente mapas e planos.

Para Moudon (1997), a morfologia urbana promete construir uma ponte entre a investigação e a prática da “construção urbana” e não se resume apenas aos objetos construídos e materializados no espaço urbano, mas compreende um conjunto de objetos arquitetônicos que relacionam entre si. O resultado dessa organização espacial resulta na materialização estética, funcional, ecológica, social e econômica dos espaços urbanos. Aos morfologistas urbanos de diferentes ramos da ciência, cabem focar os resultados tangíveis de frutos de abordagens ambientais, sociais e econômicas, e avaliar como eles interagem e moldam nossas cidades (Moudon, 1997).

## **1.2. As Estruturas Urbanas e os elementos físicos fundamentais**

Do ponto de vista do planejamento urbano, as vias, os lotes e os edifícios são vistos como as estruturas básicas dos espaços urbanos que estão interligados e mudam de acordo com as novas exigências funcionais da sociedade. A princípio estes três elementos se convergem no que Conzen citado por Gauhitez (2004) classificou como os três objetos da análise morfológica em ambiente urbano: as estruturas dos edifícios (geometria e orientação espacial), o plano da cidade (relacionado ao tecido urbano e a relação entre as estruturas) e o padrão de utilização dos lotes e edifícios (relacionado à função e ao uso e cobertura dos diversos tipos estruturas).

Rob Krier (1979, p.22), na sistematização e classificação das estruturas urbanas, entendia que, em termos tipo-morfológicos, as áreas urbanas poderiam ser analisadas por meio das tipologias de praças, ruas, marcos urbanos ou monumentos. Já Lamas (1992, p.37) propõe que a forma urbana é constituída a partir: do solo, dos edifícios, do lote, do quarteirão, das fachadas, dos logradouros, do traçado, das ruas, das praças, dos monumentos, da vegetação e do mobiliário.

Para Moudon (1997), os edifícios, ruas, jardins, parques e monumentos, estão entre os principais elementos da análise morfológica em meio urbano. Levy (1999) cita que na maioria das pesquisas sobre a forma urbana, os elementos estruturais são: o lote, a rua, o espaço construído e o espaço aberto. Já Lynch (1960, p. 57), define cinco elementos que resumem, as categorias de classificação das formas físicas: as vias, os limites, os bairros, os cruzamentos e os pontos marcantes.

Estes elementos, são considerados como organismos que constituem o Sistema de Espaços Urbanos (SEU), transformados através do tempo, os quais segundo Lamas (1992, p.37) devem ser articulados entre si e vinculados ao conjunto que definem os lugares que constituem o espaço urbano. Um traço comum na evolução das cidades são os constantes ciclos de transformação<sup>6</sup> e readequação dos elementos estruturantes e das coberturas da paisagem urbana (Gauhitez, 2004).

---

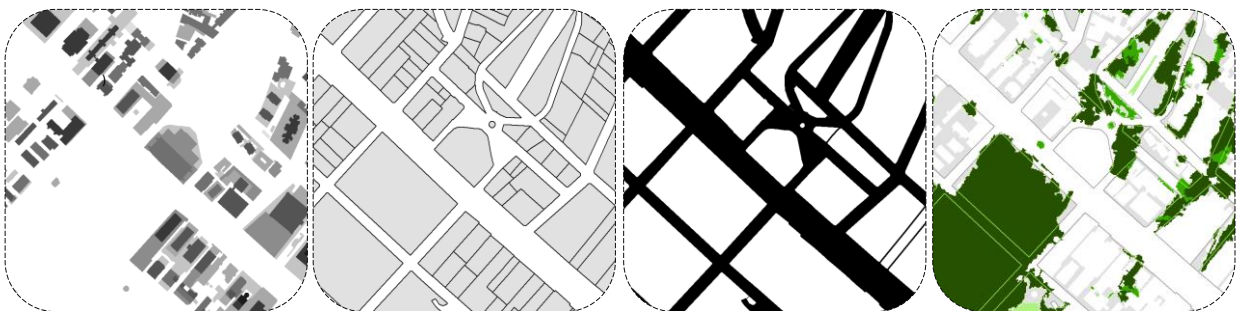
<sup>6</sup> Uma das ideias mais importantes desenvolvidas nesse aspecto foi elaborada por Conzen, o que chamou de *burgage cycle* ou ciclo da parcela burguesa. Durante este ciclo, um terreno original é primeiro ocupado por uma edificação. O espaço atrás da edificação é então preenchido por etapas até que, em alguns casos, é coberto quase completamente por novos edifícios (Gauhitez, 2004). Conzen reconheceu, que um terreno original consiste na

Segundo Levy (1999), isso revela uma lógica particular entre estas abordagens enumeradas, a de uma leitura das estruturas urbanas por camadas ou sedimentação. É comum observar na evolução de uma cidade, que após um primeiro ciclo de construção e a consolidação de um sistema primordial de espaços urbanos (destinados a mobilidade, lazer e moradias), algumas motivações advindas de desastres ambientais, confrontos religiosos, étnicos, econômicos e territoriais ou pressões exercidas por processos inerentes à urbanização, fazem com que haja a redefinição parcial ou total dos espaços urbanos.

Por exemplo, os lotes transformados em áreas edificadas, setores de planejamento ou zonas de construção, devido à consolidação do uso da terra, são então desocupados para serem readequados em espaços de infraestrutura de transporte, principalmente em estradas e o mesmo ocorre ao inverso. Espaços destinados ao lazer e recreação tendem a serem os primeiros a sucumbir diante de processos econômicos, para darem lugar a grandes empreendimentos. Após algum tempo os reflexos dessas modificações, principalmente no aumento da densidade construída, aparecem nos elevados níveis de desconforto térmico, baixa qualidade de vida, aumento do consumo energético e desvalorização do espaço local.

Essas reflexões até a primeira reunião do *International Seminar for Urban Form* - ISUF em 1994, foram difundidas por diferentes trabalhos com base nas influências das escolas principais de morfologia urbana, as quais haviam trabalhado os elementos básicos de modo similar, apesar de mudanças na nomenclatura serem evidentes. Nesse sentido, Moudon (1997) destaca a importância destas reuniões na definição de um consenso de que a forma urbana pode ser lida através da sua estrutura e forma física baseado em três princípios:

- I. Na definição dos elementos físicos fundamentais: os edifícios, os lotes ou parcelas, as ruas e os espaços abertos (Figura 1).



**Figura 1** – Elementos físicos fundamentais em morfologia urbana: a) edifícios; b) lotes ou parcelas; c) vias e d) espaços livres de edificação.

- II. No entendimento dos diferentes níveis de resoluções em que a morfologia urbana pode ser analisada, que são geralmente: edifícios e blocos, lotes, ruas, regiões e zonas e a cidade (Figura 2).

---

progressiva ocupação edificada da parte traseira do lote, terminando na eliminação dos edifícios e num período antecederia a um novo ciclo de desenvolvimento (Whitehand, 2001), e a formação de uma tipologia nova de construção (Gauhitez, 2004).



**Figura 2** – Níveis de resolução das estruturas físicas fundamentais da forma urbana: a) edifícios e blocos; b) lotes e vias; c) regiões ou zonas e d) cidade.

- III. No modo como os elementos estruturantes da forma urbana variam no tempo, pois estão sujeitos a mudanças contínuas, como serem substituídos ou serem apenas uma perspectiva histórica.

Deste modo, a forma, a resolução e o tempo constituem os três componentes fundamentais da pesquisa em morfologia urbana. Nesta tese especial enfoque será dado a forma dos elementos em suas estruturas, tecidos e coberturas e a resolução no espaço urbano. A menor célula da cidade é a combinação de dois elementos estruturantes: a parcela individual de terra, juntamente com o seu edifício ou edifícios e espaços abertos. As características da célula definem a forma (estrutura) e o nível de densidade, bem como a utilização efetiva e potencial da forma urbana ao longo do tempo (Moudon, 1997).

### 1.2.1. O Sistema de Espaços Urbanos (SEU)

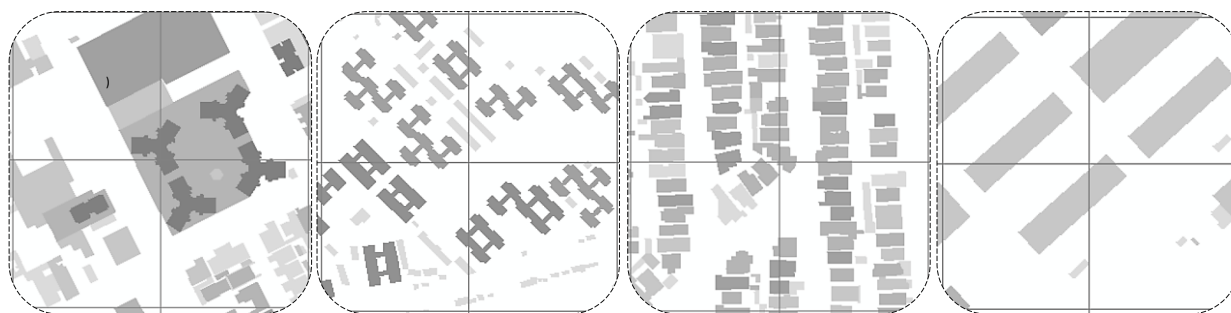
A análise da morfologia dos espaços urbanos em seus elementos físicos fundamentais, pode ser realizada com base no agrupamento de cada classe de estrutura urbana em subsistemas, que compõem o Sistema de Espaços Urbanos (SEU). O SEU será tratado nesta tese com base nos princípios de organização e agrupamento dos tipos de estruturas urbanas, tendo como referência os princípios introduzidos pelo Prof. Felisberto Cavalheiro<sup>7</sup> do Departamento de Geografia da FFLCH-USP no contexto do ordenamento dos espaços urbanos no Brasil (Cavalheiro e Del Picchia, 1992; Lima et al., 1994; Cavalheiro et al., 1999).

A sistematização apresentada por Cavalheiro e Del Picchia (1992), agrupa as estruturas urbanas básicas em três subsistemas: I) Subsistema de Espaços Construídos - SEC (habitação, indústria, comércio, escolas etc.); II) Subsistema de Espaços de Integração Urbana - SEIU (rede ferroviária, rodoviária, hierarquia de vias); e, III) Subsistema de Espaços Livres de Construção - SELC (praças, parques, jardins, espaços ao ar livre e etc.).

<sup>7</sup> O Prof. Felisberto Cavalheiro do Departamento de Geografia da FFLCH-USP, concluiu em 1981 o seu doutoramento em paisagismo orientado pelo o Prof. Gert Gröening da Fach-bereich Landespflege, Universidade de Hannover (Alemanha), com a tese "Die kommunale Freiraumverwaltung in São Paulo, Brasilien: Gegenwärtige Situation und Chancen zukünftiger Entwicklung" (Administração Municipal de Espaços Livres em São Paulo, Brasil: situação atual e opções para futuro desenvolvimento) (Santos e Nucci, 2009).

### ***Subsistema de Espaços Construídos (SEC)***

A cidade tem como base fundamental o Subsistema de Espaços Construídos (SEC), que compreende as estruturas urbanas correspondentes aos aglomerados de diferentes tipos de casas, blocos e prédios (Steemers et al., 1997), os quais criam tipologias em função das suas I) dimensões físicas (altura, área e volume), II) forma geométrica, III) orientação (aleatória ou alinhado) e IV) padrões de distribuição (aleatório ou escalonado) no SEU (Figura 3). O SEC corresponde, portanto, ao conjunto de estruturas que foram adaptando-se no desenho e na sua evolução histórica às condições externas (Moudon, 1997; Levy, 1999), para compor um subsistema atual. O SEC em uma abordagem funcional como será descrita nos próximos tópicos, compreende o subsistema destinado à habitação, atividades industriais e econômicas (Cavalheiro et al., 1999). Pode-se dizer que este é talvez o subsistema de espaços urbanos mais vulnerável, mutável e em constante transformação.



**Figura 3** - Exemplos de tipologias do Subsistema de Espaços Construídos em São Paulo considerando dimensões físicas, geometria, distribuição e orientação.

As modificações no SEC advêm de causas diversas, muitas vezes influenciadas por constantes ciclos de desenvolvimento, no qual os espaços construídos segundo Whitehand (2010) adquirem novas dimensões ao serem transformados em blocos compactos e interdependentes. A urbanização e os processos de segregação, gentrificação, renovação urbana e a verticalização (Smith, 1986, p. 32), são atuantes no SEC e passam a promover diversas alterações nas relações com os demais subsistemas, exercendo incontestável pressão sobre o ecossistema urbano, sobretudo no clima local.

Para além da sua geometria, o SEC pode ser analisado segundo diferentes perspectivas, como a função e uso, pela sua relação com a densidade urbana, tipologia de materiais empregados e a eficiência energética (Adolphe, 2001; Dodman, 2009; Salat, 2009). Para os objetivos deste estudo o SEC é o principal subsistema a atuar nas modificações da ventilação natural e nas temperaturas em superfícies, como será discutido no Capítulo II.

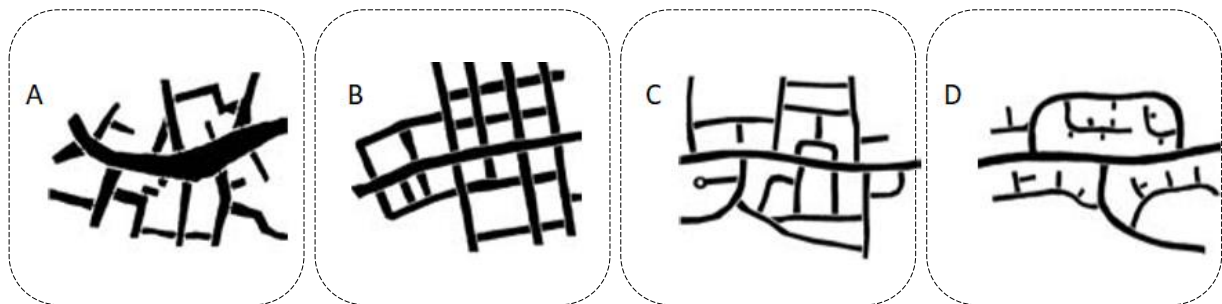
### ***Subsistema de Espaços de Integração Urbana (SEIU)***

As cidades também podem ser analisadas morfologicamente a partir das estruturas viárias. No passado, a topografia representou um fator determinante na delimitação dos espaços naturais a serem transformados em viários, assim como a proximidade junto aos corpos de água e os fundos de vales estão de alguma forma presentes na história do Subsistema de Espaços de Integração Urbana – SEIU e na questão da mobilidade urbana.

O SEIU está diretamente relacionado com os transportes, o que acaba por ser uma das bases da estruturação de tecidos urbanos e traçados, entre velocidade e tempo de deslocação (Hillier, 2007 p. 226). As vias contêm uma grande quantidade de informações sobre os mecanismos de formação, integração e evolução das cidades, como elementos fundamentais no desenrolar de atividades necessárias, opcionais e sociais dos centros urbanos (Gehl, 2011, p. 9).

A espacialização do SEIU não ocorre de forma homogênea na maioria das cidades, e, em se tratando de grandes centros urbanos, alguns subsistemas ou redes são mais planejadas do que outros. A estrutura viária retrata um subsistema chave na análise morfológica, relacionado não apenas a forma e a textura dos tecidos urbanos, mas também a fluidez no SEU.

Marshall (2004, p. 84) realizou uma análise de diversos espaços de integração urbana presentes em várias cidades do globo. Com a intenção de refletir sobre os padrões típicos de ruas que são encontrados na maioria das áreas urbanas, o autor considerou diferentes estágios de crescimento de vilas e cidades para propor um modelo básico de tipologias, chamado ABCD (Figura 4).



**Figura 4** - Tipos básicos de espaços de integração urbana segundo a tipologia ABCD - de um centro urbano (à esquerda) para a periferia (à direita). Fonte: Marshall (2004, p. 84).

Para Marshall (2004, p. 84), as vias centrais (A) estendessem para fora do núcleo histórico de um assentamento até seus arredores (D) configurando redes diferentes. O tipo A é frequentemente verificado nas áreas centrais das cidades, no qual a angularidade das ruas, orientadas em uma variedade de direções, gera uma radialidade rudimentar. O tipo B é típico de extensões planejadas ou assentamentos recém-fundados, no qual a prevalência de junções perpendiculares de quatro direções dá origem, naturalmente, à direcionalidade bilateral, com a implicação de uma forma de grade na escala mais ampla. O tipo C é talvez

o tipo mais geral que pode ser encontrado em várias posições em um assentamento, montado em uma via arterial, seja constituindo a armação central de um assentamento inteiro ou uma extensão suburbana ao longo de uma rota radial. Finalmente, o tipo D é típico de traçados hierárquicos modernos e é frequentemente associado a padrões curvilíneos de vias distribuidoras, formando padrões de ramificação (Figura 5).



**Figura 5** - Tipos básicos de espaços de integração urbana em São Paulo de acordo com o modelo de tipologia ABCD de Marshall (2004, p. 84).

As tipologias de classificação do SEIU podem variar de acordo com os objetivos das análises. Como elemento estruturante da forma urbana, a relação dos espaços de integração urbana com as variáveis do clima está relacionada com diversos fatores principalmente a dissipação de calor e dispersão de poluentes por meio dos corredores de ventilação natural em meio urbano, mas também ao metabolismo urbano, onde se concentra uma das maiores fontes de poluição devido ao tráfego rodoviário.

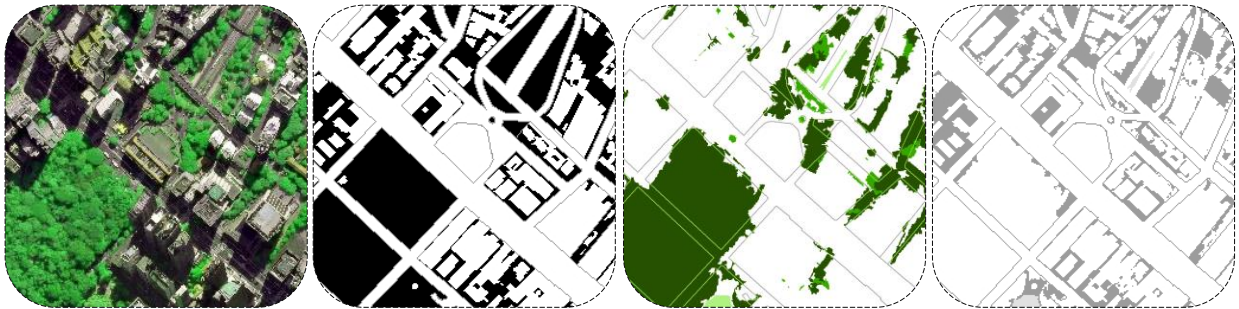
### ***Subsistema de Espaços Livres de Construção (SELC)***

O último subsistema a ser discutido corresponde aos espaços livres de construção (SELC), os quais também podem ser compreendidos como elementos estruturantes e integradores da paisagem urbana. No entanto, segundo Cavalheiro e Del Picchia (1992) e Cavalheiro et al. (1999), o SELC compreende qualquer espaço urbano fora das edificações e ao ar livre, de caráter aberto que independentemente do uso é destinado ao pedestre e ao público no geral e não ao transporte coletivo.

Há uma relativa confusão dos termos relacionados ao SELC, em especial quando o tema é tratado por especialistas de campos diferentes. Os termos de área e espaço livre, verde, não edificado e público, têm sido utilizados, muitas vezes como sinônimos. O conceito de espaços livres por vezes acaba por ser mais abrangente, integrando demais conceitos que se contrapõem ao SEC e SEIU.

Llardent (1982, p. 171) compreende que os espaços livres contam com os parques de jogos, esporte e de atrações, zoológico, jardim botânico, áreas para usos especiais e parques urbanos (Figura 6). Segundo Nucci (2001, p. 33), dado um conjunto residencial, proporções de subsistemas de espaços urbanos adequadas a manutenção da qualidade ambiental urbana seriam: SEC (37,8%), SEIU (19,6%) e SELC (42,6%).

A zona urbana do MSP tem-se que 70% são espaços construídos, 27% são espaços pertencentes ao sistema viário e somente 3% espaços considerados áreas verdes, segundo dados do Sempla/Deplano, descritos por Silva (1993).



**Figura 6** - Tipos de Subsistemas de Espaços Livres de Construção (SELC): I) Imagem de satélite Ikonos de São Paulo; II) Espaços Livres de Construção; III) Espaços Verdes e IV) Espaços Livres públicos e privados.

Os espaços livres de construção e espaços verdes não são sinônimos, se diferenciam nas texturas, coberturas e elementos constituintes. Para Milano (1992), todo espaço verde constitui um espaço livre, mas nem todo espaço livre pode ser considerado como espaço verde. O conceito de espaços verdes está estritamente relacionado à arborização urbana e ao predomínio da vegetação como elemento chave, o que é corroborado por vários autores que discutem o conceito (Llarden, 1982; Cavalheiro e Del Picchia, 1992; Lima et al., 1994; Nucci, 2001).

Ressalta-se a finalidade ecológica dos espaços verdes, dentre elas a função climática, sendo a vegetação o elemento fundamental de composição paisagística correspondendo, geralmente, a parques e jardins (Cavalheiro et al., 1999). Diante desta visão acerca do tema, é clara a importância do SELC na formação de uma cidade, pois além de destinado à ornamentação urbana, exerce outras funções vitais, como: higiênica, paisagística, de recreação, de valorização econômica, de qualidade de vida local, de recuperação do meio ambiente, biodiversidade e saúde para além dos reflexos no microclima.

Segundo Troppmair e Galina (2003), com base nessas considerações, os espaços livres de construção e outros elementos do verde urbano, não devem ser encarados como corpos estranhos em uma cidade, mas devem ser vistos como importantes elementos integrantes e participantes da dinâmica urbana. Com relação aos espaços naturais, como os remanescentes de florestas urbanas e áreas de preservação próximas aos corpos d'água, ocorre o predomínio da função ecológica e manutenção do equilíbrio ambiental, com enfoque na biodiversidade.

Os espaços livres presentes nos lotes, sem a presença de vegetação como elemento fundamental, serão tratados nesta tese como áreas não edificadas no lote. Como uma tipologia do SELC, o lote apresenta relação direta com as modificações no desenho, função e uso dos SEC e SEIU. O papel dos lotes, muitas vezes negligenciado pelos agentes interessados no processo de construção da cidade, é fundamental para os desdobramentos desta tese quando relacionado com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural em meio urbano.

### **1.3. Os Tecidos Urbanos e a interação dos elementos físicos fundamentais da morfologia urbana**

Segundo Gauhitez (2004), o modo como a forma de uma cidade pode ser separada em partes morfológicamente homogêneas, concentra-se no que autores como Conzen chamava de “região morfológica” e o que os italianos chamaram de *tessuto*, o que são noções próximas à *Stadtteil* de Keyser e não são muito distantes da *Anlage* de Kretzschmar ou *entilé homogène* como usado por Arnaud. Esses conceitos convergem, portanto, em agrupamentos de relações, ou seja, tipos de estruturas (edifícios, espaços abertos, lotes e ruas) que formam um todo coeso ou porque foram todos construídos ao mesmo tempo ou dentro das mesmas restrições, ou porque passaram por um processo comum de transformação (Moudon, 1997).

Todos os elementos físicos fundamentais, ao serem agrupados criam texturas e possuem características de organização e implicações diferentes no território e no clima, que quando relacionados entre si, formam os tecidos urbanos. Para Levy (1999) a organização e o desenvolvimento de tecidos no espaço urbano não são rivais, mas seguem leis que a morfologia urbana tentou identificar. Trata-se de complexas ligações e sobreposições, provavelmente ditadas pela organização dos elementos da estrutura urbana, no qual, algumas categorias permanecem constantes, alguns aspectos são permanentes e que são as regras de transformação ao longo do tempo que ditam essas mudanças nos tecidos urbanos.

Os estudos sobre a evolução dos tecidos urbanos estão presentes no campo da morfologia urbana, particularmente no modo como as estruturas urbanas internas se organizam (Gauthier e Gilland, 2005). Cada cidade articula, portanto, estes subsistemas vivos de estruturas básicas (ruas, edifícios, espaços destinados ao lazer, recreação) e, claro, de pessoas e bens que formam os tecidos urbanos (Gauthier e Gilland, 2005).

A leitura física dos tecidos urbanos pode ser realizada pelo viés histórico e a sedimentação dos tecidos ao longo do tempo, ou em relação às características culturais, econômicas e do ambiente natural, especialmente a influência que a topografia e o clima podem apresentar no arranjo espacial dos tecidos. Neste aspecto, a análise dos tecidos urbanos condiciona os padrões de texturas dado pela porosidade e oclusividade de uma área sobretudo no arranjo dimensional e composição dos *canyons* urbanos como será visto com pormenores no Capítulo II desta tese.

### **1.4. O uso da forma urbana e a relação funcional dos espaços urbanos**

Considerando o que Conzen citado por Gauhitez (2004) classificou como os três objetos da análise morfológica em ambiente urbano, o último objeto a ser discutido está relacionado com o padrão de utilização das estruturas e tecidos, o qual pode ser descrito pela função dos diversos tipos de usos e coberturas do solo. Nesse sentido, a função está presente tanto na análise tipológica da forma urbana,

quanto na abordagem historiográfica. A relação funcional dos elementos presentes no SEU, pode ser lida por meio de uma abordagem mais qualitativa, ancorada em vários indicadores e características.

À primeira vista, a função reflete o uso real até certo ponto, mas também é direcionada para necessidades e usos futuros e, portanto, não precisa refletir as condições presentes (Marshall, 2004, p. 56). O estudo das funções morfológicas, segundo Hillier (2008, p. 225) é um meio de chegar a um claro significado da forma urbana. Este tipo de análise está mais presente no SEC, por meio da identificação e classificação com base nas funções de moradia, comércio, indústria, cultura e etc.

No SEIU a função de movimento é, em certo sentido, central para a função do ponto de vista da organização espacial. De acordo com Marshall (2004, p. 26), o padrão das ruas e dos lotes de terra é claramente influenciado pelos transportes, topografia, propriedade e valor da terra, além de outros fatores sociais, econômicos e físicos. Os diferentes tipos de vias podem ter papéis distintos na funcionalidade dos tecidos urbanos e serem classificadas de acordo com a função em: rua cívica, comercial, residencial e multifuncional (Marshall, 2004, p. 124).

No SELC, a função aparece normalmente associada ao lazer para as categorias como praças, jardins ou parques por exemplo (Llarden, 1982, p. 171). Algumas classificações do SELC têm a função como base para distinguir os espaços que contemplam apenas o lazer e espaços associados aos aspectos ecológicos, estéticos e sociais como foi referido anteriormente. A função no SELC, quando relacionada com a qualidade ambiental, tem reflexos importantes no clima, principalmente nas escalas local e micro e está diretamente relacionada com o que Oke (2006) referiu como controles básicos que atuam na formação e intensidade da Ilha de Calor Urbana – ICU: as coberturas urbanas e o metabolismo urbano.

### **1.5. Os tipos de estudos presentes na construção do campo da Morfologia Urbana**

De acordo com a análise de Moudon (1997), as quatro escolas principais (alemã, inglesa, italiana e francesa) forneceram ao longo do último século, as bases para o estabelecimento das perspectivas de investigação no campo da morfologia urbana. Após rever os elementos básicos da morfologia urbana em suas estruturas, tecidos e funções e a finalidade dos estudos, uma importante etapa se refere a revisão dos métodos de investigação neste campo.

A análise historiográfica foi o ponto de partida para muitos morfologistas urbanos, os quais tinham como base a leitura das cidades por estratos e sua evolução no contexto espaciotemporal. Moudon (1997), destaca que muito da interpretação quanto à evolução de uma cidade, a partir de seus anos de formação para suas transformações posteriores, permite identificar, dissecar e compreender o arranjo dos seus vários componentes no período atual.

Em outra perspectiva de análise, os estudos que contemplam a mediação e classificação dos elementos estruturantes de uma cidade (edifício, lote, rua e espaço livre) existiram em contraponto com

estudos que abordaram a relação destes elementos com a sua evolução temporal (Moudon, 1997; Levy, 1999). Nesse sentido, a análise morfográfica, muitas vezes é o estágio preliminar necessário na construção de uma hipótese, baseada em uma observação medida. A medição é, portanto, um dos aspectos quantitativos da morfologia urbana através do qual podemos obter informações sobre a densidade de construção e posteriormente estabelecer a relação com aspectos climáticos, sociais, econômicos etc.

Outro método de análise presente nos estudos de morfologia urbana compreende a tipologia ou análise tipo-morfológica, a qual possui uma forte e sistemática ligação entre o desenho urbano e a forma urbana, principalmente na escola italiana. A tipologia<sup>8</sup> como outros métodos de análise, possui acepções arquitetônico-urbanísticas diversas, o seu conceito é redefinido sempre em função das investigações que se pretende realizar. A tipologia é diferenciada como uma totalidade que une uso, conhecimento e formação e é conseqüentemente um objeto de alguma complexidade. A classificação tipo-morfológica<sup>9</sup> baseada em determinados indicadores permite extrapolar conhecimentos específicos de uma temática a fim de suportar ou orientar cientificamente escolhas em outras disciplinas (Martins, 2014, p.112).

Como um campo de investigação dos aspectos que, juntos definem a forma e a qualidade do ambiente urbano (Moudon, 1997; Oke, 2006; Xu et al., 2017), a compreensão da relação entre os elementos da morfologia urbana e do clima urbano exige uma leitura dos diferentes métodos de investigação que podem ser utilizadas. De acordo com o enquadramento de abordagens morfológicas realizado por Benzerzour (2004, p. 235) e presente também em Martins (2014, p. 117), a relação dos parâmetros físicos da forma urbana com o meio envoltório e os diferentes elementos climáticos que se propõe nesta tese, será retratada como abordagem morfoclimática<sup>10</sup>.

Como abordagem morfoclimática compreende-se que o conjunto de indicadores que visam identificar no contexto morfológico urbano, o que poderia influenciar nas componentes climáticas, para então serem investigadas as possibilidades de readequação e zoneamento do SEU considerando o perfil morfoclimático urbano local. As unidades ou zonas, como será tratado nos resultados deste estudo, também seriam baseadas em uma definição de alguma complexidade de tipos de estruturas (ruas, padrões de lotes, disposição de edifícios) e agrupamentos (tecidos).

Em cada zona construída devem ser determinados os tipos de forma urbana que, precisamente proporcionados e distribuídos, criam o caráter da própria zona (Gauhitez, 2004). O uso da tipologia em espaços urbanos permite, portanto, reduzir a complexidade inerente à morfologia da cidade. Consegue-se

---

<sup>8</sup> Boudon e Bourricaud (2002, p. 36), afirmam que o tipo como uma expressão da essência de uma família de objetos, com base no uso de critérios para distinguir os elementos de um conjunto, portanto distingue uma tipologia (com base em vários critérios) de uma classificação (baseada em um critério).

<sup>9</sup> Carlo Aymonino, cujo estudo de Pádua e outros escritos sobre o que ele chamado de *typomorfologia* estimulou ainda mais o interesse no desenho da cidade (Moudon, 1997).

<sup>10</sup> Termo bastante comum em geomorfologia discutido por Cholley (1950), em *Morphologie structurale et morphologie climatique* e Ab'Sáber (1970) em *Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil*.

através da tipologia condensar um conjunto de aspectos e critérios relevantes de modo a que sejam utilizados em conhecimentos aplicáveis a outras disciplinas ou especialidades, dentre elas o clima urbano.

A tipologia e o zoneamento podem ser reunidos para fornecer uma ferramenta poderosa para planejadores e projetistas urbanos, uma recomendação colocada em prática mais de meio século antes (Gauhitez, 2004). Nesta pesquisa, especial enfoque será dado a análise morfográfica para definição das métricas que compõem os modelos de análise e em seguida a análise morfoclimática com base nos elementos estruturantes da forma urbana em relação à ventilação natural e  $T_{SUP}$ .

#### **1.6. A densidade urbana aplicada ao ordenamento do território**

Os estudos morfoclimáticos em meio urbano avaliam o impacto que uma estrutura urbana (construída, viária ou livre de construção) em suas dimensões (altura, área, volume, perímetro), características geométricas e espaciais, podem apresentar isoladamente, no efeito conjunto (como subsistemas) ou ainda na relação entre elas (tecidos urbanos) em componentes climáticas como o vento, temperaturas do ar e das superfícies, umidade e sombreamento (Groleau e Marenne, 1995; Adolphe, 2001; Salat, 2011).

Quando diferentes tipos de estruturas são agrupados, estes resultam na criação de tecidos urbanos com diversas propriedades texturais e aerodinâmicas. Os tecidos e estruturas são ainda revestidos por diferentes tipos de coberturas (concreto, cerâmica, materiais espelhados), criadas e moldadas no tempo de acordo com as funções vigentes (residencial, comercial, industrial). Essas características dos espaços urbanos implicam em impactos diferentes no clima urbano, e, portanto, exigem a compreensão a partir de diversos critérios de análise (Stewart e Oke; 2009; Martins et al., 2016).

Ao longo dos últimos anos e muito por meio da abordagem tipo-morfológica, os estudos que investigaram a relação da forma urbana com diferentes componentes do clima urbano (investigações morfoclimáticas urbanas), têm sido extensivamente retratadas por meio do uso de métricas espaciais e indicadores (Adolphe, 2001; Zhao et al., 2011; Merlier et al., 2018). Uma das atuais potencialidades da análise morfoclimática aplicada ao ordenamento do território, direciona-se na possibilidade de readequação do SEU e na tradução eficaz de informações teóricas para os técnicos de planejamento, com vistas a promover melhorias nas condições de ventilação natural, conforto térmico e a qualidade do ar, além de promover e maximizar a eficiência energética (Mesev et al., 1995; Golany, 1996; Steemers, 2003).

Os estudos climáticos que têm a morfologia urbana como um elemento fundamental para o ordenamento do território, segundo Ren et al. (2011) iniciaram-se com o pesquisador alemão Knoch (1951, 1963), o qual propôs pela primeira vez um sistema de mapeamento climático para fins de planejamento. Mais tarde estes mapeamentos de áreas urbanas com características físicas homogêneas que apresentam uma resposta climática semelhante seriam chamados Climatopos (Scherer et al., 1999; Fehrenbach et al.,

2001). No *Relatório para Orientações Climáticas para o Ordenamento em Lisboa*, Alcoforado et al. (2005, p. 26), afirmam que o conceito de Climatopos é descrito como áreas homogêneas do ponto de vista da morfologia urbana e posição topográfica, interagindo com a atmosfera, sendo cada um correspondente a um clima local próprio.

Outra classificação mais recente, baseada no uso de imagens, procurou conciliar o papel que a abordagem morfoclimática apresenta para o planejamento urbano foi elaborada por Stewart e Oke (2009). A partir de um conjunto inicial de sete indicadores de desempenho morfoclimático (densidade de construção, impermeabilidade, relação de aspecto dos *canyons* urbanos, fator de visão do céu, altura média dos elementos de rugosidade, admitância térmica e a densidade do fluxo de calor antropogênico), os autores sugeriram uma classificação do ecossistema urbano em dezessete tipos de zoneamento climático local (*Local Climate Zone*). Segundo a metodologia de Stewart e Oke (2009), o espaço urbano pode ser dividido em dez classes de espaços construídos e viários e sete para espaços naturais. Estas zonas apresentaram aproximações na capacidade de modificar os climas locais devido ao arranjo de seu tecido, cobertura do solo, estrutura e metabolismo urbano (Oke et al., 2017, p. 25).

Como referido anteriormente, uma das possibilidades de análise da morfologia urbana compreende ainda mensuração de densidades em meio urbano. A densidade urbana em um sentido espacial, pode ser expressa pelo nível de pressão sobre um determinado o espaço, ou como uma série de unidades em uma determinada área (Boyyko e Cooper, 2011). Na bibliografia, densidade aparece como um conceito composto por outros conceitos como intensidade, compacidade e oclusividade. Como uma ferramenta ao ordenamento do território, a análise da densidade urbana permite descrever, prever e controlar o uso da terra (DETR, 1998; Boyyko and Cooper, 2011; Berghauser Pont and Haupt, 2007).

A densidade urbana representa um conceito-chave ao ordenamento do território, uma vez que, desde antes do século XX, a densidade das cidades em suas diferentes perspectivas, já era tratada como uma consequência do processo de desenvolvimento urbano (Rapoport, 1975; Churchman, 1999). Ao longo dos últimos anos, diversos estudos têm explorado a relação entre a morfologia e densidade dos espaços urbanos com o clima urbano. Estes estudos procuraram compreender como o planejamento do atual estado de saturação dos espaços urbanos pode ajudar a promover melhorias nas condições de conforto térmico e a qualidade do ar, além de e maximizar a eficiência energética dos espaços urbanos (Mesev et al., 1995; Steemers, 2003; Coutts et al., 2007; Bramley and Power, 2009; Bardhan et al., 2015) como será discutido no Capítulo IV com recomendações ao ordenamento do território e a produção de cartografias de síntese.

Ren et al. (2011) e Stewart e Oke (2012) demonstram que as classificações morfoclimáticas do SEU convergem no papel fundamental que a análise da morfologia urbana apresenta na formação dos microclimas urbanos. A abordagem morfoclimática urbana dispõe de um grande conjunto de propriedades,

critérios e medidas que podem ser investigadas e especializadas para melhor propor o ordenamento do território para fins climáticos de acordo com o objetivo de cada estudo.

### **1.7. O SIG na base das futuras abordagens em Morfologia Urbana**

A espacialização da informação geográfica esteve presente na base das primeiras análises da morfologia urbana (Whitehand, 2010), incluindo a elaboração dos planos de cidades alemãs e as pesquisas pioneiras de Conzen que tinham grande apreço pela cartografia. Moudon (1997) destaca que a revolução em curso, na forma como as informações urbanas podem ser atualmente gravadas e especializadas é uma grande promessa para análise morfológica. Na era dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e da conjugação das técnicas quantitativas, dentre elas a análise por sensoriamento remoto e outros tipos de recolha sistemática de dados, diversas ferramentas para análise em diferentes escalas, permitiu avanços no campo da morfologia urbana conjugado com outras abordagens inerentes aos espaços urbanos.

Ao longo das últimas décadas os estudos têm mostrado que o alcance da morfologia urbana está muito além de suas principais fronteiras em geografia e arquitetura, e vem expandindo-se em particular no domínio do planejamento. Para Moudon (1997), as análises em SIG têm implicações enormes tanto para a pesquisa, quanto para gestão de áreas urbanizadas.

Hillier (2007, p. 106) considera na prática, que todos os potenciais de visualização e documentação cartográfica que foram desenvolvidos nos últimos anos por meio dos SIG, podem ser interligados e potencialmente trazidos ao escopo de um modelo analítico com capacidade comprovada de ligar dados morfológicos urbanos. Entretanto, de acordo com a análise de Gauhitez (2004), a quantificação das estruturas, tecidos e usos da forma urbana como presente em alguns estudos, acabam por ficar tão preocupados com a análise puramente morfográfica, que oferecem pouca interpretação da morfologia urbana e são capazes de descrever formas que não têm ligações com qualquer processo identificável.

É notável que os SIG trouxeram avanços na análise da forma urbana, a qual tem-se consolidado graças à possibilidade de leitura da informação espacial em um sistema de transição entre as escalas espaciais desde o nível do edificado e lote até amplas regiões urbanizadas. Para além de gravar as informações do mundo real em um banco de dados digitais, os SIG podem também ligar atributos espaciais e não espaciais em relação às forças que os moldam (fatores sociais, econômicos e ambientais), para então servir de base para atuação de especialistas em diagnosticar e produzir soluções aos diversos problemas urbanos. Outra vantagem refere-se à manipulação de grande quantidade de informação para análise geográfica e a possibilidade de criação de modelos com base no uso de indicadores de forma urbana entre outros. Destaca-se a importância dos SIG para este estudo tanto para avaliação das estruturas, tecidos e coberturas urbanas, quanto no potencial para analisar a relação com as componentes do clima urbano ( $T_{SUP}$

e ventilação natural), traduzindo-se em uma importante ferramenta que será explorada com pormenores no Capítulo IV dos procedimentos metodológicos.

### **1.8. A morfologia urbana como um campo multidisciplinar fundamental ao estudo das cidades**

A cidade como um sistema dinâmico, concedido com relativa autonomia, constitui o núcleo principal das pesquisas e conecta as contribuições das escolas de morfologia urbana (Gauthier e Gilland, 2005). A diversidade de agentes que operam simultaneamente em um espaço urbano sugere que as cidades são um fenômeno emergente multi-fractal (Salat et al., 2014). Nesse sentido, desde o despontar das cidades e principalmente após a Revolução Industrial, a morfologia urbana, apresenta-se como um campo de investigação composto por um conjunto de instrumentos e como uma forma de poder analisar e interpretar os espaços urbanos em diferentes perspectivas, escalas e temporalidades.

Ao longo do último século a análise morfológica em meio urbano, demonstrou não ser um campo rígido, ao contrário, pode ser associado às outras disciplinas e abordagens que também tem o espaço urbano como objeto de análise. Portanto, a definição de forma urbana possui variadas conotações e pode ser dada em função das características da abordagem a ser empregada no estudo, no qual pode-se adicionar critérios de modo a obter uma análise mais detalhada e adequada para o fim a que é proposto.

Para além das potencialidades do campo da morfologia urbana aplicada ao contexto de análises historiográficas, caracterização métrica ou tipológica, as abordagens neste campo multidisciplinar tendem a ser cada vez menos rigorosas e mais abrangentes no intuito de melhor compreender a realidade intrínseca de cada área urbana. Nesse sentido Gauthier e Gilland (2005) afirmam que talvez a contribuição mais importante da morfologia urbana para o estudo das cidades tenha sido a de mostrar como o ambiente construído pode ser entendido como um sistema de relações submetidos a regras de transformação. Whitehand (2010) reforça este pensamento ao afirmar que os ambientes urbanos e as forças responsáveis por eles estão em constante mudança.

Entre os ramos acadêmicos e profissionais que trabalham nas áreas de planejamento e desenho urbano, muito tem-se discutido sobre as relações entre a morfologia urbana e a questão do desenvolvimento sustentável na promoção de cidades saudáveis, em que a qualidade de vida, a eficiência energética e o conforto térmico para seus habitantes tornem-se um padrão acessível a todos sem comprometer futuras gerações (Smith e Levermore, 2008; Wong et al., 2011).

A morfologia urbana e o clima urbano têm como gênese o impacto da urbanização no ecossistema urbano. Parte-se do entendimento que a atmosfera urbana e SEU apresentam uma relação mútua e contínua (Oke, 2006), que pode ser investigada pela análise conjunta da morfologia urbana e de diversas componentes climáticas. Entretanto, as discussões em curso sobre a morfologia urbana e o clima urbano

não estão limitadas à abordagem morfoclimática proposta neste estudo, tão pouco apenas às duas componentes climáticas enunciadas nos objetivos ( $T_{SUP}$  e a ventilação natural).

O campo da morfologia urbana envolve tantas outras possíveis combinações de análise (historiográfica, morfográfica, morfoeconômica) (Moudon, 1997), quanto a sua relação com outras componentes presentes no Sistema Clima Urbano – SCU (subsistemas termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico) (Monteiro, 1976, p. 95).

Cada vez mais ligado ao potencial multidisciplinar que o campo da morfologia urbana apresenta, como será apresentado no Capítulo III desta tese (ao retratar a abordagem morfoclimática com base no uso de indicadores e métricas) os avanços proporcionados pelos SIG também possibilitaram que intervenções a nível do planejamento do SEU em suas estruturas, tecidos, coberturas e funções, fossem conjugadas com demais fatores sociais, econômicos e ambientais. É do balanço entre as limitações e potencialidades que os SIG podem apresentar na análise da morfologia urbana e a identificação das características físicas das cidades, ou seja a leitura das tipologias de estruturas, tecidos e coberturas vigentes e suas relações com as componentes climáticas ( $T_{SUP}$  e ventilação natural) que tratam os próximos capítulos.

## CAPÍTULO II – O CLIMA URBANO: A RELAÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E O VENTO COM A FORMA URBANA

---

### 2.1. A atmosfera urbana e as escalas temporais e espaciais do clima

Nesta seção serão revistos alguns conceitos e processos-chave que definem as escalas de abordagem e os processos físicos do clima urbano a fim de estabelecer as relações de causalidades entre a morfologia urbana com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural. Para os objetivos desta tese, a atmosfera urbana será abordada num primeiro momento com a descrição das escalas em que se inserem os elementos e os fenômenos desta abordagem.

Na linha de evolução das cidades, o período da Revolução Industrial deu origem a transformações fortes na chamada cidade tradicional, não só em termos de organização do espaço urbano, mas também no modo como as ciências tradicionais se desdobraram na compreensão dos novos fenômenos, impactes e acontecimentos deste período. O surgimento de diversas novas disciplinas que tinham as cidades como objeto de estudo, encontram no período pós-Revolução Industrial um marco de seu surgimento, tais como a climatologia urbana (Oke et. al, 2017, p. 454), a ecologia urbana (Sukopp, 1998), o planejamento da paisagem e o urbanismo moderno (Benevolo, 1971, p. 7). Este mesmo período aprofundou as relações interdisciplinares e o entendimento do espaço urbano como um ecossistema, o qual se encontra em constante transformação e sob a influência de vários fenômenos e atividades que o compõem.

As cidades seriam então a confluência de vários subsistemas, no qual o ecossistema urbano importa e exporta energia e massa, integrando os seres vivos que interagem com o ambiente físico (Douglas, 1983 citado por Oke et al., 2017, p. 3). A atmosfera em seus fenômenos e modelos climáticos integram um dos subsistemas que compõem o ecossistema urbano (Oke et al., 2017, p. 3), a qual pode ser compreendida em diferentes escalas espaciais (extensão) e temporais (duração).

A noção de escala, transversal a qualquer estudo geográfico, aparece na climatologia urbana como um conceito fundamental para entender as modalidades de interações entre os elementos em superfície urbana com as camadas atmosféricas adjacentes (Arnfield, 2003). Na escala temporal, os fenômenos climáticos que atuam sobre o SEU, possuem escalas de durações diferentes (Oke, 1987, p. 4). No nível da escala espacial, a região, a cidade e seus efeitos no clima são influenciados pela localização geográfica: latitude, continentalidade, abertura a eventos, proximidade com a água, topografia envolvente etc. (Grimmond et al., 2010).

No espaço urbano, diferentes critérios de classificação das escalas climáticas espaciais (horizontais e verticais) podem ser adotados (Tabela 1). Na escala espacial horizontal a extensão do território é utilizada como critério pela maioria das abordagens, ao passo que em perfil vertical são estudados os estratos que contemplam as interações entre os elementos presentes na superfície até a atmosfera livre.

**Tabela 1** – Classificação das unidades urbanas e seus fenômenos climáticos urbanos.

Fonte: Oke et al., (2017, p. 19).

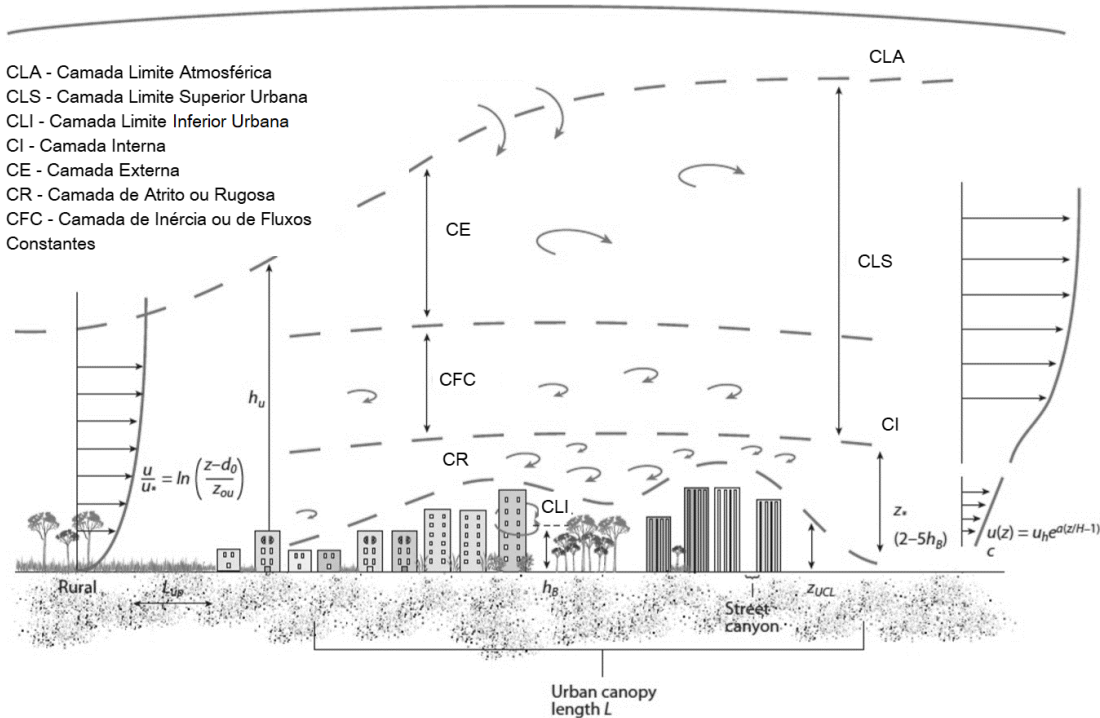
<b>Unidades urbanas</b>	<b>Recursos internos</b>	<b>Características verdes e água</b>	<b>Fenômenos climáticos urbanos</b>	<b>Escala Horizontal</b>	<b>Escala Climáticas</b>
<b>Fachadas</b>	Telhado, parede, rua	Folha, gramado	Sombras, fluxo de calor armazenado, orvalho e geadas	10 x 10 m	
<b>Elementos</b>	Casas, prédios, armazéns	Árvore	Pluma de emissões habitacionais, efeito de esteira	10 x 10 m	Micro
<b>Canyons urbanos</b>	Ruas e edifícios envolventes	Árvores de arruamento, jardins, rios e canais	Sombreamento transversal de ruas, vórtices, bioclima de pedestres, clima de pátio	30 x 200 m	
<b>Quadras</b>	Blocos, quarteirão	Parques, lagos	Clima do parque, <i>cumulus</i> de fábrica	0,5 x 0,5 km	
<b>Zonas Locais</b>	Centrais, residenciais, industriais etc.	Florestas, lagoas, cinturão verde, pântanos	Climas de bairro, brisas locais, poluição do ar	2 x 2 km	Local
<b>Cidade</b>	Área construída	Floresta urbana	Ilha de Calor Urbano, domo de poluição atmosférica, padrões de efeitos urbanos de umidade e vento	25 x 25 km	
<b>Região Urbana</b>	Cidade e áreas envolventes		Plumas urbanas, anomalias de precipitação e nuvens	100 x 100 km	Meso

Como foi referido por Moudon (1997), a morfologia urbana em suas estruturas e tecidos pode também ser entendida em diferentes escalas espaciais e temporais. Os estudos em morfologia urbana têm como escala espacial mínima a influência dos elementos estruturantes (como os edifícios, ruas, praças, jardins) e a relação entre estes (tecidos urbanos), correspondendo à escala microclimática (fenômenos em escala horizontal de dimensões típicas de 0,01m à 1km) e como escala máxima a cidade, o que corresponde à mesoescala climática (Oke, 1987, p. 3).

Na vizinhança imediata de cada elemento da morfologia urbana existe um microclima, particular, em que variações na temperatura de superfície e na ventilação natural podem ocorrer mesmo pelo mais pequeno objeto. Em escala local essa compreensão estende-se de dimensões menores que 1 km até alguns quilômetros, no qual pode-se estudar as áreas de semelhante topografia, metabolismo urbano e morfologia urbana. Na mesoescala, a extensão territorial pode variar entre 10 km e 200 km (Oke et al., 2017, p. 19) e compreende as interações de uma área urbana toda no clima.

Na escala vertical, a topografia e os elementos presentes em superfície, modificam sensivelmente as características gerais da ventilação natural, da radiação, da temperatura e umidade do ar (Oke et al., 1987, p. 29) e se fazem sentir na Camada Limite da Atmosfera (CLA) (Figura 7). A CLA representa a parte

mais baixa da atmosfera da Terra que está em contato direto com a superfície e é controlada pela rugosidade, mistura térmica e as concentrações de umidade e poluentes atmosféricos (Oke, 1988, p. 6), onde os fluxos de quantidade de movimento, energia (nomeadamente calor) e massas são transportados e difundidos por movimentos turbulentos (Lopes, 2003, p. 20).



**Figura 7** - Ilustração dos estratos da Camada Limite Atmosférica. Fonte: Fernando, 2010.

Segundo Garrat, (1992, p.2), os ciclos diários de aquecimento e arrefecimento das superfícies, a rugosidade dos elementos, a presença de nuvens na atmosfera e o metabolismo urbano (emissões antrópicas e a poluição), são os fatores que alteram o balanço energético e acabam por modificar as condições de estabilidade ou instabilidade atmosférica na CLA. Em condições de estabilidade neutra, a estrutura da CLA cria estratos que compreendem duas principais camadas: Camada Limite Inferior Urbana (CLI) e a Camada Limite Superior Urbana (CLS). A começar pelo topo da atmosfera em direção às superfícies, CLS representa os fenômenos atmosféricos que são de natureza local/regional (ou de mesoescala) e estratifica-se em duas subcamadas: I) a Camada Interna (CI), caracterizada por intensa turbulência de pequena escala, em que o fluxo de ar depende das características da superfície (Garrat, 1992, p. 3); e, II) a Camada Externa ou de Ekman (CE), que é dominada por movimentos convectivos (Grimmond e Oke, 1999).

Por sua vez, a CI é estratificada em Camada de Atrito ou Rugosa (CR) e Camada de Inércia ou de Fluxos Constantes (CFC) (Oke, 1987, p. 5). A CR se refere a camada em que o fluxo é muito irregular, controlado pela superfície do solo. Na CFC, a variação da turbulência com a altitude é inferior em 10% à sua magnitude, cuja característica principal é apresentar um perfil de vento logarítmico em condições de estabilidade neutra.

Na parte mais baixa da atmosfera, a CLI é diretamente influenciada pela rugosidade das superfícies urbanas, pela turbulência térmica e mecânica, pela produção de calor antrópico e pelo armazenamento de calor nas estruturas físicas urbanas (Landsberg, 1981, p. 23). A CLI é comandada por processos atmosféricos de escala local e micro (nível das estruturas e dos *canyons* urbanos), no qual o impacto dos elementos estruturantes da forma urbana, em suas diferentes tipologias de textura, cobertura, geometria e extensão, faz sentir-se mais dependendo das características topográficas (Oke, 1987, p. 284).

As cidades como sistemas complexos, abertos a fluxos de energia e massa e caracterizados por um contínuo processo de mudança (Andrade, 2005), promovem alterações gradativas nas propriedades físicas das superfícies, nas trocas energéticas e radiativas, as quais terminam por afetar as condições térmicas e aerodinâmicas da atmosfera urbana em várias escalas. Por sua vez, estas modificações causam mudanças no armazenamento de calor, evapotranspiração e calor liberado na queima de combustíveis fósseis.

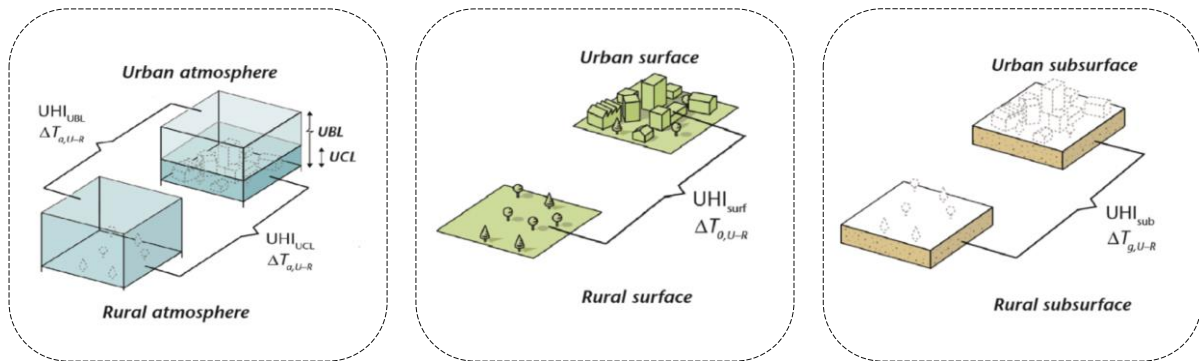
O somatório destas modificações torna os espaços urbanos susceptíveis a condições climáticas mais rigorosas, oferecem risco a saúde, além de promover a baixa qualidade ambiental, o desconforto térmico e o aumento do consumo energético (Oke, 2006; Nucci, 2003; Lopes, 2006; Salat, 2009; Rode et al., 2014). Como consequência é bastante provável que a temperatura média do ar seja aumentada na área urbana - um fenômeno amplamente conhecido como a Ilha de Calor Urbana (ICU) (Oke et al., 2017, p. 41). A seguir discute-se os processos físicos relacionado a acumulação de calor em meio urbano e sua relação com a morfologia urbana na CLI.

## **2.2. A formação de Ilhas de Calor Urbano (ICU)**

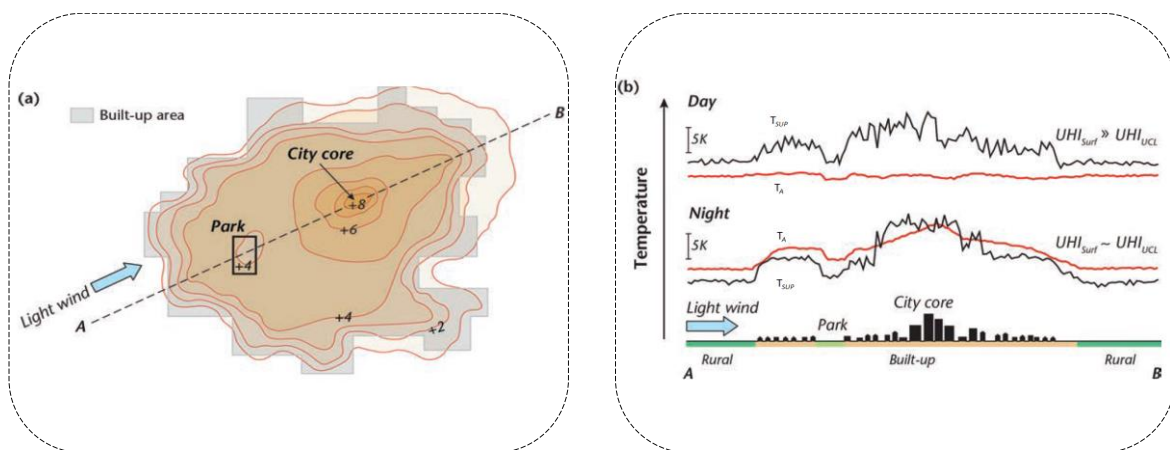
A Ilha de Calor Urbano (ICU) é um reflexo da totalidade dos microclimas criados devido por alterações feitas pelo homem em meio urbano (Landsberg, 1981, p. 84). Para Lombardo (2011) trata-se de um padrão térmico que ocorre na maior parte das cidades, como o resultado cumulativo de modificações na cobertura do solo e na composição da atmosfera, associados com o processo de urbanização. Segundo Oke et al., (2017, p. 198) existem diferentes formas de investigar a intensidade e espacialização das ICU, referente às temperaturas do solo, das superfícies e do ar na CLI e na CLS (Figura 8 e 9a). Apesar da proximidade das interações entre estas medidas de temperaturas, elas apresentam diferentes escalas espaciais, meios de medição, gênese (emissões antrópicas, geometria, dimensão e uso das estruturas urbanas) e dinâmicas temporais de acordo com a classificação proposta por Oke et al., (2017, p. 198):

- Ilha de Calor Urbano Subsuperficial ( $ICU_{SUB}$ ) – corresponde às diferenças entre os padrões de temperatura no solo da cidade, incluindo os solos urbanos e o tecido construído.
- Ilha de Calor Urbano de Superfície ( $ICU_{SUP}$ ) – referentes as diferenças de temperatura na interface da atmosfera exterior com os materiais sólidos da cidade e a interface de ar rural para o solo equivalente.

- Ilha de Calor Urbano da Camada Limite Inferior (ICU<sub>CLI</sub>) - diferença entre a temperatura do ar contido na CLI, ou seja, a camada entre a superfície urbana e o nível do telhado.
- Ilha de Calor Urbano da Camada Limite Superior Urbana (ICU<sub>CLS</sub>) – representa a diferença entre a temperatura do ar no topo da CLI até o topo da CLS.



**Figura 8** - As ilhas de calor do ar e das superfícies. Fonte: Oke et al., (2017, p. 199).



**Figura 9** - Diferenças de temperaturas do ar ( $T_A$ ) e das superfícies ( $T_{SUP}$ ) entre a área urbana e rural (a), para períodos diurnos e noturnos (b). Fonte: modificado de Oke et al. (2017, p. 197).

A ICU<sub>SUP</sub> em um perfil vertical refere-se as temperaturas das coberturas presentes tanto junto ao solo (CLI), quanto ao nível acima dos espaços construídos, a depender do nível da geometria e orientação das estruturas, textura e níveis de obstrução e sombreamento nos *canyons* urbanos. Portanto, a investigação quanto a relação com a morfologia urbana é um pressuposto fundamental. No contexto desta tese, especial enfoque será dado à Ilha de Calor Urbano de Superfície (ICU<sub>SUP</sub>), a qual geralmente é mais intensa durante o dia (Figura 9b), e pode ser observada a partir de imagens de satélite (Nichol, 2005), referidas na bibliografia, cujos padrões são reconhecidos pela  $T_{SUP}$ . As propriedades térmicas como a conversão dos níveis de radiância para temperatura de brilho, e o cálculo da emissividade a partir de índices de vegetação são alguns dos parâmetros de base utilizados para análise da  $T_{SUP}$ , os quais serão apresentados com pormenores no Capítulo IV, referente aos processos metodológicos.

### 2.2.1. Os controles da $ICU_{SUP}$ e a relação com a Morfologia Urbana em meso escala

Oke et al. (2017, p. 25) afirmam que a existência de dois conjuntos de características que modificam a componente térmica e os ventos em ambiente urbano em diferentes escalas: I) aquelas relacionadas com as mudanças nas propriedades da superfície; e, II) as outras devido às emissões antropogênicas, associados ao metabolismo urbano. Em mesoescala, para além destas características, os autores mencionam que as dimensões gerais de uma cidade (área, diâmetro), sua forma (circular, radial, linear ou celular), seu horizonte e seu núcleo (central, ex-central ou múltiplo), também podem desempenhar papéis importantes na criação de climas urbanos e na intensidade e a magnitude das diferentes ICU.

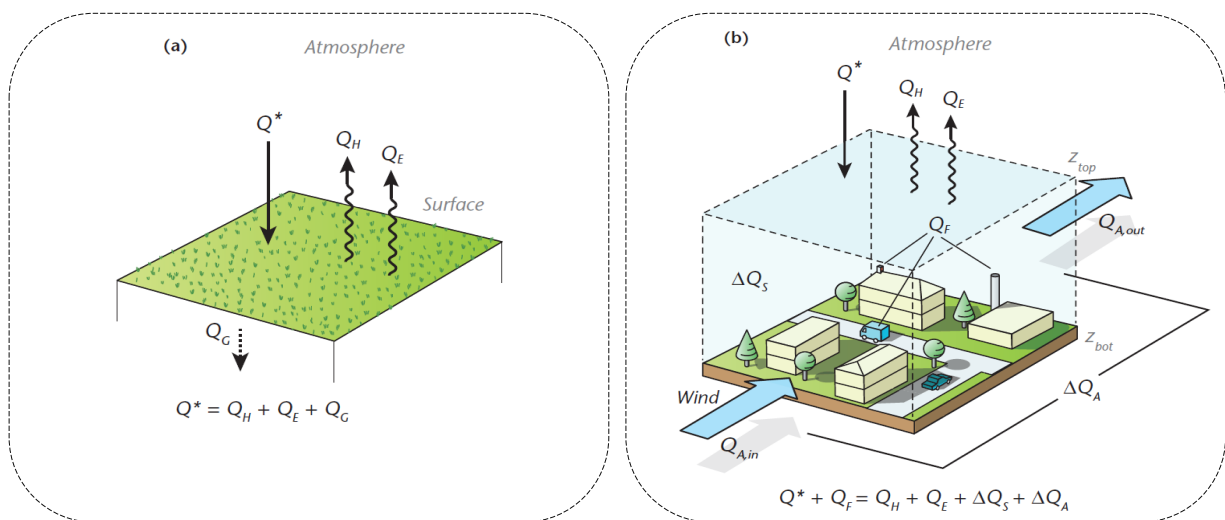
Em escala local e micro, Oke (2006) e Oke et al. (2017, p. 25) esclarecem que as condições climáticas para formação dos diferentes tipos de ICU estão relacionadas a quatro controles presentes nos espaços urbanos: I) a estrutura urbana (dimensões dos edifícios e os espaços entre eles, larguras de ruas); II) o tecido urbano (a relação entre as estruturas e materiais naturais); III) cobertura urbana (frações de edificações, pavimentadas, vegetado, solo nu, água); e, IV) o metabolismo urbano (calor, água e poluentes devido à atividade humana).

O metabolismo urbano possui diferentes escalas de tempo, como os ritmos do dia de trabalho, que modulam os meios de transportes e os pulsos de tráfego, o uso doméstico e consumo de água, a energia para climatização, aquecimento ou arrefecimento dos espaços, as atividades industriais etc. Esses ritmos criam flutuações para as variações na produção de calor antropogênico que devem ser adicionadas em estimativas de balanço energético em meio urbano (Oke et al., 2017, p.25).

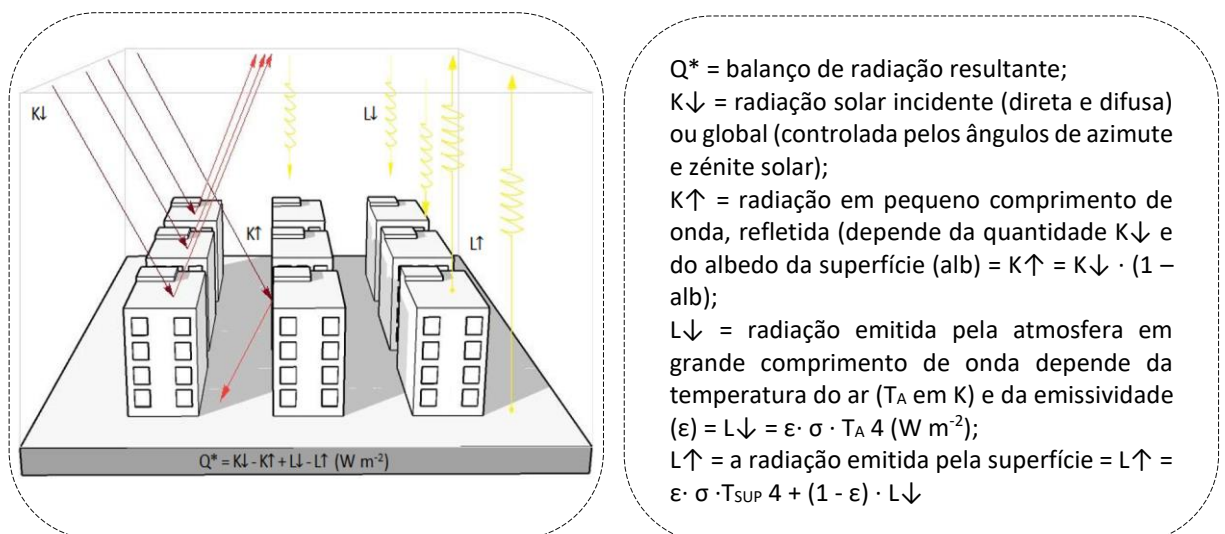
Nas diversas escalas climáticas, a liberação de calor antrópico ainda que diminuta, pode alterar o balanço energético. O fato de as emissões antropogênicas significar que as pessoas são os principais atores no metabolismo urbano (em sua natureza espacial e temporal), torna este controle pouco previsível. Com base nessas premissas, ainda que seja de suma importância a mensuração deste último controle citado por Oke (2006), tanto para a componente térmica, quanto para a ventilação natural em meio urbano, nesta tese não será abordado a produção de calor antrópico, uma vez que, a aquisição de dados para este fim ainda é de difícil mensuração dadas as dimensões de uma metrópole como São Paulo. A seguir será abordado em mesoescala climática a relação da morfologia urbana com as modificações na  $T_{SUP}$  e na ventilação natural. Em seguida, em escala local e micro são discutidos os efeitos individuais das estruturas, tecidos e coberturas urbanas nestas duas componentes climáticas. Estes controles da ICU estão diretamente relacionados aos objetos de análise da morfologia urbana em sua geometria, textura, e uso/função como foi descrito no Capítulo I.

### 2.3. As interações entre a atmosfera e a temperatura das superfícies urbanas

De acordo com Oke et al. (2017, p. 156), o espaço urbano possui um Balanço de Energia em Superfície (BES), dado pela combinação de diferentes fluxos radiativos, condutivos e turbulentos como ilustra a Figura 10. Segundo a análise de Lopes (2003, p. 295), o Balanço Radiativo ( $Q^*$ ) (Figura 11) é a principal entrada de energia do BES, que é contrabalançado pelas trocas energéticas entre as superfícies e a atmosfera, efetuadas pelos fluxos convectivos de calor sensível ( $Q_H$ ), latente ( $Q_E$ ) e pela condução de calor do, ou para o solo ( $Q_G = \Delta Q_S$  armazenamento de calor) e a advecção presente na atmosfera urbana ( $\Delta Q_A =$  Fluxo de calor por advecção). Para as áreas urbanas Oke et al. (2017, p. 157) adicionam o fluxo de calor antropogênico ( $Q_F$ ) na equação do BES.



**Figura 10** - Balanço de Energia em Superfície (BES): a) rural e b) urbana. Fonte: Oke et al., (2017, p. 157).



**Figura 11** - Balanço Radiativo em superfícies construídas. Fonte: adaptado de Martins (2014, p. 73).

O fluxo de calor latente ( $Q_E$ ) corresponde à quantidade de calor libertado ou absorvido por um sistema na mudança de fase da água (por unidade de massa). O fluxo de calor sensível ( $Q_H$ ), está associado à mudança de temperatura, normalmente descrito como o calor sentido pelos seres vivos. O fluxo de calor condutivo ( $Q_G$ ) é o calor armazenado nas superfícies, comandado por quatro propriedades térmicas: a condutividade, a capacidade calorífica, a difusividade e a admissão térmica (Lopes, 2003, p. 295).

Como importante componente de troca energética, o balanço radiativo ( $Q^*$ ) está relacionado ao saldo das entradas e saídas dos fluxos de radiação solar, ou seja, a quantidade de radiação que é absorvida, refletida e emitida por uma superfície urbana. O  $Q^*$  pode ser avaliado através da análise da irradiância solar de pequenos comprimentos de ondas (incidente e refletida) e da radiação de grandes comprimentos de onda emitida pela superfície e pela atmosfera (Grimmond et al., 2010). Diversos outros fatores como a topografia, as geometrias, texturas e coberturas urbanas também interferem na quantidade de energia solar recebida e nos níveis de absorção, reflexão, difusão e re-irradiação da energia solar (Zhao, et al., 2010, Grimmond et al., 2010).

Oke et al. (2017, p. 157) informam que dado o BES e o  $Q^*$ , existe uma única temperatura na sua interface com o ar, a temperatura de superfície -  $T_{SUP}$ . Essa temperatura é o limite comum nos gradientes de temperatura que geram um fluxo de calor sensível ( $Q_H$ ) para cima na atmosfera, e similarmente conduz um fluxo de calor sensível para baixo no substrato ( $Q_G$ ). Qualquer mudança nas propriedades térmicas dos materiais presentes em superfície acaba por afetar a  $T_{SUP}$ . Portanto, ocorre maior variabilidade em comparação com a temperatura do ar, particularmente durante o dia.

A  $T_{SUP}$  como uma componente fundamental do  $Q^*$ , está relacionada com o fluxo de energia em grande comprimento de onda para a atmosfera e depende de outros parâmetros como o albedo, a umidade da superfície e a vegetação (Voogt e Oke, 1997). Geralmente a  $T_{SUP}$  é uma média da temperatura radiativa efetiva dos vários dosséis (construídos e naturais) presentes em superfícies e junto ao solo (Hall et al., 1992), os quais são detectados pelos sensores térmicos<sup>11</sup> a bordo de satélites e outras aeronaves, num comprimento de onda entre 8 e 12  $\mu\text{m}$  (Norman e Becker, 1995).

De modo simplificado a  $T_{SUP}$  corresponde à uma temperatura calculada a partir dos valores de radiância ajustados através da Temperatura de Brilho ( $T_B$ ) e da emissividade da superfície da terra ( $\epsilon$ )<sup>12</sup>. Voogt e Oke (1997) salientam que a mensuração da  $T_{SUP}$  nas cidades é difícil devido à estrutura complexa da interface urbano-atmosfera (inclinação da superfície, aspecto, sombreamento, e variações diurnas nas propriedades térmicas e radiativas).

---

<sup>11</sup> O que é medido pelo sensor é a energia refletida ou a que é emitida pela própria superfície. Apesar de ser diferente da temperatura da atmosfera, normalmente medida a dois metros do solo, vários estudos têm mostrado a forte correlação entre estas duas grandezas físicas (Lopes, 2003, p. 220)

<sup>12</sup> A  $T_B$  é uma medida que descreve a quantidade de radiação em termos da temperatura de um hipotético corpo negro emitindo a mesma quantidade de radiação no mesmo comprimento de onda. A emissividade ( $\epsilon$ ) é uma razão que compara a capacidade de irradiação de uma superfície, com a capacidade de radiação de um alvo.

Em meio urbano, os fluxos de calor na superfície também podem induzir a convecção local na CLA, produzindo mudanças na temperatura do ar e nos ventos em superfície, nos níveis de nebulosidade, evaporação e evapotranspiração e (potencialmente) na precipitação (Aires et al., 2001). Conhecer a intensidade  $T_{SUP}$  e sua espacialização é importante para melhor propor as medidas relativas ao ordenamento dos espaços urbanos no controle das trocas de fluxo de calor sensível e latente com a atmosfera (Voogt e Oke, 2003; Sun, 2008).

Segundo Voogt e Oke (1997), as representações de superfície na CLA por meio de imagens de satélite se aproximam da natureza real. Entretanto os detalhes da morfologia urbana são cada vez mais simplificados à medida que a área total aumenta. Para análise da  $T_{SUP}$  é necessário imagens de alta resolução e medições locais, o que torna um desafio para grandes áreas. Em geral os estudos que utilizam imagens de satélite para avaliar a  $T_{SUP}$ , se referem ao que é imageado no topo das superfícies e não nas superfícies completas. De fato, as  $T_{SUP}$  modificam-se rapidamente no tempo e no espaço, porque são dependentes das características biofísicas do terreno, que variam bastante em pequenas distâncias. Segundo Prata et al. (1995), para obter medições mais precisas ao longo do tempo, é necessário estimar a  $T_{SUP}$  em uma resolução temporal relativamente mais alta.

As superfícies imageadas por satélites formam um mosaico de coberturas (vegetais, minerais e sintéticas, irrigadas ou não), que apresentam propriedades radiativas, térmicas, aerodinâmicas e hídricas completamente diferentes (Arnfield, 2003). Como uma grandeza física que comanda o  $Q^*$  em meio urbano, o albedo das superfícies (alb) condiciona os níveis de radiação refletida (Tabela 2), o qual é um parâmetro fundamental no controle da energia radiativa entre a atmosfera e a superfície, que quantifica a reflexividade das superfícies da terra. Em meio urbano, o albedo das coberturas pode variar entre 14 – 18 devido a composição química dos materiais da superfície (Ayoade, 1983, p. 28; Oke, 1987, p. 23; Lopes, 2006). Com base nessas premissas esta tese propõe a análise da  $T_{SUP}$ , numa escala temporal que envolve as últimas décadas de imagens Landsat - TM e TIRS (5 e 8)<sup>13</sup>, definindo as estações úmidas e secas como critério para agrupamento das imagens. As discussões sobre os métodos para estimar a  $T_{SUP}$  serão descritas com pormenores no Capítulo IV.

**Tabela 2** - Albedo de vários tipos de superfícies. Fonte: Ayoade (1983, p. 29).

<b>Superfícies</b>	<b>Albedo %</b>	<b>Superfícies</b>	<b>Albedo %</b>
Solo negro e seco	14	Gramados/relvados	15-30
Solo negro e úmido	8	Neve recém-caída	80
Solo nu	7-20	Neve caída há dias ou semanas	50 – 70
Areia	15-25	Gelo	50-70
Florestas	3-10	Água altitude solar > 40°	2 – 4
Campos naturais	3-15	Água altitude solar 5 – 30°	6 – 40
Campos de cultivo secos	20 – 25	Cidades	14-18

<sup>13</sup> A exemplo do modelo de Lopes (2003, p. 279), neste estudo todos os fluxos diários serão considerados positivos, no que se refere às perdas e ganhos para a superfície. Esta medida permite compreender as diferenças de temperatura entre as tipologias de geometria, texturas e coberturas da forma urbana.

## 2.4. A ventilação urbana e o impacto na dissipação de calor e poluentes

Os ventos são movimentos de massas de ar na atmosfera, que escoam em velocidades orientadas em direções, seja devido às variações de temperatura e gradientes de pressão, latitude geográfica ou pelos efeitos topográficos locais (Garrat, 1994; Oke et al., 2017, p. 77). A direção do vento é determinada pela localização dos centros de altas pressões (anticiclones) para baixas pressões (ciclones) (Davenport, 1960; Oke, 1987, p. 176). Este movimento não é retilíneo, mas é defletido pela rotação da Terra, forçando o vento à redirecionamentos devido a força inercial de Coriolis (Lopes, 2003, p. 19).

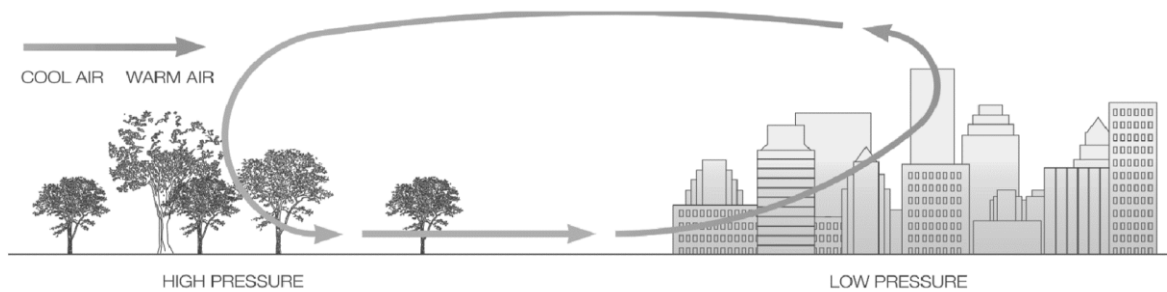
Segundo Prata Shimomura (2005, p. 33), em mesoescala a velocidade de escoamento do vento é determinada pela magnitude das diferentes densidades assumidas pelas massas de ar, devido ao seu aquecimento heterogêneo pelo contato com superfícies da Terra. Quanto maior a diferença de pressão entre as duas áreas, mais rapidamente o ar se move criando turbulências (De Villiers, 2006, p. 73), as quais de acordo com a análise de Oke et al. (2017, p. 105) são geradas por processos mecânicos e térmicos. Estes processos dependem das propriedades estruturais da superfície (rugosidade dos espaços construídos e naturais) e da intensidade do fluxo de calor sensível (QH) na superfície.

Em meio urbano, desde os anos 1960, a ventilação natural passou a ser estudada em diversas escalas por diferentes métodos dentre eles: I) às simulações computacionais de modelos diagnóstico como será utilizado nesta tese; assim como, II) os avanços nos modelos de simulação por Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* — CFD), e, III) as pesquisas e simulações em túneis de vento (Stathopoulos e Baskaran, 1996; Bosch e Rodi, 1998; Franke et al., 2004; Jiru e Bitsuamlak, 2010). No entanto, os efeitos da topografia local, da morfologia urbana, da presença de estrato arbóreo e da produção de calor antrópico nos ventos, ainda necessitam de maior destaque nas pesquisas acadêmicas e na conscientização por parte de órgãos gestores quanto aos benefícios, riscos e necessidade de manutenção da ventilação natural em meio urbano.

A relação do fluxo de ar com a topografia, segundo (Oke, 1987, p. 183), não é fácil de ser mensurada, uma vez que, as formas de relevo criam perturbações no padrão de fluxo de ar, ainda que em diferentes escalas. É, no entanto, possível identificar alguns padrões típicos de fluxo de ar em torno do relevo através da modelação numérica ou a construção de um modelo para simulações de fluxo em túneis de vento. Ainda segundo Oke (1987, p. 184), inclinações em superfície até cerca de 17°, geralmente permitem que o fluxo de ar na CLI se ajuste sem que haja a separação das linhas de fluxo a sotavento. Acima destes valores o aumento na elevação do solo em relação à média requer que o fluxo se restrinja verticalmente e isso resulta em aceleração.

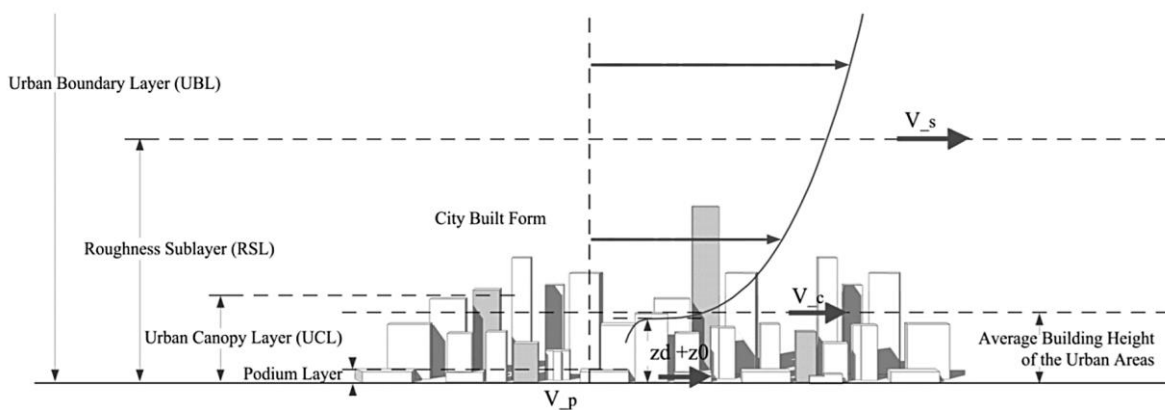
À mesoescala, os movimentos de massa de ar, que são originariamente limpos e úmidos (brisas), em contato com as formas de relevo e a morfologia urbana, têm propensão a diminuir drasticamente o arejamento nas cidades (Alcoforado et al., 2005). O vento modificado em sua velocidade e direção chega

ao centro das cidades por vezes já carregado de poluentes e com baixa umidade (De Villiers, 2006, p. 90; Cleugh e Grimmond, 2011). Em condições de baixa ventilação natural, o ar na região central aquece e sobe, e na periferia o ar cria um movimento convergente para o centro da cidade (Figura 12), onde se encontra o pico da ICU formando-se, assim, um "domo" de poluição sobre a cidade (Oke et al., 2017, p. 228).



**Figura 12** – Diferenças de pressão no vento em áreas urbanas e rurais. Fonte: Fleming (2015, p. 51).

Na escala vertical, a velocidade do vento aumenta com a altura, alcançando um valor constante no topo da CLS (Figura 13). Lopes (2003, p. 29) afirma que durante a ocorrência de ventos fracos, a altura acima da qual a velocidade média do vento se mantém constante, depende da quantidade de convecção térmica gerada pela superfície (com o aquecimento da superfície este valor aumenta, ocorrendo o oposto como arrefecimento).



**Figura 13** - O perfil de vento nas cidades e a relação CLI com a diminuição significativa na velocidade do vento. Fonte: Ng et al., (2011).

Na ausência de efeitos térmicos, a influência do atrito depende da rugosidade das superfícies urbanas (Lopes 2003, p. 26). Neste caso, o atrito pode retardar o fluxo de ar à medida que se aproxima da superfície, diminuindo a sua velocidade média horizontal. Para além da topografia e da morfologia urbana, outro elemento que condiciona a ventilação natural em meio urbano, diz respeito à presença do estrato arbóreo. Com diferentes formas e disposições, a vegetação assegura um conjunto de funções sociais,

estéticas e principalmente ecológicas (serviços de ecossistemas urbanos), com reflexos diretos na temperatura do ar e superfícies e no clima local como foi descrito anteriormente (Nucci et al., 2003; Yu e Hien, 2006; Qiu et al., 2017; Lin et al., 2017).

Contudo, na última década tem surgido novas perspectivas de análise dos efeitos causados pela presença de extrato arbóreo em ambientes urbanos e as interações com a ventilação natural, os quais demonstram que a vegetação em diferentes escalas, também pode modificar a velocidade e fluxo dos ventos, atuando no incremento da rugosidade urbana (parques florestais) e nos potenciais corredores ventilação natural (disposição da arborização de arruamento), acentuando as condições de estabilidade atmosférica e por dificultar a dispersão de poluentes (Gromke, 2011; Wania et al., 2012; Gromke e Ruck, 2012; Vos et al., 2013; Yuan et al., 2017).

No entanto, ainda que a ventilação natural em meio urbano apareça como uma componente fundamental que poderia ajudar a reduzir as concentrações de calor e poluentes nos espaços urbanos (Oke et al., 2017, p. 91), a sua eficiência depende da diminuição dos níveis de interferência no fluxo de ar. Sobre este ponto, o planejamento dos espaços urbanos quanto às tipologias de estruturas, tecidos e coberturas urbanas pode contribuir para manutenção dos corredores de ventilação natural e garantir melhores condições de conforto bioclimático.

## **2.5. A importância da análise da $T_{SUP}$ e a ventilação natural para o ordenamento do território**

Como expoente máximo da ação antrópica sobre o clima, a ICU é um problema recorrente, sobretudo nas megacidades, no qual soluções para promover adaptações não são fáceis, pois exigem por um lado a compreensão de todas as componentes que atuam sobre e em interação com o clima local e por outro a atuação dos gestores urbanos com medidas de intervenção. Nesse sentido a ciência ainda procura explicações, modelos e ferramentas capazes de fornecer soluções para a atenuação da intensidade das ICU. É neste sentido que o campo da morfologia urbana integrada à informação climática tanto tem a contribuir com o ordenamento dos espaços urbanos.

Como destacou Oke (2006), três dos quatros controles da ICU, estão diretamente vinculados à forma urbana com reflexos significativos na alteração do clima em diferentes escalas (meso, local e microescala). Com base nos princípios apresentados, a discussão relativa à morfologia urbana, a ventilação natural e a temperatura das superfícies, são consideradas por diversos autores como questões centrais a serem investigadas no que se refere à gestão dos poluentes, eficiência energética em meio urbano e na procura por cidades mais sustentáveis.

Neste capítulo são discutidas em escala local e micro as relações entre a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural com a morfologia urbana em suas estruturas, tecidos e coberturas urbanas. Em seguida são investigadas propriedades da forma urbana para proposição da análise morfoclimática.

### 3.1. A relação da Temperatura das Superfícies ( $T_{SUP}$ ) e a Morfologia Urbana

Segundo Oke et al. (2017, p. 170), a variabilidade da  $T_{SUP}$  em ambiente urbano está relacionada às propriedades geométricas, aerodinâmicas, radiativas e de umidade, presente nas estruturas, tecidos e coberturas urbanas. Os padrões de calor registrados pelos sensores e que estão presentes no cálculo da  $T_{SUP}$  são obtidos com base nos valores de emissividade e a reflectância, as quais são controladas pelas características da morfologia urbana, com reflexos nas condições térmicas locais e na atmosfera adjacente (Golany, 1996; Oke, 2006; Zhao et al., 2011).

#### 3.1.1. *As Estruturas Urbanas e o papel das propriedades geométricas e espaciais na $T_{SUP}$*

A estrutura urbana, corresponde a configuração tridimensional dos elementos físicos fundamentais (edifícios, vias e espaços livres de construção), os quais podem ser compreendidos em suas propriedades geométricas e espaciais. Em escalas local e microclimática, o efeito dos edifícios, vias e espaços livres de construção, controlam os padrões de trocas radiativas e energéticas e as interferências no fluxo de ar, as quais são responsáveis pelos contrastes térmicos captados pelos sensores (Adolphe, 2001; Oke et al., 2017, p. 6)

No que se refere às propriedades físicas das estruturas urbanas, Eliasson (1990; 1996) considera que a geometria pode ser um dos parâmetros mais relevantes na variação do microclima. Toda a estrutura presente no SEU possui um tipo de geometria e toda a geometria incide de modo diferente no controle dos padrões de trocas radiativas e energéticas, além da influência nos fluxos turbulentos (Lindberg et al., 2003; Oke, 2006; Bourbia e Boucheriba, 2010).

No âmbito da estrutura individual de um edifício ou no efeito conjunto de grandes blocos geminados (Arantes, 2012, p. 220), os níveis de fragmentação e compacidade das estruturas (Zhang et al., 2017), podem ser determinantes no aumento ou redução da  $T_{SUP}$  (Nichol, 1996). Considerando a mesma área de implantação, diferentes arranjos geométricos de uma estrutura construída, podem traduzir-se em maiores áreas de superfícies (telhados e fachadas) expostas à luz solar, assim como maiores níveis de sombreamento das superfícies envolventes<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> A sombra é projetada na direção oposta ao raio solar e tem um comprimento igual à altura da obstrução (H), dividida pela tangente do ângulo de altitude solar ( $\tan \beta$ ) (Oke et al., 2017, p. 132).

### 3.1.2. A relação do Tecido Urbano e as texturas das superfícies com a $T_{SUP}$

A leitura conjunta do arranjo espacial produzido pelo agrupamento das estruturas urbanas (edifícios, vias, espaços livres de construção), criam tipos de tecidos (Moudon, 1997; Levy, 1999), os quais podem ser lidos por meio das suas texturas e pelo modo como influenciam na  $T_{SUP}$  em meio urbano. De acordo com as características dimensionais das estruturas urbanas (altura, largura, área, volume, perímetro), os tecidos urbanos podem apresentar tipologias de texturas diversas: rugosas, porosas, oclusas, lisas, retilíneas etc. Estes tipos de textura determinam as quantidades de propriedades radiativas (reflexividade, absortividade e transmissibilidade), térmicas (condutividade, difusividade, emissividade) e de umidade (evaporação e evapotranspiração), princípios que controlam a  $T_{SUP}$  nas cidades.

As características aerodinâmicas dos tecidos urbanos exigem apresentar um panorama da  $T_{SUP}$  com cautela. A mensuração por imagens de satélite, como o método mais comum nos estudos sobre essa temática, pode não conseguir retratar com precisão as temperaturas reais do topo e das superfícies. No interior dos *canyons* urbanos profundos (Oke et al., 2017, p. 51), as características aerodinâmicas dos tecidos urbanos podem até mesmo apresentar condições de temperaturas mais baixas (dependendo da hora de passagem do satélite, dos efeitos da topografia e do nível de verticalidade).

Como principal elemento dos tecidos urbanos, os *canyons* urbanos são definidos por Sini et al. (1996), como uma via entre edifícios que se alinham continuamente ao longo de ambos os lados. A análise dos *canyons* urbanos produz informações relevantes para as questões climáticas como o consumo de energia, ventilação natural em edifícios, dispersão de poluentes do ar, bem como conforto e segurança humana (Vardoulakis et al., 2003; Eliasson et al., 2006). No interior dos *canyons*, a radiação solar, como principal componente que atua na  $T_{SUP}$ , apresenta um panorama complexo, com múltiplos impactos no potencial de acumulação de calor nas superfícies e no aumento das reflexões múltiplas (Kondo et al., 2001; Grimmond et al., 2001; Sailor e Fan, 2002; Harman et al., 2004a). De acordo com os níveis de declividade do terreno, este panorama pode ser acentuado em alguns períodos do dia, por causa das sombras dos edifícios, o que dificulta ainda mais a captação da  $T_{SUP}$  pelos sensores de satélite.

Outro efeito dos tecidos urbanos na  $T_{SUP}$  refere-se aos padrões de texturas, as quais de acordo com a análise de Oke et al. (2017, p. 136), estão relacionadas às condições que influenciam o vento e o sombreamento. Neste caso os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  ocorrem em tecidos urbanos compostos por estruturas com texturas lisas, protegidas do vento e com pouca turbulência, no qual há maior área de exposição à radiação solar, enquanto os valores mais baixos de  $T_{SUP}$  são observados sobre fachadas de tecidos rugosas, bem acoplados ao vento. Ainda segundo os autores, há uma mistura quase infinita dessas propriedades em uma área urbana, de modo que os padrões espaciais de  $T_{SUP}$  nas cidades são extremamente variados pelas texturas, especialmente durante o dia.

### 3.1.3. *As Coberturas urbanas e o impacte na $T_{SUP}$*

As coberturas urbanas controlam as propriedades radiativas e de umidade nas interfaces ocupadas pelas coberturas antrópicas (espaços construídos, pavimentados, viários etc.) e pelas coberturas naturais (vegetação e corpos de água) (Oke et al., 2017, p. 20). Para a análise em morfologia urbana, o controle da cobertura urbana pode ser analisado através de critérios de intensidade de ocupação (frações permeáveis e impermeáveis e a intensidade de uso e coberturas do solo) e de organização dessas coberturas no SEU (propriedades de continuidade e proximidade).

As coberturas em meio urbano alteram o balanço radiativo e energético das superfícies. Esses processos podem atuar no incremento ou redução da  $T_{SUP}$  e na restituição do calor absorvido para a atmosfera. Voogt e Oke (1998) realizaram observações diretas da  $T_{SUP}$  e a correlação com o uso e a cobertura da terra em Vancouver, Canadá. Os resultados revelaram fortes variações na  $T_{SUP}$  de até 9°C medidos na área central, o que segundo os autores estaria relacionado aos padrões de irradiação e sombreamento das diferentes superfícies.

A elevada intensidade de ocupação do SEC, resulta em maior impermeabilização dos espaços urbanos, em parte pelo uso de materiais impermeáveis no momento de ocupação do solo, em parte pelas modificações em sua forma, uso e cobertura ao longo do tempo. Estas modificações condicionam os padrões de  $T_{SUP}$  em meio urbano e resultam no desequilíbrio entre as proporções ideais de subsistemas de espaços urbanos (Nucci, 2001, p. 33), além de representarem um decréscimo nos níveis de conforto bioclimático (Matzarakis et al., 1999).

As coberturas urbanas acabam por criar padrões de continuidade e proximidade e revelam uma lógica de organização espacial, que condiciona a predominância de uma ou mais propriedades químicas e térmicas presentes nos materiais em superfícies (como o albedo, emissividade, irradiância). Essas propriedades controlam os níveis de absorção da radiação incidente durante o dia e a liberação durante a noite, causando diferenças máximas de temperatura nas superfícies (Weng et al., 2004; Sailor e Lu, 2004).

O efeito de aumentar a reflexividade das coberturas em superfícies, através da aplicação de revestimentos altamente refletivos e materiais frios, pode traduzir-se por exemplo numa estratégia de gerenciamento das temperaturas de superfície em meio urbano (Aida, 1982; Arnfield, 1982; Akbari et al., 2001; Golden e Kaloush, 2006; Mohajerani et al., 2017). Segundo Oke et al. (2017, p. 128), as propriedades térmicas e radiativas das coberturas urbanas controlam a capacidade de refletir a radiação de pequenos comprimentos de onda (albedo -  $\alpha$ ) e emitir radiação de grandes comprimentos de onda (emissividade -  $\epsilon$ ) (Tabela 3). Coberturas com baixo  $\alpha$  favorecem a absorção de ondas curtas e, portanto, apresentam maior  $T_{SUP}$ , enquanto aquelas com alto  $\alpha$  reduzem o ganho de pequenos comprimentos de onda e levam a redução na  $T_{SUP}$ . Coberturas com baixa  $\epsilon$  tendem a reter mais calor, mas podem parecer anormalmente frias quando vistas por sensores térmicos (Oke et al., 2017, p. 128).

**Tabela 3** – Valores de albedo e emissividade de vários tipos de coberturas presentes nos espaços construídos e viários. Fonte: traduzido de Oke et al., (2017, p. 129).

Superfícies		Albedo	Emissividade ( $\epsilon$ )
Vias	Asfalto	0.05 - 0.27	0.89–0.96
	Concreto	0.10 – 0.35	0.85–0.97
Paredes	Concreto	0.10 – 0.35	0.85–0.97
	Tijolo (vermelho - branco)	0.20 – 0.60	0.90–0.92
	Pedra cinzenta e vermelha	0.20 – 0.45	0.85–0.95
	Pedra calcária	0.40 – 0.64	0.85–0.95
	Madeira	0.22	0.90
Cores	Branco, cal, verde	0.50 – 0.90	0.85–0.95
	Vermelho, marrom, verde	0.20 – 0.35	0.85–0.95
	Preto	0.02 – 0.15	0.90–0.98
Telhados	Azulejo (antigo - novo)	0.10 – 0.35	0.90
	Telhas (escuro - Claro)	0.05 – 0.25	0.90
	Alcatrão e cascalho	0.08 – 0.18	0.92
	Ardósia	0.10 – 0.14	0.90
Janelas	Vidro Claro	0.08	0.87–0.95
	Vidro colorido, revestido de película	0.09 – 0.52	0.05 – 0.30
Metálicos	Metais polidos	0.50 – 0.90	0.02 – 0.96

Os valores mais altos de  $T_{SUP}$  ocorrem em coberturas impermeáveis com baixa admitância térmica ( $\mu$ ), que resistem à transferência de calor para o substrato e concentram-na numa fina camada superficial que fica muito quente (por exemplo, telhados). À noite, os telhados tornam-se relativamente frios, devido a capacidade limitada de armazenamento de calor em relação às coberturas presentes nas vias (Oke et al., 2017, p. 134).

As coberturas naturais como os corpos d'água e a presença de cobertura vegetal (parques, árvores de arruamento, telhados e paredes verdes) estão diretamente relacionadas com os níveis de permeabilidade, umidade e evaporação local, está relacionada condições bioclimáticas favoráveis no SEU. Os benefícios da cobertura vegetal para a estabilização da temperatura do ar e das superfícies incluem desde o sombreamento e o conforto térmico ao nível do pedestre (Matzarakis et. al, 1999), até a relação direta no metabolismo urbano. Isso se dá pela: I) filtragem do ar (absorção do CO, NOx e SO<sub>2</sub>); II) diminuição das partículas em suspensão por meio da retenção destas nas superfícies das folhas; e, III) equilíbrio do índice de umidade no ar por meio da evapotranspiração (Oke, 1987, p. 262; Yu e Hien, 2006; Qiu et al., 2017; Lin et al., 2017).

Segundo Oke et al. (2017, p. 158), a disponibilidade de umidade nas superfícies, solo e da água presente na vegetação fornecem um mecanismo para a perda de calor pelo fluxo de calor latente ( $Q_E$ ). Para os autores, as  $T_{SUP}$  mais elevadas são encontradas geralmente sobre coberturas secas (por exemplo, concreto, telhados) que não canalizam muita energia disponível para a água em evaporação. As superfícies com acesso a água (por exemplo, solos úmidos, relvados, folhas) apresentam  $T_{SUP}$  inferior durante o período diurno devido ao arrefecimento por evaporação.

### 3.2. A relação da morfologia urbana com ventilação natural em escalas locais e micro

A morfologia urbana tem um papel fulcral nas características físicas e térmicas que modificam a ventilação em meio urbano (Ng et al., 2011; Oke et al, 2017, p. 89). Segundo Lopes (2003, p. 54), o fluxo de ar em torno dos edifícios é uma questão de análise microclimática usando-se, como técnicas os túneis aerodinâmicos de simulação da CLI e modelos numéricos. Neste sentido, diversos estudos têm demonstrado que a *performance* do vento em escalas local e micro está relacionada com fatores como a geometria, densidade, altura, textura e a acumulação de calor no SEU (Sini et al., 1996; Gál e Unger, 2009; Lopes, 2006; Oke, 2006; Eliasson et al., 2006).

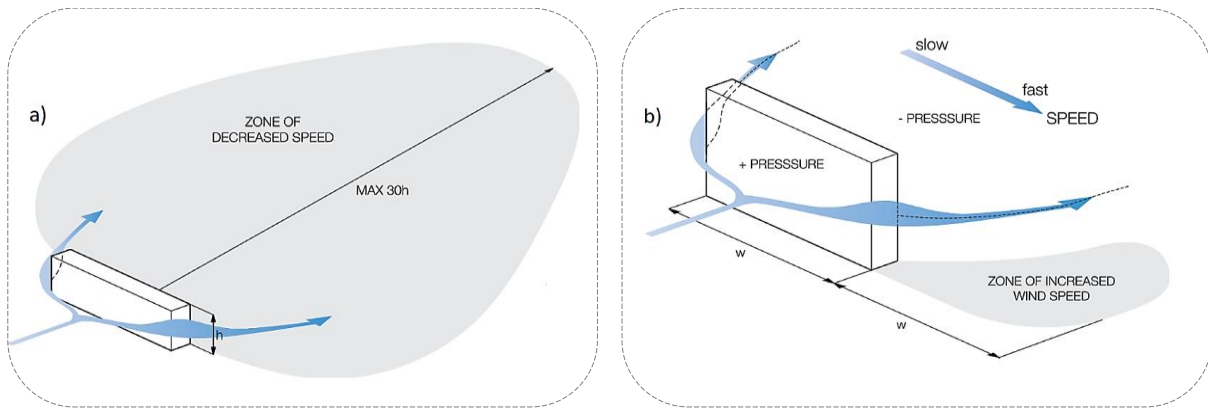
#### 3.2.1. O impacte das Estruturas Urbanas no fluxo de ar

As estruturas urbanas, sobretudo o Subsistema de Espaços Construídos (SEC), representam os maiores obstáculos a progressão do fluxo de ar, modificando o vento em sua direção e velocidade em diversas circunstâncias. Estas características criam movimentos complexos na ventilação natural, dependendo da configuração espacial e das propriedades geométricas de cada estrutura urbana em relação ao fluxo de ar predominante (Steemers et al., 1997; Adolphe, 2001; Merlier, 2018).

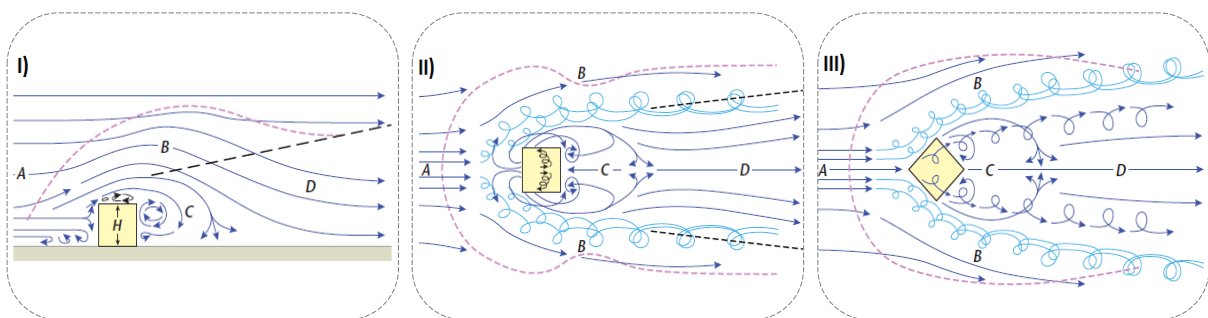
Gandemer (1975) apresentou uma sistematização dos movimentos de fluxo de ar sobre diferentes estruturas construídas e as suas implicações no conforto mecânico dos indivíduos, a qual ainda hoje largamente utilizada em manuais de planeamento urbano. Esta síntese de movimentos do fluxo de ar e principalmente os modelos utilizados por Gandemer (1975) e Bennett (2007) foram mais tarde compilados por Fleming (2015), que intitulou de *Wind Effects Library*, uma biblioteca de efeitos do vento no qual os agentes do planeamento podem consultar como as formas geométricas de um edifício modifica as condições de vento específicas.

Na microescala, os efeitos isolados de uma estrutura construída, podem resultar em duas condições básicas: I) na desaceleração do vento e conseqüente redução do potencial de ventilação dos espaços envoltórios de sotavento (Figura 14a); e, II) no efeito de aceleração (Bennett, 2007; Fleming, 2015, p. 9; Oke et al., 2017, p. 82). Como um fluído, o vento em contato com uma estrutura construída tende a escoar para as partes adjacentes. Este movimento causa a compressão e o aceleração das linhas de fluxo do ar e incide no aumento das turbulências nos vértices das estruturas (Figura 14b).

Oke (1987, p. 264) e Oke et. al (2017, p. 83) descrevem o percurso do fluxo de ar nos arredores de uma estrutura construída, considerando uma geometria cúbica, isolada e com telhado plano. Segundo os autores quando esta estrutura é colocada perpendicularmente à direção predominante do vento (isto é, com o seu lado de barlavento em ângulo reto), várias áreas podem ser identificadas, em termos de direções, velocidades e intensidade de turbulência (Figura 15).



**Figura 14** - Delimitação de zonas de desaceleração (a) e aceleração (b) do vento. Fonte: Fleming (2015, p. 9).



**Figura 15** - Efeitos do fluxo de ar nos espaços adjacentes de um obstáculo cúbico isolado: I) vista lateral com fluxo de ar (A), mostrando a zona de deslocamento (B), a cavidade (C) e a zona de esteira (D); II) vista dos efeitos no fluxo de ar em planta próxima ao nível do solo; III) visualização do fluxo com o edifício orientado em 45° para o fluxo de ar. Fonte: modificado de Oke et. al, (2017, p. 83).

Lopes (2003, p. 55), descreve que em primeiro lugar pode-se identificar uma zona (A), onde o fluxo não é perturbado (*undisturbed flow*) e, portanto, não sofre a influência do obstáculo. Em seguida, verifica-se, uma zona de deslocamento do ar (*displacement zone*) que começa antes do vento atingir o obstáculo por causa do aumento de pressão sobre a parede (B). Imediatamente a sotavento do obstáculo a pressão diminui e tende a “aspirar” o ar, formando-se um turbilhão, chamada zona de cavidade (*lee edd*) (C). Considerando um edifício isolado, as paredes laterais e a sotavento são áreas de sucção (porque o ar tende a movimentar-se das altas para as baixas pressões), onde se dá a dupla inversão das direções (formando um padrão em forma de ferradura). Nas partes laterais de obstáculos de formas angulosas, ocorre a separação do fluxo, tal como nos topos, em que parte da linha de fluxo tende a tomar uma direção descendente e forma-se uma zona de esteira (*wake*), de dimensão 10 a 15 vezes superior à altura do obstáculo (D).

### 3.2.2. O Tecido Urbano e o efeito das texturas na ventilação natural

As cidades como as mais rugosas superfícies sob a Camada Limite Atmosférica – CLA, atuam como uma esteira para o fluxo de ar (Oke, 1987, p. 298). Em escalas locais e micro, conforme o vento adentra as cidades e escoar próximo da superfície, as propriedades aerodinâmicas e texturais do SEC somada as áreas de vegetação arbórea, criam um efeito de barreira à progressão do fluxo de ar, fazendo o sentir através das modificações na sua velocidade e direção e no aumento das turbulências mecânicas e térmicas (Oke et al., 2017, p. 80).

A relação entre as estruturas urbanas (construídas, viárias e livres de construção) que compõem os tecidos urbanos, delimita as porções penetráveis e impenetráveis para o fluxo de ar no SEU, o qual pode ser medido pelas propriedades de porosidade e rugosidade da CLI (Bottema, 1995; Grosso, 1998; Gál e Unger, 2009; Yuan e Ng, 2014). Tecidos urbanos com elevada verticalidade tornam o SEU particularmente suscetível ao desenvolvimento de uma subcamada de rugosidade com profundidade significativa, podendo ser várias vezes a altura média do edificado (Arnfield, 2003).

Para a cidade de Lisboa, Lopes (2003, p. 132) constatou que a rugosidade dos elementos presente em superfície, provoca uma redução na velocidade média do vento de cerca de 2 m/s (tanto para o vento medido a 100m de altura, quanto junto ao solo). No entanto, o autor afirma que aos 100m de altura existe uma menor diminuição relativa (14 a 19 %) de redução efetiva na velocidade do vento, enquanto junto à superfície, essa redução da velocidade do vento é de 26 a 30%.

O efeito conjunto das texturas no tecido urbano, limita o efeito dos ventos locais e modifica a estrutura aerodinâmica da CLA em várias escalas (Yuan e Ng, 2012). Sobre este ponto, outro aspecto a ser discutido diz respeito ao nível de oclusividade dos espaços urbanos, sobretudo no âmbito dos *canyons* urbanos. A regularidade do espaçamento entre edifícios, determinam as propriedades de abertura da superfície urbana em relação à atmosfera, o que alguns estudos destacam como a fração de céu visível (*Sky View Factor – SVF*) ou razão entre a altura das estruturas e a largura dos espaços que as separam (*Ratio H/W*) (Ratti et al., 2006; Eliasson et al., 2006; Unger, 2009).

No interior dos tecidos urbanos a configuração dos *canyons* urbanos e o impacto na ventilação natural, podem ser compreendidos considerando-se os níveis de verticalidade e oclusividade de uma área, dados pelas métricas de altura e largura dos espaços que separam os edifícios (Gál et al., 2009; Choi et al., 2018). Estas características aumentam a criação de vórtices nos espaços circundantes ao edificado, dificultam a dispersão de poluentes e dissipação de calor, e acabam por afetar os níveis de conforto térmico e mecânico para os pedestres (Eliasson et al., 2006; Ng et al., 2011). Neste sentido, o progressivo aumento da verticalidade dos elementos nas cidades tem resultado na diminuição da velocidade média do vento e um aumento na turbulência em função das características locais (Zhu e Anderson, 2019).

### 3.2.3. *As Coberturas urbanas e o impacte na ventilação natural*

As coberturas urbanas estão relacionadas às frações de superfícies permeáveis e impermeáveis e no modo como estão organizadas (continuidade e proximidade) em uma unidade de análise. Segundo Oke et. al (2017, p. 81), os padrões de fluxo de ar no SEU podem ser aumentados ou diminuídos pelos efeitos térmicos das coberturas, especialmente sob condições de vento fraco.

Quando uma cobertura urbana é fortemente aquecida pela radiação solar ela também aquece o ar adjacente e cria uma estreita camada de ar quente sobre as superfícies. Dependendo da direção, velocidade do vento e das propriedades térmicas dos materiais de construção (Sini et al., 1996), os efeitos do sobreaquecimento das coberturas presentes nas paredes, telhados e solo produz na ventilação natural estão relacionados principalmente ao aumento do fluxo turbulento do ar e a criação vórtices.

O arranjo organizacional das coberturas em meio urbano, indica o potencial térmico em termos de ganhos e perdas de calor para a atmosfera em uma localidade. As diferentes tipologias de coberturas e o grau de impermeabilidade, principalmente no SEC e SEIU, tendem a canalizar todo o seu calor e libertá-lo na forma de calor sensível ( $Q_H$ ). Quando próximas ou contínuas as coberturas urbanas com as mesmas propriedades térmicas (sobretudo dos edifícios e vias) acabam por aquecer a atmosfera adjacente. Isto ocorre devido ao maior percentual de área de exposição direta à radiação solar e, também, por não haver canais para o arrefecimento pela ventilação natural entre as coberturas. Situação inversa, pode ser verificada quando as superfícies são revestidas por coberturas naturais, as quais raramente são impermeáveis. Na presença de umidade, a energia radiante excedente pode ser convertida em calor latente ( $Q_E$ ) e acaba reduzindo as temperaturas locais que não dependem tanto do vento para arrefecerem, ainda que a concentração de poluentes seja um fator limitante (Yu and Hien, 2006; Obiakor et. al, 2012).

Nos espaços intersticiais do SEC e nos *canyons* urbanos, a turbulência gerada termicamente resulta no aquecimento das superfícies, as quais impõem uma força ascendente em relação ao ar mais frio e denso que as rodeia. Nesse sentido, Oke et al. (2017, p. 81) afirmam que a força inversa à gravidade acelera as frações menos densas e mais quentes, chamadas térmicas ou plumas. As ondas térmicas criam uma fricção e mistura entre elas e o ar circundante à medida que sobem. O movimento vertical também pode ser suprimido pela estratificação da densidade da atmosfera. Se a superfície for mais fria que a atmosfera acima, o ar mais frio (e denso) fica mais próximo da superfície e o movimento vertical será amortecido.

As coberturas urbanas impactam as trocas radiativas e energéticas no fluxo de ar na CLI, as quais podem produzir campos térmicos distintos entre os períodos diurnos e noturnos. Pesquisas recentes mostraram que, enquanto os fluxos de calor sensíveis das coberturas dos telhados dominam a troca de calor da atmosfera durante o dia, o calor armazenado liberado das paredes dentro dos *canyons* urbanos, pode manter condições neutras a instáveis em áreas urbanas densas à noite (Christen e Voogt, 2004; Offerle et al., 2007; Salmond et al., 2012).

No interior dos *canyons* urbanos, diferentes propriedades térmicas presentes nos materiais de cobertura influenciam significativamente as propriedades e condições de estabilidade do fluxo de ar (Eliasson, 1990; Salmond et al., 2005). Em *canyons* urbanos profundos, os níveis de conectividade (grau de geminação) e proximidade (distância entre as coberturas) das coberturas presentes nas paredes, pisos e principalmente telhados condicionam as perdas de calor para a atmosfera (Chen et al., 2017), as quais não esfriam tão rapidamente quanto as coberturas dos telhados, devido a diferenças na radiação e de armazenamento de calor. Portanto, o ar do *canyon* urbano é instável em relação ao nível acima dos telhados dos edifícios durante a maior parte do dia (Oke et al., 2017, p. 90).

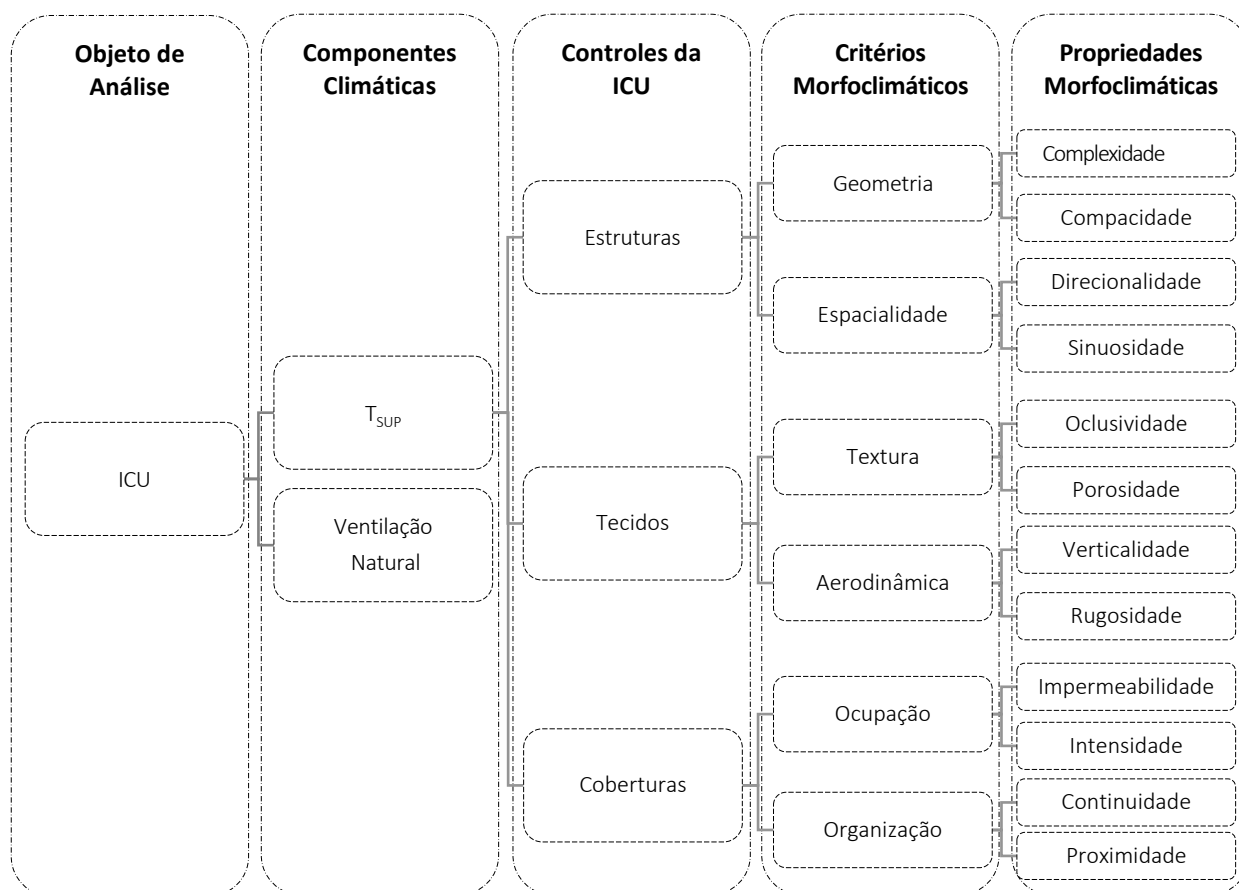
O impacto que as coberturas urbanas apresentam na ventilação natural é uma consequência do aumento da capacidade de calor das superfícies urbanas dominantes, como o asfalto e o concreto, em comparação com as superfícies com vegetação nas áreas rurais (Zajic et al., 2011). Soluções para o impacto que as coberturas urbanas em sua intensidade de ocupação e nível de impermeabilização das superfícies apresenta no fluxo de ar, não são simples. A densidade de ocupação do solo, o uso de materiais com alta capacidade térmica nas superfícies e a organização destas coberturas no SEU, muitas vezes são questões que passam distantes do planejamento urbano.

### **3.3. Critérios de Seleção das Propriedades Morfoclimáticas**

A análise morfoclimática voltada ao ordenamento dos espaços urbanos (Benzerzour, 2004, p. 235; Martins, 2014, p. 117), reúne elementos do campo da morfologia urbana e a relação com as componentes do clima urbano através do uso de controles, critérios e propriedades aferidos com base no uso indicadores. Com base nos três controles da morfologia urbana que atuam diretamente na formação e intensidade da ICU (Oke, 2006), um conjunto de critérios morfoclimáticos foram definidos para avaliar o impacto que a forma urbana apresenta sobre a variação da  $T_{SUP}$  e a ventilação natural, a saber: geometria, espacialidade, textura, perfil aerodinâmico, ocupação e organização (Figura 16).

O número de critérios morfoclimáticos adotados para discutir os controles da ICU citados por Oke (2006), podem variar de acordo com a finalidade de cada estudo, assim como o uso de outras métricas, fórmulas, indicadores, unidades de análises, ainda que, por vezes o objetivo seja o mesmo (Steemers et al., 1997; Adolphe, 2001; Salat, 2009; Martins et al., 2016; Santos et al., 2017; Silva et al., 2018).

Nesta tese, para análise morfoclimática foram definidos um conjunto de doze propriedades da forma urbana agrupadas de acordo com os critérios citados. Para cada propriedade morfoclimática foi definido um indicador morfoclimático, os quais serão abordados com pormenores no Capítulo IV referente aos procedimentos metodológicos, seguindo a descrição das métricas a serem utilizadas para analisá-los assim como os dados de base e implementação do método em SIG.

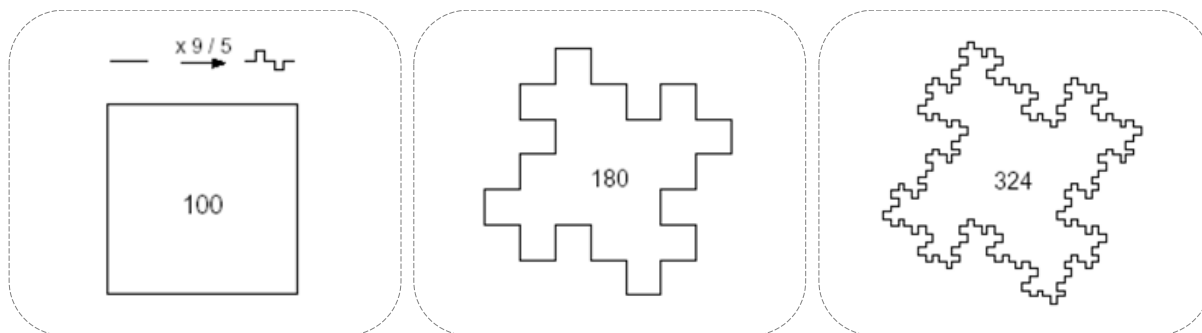


**Figura 16** - Organograma de classificação da análise morfoclimática.

### 3.3.1. As propriedades morfoclimáticas das Estruturas Urbanas (Geometrias e Espacialidades)

Para análise do controle da ICU relacionado às estruturas urbanas o critério morfoclimático da geometria compreende as propriedades da forma em sua complexidade e nível de compacidade. O segundo critério para análise das estruturas urbanas está relacionado com a espacialidade da forma urbana, no qual a direcionalidade e sinuosidade das estruturas são as propriedades investigadas em relação a T<sub>SUP</sub> e a ventilação natural.

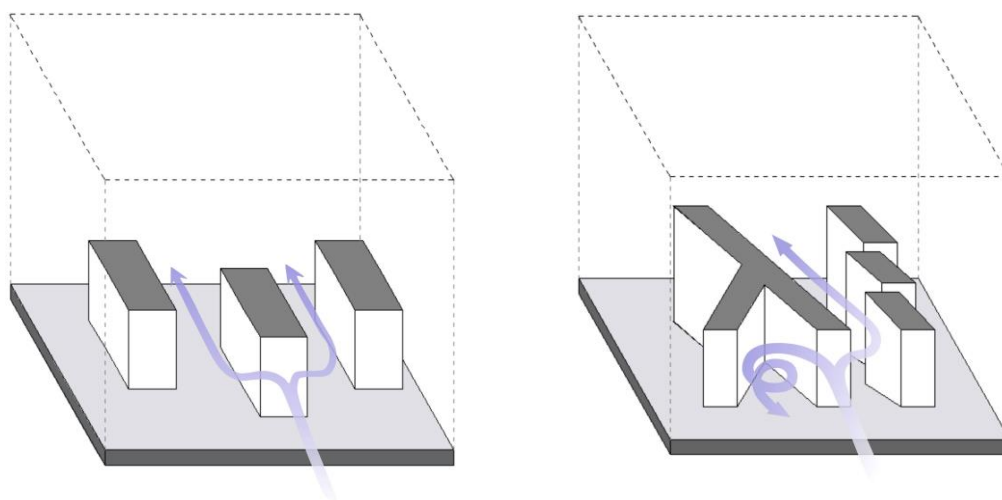
- **Complexidade Geométrica** – A complexidade indica o nível de repartição de um elemento para avaliar sua equidade com base nos estudos da geometria de objetos fractais (Batty e Xie, 1996; Frankhauser, 2005; Chen, 2012). Em meio urbano é uma medida muito utilizada para avaliar estruturas individuais ou até mesmo cidades inteiras (Longley e Mesev, 2000). A complexidade de um elemento possui, muitas vezes, como objetivo, ser a mais homogênea possível, relevando-se positiva de acordo com a capacidade de um corpo fractal em ocupar seu espaço da maneira mais eficiente, mas também negativa, quando essa geometria se apresenta disforme num arranjo tecidual urbano (March, 2015; Chen, 2016). Aplicada ao contexto das estruturas urbanas, a complexidade é mensurada por meio das medidas do perímetro da forma (Figura 17).



**Figura 17** - Aumento da complexidade da forma em relação ao perímetro. Fonte: March (2015).

$T_{SUP}$  - Para a análise morfoclimática, o aumento da complexidade de uma estrutura edificada pode influenciar na  $T_{SUP}$  devido ao maior grau de dissipação da radiação de grande comprimento de onda na direção ascendente ( $L\uparrow$ ). Por outro lado, a irregularidade das fachadas reduz a absorção de radiação solar ( $K\downarrow$ ), com impactos nas condições de iluminação natural interna e nos níveis de sombreamento nas adjacências da estrutura construída (Yu et al., 2009; Martins et al., 2016, Zhang et al., 2017).

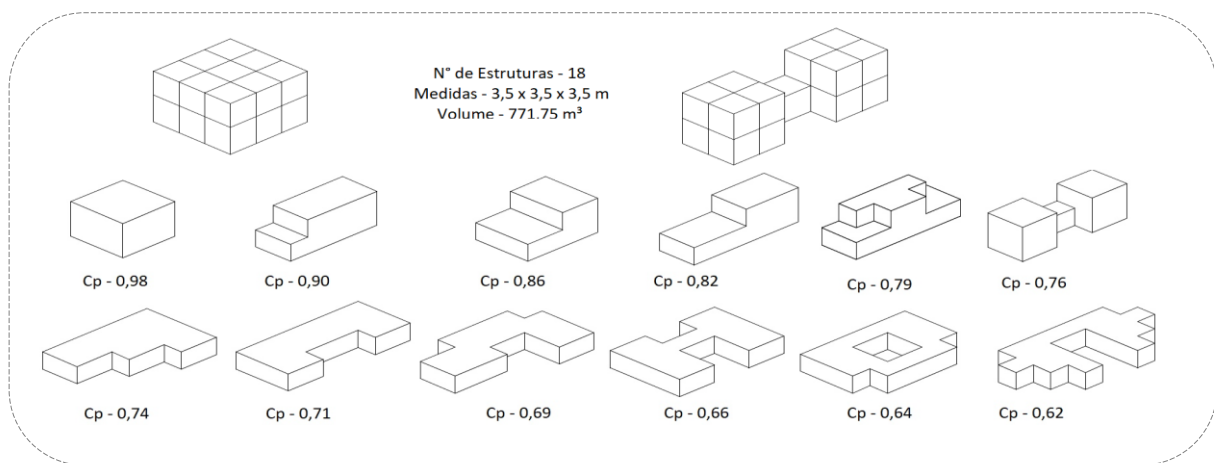
Ventilação Natural - Recentes estudos têm observado que em altura, formas complexas com elevado nível de fragmentação, modificam muito a direção e a velocidade do perfil do vento (Rizk e Henze, 2014; Bhandari et al., 2015; Elotefy et al., 2015). Para estes estudos formas edificadas com geometrias circulares e aerodinâmicas apresentam menor interferência no fluxo de ar quando comparadas com formas mais complexas, as quais tendem a limitar a atuação da ventilação natural devido ao aumento de interrupções consecutivas nas linhas do fluxo de ar. Como resultado, as áreas envolventes dos edifícios podem ser comprometidas, na função da ventilação natural de limpar os espaços adjacentes dos poluentes e dissipar o calor acumulado nas superfícies, dependendo ainda das grandezas físicas como altura e volume da forma e das propriedades de orientação em relação ao vento dominante (Figura 18).



**Figura 18** - Impacto de formas complexas (a) e regulares (b) na ventilação natural.

- **Compacidade Geométrica** - A compacidade é referida na literatura como sinônimo de desenvolvimento monocêntrico de alta densidade (Gordon e Richardson, 1997) e pode ser compreendida pelo nível de concentração ou expansão descentralizada de um objeto dentro de uma unidade de análise (Ewing, 1997; Tsai, 2005), considerando a relação entre o volume de uma forma construída e medidas como área e perímetro do seu recinto (Galster et al., 2001).

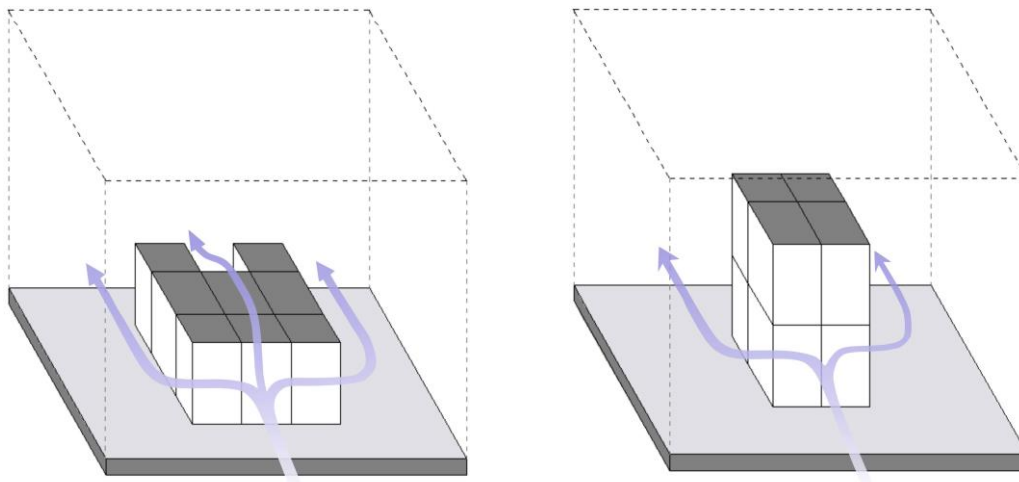
Como uma propriedade geométrica das estruturas urbanas, a compacidade pode ser analisada por meio de diferentes índices. Pessenlehner e Mahdavi (2003) comparam o modo como uma estrutura cúbica elementar (com medidas de 3,5x 3,5 x 3,5 m), pode ser combinada de maneiras diferentes (54 variações), considerando um conjunto de 18 cubos idênticos com o mesmo volume. Os resultados do indicador de compacidade podem ser verificados na Figura 19.



**Figura 19** - Valores de compacidade relativa de formas geométricas. Fonte: Pessenlehner e Mahdavi (2003).

$T_{SUP}$  – A compacidade interfere nos ganhos e perdas térmicas de maneiras diferentes. Estruturas esparsas representam maior área de superfície exposta a radiação solar, com reflexos significativos e inversos nos níveis de permeabilidade junto ao solo e na iluminação natural nas adjacências do edificado (Golany, 1996; Adolphe, 2001; Curreli e Roura, 2010; Martins et al., 2016). Por outro lado, quanto mais compacto são os blocos de construção, maior é a sua capacidade de concentração da radiação solar no topo das estruturas ( $K_{\downarrow}$ ), o que depende ainda dos materiais de cobertura nas fachadas e topo da estrutura e na capacidade de armazenamento de calor (Coutts et al., 2007).

Ventilação Natural - Como afirmam Oke et al. (2017, p. 83), as formas cúbicas com elevada compacidade reduzem a visibilidade do céu e impedem a continuidade dos caminhos de vento, com reflexos na dissipação de calor e no arrefecimento natural das estruturas construídas e na dispersão de poluentes em sua área envolvente (Hang et al., 2009; Wu e Hsieh, 2017). Para o planejamento urbano, modificações na orientação de um edifício não alteram sua compactação, mas podem melhorar as condições de escoamento do fluxo de ar e afetar o desempenho térmico das estruturas (Figura 20).

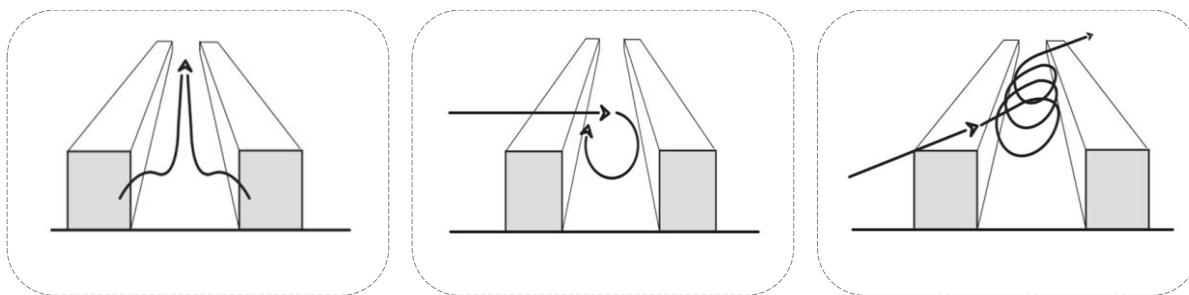


**Figura 20** - Impactos das formas compactas (a) e esparsas na ventilação natural.

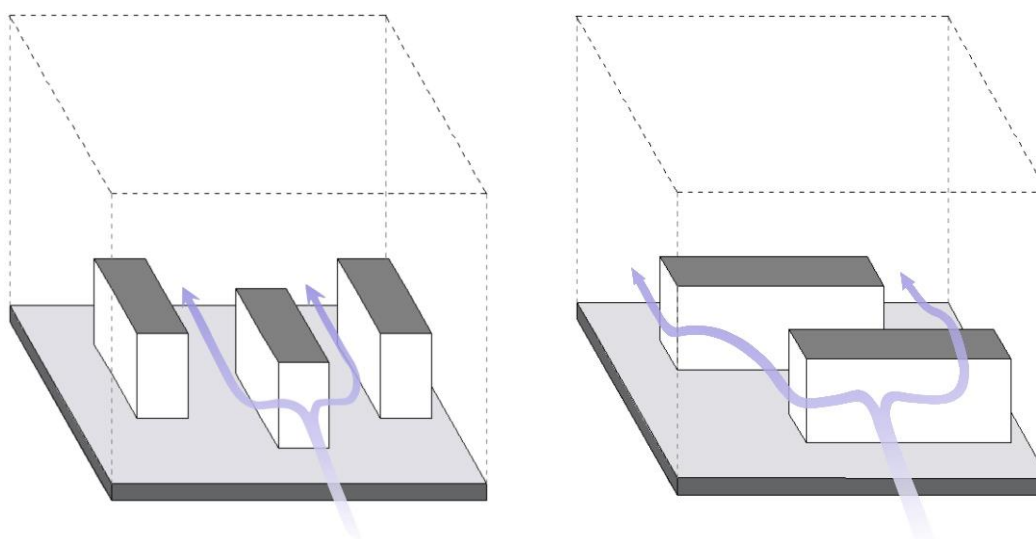
- **Direcionalidade** - A direcionalidade é uma propriedade espacial que indica a orientação geográfica das estruturas urbanas (construídas, viárias ou livres de construção) em relação a um norte referenciado. Para compreender a direcionalidade das estruturas dois parâmetros são considerados fundamentais: I) o azimuth (para a ventilação natural e as direções predominantes); e, II) a ponderação pela proporção de área ou volume da estrutura, a depender da finalidade do estudo.

$T_{SUP}$  - A direção das estruturas urbanas (em sua área total) determinam o tempo de exposição a incidência da radiação solar direta ao longo de um dia e as variações na  $T_{SUP}$  (Santamouris et al., 1999; Park et al., 2012; Theeuwes et al., 2014). Em microescala a orientação de um edifício resulta em efeitos divergentes entre os níveis de irradiação e sombreamento conforme o caminho que o sol percorre nas direções cardeais (Takebayashi et al., 2017; Albatayneh et al., 2018). Os estudos esclarecem que nas primeiras e últimas horas do dia, enquanto uma fração dos espaços construídos recebe menor incidência solar direta, em outra fração, a radiação aquece as superfícies que tendem à estocagem e o aprisionamento de calor (devido as propriedades de cobertura).

Ventilação natural - Para o vento a direcionalidade de uma estrutura urbana determina a quantidade de espaços construídos orientados como barreiras aos corredores de ventilação natural (Baskaran e Kashaf, 1996; Zhang et al., 2005; Yuan e Ng, 2014; Mittal et al. 2019). Estas condições determinam o potencial de uso do vento como elemento natural para o arrefecimento dos espaços construídos, assim como para a maximização do potencial de dispersão poluentes e dissipação de calor, que podem causar variações microclimáticas (Figura 21). Para a análise morfoclimática, a direcionalidade das estruturas urbanas pode ser investigada com base na orientação dos espaços construídos (como nesta tese), mas também na relação do fluxo de ar com o SEIU, de modo a compreender como o arranjo das vias se relaciona com a quantidade de caminhos livres na direção dos ventos predominantes (Georgakis e Santamouris, 2004; Frankhauser, 2005; Ng et al., 2011; Shishegar, 2013) (Figura 22).



**Figura 21** - Diferentes formas de escoamento do fluxo de ar nos *canyons* urbanos em relação à direção das estruturas urbanas. Fonte: Frankhauser (2005).



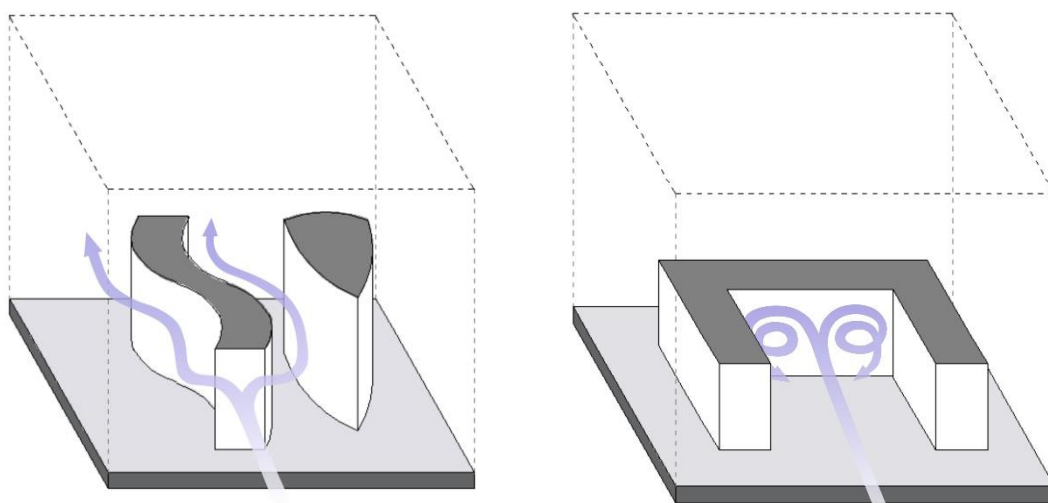
**Figura 22** - Efeito de barreira dos blocos construídos orientados na direção do vento predominante (a) e (b) orientados para canalização e continuidade do fluxo de ar.

- **Sinuosidade** - A sinuosidade é uma propriedade das estruturas urbanas que indica o grau de curvatura, ou seja, permite avaliar a relação entre o comprimento linear de um bloco edificado ou de uma via num dado azimute curvilíneo (Adolphe, 2001; Edussuriya e Chan, 2011; He et al., 2019).

$T_{SUP}$  - Segundo Oke et al. (2017, p. 200), a orientação (azimute) e níveis de sinuosidade das estruturas urbanas, fornecem um forte controle sobre as  $T_{SUP}$  devido a relação com as sombras que serão criadas em sua área envolvente no decorrer de um dia (Oke et al., 2017, p. 132). As sombras das estruturas edificadas são mais longas no início da manhã e da noite e reduzem drasticamente sua extensão ao meio-dia, criando um padrão distinto de perda solar. Os valores mais altos de  $T_{SUP}$  estão associados às fachadas das estruturas que maximizam a irradiância local ( $K_{\downarrow}$ ), como por exemplo, as fachadas lisas não sombreadas, bem expostas em relação à radiação solar direta na maior parte do dia.

Ventilação Natural - Nos níveis mais baixos da CLI, a ventilação natural é controlada pela altura dos obstáculos e os níveis de orientação dos espaços construídos (direcionalidade) e pelo comprimento retilíneo das estruturas (sinuosidade) (Adolphe, 2001). Para a análise morfoclimática, estas propriedades indicam o

efeito de corredor que as estruturas construídas criam para a ventilação natural. Quando os espaços construídos se encontram retilíneos, paralelos uns aos outros e orientados na direção do vento predominante ocorrem boas condições para canalização do vento, neste caso o valor da sinuosidade das estruturas urbanas é então igual a zero (Figura 23). No entanto, quando ocorrem consecutivas interrupções no alinhamento dos espaços construídos e muitos obstáculos estão orientados na direção predominante do escoamento do vento, ocorre maior dissipação das linhas do fluxo de ar para as áreas adjacentes e com isso o aumento de fluxos turbulentos e vórtices, e, portanto, menor é a capacidade do vento em dissipar o calor acumulado nas superfícies e dispersar concentrações de poluição (Adolphe, 2001; Mooneghi e Kargarmoakhar, 2016; Elotefy et al., 2017; Daemei et al., 2005).



**Figura 23** - Relação entre da baixa (a) e elevada (b) sinuosidade das estruturas construídas no fluxo de ar.

### 3.3.2. *As propriedades morfoclimáticas dos Tecidos Urbanos (Texturas e Aerodinâmica)*

Os tecidos urbanos representam as relações entre elementos básicos da morfologia urbana (edifícios, vias e espaços livres de construção) e um dos controles que atuam na ICU (Oke, 2006). Para a análise morfoclimática a investigação dos tecidos urbanos e a relação com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural é apresentada segundo os critérios de textura (dado pelas propriedades de porosidade e oclusividade) e pelo critério de desempenho aerodinâmico dos tecidos (dado pelas propriedades de rugosidade e verticalidade dos espaços urbanos).

- **Rugosidade Aerodinâmica** - A rugosidade do tecido urbano está diretamente relacionada com a altura da Camada Limite Inferior (CLI). Como o parâmetro superficial crítico que governa a produção de turbulências no fluxo de ar nos *canyons* urbanos, a rugosidade ou rugosidade aerodinâmica da superfície, compreende o conjunto de obstáculos em superfície, naturais e antropizados (Yersel e Goble, 1986;

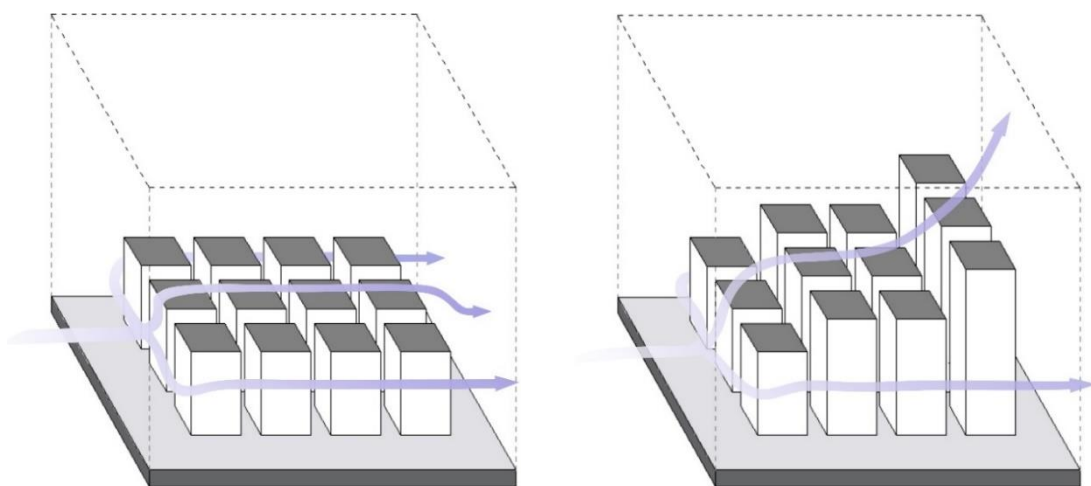
Macdonald et al., 1998; Lyra e Pereira, 2006), capazes de alterar o fluxo de ar, sua velocidade e direção (Oke, 1988; Lopes, 2006; Cheng e Castro, 2002).

Um dos indicadores mais comuns de serem utilizados para esta propriedade dos tecidos urbanos é descrito na bibliografia como: Comprimento de Rugosidade ( $Z_0$ ) (Lopes, 2006; Ng et al., 2011; Yuan e Ng, 2012). O  $Z_0$  é um dos indicadores mais importantes e comumente utilizados para descrever a rugosidade aerodinâmica, por causa da sua relação com a magnitude das turbulências e a velocidade do fluxo de ar acima da CLI (Davenport et al., 2000; Gál e Unger, 2009) (Tabela 4).

**Tabela 4** - Valores típicos da rugosidade aerodinâmica em meio urbano. Fonte: (Oke et al., 2017, p. 103).

Superfícies	Altura média dos elementos ( $Z_H$ ) <sup>15</sup>	Comprimento de Rugosidade ( $Z_0$ )	Deslocamento do Plano Zero ( $Z_D$ )
Densidade e altura baixa – casas, jardins, árvores, armazéns	5 - 8	0.3 – 0.8	2 - 4
Densidade e altura média – casas em fileiras e próximas, centros urbanos	7 - 14	0.7 – 1.5	3.5 - 8
Densidade e altura elevada – menos de seis andares, linhas de blocos de edifícios	11 - 20	0.8 – 2	7 - 15
Arranha-céus – agrupamento de torres, apartamentos e escritórios	> 20	> 2	> 12

Ventilação Natural - A rugosidade é descrita na bibliografia como a propriedade do tecido urbano que mais atua na redução da velocidade média do vento. As fachadas dos espaços construídos orientados na direção do vento predominante interagem com o fluxo de ar criando uma barreira para sua progressão. Quanto mais rugosos são os tecidos urbanos, maior a interferência e a influência do atrito, o que torna o fluxo de ar um elemento complexo de ser analisado (Figura 24).



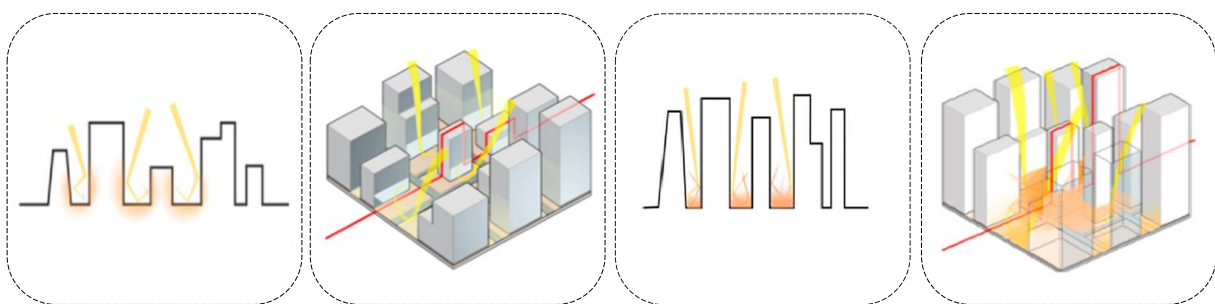
**Figura 24** - Efeito das texturas lisas (a) e rugosas (b) nos tecidos urbanos na ventilação natural.

<sup>15</sup> Lopes (2003, p. 47), descreve o  $Z_D$  como o nível onde o fluxo médio de quantidade de movimento é absorvido e depende da altura ( $Z_H$ ) e volumetria das estruturas urbanas. Considerando um objeto que se interpõe ao fluxo, o  $Z_D$  localiza-se geralmente a 2/3 da sua altura. O  $Z_0$  é a altura a partir do solo, onde a velocidade do vento se anula, se o perfil do vento tiver uma variação logarítmica com a altitude e, portanto, é um parâmetro relacionado com a forma, altura e densidade de distribuição dos elementos na superfície

$T_{SUP}$  – A relação da rugosidade com a  $T_{SUP}$  aparece como um tema transversal na bibliografia (Grimmond e Oke, 1999; Ratti et al., 2006; Nakata-Osaki et al., 2016). No entanto, tecidos rugosos em meio urbano podem influenciar nas propriedades radiativas (reflexividade, absorvidade e transmissibilidade) e térmicas (condutividade, difusividade, emissividade), por modificar as transferências de calor por advecção, aumentar o sombreamento e reduzir a eficácia na remoção e dispersão de calor acumulado nas superfícies e poluentes em suspensão.

- **Verticalidade** - A verticalidade como um processo é muitas vezes condicionado por motivações econômicas e que exige dos órgãos gestores maiores planejamento quanto às áreas a serem verticalizadas, portanto, a maioria dos espaços urbanos têm falhado na predição do impacto que grandes arranha-céus apresentam na  $T_{SUP}$  e no fluxo de ar. Para a análise morfoclimática, a verticalidade representa a altura média dos blocos de edifícios e a relação com a área construída.

$T_{SUP}$  - Como uma propriedade aerodinâmica dos tecidos urbanos, a verticalidade do SEC pode representar um efeito significativo e inverso no nível de disponibilidade de insolação e sombreamento. Portanto, reflete no consumo de radiação e na  $T_{SUP}$  em diferentes condições aparentemente contraditórias. A verticalidade acaba por aumentar a área das fachadas e dos telhados expostos a radiação solar, o que pode ser interpretado como um ambiente que tende a sofrer com a acumulação de calor devido à absorção da radiação solar ( $K\downarrow$ ), e conseqüentemente, com o superaquecimento do ar e das superfícies envoltórias (Figura 25). No entanto, um aumento na verticalidade do SEC resulta em *canyons* urbanos profundos, que impedem que o fluxo radiativo atinja os níveis mais baixos dos *canyons* urbanos e dos espaços envolventes na maior parte do dia. Quanto maior a verticalidade, maior o efeito das sombras nos arredores dos espaços construídos e menor poderá ser também a visibilidade do céu para as superfícies avaliadas.

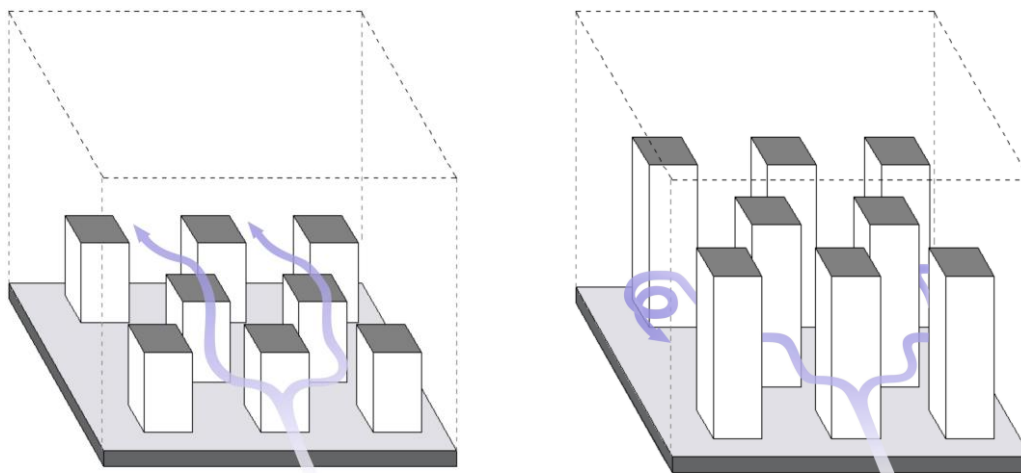


**Figura 25** - Efeitos de captura de radiação solar dentro de um *canyon* urbano com baixos valores de albedo e um alto *Sky View Factor* (SVF) e um *canyon* urbano em situação inversa. Fonte: Choi et al., (2018).

Por um lado, o aumento da verticalidade produz sombras desejáveis para redução da irradiação solar na área envolvente de uma edificação (sem considerar os efeitos na ventilação natural), o que poderia, também, reduzir as condições de iluminação natural no interior dos espaços construídos, resultando num

maior consumo energético. Por fim, a fração de radiação emitida que atinge as superfícies fica aprisionada no interior dos *canyons* urbanos através de múltiplas reflexões entre fachadas dos edifícios sobreaquecendo o ar e as estruturas envolventes.

Ventilação Natural - Os efeitos da verticalidade dos tecidos urbanos no fluxo de ar são semelhantes aos descritos pela propriedade de rugosidade, porém diferem na forma de medição (Figura 26). A rugosidade considera como unidade de análise o principal seguimento de fachadas que atuam como barreiras ao fluxo de ar, ao passo que a verticalidade considera o edificado como um todo (Adolphe, 2001; Yuan e Ng, 2012; Martins et al., 2016; Silva et al., 2018).

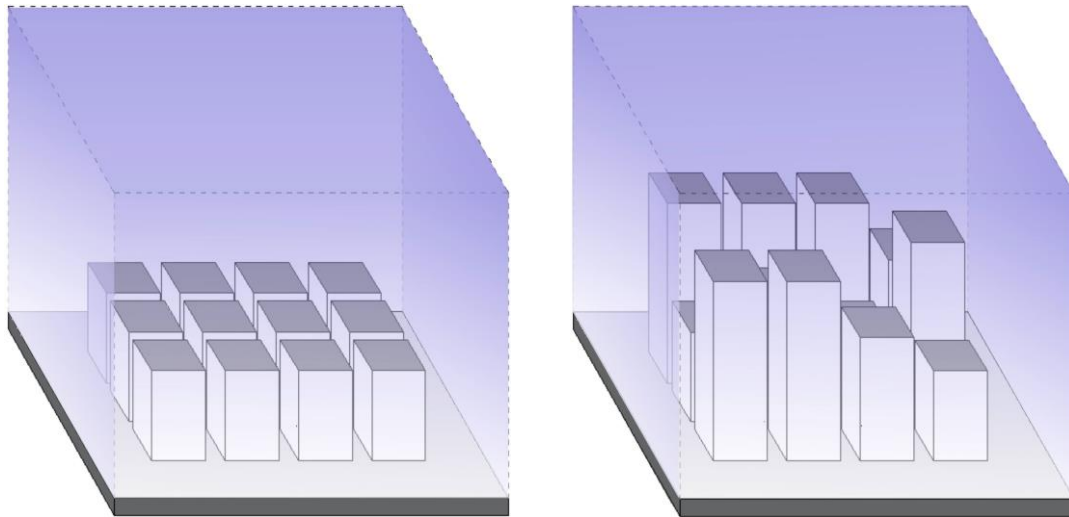


**Figura 26** - Fluxo de ar em contato com tecidos baixos (a) e verticalizados (b).

- **Porosidade** - A porosidade é uma propriedade de textura dos tecidos urbanos que mostra a relação entre as partes penetráveis e impenetráveis da camada de ar livre sobre uma determinada área construída (Gál et al., 2009). Gál e Unger (2009), propuseram dois métodos verticais para calcular a porosidade, considerando a alturas da CLI, estes modelos foram similares em diversos outros estudos (Yuan e Ng, 2012; Akman, 2017, p. 78; Santos et al., 2017; Silva et al., 2018; Choi et al., 2018). Outros meios de quantificar a porosidade dos tecidos urbanos foram disseminados por Adolphe (2001) e presente nos estudos de Edussuriya et al. (2011), Martins et al., (2013) e Merlier et al., (2018), os quais consideram os poros como medidas a serem quantificadas individualmente.

$T_{SUP}$  – A porosidade possibilita caracterizar espaço disponível para a emissão de calor a partir tráfego e pelo metabolismo dos organismos vivos, somado à libertação do calor armazenado devido às características térmicas dos materiais de construção e cobertura do solo. Segundo Balocco e Grazzini (2000) a porosidade do tecido urbano também pode ser conectada à rugosidade e verticalidade urbana, e pode fornecer uma indicação global das diferentes texturas (antrópicas e naturais) que formam os tecidos e os reflexos nos níveis de sombreamento no interior dos *canyons* urbanos.

Ventilação Natural - A porosidade caracteriza o efeito do tecido urbano na regulação do volume de ar ocupado e livre nos *canyons* urbanos. Respectivamente, a porosidade é um meio de compreender o espaço na CLI disponível para deslocamento das massas de ar, gradientes de pressão e a capacidade de dissipação de calor e dispersão de poluentes no interior dos *canyons* urbanos e espaços livres de construção (Gál e Unger, 2009; Hang e Li, 2010; Hu et al., 2012) (Figura 27).



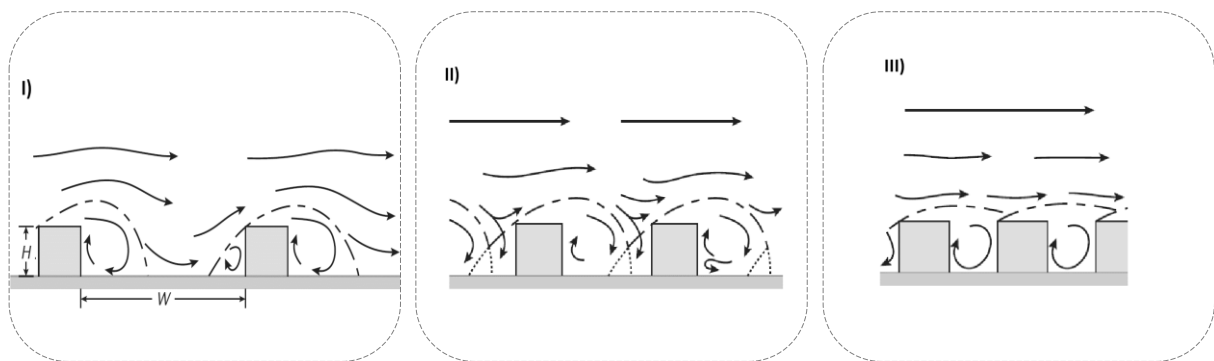
**Figura 27** - A porosidade e a relação com a ventilação natural de acordo com o baixo (a) e elevado (b) volume de espaços construídos na CLI.

- **Oclusividade** – A oclusividade é uma propriedade de textura que possibilita caracterizar o perfil aerodinâmico e o nível de obstrução que os espaços construídos apresentam nos tecidos urbanos, tendo como unidade de análise os *canyons* urbanos e os espaços livres de edificação. O nível de oclusividade dos tecidos urbanos possui dois indicadores mais comuns: a fração de céu visível (*Sky View Factor*) e o prospecto médio (*H/W Ratio*) (Landsberg, 1981; Oke, 1988; Alcoforado et al., 2005; Ratti et al., 2006; Marciotto et al., 2010; Chatzidimitriou e Yannas, 2017).

$T_{SUP}$  - A oclusividade auxilia na compreensão da intensidade da ICU, no estudo do balanço radiativo e da ventilação natural dos espaços urbanos. De acordo com a análise de Oke et al. (2017, p. 135), considerando apenas uma única entrada para radiação num *canyon* urbano (e não considerando o efeito da topografia, declividade e a elevada verticalidade envoltória), o espaçamento entre os blocos de edifícios condiciona o percurso da radiação solar e o armazenamento de calor nas superfícies. A oclusividade de um *canyon* urbano está relacionada com a  $T_{SUP}$  e o balanço de radiação tanto em grande como em pequeno comprimento de onda. Aida (1982) e Aida e Gotoh (1982) já demonstravam que proporções crescentes de oclusividade no SEU diminuía o albedo das superfícies. Dentro dos *canyons* urbanos, o nível de abertura ao céu poderia reduzir as diferenças na emissão de ondas longas entre as paredes (Harman et al., 2004a). Elevada oclusividade nos tecidos urbanos ocasiona a diminuição da perda de radiação de grande

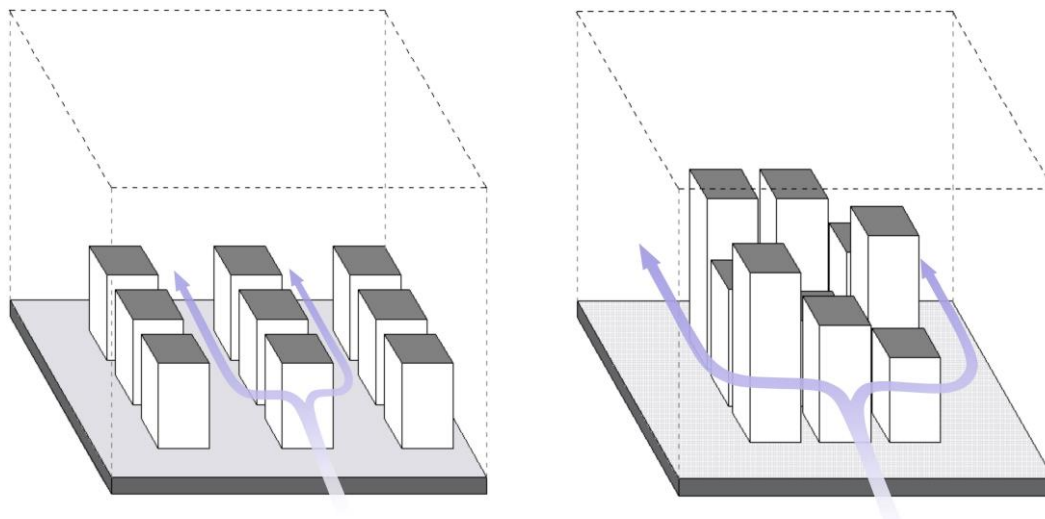
comprimento de onda de sentido ascendente ( $L\uparrow$ ) e o aumento da radiação de grande comprimento de onda ( $L\downarrow$ ) devido à atmosfera mais poluída.

Ventilação Natural – O nível de obstrução ou a disponibilidade de espaço junto à superfície condicionam a *performance* do fluxo de ar em dispersar poluentes e dissipar o calor armazenado no tecido urbano durante o dia (Oke, 1988; Georgakis e Santamouris, 2004; Martins et al., 2013). Oke et al. (2017, p. 87), afirmam que quando os edifícios são muito espaçados ( $H/W < 0,35$ ), o fluxo de ar percorre de forma semelhante nos edifícios isolados (I - *Isolated roughness flow*). Dependendo do espaçamento entre os ventos, e se a matriz é regular, escalonada ou aleatória, haverá interações como efeito de esteira (Figura 28).



**Figura 28** - Efeitos de oclusividade dos espaços urbanos no fluxo de ar. Fonte: Oke et al., (2017, p. 88).

Oke et al. (2017, p. 87) descreve que, em densidades maiores ( $0,35 < H/W < 0,65$ ), a distância que separa os elementos começa a causar vórtices na zona de cavidade atrás do edifício e é reforçado pelo fluxo abaixo da face de barlavento do prédio ao lado (II - *Wake interference flow*). Com menor espaçamento entre os blocos ( $H/W > 0,65$ ), o fluxo de ar acima dos edifícios apresenta menor tendência de atingir os *canyons* urbanos (III - *Skimming flow*). Para esta tese a oclusividade envolve todas as distâncias entre os espaços construídos e os espaços adjacentes (viários ou livres de edificação). A proximidade entre as estruturas construídas cria espaços oclusos em que o fluxo de ar encontra dificuldades de escoamento, que limitam o efeito da ventilação natural e aumentam o escoamento pelas adjacências dos blocos (Ng et al., 2011) (Figura 29).



**Figura 29** - Oclusividade e relação com a ventilação natural: a) baixa oclusividade e b) elevada.

### 3.3.3. *As propriedades morfoclimáticas das Coberturas Urbanas (Ocupação e Organização)*

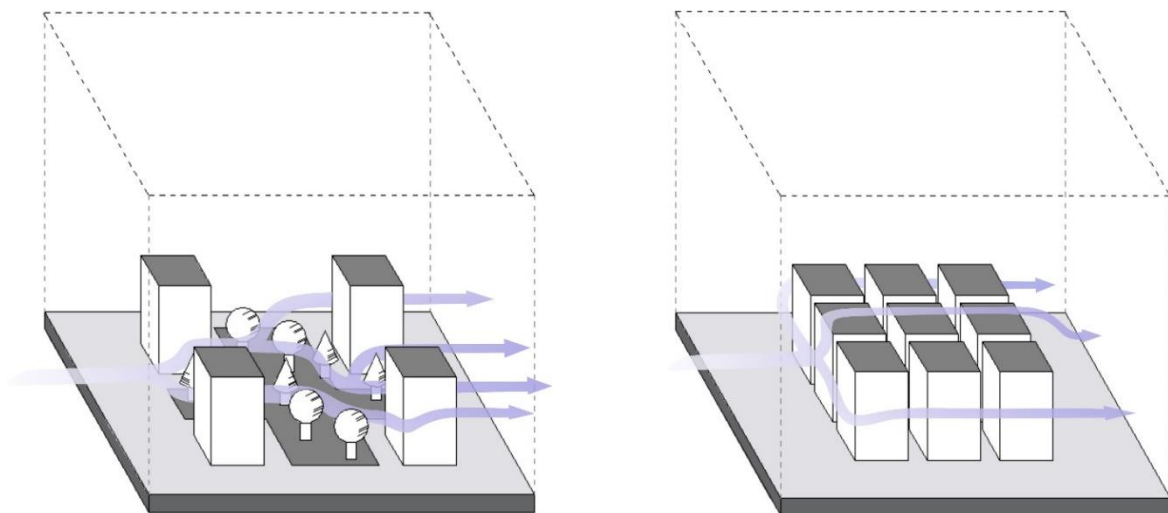
A cobertura urbana representa o último dos controles da ICU citado por Oke (2006), que está diretamente relacionado com a morfologia urbana. A relação das coberturas urbanas com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural será investigada com base nos critérios morfoclimáticos de: I) análise ocupacional (propriedades de impermeabilidade e intensidade do uso do solo); e, II) análise da organização dos padrões de coberturas urbanas (propriedades de contiguidade e proximidade).

- **Impermeabilidade das superfícies** – O conhecimento dos padrões de impermeabilidade (proporção impermeável junto ao solo numa unidade de análise), em sua magnitude, localização e distribuição espacial é significativo para uma série de questões relativas ao planejamento urbano e à gestão ambiental (Weng, 2012). Como uma das características mais marcante do processo de urbanização, a impermeabilização das superfícies tem papel fulcral na análise da ICU (sobretudo a  $ICU_{sup}$ ), e está presente em diversos estudos que envolvem temáticas de densidade urbana, conforto bioclimático e riscos urbanos (enchente, inundação, alagamento e enxurradas) (Arnold e Gibbons, 1996; Brabec et al., 2002; Stewart e Oke, 2012).

$T_{SUP}$  – A fração impermeável do solo provoca alterações no balanço energético, devido ao aumento da área das superfícies expostas a radiação solar, com reflexos na condutividade térmica e um incremento na taxa de armazenamento de calor (Xiau et al., 2007; Weng et al., 2009; Nie e Xu, 2015). Os espaços impermeáveis acabam por reduzir a umidade do ar quase nulidade, devido à ausência total ou parcial de biomassa e à incapacidade de infiltração da água das chuvas no solo. Estas condições resultam na diminuição do efeito de arrefecimento evaporativo, assim como a transferência de fluxo turbulento de calor latente (QE), uma vez que a água da chuva, não encontrando condições para infiltração, escorre

rapidamente pelas superfícies impermeabilizadas (Alcoforado e Matzarakis, 2010; Unger et al., 2014; Zheng et al., 2018).

Ventilação Natural – Para a ventilação natural, as coberturas urbanas apresentam forte relação aos efeitos térmicos no fluxo de ar. As coberturas urbanas impermeáveis aumentam os fluxos turbulentos de calor sensível ( $Q_H$ ) e representam um ponto de armazenamento de calor ( $\Delta QS$ ) devido as propriedades químicas dos materiais de cobertura presentes em superfície. A ausência de coberturas naturais reduz a umidade do ar (fluxo turbulento de calor latente –  $Q_E$ ) e o efeito de filtragem dos poluentes pela vegetação (Lu e Weng, 2006; Coutts et al., 2007; Oke et al., 2017, p. 180). Estas condições criam uma camada de ar quente junto as superfícies que geram diferentes gradientes de pressão no fluxo de ar e consequente aumento dos turbilhões (vórtices) nos espaços envolventes ao edificado, reduzindo o potencial de dissipação do calor e dispersão dos poluentes (Figura 30), com reflexos nos níveis de conforto térmico e mecânico para os pedestres (Eliasson et al., 2006; Ng et al., 2011).

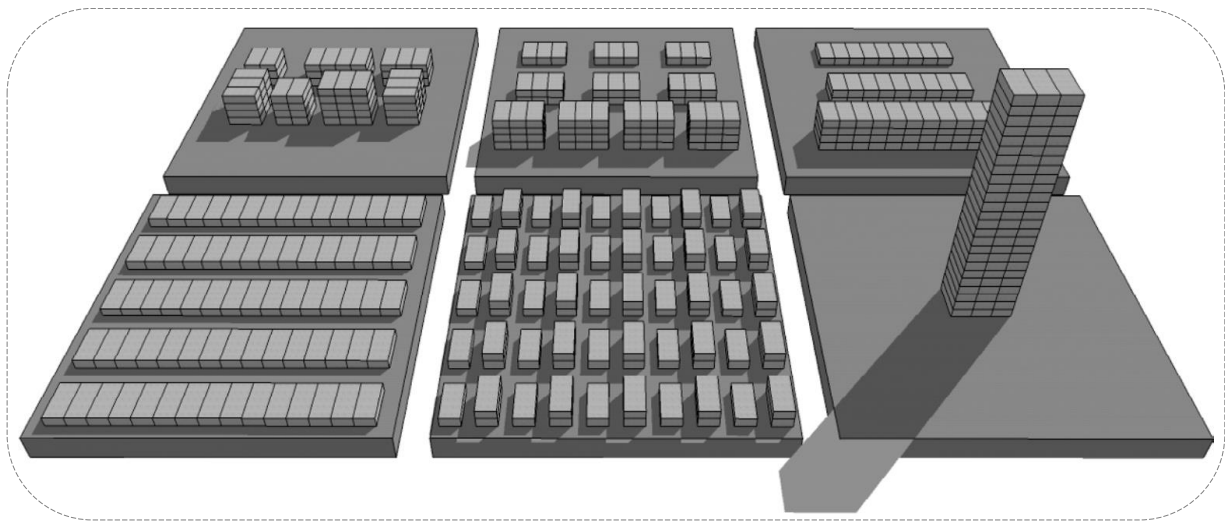


**Figura 30** - Impacto das coberturas permeáveis (a) e impermeáveis no vento (b).

- **Intensidade de Ocupação** - A intensidade de ocupação é uma propriedade morfoclimática da cobertura urbana muito usada como instrumento de regulação do uso do solo (Joshi e Kono, 2009). Neste sentido, a intensidade de ocupação implica na análise da área total ocupada por pavimentos numa unidade de análise (zona, bairro, célula, quadra, lote), para alcançar um resultado que permite comparar diferentes níveis de eficiência (habitacional, energética, funcional, aerodinâmica) ou sobrecarga dos espaços urbanos (Gao et al., 2006; Morrissey, et al., 2011; Bourdic et al., 2012).

Os estudos sobre a intensidade de ocupação têm como foco as medidas de densidade ou de valoração de um espaço em relação ao núcleo urbano como afirmam Barr e Cohen (2014). Estes estudos consideram a razão entre o espaço útil total e o tamanho da parcela, por exemplo: um prédio de 10 andares construído em todo o terreno teria um indicador de intensidade de ocupação 10, assim como um prédio

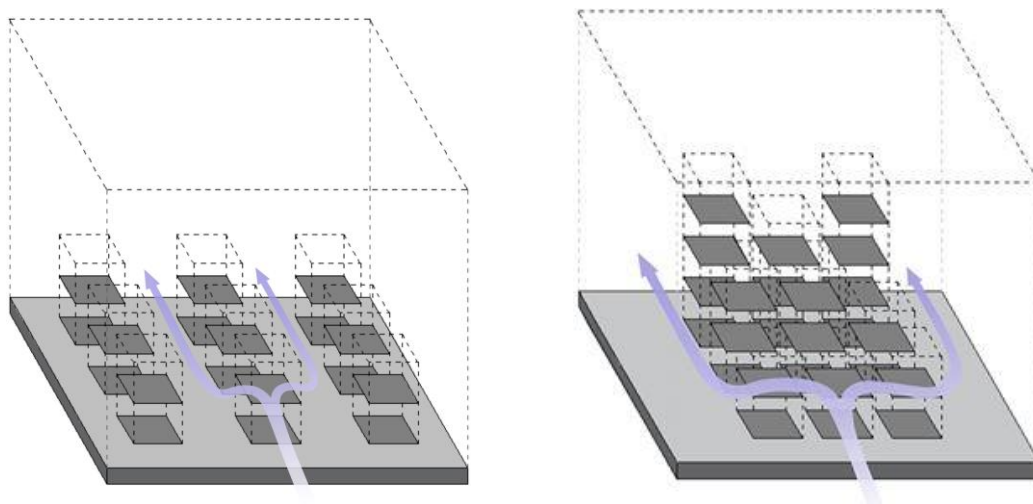
de 20 andares na metade do lote; pois a soma das áreas por pavimento seria a mesma, ainda que, as dimensões quanto a sua forma, textura e níveis de cobertura sejam completamente diferentes (Figura 31).



**Figura 31** - Diferentes dimensões de intensidade de ocupação da forma urbana. Fonte: Arantes (2006, p. 223).

$T_{SUP}$  - A intensidade de ocupação das coberturas em meio urbano assim como a impermeabilidade pode ser utilizada como um indicador de concentração de calor numa unidade de análise e possui efeitos semelhantes na  $T_{SUP}$ . No entanto, a intensidade de ocupação é muito usada no planejamento e no desenho urbano para análise do comportamento térmico dos edifícios e o consumo de energia. Franzetti et al. (2004) focaram a análise da intensidade de ocupação no consumo de energia considerando a influência que o aumento no número de pavimentos apresenta na redução da disponibilidade de luz do dia, e, portanto, maior taxa de iluminação artificial nas cargas térmicas são utilizadas. Eskin e Türkmen (2008) também consideraram o impacto que a intensidade e ocupação apresenta no sobreaquecimento e circulação de ar interna dos edifícios, pois quanto maior o número de pavimentos numa mesma estrutura, maior o percentual (em área) de coberturas com alta capacidade térmica.

Ventilação Natural - Para a ventilação natural, a análise da intensidade de ocupação apresenta similaridades com a porosidade dos tecidos, uma vez que, considera o somatório das áreas impermeáveis junto ao solo e por número de pavimentos (Figura 32). Esta característica reflete no ganho de calor (interno e externo) dos espaços construídos, as quais modificam o fluxo de ar termicamente (similar aos efeitos descritos pelas coberturas impermeáveis), mas também mecanicamente (Yang et al., 2013), uma vez que, o número de pavimentos indica o efeito aerodinâmico dos espaços construídos no fluxo de ar, como foi descrito anteriormente pelas propriedades morfoclimáticas como a porosidade, oclusividade, verticalidade e rugosidade (Hu e Yoshie, 2013; Srifuengfung e Peerapun, 2013; Ignatius et al., 2015).



**Figura 32** - Relação de baixa (a) e elevada (b) intensidade de ocupação com a ventilação natural.

- Proximidade** - A proximidade corresponde aos padrões de espaçamento (distância) entre dois objetos de análise. Para Gustafson e Parker (1994)<sup>16</sup>, os índices de proximidade são mais adequados para a avaliação de paisagens de "alto contraste", onde o habitat de interesse é distinto da matriz circundante. Segundo a análise de Nie e Xu (2015), em meio urbano a proximidade entre tipologias de coberturas urbanas (naturais e antrópicas), tem como medidas fundamentais a média ou desvio padrão da distância dos vizinhos mais próximos euclidianos.

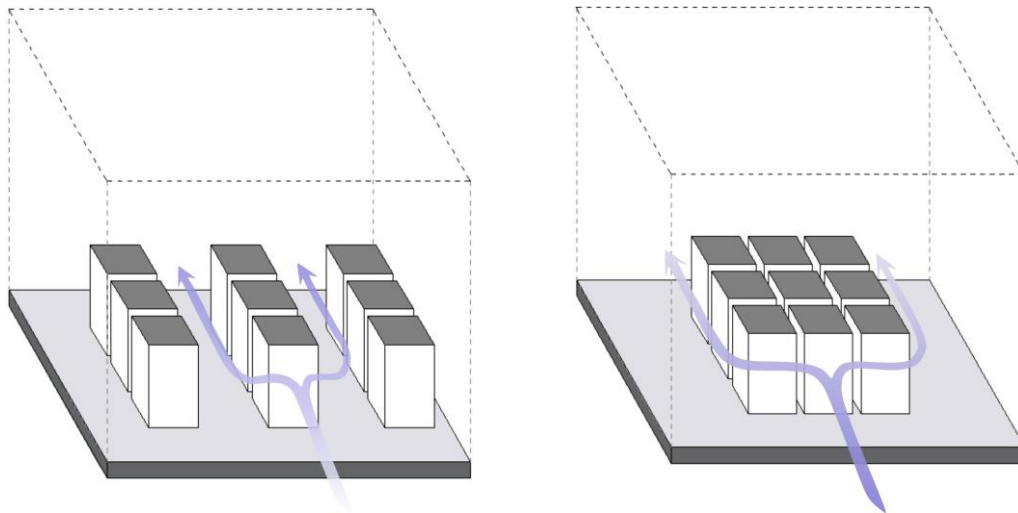
A proximidade como uma propriedade morfoclimática permite identificar padrões de organização dos tipos coberturas que caracterizam condições climáticas locais e apresentam relação com o metabolismo urbano (Gustafson e Parker, 1994; Golany, 199; Bourdic et al. 2012). Para Weng (2001) a proximidade dos espaços urbanos tem uma importante implicação no desenvolvimento do uso e cobertura do solo, no qual os processos de expansão urbana geralmente mostram uma relação íntima com a distância e função desses objetos geográficos, incluindo condições de valoração, densidade e procura por habitação numa zona.

$T_{SUP}$  - Considerada como medida de desenvolvimento urbano de alta densidade, a análise da proximidade entre coberturas urbanas, sobretudo dos espaços construídos, tem potencial de compreender os efeitos que coberturas construídas apresentam em parâmetros da  $T_{SUP}$ , ao condicionar os níveis de albedo e elevado potencial de armazenamento de calor. Neste caso quanto mais próximas as coberturas dos espaços construídos estiverem, maior será o potencial de concentração de calor e consumo energético para arrefecer o ambiente interno.

Ventilação Natural - A proximidade está relacionada com a distância entre as coberturas de superfícies dos espaços construídos. Conforme o ar escoar ao longo das superfícies e percorre as fachadas

<sup>16</sup> Recorrendo aos conhecimentos da biogeografia e ecologia da paisagem, o autor cita a análise da proximidade entre coberturas naturais, dentre eles as manchas de florestas e vegetação urbana como o tipo de interesse, mas reforça que qualquer tipo de elemento irregular poderia ser avaliado.

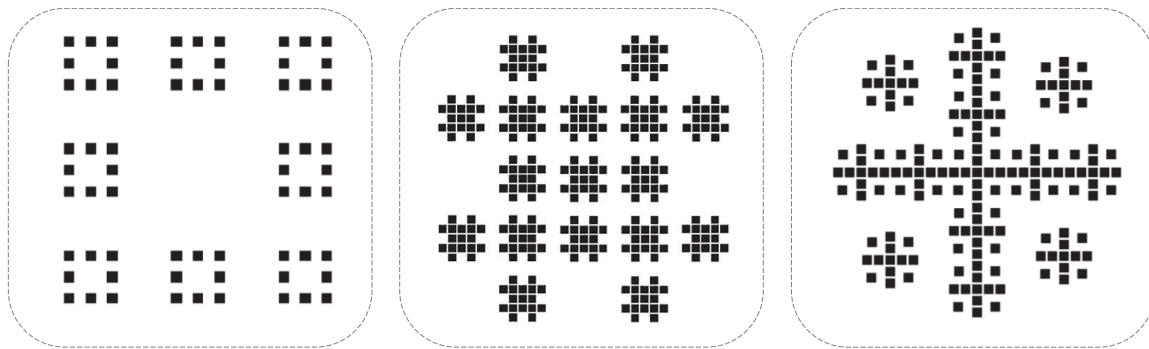
(Figura 33), a proximidade entre as coberturas urbanas cria condições para concentração de superfícies com elevada admitância térmica, (Theurer, 1999; Taseiko et al., 2009; Hang e Li, 2010; Gan e Chen, 2016), as quais apresentam reflexos nas diferenças de gradiente de pressão dos ventos entre as temperaturas no interior e exterior dos espaços construídos (Wiren, 1983; Chang e Meroney, 2003; Mfula et al., 2005).



**Figura 33** - Baixa proximidade (a) e elevada proximidade das coberturas urbanas e a relação com o vento.

- **Conectividade** - A conectividade está relacionada com o critério de organização das coberturas em meio urbano que corresponde à interconexão espacial das coberturas urbanas (construídas, viárias ou verdes) e descreve o número de elementos agrupados sem interrupções (geminação). Diversos autores associam esta propriedade à delimitação de caminhos e manchas contínuas num mosaico de tipos de coberturas urbanas (Frankhauser, 2008; Thomas et al., 2007 e 2008; Tannier e Thomas, 2013). Yuan et al. (2018) referem que a conectividade dos elementos urbanos também é uma propriedade que expressa a densidade, pois revela do grau de agregação ou desenvolvimento das coberturas presentes nos espaços de uma cidade. Para Bechle et al. (2011) esta dimensão fornece informações facilmente sobre a mudança de padrões de coberturas na cidade agrupados ou dispersos.

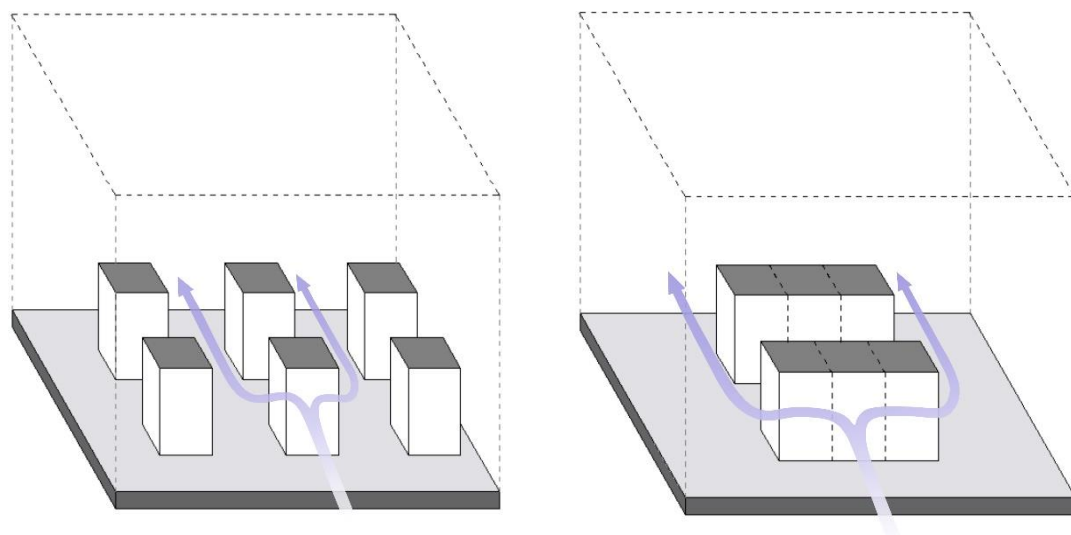
Para estudos da propriedade de conectividade que tem como base a cobertura vegetal em meio urbano (Galster et al., 2001; Davies et al., 2015; Artmann et al., 2019), a delimitação das manchas de biomassa e a sua continuidade estabelece o potencial da infraestrutura verde. Ao passo que, a conectividade de espaços edificados é o principal critério para atribuir uma classe de cobertura de terra às áreas construídas ou às áreas agrícolas (Longley e Mesev, 2000; Chen et al., 2017). Segundo Oke et al. (2017, p. 445), a conectividade junto com a proximidade, podem ser inseridas na discussão do desenvolvimento urbano compacto e necessitam da definição de requisitos de densidade mínima para novos desenvolvimentos. No âmbito da análise das componentes climáticas que se propõe nesta tese especial enfoque será dado a conectividade das coberturas presentes no SEC (Figura 34).



**Figura 34** - Padrões de conectividade e espraiamento das coberturas urbanas. Fonte: Thomas et al., (2007).

$T_{SUP}$  - A conectividade entre as coberturas urbanas, influencia na componente térmica a nível da concentração (horizontal) de áreas constituídas por coberturas com baixo albedo e elevada admitância térmica expostas a radiação solar (Chang e Meroney, 2003; Lu and Weng, 2006; Coutts et al., 2007; Xiau et al., 2007; Weng et al., 2009; Nie e Xu, 2015). Como demonstram diversos estudos, a concentração de calor (interno e externo) nas coberturas geminadas tende a aumentar de acordo com os níveis de adensamento e conectividade das superfícies urbanas (Golany, 1996; Franzetti et al., 2004; Bereitschaft e Debbage, 2013).

Ventilação Natural - Os efeitos da conectividade das coberturas na ventilação natural podem ser semelhantes aos da proximidade e intensidade de ocupação, pois representa o número de edifícios agrupados em blocos geminados (Figura 35). Elevado grau de conectividade entre as coberturas urbanas irá atuar na concentração de superfícies com elevada admitância térmica e no maior efeito de barreira à progressão do fluxo de ar, a depender da orientação da forma urbana (Kubota et al., 2008; Hu e Yoshie, 2013; Yang et al., 2013; Unger et al., 2014; Zheng et al., 2018).



**Figura 35** - Níveis de conectividade das coberturas presentes nos edifícios e influência nos campos de vento (a – baixa e b – elevada).

### 3.4. A morfologia urbana aplicada ao contexto climático

Como diversos estudos demonstraram, a morfologia urbana em seus elementos estruturantes (edifícios, ruas, espaços livres) está diretamente relacionada com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural. O vento é descrito como o principal elemento climático que atua na dissipação de calor acumulado em superfície, no ar e junto ao solo e na dispersão de poluentes, sendo fundamental ao ordenamento dos espaços urbanos, de forma a maximizar o potencial da ventilação natural em meio urbano. Como uma ferramenta na delimitação dos *hotspots* da  $ICU_{SUP}$ , a análise da  $T_{SUP}$  pode ser utilizada como um indicador das mudanças climáticas no contexto espaciotemporal e sustentar a proposição de medidas de adaptação frente a este problema. A confluência dos conhecimentos relacionados a estas componentes climáticas e ao campo da morfologia urbana sustentam as motivações proposição de um modelo de readequação e ordenamento do território para fins climáticos em São Paulo.

Como um meio de chegar a um significado prático e real da forma urbana em seu contexto climático, a implementação da abordagem morfoclimática foi proposta com base nos principais critérios e propriedades que definem o desempenho da forma urbana em relação a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural. Através dos conhecimentos de diversos campos de investigação, para esta tese, a análise morfoclimática foi organizada de acordo com os controles citados por Oke (2006), em que: I) as estruturas são investigadas segundo os critérios de sua geometria e espacialidade; II) os tecidos urbanos pelos critérios aerodinâmico e de textura; e, III) as coberturas urbanas de acordo com os critérios de organização e ocupação.

Para cada critério morfoclimático definiu-se as propriedades que visam compreender os espaços urbanos quanto à acumulação de calor em superfícies e redução das áreas vegetadas e à redução da capacidade de circulação do ar e nos níveis de poluição do ar. Estas propriedades podem ser analisadas com base no uso de diferentes indicadores morfoclimáticos. Neste sentido, dependendo das métricas que constituem os indicadores, as propriedades de diferentes elementos urbanos acabam por sobrepor-se e seu estudo se torna redundante. Portanto, estabelecer a correlação com as componentes climáticas em uma mesma unidade de análise, torna-se um dos parâmetros de avaliação para definir as propriedades da forma urbana que melhor podem servir como ferramenta ao ordenamento do território pelo prisma climático.

Sabe-se que como prática, o planejamento urbano é claramente orientado para a ação, enquanto, como assunto acadêmico, assume um caráter mais complexo e ambíguo. Nesse sentido, cabe aqui ressaltar como o estudo da morfologia urbana e do clima urbano podem ser aproveitados pelo ordenamento dos espaços urbanos para promover melhorias na qualidade do ar, na saúde, conforto térmico e mecânico, consumo energético, no arrefecimento passivo dos edifícios. Estes benefícios da aplicação da análise morfoclimática podem gerar ferramentas práticas e úteis para a gestão das cidades e é disso que trata o Capítulo IV, referente aos procedimentos metodológicos necessários para esta tese.



## CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS

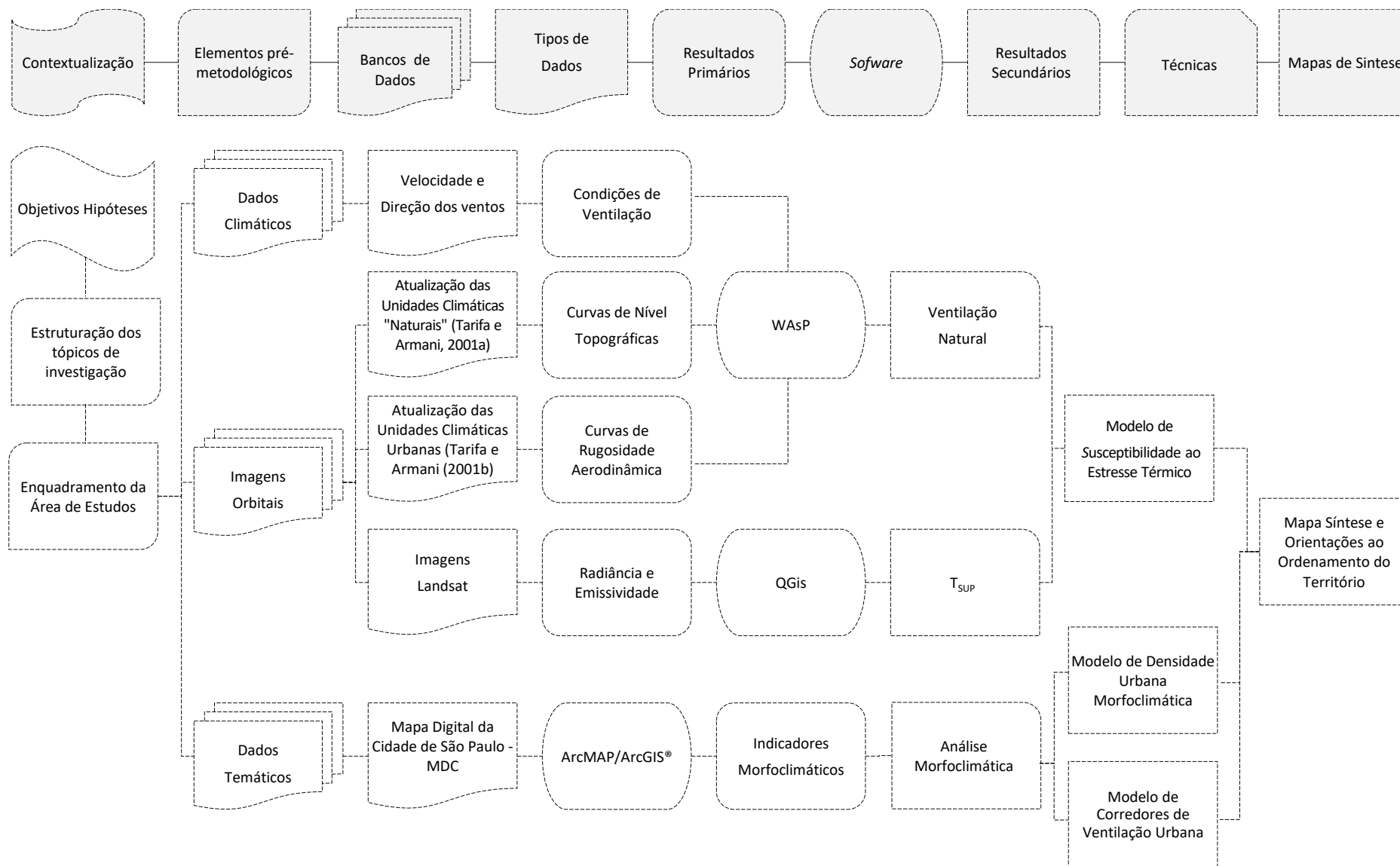
---

Após estabelecer as relações multilaterais entre os elementos estruturantes da morfologia urbana (estruturas, tecidos e coberturas) e as componentes climáticas em análise ( $T_{SUP}$  e a ventilação natural), o Capítulo IV apresenta uma visão geral das etapas metodológicas para implementação dos objetivos e as hipóteses apresentadas, as quais foram divididas em 5 partes:

- Na primeira parte deste capítulo apresentam-se os aspectos da urbanização e o enquadramento climático da área de estudos – a Metrópole de São Paulo - MSP;
- Em seguida são apresentados os tipos de dados recolhidos (climáticos, temáticos e orbitais) e os programas que compõem cada modelo de análise;
- Na terceira parte são propostos os modelos dos métodos de análise e produção de cartografia de base sobre: I) caracterização das temperaturas de superfície ( $T_{SUP}$ ); II) a caracterização da ventilação natural; e, III) análise morfoclimática com base em indicadores de desempenho da forma urbana;
- Na quarta parte é apresentada a análise da coincidência espacial entre a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural com as propriedades morfoclimáticas investigadas e a análise dos resultados por macroáreas definidas pelo PDE (2014) de São Paulo;
- A última parte consiste na proposição das cartografias para o ordenamento do território com fins climáticos, no qual são apresentados os seguintes modelos: I) modelo de densidade urbana morfoclimática; II) cartografia de delimitação dos potenciais corredores de ventilação natural com base na morfologia urbana; III) modelo de susceptibilidade ao estresse térmico; e, IV) cartografia final de zoneamento morfoclimático urbano.

Para estabelecer a relação entre os campos de investigação anunciados, uma das questões iniciais colocadas diz respeito ao uso de uma unidade de análise em comum que permita a inserção de diferentes tipos de dados provenientes de várias componentes do ecossistema urbano. Esta unidade de análise tem como base o uso de uma grelha constituída por células, similares às dimensões mínimas de uma quadra urbana comum (100m por 100m).

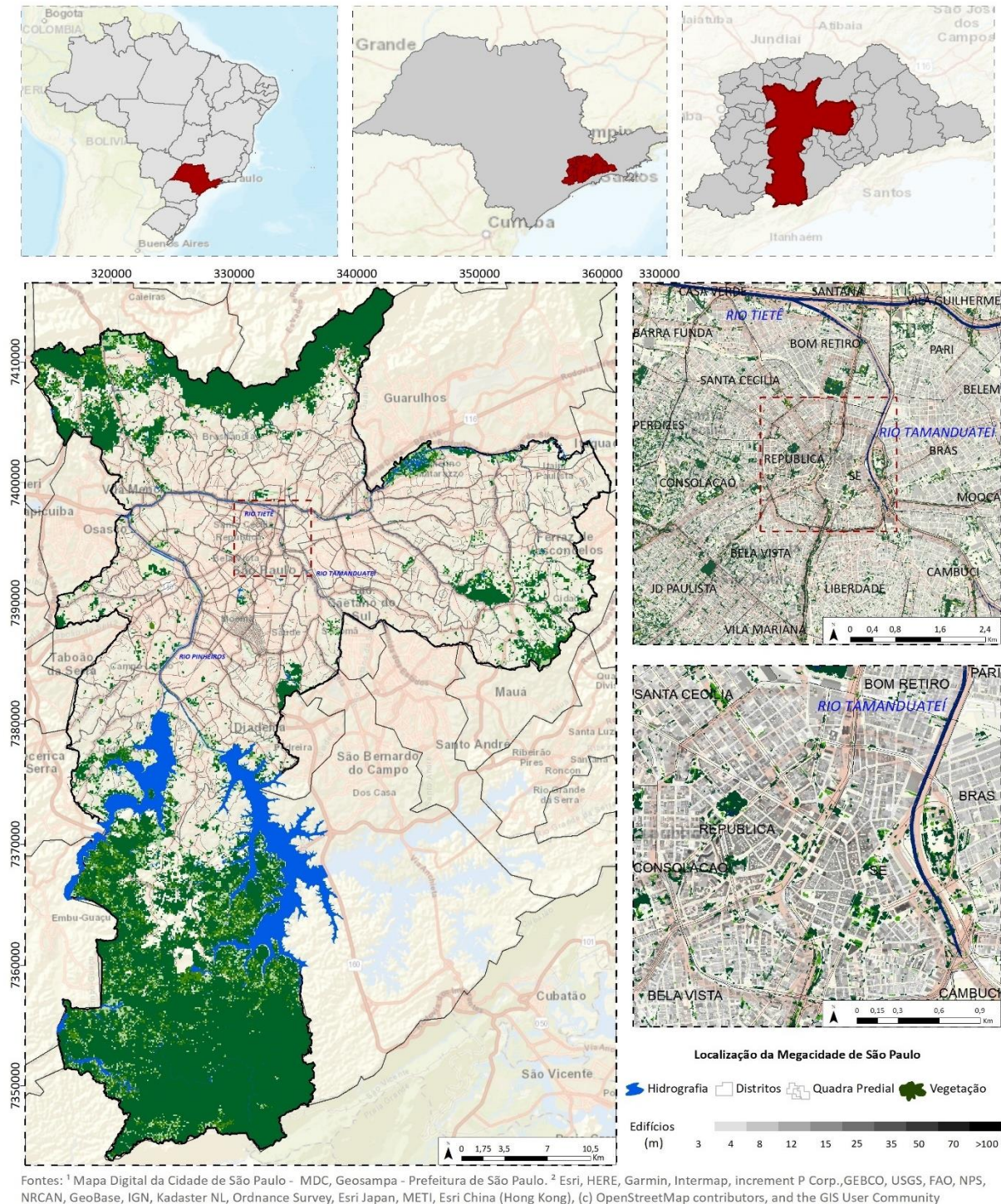
As células permitem a espacialização e leitura cartográfica das estruturas, tecidos e coberturas urbanas tanto em microescala climática e morfológica quanto no efeito de agrupamento em subsistemas de espaços urbano para análises à meso escala. O uso da grelha composta por células como unidades de análise, possibilita ainda, a atualização dos dados a qualquer momento, permitindo que este tipo de estudo seja utilizado como base em análises multidisciplinares futuras. As etapas de implementação dos métodos presentes nesta tese e os processos, técnicas e *software* envolvidos na elaboração e cada análise são descritos a seguir (Figura 36).



**Figura 36** - Etapas e procedimentos para análise da temperatura de superfícies, ventilação natural e propriedades morfoclimática.

#### 4.1. Enquadramento área de estudos em análise: MetrÓpole de São Paulo - MSP

A área definida para realização dos estudos desta tese compreende o território da MetrÓpole de São Paulo (MSP), situada nas posições 23°21' S, 46°44' W numa área de 1.521,11 km<sup>2</sup> (Tarifa e Armani, 2001a), com seus 12.106.920 milhões de habitantes (IBGE, 2016), capital do Estado de São Paulo no sudeste do Brasil, como demonstra a Figura 37.



**Figura 37** - Área de Estudos da esquerda para direita: Brasil, Estado de São Paulo, Região Metropolitana de São Paulo, Distritos centrais e área do centro antigo da MetrÓpole de São Paulo.

A maior aglomeração urbana no continente americano<sup>17</sup>, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é considerada a quarta maior do mundo<sup>18</sup> com 21.847.000 habitantes (DESA, UN. 2018). Localizada entre os paralelos 22° e 24° de latitude Sul e os meridianos 45° e 47° de longitude Oeste (López, 2001), a RMSP possui uma área total de 8051 km<sup>2</sup>, composta por outros 38 municípios, sendo São Paulo o principal centro desta região.

A RMSP forma uma gigantesca massa de conurbação que se espalha ao longo da bacia hidrográfica do Alto Tietê e afluentes, até uma distância linear de aproximadamente 50 km do oceano Atlântico (López, 2001). Atualmente a extensa mancha urbana apresenta dimensões de 1747 km<sup>2</sup> e sofre com uma grave degradação ambiental (Alves Filho, 2001).

A característica mais marcante desta região metropolitana é, sem dúvida, o seu rápido crescimento populacional e físico que se consolidou em muito pouco tempo, mais precisamente no último século. O seu centro metropolitano, o município de São Paulo, não passava de um vilarejo até o final do século XIX (Lencioni, 1998). A sua gênese está associada ao trabalho livre de imigrantes europeus, principalmente italianos nas últimas décadas na grande empresa cafeeira (Lencioni, 1998). É neste cenário que a cidade de São Paulo, capital da província cafeeira, se transformou rapidamente de uma cidade comum para uma metrópole industrial, na primeira metade do século XX (Figura 38).

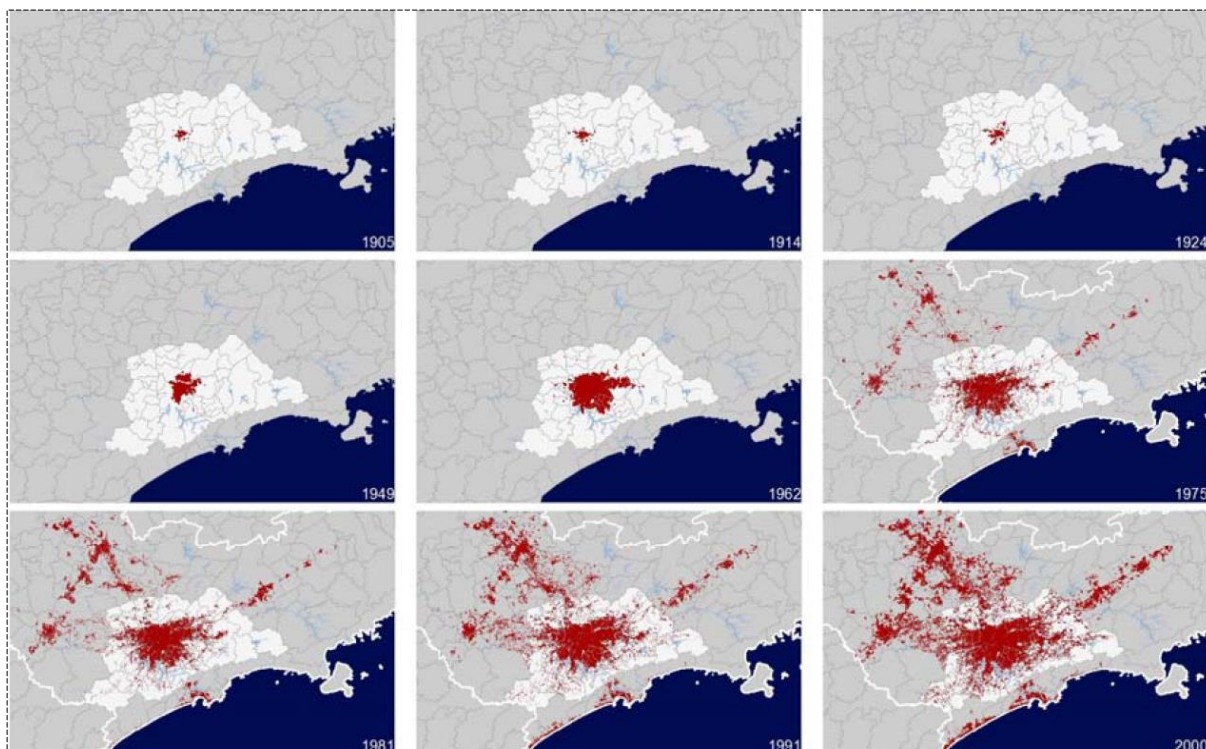
A nível global, a MSP experimentou um dos mais expressivos processos de crescimento urbano do último século, com maior intensidade durante as primeiras oito décadas do século XX (Meyer et al, 2015), e com a maior taxa registrada na década de 1950 (5,58% ao ano), o que explica em parte os enormes problemas e desafios atuais. No século XIX, período de transformação significativo para cidades globais como Londres e Paris, essas cidades cresceram cerca de cinco vezes (Lencioni, 1998), ao passo que, em 1920, a cidade de São Paulo era apenas uma capital brasileira comum, com 579.033 habitantes, que em menos de 100 anos multiplicou por mais de 20 vezes o seu tamanho.

No século XX, a cidade de São Paulo entrou num acelerado ritmo de crescimento urbano e demográfico, gerando problemas relacionados com a ocupação inadequada do meio físico local. Esse processo, em ritmo contínuo e acelerado, fez com que a mancha urbana ultrapassasse as barreiras naturais representadas pelo relevo de terrenos pré-cambrianos das Serras de São Roque, Cantareira e Serra do Mar e se expandisse em direção às cidades vizinhas de Sorocaba, Campinas e Cubatão, respectivamente (López, 2001).

---

<sup>17</sup> Segundo dados da ONU (DESA, UN. 2018), *Revision of world urbanization prospects* a RMSP é seguida pela área metropolitana da Cidade do México (21.672.000 hab.), Nova Iorque (18.805.000 hab.), Buenos Aires (15.057.000 hab.) e Rio de Janeiro (13.374.000 hab.).

<sup>18</sup> A maior aglomeração urbana concentra-se em Tokyo (37.435.000 hab.), seguida por Delhi (29.399.000 hab.) e Shanghai (26.317.000 hab.) (DESA, UN. 2018).



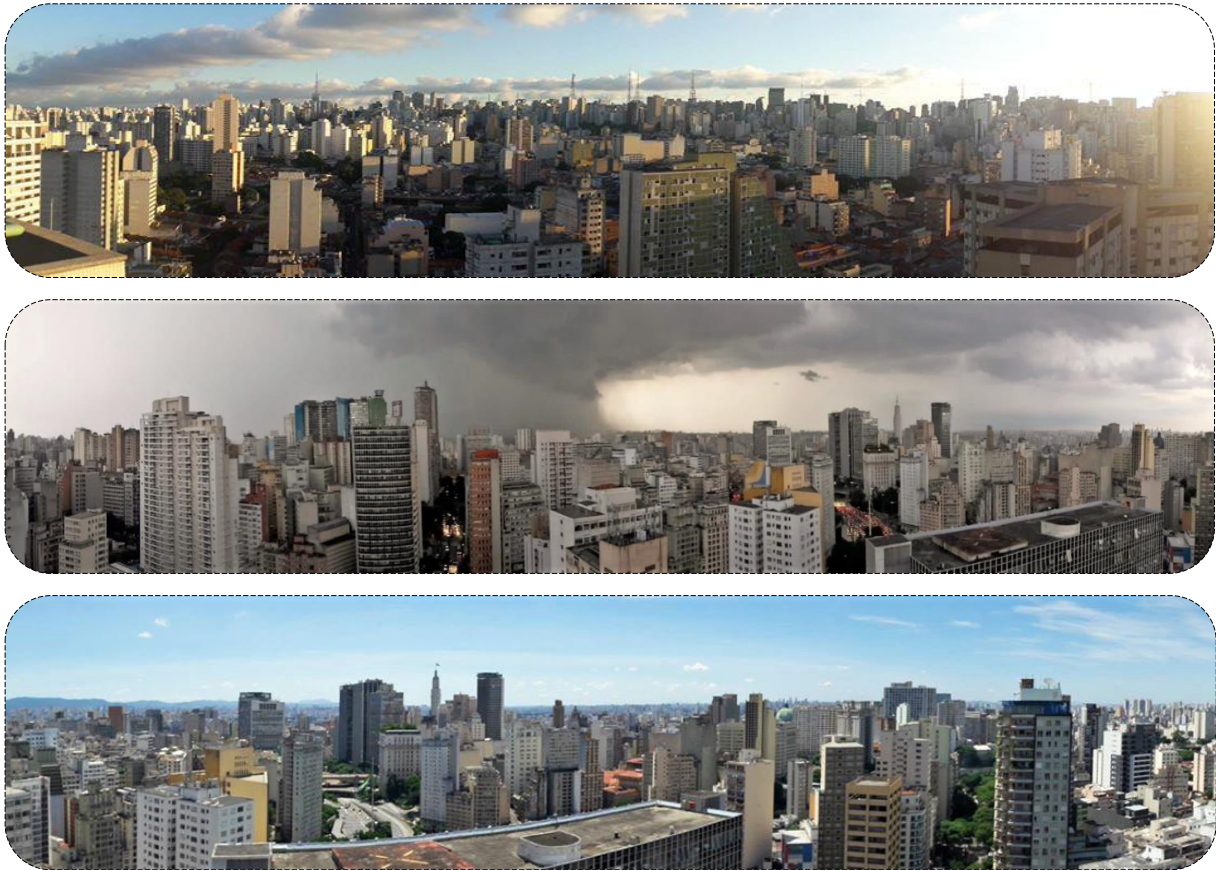
**Figura 38** - Expansão da Região Metropolitana de São Paulo entre 1905 – 2000. Fonte: Meyer et al, 2015.

Para Lencione (1998), a expansão da mancha metropolitana de São Paulo ocorreu num contexto de crise e recessão econômica no final dos anos 70 e consolidou-se na década de 80 (a chamada década perdida), com decréscimo nos investimentos, quer privados ou públicos, diante de uma drenagem maciça de capitais para fora do país. Segundo a autora, é neste contexto do binômio fábrica cidade industrial que se consagrou a cidade de São Paulo e as áreas periféricas.

Atualmente, a capital paulista concentra cerca de 6% da população brasileira (IBGE, 2016) e sua região metropolitana 11%. Segundo Lencioni (1998), São Paulo tem como característica a concentração dos serviços mais especializados relativos a finanças e ao *marketing*, ao planejamento e à consultoria. Outro destaque é a concentração de cerca de 81% dos depósitos financeiros, além de 1/3 das agências bancárias do Estado de São Paulo. No cenário global, São Paulo representa grande relevância política, cultural e econômica, sendo a cidade brasileira mais influente. Em grande parte, a sua influência deriva do fato do parque industrial brasileiro estar concentrado em São Paulo, onde se localiza, aproximadamente, cerca de metade do valor gerado na indústria do país (Lencioni, 1998; Meyer et al, 2015).

Como a maioria das grandes cidades latino-americanas, o ordenamento urbano representa um desafio contínuo para o presente e o futuro. Segundo Nucci (2001, p.1) desde a década de 70, as propostas de planejamento urbano para a MSP colocam o adensamento urbano como resposta às demandas sociais. Para o autor, o adensamento proposto, significa uma intensificação do uso e da ocupação do solo, vinculado à disponibilidade de infraestrutura (redes de água, luz, esgoto, telefone e gás canalizado) e às condições do

meio físico. A área que apresentasse uma infraestrutura subutilizada e sem impedimentos do meio físico seria considerada como passível de adensamento e verticalização (Figura 39).



**Figura 39** – Imagens do Sistema de Espaços Urbanos no centro de São Paulo.

Esta visão de desenvolvimento associada à verticalização e adensamento do espaço urbano esteve presente ao longo das décadas na metrópole paulistana, como produto da urbanização intensiva, com modificações no clima urbano que seguem números preocupantes. Atualmente a MSP tem se consagrado como uma área de estudos sobre a vulnerabilidade urbana na tentativa de procurar soluções para as conflituosas demandas entre o ordenamento territorial e as questões ambientais dentre elas o clima, assim como os reflexos na saúde, qualidade de vida e setores econômicos e políticos.

No contexto do último Plano Diretor Estratégico - PDE (2014), as questões de ordenamento territorial relacionadas com o clima somente aparecem em temas transversais do meio ambiente e ainda carecem de maior destaque, ferramentas, estudos e novas abordagens que visem propiciar melhor condições de qualidade de vida aos paulistanos. É neste contexto que esta tese assenta a proposta de readequação dos Sistema de Espaços Urbanos da MSP, para atuação em futuras intervenções por parte da gestão urbana do município.

#### 4.1.1. O contexto climático da Metrópole de São Paulo

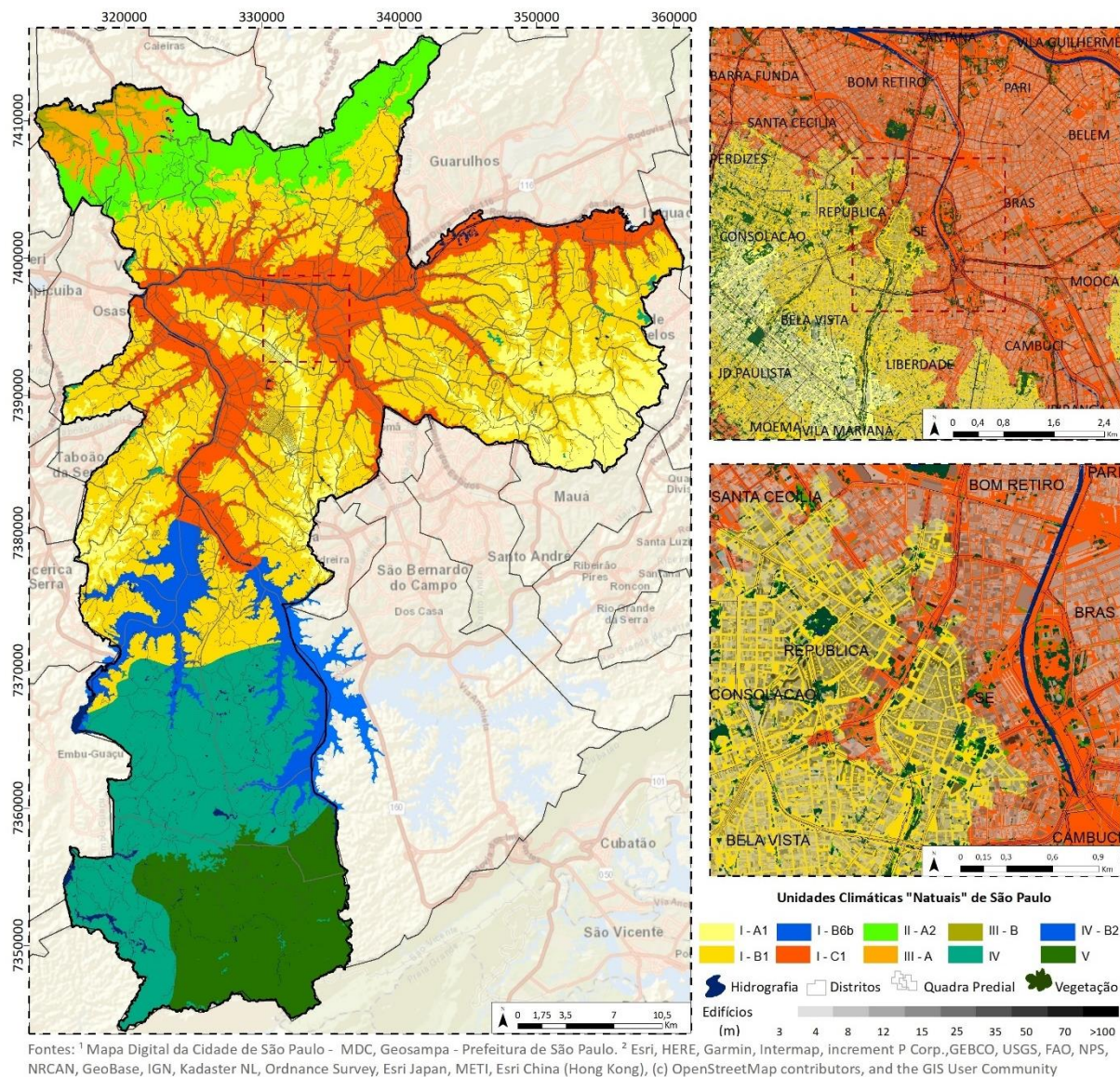
A expansão urbana extremamente rápida no último século e a inexistência de um projeto de ordenamento do território adequado às condições físicas e evolutivas influenciam na configuração climática de São Paulo (López, 2001). As condições cada vez mais favoráveis à concentração de poluentes em toda a cidade, a intensidade da ICU, as inversões térmicas e os riscos climáticos são apenas alguns dos exemplos de como os aspectos específicos de seu clima urbano foram moldados pelo processo de urbanização.

Tarifa e Azevedo (2001) reuniram no livro “Os climas da cidade de São Paulo” uma coletânea de estudos relacionados com os tipos de climas “naturais” e climas “urbanos”, o fluxo de calor gerado pelas atividades humanas, inundações e a distribuição espacial da chuva, o vento, a qualidade do ar e chuvas ácidas. Estes estudos serviram de base para caracterização do contexto climático e geográfico e à criação do “Atlas Ambiental do Município de São Paulo” em 2002.

Segundo Tarifa e Armani (2001a) a localização da metrópole paulistana implica numa realidade climática de transição entre os Climas Tropicais Úmidos de Altitude, com período seco definido, e os Subtropicais, permanentemente úmidos, do Brasil meridional (Figura 40). Os autores enfatizam que, uma das principais características climáticas dessa transição zonal é a alternância das estações (quente-úmida e a outra fria e relativamente mais seca) ao lado das variações bruscas do ritmo e da sucessão dos tipos de tempo. Podem ocorrer situações meteorológicas de intenso aquecimento bem como de intenso arrefecimento em períodos de curta duração (dias a semanas). Para os autores, esta alternância explica, regionalmente, tanto a ocorrência de fortes impactos pluviométricos, como a existência, em determinados anos, de longas sequências de períodos secos. Nos anos de máxima oscilação sul (El Niño de 1976/77, 82/83, 91/92 e 94) a bacia do Alto Tietê (RMSP) passou por impactos pluviométricos muito intensos, tanto na primavera-verão como no outono.

Do centro da MSP até poucos quilômetros de distância (60 – 70 km em média) encontra-se o Oceano Atlântico. Esse cenário define um conjunto de controles climáticos que em interação com a sucessão habitual dos sistemas atmosféricos, caracterizam os climas locais, produzidos pelos encadeamentos de diferentes tipos de tempo (Tarifa e Armani, 2001a).

O sítio urbano da MSP abrange dois grandes conjuntos geomorfológicos distintos: o da Bacia Sedimentar de São Paulo e o de seu rebordo granítico-gnáissico (López, 2001). A MSP está situada num contexto de terras altas (predominantemente entre 720 e 850 metros), chamado Planalto Atlântico. A topografia desse planalto apresenta as mais variadas feições, tais como planícies aluviais (várzeas), colinas, morros, serras e maciços com diversas orientações (Tarifa e Armani, 2001b). Em meio a esta configuração topográfica, o Rio Tietê intersecta a cidade no eixo Este-Oeste e possui dois principais afluentes, os rios Pinheiros (Sudoeste) e Tamanduateí (Centro-Este).



**Figura 40** - Unidades Climáticas Naturais: Fonte: Adaptado do Atlas do Município de São Paulo (2002) e Tarifa e Armani, 2001.

- Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Atlântico (I): I – A1 - topos dos maciços, serras e altas colinas; I – B1 - colinas intermediárias, morros baixos, terraços e patamares; e I – C1 - várzeas e baixos terraços.
- Clima Tropical Úmido Serrano da Cantareira – Jaraguá (II): II - A1 - maciços e serras da face meridional da Cantareira e Jaraguá, onde está inserido o Parque da Cantareira; e II - A2 - maciços e serras da face setentrional da Cantareira e Jaraguá com topos voltados para a Bacia do Juquerí.
- Clima Tropical Úmido de Altitude do Alto Juquerí (III): III - A - morros e espigões do Alto Juquerí – Tietê; e III - B - terraços e as várzeas do Vale do Juquerí.

- Clima Tropical Sub-oceânico Superúmido do Reverso do Planalto Atlântico (IV): IV - A- morros e espigões elevados do Alto Pinheiros e Embú-Guaçu; e IV - B - morros e nascentes do Alto Pinheiros e Embú-Guaçu.
- Clima Tropical Oceânico Super-úmido da fachada Oriental do Planalto Atlântico (V): VA - serras e altos espigões da Fachada Oriental do Planalto Atlântico; VB - morros, serras e escarpas do Alto Capivari-Monos; e VC - escarpa oriental do Planalto Atlântico (Serra do Mar).

A estruturação e a orientação do seu relevo e suas bacias e sub-bacias também influenciam o direcionamento dos fluxos de vento, provenientes do oceano ou do continente. A formação de nevoeiros (névoa seca ou úmida) ou de inversões térmicas também podem, em muitos casos, ser explicadas a partir da atuação do relevo e das variações bruscas de temperatura sobre os fluxos de vento que chegam à cidade (Tarifa e Armani, 2001b). Os autores utilizaram dados da Estação Meteorológica do Mirante de Santana no centro da MSP (latitude 23°30', longitude 46° 37' e altitude 792m) para demonstrar a sazonalidade dos atributos climáticos (pressão, temperatura, precipitação) por meio da análise das normais climatológicas do período 1961-1990 (Tabela 5).

**Tabela 5** - Normais Climatológicas Mirante de Santana (1961 a 1990). Fonte: Tarifa e Armani (2001a)<sup>19</sup>.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
<b>P.A. (mb)</b>	923,5	924,2	924,9	926,2	927,4	928,7	929,4	928,3	927,2	925,4	923,8	923,2	926,0
$\overline{X}TMx$ (°C)	27,3	28,0	27,2	25,1	23,0	21,8	21,8	23,3	23,9	24,8	25,9	26,3	24,9
$\overline{X} TMin$ (°C)	18,7	18,8	18,2	16,3	13,8	12,4	11,7	12,8	13,9	15,3	16,6	17,7	15,5
$\overline{X} TMed$	22,1	22,4	21,7	19,7	17,6	16,5	15,8	17,1	17,8	19,0	20,3	21,1	19,3
<b>Umi Rel (%)</b>	80	79	80	80	79	78	77	74	77	79	78	80	78
<b>Neb (C10)</b>	8,1	7,5	7,7	7,4	6,6	6,2	6,1	6,2	7,2	7,7	7,7	8,2	7,2
<b>Prec (mm)</b>	238,7	217,4	159,8	75,8	73,6	55,7	44,1	38,9	80,5	123,6	145,8	200,9	1454,8
<b>Evap (mm)</b>	99,9	86,9	88,4	80,7	79,8	78,2	91,1	104,8	100,0	99,9	101,4	96,9	1108,0
<b>Inso (h/dia)</b>	4,8	5,2	4,7	4,7	4,6	4,8	5,3	5,2	4,0	4,5	4,8	4,2	4,7

Com base nos dados apresentados, Tarifa e Armani (2001a) verificaram a existência nítida de duas estações bem definidas: I) estação quente e chuvosa que se estende de outubro a março (primavera-verão); e, II) estação fria e relativamente mais seca, de abril a setembro (outono-inverno). No que se refere à nebulosidade, verifica-se um índice elevado de cobertura durante o verão e na primavera, o que se reflete diretamente na insolação na  $T_{SUP}$ .

<sup>19</sup> Os valores medidos das normais climatológicas foram: pressão atmosférica (P.A. mb), temperatura do ar média máxima ( $\overline{X}TMx$  °C), média mínima ( $\overline{X} TMin$  °C) e média global ( $\overline{X} TMed$ ), umidade relativa do ar (Umi Rel %), nebulosidade (Neb C10), precipitação (Prec mm), evaporação (Evap mm) e insolação (Inso h/dia).

Segundo Tarifa e Armani (2001a), o clima subtropical úmido confere um comportamento térmico que mostra variação sazonal muito semelhante: I) o período de maio a outubro registrou os menores valores médios da temperatura do ar, com uma variação entre 15,8°C julho (mês mais frio) a 19,0°C (outubro); II) na estação quente, os valores oscilam entre 22,4°C (fevereiro, mês mais quente) e 20,3°C (novembro), ficando abril com 19,7°C (transição para o inverno); III) a média anual das máximas é de cerca de 24,9°C, com o mês mais frio em julho, registrando 21,8°C e o mês mais quente (fevereiro) 28,0°C; IV) a média anual das temperaturas mínimas foi de 15,5°C, registrando-se no mês mais frio (julho), um valor médio de 11,7°C enquanto, no mês mais quente (fevereiro), apresenta uma média de 18,8°C (Tarifa e Armani, 2001a).

Tomando por base os dados da estação meteorológica do Mirante de Santana, localizada dentro da área densamente urbanizada da MSP, López (2001) afirma que a temperatura média do ar da cidade entre 1947 e 1956 era de 17,6°C, passando para 19,0°C entre os anos de 1967 e 1976 e chegando a 19,7°C no período compreendido entre 1983 e 1992. Segundo este autor, o fato das médias térmicas anuais de um mesmo posto meteorológico sofrerem um aumento superior a 2°C em menos de 50 anos é consequência direta da expansão descontrolada da metrópole, o que tende a se agravar ainda mais nos próximos anos, com as alterações climáticas projetadas. A constante expansão da mancha urbana paulistana (acompanhada da concentração de atividades industriais, veículos motorizados e a presença de extensas áreas construídas), vem gerando bruscas mudanças no balanço de energia, contribuindo para a ascensão progressiva dos valores médios de temperatura (López, 2001).

Azevedo (2001), analisou o fluxo de calor emitido anualmente por biomassa e por atividades humanas em contraste ao fluxo anual de energia proveniente da radiação solar na RMSP. O autor concluiu que mesmo sob uma perspectiva conservadora, o montante de energia introduzido e dissipado no clima urbano de São Paulo pela atividade humana é comparável ao da radiação solar na mesma escala de magnitude<sup>20</sup>.

Com relação a umidade do ar, durante todo o ano os valores mantiveram-se relativamente elevados (em média), variando com um máximo de 80% nos meses de janeiro, março, abril e novembro com um mínimo de 74% em agosto (Tarifa e Armani, 2001a). Pode-se dizer que as maiores percentagens estão ligadas aos meses chuvosos de verão, quando predominam os ventos de SE provenientes do oceano. Nos meses de inverno, apesar das baixas temperaturas, são registrados os menores índices percentuais de umidade relativa do ar, ocasionados pelo predomínio de massas de ar associadas a elevadas pressões atmosféricas (López, 2001).

---

<sup>20</sup> O autor refere que esta conclusão deve ser considerada com ressalvas uma vez que devem haver áreas urbanas na cidade em que a proporção em questão seja maior, a depender do nível de aglomeração humana e além disso em latitudes mais elevadas e/ou locais em que a nebulosidade é maior que em São Paulo a radiação solar global, ao nível do solo, tende a ser menor que no caso estudado.

Para o período de 1961-1990, a pluviosidade média anual, segundo Tarifa e Armani (2001a), foi de 1454,8 mm, sendo o mês mais chuvoso (janeiro), com 238,7 mm, e o mês mais seco (agosto), com apenas 38,9 mm. O máximo pluviométrico, em 24 horas (para o posto meteorológico do Mirante de Santana), ocorreu no dia 21 de dezembro de 1988 tendo sido registrado um valor de 151,8 mm. López (2001) destaca que há uma nítida interferência da configuração topográfica e geomorfológica na determinação das áreas que detêm maiores ou menores totais pluviométricos, no qual as áreas de pluviosidade anual superior a 1.400 mm correspondem às áreas de serras, e as totais pluviométricos inferiores a 1.300 mm anuais são verificados nas áreas de fundo de vale e das várzeas (bacias e sub-bacias dos Rios Tietê, Paraíba do Sul, Parateí e alto Jaguari e respectivos afluentes).

Para análise dos dados de vento, Tarifa e Armani (2001a) utilizaram como referência a estação meteorológica do Aeroporto de Congonhas, a qual registrou a persistência de calmarias em 33,7% dos dados anuais. As primeiras predominâncias do vento, correspondem as direções Sudeste (SE) com 19,6% e Sul (S) com 16%, em menor frequência, ocorrem os ventos na direção Este (E) com 8,8%, Noroeste (NO) com 6,3%, Norte (N) com 5,8% e Nordeste (NE) com 5,6%. As direções menos frequentes correspondem aos ventos de Sudoeste (SO) 2,1%, e 1,8% na direção Oeste (O). A pressão atmosférica, cuja média anual é de 926,0 mb, oscila no outono-inverno entre 926,2 mb (abril) e 929,4 mb (julho), e na primavera-verão, entre 923,2 mb (dezembro) e 925,4 mb (outubro) (Tarifa e Armani, 2001a).

López (2001), analisou as frequências de direção e velocidade dos ventos entre 1983 e 1992 para três estações meteorológicas localizadas em áreas distintas na metrópole paulistana (Mirante de Santana na Zona Norte, Aeroporto de Congonhas na Zona Sul e Aeroporto de Cumbica em Guarulhos na RMSP). O autor destacou as seguintes características do comportamento padrão dos fluxos de ventos na RMSP:

- Correntes de E, SE e S apresentam, os maiores percentuais de frequência sobre o total de ventos registrado em São Paulo. Nos meses de inverno, ocorre uma ligeira queda na frequência dos ventos de S e SE, em função da constante presença, neste período, dos Sistemas Atmosféricos de Alta Pressão (SAAP), que conferem uma maior estabilidade atmosférica em sua área de atuação.
- Correntes de ventos na direção NE, apresentam índices de frequência baixos ou moderados com ligeira ascensão no inverno, em função da maior influência do SAAP sobre o continente.
- Correntes de ventos N e NO apresentam frequências baixas ou moderadas durante todo o ano.
- Os ventos de O e SO respondem apenas por ocorrências isoladas, não tendo participação realmente significativa na circulação de ventos da metrópole paulistana.
- Calmarias são verificadas em grande frequência durante os meses mais frios do ano, em função da maior atuação nesta época de sistemas atmosféricos caracterizados por sua estabilidade.

## 4.2. Aquisição e montagem de bancos de dados

Após caracterizar o perfil urbano e climático da área de estudos foram estruturadas os métodos, técnicas e procedimentos necessários para análise morfoclimática, da  $T_{SUP}$  e da ventilação natural, para então propor um modelo de representação cartográfica direcionado à readequação dos espaços urbanos na MSP. A partir da revisão do conjunto inicial de controles, critérios e propriedades que estruturam as análises nesta tese, iniciou-se a etapa de aquisição e montagem do banco de dados composto por três tipos a serem utilizados para modelação:

- Dados temáticos - de forma a analisar as propriedades morfoclimáticas foram necessários dados em formato *shapefile* referente aos elementos estruturantes do SEU, adquiridos por meio do Sistema de Consulta do Mapa Digital da Cidade de São Paulo – MDC:
  - SEC - Sistema de Espaços Construídos (edifícios - altura, área);
  - SEIU – Sistema de Espaços de Integração Urbana (lotes, circulação viária, quadra predial);
  - SELC – Sistema de Espaços Livres de Construção (áreas verdes, áreas livres).
  
- Detecção remota - parte do estudo aqui proposto envolve etapas de aquisição, processamento e análise das informações em formato *raster* com características espectrais diversas, os quais compreendem as imagens:
  - IKONOS - com resolução de 1m, cedida pelo Laboratório de Geografia da Universidade de São Paulo - USP, para atualização das classes de rugosidade (2011);
  - ASTER GDEM - para extração de curvas de nível e dados topográficos atualizados através da elaboração de um *Digital Elevation Model* (DEM) e delimitação de classes de ventilação natural;
  - LANDSAT 5 e 8 – para análise das propriedades térmicas das superfícies como o albedo, a emissividade e a  $T_{SUP}$ ;
  - Mapas temáticos impressos – para análise das unidades climáticas (Tarifa e Armani, 2001a e 2001b).
  
- Dados Climáticos: para modelação do vento em meio urbano foram adquiridas séries históricas de informações referentes a velocidade e direção dos ventos. Para este estudo a temporalidade de dez anos de medição foi adquirida junto ao INMET - Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil, sendo para a capital paulista e utilizado os dados do Aeroporto de Congonhas.

#### 4.3. Infraestruturas laboratoriais, materiais e *software* utilizados

De acordo com os objetivos estabelecidos para esta tese, cada etapa metodológica contou com o uso de diferentes tipos de dados, *software*, procedimentos e equipamentos dentre eles:

- Geomodlab – Laboratório de detecção remota, análise e modelação geográfica do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa (IGOT/ULisboa), que serviu de base de trabalho para o processamento de grande volume de dados;
- ArcMAP/ArcGIS® 10.5 (ESRI) - para todo o processo de criação de banco de dados e álgebra de mapas referentes à análise das propriedades morfoclimáticas e a construção dos mapas finais de síntese;
- WAsP - Wind Atlas Analysis and Application Program (DTU Wind Energy) – foi utilizado para simulação dos perfis e campos de vento em altura, considerando a topografia e a rugosidade dos obstáculos;
- Qgis 3.6 (QGIS Development Team) - trata-se de um *software* livre que foi utilizado nas etapas de pré-processamento e processamento das imagens Landsat para elaboração da cartografia da temperatura de superfície;
- eCognition 9.0 (Trimble®) foi utilizado para o processamento digital da imagem de alta resolução IKONOS, durante as etapas de combinação de bandas e definição da árvore de processamentos referentes à segmentação multiresolução e classificação orientada aos objetos.

#### 4.4. Modelo para a Análise da Temperatura das Superfícies ( $T_{SUP}$ )

Oke et al. (2017 p. 157), afirmam que a  $T_{SUP}$  é afetada diretamente por qualquer mudança nas propriedades térmicas dos materiais presentes em superfície, pela estrutura urbana e textura do tecido urbano e pela ventilação natural. Neste estudo a análise da temperatura de superfície pretende compreender e determinar a dimensão espacial e o ritmo estacional diurno das  $T_{SUP}$  como indicador dos *hotspots* da  $ICU_{SUP}$  em São Paulo, considerando as propriedades como a emissividade e a radiância térmica.

Como foi referido no Capítulo II, as imagens orbitais para análise da  $T_{SUP}$  dificilmente retratam a realidade total da temperatura de superfície, sendo comumente imageado apenas o topo das superfícies e algumas áreas adjacentes, dependendo ainda da verticalidade, topografia e declividade do terreno. Para as imagens Landsat 5 e 8, existem outras limitações como por exemplo, à questão da resolução espacial (120 e 100m para a banda térmica) e a resolução temporal por serem tratadas de imagens obtidas em média a cada 16 dias e o horário de passagem do satélite (para o quadrante da MSP ocorre no período diurno).

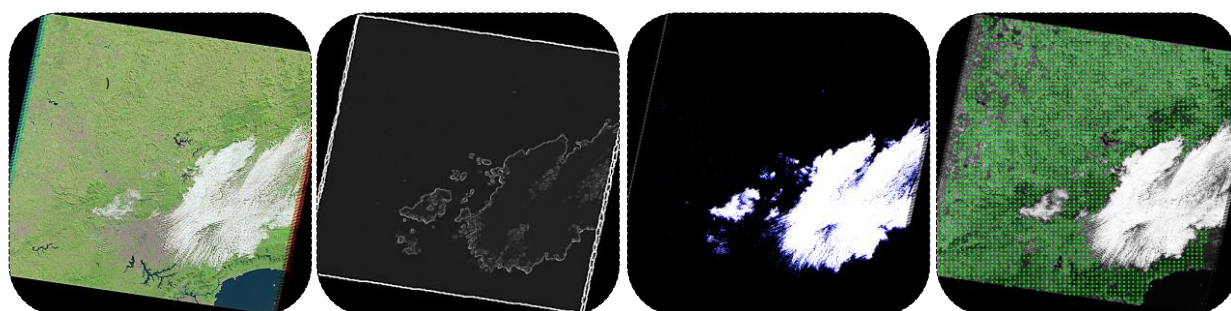
Como a principal fonte de análise da  $T_{SUP}$  em diversos locais do globo, as imagens Landsat têm sido extensivamente utilizadas nas últimas décadas: Basileia por Parlow, 1999; Lisboa por Lopes, 2003 e 2006; Lucena et al. (2004), para o Rio de Janeiro, além de diversos estudos na MSP (Lombardo, 1985; Tarifa e Armani, 2001; Barros e Lombardo, 2016).

Com base nestas premissas, nesta tese o modelo de métodos para análise da  $T_{SUP}$  foi estruturado no uso das imagens termais dos sensores Landsat 5 – *Thematic Mapper* (TM) e Landsat 8 - OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Para Ndossi e Avdan (2016), estes sensores são equipados com instrumentos que permitem detectar a radiação eletromagnética entre a região do espectro eletromagnético visível à infravermelha térmica como é escrito na Tabela 6.

**Tabela 6** - Características das imagens Landsat 5 e 8. Fonte: USGS Earth Explorer

Landsat - TM ( <i>Thematic Mapper</i> )			Landsat 8 - TIRS ( <i>Thermal Infrared Sensor</i> )		
Bandas Espectrais	Res. Espec	Res. Espacial	Bandas Espectrais	Res. Espec	Res. Espacial
1 - Azul	0,45 - 0,52	30	1- Costaeiro/aerossol	0.43 - 0.45	30
2 - Verde	0,52 - 0,60	30	2 - Azul	0.450 - 0.51	30
3 - Vermelho	0,63 - 0,69	30	3 -Verde	0.53 - 0.59	30
4 – Infra. Próximo	0,76 - 0,90	30	4 - Vermelho	0.64 - 0.67	30
5 – Infra. Médio	1,55 - 1,75	30	5 – Infra. Próximo	0.85 - 0.88	30
6 – Infra. Térmico	10,4 - 12,5	120	6 – Infra. Médio	1.57 - 1.65	30
7 - Infra. Médio	2,08 - 2,35	30	7 – Infra. Médio	2.11 - 2.29	30
			8 - Pancromática	0.50 - 0.68	30
			9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
			10 – Infra. Térmico (TIRS)1	10.60 – 11.19	100
			11 – Infra. Térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

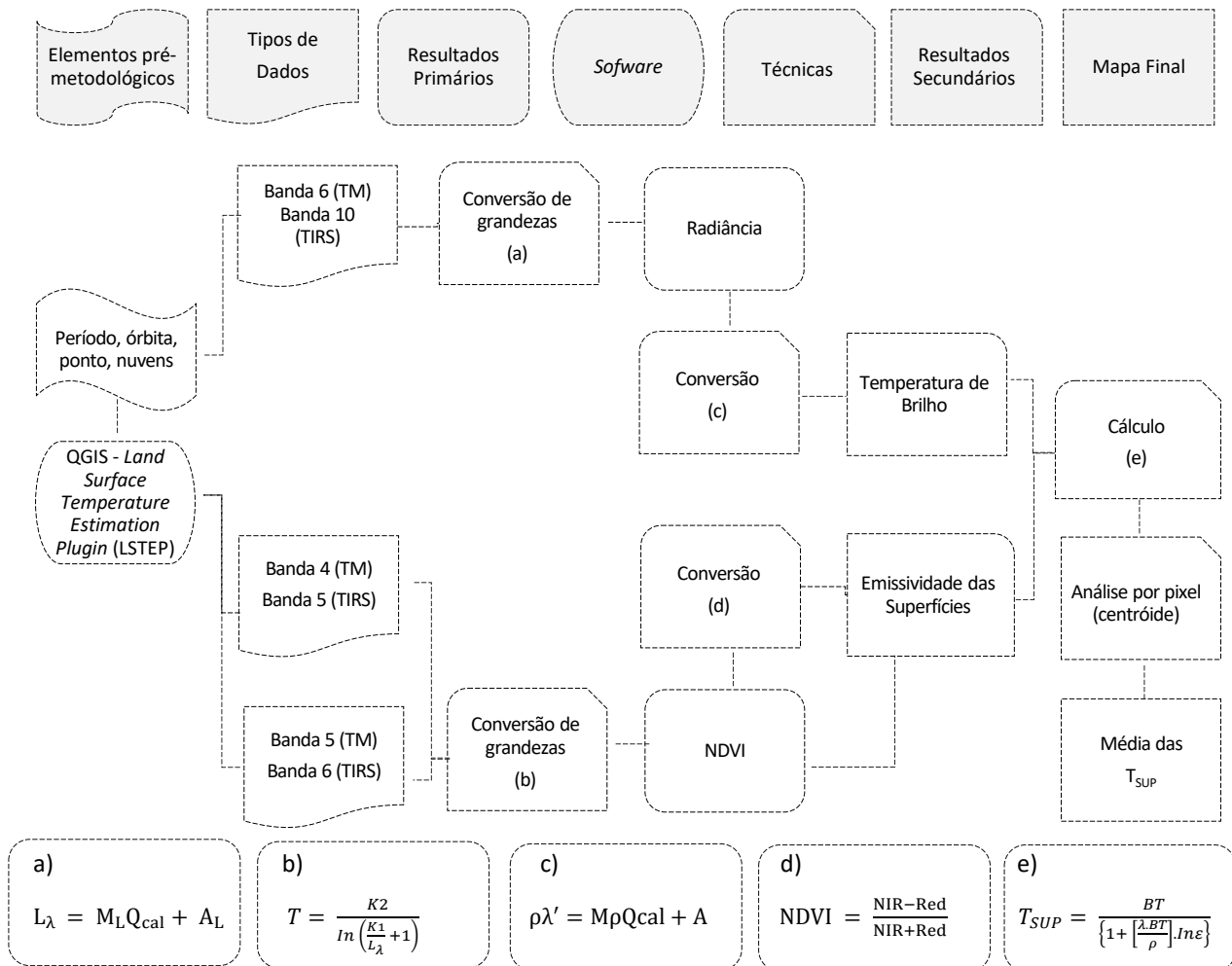
As imagens Landsat encontram-se disponíveis através do portal da *United States Geological Survey* (USGS *Earth Explorer*). Na própria plataforma do USGS *Earth Explorer*, delimitou-se a área de estudos situada na coluna 219 e linha 76 e em seguida aplicou-se a filtragem da cobertura de nuvens menor que 70% da área imageada. Outra filtragem foi realizada posteriormente para remoção dos possíveis pixels anômalos referente à cobertura de nuvens (Figura 41).



**Figura 41** - Etapas para filtragem e seleção das imagens Landsat: a) delimitação da área de estudo; b) delimitação da cobertura de nuvens; c) filtragem dos pixels; d) extração das áreas sem nuvens.

Realizada a etapa de armazenamento das 160 cenas Landsat procedeu-se à criação de um banco de dados estacional e em seguida por década. Informa-se que a MSP está situada entre duas áreas de imageamento, para o qual foi necessário a criação de um mosaico para cada banda das cenas Landsat, esta etapa que foi realizada no *software* QGIS por meio da ferramenta *Mosaic\_raster*. Com as bandas

mosaicadas, foi realizada a instalação do *Land Surface Temperature Estimation Plugin* (LSTEP), desenvolvido por Ndossi e Avdan (2016), disponível para o QGIS, que tem como propósito extrair a  $T_{SUP}$  de imagens orbitais Landsat (5 TM, 7 ETM + e 8 TIRS). Apresenta-se na Figura 42, o processo para obtenção de  $T_{SUP}$ .



**Figura 42** - Procedimentos para obtenção da Temperatura das Superfícies.

O processo metodológico para calcular a  $T_{SUP}$  com base no *Land Surface Temperature Estimation Plugin* (LSTEP), seguem as seguintes etapas: I) conversão das informações do Infravermelho Térmico, ou seja, os Números Digitais ( $N_{DS}$ ) da imagem para valores de Radiância ( $R_D$ ); II) conversão dos valores de  $R_D$  para Temperatura de Brilho ( $T_B$ ); III) próximo passo destina-se ao cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para então ser calculada a emissividade -*Land Surface Emissivity* (LSE); e, IV) cálculo do temperatura de superfície com base na  $T_B$  e na LSE etapa que pode ser realizada por diferentes algoritmos.

## Conversão de Números Digitais para valores de Radiância

Os dados térmicos das imagens Landsat são armazenados em números digitais ( $N_{DS}$ ) e utilizados como uma forma de representar diferentes níveis de brilho em uma imagem rasterizada. Segundo Ndossi e Avdan (2016), para converter os  $N_{DS}$  em valores de  $R_D$ , foram selecionadas as bandas térmicas 6 (infravermelho termal – 10,4 - 12,5 $\mu$ m) do sensor 5TM e a banda 10 (infravermelho termal – 10,60 a 11,19 $\mu$ m) do sensor 8TIRS, imageadas entre o período de 1984 e 2017, referente linha 219 e coluna 076, que compreendem a área da RMSP.

No *software* QGIS, Ndossi e Avdan (2016) referem que os valores de  $N_{DS}$  do sensor Landsat 5TM, podem ser convertidos para grandezas de  $R_D$  por meio dos fatores de ganho e reescalonamento, como é descrito nas Equações (1) e (2). Para cenas do Landsat 8 TIRS é necessária a calibração das bandas com base no arquivo de metadados, disponível ao efetuar a transferência das imagens do USGS *Earth Explorer*, para este caso a Equação (3) representa o modelo de conversão:

$$L_\lambda = gain \times Q_{cal} + bias \quad (1)$$

$$L_\lambda = ((LMAX_\lambda - LMIN_\lambda)/(QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_\lambda \quad (2)$$

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Onde:  $L$  é a radiância espectral do topo da atmosfera em  $W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ; *gain* é o ganho escalado (contido no cabeçalho de produto ou no registro de dados auxiliares), representado em  $W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ; *bias* é o viés de escala reescalado em  $W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $Q_{cal}$  é o valor de *pixel* de produto padrão ( $D_N$ ) quantificado e calibrado;  $LMAX_\lambda$  é a radiância espectral que é dimensionada para  $QCALMAX$  em  $W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $LMIN_\lambda$  é a radiância espectral que é dimensionada para  $QCALMIN$  em  $W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ;  $M_L$  é o fator de redimensionamento multiplicativo específico da banda dos metadados;  $A_L$  é o fator de redimensionamento aditivo específico da banda dos metadados.

## Conversão da Radiância ( $R_D$ ) para Temperatura de Brilho ( $T_B$ )

A Temperatura de Brilho ( $T_B$ ) é a temperatura necessária para que um corpo negro possa emitir a mesma quantidade de radiação por unidade de área de superfície em comparação com outro corpo observado (Ndossi e Avdan, 2016). A  $T_B$  possui a capacidade de representar medições de temperatura das superfícies, mas não considera os valores de emissividade. Geralmente a  $T_B$  é menor que a  $T_{SUP}$ , mas isso pode ser revertido, dependendo das condições atmosféricas (temperatura do ar e umidade) (Prata et al., 1995; Dash et al., 2002). Segundo Ndossi e Avdan (2016), depois que os  $N_{DS}$  são convertidos em  $R_D$ , o próximo passo é a conversão da  $R_D$  em  $T_B$  como demonstra a Equação (4):

$$T_B = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

Onde,  $T_B$  é a Temperatura de Brilho de em Kelvin,  $L_\lambda$  a radiância espectral no topo da atmosfera, e  $K1$  e  $K2$  são as constantes de conversão térmica para as bandas utilizadas a partir dos arquivos de metadados das cenas.

### **Cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)**

Para avaliar a emissividade de uma superfície é necessário conhecer antes suas propriedades termo-físicas, as quais segundo Ndossi e Avdan (2016) podem ser analisadas com base no *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Para a obtenção da emissividade das superfícies por meio do cálculo do NDVI foram utilizadas as bandas 3 (vermelho – 0,63µm a 0,69µm) e 4 (infravermelho próximo – 0,76µm a 0,90µm) do sensor Landsat 5TM, ao passo que, para o sensor Landsat 8 OLI/ TIRS utilizou-se as bandas 4 (vermelho – 0,64µm a 0,67µm) e 5 (infravermelho próximo – 0,85µm a 0,88µm) para gerar o NDVI, o qual foi calculado seguindo a equação (5) proposta por Rouse et al. (1974).

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (5)$$

Onde, NIR = reflectância para banda do infravermelho próximo (NIR – *Near Infrared*) e Red = reflectância para a banda do vermelho.

### **Cálculo da Emissividade das Superfícies (*Land Surface Emissivity* - LSE)**

O *Land Surface Temperature Estimation Plugin* - LSTEP utiliza algoritmos de estimativa de emissividade a partir de cada *pixel* da imagem de NDVI, o que permite distinguir diferenças entre solo exposto e a cobertura vegetal por exemplo. A LSE de um *pixel* foi calculada classificando os *pixels* de acordo com a classe de NDVI. Ndossi e Avdan (2016) propuseram o uso de valores de NDVI em escalas globais para as seguintes classes: solo – 0.966; espaços construídos – 0.962; espaços verdes – 0.973; água – 0.991. Os parâmetros atmosféricos de espalhamento e absorção também podem afetar a estimativa da emissividade da superfície terrestre do NDVI. No entanto no LSTEP não foram levados em consideração pelos autores.

### **T<sub>SUP</sub> por meio da correção dos parâmetros pela função de Planck**

O último passo na obtenção da T<sub>SUP</sub> é corrigir os valores de T<sub>B</sub> em relação aos parâmetros LSE e atmosféricos. Neste sentido existem muitos algoritmos que foram projetados com esta finalidade, os quais variam de um sensor para outro e cada um deles apresenta potencialidades, limitações e diferenças quanto ao nível de precisão. Para o LSTEP, Ndossi e Avdan (2016) definiram com base em diversos estudos, quatro algoritmos a serem implementados no *plugin*: *Inversion of Planck's Function After*; *Mono-Window Algorithm* (MWA); *Radiative Transfer Equation* (RTE); *Single Channel Algorithm* (SCA).

Ao analisar e comparar os resultados de T<sub>SUP</sub> para dez cenas diferentes, os autores concluíram que os algoritmos MWA, a SCA, a RTE e a função de *Planck* podem ser usadas na estimativa de qualquer T<sub>SUP</sub> de imagens Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM + e Landsat 8 TIRS. No entanto, a disponibilidade de dados meteorológicos durante o tempo de passagem de satélite pode desempenhar um papel importante no

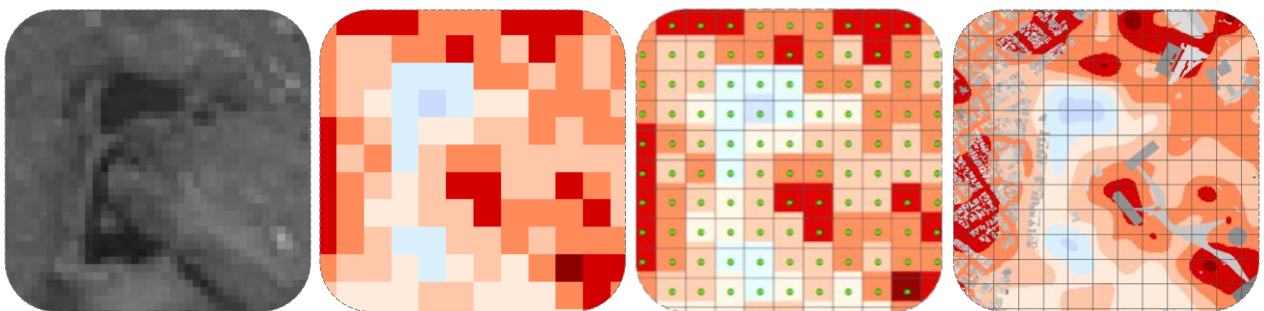
processamento das imagens, ainda que não tenham sido encontrados grandes disparidades entre os algoritmos de mensuração. Por fim os autores concluem que a função Planck seria então a mais fácil de usar em comparação com os outros algoritmos, já que não requer variáveis atmosféricas. A última etapa do processamento foi realizada para obter os dados de  $T_{SUP}$ , no qual se calculou a imagem da  $T_B$  e a LSE, utilizando a equação de *Planck* para corrigir a imagem, com base na Equação 6.

$$T_s = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\frac{\lambda \cdot BT}{\rho}\right] \cdot \ln \varepsilon\right\}} \quad (6)$$

Onde,  $T_{SUP}$  é a temperatura da superfície terrestre (em graus Kelvin),  $T_B$  é a temperatura de brilho no sensor, calculada anteriormente (em graus Kelvin),  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação emitida;  $\rho$  é  $(h * c/\sigma) = 1,438 \times 10^{-2} mK$ ; e,  $\varepsilon$  é a emissividade espectral da superfície terrestre. Ao final do cálculo entre as imagens, o *plugin* faz a conversão automática de Kelvin (K) para graus Celsius (°C).

### Extração dos valores para a unidade de análise

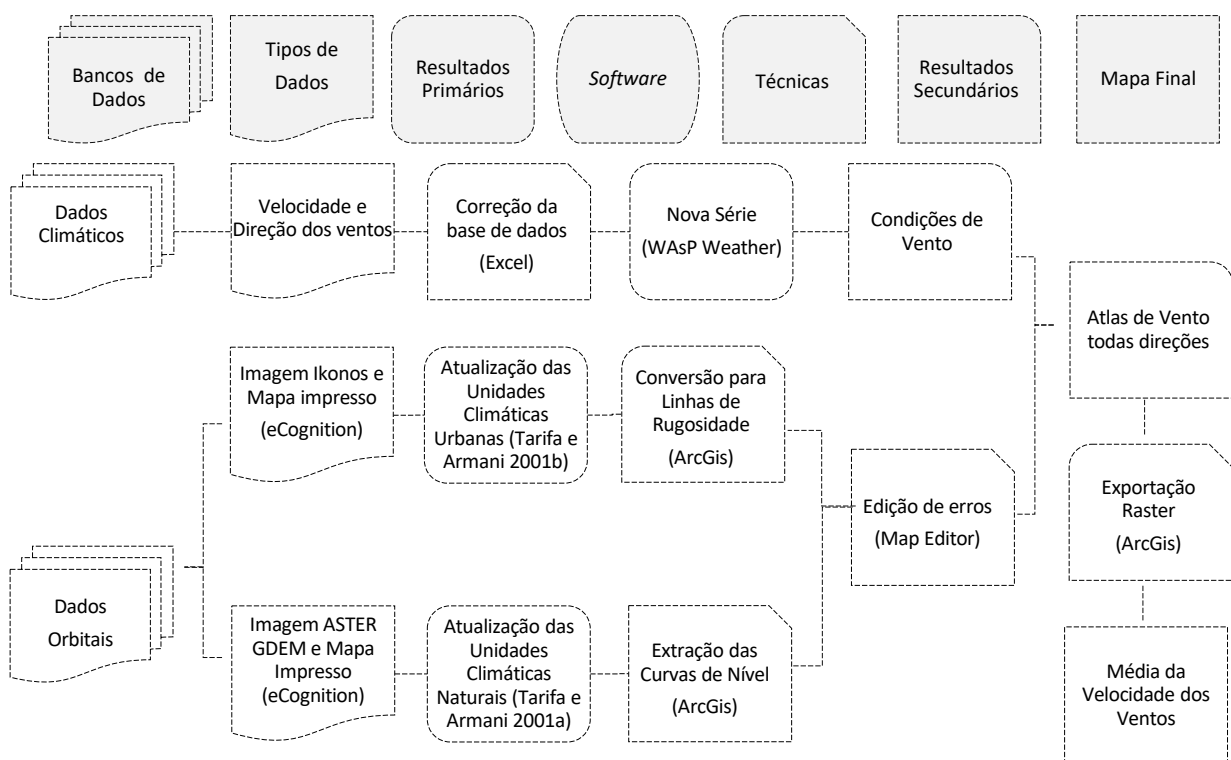
Nesta tese o intervalo de pesquisa definido compreende as imagens disponíveis de 1984 até período de 2017 (160 imagens ao total). Este período de análise tem como propósito agrupar as imagens em duas estações bem definidas: uma estação quente e chuvosa que compreende os meses de outubro a abril e outra mais seca e fria para os meses de maio a setembro, como ressaltou Tarifa e Armani (2001a). Para cada tipo de sensor, criou-se uma *shapefile* de pontos, considerando o centróide dos *pixels*. Esta etapa foi necessária para que os valores de  $T_{SUP}$  com mesmo identificador fossem a seguir analisados por décadas e estações de acordo com os objetivos delimitados. Procedeu-se ao cálculo da  $T_{SUP}$  considerando as imagens disponíveis nas últimas décadas e a produção de cartografias da  $T_{SUP}$  na MSP (Figura 43).



**Figura 43** - Processo de obtenção da Temperatura das Superfícies: I)  $T_{SUP}$  para sensores Landsat; II) classificação dos pixels; III) extração dos valores por pontos no centroide do pixel; e, IV)  $T_{SUP}$  na unidade de análise.

#### 4.5. Modelo da Ventilação Natural na Metr pole de S o Paulo

Esta etapa teve por objetivo avaliar a ventila o natural em mesoescala para identificar os poss veis pontos de acelera o e estagna o do fluxo ar, considerando a topografia e a rugosidade das superf cies urbanas com base no *software* WAsP (Figura 44). De acordo com Lopes (2003, p.109) o “WAsP”, foi criado pelo *Wind Energy Department - Ris  National Laboratory* da Dinamarca, o qual permite a modela o do vento (dire es e velocidades). Montavon (1998), refere que o WAsP   um *software* que utiliza modelos diagn sticos (do tipo *linearised models* conhecido como *BZ-Model*). Isso significa que o objetivo da utiliza o deste *software*   verificar a aplicabilidade do uso dos dados de vento de esta es meteorol gicas para resolver as equa es de quantidade de movimento, mas n o de conserva o de energia, n o sendo, portanto, um *software* aconselh vel para simular condi es em que o fluxo   conduzido por aspectos t rmicos.



**Figura 44 - Workflow** para an lise da ventila o natural em meio urbano.

Algumas limita es s o descritas na bibliografia quanto ao uso de modelos diagn sticos para simula o do vento, neste caso com rela o ao *software* WAsP s o apresentadas a seguir (Mortensen et al., 1993; Montavon, 1998; Frank et al., 2001; Lopes, 2003, p. 109; Prata Shimomura, 2006, p.91): I) deve-

se assumir a estabilidade neutra atmosférica<sup>21</sup> não considerando os movimentos verticais de origem térmica na camada limite da atmosfera; II) as informações de base da área de estudos devem ser suficientemente "suavizadas", para assegurar a não separação do fluxo de ar; III) o WASP é baseado numa solução que descreve a perturbação do fluxo através de função conhecida como "perfil logarítmico do vento", restringido a áreas com baixos declives (<17°); IV) a estação meteorológica de referência (neste caso Aeroporto de Congonhas) e o local onde se quer analisar o regime de vento devem estar em regiões com os mesmos "tipos de tempo"; e, V) a série de dados meteorológicos e o modelo topográfico deverão ser os mais fidedignos possíveis. Estas condições foram consideradas para a área da MSP, no entanto apenas nos limites da cidade, por falta de informação abrangente, sobretudo os municípios da RSMP mais afastados, os comentários serão evitados nas análises apresentadas adiante. Para este propósito definiu-se um recorte que considera 10km de borda da MSP.

### **Configuração dos dados de vento no WASP *Climate Analyst***

Para analisar a ventilação natural o *software* WASP, considera como *inputs*: I) os dados climáticos de medições da velocidade média e direção dos ventos; II) um modelo de topografia da região como um dos principais fatores de modificação do vento; e, III) uma carta de rugosidade em meio urbano com base na altura das edificações. A análise dos dados de velocidade e direção dos ventos foram realizadas no WASP *Climate Analyst* (Mortensen, 2013). Com esta informação, gerada a partir dos dados da série meteorológica de referência, o programa faz análise do regime de vento para qualquer local, desde que seja conhecida a topografia e as classes de rugosidades.

As etapas de análise dos dados de vento são descritas nos trabalhos de (Montavon, 1998; Lopes, 2003, p. 112; Prata Shimomura, 2006, p. 92) e apresentam três momentos principais: I) a partir de uma série histórica de dados de vento (direção e velocidade), o *software* WASP executa a correção destes dados em uma nova série histórica que descreve o vento, gerando um Atlas de Vento do Local no WASP *Climate Analyst*; II) como o *software* integra diversos modelos de cálculo e de extrapolações, verticais e horizontais, pode-se gerar o atlas de vento tanto com medidas feitas junto à superfície e a 10m, quanto com dados de vento geostrófico (estes medidos por exemplo com rádio-sonda); e, III) a geração de um atlas de vento compreende a aquisição de uma série de dados de vento, descrição do posicionamento da estação meteorológica (altura do anemômetro), o tipo de rugosidade da superfície ao redor da estação e da rugosidade dos locais para os quais serão gerados os atlas de vento.

---

<sup>21</sup> O WASP assume, portanto, condições de atmosfera neutra, um estado em que a atmosfera não se encontra estável nem instável. Ocorre com ventos moderados a fortes e quando a superfície aquece ou arrefece muito fracamente a camada limite.

De acordo com Mortensen (2013), a entrada de dados climatológicos dos ventos no WASP contém: a distribuição da direção do vento (rosa dos ventos) e as distribuições setoriais da velocidade média do vento (histogramas), a altura do sensor de velocidade do vento (anemômetro) acima do nível do solo em metros e as coordenadas geográficas do local do mastro (latitude<sup>22</sup> e longitude). O vento observado é geralmente analisado para 8 ou 16 setores. Para esta tese que os dados utilizados foram os da estação meteorológica do aeroporto de Congonhas em São Paulo formando com horários da velocidade e direção do vento no período de 2000/2010. Depois de se efetuarem alguns testes de homogeneidade, verificou-se não existirem rupturas na série, e, portanto, não foi necessário proceder-se a correções.

### **Criação das curvas de nível e modelo topográfico**

Para além de uma série alargada de dados de vento (no mínimo aconselhado de 10 anos de direções e velocidades), o programa utiliza outros dois tipos de *inputs*, como a superfície topográfica e as classes de rugosidades do terreno. Segundo Mortensen (2013), o mapa de elevação contém os contornos de altura do terreno que podem ser digitalizados diretamente a partir de cartas topográficas em papel ou ainda serem gerados a partir de dados de altura aleatória em *grade* usando *software* de contorno. O modelo de topografia em mesoescala nesta tese teve como base o uso das Unidades Climáticas “Naturais” estabelecidas por Tarifa e Armani (2001a) e atualizada a delimitação das curvas de nível com base no uso de imagem ASTER/GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer/Global Digital Elevation Model*) com uma resolução de 30m.

Os dados em formato *raster* não podem ser utilizados diretamente no WASP, portanto, é necessário fazer uma conversão para um mapa de contorno de altura (vetor). Neste estudo utilizou-se o ArcMAP/ArcGIS® para fazer mapas vetoriais em formato de linha como *input* para WASP (Figura 45 - I). A partir da atualização das Unidades Climáticas “Naturais” e das linhas de curvas de nível provenientes dos dados ASTER/GDEM foi realizada a importação para o programa MapEditor para verificar e editar sistematicamente possíveis erros que impossibilitam a importação para o WASP (*Nodes*, *Deadends* e *Cross points*) (Figura 45 - II). Esta mesma etapa é também realizada para a rugosidade das superfícies.

### **A rugosidade como um dos principais fatores que modificam os campos de vento**

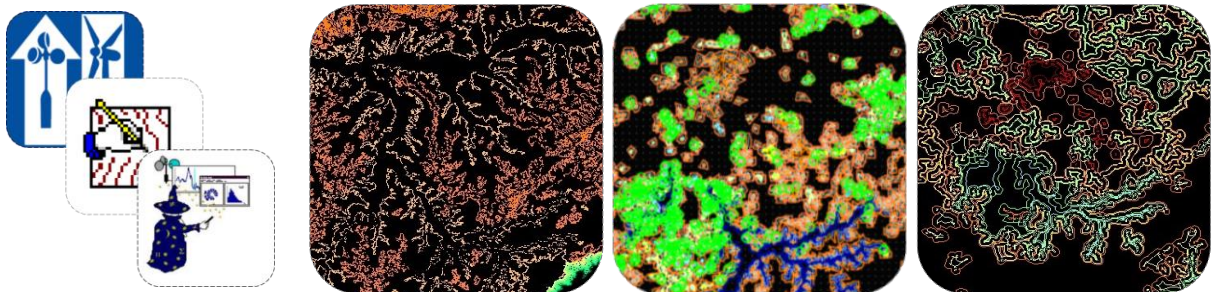
Para geração do atlas de ventilação natural no WASP são necessárias informações da rugosidade das superfícies. Segundo Lopes (2003, p. 118), para escalas de análise regional/local, a principal informação da rugosidade é proveniente da altura dos prédios, sendo a largura das ruas apenas tomada em conta em

---

<sup>22</sup> A latitude é usada pelo WASP para calcular o parâmetro Coriolis (Mortensen, 2013).

casos pontuais. À estas escalas esta medida é quase impossível de ser calculada com precisão devido ao grande conjunto morfológico presente no SEU, por isso, a generalização que se faz, de modo a suavizar a entrada dos dados de rugosidade no *software*, principalmente na área envolvente da região em análise (para uma porção da RMSP), não acarreta grandes desvantagens à análise regional.

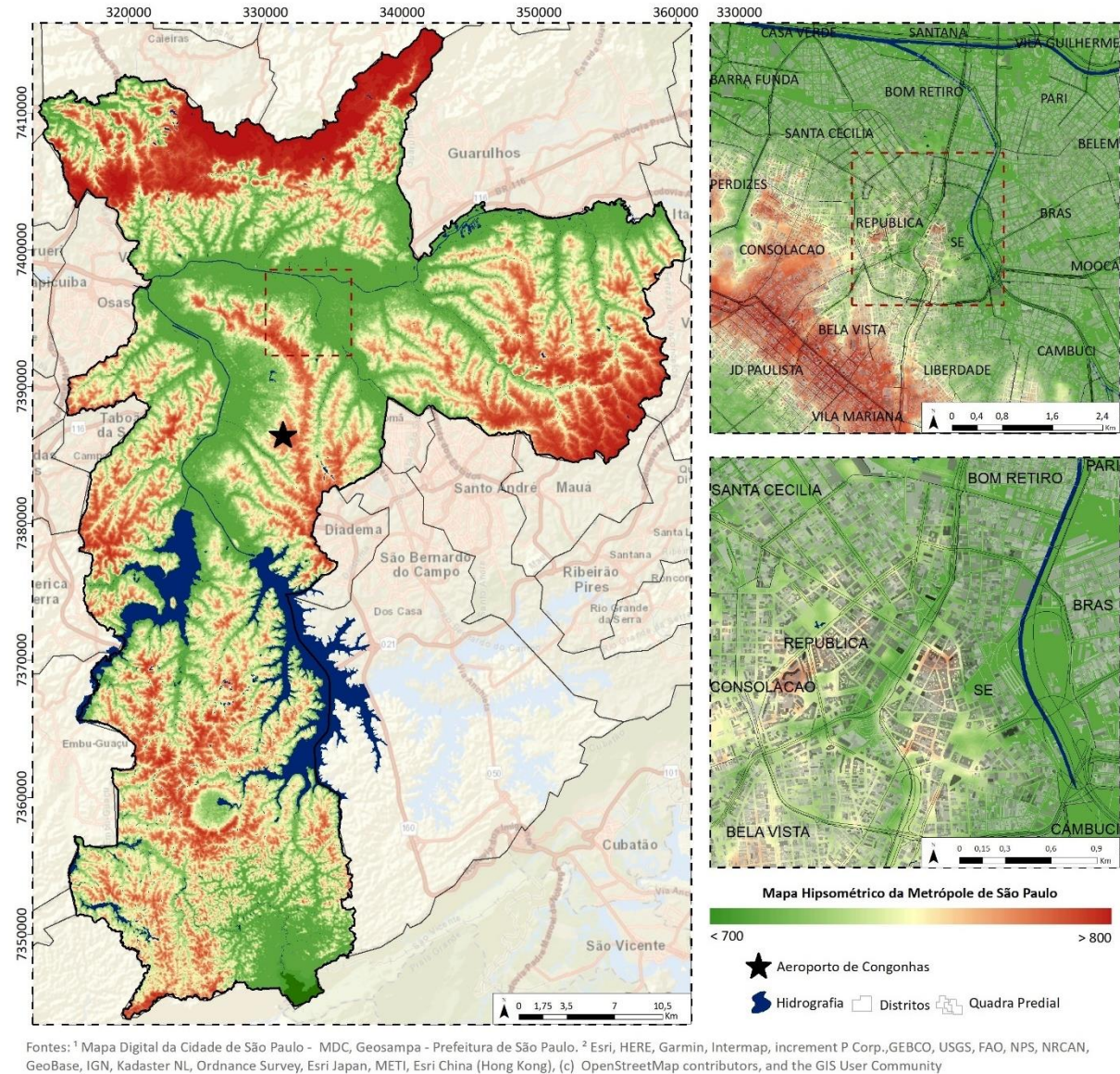
Para este estudo foi realizado uma atualização das Unidades Climáticas Urbanas (Tarifa e Armani, 2001b) de acordo com a definição de tipologias do uso e cobertura da terra da MSP e sua área envolvente por meio do uso de imagens IKONOS. Em seguida atribui-se para cada classe de uso e ocupação da terra os valores de rugosidade como foram descritos por Oke et al., (2017, p. 103). O mapa de rugosidade das superfícies em formato *raster* foi convertido para polígonos de rugosidade em formato *shapefile* com base no agrupamento dos pixels, em seguida procedeu-se a transformação dos polígonos em linhas de rugosidade. Para o *shapefile* das linhas de rugosidade foi criado na tabela de atributos dois campos contendo os valores do limite interno e externo das linhas. Em seguida, procedeu-se a exportação para o MapEditor para verificar e editar sistematicamente os possíveis erros já mencionados (*Nodes*, *Deadends* e *Cross points*) (Figura 45 - III). No *MapEditor* foi criado um único arquivo contendo as informações das linhas rugosidades e da topografia da área da cidade de São Paulo, para então serem gravados juntos numa extensão que permite a leitura no WASP. Os *inputs* em formato de linhas topográficas e de rugosidade foram importados para a árvore de processos do WASP como mapas vetoriais, que podem conter linhas de contorno de altura, linhas de mudança de rugosidade e linhas sem atributos (borda do local da área de estudos) (Figura 45 - IV).



**Figura 45** - Geração dos inputs para o WASP: I) Interface do WASP, Climate Analyst e MapEditor; II) Curvas de nível; III) erros verificados no MapEditor; e IV) Base de dados corrigida para análise da direção e velocidade dos ventos.

Após importar todos os arquivos para a árvore de procedimentos no WASP são introduzidas as coordenadas da estação meteorológica (em sistema de coordenadas métricas). O WASP permite criar uma grelha de recurso para cada *Wind Atlas*, que consiste num conjunto de pontos de uma célula, que fazem uma ponderação a um ponto definido, neste caso o ponto com as coordenadas de cada estação em questão. A partir da série do Aeroporto de Congonhas (Figura 46) no centro da RMSP e tendo em conta a rugosidade e o relevo, foram produzidas cartografias da ventilação natural numa grelha de 1km por 1km à uma altura

de 10m em 8 direções principais, incluindo a médias de todas as direções. Os resultados foram então exportados em formato *raster* para o ArcGis e em seguida a exemplo da  $T_{SUP}$  os dados da ventilação natural foram convertidos e incorporados a grelha da unidade de análise.



**Figura 46 – Hipsometria e localização da estação do Aeroporto de Congonhas em São Paulo.**

#### 4.6. As propriedades morfoclimáticas da forma urbana

Esta etapa compreende a estruturação do modelo de métodos para análise morfoclimática do SEU em São Paulo. Após uma revisão minuciosa de um conjunto inicial de controles da forma urbana que atuam no incremento e espacialização da ICU (estruturas, tecidos e coberturas) procurou-se compreender como a forma urbana interage com o vento e o acúmulo de calor nas superfícies, para então definir um conjunto de doze propriedades morfoclimáticas (complexidade, compacidade,

direcionalidade, sinuosidade, rugosidade, porosidade, oclusividade, verticalidade, impermeabilidade, intensidade, proximidade e continuidade), agrupadas em seis tipos de critérios morfoclimáticos (geometria, espacialidade, textura, aerodinâmica, ocupação e organização).

Para avaliar a relação entre as propriedades da morfologia urbana com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural foram utilizados indicadores morfoclimáticos seguindo as definições presentes na bibliografia que melhor se adequam aos objetivos desta tese. A análise morfoclimática envolve o uso de métricas do SEU, as quais foram obtidas com base nos dados vetoriais urbanos do Mapa Digital da Cidade de São Paulo (MDC) fornecido pela Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano – SMDU, em formato *shapefile* contendo informações detalhadas do:

- SEC - Sistema de Espaços Construídos, com o desenho dos polígonos dos edifícios e as informações de base relacionadas à altura e área (Figura 47 – I e II);
- SELC – Sistema de Espaços Livres de Construção, com a delimitação dos polígonos de áreas não edificadas, o subsistema de lotes, quadra predial e quadra viária e informações do uso predominante (Figura 47 – III);
- SEIU – Sistema de Espaços Integração Urbana, com a descrição dos tipos de logradouros representados em formato de linhas (Figura 47 – IV).

Por meio do *software* ArcMAP/ArcGIS®, verificou-se um total de 2.817.744 polígonos que compreendem o SEC da cidade de São Paulo. Num primeiro momento essa base de dados foi filtrada e corrigida a fim de reduzir os possíveis erros sobre de criação de polígonos anômalos e a distorção das informações relacionadas com a altura e área dos edifícios (eliminando por exemplo polígonos de edifícios com alturas inferiores a 2m de altura e área mínima de 10m), com isso o número de polígonos descritos como edifícios foi reduzido para 2.774.083.

Em seguida verificou-se as métricas que viabilizam analisar as propriedades morfoclimáticas por meio dos indicadores, neste sentido, na própria tabela de atributos do SEC foram calculados automaticamente o volume dos edifícios e perímetro dos polígonos. A partir deste conjunto inicial de métricas foram criadas outras informações de base para o cálculo dos indicadores.

Para análise das propriedades morfoclimáticas de Impermeabilidade e Continuidade, os indicadores selecionados não necessitam que as métricas sejam tratadas a nível do edifício individualmente, portanto, os polígonos com a mesma altura e paredes geminadas foram dissolvidos através da ferramenta *dissolve* presente no ArcMAP/ArcGIS®, para reduzir o volume de informações presentes na base de dados e construir blocos de construção contínuos (Figura 47 – V).

Para algumas propriedades morfoclimáticas (como por exemplo a Complexidade e Sinuosidade) os blocos de construção dissolvidos anteriormente, foram inseridos em formas regulares (esféricas ou

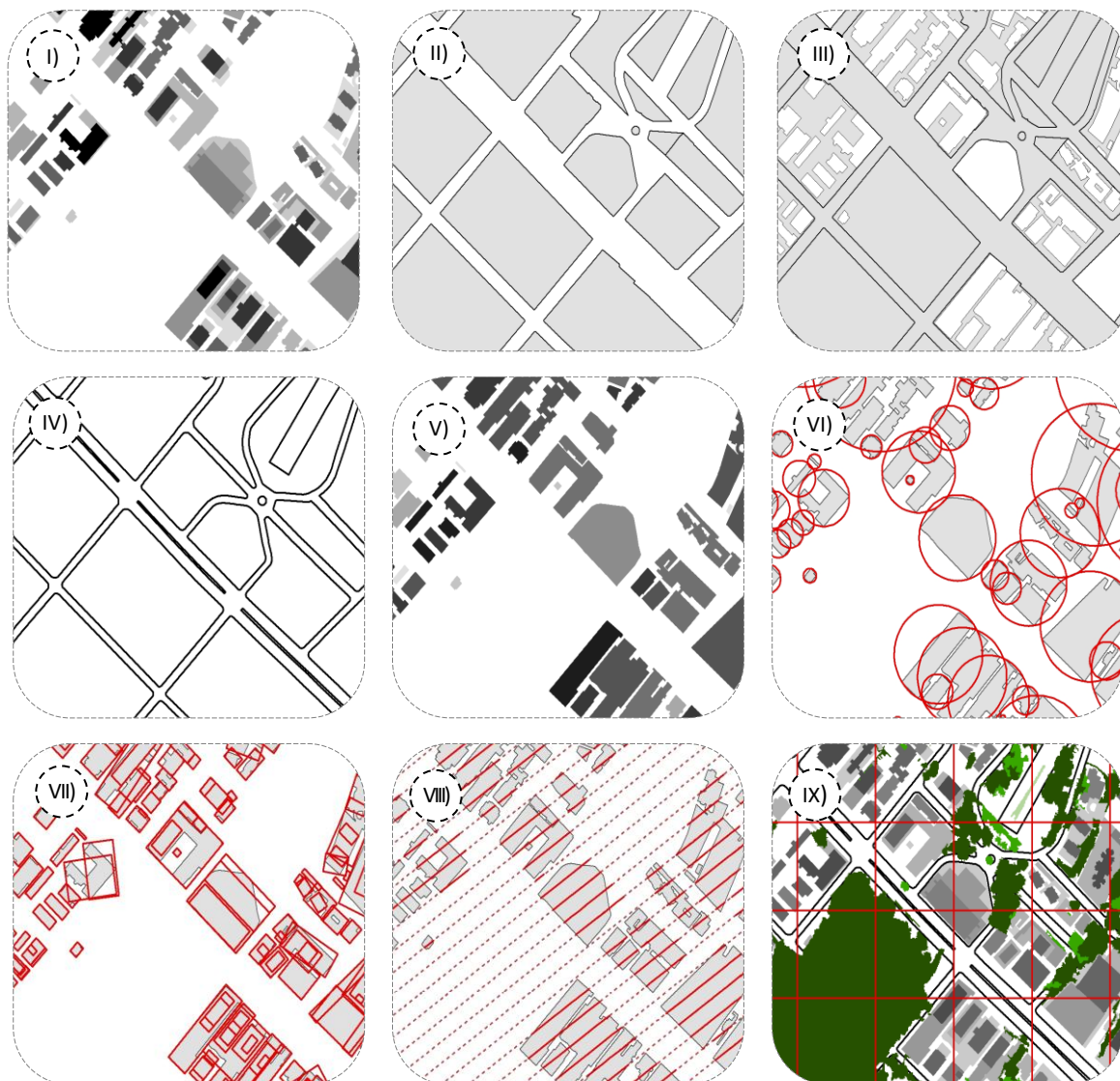
retangulares) através da ferramenta *create regular block*, para analisar o nível de abrangência e linearidade de cada polígono e comparar as métricas como o perímetro e área do edificado em relação às métricas de uma forma regular (Figura 47 – VI e VII).

Outra informação de base criada corresponde ao conjunto de linhas equidistantes e paralelas a cada 20 metros para representar as fachadas dos edifícios expostos a direção do vento dominante na MSP, além avaliar o comprimento de sinuosidade no interior dos *canyon* urbanos. Através da ferramenta *create lines* foram geradas para cada direção cerca de 15.000 linhas que foram recortadas (*clip*) de acordo com a área da MSP. A mesma métrica foi utilizada para verificar o maior segmento contínuo entre dois pontos para definir possíveis corredores de ventilação natural (Figura 47 – VIII).

Para que possam ser consideradas as interações entre as superfícies e a atmosfera, procedeu-se à criação da unidade de análise num sistema de grelha, composta por células. Esta operação foi realizada no ArcMAP/ArcGIS®, por meio da ferramenta *create fishnet*. O uso de grelhas como unidades de análise está presente em alguns estudos de morfologia urbana e clima urbano (Gàl e Unger, 2001; Correia e Lopes, 2013; Martins et al., 2016), como uma solução para tratar a informação espacial de diferentes sistemas de espaços urbanos. Para este estudo foi utilizada uma grelha composta por células similares as dimensões de uma quadra urbana comum, com medidas de 100h x 100w x 100z, (para a análise climática é possível definir o limite da CLI com base na altura máxima dos SEC, neste caso para a MSP o valor médio máximo foi de 100m). As células foram então intersectadas pelos dados vetoriais do SEC da base do MDC, o que resultou em 154.995 células de avaliação (Figura 47 – IX).



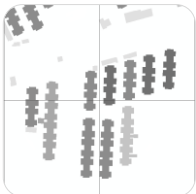
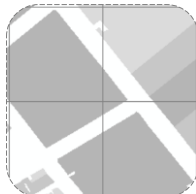


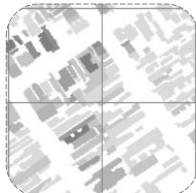

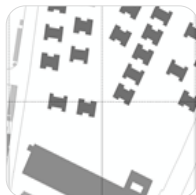
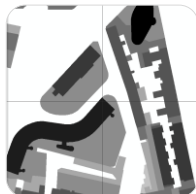
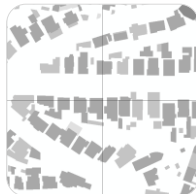


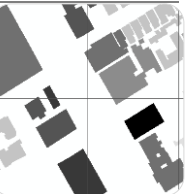
A grelha composta por células permite a inserção de informações proveniente de diferentes formas de representação (ponto, polígono, linha) e tipos de informação (ambiental, social, econômica) em um único ambiente com representação em dimensão 3D. A criação das células também é necessária para que se possa analisar o volume de ar livre e o volume dos edifícios no interior de uma unidade de análise, relevando o nível de espraiamento ou agrupamento dos elementos, o espaço livre para circulação no tecido urbano e complexidade ou uniformidade dos blocos.

Estabelecida as especificidades das métricas necessárias para análise morfoclimática, procedeu-se a seleção dos indicadores que melhor expressão a relação da forma urbana com a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural. A parametrização a partir de um sistema de indicadores simplificados de desempenho climático, oferece de forma simples e efetiva correlações importantes para se estabelecer relações entre a forma e o clima (Martins, 2014 p. 230). O uso de técnicas relativamente simples em ambiente SIG possibilita analisar diferentes tipos de dados oriundos de modelos climáticos urbanos e de morfologia urbana, para então criar um conjunto de ferramentas e cartografias úteis ao planejamento urbano. Com base nas propriedades morfoclimáticas das estruturas, tecidos e coberturas urbanas, procurou-se adaptar os indicadores descritos na bibliografia ao contexto do uso de uma unidade de análise composta por uma grelha de células, como é descrito na Tabela 7.



**Figura 47** – Métricas da análise morfoclimática: I) altura dos edifícios no SEC – Subsistema de Espaços Construídos; II) áreas dos lotes de implantação; III) SELC – Subsistema de Espaços Livres de Construção; IV) SEIU – Subsistema de Espaços de Integração Urbana (logradouros e áreas não edificadas); V) espaços construídos dissolvidos em blocos de construção contínuos; VI) blocos contínuos regularizados em formas esféricas; VII) blocos contínuos regularizados em forma retangular; VIII) linhas paralelas e equidistantes a cada 20 metros para direções cardeais; IX) grelha como unidades de análise - composta células com as dimensões de 100 de altura, largura e profundidade.

**Tabela 7 – Equações dos Indicadores de desempenho morfoclimático**

Propriedades	Métricas	Indicadores	Baixa	Elevada
<p><b>1. Complexidade – Cx</b>  Relação do perímetro dos edifícios em uma circunferência, com o número de pavimentos.</p>	$Abrc = 2\pi \left( \frac{Abc}{\sqrt{\pi}} \right)$	$Cx = \frac{Nfb \times \left( \frac{Pbc}{2\sqrt{\pi}} \right)}{Nfb \times Abrc}$		
<p><b>2. Compacidade – Cp</b>  Relação entre o perímetro dos edifícios em razão da forma regularizada em altura.</p>	$Nfb = Hbe/3$	$Cp = Nfb \left( \frac{\sum Pbc - \sum Pbrc}{Ac - \sum Abc} \right)$		
<p><b>3. Sinuosidade - Sn</b>  Nível de curvatura de uma forma em relação ao seu percurso retilíneo.</p>	$Lfbc = Lp \cap Nbc$	$Sn = \frac{\sum MxLp - \sum Lfbc}{Nb}$		
<p><b>4. Direcionalidade – Dc</b>  Orientação espacial do edificado em relação ao fluxo de ar.</p>	$Lfbc = Lp \cap Nbc$	$Dc = \sum Lfbc$		
<p><b>5. Rugosidade – Rg ou Z<sub>0</sub> (Lettau, 1969)</b>  Altura de deslocamento do perfil do vento, dado pelo comprimento das fachadas expostas ao vento dominante.</p>	$MxLfbc = \sum Lfbc$  $Vfbc = Hfbc \times Afbc$	$Z_0 = (0.5 \times hbc) \times \frac{Vfbc}{Ac}$		
<p><b>6. Porosidade - Po</b>  Relação dos volumes dos edifícios pelo volume da célula.</p>	$Vc = Hc \times Ac$ $Vbc = Hbc \times Abc$	$Po = \frac{Vc + Vbc}{Vc - Vbc}$		
<p><b>7. Verticalidade - Vt</b>  Relação entre a altura do edifício pela sua área na célula.</p>		$Vt = \frac{(\sum Hb)^2}{\sum Ab}$		

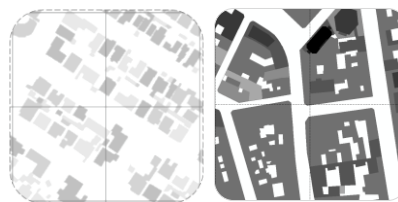
### 8. Oclusividade – Oc ou H/W

Relação da altura média ponderada pela largura dos espaços que os separam.

$$Wel = \frac{Pel - \left[ 2x \left( \frac{Ael}{Pel \times 0.5} \right) \right]}{2}$$

$$Welc = \left( \frac{Ael}{Wel} \right)$$

$$F \frac{H}{W} = \frac{Hbc}{Welc}$$



### 9. Impermeabilidade – Ip ou ISF

Corresponde à soma das áreas construídas no solo, dividido pela área total da célula.

$$ISF = \frac{\sum Ab}{Ac}$$



### 10. Intensidade de Ocupação - Ic

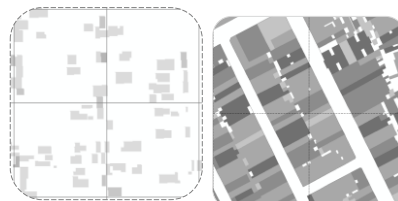
Soma das áreas dos edifícios pelo número de pisos em razão com sua área de implantação.

$$Nfb = Hbc/3$$

$$ATcbc$$

$$= Abc \times Nfb$$

$$Ic = \frac{ATcbc}{Ac}$$

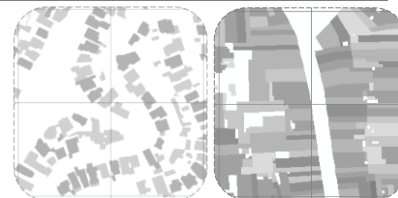


### 11. Continuidade - Cn

Relação entre o número de paredes geminadas em um único bloco sobre a área total envoltória.

$$Abc = \sum Ab$$

$$Cn = \frac{\sum Abc}{Nb}$$



### 12. Proximidade - Px

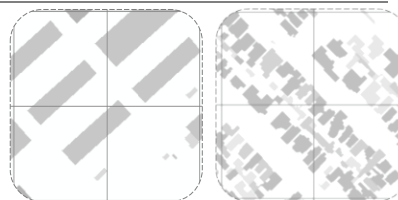
Relação da distância entre uma ou mais coberturas urbanas.

$$MxLel$$

$$= MxLfc$$

$$- \sum Lfbc$$

$$Px = \frac{\sum MxLel}{Welc}$$



**Métricas dos espaços construídos individuais:** *Hb* - Altura do edifício; *Ab* – Área do edifício; *Vb* - Volume do edifício; *Pb* - Perímetro do edifício; *Nfb* – Número de pavimentos; *Nb* – Número de edifícios.

**Métricas dos blocos de espaços construídos:** *Hbc* - Altura média dos blocos; *Abc* - Área construída dos blocos; *Pbc* – Perímetro dos blocos; *Vbc* – Volume dos blocos; *Abc* - Área de implementação dos blocos; *ATcbc* - Área total construída dos blocos na célula; *Nfbc* – Número de pavimentos dos blocos; *Nbc* – Número de blocos na célula.

**Métricas dos blocos de espaços construídos regularizados:** *Abrc* – Área dos blocos regularizados; *Pbrc* – Perímetro dos blocos regularizados.

**Métricas das fachadas dos blocos de espaços construídos:** *Lfbc* – Comprimento das fachadas dos blocos; *Hfbc* - Altura média das fachadas dos blocos; *Afbc* – Área média das fachadas dos blocos; *Vfbc* – Volume das fachadas dos blocos; *MxLfbc* – Maior comprimento de fachada dos blocos exposto ao vento dominante na célula.

**Métricas das linhas paralelas equidistantes:** *Lp* – Comprimento das linhas paralelas equidistantes; *MxLp* – Maior comprimento das linhas paralelas equidistantes na célula;

**Métricas da unidade de análise - células:** *Hc* – Altura da célula; *Ac* - Área da célula; *Vc* – volume da célula; *Pc* – Perímetro da célula.

**Métricas calculadas para o sistema de espaços abertos:** *Ael* - Área dos espaços livres; *Pel* - Perímetro dos espaços livres; *Wel* – Largura dos espaços livres; *Welc* - Largura média dos espaços livres nas células; *MxLel* – Maior comprimento de espaços livres.

#### 4.7. Modelo de Susceptibilidade ao Estresse Térmico

Os resultados da análise da ventilação natural e da  $T_{SUP}$  foram utilizados em um modelo de Susceptibilidade ao Estresse Térmico para avaliar a propensão do território ao potencial aumento da intensidade da ICU e assegurar a utilidade dos mapas produzidos para fins de ordenamento do território. Como susceptibilidade compreende-se a propensão para uma área ser afetada por um determinado perigo em tempo indeterminado, sendo avaliada através dos fatores de predisposição para a ocorrência dos processos ou ações, não contemplando o seu período de retorno ou probabilidade de ocorrência (Julião et al., 2009).

O modelo de susceptibilidade ao estresse térmico tem como principal objetivo produzir uma informação única, sendo, portanto, utilizada a ferramenta *Reclassify* em *Spatial Analyst Tools* do software ArcMAP/ArcGIS® para converter os valores reais de  $T_{SUP}$  e ventilação natural em intervalos de 1 – 10 como mostra a Tabela 8. Em seguida os mapas reclassificados foram inseridos na ferramenta *Raster Calculator* para inserção da Equação 7 e obtenção da cartografia do Índice de Susceptibilidade ao Estresse Térmico (ISET). Os resultados obtidos foram posteriormente agrupados em 5 classes, com base nas quebras naturais da distribuição, e foi atribuída coloração gradativa de acordo com os níveis de susceptibilidade, com valores limites variam entre 0 (baixa) e 100 (alta), como mostra a Figura 47.

**Tabela 8** – Pesos utilizados para ponderação na análise da susceptibilidade a ICU

Classes (cl)	Ventilação Natural	$T_{SUP}$	Pesos (p)
1	>5.0	<21	1
2	4.5	22	2
3	4.0	23	3
4	3.5	24	4
5	3.0	25	5
6	2.5	26	6
7	2.0	27	7
8	1.5	28	8
9	1.0	29	9
10	<0.5	>30	10

$$ISET = \frac{\sum T_{sup} (cl*p) + \sum Ventilação\ natural (cl*p)}{2} \quad (7)$$

#### 4.8. Modelo de Densidade Urbana Morfoclimática

A exemplo do modelo de susceptibilidade ao estresse térmico, os valores reais calculados para todas propriedades morfoclimáticas foram reclassificados em 10 classes, segundo a frequência dos histogramas pelo método de quebras naturais no ArcMAP/ArcGIS®. Os resultados das propriedades das estruturas, tecidos e coberturas urbanas apresentaram variações entre os intervalos de 0.1 (baixo) classe 1 a 1.0 (muito alto) classe 10, como mostra a Tabela 9. Por meio da multiplicação das classes (1 -10) pelos

pesos individuais (1 - 10), dividido pelo número de propriedades em análise (12), obtém-se o Índice de Densidade Urbana Morfoclimática (Equação 8).

**Tabela 9** - Indicadores das propriedades morfoclimáticas das classes em análise<sup>23</sup>

Classe/ Peso (p)	Intervalo	Cp	Cx	Sn	Dr	Rg	Po	Oc	Vt	Im	Io	Cn	Px
1	0.1	0.89	0.10	0.54	0.10	0.3	0.39	0.33	0.02	0.6	0.12	0.16	0.64
2	0.2	1.42	0.20	0.97	0.24	0.4	0.63	0.50	0.07	0.14	0.21	0.28	0.96
3	0.3	1.93	0.34	1.16	0.34	0.5	0.83	0.63	0.10	0.21	0.39	0.39	1.08
4	0.4	2.35	0.40	1.36	0.49	0.6	1.03	0.77	0.14	0.32	0.41	0.49	1.14
5	0.5	2.69	0.56	1.51	0.59	0.75	1.07	0.97	0.21	0.44	0.55	0.58	1.19
6	0.6	3.01	0.68	1.71	0.69	1.0	1.11	1.25	0.28	0.52	0.65	0.66	1.25
7	0.7	3.33	0.77	1.94	0.79	1.25	1.16	1.59	0.38	0.67	0.72	0.75	1.32
8	0.8	3.70	0.93	2.25	0.90	1.5	1.22	2.01	0.56	0.75	0.85	0.84	1.40
9	0.9	4.25	1.58	3.70	1.49	1.75	1.49	2.53	0.84	0.90	0.92	0.97	1.51
10	1.0	>4.25	>1.58	>3.70	>1.49	>2.0	>1.49	>2.53	>0.84	>0.90	>0.92	>0.97	>1.51

$$IDUM = \frac{\sum(Cp*p)+(Cx*p)+(Sn*p)+(Dr*p)+(Rg*p)+(Vt*p)+(Po*p)+(Oc*p)+(Im*p)+(Io*p)+(Cn*p)+(Px*p)}{12} \quad (8)$$

Após a análise do Índice de Densidade Urbana Morfoclimática os resultados foram agrupados em 5 classes e atribuída coloração gradativa para fins de produção de cartografia de síntese ao ordenamento do território. Com o objetivo de identificar a intensidade e o tipo de densidade urbana (horizontal, vertical e a combinação dos dois tipos) utilizou-se a Análise de Agrupamento (*cluster analysis*) no *software* SPSS, para delimitação dos espaços urbanos que tendem a concentração de calor e redução do potencial de escoamento do fluxo de ar com base na morfologia urbana.

A Análise de Agrupamento (*cluster analysis*) é uma técnica multivariada de classificação que objetiva agrupar dados de acordo com as características entre eles, para então classificar objetos em um grupo utilizando um critério fixado. Neste estudo utilizou-se o método *Kmeans clustering*, que utiliza uma determinada quantidade de centroides (pontos centrais dos grupos estabelecidos pelo usuário) que serão criados para ajudar a encontrar a similaridade dos dados (Tabela 10).

Por meio da distância média de todos os pontos estabeleceu-se um mínimo de 20 interações entre os valores dos indicadores morfoclimáticos e os centroides (K) para definição de 5 classes densidade urbana para fins climáticos de acordo com o modelo de Correia et al., (2014). Após a identificação das classes buscou-se compreender os tipos de densidade urbana em 5 classes principais: Baixa, média, alta (vertical), alta (horizontal), muito alta (combinação de densidade horizontal e vertical).

<sup>23</sup> Para o índice de z0 os valores reais foram estimados com base na Tabela 1, e em seguida agrupados nas classes de acordo com a literatura (Grimmond e Oke, 1995). Os índices medidos foram: Cp - Compacidade; Cx - Complexidade; Sn – Sinuosidade; Dr – Direcionalidade; Rg – Rugosidade; Po – Porosidade; Oc – Oclusividade; Vt – Verticalidade; Im – Impermeabilidade; Io – Intensidade de Ocupação; Cn – Conectividade e Px – Proximidade.

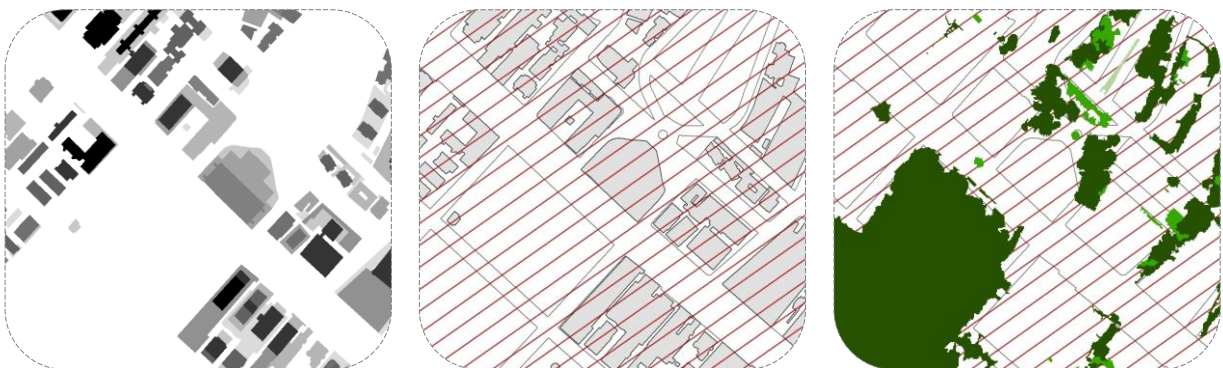
**Tabela 10** – Limiares das propriedades morfoclimáticas para a Análise de agrupamento

Classe/Indicador	Cp	Cx	Sn	Dr	Rg	Po	Oc	Vt	Im	Io	Cn	Px
Baixa	0.72	0.18	0.69	0.20	0.35	0.33	0.60	0.11	0.20	0.21	0.18	0.23
Média	1.37	0.40	1.23	0.47	0.70	0.73	0.95	0.41	0.43	0.41	0.49	0.61
Alta (vertical)	1.91	0.84	3.11	1.20	2.0	1.26	2.15	0.70	0.62	0.55	0.61	0.93
Alta (horizontal)	3.66	1.15	2.21	0.88	1.0	1.01	1.51	0.58	0.75	0.85	0.84	1.40
Muito Alta	>4.25	>1.58	>3.11	>1.20	>2.0	>1.26	>2.15	>0.70	>0.75	>0.85	>0.84	>1.40

#### 4.9. Modelo de Corredores de Ventilação Urbana

Esta etapa tem como objetivo a elaboração de uma cartografia de síntese e orientação para manutenção dos atuais corredores de ventilação urbana, com base na relação entre as propriedades morfoclimáticas e métricas morfológicas seguindo os principais critérios descritos nos trabalhos sobre esta temática (Matzarakis e Mayer, 1992; Ng et al., 2011; Correia et al., 2013; Santos et al., 2017):

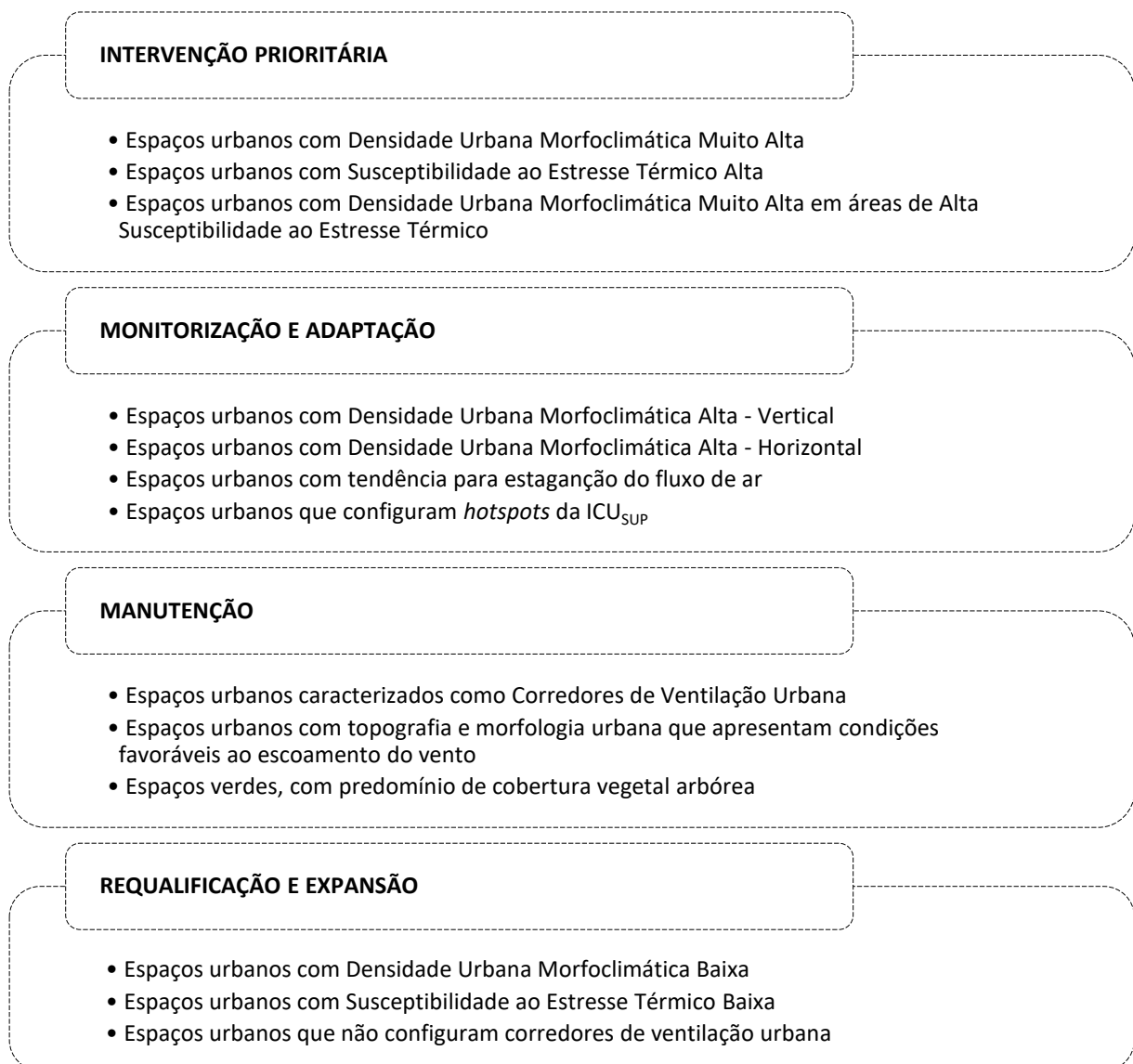
- Subsistema de Espaços Construídos: espaços que apresentem altura inferior a 10m (baixa verticalidade), comprimento de rugosidade seja  $Z_0$  inferior a 0,5m, e a porosidade no tecido urbano seja de 90% em relação à altura da Camada Limite Inferior (CLI) (Figura 48 - I);
- Subsistema de Espaços de Integração Urbana: espaços que apresentem comprimento suficientemente grande numa direção cardinal de pelo menos 1km (orientação e sinuosidade nos *canyons* urbanos) (Figura 48 - II); a largura no corredor de ventilação seja suficientemente grande em relação à altura dos obstáculos ( $W > 50m$ );
- Subsistema Espaços Livres de Construção: espaços com comprimento retilíneo de 1km em que a presença da vegetação não seja o elemento predominante a atuar como barreira (Figura 48 - III).



**Figura 48** - Critérios para delimitação dos corredores de ventilação: I) perfil aerodinâmico dos espaços construídos; II) comprimento dos espaços livres de construção nas direções cardiais; III) vegetação em meio urbano como obstáculo para progressão do ar.

#### 4.10. Cartografia de Síntese e Orientação ao Ordenamento do Território

A última cartografia visa organizar toda a informação previamente produzida nos modelos de Susceptibilidade ao Estresse Térmico, Densidade Urbana Morfoclimática e Corredores de Ventilação Urbana, em uma cartografia de síntese ao ordenamento do território em São Paulo. Por meio da sobreposição simples dos *layers* previamente produzidos procurou-se delimitar: I) espaços urbanos em que ocorre a aceleração do fluxo de ar; II) espaços que configuram corredores de ventilação urbana devido a morfologia do SEU; III) corredores de ventilação urbana em áreas de aceleração do fluxo de ar; IV) as áreas susceptíveis ao estresse térmico que apresentam as maiores  $T_{SUP}$  e baixa capacidade de ventilação natural; V) áreas com alta densidade morfoclimática; e, VI) áreas de alta densidade morfoclimática em regiões susceptíveis ao estresse térmico (Figura 49).



**Figura 49** – Modelo para cartografia de síntese final ao ordenamento do território.

## CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise da temperatura das superfícies ( $T_{SUP}$ )

As imagens Landsat 5 e 8 que compõem o território da Metrópole de São Paulo (MSP), foram utilizadas para análise das temperaturas de superfícies ( $T_{SUP}$ ) por meio do *Temperature Estimation Plugin* (LSTEP) disponível no *software* Qgis. Após a obtenção dos valores de temperatura de brilho ( $T_B$ ) e emissividade, a  $T_{SUP}$  foi calculada com base na função de Planck (Ndossi e Avdan, 2016). As imagens processadas foram agrupadas por períodos (quente e úmido e frio e seco) para em seguida serem discutidas as médias globais. Para fins de visualização dos resultados, as cartografias das  $T_{SUP}$  foram espacializadas em três níveis de escala: I) área urbanizada; II) núcleo central e áreas envolventes; e, III) o antigo centro e os distritos da República e Sé. Os resultados para análise do período quente e úmido, que compreende os meses de outubro a março (Tarifa e Armani, 2001a), indicam a  $T_{SUP}$  mínima média de 23.2°C, máxima média de 37.6°C e global média de 31.5°C (Figura 50).

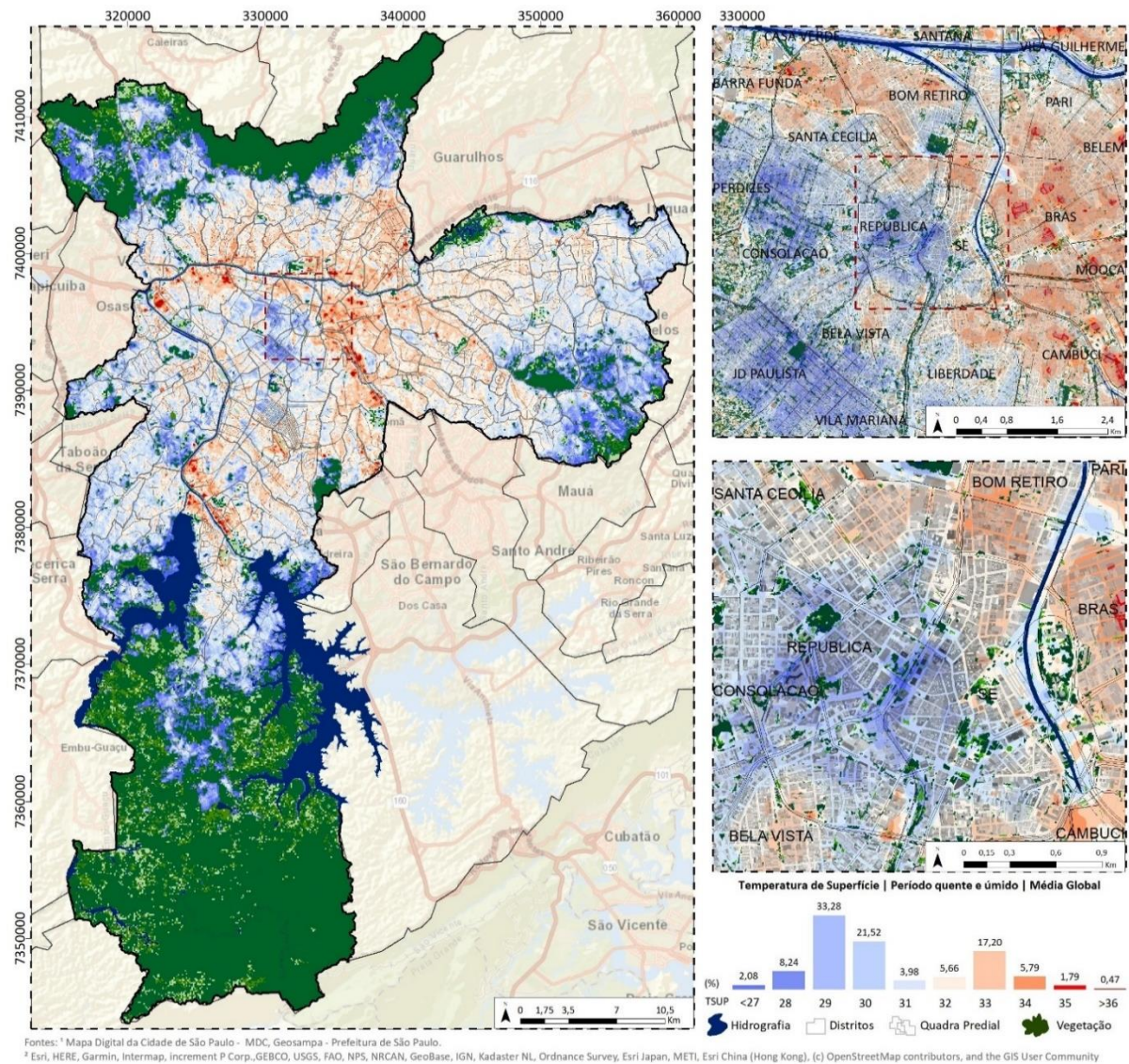
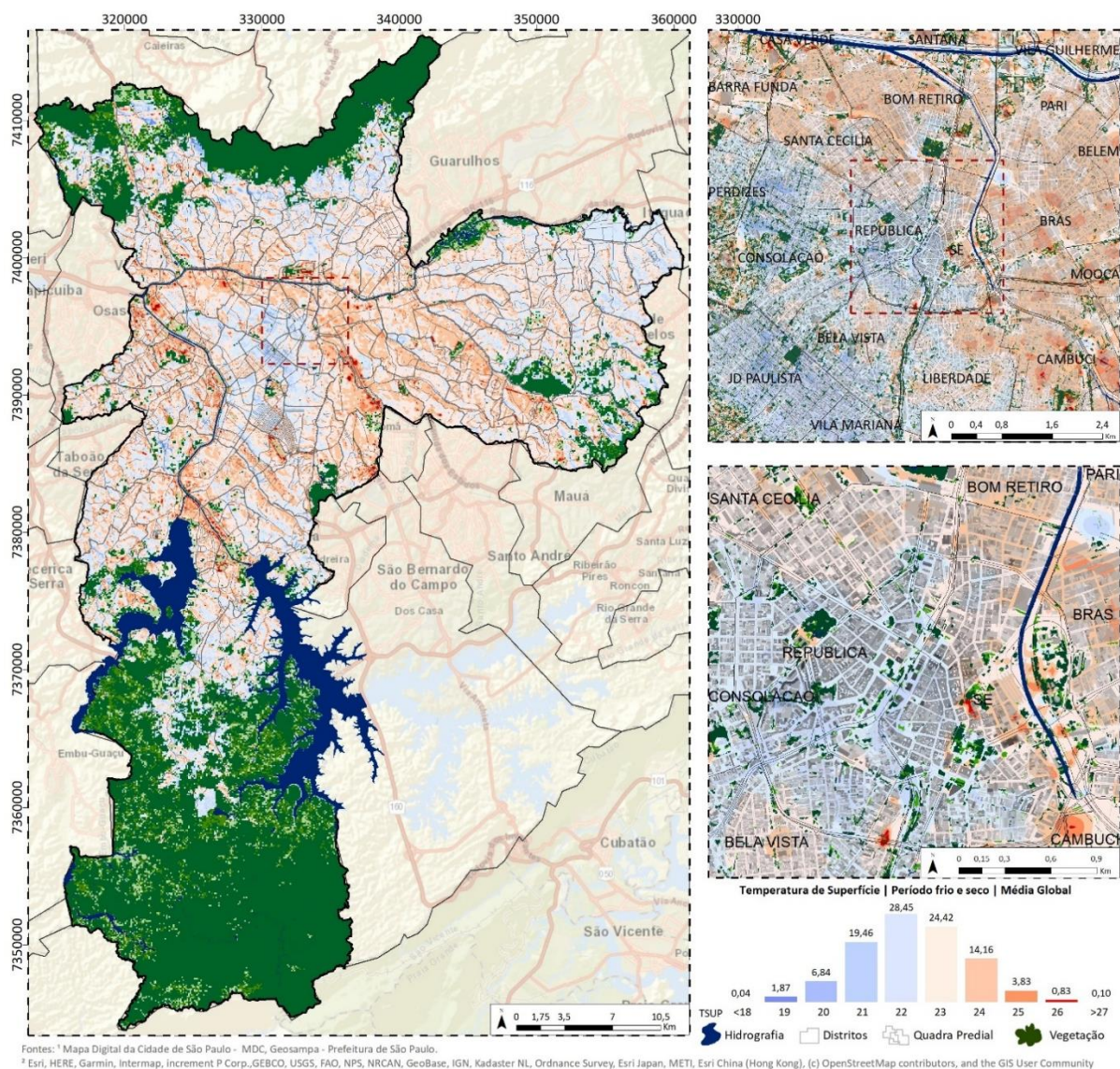


Figura 50 -  $T_{SUP}$  em São Paulo para o período quente e úmido entre 1984 e 2017.

Os resultados para o período quente e úmido foram agrupados em classes a cada 1°C. A maior concentração das  $T_{SUP}$  foi na ordem de 29°C (33,2%), 30°C (21,5%) e 33°C (17,2%), valores que, quando somados perfazem mais da metade dos resultados. Os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  (acima de 35°C) correspondem à 2,26% e as temperaturas inferiores à 28°C somadas perfazem 10,32% do SEU de São Paulo.

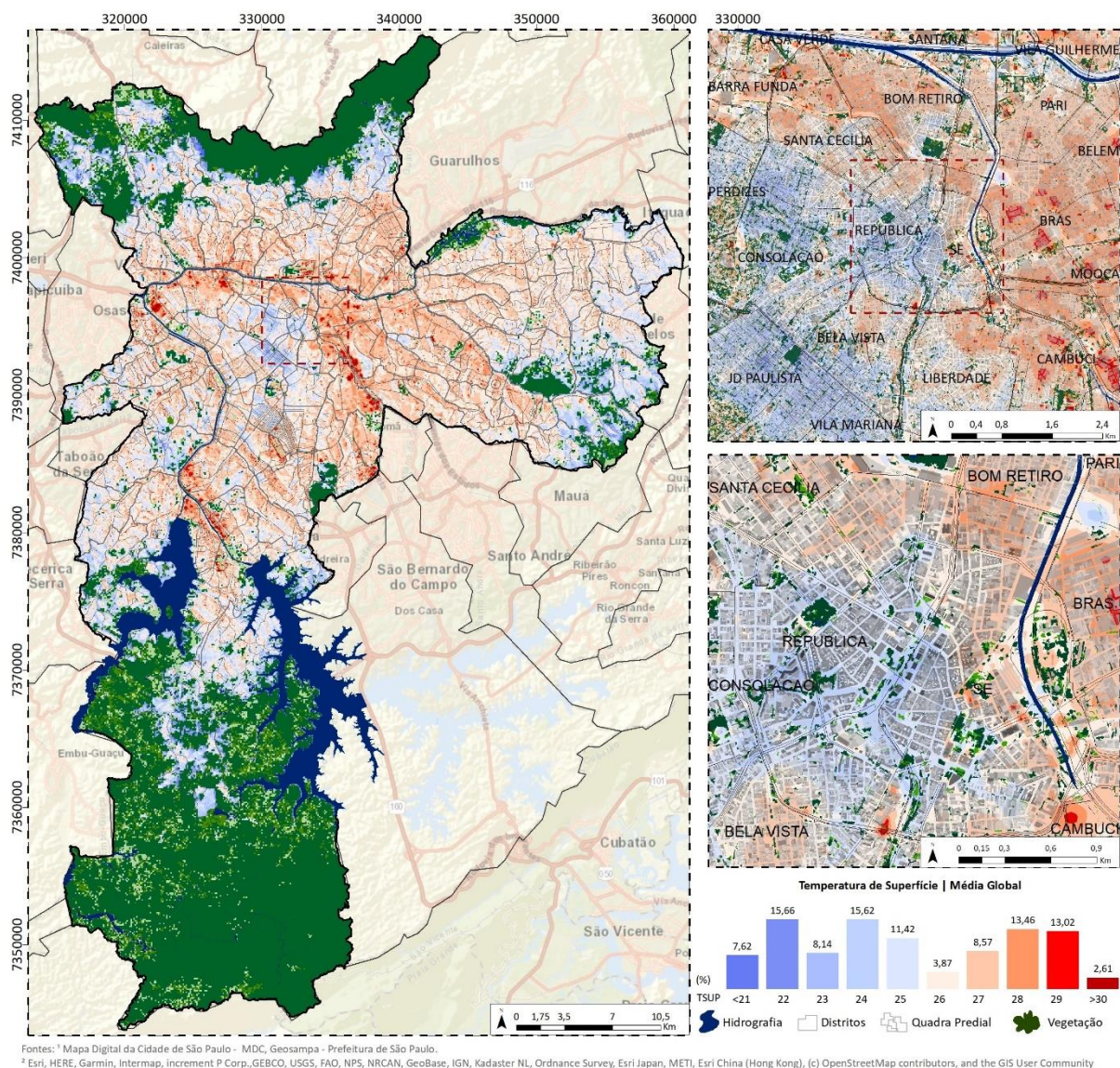
Para a análise do período frio e seco, que compreende os meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, a  $T_{SUP}$  mais baixa foi na ordem de 16,2 °C, máxima de 28,2 °C e média de 21,4°C. Os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  durante o período frio e seco (acima dos 26°C), quando somados perfazem menos de 1% dos resultados e os valores mínimos (abaixo de 19°C) representam 1,9%. Os resultados evidenciam como classes predominantes, a concentração dos pixels entre as temperaturas de 22°C (28,4%) e 23°C (24,4%), como mostra a Figura 51.



**Figura 51** -  $T_{SUP}$  em São Paulo para o período frio e seco entre 1984 e 2017.

Após analisar a  $T_{SUP}$  por períodos (quente e úmido, frio e seco) procedeu-se a análise dos valores médios globais para todas as imagens Landsat entre o período de 1984 – 2017. Os resultados indicam que a MSP apresenta  $T_{SUP}$  média global mínima na ordem de 20.3°C e média global máxima de 31.7°C, com  $T_{SUP}$  média global na ordem de 26.5°C.

A análise dos resultados indica uma distribuição dos valores concentrados nas classes de 22°C (15,7%), 24°C (15,6%), 28°C (13,5%) e 29°C (13,0%). A análise dos valores médios globais de  $T_{SUP}$  indicam que 15,6% dos espaços urbanos em São Paulo apresentam temperaturas iguais ou superiores à 29°C, por outro lado, verifica-se que 23,3% do SEU da MSP compreende os valores mínimos de  $T_{SUP}$  (abaixo de 21°), como podem ser verificados na Figura 52.

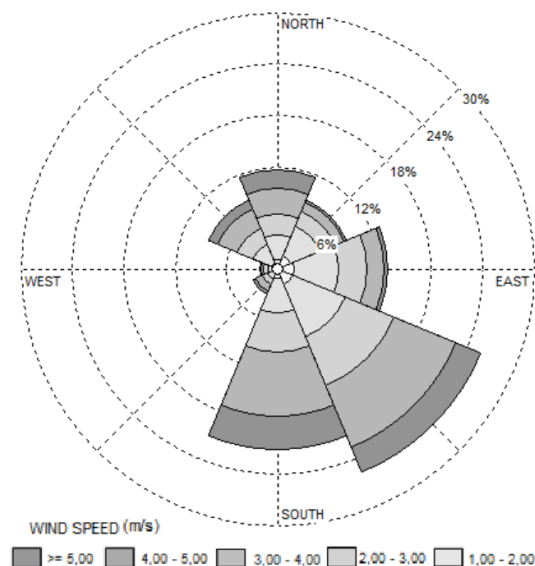


**Figura 52 - Mapa da  $T_{SUP}$  média em São Paulo entre 1984 e 2017.**

## 5.2. Ventilação natural na Metrópole de São Paulo (MSP)

A análise da ventilação natural na MSP foi realizada no *software* WAsP com base em informações da topografia e rugosidade geral em mesoescala. Para simulação do vento à uma altura de 10m, procedeu-se ao tratamento dos dados da estação do Aeroporto de Congonhas, para o período de 2000 – 2010 no WAsP *Climate Analysis*. O programa analisa a base de dados de acordo com a informação inicial com 8 direções principais dos ventos apresentadas na Figura 53.

Os resultados agrupados em 8 direções indicaram que a velocidade média do vento é na ordem de 2.5 m/s. Como primeira predominância aparecem os ventos na direção Sudeste (SE) com 28,3% das frequências, com velocidade máxima de 10.7 m/s e mínima de 0.3 m/s. Como segunda maior frequência, os ventos de Sul (S) representam 24,9% das frequências, com velocidade máxima de 12.6 m/s e mínima de 0.2 m/s. Os ventos no vetor Este (E) perfazem 12,8% das frequências, com velocidade máxima de 13.3 m/s e a mínima de 0.2 m/s, seguida pelos ventos de Noroeste (NO) com 9,5% dos resultados, com velocidade máxima na ordem de 14.7 m/s e mínima de 0.2 m/s. Os ventos nas direções de Norte (N) perfazem cerca de 9,40% das frequências, com velocidade máxima de 11.3 m/s e mínima de 0.3 m/s. Em seguida os ventos de Nordeste (NE) com 8,5% das frequências, a velocidade máxima atingiu 14.4 m/s e mínima foi de 0.3 m/s. Os menores vetores de frequência dos ventos em São Paulo correspondem aos ventos de Sudoeste (SO) 3,8%, com velocidade máxima de 16.1 m/s e mínima de 0.2 m/s e por último com 2,6% dos resultados os ventos na direção Oeste (O), o qual tem a velocidade máxima corresponde a 15.8 m/s e mínima de 0.2 m/s (Tabela 11).

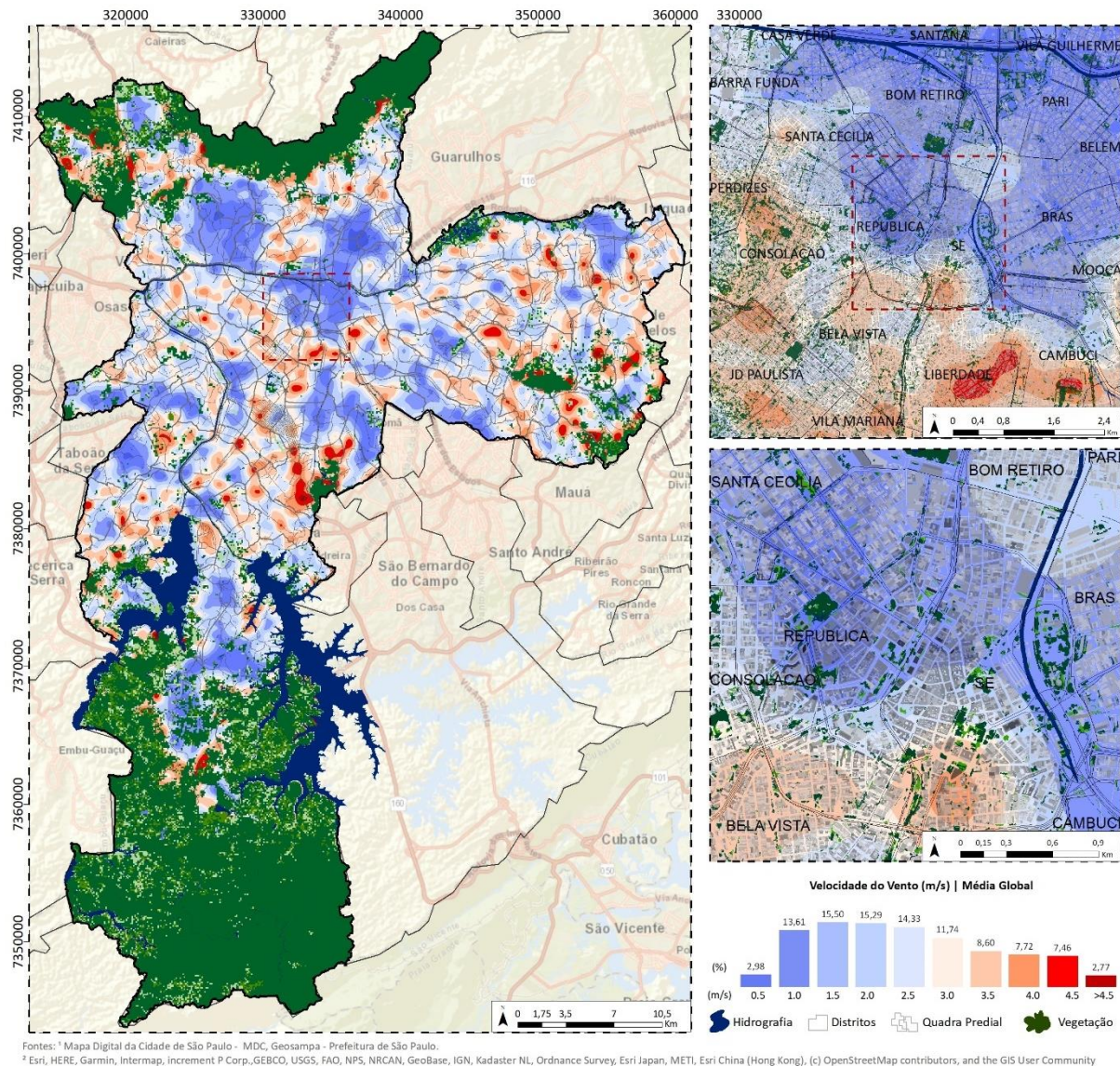


**Tabela 11** – Percentagem de vento para 8 direções dos dados da Estação de Congonhas no período 2000 – 2010.

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
<b>Freq. (%)</b>	9,4	8,5	12,8	28,3	24,9	3,8	2,6	9,5
<b>Vel. Med</b>	2.5	2.6	2.5	2.3	2.4	2.6	2.5	2.4
<b>Vel. Max</b>	11.3	14.4	13.3	10.7	12.6	16.7	15.8	14.6
<b>Vel. Min</b>	0.31	0.29	0.20	0.26	0.22	0.23	0.16	0.22

**Figura 53** – Dados de vento da Estação de Congonhas para 8 direções.

A classificação dos resultados por frequência a cada 0.5 m/s indica as áreas com tendência à estagnação do fluxo de ar (resultados de velocidades mínimas até 1.0 m/s), quando agrupados perfazem em média 16,7% do SEU de São Paulo em todas as direções. Os espaços urbanos em que o vento sofre a aceleração máxima devido a topografia e a morfologia urbana local, correspondente aos valores acima de 4.5 m/s, quando somados representam 10,2% dos resultados, como mostra a Figura 54 e Tabela 12.

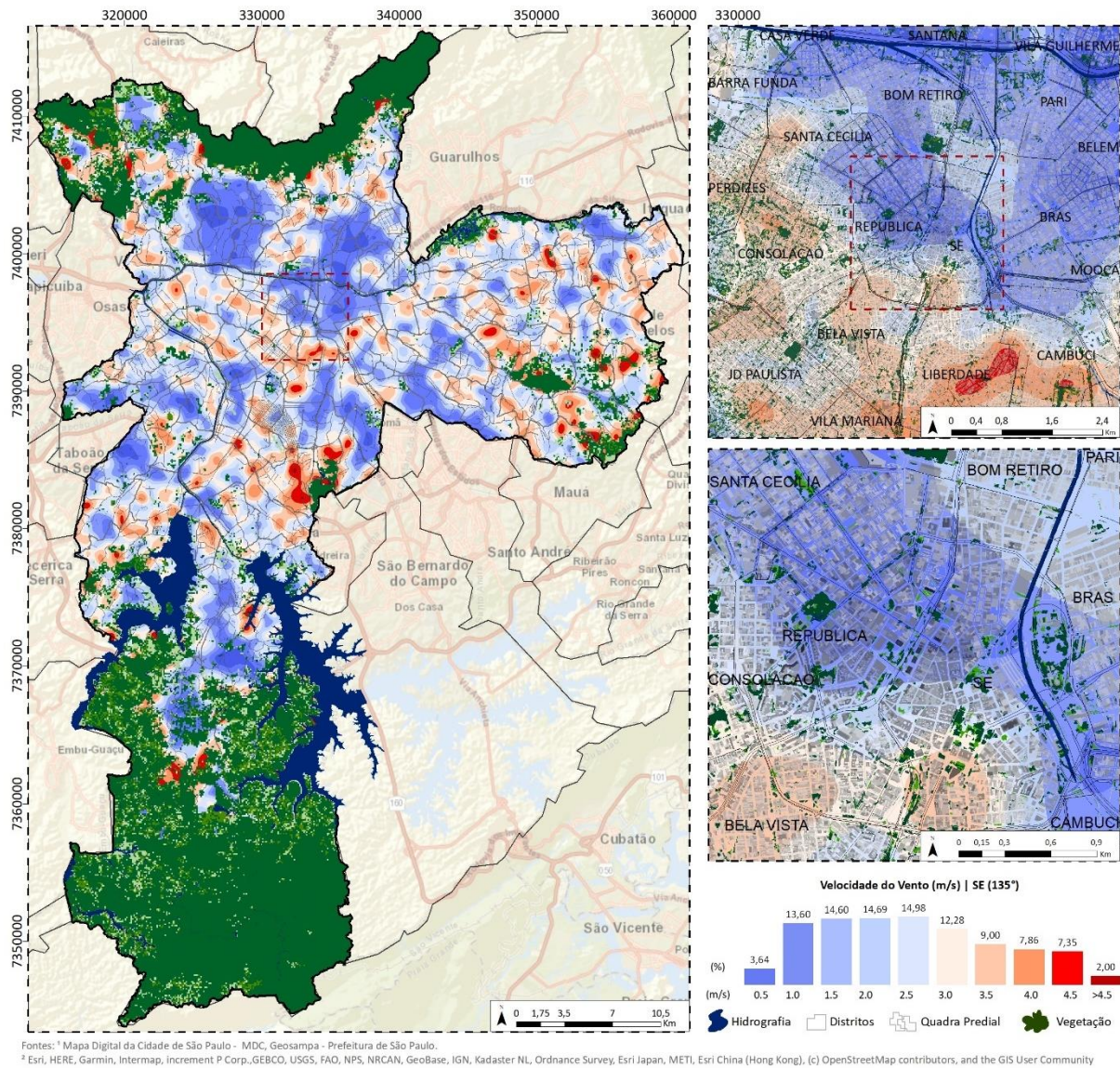


**Figura 54** - Mapa da ventilação natural em São Paulo por valores médios para todas direções.

Na direção do vento predominante de Sudeste (SE) é possível verificar que em média 16,6% de espaços urbanos representam tendência para estagnação do fluxo de ar (valores inferiores à 1 m/s), e cerca de 7,6% representam possíveis zonas com tendência para a aceleração do fluxo e ar (maior que 4.5 m/s). Verificou-se uma distribuição homogênea dos resultados entre limiares de velocidades de 1.0 e 3.0 m/s, no qual os valores oscilaram entre 13,6% e 12,3%, com máxima concentração dos valores (15%) na classe 2.5 m/s. Quando somadas estas classes perfazem 70,1% dos espaços urbanos (Figura 55).

**Tabela 12 – Ventilação natural por classe de velocidade e direção em São Paulo.**

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Média
0.5	6,78	0,96	1,32	3,64	3,90	1,55	2,07	3,62	2,98
1.0	21,14	10,71	10,74	13,60	15,67	10,59	12,50	13,95	13,61
1.5	20,70	15,19	13,85	14,60	15,32	15,42	14,32	14,62	15,50
2.0	18,72	15,27	15,19	14,69	14,75	14,87	15,00	13,83	15,29
2.5	13,63	15,18	15,63	14,98	13,15	14,08	14,34	13,62	14,33
3.0	8,67	12,97	13,10	12,28	11,18	12,21	12,02	11,49	11,74
3.5	4,88	9,78	9,65	9,00	8,33	9,36	9,10	8,67	8,60
4.0	2,78	8,99	8,95	7,86	7,53	8,75	8,56	8,30	7,72
4.5	1,43	8,52	8,55	7,35	7,62	9,23	8,59	8,40	7,46
> 4.5	1,27	2,42	3,02	2,00	2,55	3,95	3,49	3,49	2,77



**Figura 55 - Ventilação natural em São Paulo com ventos de Sudeste.**

Para a segunda direção predominante em São Paulo, os ventos de Sul (S), os resultados apresentam em média 2.4 m/s. Para esta direção, as zonas que aparecem com tendência à estagnação do vento, correspondentes aos espaços urbanos em que a velocidade é inferior a 1.0 m/s, quando somadas perfazem menos de 20,5%. Verifica-se que no outro extremo do histograma, as zonas de máxima aceleração do vento, que correspondem os espaços urbanos com velocidades superiores a 4.5 m/s, perfazem cerca de 10,2%. Tendo em consideração a topografia e a morfologia urbana, a ventilação natural na direção Sul apresenta uma distribuição dos resultados a cada 0.5 m/s concentrados nas classes da primeira metade do histograma, com maior frequência em 1.0 m/s (15,7%). Quando comparado aos valores globais, os ventos na direção Sul são os que mais sofreram com o aumento das zonas com tendência a estagnação do fluxo de ar (Figura 56).

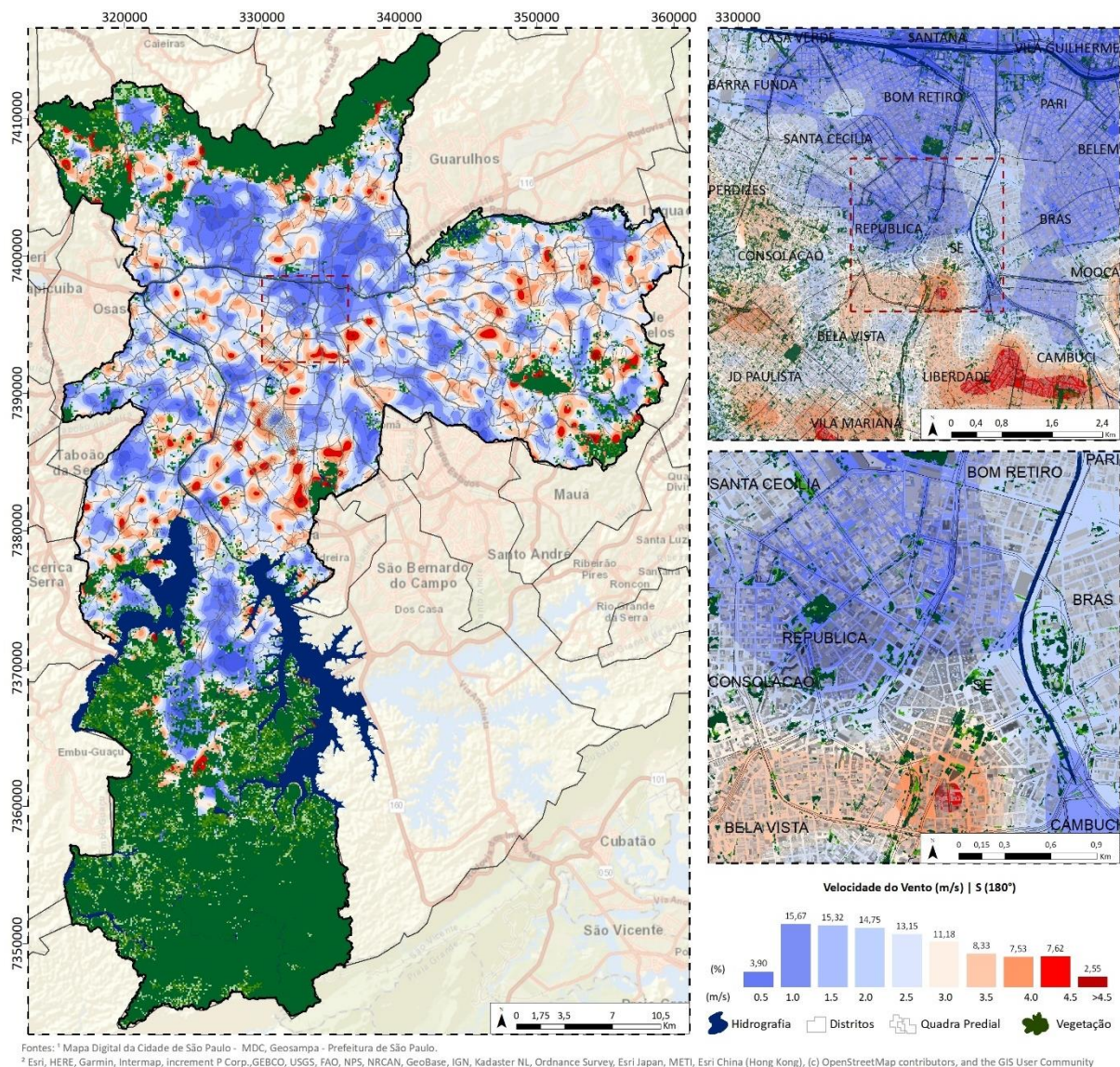
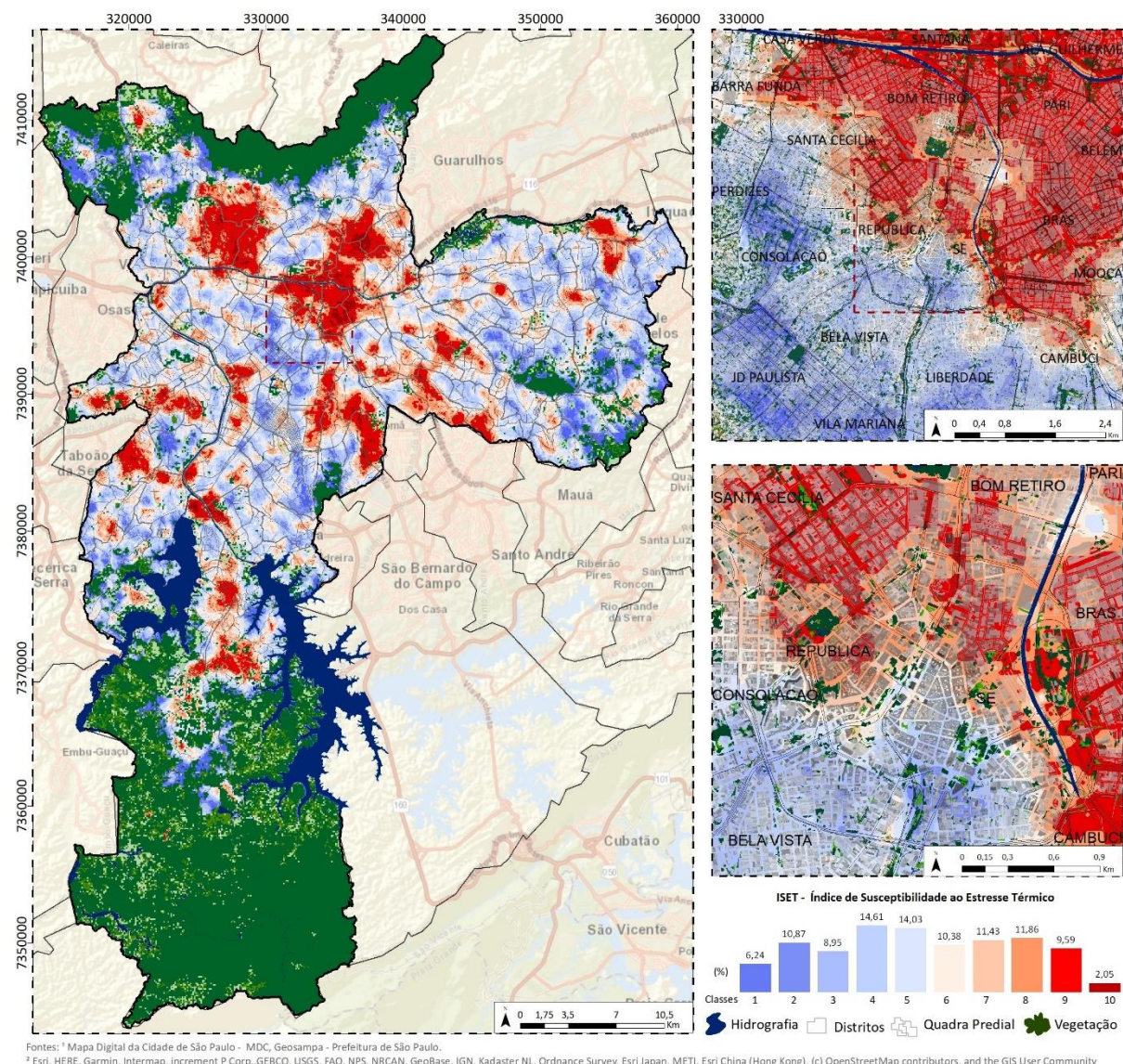


Figura 56 - Ventilação natural em São Paulo com ventos de Sul.

### 5.3. Análise da Susceptibilidade ao Estresse Térmico

O mapa do Índice de Susceptibilidade ao Estresse Térmico - ISET (Figura 57) mostra que a distribuição a nível do Município de São Paulo não é uniforme, existindo áreas mais suscetíveis que outras (12%), situadas principalmente nos distritos próximos as áreas de várzeas dos rios Tietê e Tamanduateí, fato explicado pela heterogeneidade do uso de coberturas urbanas existente entre os espaços geográficos que constituem a área de estudo, pela presença diferenciada de formas de relevo e pelo histórico de ocupação das áreas no último século. Os espaços urbanos com baixo ISET estão situados próximos das áreas verdes e em alguns casos, como na região do Espigão Central da Avenida Paulista, a morfologia urbana predominantemente verticalizada em áreas de topos, acaba por criar sombras e condições para a aceleração do vento, o qual diminui bruscamente a velocidade a sotavento.



**Figura 57** – Índice de Susceptibilidade ao Estresse Térmico em São Paulo segundo a  $T_{SUP}$  e a ventilação natural.

#### 5.4. Análise das propriedades morfoclimáticas do Sistema de Espaços Urbanos de São Paulo

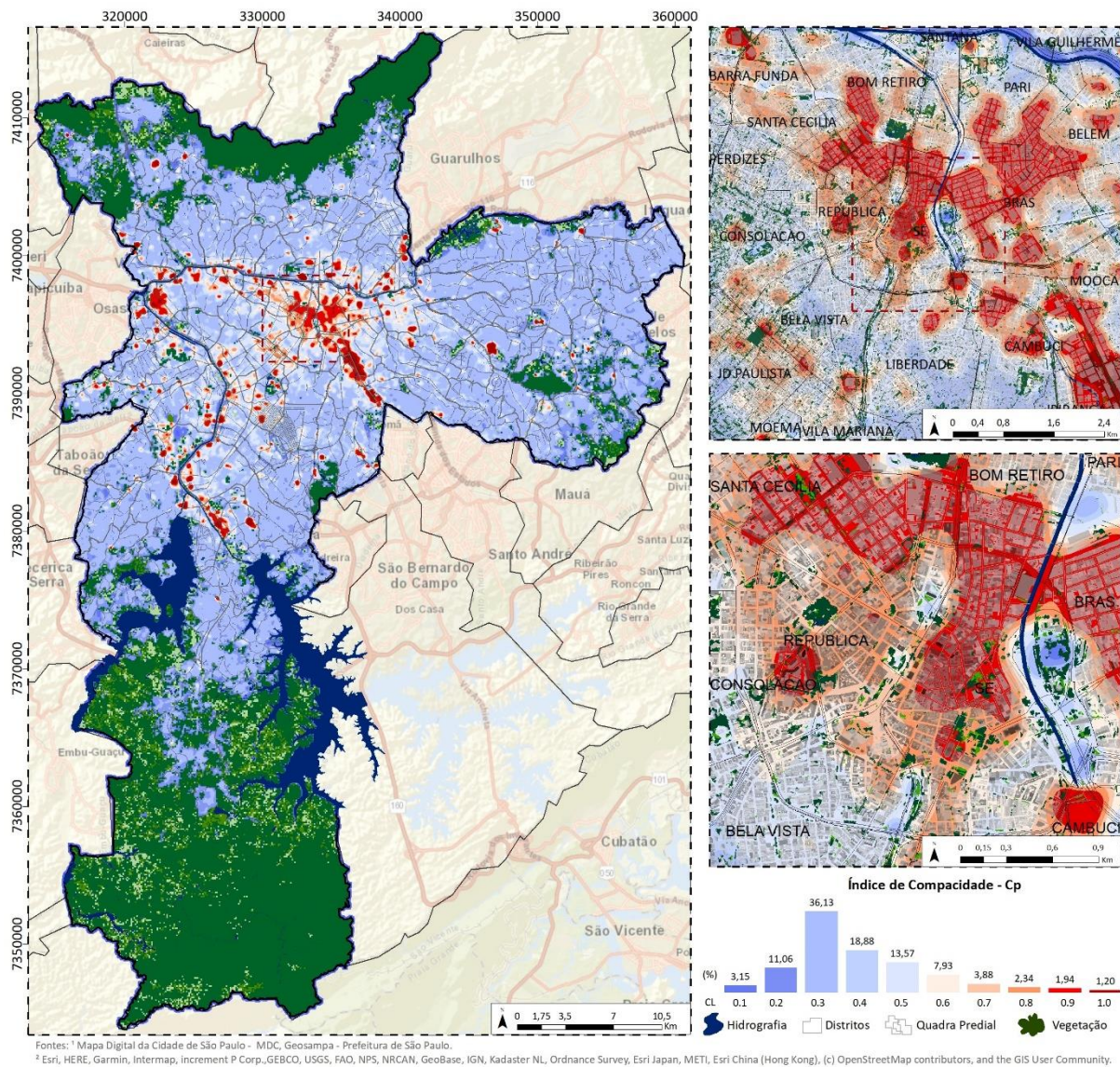
Com base nas informações da morfologia dos espaços urbanos disponibilizadas pelo Mapa Digital da Cidade de São Paulo (MDC), procurou-se analisar as propriedades da forma urbana por meio da adaptação dos indicadores morfoclimáticos mais pertinentes a este tipo de estudo. As diferentes métricas que constituem os indicadores foram trabalhadas em uma unidade de análise em comum, constituída por células uniformes, as quais possibilitaram a padronização dos resultados.

Os diferentes tipos de estruturas urbanas foram investigados de acordo com sua geometria fractal e o nível de compacidade geométrica, sendo utilizadas as métricas do perímetro e área em relação a uma forma com perímetro circular. Em outra perspectiva de análise, as estruturas urbanas foram investigadas segundo a orientação espacial e o nível de sinuosidade das formas, neste sentido o uso de linhas paralelas equidistantes foram necessárias para medir o nível de obstrução na direção do vento dominante e a curvatura das estruturas.

A relação entre os tipos de estruturas que constituem os tecidos urbanos foram investigados com base nas propriedades de textura, dado pelo nível de abertura dos espaços livres de em relação ao céu visível dado pela oclusividade e a volumetria do edificado em relação ao espaço de ar livre disponível no interior de uma unidade de análise que foi medida pela porosidade. A dimensão aerodinâmica dos *canyons* nos tecidos urbanos dado pelas medidas de altura dos espaços construídos foi investigada na propriedade de verticalidade e o nível de obstrução das fachadas dos espaços construídos em relação ao deslocamento do fluxo de ar foi avaliado pela rugosidade aerodinâmica.

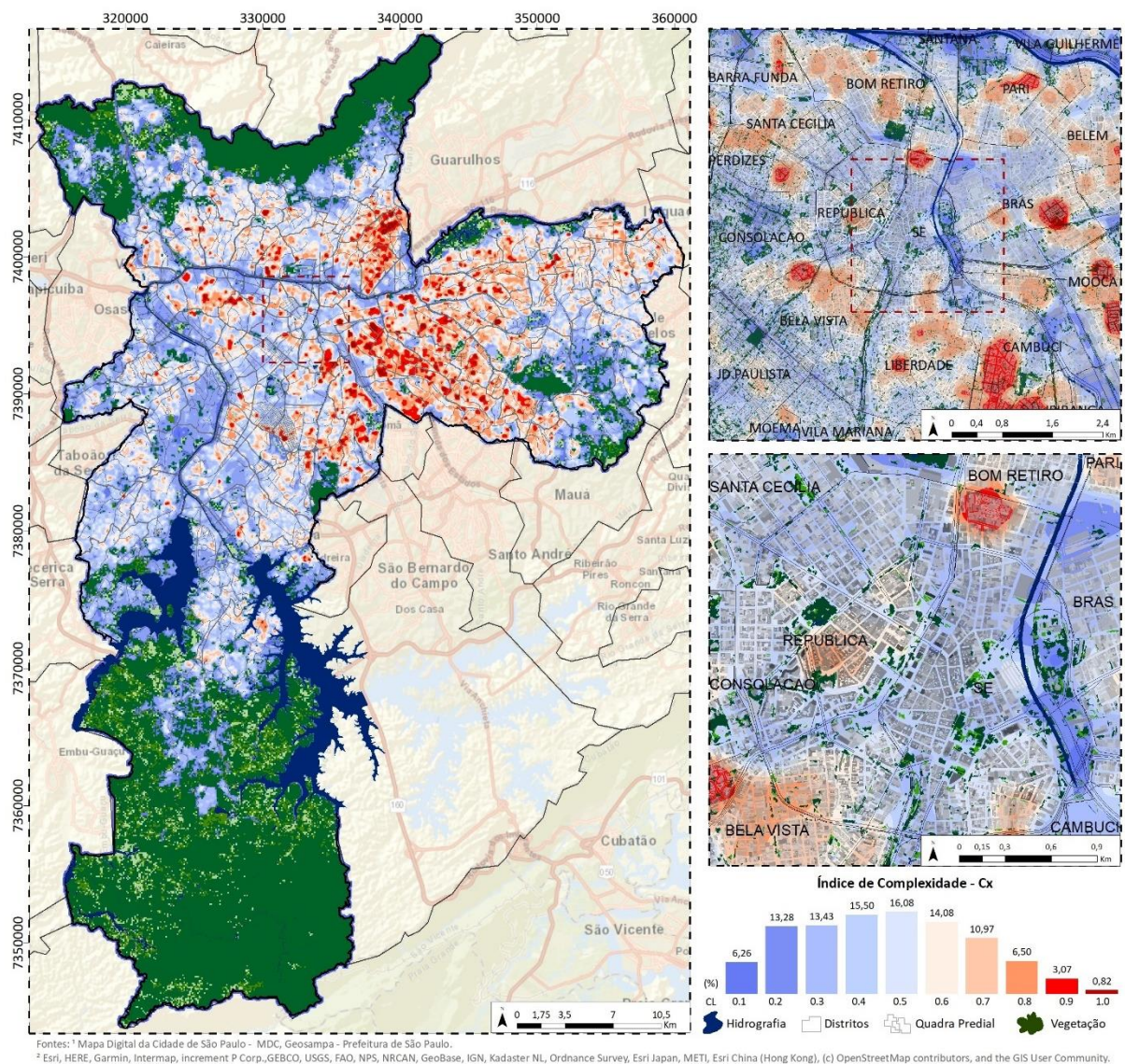
Conclui-se a análise morfoclimática com a investigação das propriedades morfoclimáticas relacionadas com a presença de coberturas urbanas. Neste sentido procurou-se compreender primeiramente o nível de espaços impermeáveis e a intensidade de ocupação dos edifícios em altura por meio do número de pavimentos. Em seguida, as coberturas urbanas foram investigadas em relação a organização espacial no SEU, neste sentido a conectividade entre as coberturas, dada pelo nível de geminação entre os espaços construídos e o nível de proximidade entre as coberturas dos espaços construídos finalizam a análise morfoclimática.

- Compacidade Geométrica (Cp)** - A compacidade expressa o nível de agrupamento ou desenvolvimento de alta densidade de uma geometria no interior de uma unidade de análise (Galster et al., 2001), calculada com base nas medidas da área construída e o perímetro dos blocos de edifícios, ponderados pela área envoltória presente na célula, similar ao índice de compacidade utilizado por Yu-Hsin Tsai (2005). Os resultados para análise da compacidade indicam a presença maciça de estruturas urbanas com baixo nível de compacidade, sendo as maiores frequências identificadas nas classes 0.3 (36,1%) e 0.4 (18,8%) (Figura 58). Os espaços urbanos em que a compacidade das estruturas atinge os valores máximos (acima de 0.8) perfazem 3,1% da área urbanizada. Nestes espaços as estruturas compactas tornam-se um obstáculo à circulação do ar (a depender da volumetria e altura) e acabam por criar áreas de estagnação à sotavento da estrutura, além do aumento de vórtices na área envolvente do edificado. Estes movimentos do fluxo de ar somados a “concentração” de calor de superfície e a acumulação de calor antrópico, acabam por criar condições desfavoráveis ao conforto bioclimático e podem ter reflexos no aumento do consumo energético.



**Figura 58 - Compacidade (Cp) geométrica das estruturas urbanas em São Paulo.**

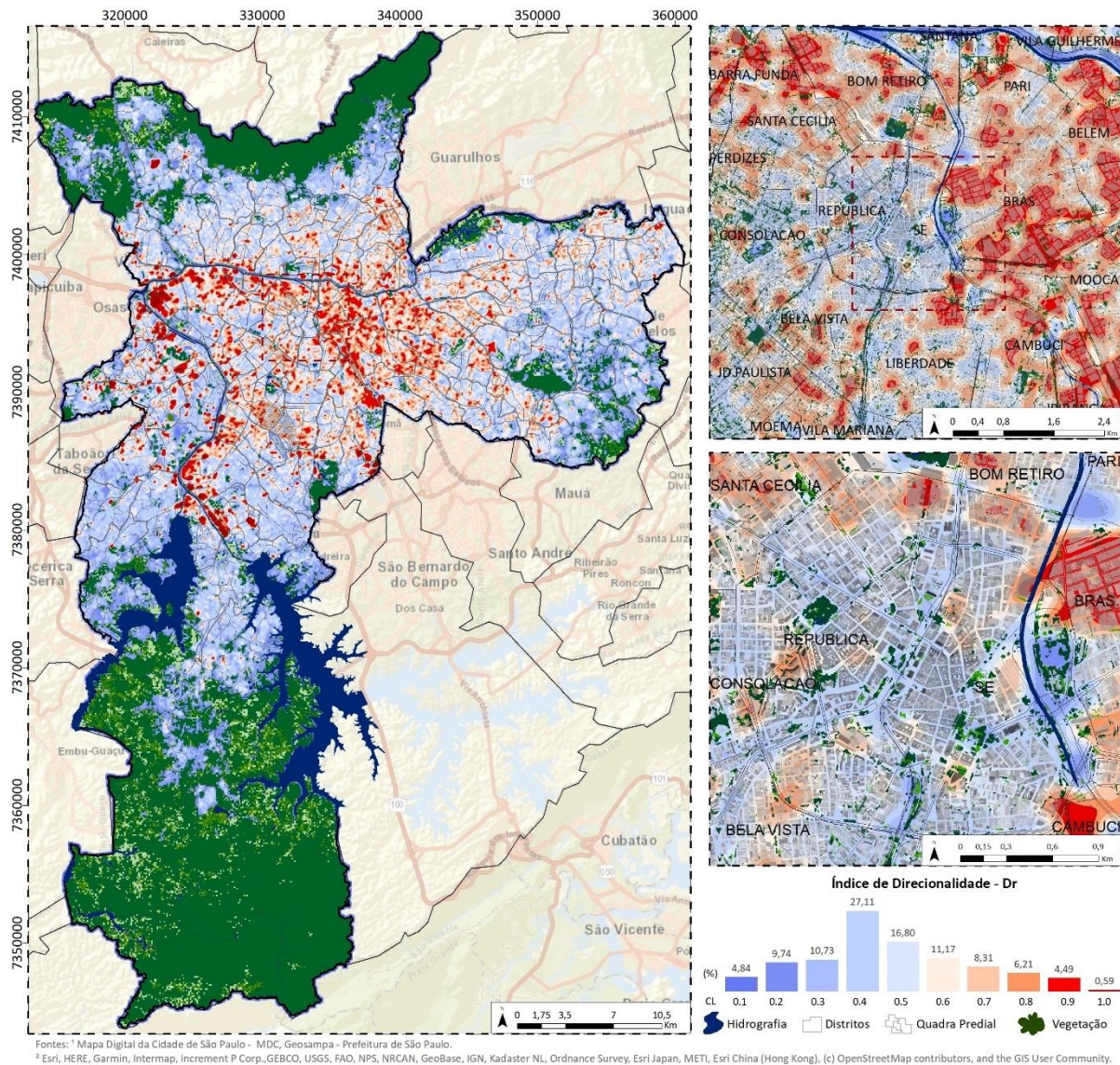
- Complexidade Geométrica (Cx)** – O Índice de Complexidade (Cx) foi adaptado do *Area Weighted Mean Shape Index – AWMSI*, descrito por Makido et al. (2012), o qual foi calculado relacionando a extensão do preenchimento espacial de uma forma com perímetro mais complexo em relação a uma forma com perímetros simples em dimensão radial. A complexidade das estruturas construídas, medida pelo Cx, indicou que SEU de São Paulo apresenta 64,5% dos resultados concentrados na primeira metade do histograma. Os níveis mais baixos de complexidade perfazem 19,5% dos resultados e os níveis mais elevados 3,1% (Figura 59), nestes espaços o elevado nível de fragmentação das estruturas urbanas pode influenciar na  $T_{SUP}$  e nas condições de iluminação natural, de acordo com o número de fachadas expostas a radiação direta. Para a ventilação natural a presença de estruturas urbanas complexas contribui para o aumento de vórtices no entorno do edificado e dificultam a continuidade dos caminhos de ventilação.



**Figura 59 - Complexidade (Cx) geométrica das estruturas urbanas em São Paulo.**

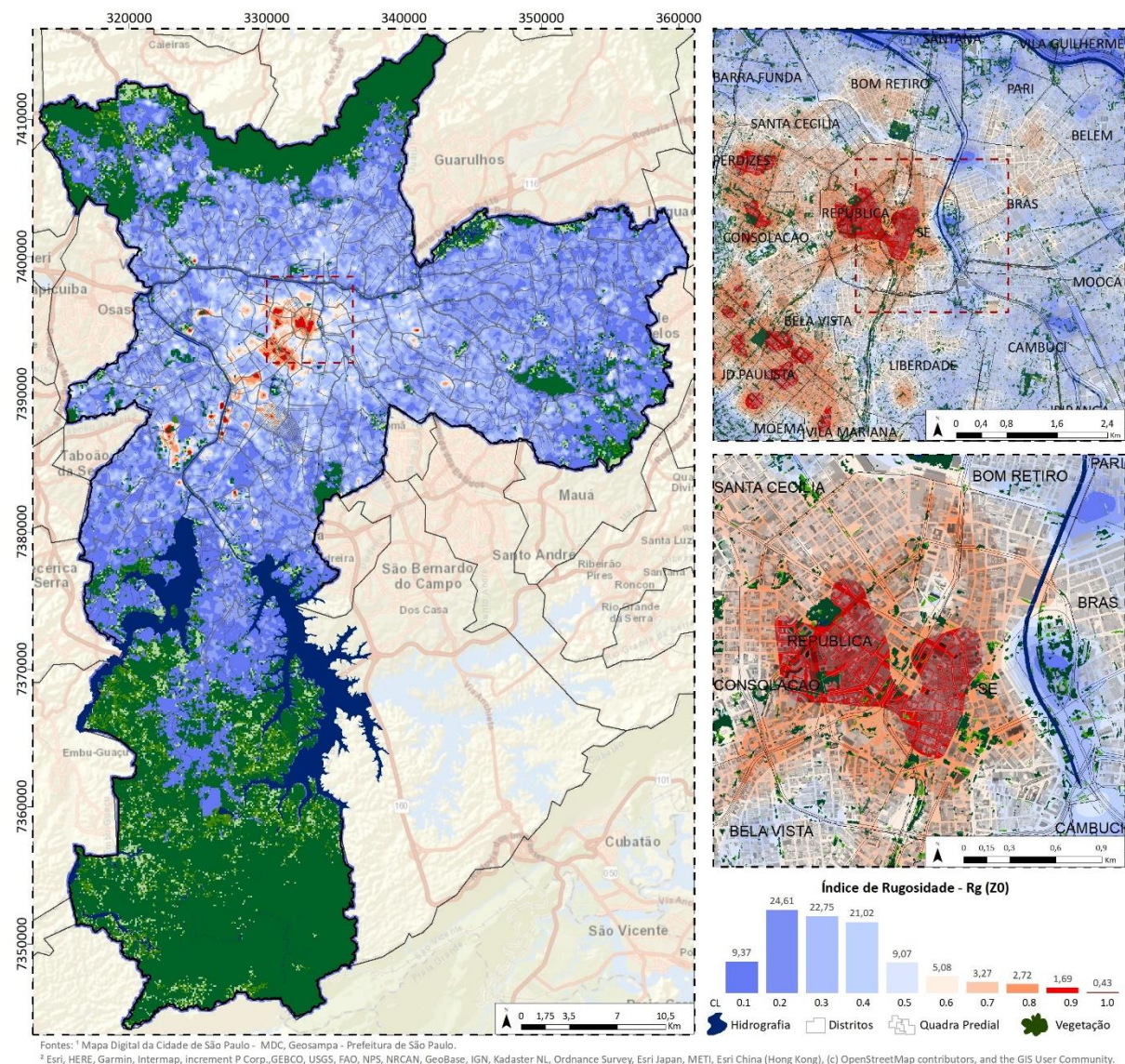


- Direcionalidade (Dc)** – A direcionalidade é uma propriedade espacial das estruturas urbanas que visa compreender a orientação do edificado em relação ao fluxo de ar e a  $T_{SUP}$ . O Índice de Direcionalidade (Dc) foi calculado intersectando os blocos de edifícios com linhas paralelas e equidistantes na direção oposta ao vento predominante na MSP, para em seguida ser extraído o maior segmento de blocos no interior da célula orientado como barreira à progressão do fluxo de ar (Figura 61). A análise global dos resultados indicou que menos de 6% das estruturas urbanas estão completamente orientadas na direção NE – SO, formando barreiras à progressão do fluxo de ar. Por outro lado, cerca de 14,6% dos resultados representam os locais em que as estruturas tendem à orientação na direção do vento dominante (SE), e, portanto, facilitam o escoamento do fluxo e ar reduzindo o nível de interferências. Os resultados globais concentram-se entre valores intermediários de 0.4 (21,1%) e 0.5 (16,8%).



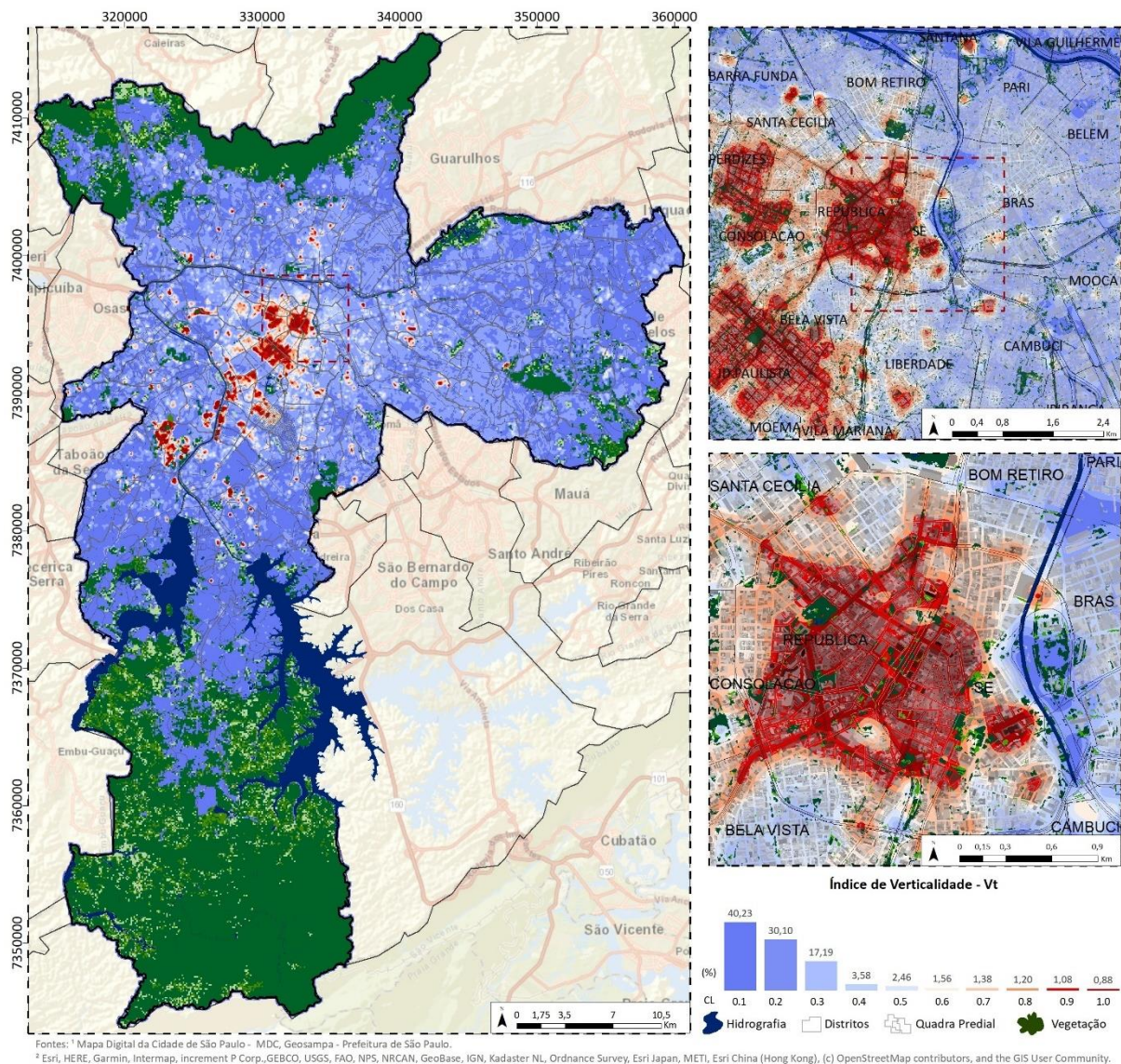
**Figura 61 - Direcionalidade (Dr) das estruturas urbanas em São Paulo.**

- Rugosidade Aerodinâmica ( $R_g - Z_0$ )** - A rugosidade como uma propriedade aerodinâmica do tecido urbano foi calculada com base na adaptação da fórmula do  $Z_0$  descrita por Lettau (1969) e apresentada por Correia et al. (2015) para a cidade de Lisboa. Por meio do uso de linhas paralelas equidistantes (20 metros), foi simulado o comprimento das fachadas dos edifícios que atuam como barreira à progressão do fluxo de ar (NE - SO), com efeitos na sua velocidade e direção, considerando ainda outras métricas como a altura e área dos espaços construídos. Na análise global a rugosidade aerodinâmica do tecido urbano de São Paulo apresentou mais 80% dos resultados na primeira metade do histograma (até 0.5), e, portanto, condições favoráveis à ventilação natural e eficácia na dispersão de poluentes e dissipação de calor na maior parte do SEU (Figura 62). No entanto os valores mais elevados aparecem concentrados em manchas próximas ao centro da cidade. Como uma propriedade que governa a produção de turbulência do fluxo perpendicular nos *canyons* urbanos, os valores mais elevados de rugosidade correspondem a 5% do SEU, concentrados principalmente na área central da cidade e em pontos específicos de elevado adensamento vertical.



**Figura 62 - Rugosidade Aerodinâmica ( $R_g$ ) dos tecidos urbanos em São Paulo.**

- Verticalidade (Vt)** – O Índice de Verticalidade, como segunda propriedade aerodinâmica dos tecidos urbanos, permite verificar o impacto da altura do edificado no efeito de sombreamento das áreas envolventes, e, portanto, na redução possível redução da  $T_{SUP}$  captada pelos sensores térmicos. O Índice de Verticalidade (Vt) tem como medida principal a altura dos edifícios multiplicada por dois e ponderada pela área construída no interior da célula. Os resultados indicam que 2% do SEU de São Paulo apresentam valores extremos de verticalidade (acima de 0.8), localizados em pontos específicos do tecido urbano, principalmente no centro antigo (República e Sé) na região da Avenida Paulista, além de alguns distritos intersectados pelo Rio Pinheiros. Em outro ponto extremo, verifica-se que 70,3% dos resultados correspondem as áreas de baixa verticalidade, no qual ocorre o predomínio de tecidos urbanos constituído por moradias que não ultrapassam 3 pavimentos em média (Figura 63).



**Figura 63 - Verticalidade (Vt) dos tecidos urbanos em São Paulo.**

- Porosidade (Po)** – Como uma propriedade de textura do tecido urbano a Porosidade tem por objetivo quantificar o volume de espaços construídos em razão do de ar livre presente na camada inferior da atmosfera urbana (*Urban Canopy Layer - UCL*). A Porosidade (Po) foi adaptada do índice de volumetria proposto por Gàl et al. (2010), com resultados globais que indicam a concentração de 76,2% das células, na primeira metade do histograma. Os resultados indicam o predomínio de espaços urbanos porosos com boas condições para as trocas energéticas e radiativas entre a atmosfera e as superfícies e para a ventilação natural percolar entre os espaços construídos. Em média o tecido urbano na capital paulista apresentou valores concentrados entre 0.3 e 0.6, sendo que cerca de 3,3% do SEU correspondentes a valores extremos, no qual a elevada volumetria do edificado no interior da célula representa um decréscimo do volume de espaço disponível para dissipação de calor e dispersão de poluentes em perfil vertical (Figura 64).

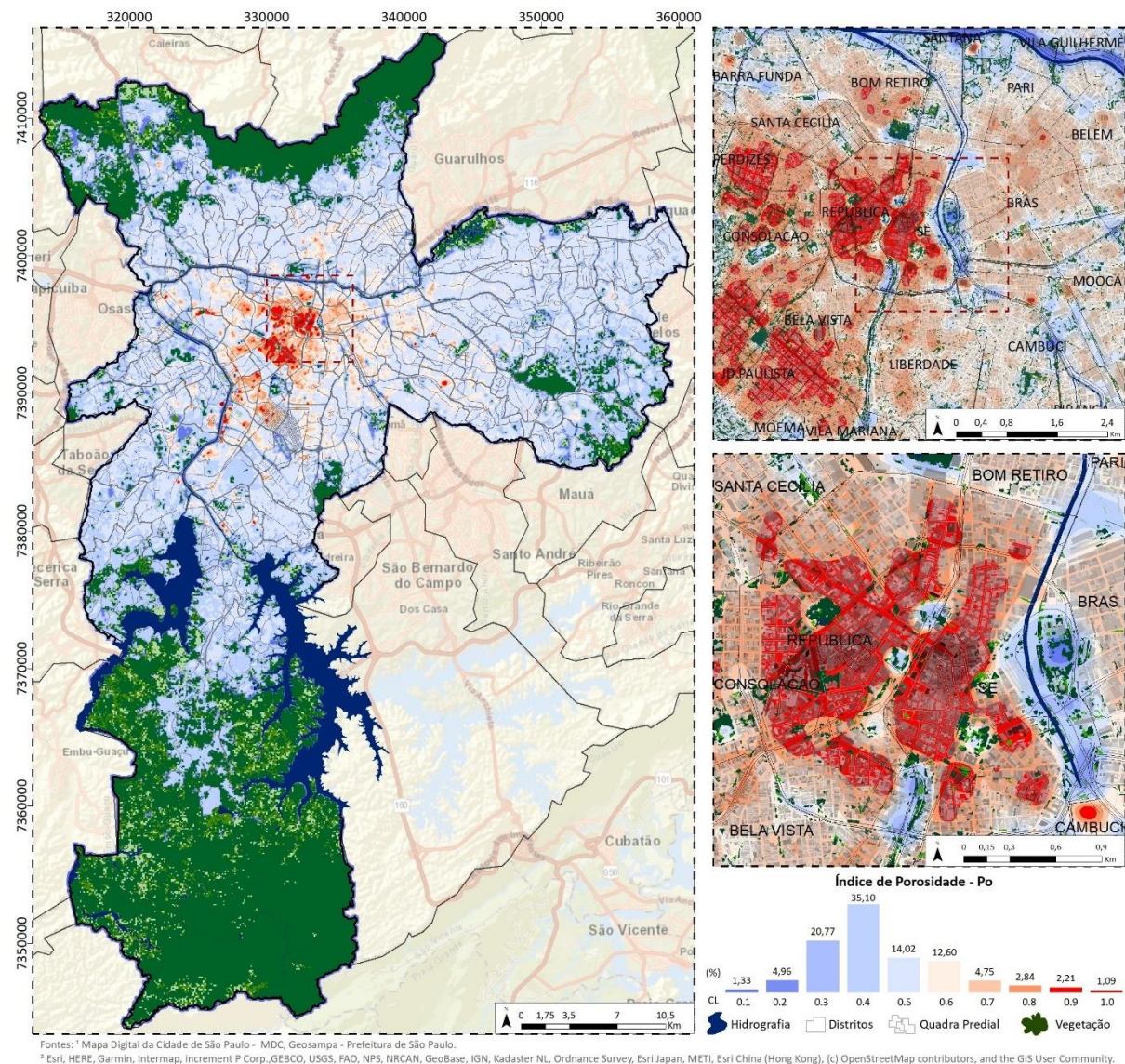
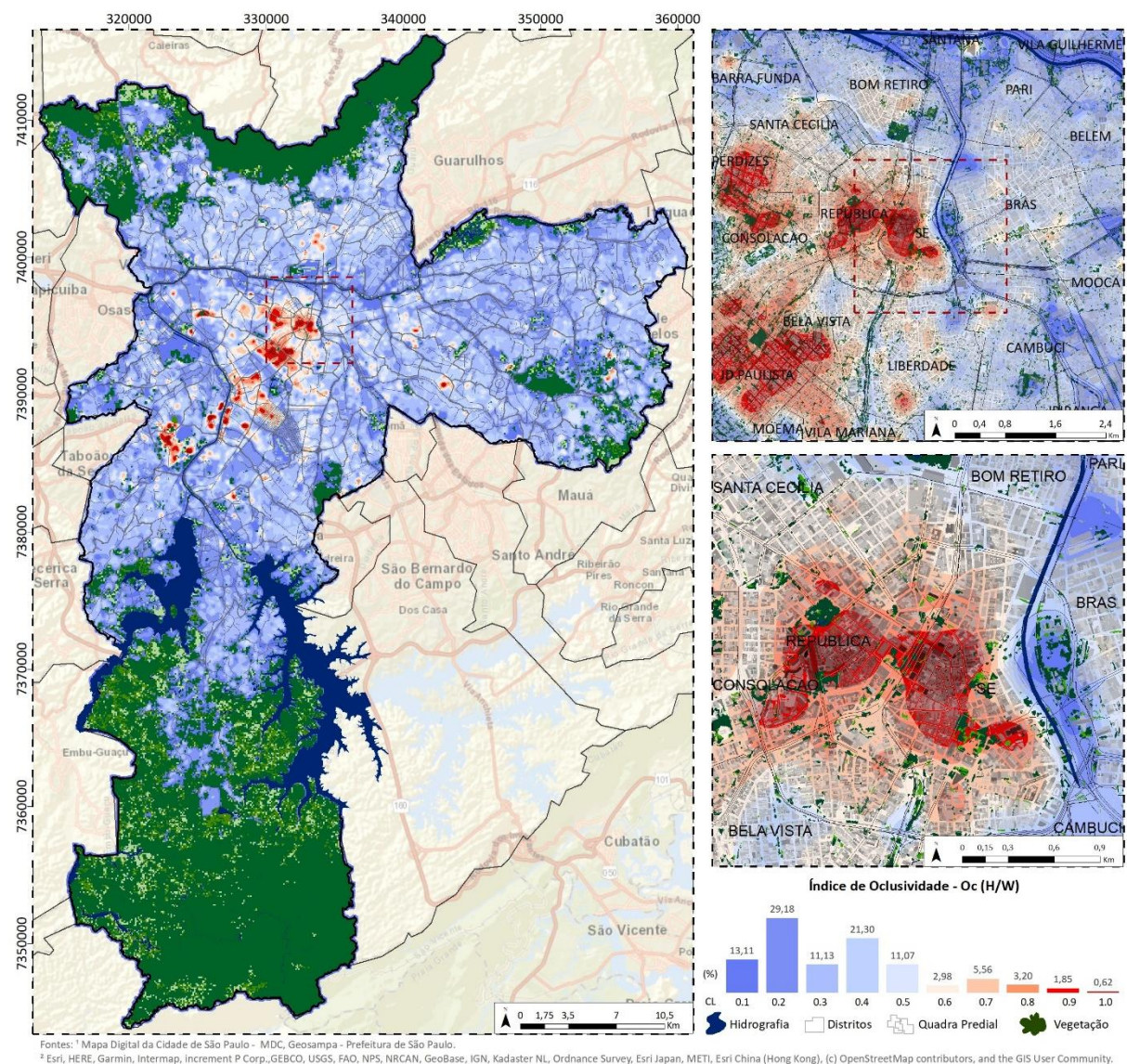


Figura 64 - Porosidade (Po) dos tecidos urbanos em São Paulo.

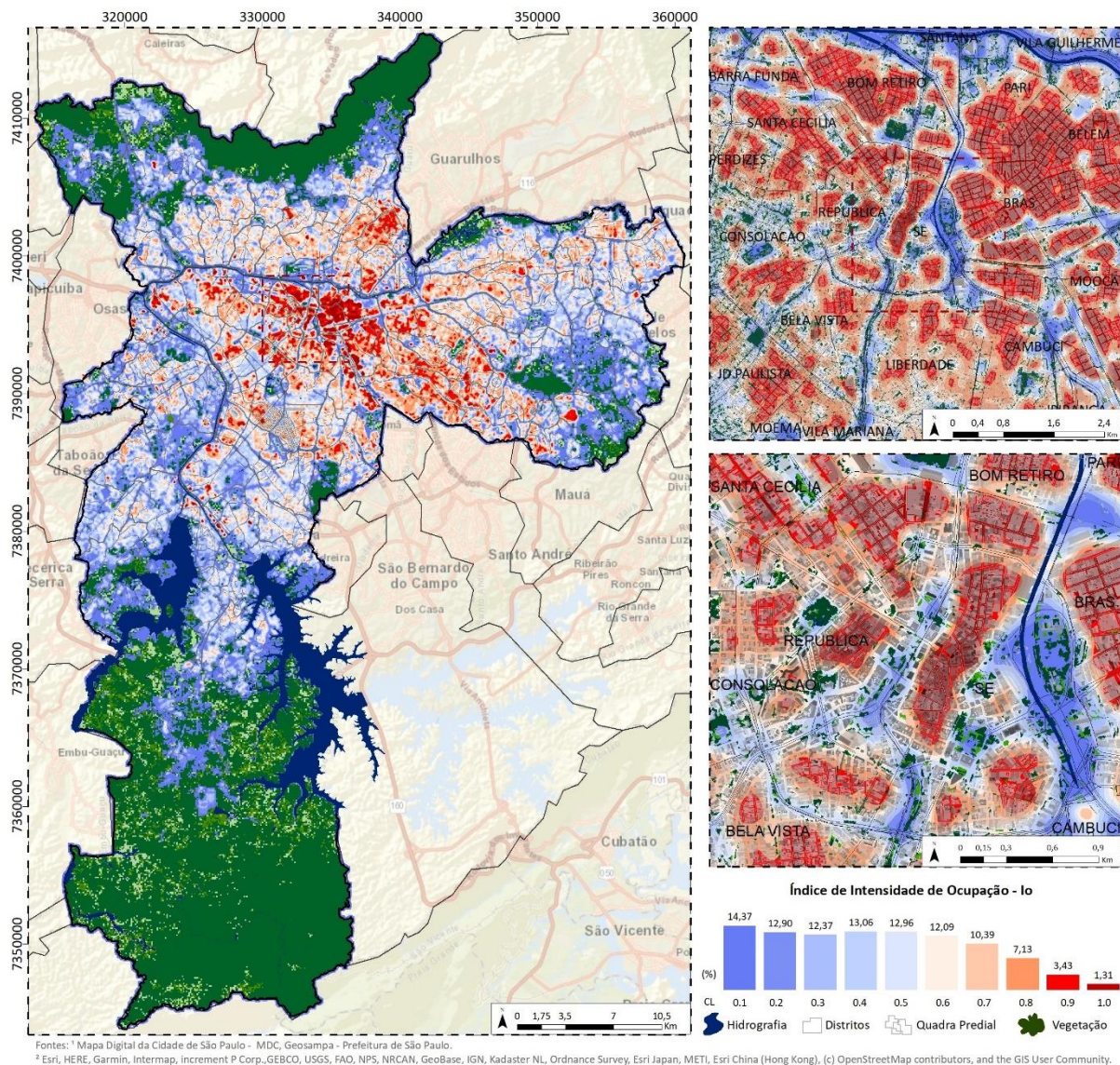
- Índice de Oclusividade (Oc)** – A oclusividade foi calculada com base no indicador *H/W Ratio* de acordo com o método de Correia et al., (2015). Nas unidades de análise foi inserida informação sobre a altura média dos blocos de edifícios (*H - height*), em seguida, por meio das medidas de perímetro e área do Subsistema de Espaços Livres de Construção (SELC) foi calculado a largura dos espaços que separam os blocos de edifícios (*W - width*). Os resultados para a análise global de oclusividade do tecido urbano, indicam que em média a capital paulistana apresenta um baixo nível de obstrução nos *canyons* urbanos, com elevada concentração dos resultados nas classes 0.2 (29.2%) e 0.4 (21.3%), totalizando 50.5% das unidades de análise. Os valores até a classe 0.5 perfazem aproximadamente 85,8% da área de estudo com condições favoráveis à visibilidade do céu, como mostra a Figura 65. Os valores mais elevados de oclusividade perfazem cerca de 3% do SEU em São Paulo, áreas em que a altura média do edificadado na unidade de análise é diversas vezes superior à largura média dos espaços abertos circundantes.



**Figura 65 – Oclusividade (Oc) dos tecidos urbanos em São Paulo, com base no *Ratio H/W*.**

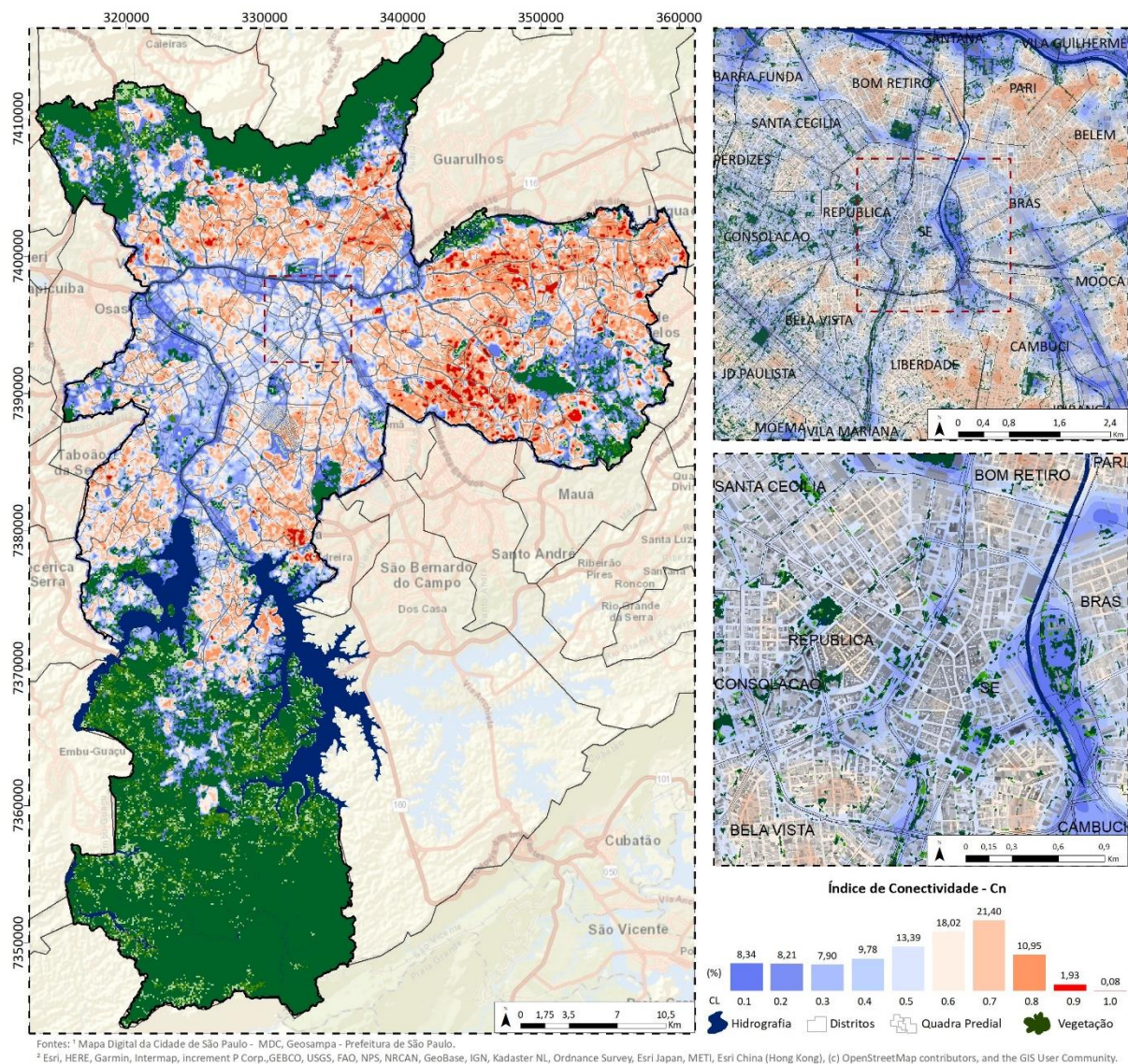


- Intensidade de Ocupação (Io)** – Como uma propriedade das coberturas urbanas que considera a intensidade de utilização da área do edificado junto ao solo (impermeabilidade) e em altura, o Índice de Intensidade de Ocupação (Io) foi calculado considerando a soma das áreas construídas (coberturas), em razão do número de pavimentos, ponderados pela área da grelha. Os resultados para a intensidade de ocupação indicam que 65,6% do SEU em São Paulo, concentram-se na primeira metade do histograma. Em média o SEU paulista é utilizado não apenas na subdivisão do lote junto ao solo, mas com intensidade de ocupação 4 vezes maior em altura. Na primeira metade do histograma os resultados concentram-se nas classes mais baixas com presença maciça das coberturas residenciais até dois pavimentos (27,3%). Os valores mais elevados (acima de 0.8), perfazem 4,7% do SEU, nestes espaços a intensidade ocupação atinge limiares extremos de coberturas construídas por pavimentos, o que pode ser utilizado como uma medida de regulação do uso do solo e controlo da densidade urbana (Figura 67).



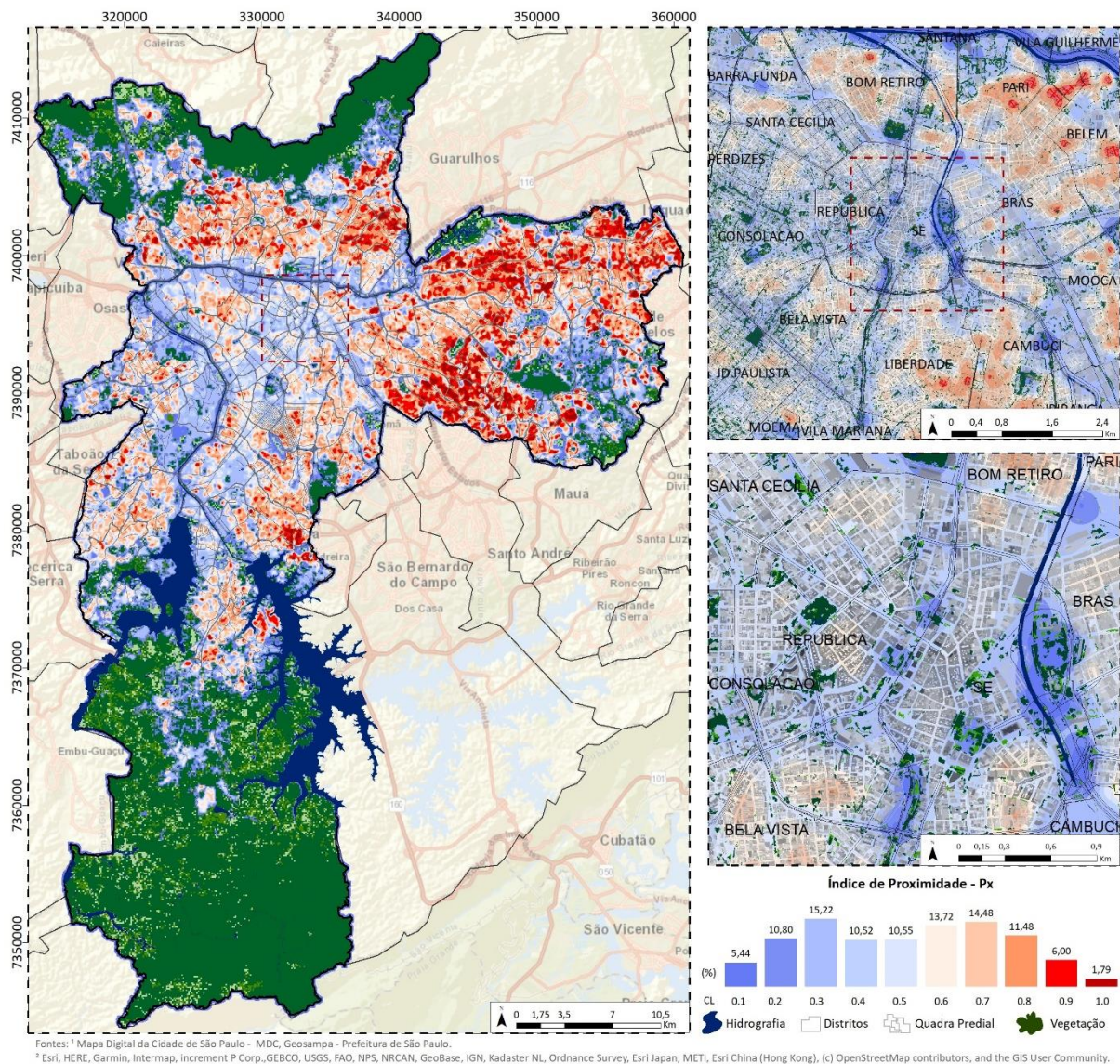
**Figura 67 - Intensidade de Ocupação (Io) das coberturas urbanas em São Paulo.**

- Conectividade (Cn)** – A conectividade corresponde ao nível de elementos agrupados sem interrupções. Como uma propriedade de organização das coberturas em meio urbano, a conectividade avalia o nível de geminação entre espaços construídos, sendo calculada com base no somatório das áreas dos edifícios dissolvidos em um bloco contínuo, em razão do número de edifícios com paredes geminadas. Os resultados globais para a propriedade de conectividade das coberturas urbanas concentram-se na segunda metade do histograma (52,4%). Os valores mais elevados (acima de 0.8), perfazem cerca de 2,01% do SEU. Estes locais indicam a presença maciça de blocos geminados na célula, o que configuram uma única tipologia de cobertura impermeável. A maior concentração dos resultados foi na classe 0.7 (21,4%) e os valores mais baixos de conectividade das coberturas urbanas perfazem cerca de 16,5%, correspondente aos espaços urbanos no qual não ocorrem a presença de blocos de edifícios com áreas totalmente geminadas (Figura 68).



**Figura 68 – Conectividade (Cn) das coberturas urbanas em São Paulo.**

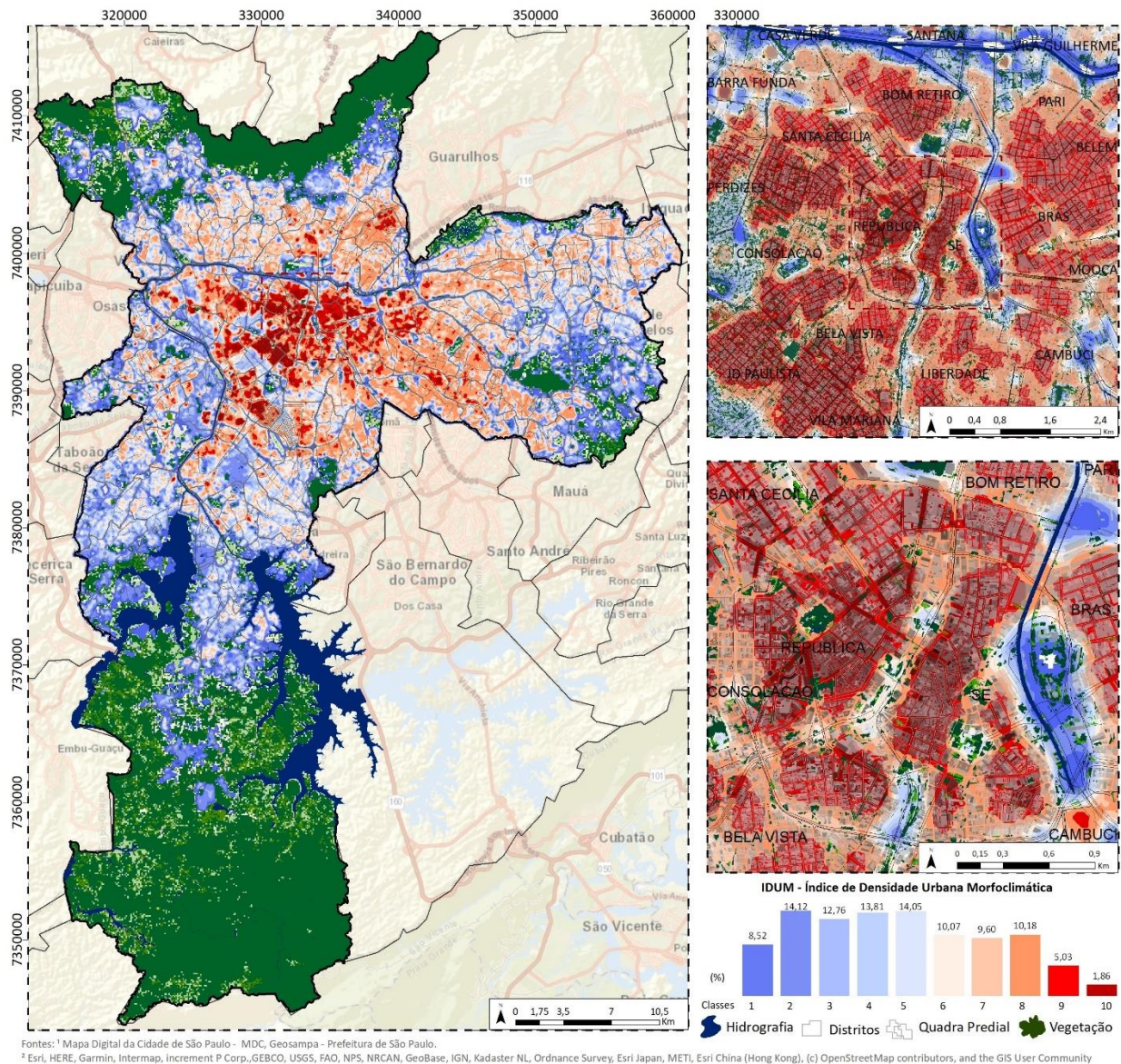
- Proximidade (Px)** – A proximidade corresponde ao espaçamento entre dois elementos do mesmo grupo (coberturas de espaços construídos), criando padrões de organização e revelando contrastes em relação com os elementos circundantes. A proximidade foi calculada com base na adaptação do índice proposto por Nie e Xu (2015), o qual propõe que os edifícios sejam dissolvidos em blocos contínuos e avaliado a distância média em relação aos blocos vizinhos na mesma unidade. Os resultados indicam a concentração na primeira metade do histograma (52,5%). Os valores máximos (acima de 0.8), ou seja, coberturas construídas muito próximas (não geminadas) perfazem um total de 7,8%. Estes espaços podem ser verificados com maior frequência nas áreas de moradias irregulares, desprovidas de grandes espaços de separação. Cerca de 16% do SEU em São Paulo apresenta baixo nível de proximidade das coberturas urbanas. Estes espaços estão localizados, em áreas verticalizadas, os quais a presença de grandes edifícios é minimamente distanciada em relação aos prédios vizinhos (Figura 69).



**Figura 69 – Proximidade (Px) das coberturas urbanas em São Paulo.**

## 5.5. Análise do Índice de Densidade Urbana Morfoclimática

Após a análise dos resultados por valores globais, procurou-se delimitar os espaços urbanos mais críticos do ponto de vista morfológico por meio do Índice de Densidade Urbana Morfoclimática – IDUM (Figura 70). A espacialização cartográfica indica que a distribuição a nível do Município de São Paulo não ocorre uniformemente com cerca de 7% dos espaços urbanos com níveis elevados de densidade urbana morfoclimática. Estes espaços estão localizados principalmente nos distritos próximos ao antigo centro da cidade (Sé, República, Brás, Santa Cecília, Bom Retiro, Pari, Mooca) e no Espigão Central da Avenida Paulista (Bela Vista, Consolação, Jardim Paulista, Vila Mariana), com tendência para modificar o fluxo de ar em sua velocidade e direção criando condições para estagnação do fluxo de ar devido a superfície urbana de grande aspereza e volumetria e condições desfavoráveis aos corredores de ventilação urbana.



**Figura 70 – Índice de Densidade Urbana Morfoclimática em São Paulo.**

## 5.6. Análise de correlações entre as propriedades morfoclimáticas

Após a espacialização cartográfica e uma primeira análise dos resultados globais para todos os indicadores morfoclimáticos, procedeu-se a análise das matrizes de valores convertidos em classes que variam entre 0 (para os valores mais baixos) e 1,0 (para valores mais elevados), para estabelecer possíveis correlações (negativas ou positivas) e compreender quais propriedades morfoclimáticas podem ser redundantes neste tipo de estudo (Tabela 13).

**Tabela 13** – Coeficiente de correlação entre as propriedades morfoclimáticas.

Índices	Cx	Cp	Dr	Sn	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>Cx</b>	1,00	0,47	0,50	0,28	0,15	0,40	0,04	0,29	0,55	0,71	0,77	0,70
<b>Cp</b>	0,47	1,00	0,51	0,37	0,56	0,51	0,42	0,29	0,54	0,57	0,09	0,10
<b>Dr</b>	0,50	0,51	1,00	0,67	0,37	0,53	0,26	0,30	0,73	0,61	0,33	0,38
<b>Sn</b>	0,28	0,37	0,67	1,00	0,29	0,29	0,25	0,09	0,44	0,19	0,16	0,14
<b>Rg</b>	0,15	0,56	0,37	0,29	1,00	0,69	0,74	0,66	0,44	0,33	0,03	0,06
<b>Po</b>	0,4	0,51	0,53	0,29	0,69	1,00	0,69	0,66	0,64	0,60	0,36	0,37
<b>Vt</b>	0,04	0,42	0,26	0,25	0,74	0,69	1,00	0,62	0,20	0,30	0,07	0,03
<b>Oc</b>	0,29	0,29	0,3	0,09	0,66	0,66	0,62	1,00	0,40	0,42	0,33	0,50
<b>Im</b>	0,55	0,54	0,73	0,44	0,44	0,64	0,20	0,40	1,00	0,79	0,47	0,50
<b>Io</b>	0,71	0,57	0,61	0,19	0,33	0,60	0,30	0,42	0,79	1,00	0,20	0,12
<b>Cn</b>	0,77	0,77	0,33	0,16	0,03	0,36	0,07	0,33	0,47	0,20	1,00	0,83
<b>Px</b>	0,70	0,10	0,38	0,14	0,06	0,37	0,03	0,50	0,50	0,12	0,83	1,00

Os resultados com base na Função CORREL (Coeficiente de Correlação do *software* Excel), indicam que a Complexidade (Cx) das estruturas urbanas correlação elevada com as propriedades de Conectividade (0,77), Intensidade de ocupação (0,70), Proximidade (0,70). As menores correlações foram com os resultados de propriedades do tecido urbano, principalmente como a Verticalidade (0,04) e Rugosidade aerodinâmica (0,15). Os valores de Compacidade (Cp) das estruturas urbanas possuem correlação maior correlação com a Intensidade de ocupação (0,57), Rugosidade aerodinâmica (0,56) e Impermeabilidade (0,54), os menores valores de correlações são verificados com as propriedades de Conectividade (0,09) e Proximidade (0,10). A direcionalidade das estruturas urbanas apresentou maior correlação com os resultados de Impermeabilidade (0,73) e Complexidade (0,71), por outro lado a menor frequência de correlações ocorre com os resultados de Oclusividade do tecido urbano (0,30). Os resultados de Sinuosidade (Sn) apresentaram maior correlação com a direcionalidade das estruturas (0,67) e baixa correlação com as propriedades de Oclusividade (0,09), Proximidade (0,14) e Conectividade (0,16).

A Rugosidade Aerodinâmica (Rg) apresentou menor correlação com os resultados de conectividade e proximidade das coberturas urbanas (0,03 e 0,06 respectivamente) e maior correlação recíproca com a verticalidade do tecido urbano (0,74). A Verticalidade (Vt) apresentou menor correlação com os resultados de Proximidade (0,3), Complexidade (0,4) e Conectividade (0,7). A Porosidade (Po) e a

Oclusividade (Oc) apresentaram baixa correlação com os resultados de sinuosidade das estruturas urbanas (0,29 e 0,09 respectivamente). A Porosidade possui maior correlação com as propriedades de Rugosidade e Verticalidade (0,69), já a Oclusividade do tecido urbano apresentou maior correlação com a Rugosidade e Porosidade (0,66).

Os valores de Impermeabilidade (Im) apresentaram correlação elevada com a Intensidade de Ocupação (Io) (0,79), ao passo que a Verticalidade foi a propriedade que menos apresentou correlação com a Impermeabilidade (0,2). Os resultados de Proximidade apresentam correlação baixa com Intensidade de Ocupação (0,12). A Conectividade apresentou alta correlação com a Proximidade das coberturas (0,83), sendo ambas propriedades com baixa correlação com as propriedades aerodinâmicas dos tecidos urbanos (rugosidade com 0,03, 0,06 e verticalidade com 0,07 e 0,03).

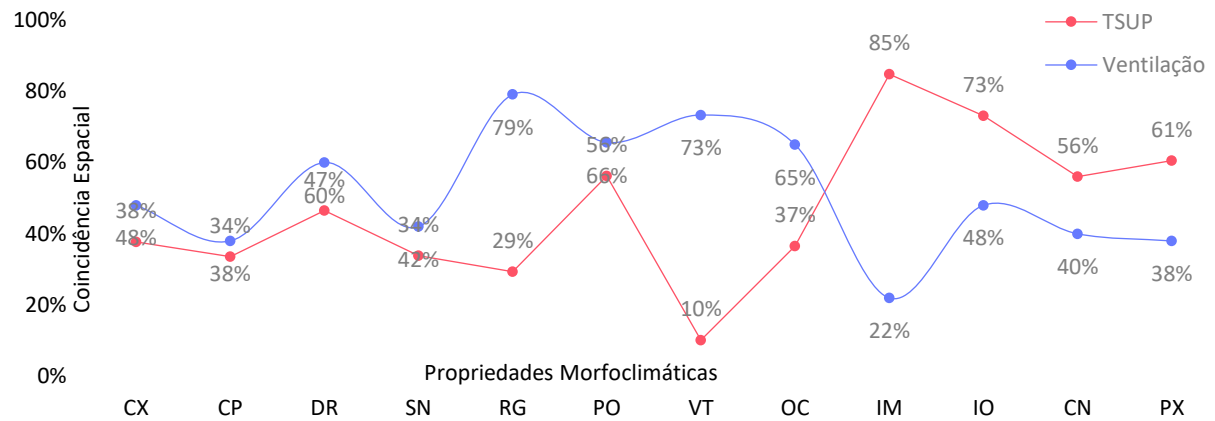
### **5.7. Análise da coincidência espacial entre as propriedades morfoclimáticas com a $T_{SUP}$ e ventilação natural**

Para ser possível a análise da coincidência espacial entre as propriedades morfoclimáticas com a  $T_{SUP}$  e ventilação natural os resultados foram generalizados de modo a apresentarem a mesma resolução de armazenamento, ainda que suas cartografias de análise tenham sido realizadas em outras resoluções. Segundo Moura (2003, p. 70) é comum que em uma análise espacial as variáveis que compõem os planos de informação apresentem fontes de dados diferentes e escalas diferentes, o que resultaria em possibilidades diferentes de resoluções espaciais. O procedimento indicado segundo autora é a adoção da pior resolução entre as praticadas (maior dimensão de pixel), pois não é cartograficamente correto reduzir a resolução e melhorar a representação de um dado cuja fonte era de pior qualidade, neste caso a ventilação natural. Devido a diferença de escalas entre as análises, os resultados das componentes climáticas foram extraídos para uma grade constituída por células com dimensões de 1km para reamostragem em uma unidade comum, para que todos os valores fossem padronizados e classificados segundo a frequência em 10 classes pelo método de quebra naturais presente no ArcGis ArcMap.

Os resultados indicam que a  $T_{SUP}$  apresentou maior coincidência espacial com as propriedades das coberturas urbanas, em média na ordem de 69% dos resultados, com maior frequência para as propriedades de Impermeabilidade (85%), seguido da Intensidade de Ocupação (73%). Os resultados de verticalidade apresentaram baixa coincidência espacial com a  $T_{SUP}$  (10%), seguida da Rugosidade (29%) e da Oclusividade (33%). Para as propriedades relacionadas com as estruturas urbanas em sua geometria e espacialização, verificou-se maior coincidência espacial com a propriedade de Direcionalidade da forma (47%) e menor com a Sinuosidade (38%) (Figura 71).

Para a ventilação natural a maior coincidência espacial foi com as propriedades do tecido urbano principalmente a Rugosidade (79%) e a Verticalidade (73%). As propriedades de Direcionalidade (60%) e Complexidade (48%) apresentaram maior coincidência espacial em relação aos resultados para análise do

vento. Em comparação com as propriedades dos tecidos e estruturas as urbanas, os resultados para as propriedades morfoclimáticas das coberturas urbanas foram as que apresentaram menor coincidência espacial com a ventilação natural, com destaque para a Intensidade de ocupação (48%) e a Conectividade (38%).



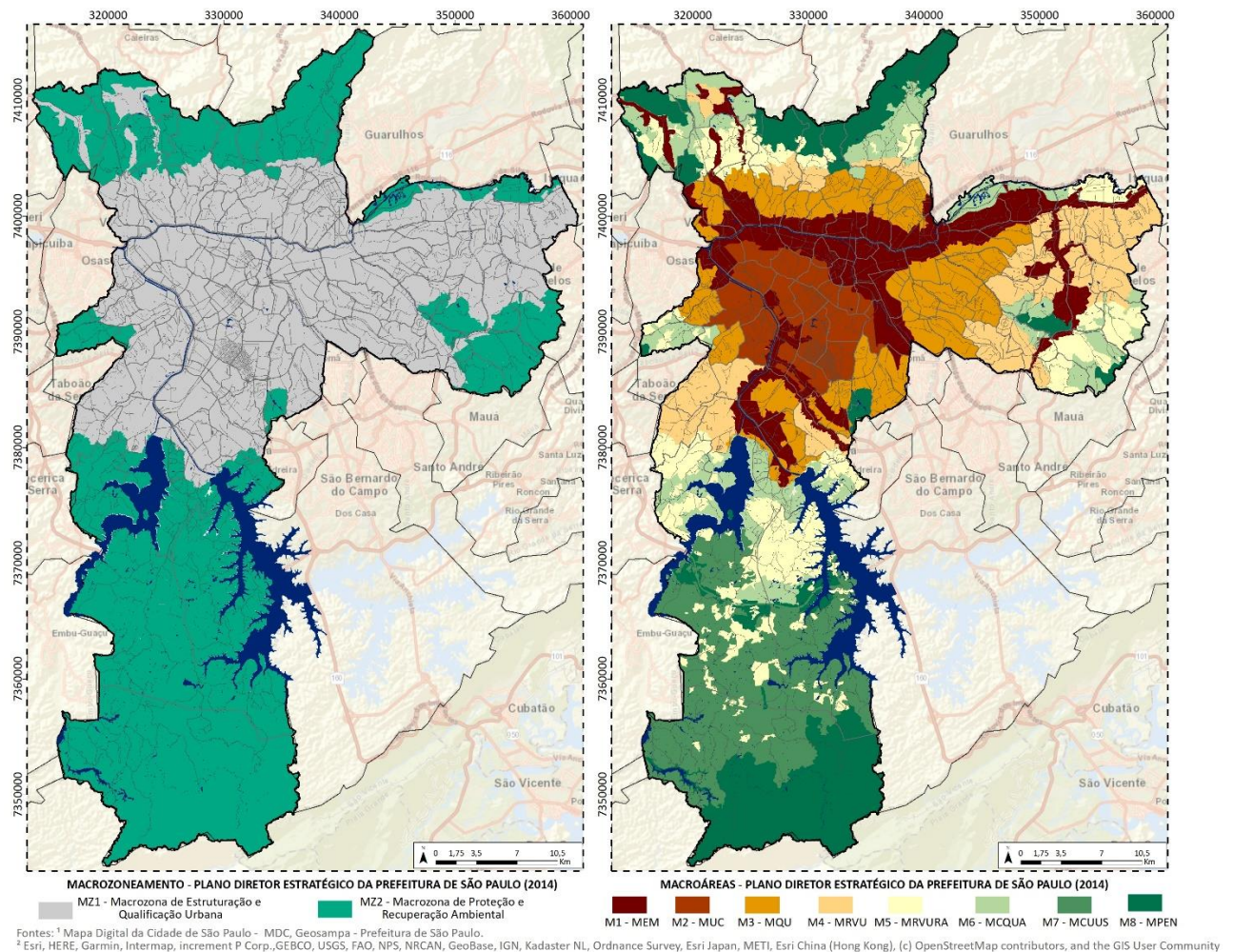
**Figura 71** – Coincidência espacial entre a ventilação natural e a  $T_{SUP}$  com as propriedades morfoclimáticas.

Por meio das cartografias de propriedades morfoclimáticas é possível identificar os espaços que sofreram com a intensa verticalização e intensidade de ocupação (áreas centrais por exemplo) e as possíveis relações com as áreas com tendência para a baixa ventilação natural e os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  São Paulo. No entanto, a interpretação destes resultados ao nível global dificilmente releva a dimensão dos contrastes entre estruturas, tecidos e coberturas urbanas presentes na capital paulista, o que dificulta a proposição de orientações e zoneamento morfoclimático. Os valores mais elevados de Verticalidade (cerca de 2%), por exemplo, podem induzir a interpretação de que o tecido urbano na capital paulista é extremamente baixo, como de fato é se considerarmos toda a área urbanizada da MSP. No entanto, apesar de ser relativamente baixo em comparação com as outras classes, os valores mais elevados de Verticalidade podem estar associados a regiões específicas, no qual a presença de edifícios “arranha-céus” que atingem alturas médias superiores aos 100m (para uma unidade de análise de 100m). Portanto, os valores globais necessitam de análise pormenorizada para delimitação das áreas prioritárias às intervenções por parte do ordenamento do território.

A espacialização cartográfica é neste sentido, fundamental para identificar concentrações de determinadas propriedades da forma urbana que podem estar associadas aos pontos de estagnação do fluxo de ar aos valores mais elevados de  $T_{SUP}$ . Para esta finalidade procurou-se analisar os resultados por meio da discussão das macroáreas, definidas pelo zoneamento presente no Plano Diretor Municipal de São Paulo (PDE, 2014). Em seguida, os resultados foram agrupados num modelo de zoneamento da densidade urbana morfoclimática, para então se verificar a conformidade do zoneamento pré-estabelecido com a informação morfoclimática produzida nesta tese.

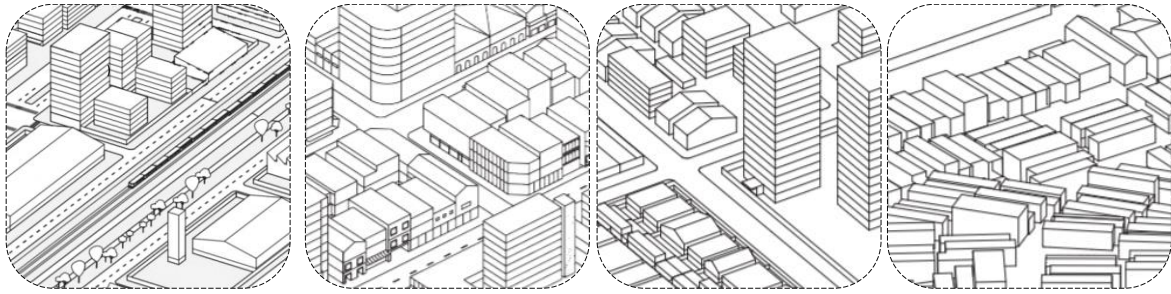
## 5.8. Caracterização Morfoclimática do Macrozoneamento do Plano Diretor Estratégico de São Paulo (PDE, 2014)

O Município de São Paulo, autorizou em 31 de julho de 2014, a vigência do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo (PDE, 2014), como lei municipal que teve como propósito orientar as ações de desenvolvimento e crescimento da cidade até o ano de 2030. Nesta perspectiva foram criadas no PDE (2014) duas macrozonas contendo quatro macroáreas cada, que visam orientar, ao nível do território, os objetivos específicos de desenvolvimento urbano e a aplicação dos instrumentos urbanísticos e ambientais (Figura 72).



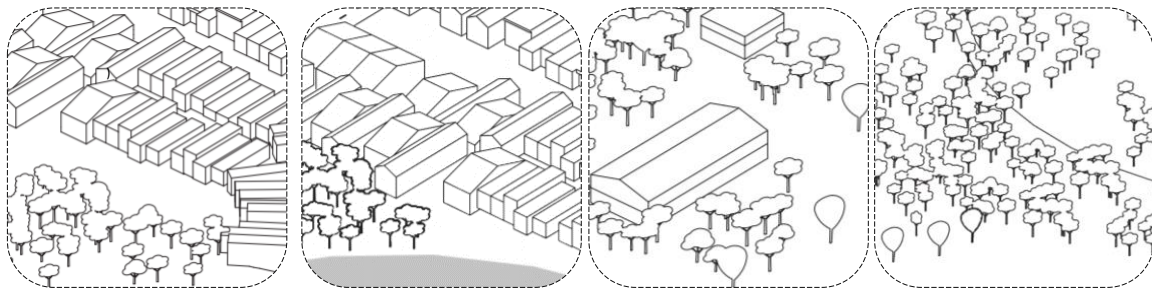
**Figura 72** – Macrozonas (I) e Macroáreas (II) estabelecidas pelo Plano Diretor Estratégico da Metrôpole de São Paulo. Fonte: Plano Diretor Estratégico - PDE (2014).

A Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana (MZ1) está situada integralmente na Zona Urbana (Figura 73), apresenta grande diversidade de padrões de uso e ocupação do solo, desigualdade socioespacial, padrões diferenciados de urbanização, subdivididos em 4 (quatro) macroáreas: I - Macroárea de Estruturação Metropolitana (M1 - MEM), II - Macroárea de Urbanização Consolidada (M2 - MUC), III - Macroárea de Qualificação da Urbanização (M3 - MQU) e IV - Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (M4 - MRVU).



**Figura 73** – Tipologias de espaços urbanos da Macrozona de Estruturação e Qualificação Urbana (MZ1): I) MEM; II) MCU; III) MQU; e IV) MRVU. Fonte: Plano Diretor Estratégico - PDE (2014).

Na Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental (MZ2) foram utilizadas como unidades de análise somente as duas macroáreas que possuem dados dos espaços construídos (Figura 74): V - Macroárea de Redução da Vulnerabilidade e Recuperação Ambiental (M5 – MRVRA) e VI - Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 – MCQUA). As Macroáreas VII - Contenção Urbana e Uso Sustentável (M7 - MCUUS) e IV - Macroárea de Preservação de Ecossistemas Naturais (M8 – MPEN) apresentam poucas tipologias de assentamentos urbanos, com predomínio de áreas de remanescentes florestais naturais e, portanto, não foram aplicadas as discussões desta tese.



**Figura 74** – Tipologias de espaços urbanos na Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental (MZ2): I) MRVRA; II) MCQUA; III) MCUUS; e IV) MPEN. Fonte: Plano Diretor Estratégico - PDE (2014).

### **M1 – Macroárea de Estruturação Metropolitana (MEM)**

A Macroárea de Estruturação Metropolitana (M1 - MEM) abrange as planícies fluviais dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, articulada ao centro antigo (Sé e República) e com prolongamento junto às principais avenidas da cidade (Figura 75). Na M1 - MEM, a  $T_{SUP}$  média maior ocorre nos espaços construídos que possuem como característica em comum a presença de grandes volumes de blocos de edifícios geminados, antigos galpões industriais e edifícios revestidos de materiais com grande capacidade térmica que são característicos desta zona. Durante o período quente e úmido verificou-se que 39,5% dos resultados apresentam a  $T_{SUP}$  na ordem 28°C a 37% acima dos 28°C (Figura 76). Durante a estação fria e seca apenas 0,09% dos espaços urbanos na M1 – MEM apresentam  $T_{SUP}$  acima de 28°, ao passo que a maior parte dos resultados para este período foi na ordem dos 25°C (40,98%).

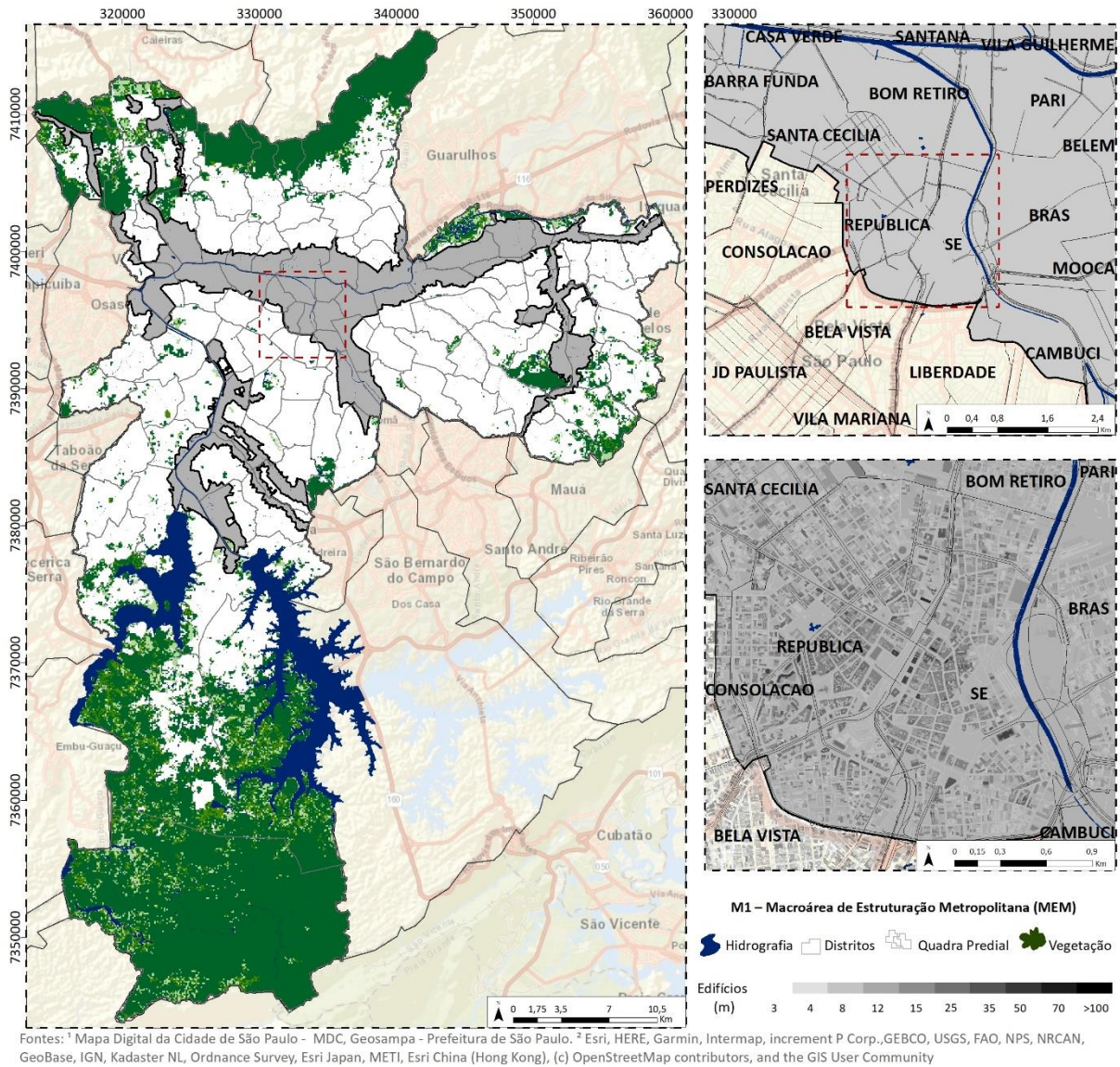


Figura 75 – Localização da M1 – Macroárea de Estruturação Metropolitana (MEM).

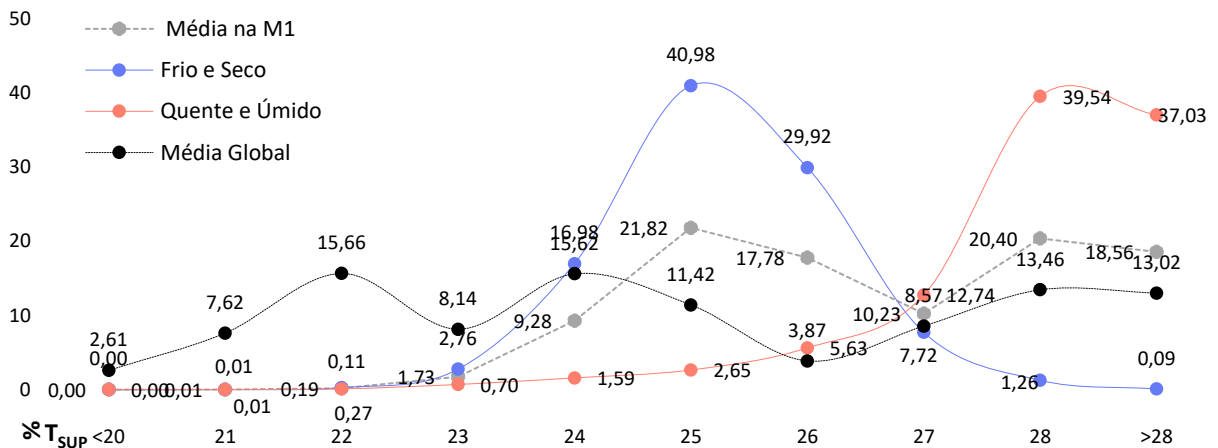
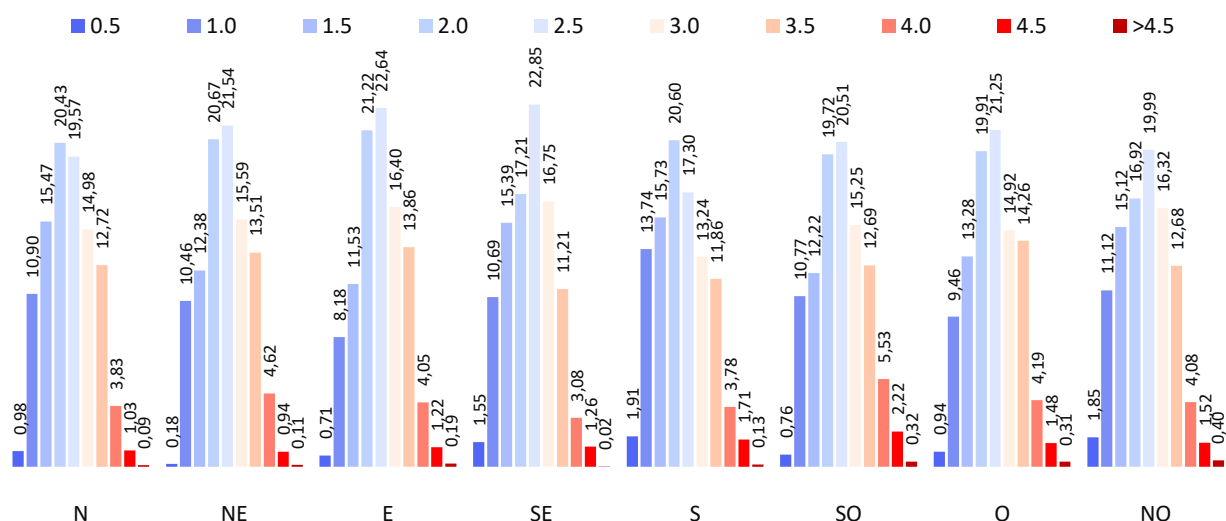


Figura 76 - T<sub>SUP</sub> estacional na Macroárea de Estruturação Metropolitana (MEM).

Para a ventilação natural é possível verificar variações na velocidade dos ventos por direções em relação à média global (Tabela 14). As zonas com tendência para a estagnação do fluxo de ar (valores inferiores a 1 m/s) apresentam uma redução em relação à média global para todo o SEU de São Paulo (10,9%), com maior intensidade nas direções predominantes do vento S (15,6%) e SE (12,2%) e menor concentração na direção E (8,9%). Verifica-se a ocorrência dos resultados entre as velocidades de 1 m/s (10,7%) e 3.5m/s (12,8 %), com maior frequência na ordem de 2.0 m/s (19,6% em média) e 2.5 m/s (20,7% em média). As zonas de possível aceleração dos ventos (acima de 4.5 m/s) representam em média menos de 2% dos espaços urbanos, valor este inferior à média global (7,6%). Os espaços com tendência para aceleração do fluxo de ar apresentam valores de SO na ordem de 2,5% (Figura 77).

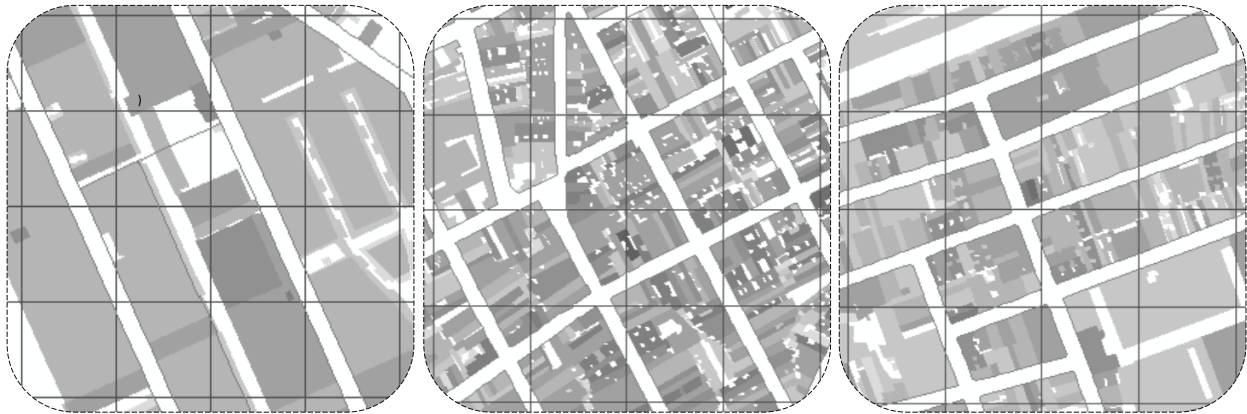
**Tabela 14 - Ventilação natural na M1 – MEM por classe de velocidade e direção.**

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	MD/ M1	MD/Global
<b>0.5</b>	0,98	0,18	0,71	1,55	1,91	0,76	0,94	1,85	1,11	2,98
<b>1.0</b>	10,90	10,46	8,18	10,69	13,74	10,77	9,46	11,12	10,66	13,61
<b>1.5</b>	15,47	12,38	11,53	15,39	15,73	12,22	13,28	15,12	13,89	15,50
<b>2.0</b>	20,43	20,67	21,22	17,21	20,60	19,72	19,91	16,92	19,59	15,29
<b>2.5</b>	19,57	21,54	22,64	22,85	17,30	20,51	21,25	19,99	20,71	14,33
<b>3.0</b>	14,98	15,59	16,40	16,75	13,24	15,25	14,92	16,32	15,43	11,74
<b>3.5</b>	12,72	13,51	13,86	11,21	11,86	12,69	14,26	12,68	12,85	8,60
<b>4.0</b>	3,83	4,62	4,05	3,08	3,78	5,53	4,19	4,08	4,15	7,72
<b>4.5</b>	1,03	0,94	1,22	1,26	1,71	2,22	1,48	1,52	1,42	7,46
<b>&gt; 4.5</b>	0,09	0,11	0,19	0,02	0,13	0,32	0,31	0,40	0,20	2,77



**Figura 77 – Classes de velocidades do vento por direções na Macroárea de Estruturação Metropolitana (MEM).**

A morfologia urbana na M1 - MEM é caracterizada por intensos processos de transformação econômica e diferentes padrões de uso e ocupação do solo (PDE, 2014). Nesta macroárea ocorre a concentração de indústrias herdadas do passado, novas atividades produtivas, polos de atividades terciárias e infraestruturas que fazem parte do subsistema de integração urbana. Essas características configuram um SEU com diversos padrões de estruturas, tecidos e coberturas como mostra a Figura 78.

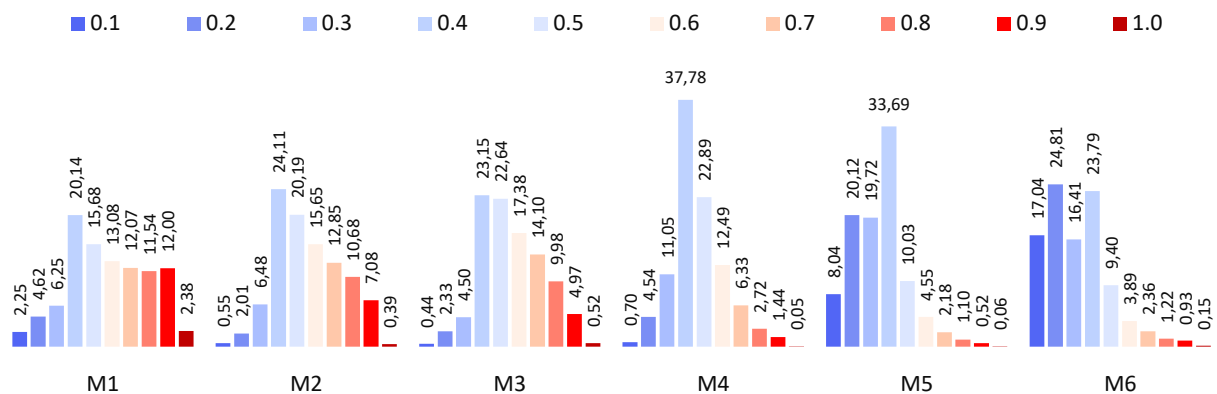


**Figura 78** - Exemplos de tipologias do Subsistema de Espaços Construídos na M1 – MEM.

A análise morfoclimática indicou que os valores mais elevados (acima de 0.8) para a propriedade de Direcionalidade (Dr) das estruturas urbanas perfazem 14,38% dos resultados, sendo os valores mínimos (abaixo de 0.3) inferiores a 5% (Tabela 15 e Figura 79). Outra característica da morfologia urbana na M1 – MEM é a presença de valores extremos de sinuosidade das estruturas urbanas (acima de 0.8), no qual, 8,47% dos espaços urbanos apresentam valores quatro vezes superiores à média global para São Paulo (1,97%) (Tabela 16 e Figura 80).

**Tabela 15**– Direcionalidade (Dr) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

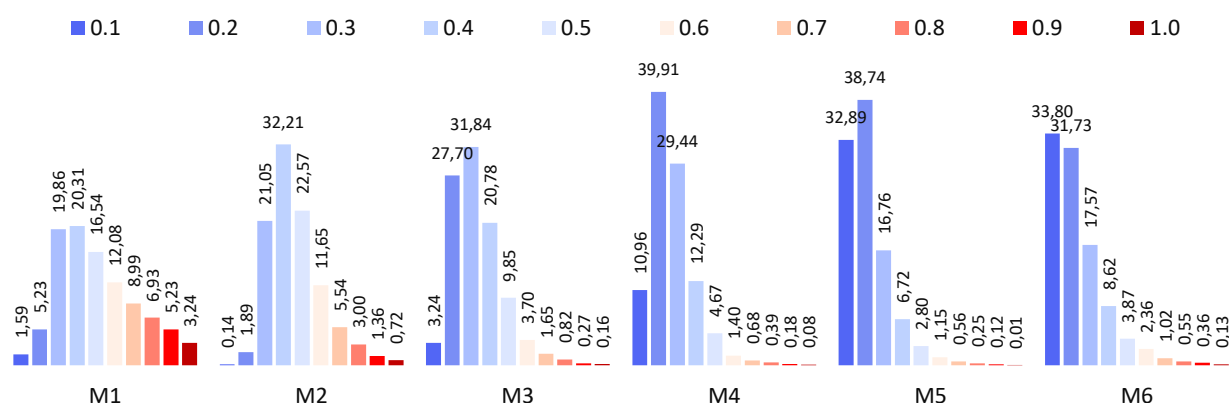
Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
<b>0.1</b>	2,25	0,55	0,44	0,70	8,04	17,04	4,84
<b>0.2</b>	4,62	2,01	2,33	4,54	20,12	24,81	9,74
<b>0.3</b>	6,25	6,48	4,50	11,05	19,72	16,41	10,73
<b>0.4</b>	20,14	24,11	23,15	37,78	33,69	23,79	27,11
<b>0.5</b>	15,68	20,19	22,64	22,89	10,03	9,40	16,80
<b>0.6</b>	13,08	15,65	17,38	12,49	4,55	3,89	11,17
<b>0.7</b>	12,07	12,85	14,10	6,33	2,18	2,36	8,31
<b>0.8</b>	11,54	10,68	9,98	2,72	1,10	1,22	6,21
<b>0.9</b>	12,00	7,08	4,97	1,44	0,52	0,93	4,49
<b>1.0</b>	2,38	0,39	0,52	0,05	0,06	0,15	0,59



**Figura 79** – Direcionalidade (Dr) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

**Tabela 16 - Sinuosidade (Sn) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.**

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
<b>0.1</b>	1,59	0,14	3,24	10,96	32,89	33,80	13,77
<b>0.2</b>	5,23	1,89	27,70	39,91	38,74	31,73	24,20
<b>0.3</b>	19,86	21,05	31,84	29,44	16,76	17,57	22,76
<b>0.4</b>	20,31	32,21	20,78	12,29	6,72	8,62	16,82
<b>0.5</b>	16,54	22,57	9,85	4,67	2,80	3,87	10,05
<b>0.6</b>	12,08	11,65	3,70	1,40	1,15	2,36	5,39
<b>0.7</b>	8,99	5,54	1,65	0,68	0,56	1,02	3,07
<b>0.8</b>	6,93	3,00	0,82	0,39	0,25	0,55	1,99
<b>0.9</b>	5,23	1,36	0,27	0,18	0,12	0,36	1,25
<b>1.0</b>	3,24	0,72	0,16	0,08	0,01	0,13	0,72

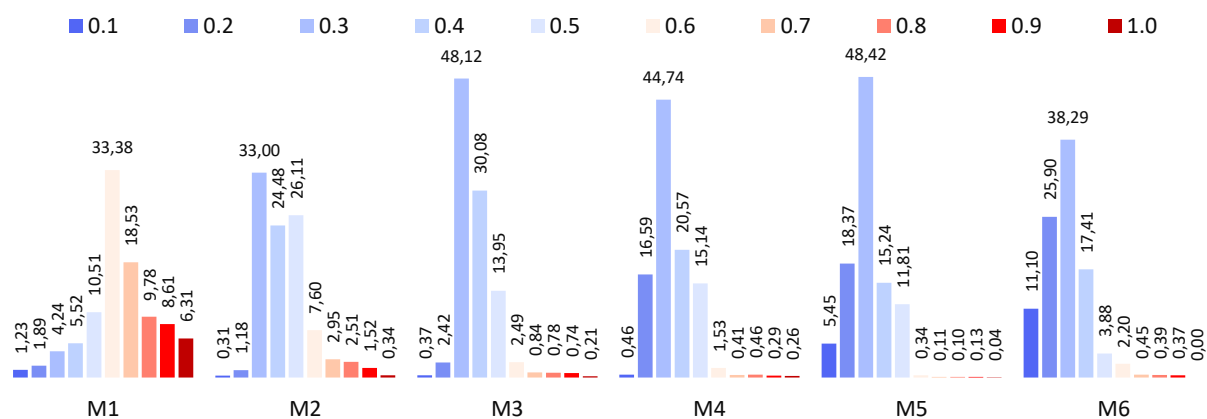


**Figura 80 – Sinuosidade (Sn) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.**

Os resultados para compacidade das estruturas urbanas apresentaram maior concentração na segunda metade do histograma. As classes superiores a 0.5 quando somadas perfazem 76,61% dos resultados (Tabela 17 Figura 81). Os valores de baixa compacidade (abaixo de 0.3) quando somados perfazem cerca de 3,12%. Nos distritos intersectados pelo rio Tamanduateí, na Zona Central e na direção Este do Município, a presença de grandes blocos de edificado e antigas e estruturas que serviram de galpões industriais situados nos distritos da Mooca, Cambuci, Vila Prudente e Ipiranga, revelam a concentração dos valores máximos de compacidade (14,92%).

**Tabela 17 – Compacidade (Cp) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.**

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
<b>0.1</b>	1,23	0,31	0,37	0,46	5,45	11,10	3,15
<b>0.2</b>	1,89	1,18	2,42	16,59	18,37	25,90	11,06
<b>0.3</b>	4,24	33,00	48,12	44,74	48,42	38,29	36,13
<b>0.4</b>	5,52	24,48	30,08	20,57	15,24	17,41	18,88
<b>0.5</b>	10,51	26,11	13,95	15,14	11,81	3,88	13,57
<b>0.6</b>	33,38	7,60	2,49	1,53	0,34	2,20	7,93
<b>0.7</b>	18,53	2,95	0,84	0,41	0,11	0,45	3,88
<b>0.8</b>	9,78	2,51	0,78	0,46	0,10	0,39	2,34
<b>0.9</b>	8,61	1,52	0,74	0,29	0,13	0,37	1,94
<b>1.0</b>	6,31	0,34	0,21	0,26	0,04	0,00	1,20



**Figura 81** – Compacidade (Cp) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

O tecido urbano da M1 – MEM que envolve o antigo centro da cidade (subprefeituras da República, Sé Brás, Pari, Santa Cecília, Bom Retiro), apresenta a maior concentração de *canyons* urbanos oclusos, no qual as ruas estreitas são confinadas por um conjunto de espaços construídos com elevada verticalidade e rugosidade. Nas áreas próximas ao Rio Pinheiros em direção à zona sul do Município são verificados também grandes volumes de edifícios (porosidade) que configuram elevados índices de rugosidade aerodinâmica em pontos específicos (Tabela 18 e Figura 82).

**Tabela 18** – Propriedades morfoclimáticas na M1 – Macroárea de Estruturação Metropolitana.

Classe/índice	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	5,72	1,23	1,59	2,25	17,85	0,17	10,27	14,18	2,66	3,93	12,49	4,20
<b>0.2</b>	18,87	1,89	5,23	4,62	32,22	0,97	31,77	16,21	5,64	10,83	14,70	11,78
<b>0.3</b>	14,38	4,24	19,86	6,25	23,56	1,41	38,14	25,92	6,48	11,34	9,23	24,80
<b>0.4</b>	14,09	5,52	20,31	20,14	13,36	4,96	8,84	28,80	6,73	12,16	10,32	11,64
<b>0.5</b>	14,35	10,51	16,54	15,68	6,31	19,38	3,48	7,48	16,68	12,06	13,50	10,83
<b>0.6</b>	12,38	33,38	12,08	13,08	3,06	39,09	1,82	3,82	14,71	12,07	15,67	11,92
<b>0.7</b>	10,31	18,53	8,99	12,07	1,96	18,46	1,58	1,86	12,57	11,87	14,66	10,86
<b>0.8</b>	6,50	9,78	6,93	11,54	1,07	7,53	1,27	1,03	19,23	11,11	8,01	8,10
<b>0.9</b>	2,79	8,61	5,23	12,00	0,57	5,64	1,71	0,54	10,52	8,08	1,29	4,63
<b>1.0</b>	0,61	6,31	3,24	2,38	0,04	2,38	1,12	0,16	4,78	6,55	0,12	1,23

Com relação as propriedades das coberturas urbanas, a impermeabilidade apresentou 61,81% dos resultados concentrados na segunda metade do histograma, sendo os valores mais elevados (acima de 0.8) na ordem de 15,3% e os valores mínimos (abaixo de 0.3) representam 8,3% (Tabela 19 e Figura 83). A intensidade de ocupação nesta macroárea apresentou uma distribuição homogênea dos resultados entre a primeira e segunda metade do histograma (na ordem de 50%), assim como, a proporção de valores extremos altos e baixos foram na ordem de 15% dos espaços urbanos (Tabela 20 e Figura 84).

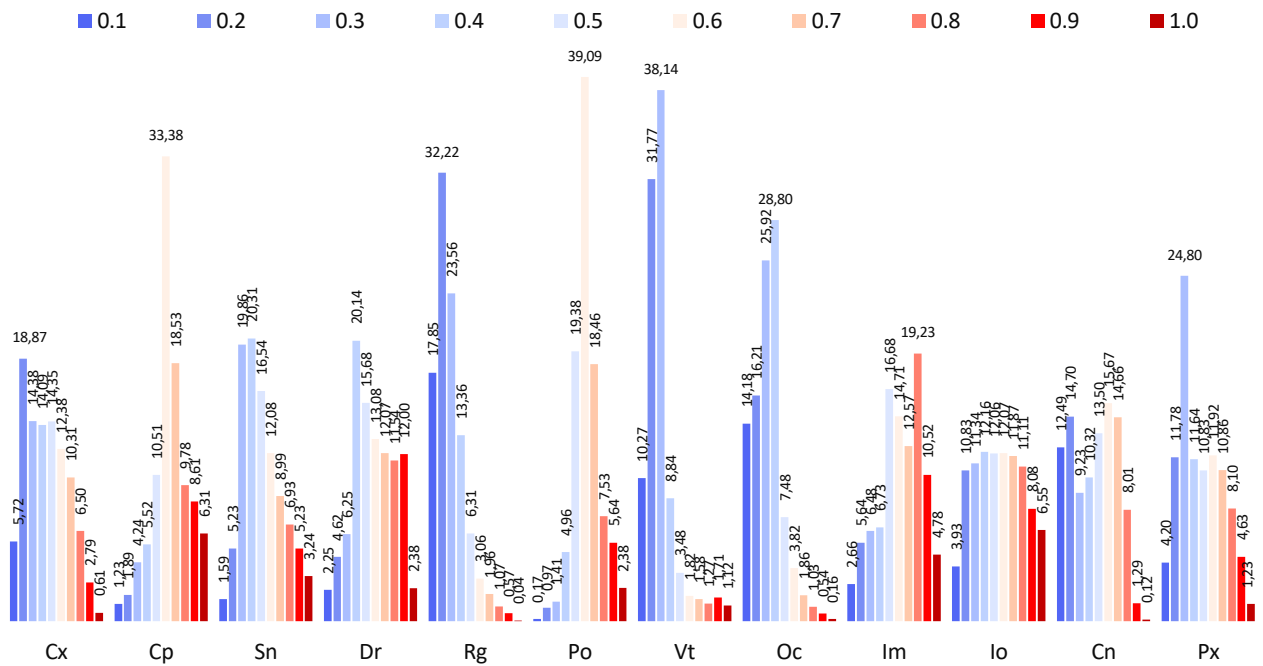


Figura 82 - Propriedades morfoclimáticas na M1 – Macroárea de Estruturação Metropolitana

Tabela 19 – Impermeabilidade (Im) das coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	2,66	4,42	5,33	9,53	31,86	24,16	12,99
0.2	5,64	6,27	5,14	10,99	15,16	11,63	9,14
0.3	6,48	8,55	5,98	12,42	12,25	9,11	9,13
0.4	6,73	6,89	5,81	10,52	7,96	5,08	7,16
0.5	16,68	22,68	25,44	35,57	19,76	42,26	27,06
0.6	14,71	21,67	32,00	16,66	8,28	5,30	16,44
0.7	12,57	16,82	14,26	2,58	3,68	1,11	8,50
0.8	19,23	11,15	4,69	0,78	0,93	1,01	6,30
0.9	10,52	0,87	0,88	0,58	0,08	0,27	2,20
1.0	4,78	0,68	0,47	0,38	0,04	0,07	1,07

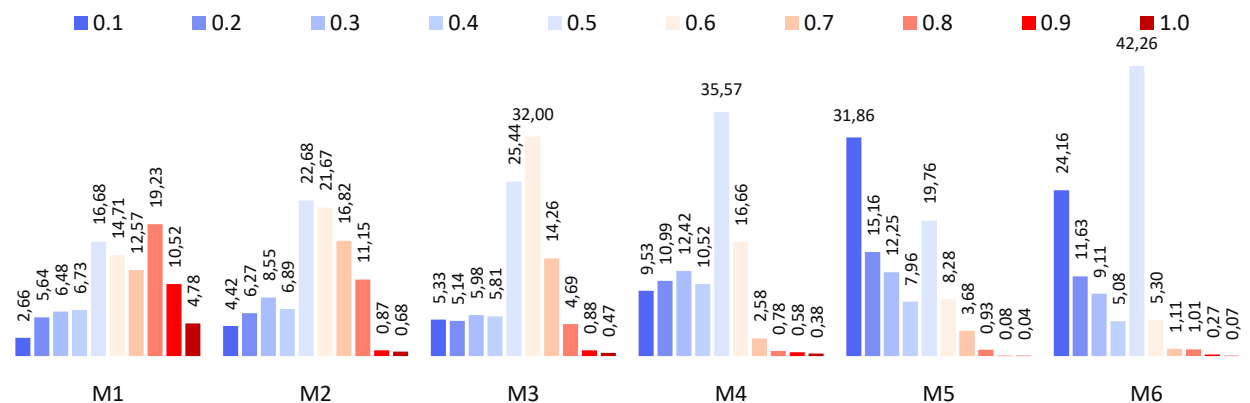
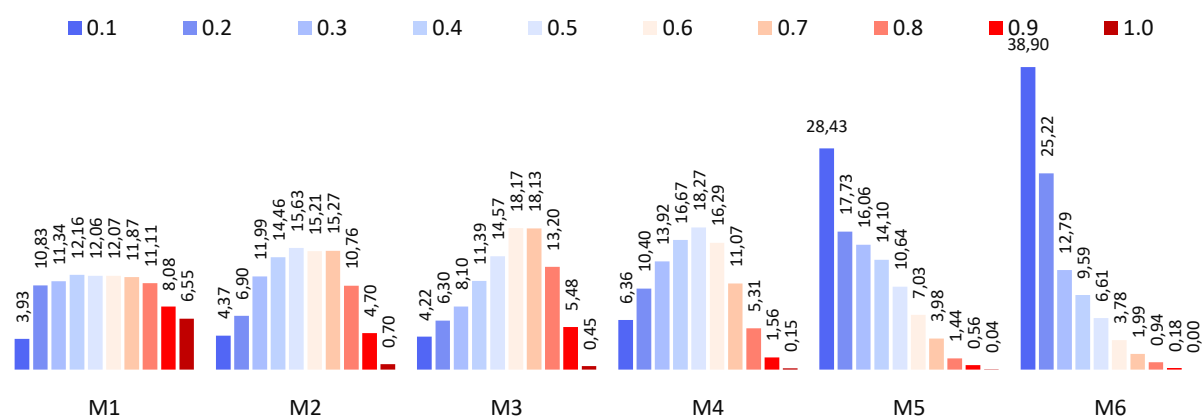


Figura 83 - Impermeabilidade (Im) das coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

**Tabela 20** - Intensidade de Ocupação (Io) das coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
<b>0.1</b>	3,93	4,37	4,22	6,36	28,43	38,90	14,37
<b>0.2</b>	10,83	6,90	6,30	10,40	17,73	25,22	12,90
<b>0.3</b>	11,34	11,99	8,10	13,92	16,06	12,79	12,37
<b>0.4</b>	12,16	14,46	11,39	16,67	14,10	9,59	13,06
<b>0.5</b>	12,06	15,63	14,57	18,27	10,64	6,61	12,96
<b>0.6</b>	12,07	15,21	18,17	16,29	7,03	3,78	12,09
<b>0.7</b>	11,87	15,27	18,13	11,07	3,98	1,99	10,39
<b>0.8</b>	11,11	10,76	13,20	5,31	1,44	0,94	7,13
<b>0.9</b>	8,08	4,70	5,48	1,56	0,56	0,18	3,43
<b>1.0</b>	6,55	0,70	0,45	0,15	0,04	0,00	1,31



**Figura 84** - Intensidade de Ocupação (Io) das coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

### M2 - Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC)

A Macroárea de Urbanização Consolidada (M2 - MUC) apresenta fortes contrastes em sua morfologia urbana, caracterizada por um padrão elevado de urbanização, saturação viária, concentração de empregos e serviços e verticalidade (PDE, 2014) (Figura 85). Os valores para análise global de  $T_{SUP}$  na M2 - MUC aparecem agrupados nas classes intermediárias. Para o período quente e úmido a  $T_{SUP}$  apresentou 44,12% dos resultados agrupados na ordem dos 28°C e acima dos 28°C (17,64%). Devido à topografia e a morfologia urbana desta macroárea, a  $T_{SUP}$  ao ser analisada por imagens orbitais, sofre a interferência das sombras locais como foi referido por Oke et al. (2017, p. 136), principalmente durante a estação fria e seca, com 40,27% dos resultados na ordem de 23°C e 29,92% nos 24°C (Figura 86).

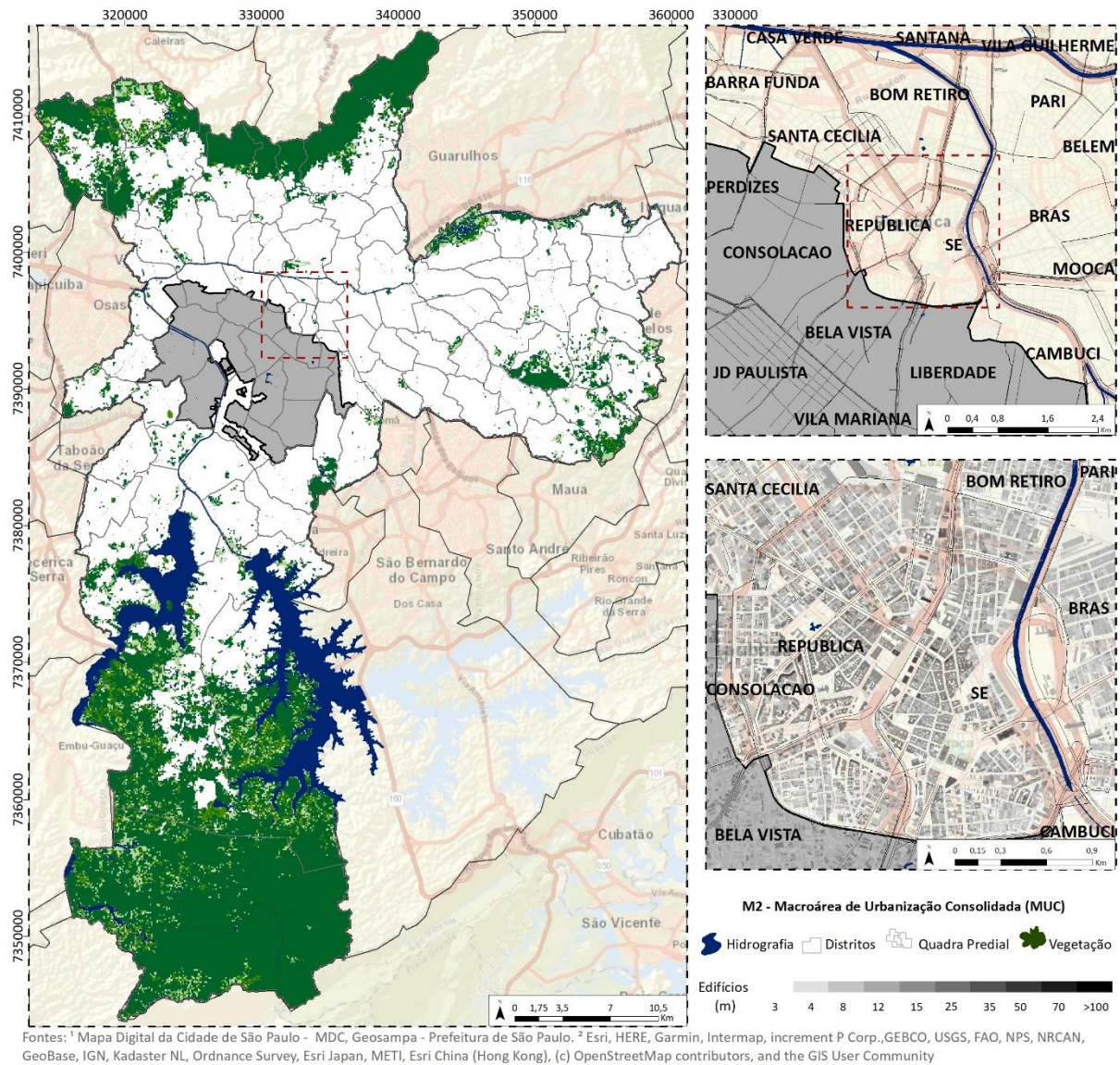


Figura 85 – Localização da M2 - Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).

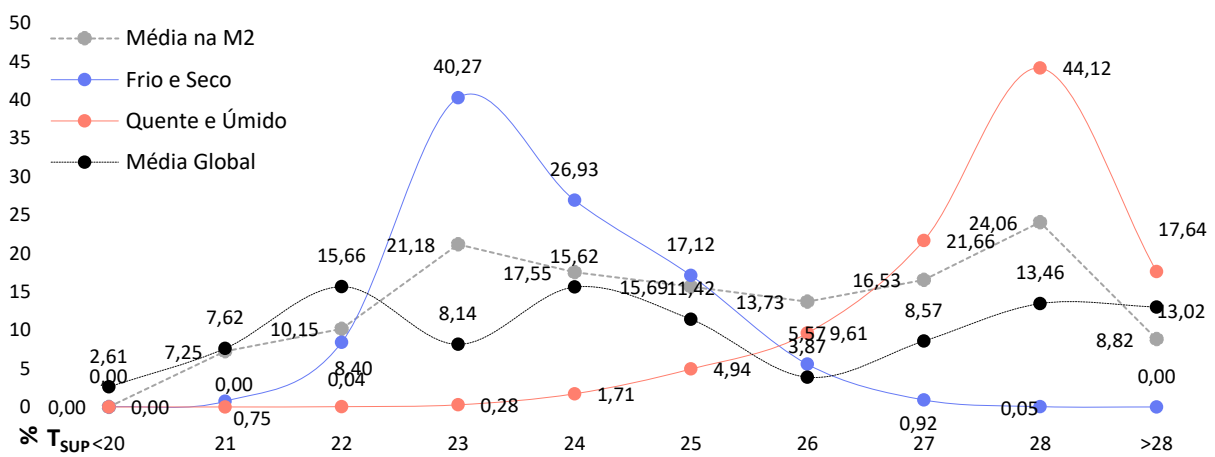
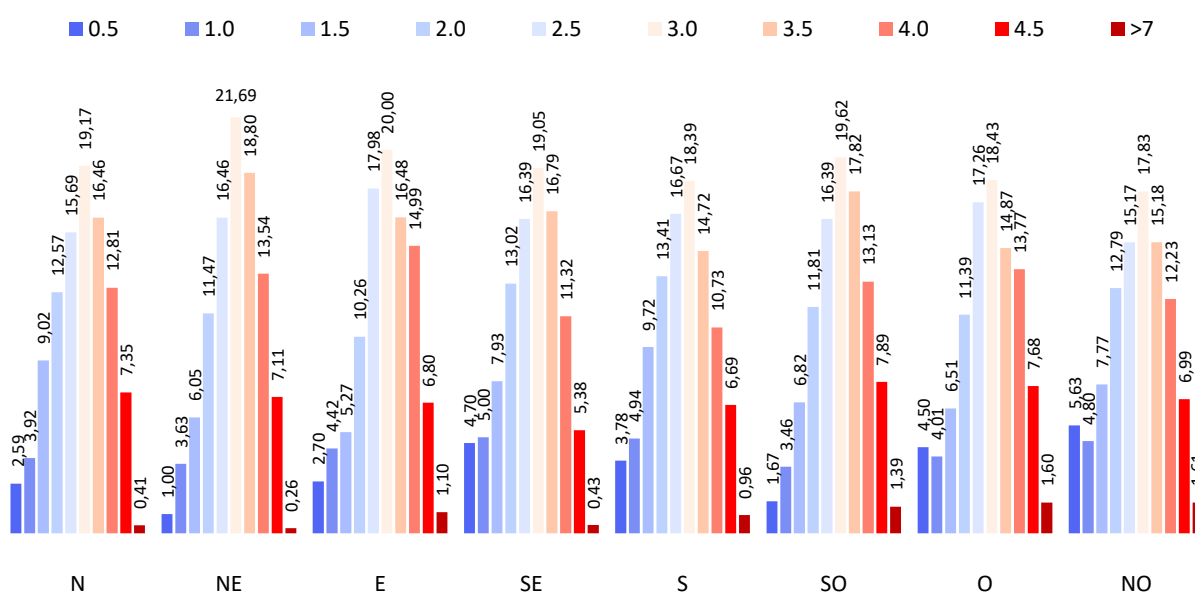


Figura 86 -  $T_{SUP}$  estacional na M2 - Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).

A ventilação natural na M2 – MUC apresenta em média a concentração dos valores entre 2 m/s e 4m/s, com maior frequência média na ordem de 3 m/s (19,27%). As possíveis zonas de estagnação do fluxo de ar (valores inferiores a 1 m/s) são verificadas com maior frequência nos ventos predominantes em São Paulo, direções SE (9,70%) e S (8,72%), valores estes, abaixo dos limiares médios (10,93%). Na direção SO e O concentram-se os maiores percentuais de zonas em que o fluxo de ar sofre possíveis acelerações (acima de 4 m/s), com 9,28% dos espaços urbanos da MUC (Tabela 21). A presença de um relevo predominante de colinas e o espigão central da Avenida Paulista (Tarifa e Armani, 2001), acabam por canalizar o vento na M2 – MUC mantendo a velocidade acima da média na segunda metade do histograma e abaixo nas cinco primeiras classes de velocidade (Figura 87).

**Tabela 21** – Ventilação natural na M2 – MUC por classe de velocidade e direção.

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	MD/M2	MD/Global
<b>0.5</b>	2,59	1,00	2,70	4,70	3,78	1,67	4,50	5,63	3,32	2,98
<b>1.0</b>	3,92	3,63	4,42	5,00	4,94	3,46	4,01	4,80	4,27	13,61
<b>1.5</b>	9,02	6,05	5,27	7,93	9,72	6,82	6,51	7,77	7,39	15,50
<b>2.0</b>	12,57	11,47	10,26	13,02	13,41	11,81	11,39	12,79	12,09	15,29
<b>2.5</b>	15,69	16,46	17,98	16,39	16,67	16,39	17,26	15,17	16,50	14,33
<b>3.0</b>	19,17	21,69	20,00	19,05	18,39	19,62	18,43	17,83	19,27	11,74
<b>3.5</b>	16,46	18,80	16,48	16,79	14,72	17,82	14,87	15,18	16,39	8,60
<b>4.0</b>	12,81	13,54	14,99	11,32	10,73	13,13	13,77	12,23	12,81	7,72
<b>4.5</b>	7,35	7,11	6,80	5,38	6,69	7,89	7,68	6,99	6,99	7,46
<b>&gt; 4.5</b>	0,41	0,26	1,10	0,43	0,96	1,39	1,60	1,61	0,97	2,77

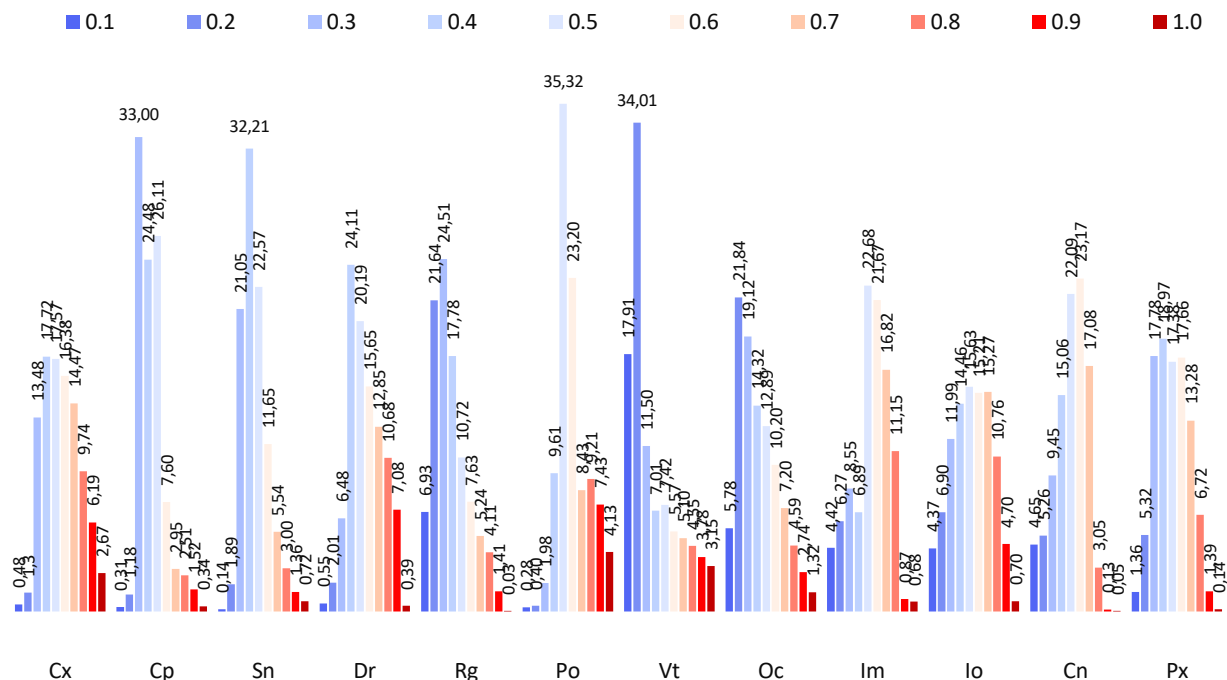


**Figura 87** - Classes de velocidades do vento por direções na Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).

A M2 – MUC apresenta a maior concentração de valores extremos de complexidade das estruturas urbanas (8,86%) e a segunda maior concentração destes limiares para as propriedades de compacidade (1,86%), sinuosidade (2,08) e direcionalidade (7,47%) das estruturas urbanas (Tabela 22). Para a análise das propriedades relacionadas com a cobertura urbana, a M2 – MUC aparece como a segunda macroárea com os maiores percentuais de valores extremos de impermeabilidade e intensidade de ocupação. Os resultados indicam a concentração na ordem de 51,19% dos valores para a impermeabilidade e 46,64% para a intensidade de ocupação, ambas propriedades com os resultados concentrados na segunda metade do histograma, como pode ser verificado na Figura 88.

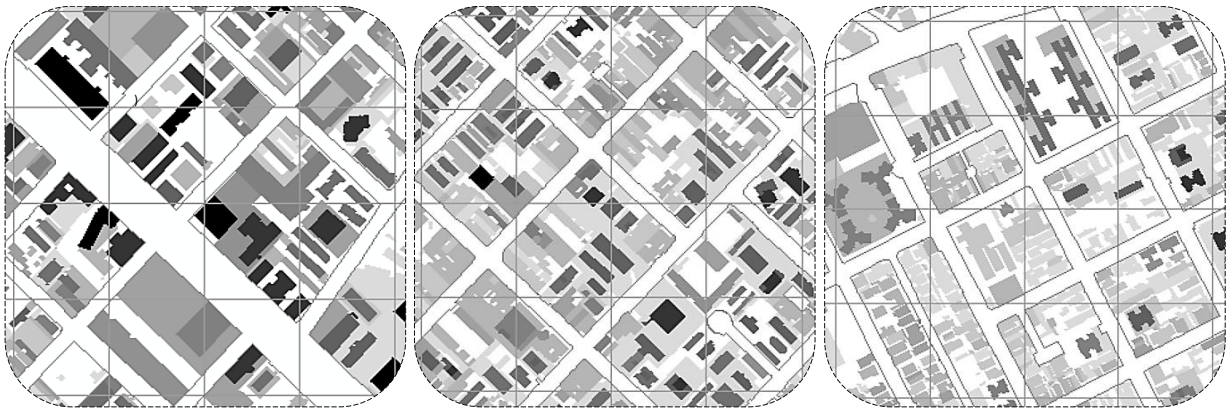
**Tabela 22 – Propriedades Morfoclimáticas na M2 – Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).**

Classe/Índice	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	0,48	0,31	0,14	0,55	6,93	0,28	17,91	5,78	4,42	4,37	4,65	1,36
<b>0.2</b>	1,3	1,18	1,89	2,01	21,64	0,40	34,01	21,84	6,27	6,90	5,26	5,32
<b>0.3</b>	13,48	33,00	21,05	6,48	24,51	1,98	11,50	19,12	8,55	11,99	9,45	17,78
<b>0.4</b>	17,72	24,48	32,21	24,11	17,78	9,61	7,01	14,32	6,89	14,46	15,06	18,97
<b>0.5</b>	17,57	26,11	22,57	20,19	10,72	35,32	7,42	12,89	22,68	15,63	22,09	17,38
<b>0.6</b>	16,38	7,60	11,65	15,65	7,63	23,20	5,57	10,20	21,67	15,21	23,17	17,66
<b>0.7</b>	14,47	2,95	5,54	12,85	5,24	8,43	5,10	7,20	16,82	15,27	17,08	13,28
<b>0.8</b>	9,74	2,51	3,00	10,68	4,11	9,21	4,55	4,59	11,15	10,76	3,05	6,72
<b>0.9</b>	6,19	1,52	1,36	7,08	1,41	7,43	3,78	2,74	0,87	4,70	0,13	1,39
<b>1.0</b>	2,67	0,34	0,72	0,39	0,03	4,13	3,15	1,32	0,68	0,70	0,05	0,14



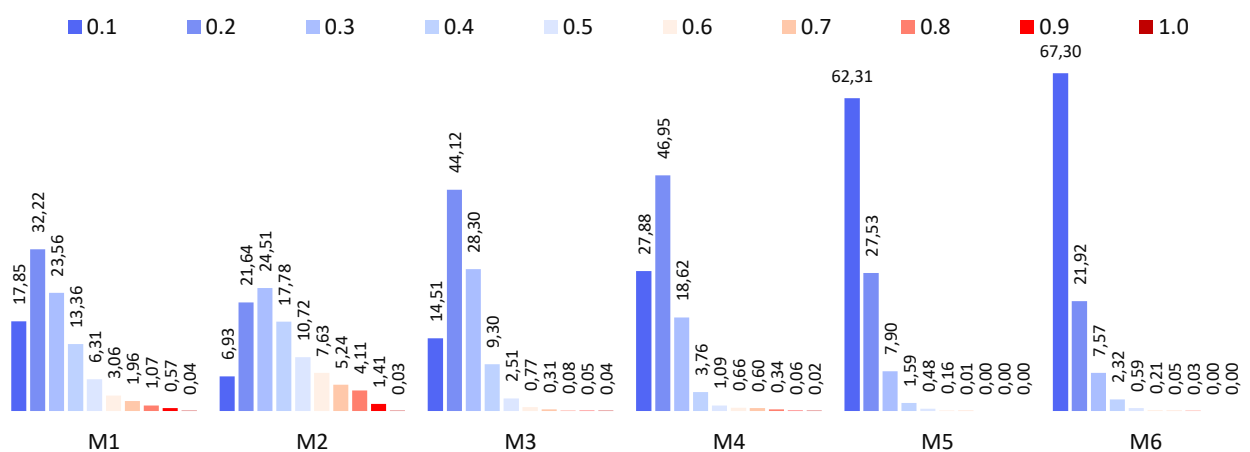
**Figura 88 - Propriedades Morfoclimáticas na M2 – Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).**

Uma das características mais marcantes da morfologia urbana na M2 - MUC é a concentração de áreas adensadas verticalmente, as quais estão localizadas próximas ao espigão central da Avenida Paulista e o conjunto de subprefeituras formado pela Bela Vista, Consolação, Liberdade, Vila Mariana, Jardim Paulista e as áreas próximas e em direção ao Rio Pinheiros. No entanto, este processo de verticalização ocorre também em diversos bairros predominantemente residenciais, os quais sofreram um forte processo de transformação e atração de usos não residenciais, sobretudo serviços e comércio (Figura 89).



**Figura 89** - Tipologias Sistema de Espaços Urbanos na Macroárea de Urbanização Consolidada (MUC).

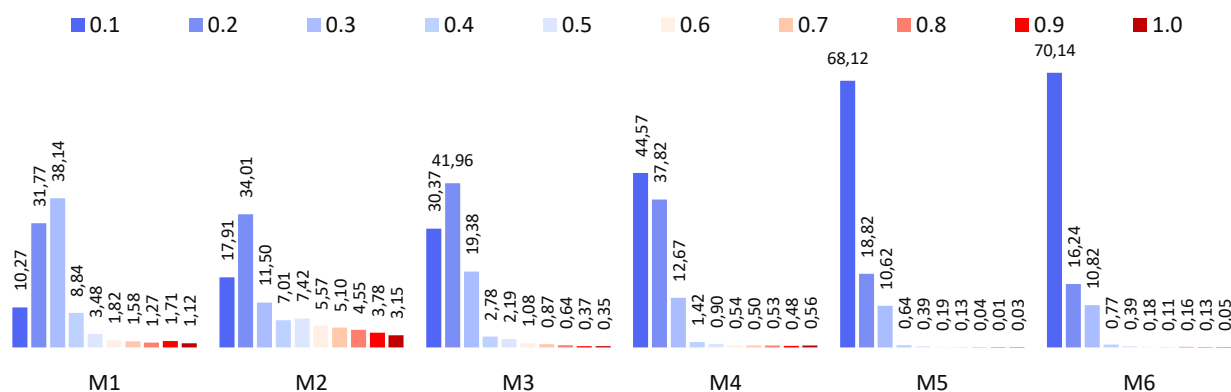
A análise morfoclimática indica as propriedades de verticalidade e rugosidade aerodinâmica com resultados concentrados entre os limiares de 0.1 e 0.5 (Figura 90 e 91). Os valores mais elevados (acima de 0.8) quando somados correspondem a 1,44% dos resultados de rugosidade (Tabela 23), valor superior à média global para estas classes (0,37%), o mesmo ocorre com a verticalidade no qual 6,93% dos resultados representam os espaços altamente verticalizados (Tabela 24), acima da média global de 1,96%. A relação entre a altura dos espaços construídos em razão pela largura dos espaços que os separam dada pela propriedade de oclusividade do tecido urbano, apresentou maior concentração dos resultados na primeira metade do histograma (Figura 92). Os valores mais elevados (acima de 0.8) na ordem de 4,06% do SEU, representam uma frequência quatro vezes superior à média global de 1% (Tabela 25).



**Figura 90** - Rugosidade Aerodinâmica (Rg) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.

**Tabela 23 – Rugosidade Aerodinâmica (Rg) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

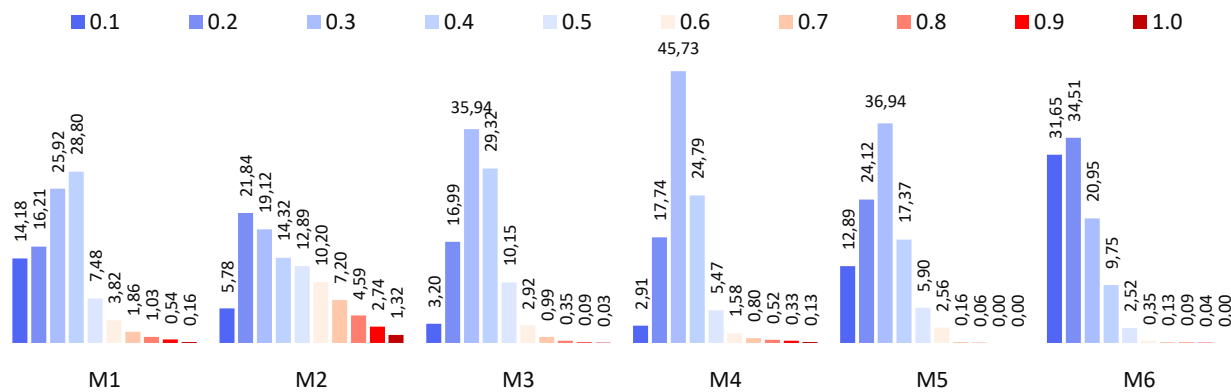
Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	17,85	6,93	14,51	27,88	62,31	67,30	32,80
0.2	32,22	21,64	44,12	46,95	27,53	21,92	32,40
0.3	23,56	24,51	28,30	18,62	7,90	7,57	18,41
0.4	13,36	17,78	9,30	3,76	1,59	2,32	8,02
0.5	6,31	10,72	2,51	1,09	0,48	0,59	3,62
0.6	3,06	7,63	0,77	0,66	0,16	0,21	2,08
0.7	1,96	5,24	0,31	0,60	0,01	0,05	1,36
0.8	1,07	4,11	0,08	0,34	0,00	0,03	0,94
0.9	0,57	1,41	0,05	0,06	0,00	0,00	0,35
1.0	0,04	0,03	0,04	0,02	0,00	0,00	0,02



**Figura 91 - Verticalidade (Vt) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

**Tabela 24– Verticalidade (Vt) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	10,27	17,91	30,37	44,57	68,12	70,14	40,23
0.2	31,77	34,01	41,96	37,82	18,82	16,24	30,10
0.3	38,14	11,50	19,38	12,67	10,62	10,82	17,19
0.4	8,84	7,01	2,78	1,42	0,64	0,77	3,58
0.5	3,48	7,42	2,19	0,90	0,39	0,39	2,46
0.6	1,82	5,57	1,08	0,54	0,19	0,18	1,56
0.7	1,58	5,10	0,87	0,50	0,13	0,11	1,38
0.8	1,27	4,55	0,64	0,53	0,04	0,16	1,20
0.9	1,71	3,78	0,37	0,48	0,01	0,13	1,08
1.0	1,12	3,15	0,35	0,56	0,03	0,05	0,88

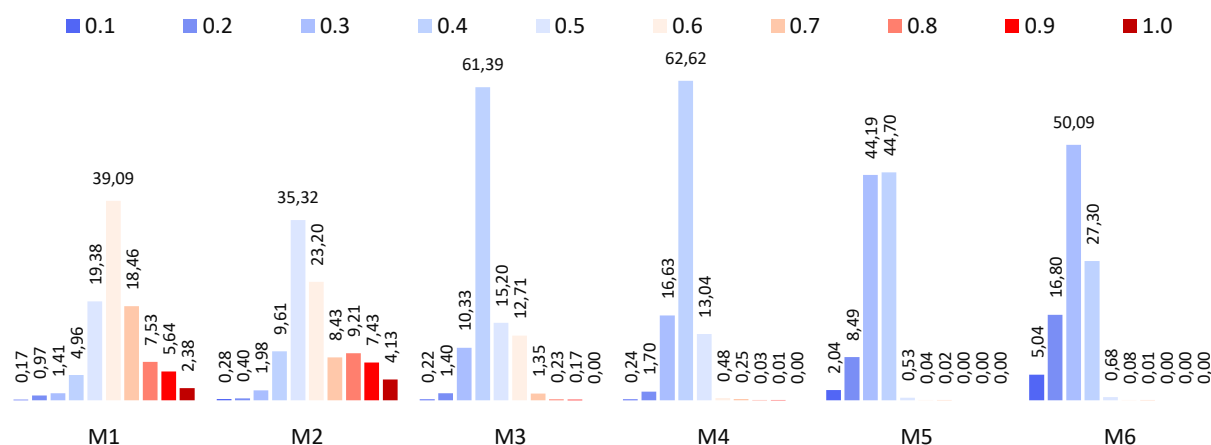


**Figura 92 - Oclusividade (Oc) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

**Tabela 25 –Oclusividade (Oc) do tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	14,18	5,78	3,20	2,91	12,89	31,65	11,77
0.2	16,21	21,84	16,99	17,74	24,12	34,51	21,90
0.3	25,92	19,12	35,94	45,73	36,94	20,95	30,77
0.4	28,80	14,32	29,32	24,79	17,37	9,75	20,73
0.5	7,48	12,89	10,15	5,47	5,90	2,52	7,40
0.6	3,82	10,20	2,92	1,58	2,56	0,35	3,57
0.7	1,86	7,20	0,99	0,80	0,16	0,13	1,86
0.8	1,03	4,59	0,35	0,52	0,06	0,09	1,10
0.9	0,54	2,74	0,09	0,33	0,00	0,04	0,63
1.0	0,16	1,32	0,03	0,13	0,00	0,00	0,27

A porosidade como a relação entre volume de ar disponível para circulação do ar e as trocas radiativas e energéticas entre as superfícies e a atmosfera apresentou máxima concentração dos resultados na primeira metade do histograma (Figura 93), no entanto os valores mais elevados, no qual o volume do edificado é superior ao volume de ar, perfazem 11,56% dos espaços urbanos. Em relação à média global os valores mais elevados de porosidade representam 3% do SEU (Tabela 26).



**Figura 93 – Porosidade (Po) no tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

**Tabela 26 –Porosidade (Po) no tecido urbano por Macroáreas de São Paulo.**

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	0,17	0,28	0,22	0,24	2,04	5,04	1,33
0.2	0,97	0,40	1,40	1,70	8,49	16,80	4,96
0.3	1,41	1,98	10,33	16,63	44,19	50,09	20,77
0.4	4,96	9,61	61,39	62,62	44,70	27,30	35,10
0.5	19,38	35,32	15,20	13,04	0,53	0,68	14,02
0.6	39,09	23,20	12,71	0,48	0,04	0,08	12,60
0.7	18,46	8,43	1,35	0,25	0,02	0,01	4,75
0.8	7,53	9,21	0,23	0,03	0,00	0,00	2,84
0.9	5,64	7,43	0,17	0,01	0,00	0,00	2,21
1.0	2,38	4,13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09

### M3 – Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU)

A Macroárea de Qualificação da Urbanização (M3 - MQU) é caracterizada pela existência de usos residenciais e não residenciais instalados em edificações horizontais e verticais, com um padrão médio de urbanização e de oferta de serviços e equipamentos (PDE, 2014) (Figura 94). Neste cenário de contrastes entre tipologias de usos e morfologias urbanas, a M3 – MQU apresentou durante o período quente e úmido, cerca de 39,58% dos espaços urbanos com a  $T_{SUP}$  na ordem dos 28°C. Durante a estação fria e seca, apenas 0,11% dos espaços urbanos atingem valores na ordem de 28°C de a  $T_{SUP}$ , com maior concentração dos resultados nos 24°C (47,35%) (Figura 95).

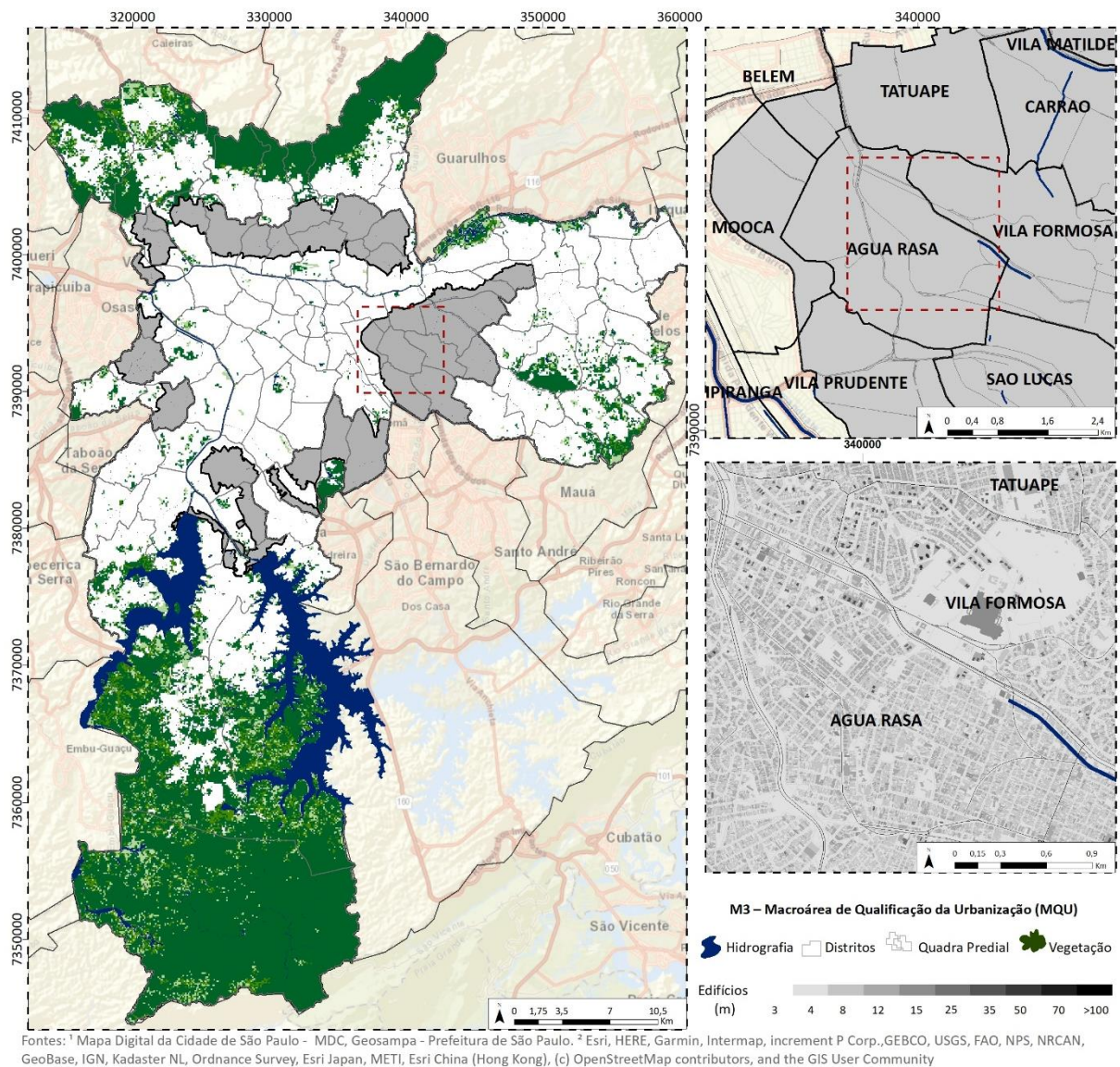


Figura 94 – Localização da M3 – Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

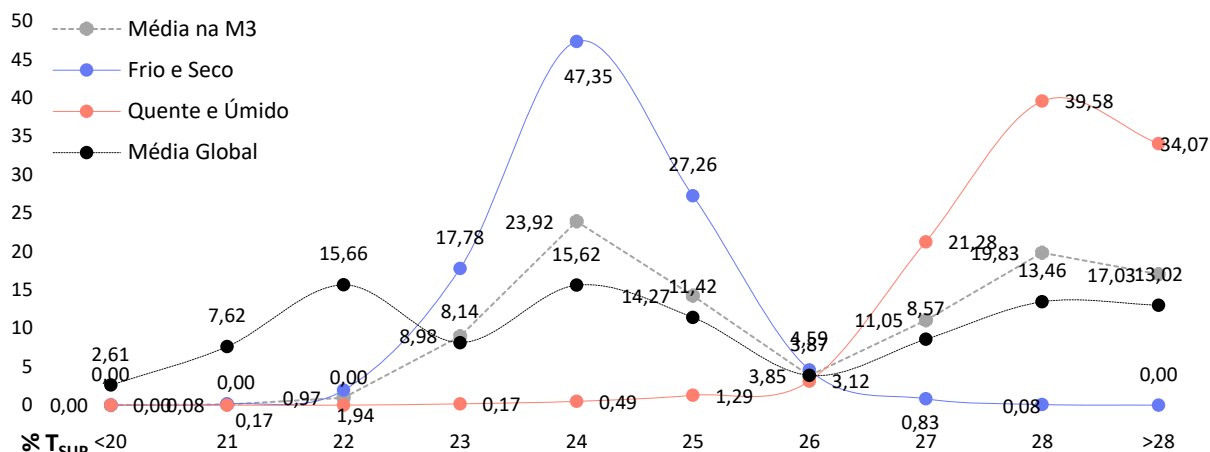


Figura 95 - T<sub>SUP</sub> na MZ3 - Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

A ventilação natural na M3 – MQU apresentou a velocidade máxima média na ordem de 2.22 m/s para a direção SO e a velocidade mínima média foi registrada na direção SE com ventos de 1.89 m/s (Tabela 27). Com uma complexa organização do SEU, a M3 - MQU representa uma faixa de transição e extensão da M1 - MEM e da M2 - MUC, com destaque para a maior concentração de espaços caracterizados como possíveis zonas de estagnação do fluxo de ar (até 1 m/s) para quase todas direções (Figura 96).

Tabela 27 – Ventilação natural por direções na Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	MD/M3	MD/Global
0.5	8,54	4,45	7,57	14,02	13,34	5,28	10,20	13,35	9,59	2,98
1.0	8,11	6,14	7,68	7,49	7,85	5,60	8,12	8,17	7,39	13,61
1.5	10,91	13,14	10,82	9,21	10,74	13,26	10,32	9,45	10,98	15,50
2.0	12,27	12,70	11,68	11,47	11,87	13,37	12,16	11,86	12,17	15,29
2.5	16,36	16,15	16,22	16,62	15,79	14,61	15,45	15,04	15,78	14,33
3.0	16,20	17,66	16,56	16,11	14,96	16,18	15,88	14,38	15,99	11,74
3.5	13,06	14,43	14,96	12,06	11,75	13,83	12,69	11,99	13,10	8,60
4.0	9,74	10,24	8,71	8,40	8,51	10,70	9,11	9,64	9,38	7,72
4.5	4,17	4,45	4,71	3,96	4,34	5,67	4,87	4,73	4,61	7,46
> 4.5	0,65	0,64	1,09	0,66	0,86	1,51	1,21	1,40	1,00	2,77

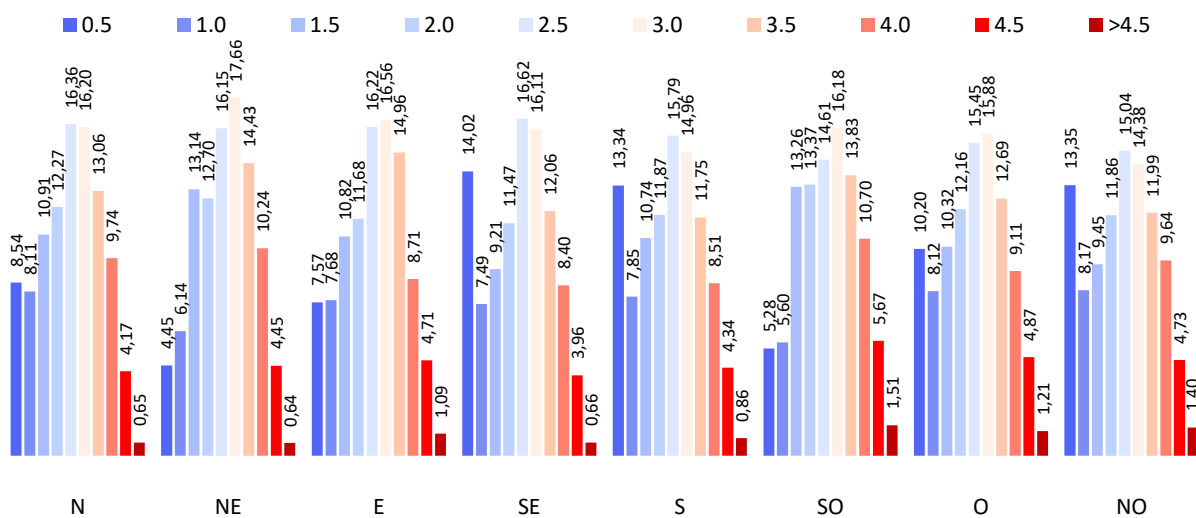
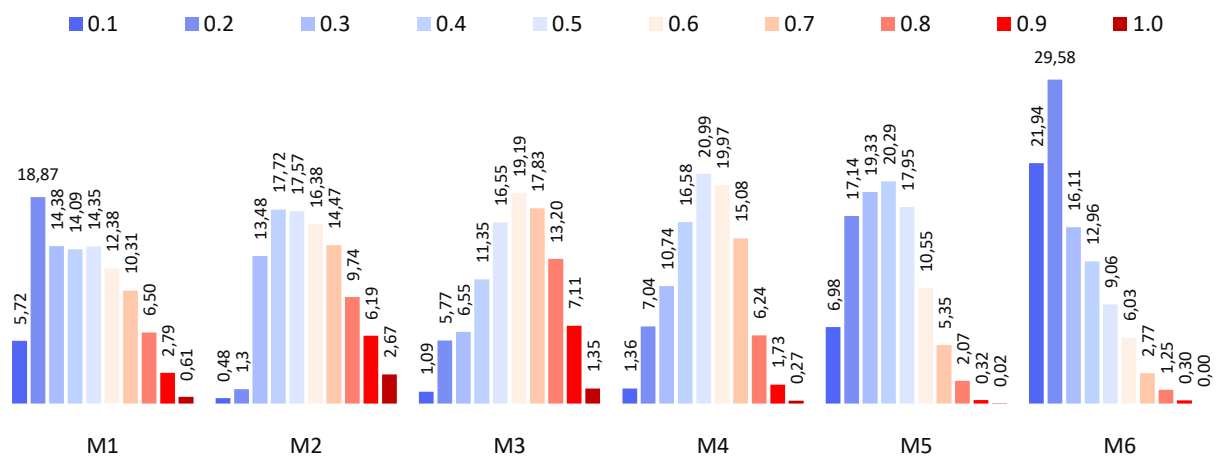


Figura 96 - Ventilação natural por direções na M3 - Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

A M3 - MQU está localizada no entorno da M1 e M2, envolvendo as subprefeituras próximas as áreas de várzeas dos rios Tiête, Pinheiros e Tamanduateí, com forte presença de coberturas impermeáveis e alta densidade de ocupação (Figura 97). Nestas áreas são verificadas o segundo maior percentual de concentração de estruturas urbanas com valores máximos de complexidade geométrica (Figura 98), os quais somados perfazem 8,46% dos resultados. As estruturas urbanas orientadas totalmente na direção oposta ao vento dominante de SE representam cerca de 5,49% dos resultados (Tabela 28).



**Figura 97** - Tipologias do Sistema de Espaços Urbanos na Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).



**Figura 98** – Complexidade (Cx) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

**Tabela 28** – Complexidade (Cx) das estruturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

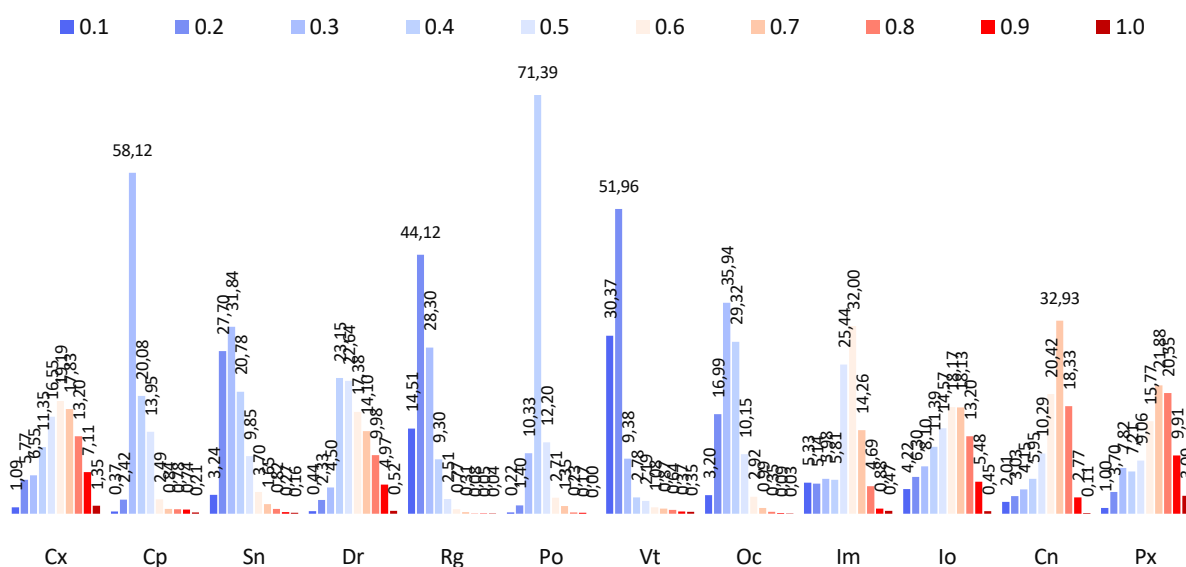
Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
<b>0.1</b>	5,72	0,48	1,09	1,36	6,98	21,94	6,26
<b>0.2</b>	18,87	1,3	5,77	7,04	17,14	29,58	13,28
<b>0.3</b>	14,38	13,48	6,55	10,74	19,33	16,11	13,43
<b>0.4</b>	14,09	17,72	11,35	16,58	20,29	12,96	15,50
<b>0.5</b>	14,35	17,57	16,55	20,99	17,95	9,06	16,08
<b>0.6</b>	12,38	16,38	19,19	19,97	10,55	6,03	14,08
<b>0.7</b>	10,31	14,47	17,83	15,08	5,35	2,77	10,97
<b>0.8</b>	6,50	9,74	13,20	6,24	2,07	1,25	6,50
<b>0.9</b>	2,79	6,19	7,11	1,73	0,32	0,30	3,07
<b>1.0</b>	0,61	2,67	1,35	0,27	0,02	0,00	0,82

As propriedades do tecido urbano em suas texturas (porosidade e oclusividade) e desempenho aerodinâmico (rugosidade e verticalidade) apresentaram os resultados concentrados na primeira metade do histograma. Os valores mais elevados (acima de 0.8) estão localizados em pontos específicos que somados representam em média menos de 1% dos resultados (Tabela 29). Com relação às propriedades das coberturas urbanas, verificou-se a concentração dos resultados para todas propriedades na segunda metade do histograma, sendo que para a conectividade o percentual de concentração dos resultados chega ao valor de 74,45% e para proximidade 71,2%.

Os valores mais elevados (acima de 0.8) de conectividade das coberturas refletem o grau de geminação entre os edifícios constituindo maior área de superfície conectada, os quais somados representam 2,88% dos espaços urbanos. O fato da M3 – MQU apresentar em sua maior parte um SEU voltado para o uso residencial, no qual a presença de tecidos urbanos com características da M2 - MUC e M1 - MEM contrastam com assentamentos precários e irregulares, configuram os níveis mais elevados de proximidade entre coberturas urbanas (13%) em uma mesma unidade de análise (Figura 99).

**Tabela 29** – Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

Classe/Índice	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	1,09	0,37	3,24	0,44	14,51	0,22	30,37	3,20	5,33	4,22	2,01	1,00
<b>0.2</b>	5,77	2,42	27,70	2,33	44,12	1,40	51,96	16,99	5,14	6,30	3,03	3,70
<b>0.3</b>	6,55	58,12	31,84	4,50	28,30	10,33	9,38	35,94	5,98	8,10	4,15	7,82
<b>0.4</b>	11,35	20,08	20,78	23,15	9,30	71,39	2,78	29,32	5,81	11,39	5,95	7,21
<b>0.5</b>	16,55	13,95	9,85	22,64	2,51	12,20	2,19	10,15	25,44	14,57	10,29	9,06
<b>0.6</b>	19,19	2,49	3,70	17,38	0,77	2,71	1,08	2,92	32,00	18,17	20,42	15,77
<b>0.7</b>	17,83	0,84	1,65	14,10	0,31	1,35	0,87	0,99	14,26	18,13	32,93	21,88
<b>0.8</b>	13,20	0,78	0,82	9,98	0,08	0,23	0,64	0,35	4,69	13,20	18,33	20,55
<b>0.9</b>	7,11	0,74	0,27	4,97	0,05	0,17	0,37	0,09	0,88	5,48	2,77	9,91
<b>1.0</b>	1,35	0,21	0,16	0,52	0,04	0,00	0,35	0,03	0,47	0,45	0,11	3,09



**Figura 99** - Propriedades morfoclimáticas dos Espaços Urbanos na Macroárea de Qualificação da Urbanização (MQU).

## M4 – Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU)

A M4 – MRVU apresenta diversas áreas com riscos geológico-geotécnicos, inundações e decorrentes de solos contaminados além do surgimento contínuo de ocupações irregulares que criam cenários de vulnerabilidade social e baixos índices de desenvolvimento humano (PDE, 2014) (Figura 100). Neste cenário para o período quente e úmido, a M4 – MRVU apresentou maior frequência das  $T_{SUP}$  máximas na ordem dos 28°C (46,85%) e durante o período frio e seco aos 23°C (44,78%). A proximidade desta zona aos remanescentes florestais, espaços construídos com baixa verticalidade intercalados aos espaços livres de construção são algumas características desta zona, o que acaba por criar uma faixa de transição das  $T_{SUP}$  em relação a M3 – MQU (Figura 101).

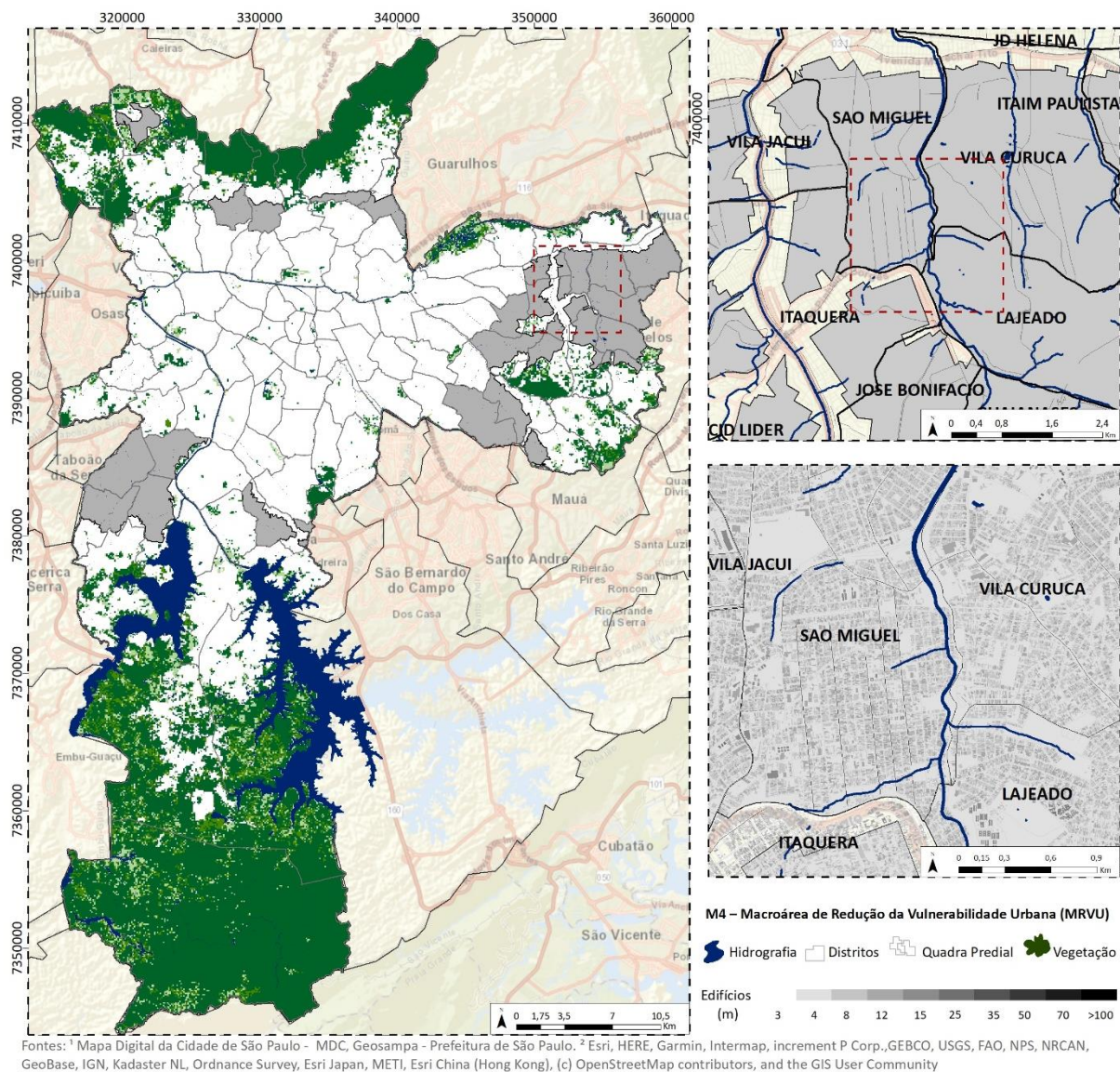
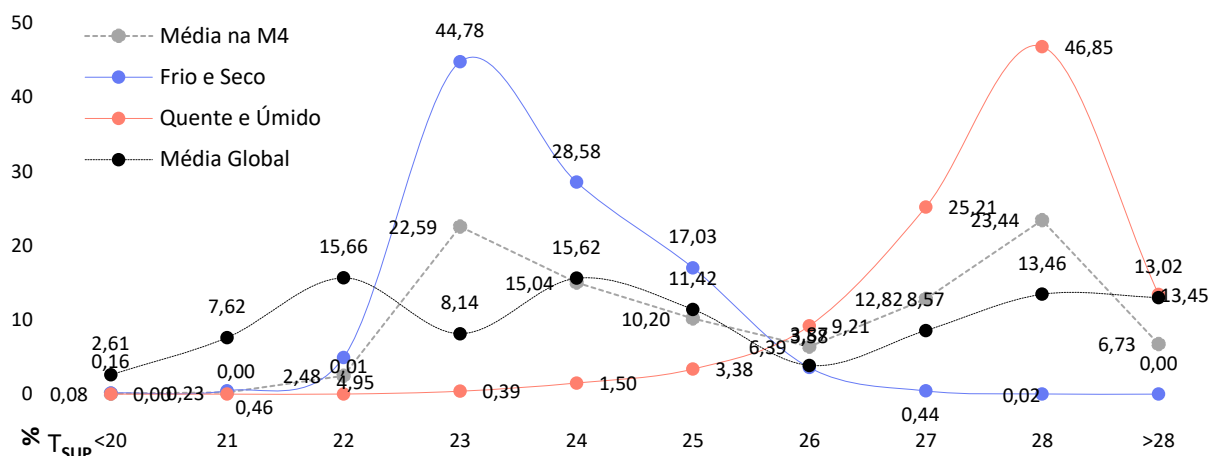


Figura 100 – Localização da M4 – Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

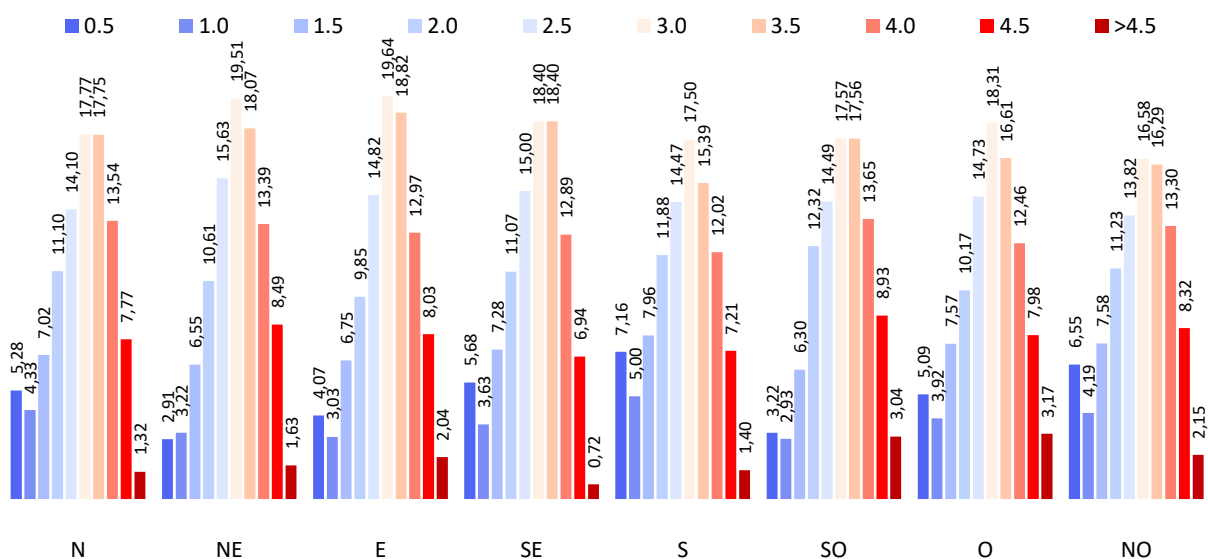


**Figura 101** - T<sub>SUP</sub> na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

Os resultados para a ventilação natural na M4 – MRVU apresentaram valores médios na ordem de 2.39m/s. Verifica-se que nas classes superiores a 3 m/s a MRVU apresenta valores acima da média global (Tabela 30). A análise das frequências por intervalos de 0.5 m/s indicou que as possíveis zonas de estagnação do fluxo de ar (valores inferiores a 1 m/s) são verificadas com maior frequência na direção Sul (12,15%), ao passo que na direção SO concentram-se os maiores percentuais de possíveis zonas de aceleração do fluxo de ar (acima de 4 m/s), com 11,97% dos espaços urbanos da M4 - MRVU (Figura 102).

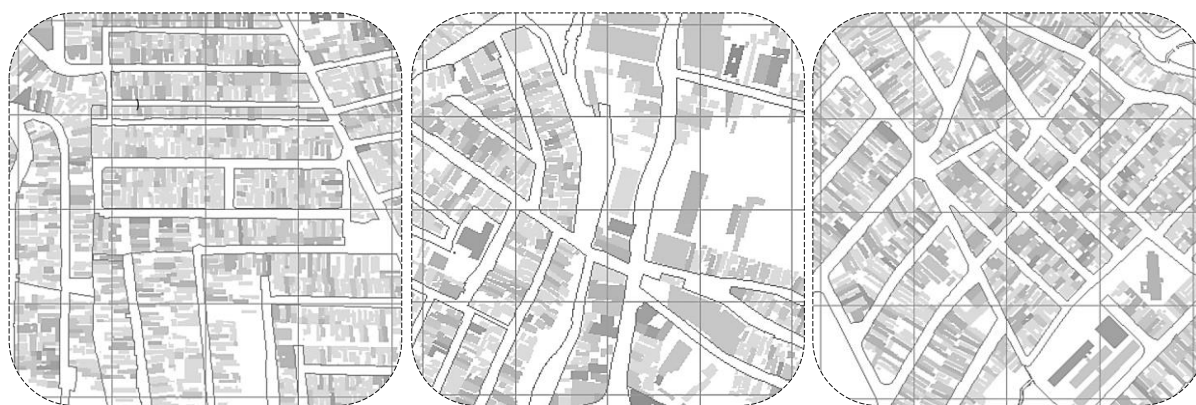
**Tabela 30**– Valores para ventilação natural na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Média	MD/Global
<b>0.5</b>	5,28	2,91	4,07	5,68	7,16	3,22	5,09	6,55	4,99	2,98
<b>1.0</b>	4,33	3,22	3,03	3,63	5,00	2,93	3,92	4,19	3,78	13,61
<b>1.5</b>	7,02	6,55	6,75	7,28	7,96	6,30	7,57	7,58	7,12	15,50
<b>2.0</b>	11,10	10,61	9,85	11,07	11,88	12,32	10,17	11,23	11,03	15,29
<b>2.5</b>	14,10	15,63	14,82	15,00	14,47	14,49	14,73	13,82	14,63	14,33
<b>3.0</b>	17,77	19,51	19,64	18,40	17,50	17,57	18,31	16,58	18,16	11,74
<b>3.5</b>	17,75	18,07	18,82	18,40	15,39	17,56	16,61	16,29	17,36	8,60
<b>4.0</b>	13,54	13,39	12,97	12,89	12,02	13,65	12,46	13,30	13,03	7,72
<b>4.5</b>	7,77	8,49	8,03	6,94	7,21	8,93	7,98	8,32	7,96	7,46
<b>&gt; 4.5</b>	1,32	1,63	2,04	0,72	1,40	3,04	3,17	2,15	1,93	2,77



**Figura 102** - Classes de velocidades do vento por direções na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

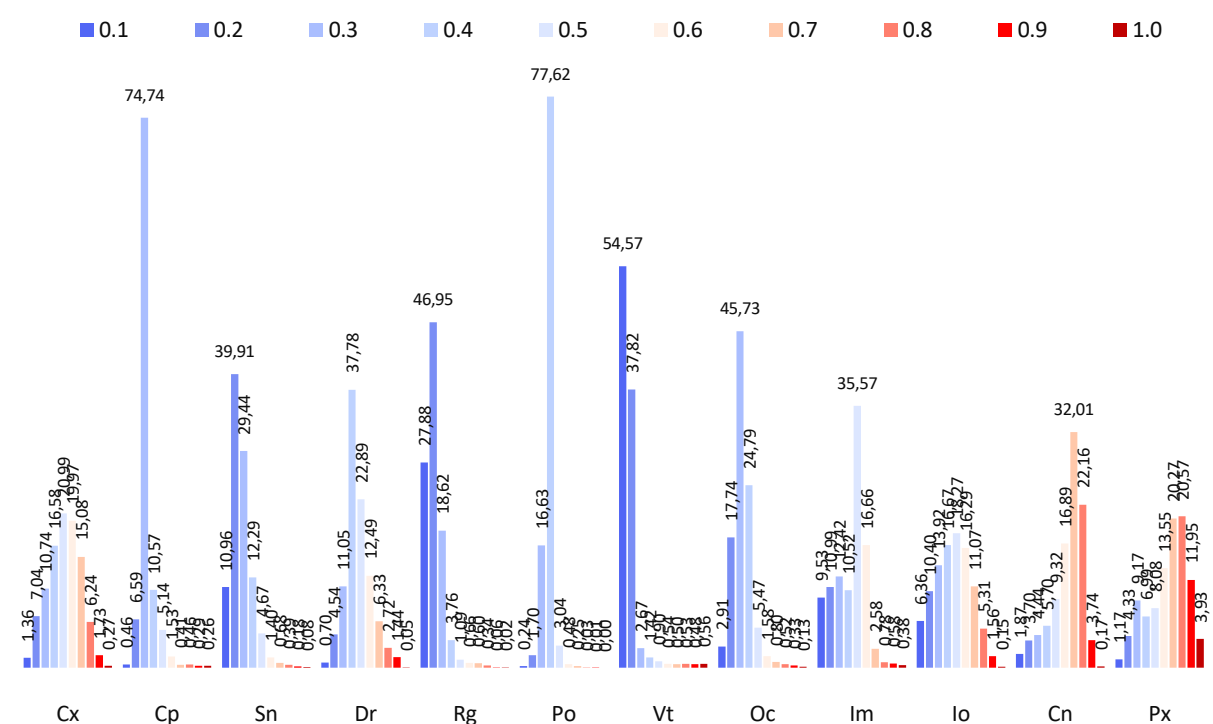
A morfologia urbana da M4 – MRVU é caracterizada pelo predomínio de usos residenciais e formas de ocupação predominantemente de baixa renda (Figura 103). Em termos morfoclimáticos, os resultados para a M4 – MRVU indicam valores baixos para todas as propriedades relacionadas ao tecido urbano. Por outro lado, são constatadas as maiores concentrações de valores extremos (acima de 0.8) para as propriedades de coberturas urbanas da conectividade e proximidade, ambas propriedades com concentração absoluta dos resultados na segunda metade dos histogramas (Tabela 31 e Figura 104).



**Figura 103** - Tipologias de espaços urbanos na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

**Tabela 31**– Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

Classe/Índice	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	1,36	0,46	10,96	0,70	27,88	0,24	54,57	2,91	9,53	6,36	1,87	1,17
<b>0.2</b>	7,04	6,59	39,91	4,54	46,95	1,70	37,82	17,74	10,99	10,40	3,70	4,33
<b>0.3</b>	10,74	74,74	29,44	11,05	18,62	16,63	2,67	45,73	12,42	13,92	4,44	9,17
<b>0.4</b>	16,58	10,57	12,29	37,78	3,76	77,62	1,42	24,79	10,52	16,67	5,70	6,99
<b>0.5</b>	20,99	5,14	4,67	22,89	1,09	3,04	0,90	5,47	35,57	18,27	9,32	8,08
<b>0.6</b>	19,97	1,53	1,40	12,49	0,66	0,48	0,54	1,58	16,66	16,29	16,89	13,55
<b>0.7</b>	15,08	0,41	0,68	6,33	0,60	0,25	0,50	0,80	2,58	11,07	32,01	20,27
<b>0.8</b>	6,24	0,46	0,39	2,72	0,34	0,03	0,53	0,52	0,78	5,31	22,16	20,57
<b>0.9</b>	1,73	0,29	0,18	1,44	0,06	0,01	0,48	0,33	0,58	1,56	3,74	11,95
<b>1.0</b>	0,27	0,26	0,08	0,05	0,02	0,00	0,56	0,13	0,38	0,15	0,17	3,93



**Figura 104** - Análise morfoclimática na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana (MRVU).

A conectividade das coberturas urbanas na M4 - MRVU (Tabela 32), apresentou a maior concentração de valores extremos (acima de 0.8) dentre as macroáreas analisadas, com 3,91%, de espaços urbanos totalmente geminados enquanto a média global foi na ordem de 2,01% (Figura 105). Este mesmo cenário é verificado para a propriedade de proximidade, com 15,88% dos espaços urbanos com valores de elevada proximidade, sendo a média global na ordem de 7,79% (Tabela 33 e Figura 106).

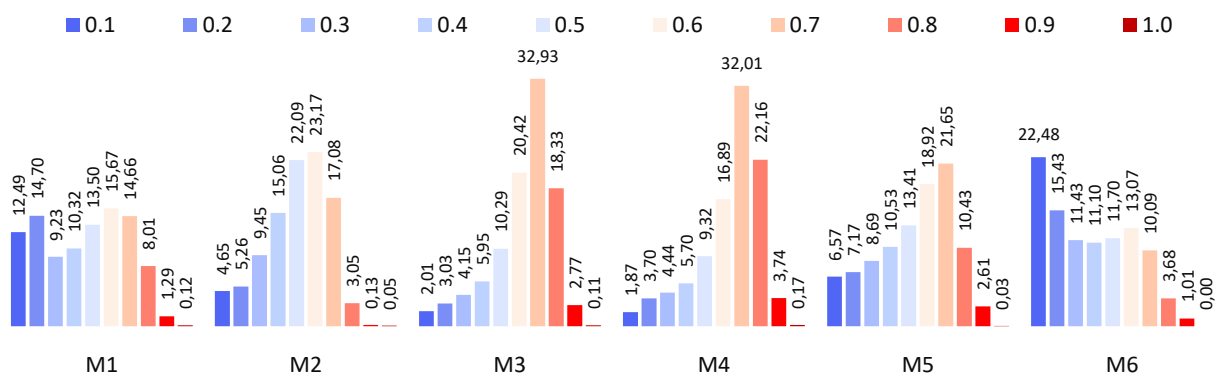


Figura 105 – Conectividade (Cn) entre as coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Tabela 32– Valores de Conectividade entre as coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	12,49	4,65	2,01	1,87	6,57	22,48	8,34
0.2	14,70	5,26	3,03	3,70	7,17	15,43	8,21
0.3	9,23	9,45	4,15	4,44	8,69	11,43	7,90
0.4	10,32	15,06	5,95	5,70	10,53	11,10	9,78
0.5	13,50	22,09	10,29	9,32	13,41	11,70	13,39
0.6	15,67	23,17	20,42	16,89	18,92	13,07	18,02
0.7	14,66	17,08	32,93	32,01	21,65	10,09	21,40
0.8	8,01	3,05	18,33	22,16	10,43	3,68	10,95
0.9	1,29	0,13	2,77	3,74	2,61	1,01	1,93
1.0	0,12	0,05	0,11	0,17	0,03	0,00	0,08

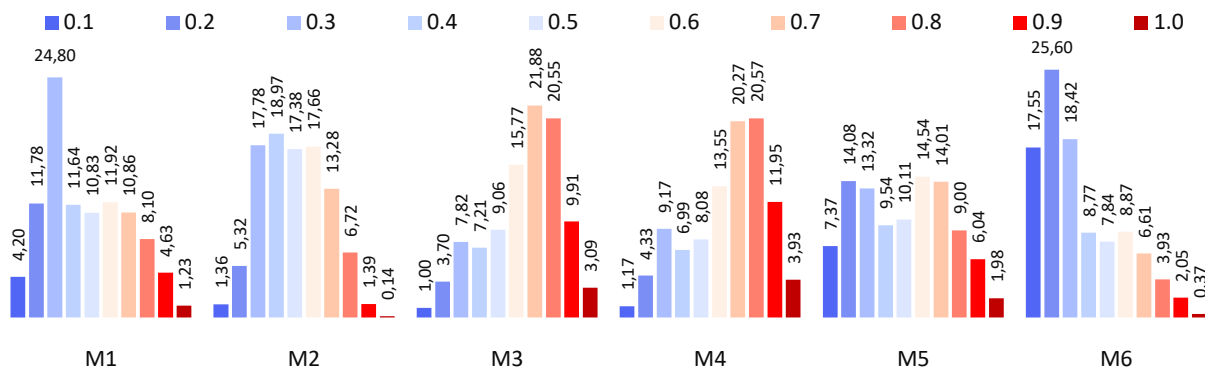


Figura 106 – Proximidade (Px) entre coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Tabela 33 – Valores de Proximidade entre as coberturas urbanas por Macroáreas de São Paulo.

Classe/Macroárea	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Média
0.1	4,20	1,36	1,00	1,17	7,37	17,55	5,44
0.2	11,78	5,32	3,70	4,33	14,08	25,60	10,80
0.3	24,80	17,78	7,82	9,17	13,32	18,42	15,22
0.4	11,64	18,97	7,21	6,99	9,54	8,77	10,52
0.5	10,83	17,38	9,06	8,08	10,11	7,84	10,55
0.6	11,92	17,66	15,77	13,55	14,54	8,87	13,72
0.7	10,86	13,28	21,88	20,27	14,01	6,61	14,48
0.8	8,10	6,72	20,55	20,57	9,00	3,93	11,48
0.9	4,63	1,39	9,91	11,95	6,04	2,05	6,00
1.0	1,23	0,14	3,09	3,93	1,98	0,37	1,79

## MZ2 - Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental (MPRA)

A Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental subdivide-se em outras quatro macroáreas, no entanto, para a análise dos resultados nesta tese foram somente utilizadas as macroáreas que possuem informações do SEU, de acordo com a base de dados do Mapa Digital da Cidade de São Paulo (MDC), restringindo-se as discussões à Macroárea de Redução da Vulnerabilidade e Recuperação Ambiental (M5 - MRVRA) e a Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA) (Figura 107).

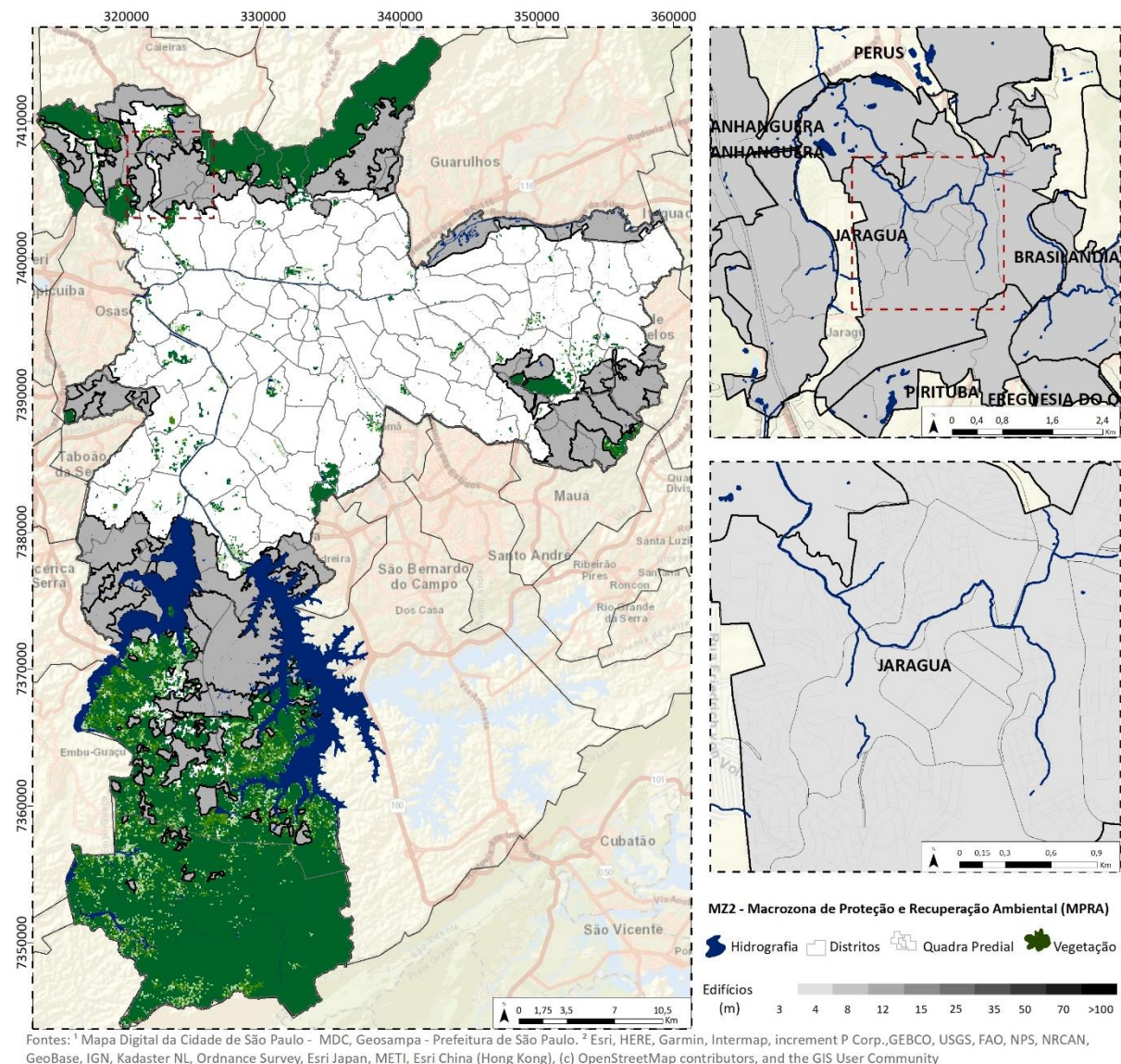
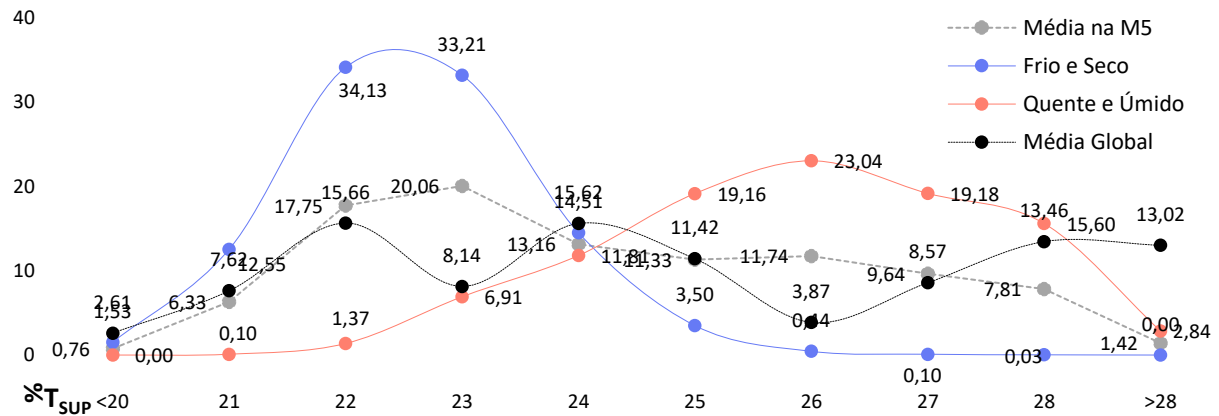


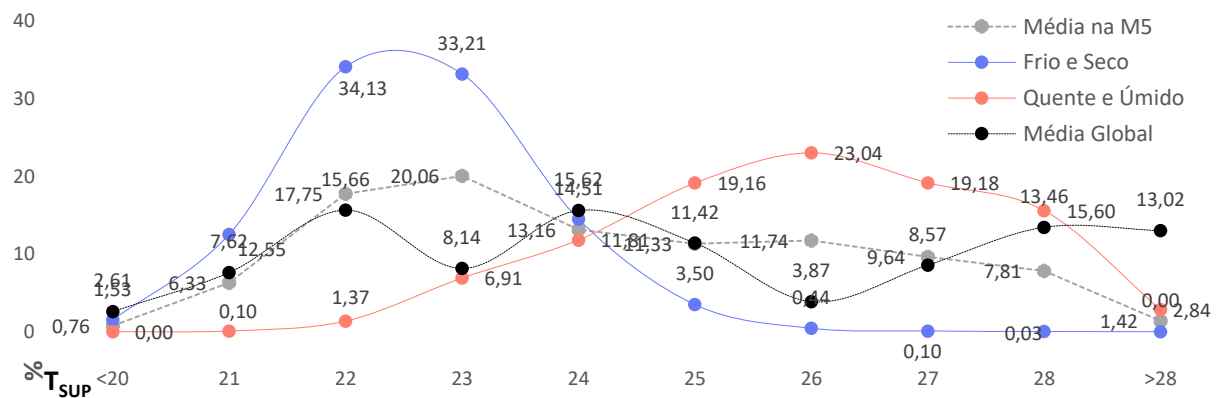
Figura 107 – Localização da Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental (MPRA).

As M5 - MRVURA e M6 – MCQUA, localizam-se nas extremidades da área urbanizada do território municipal, com predominância de elevados índices de vulnerabilidade socioambiental. Neste contexto, os resultados das médias para  $T_{SUP}$  máximas durante o período quente e úmido seguem uma distribuição mais homogênea dos valores a partir da segunda metade do histograma em comparação às macroáreas citadas

anteriormente. Verificou-se a concentração dos resultados na ordem de 26°C (23,04% para M5 e 18,66% para M6) e apenas 2,84% (M5) e 2,81% (M6) dos resultados classificados como valores acima de 28°C. Para o período frio e seco o histograma das duas macroáreas concentram os percentuais máximos na ordem de 22°C, sendo 34,13% na M5 e 36,07% na M6 (Figura 108 e 109).



**Figura 108** - T<sub>SUP</sub> na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana e Recuperação Ambiental (M5 - MRVURA).



**Figura 109** - T<sub>SUP</sub> na Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA).

A ventilação natural na M5 - MRVURA e M6 - MCQUA, apresentam em média, valores na ordem de 2.62m/s, com velocidade máxima na M5 – MRVURA de 2.74 m/s (E O) e mínima de 2.41 (S). Para a M6 - MCQUA a velocidade máxima foi de 2.76 m/s (SO), com mínima também na direção Sul na ordem de 2.49 m/s. Verifica-se que nas classes superiores a 3 m/s a M5 - MRVURA apresenta valores acima da média global (Tabela 34 e 35).

**Tabela 34**– Ventilação natural na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana e Recuperação Ambiental (M5 - MRVURA).

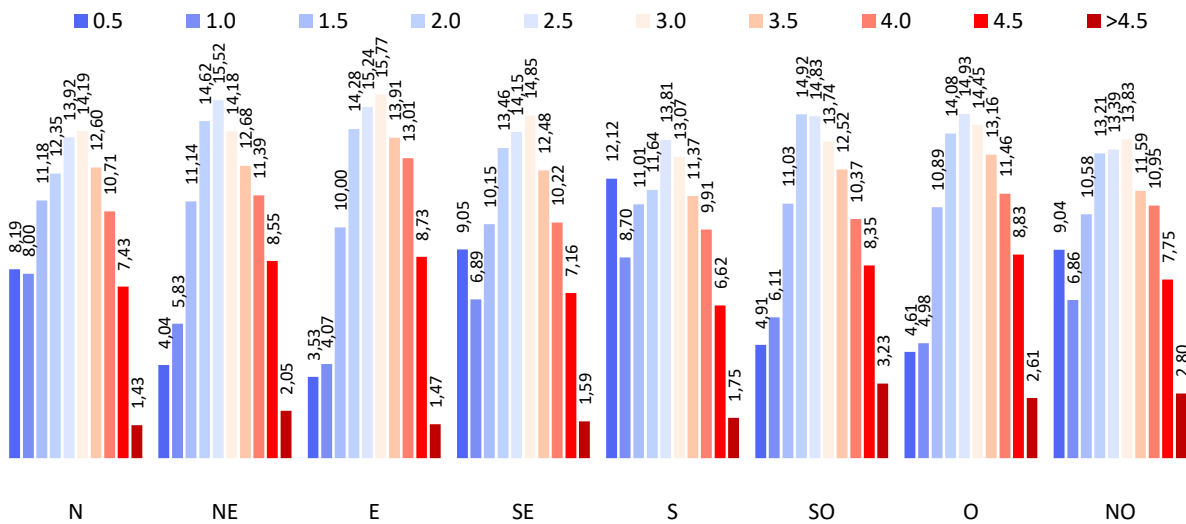
Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Média
<b>0.5</b>	8,19	4,04	3,53	9,05	12,12	4,91	4,61	9,04	6,94
<b>1.0</b>	8,00	5,83	4,07	6,89	8,70	6,11	4,98	6,86	6,43
<b>1.5</b>	11,18	11,14	10,00	10,15	11,01	11,03	10,89	10,58	10,75
<b>2.0</b>	12,35	14,62	14,28	13,46	11,64	14,92	14,08	13,21	13,57
<b>2.5</b>	13,92	15,52	15,24	14,15	13,81	14,83	14,93	13,39	14,47
<b>3.0</b>	14,19	14,18	15,77	14,85	13,07	13,74	14,45	13,83	14,26
<b>3.5</b>	12,60	12,68	13,91	12,48	11,37	12,52	13,16	11,59	12,54
<b>4.0</b>	10,71	11,39	13,01	10,22	9,91	10,37	11,46	10,95	11,00
<b>4.5</b>	7,43	8,55	8,73	7,16	6,62	8,35	8,83	7,75	7,93
<b>&gt; 4.5</b>	1,43	2,05	1,47	1,59	1,75	3,23	2,61	2,80	2,11

**Tabela 35**– Ventilação natural na Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA).

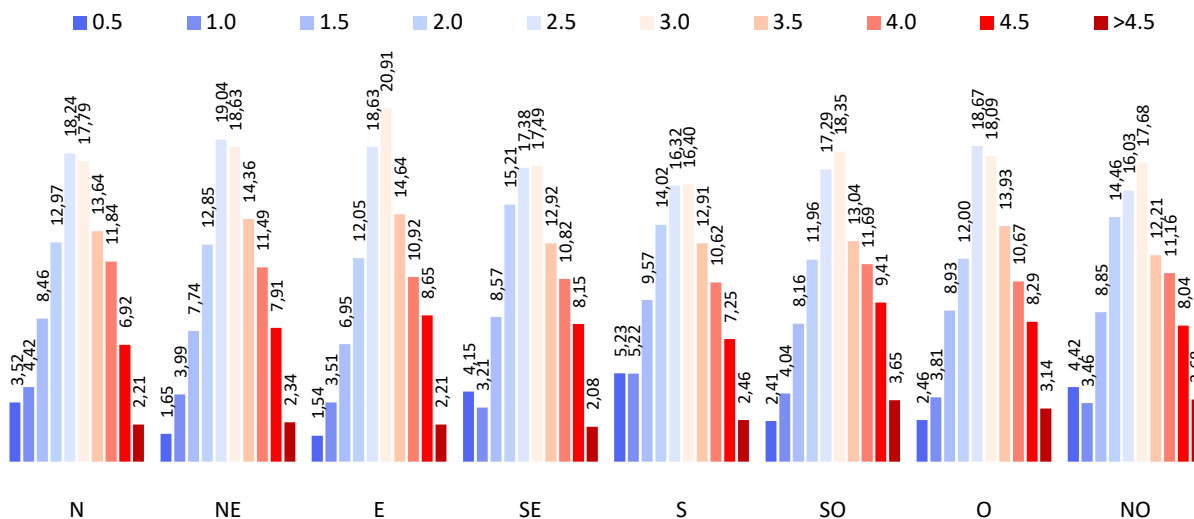
Classe/Direção	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Média
<b>0.5</b>	3,52	1,65	1,54	4,15	5,23	2,41	2,46	4,42	3,17
<b>1.0</b>	4,42	3,99	3,51	3,21	5,22	4,04	3,81	3,46	3,96
<b>1.5</b>	8,46	7,74	6,95	8,57	9,57	8,16	8,93	8,85	8,40
<b>2.0</b>	12,97	12,85	12,05	15,21	14,02	11,96	12,00	14,46	13,19
<b>2.5</b>	18,24	19,04	18,63	17,38	16,32	17,29	18,67	16,03	17,70
<b>3.0</b>	17,79	18,63	20,91	17,49	16,40	18,35	18,09	17,68	18,17
<b>3.5</b>	13,64	14,36	14,64	12,92	12,91	13,04	13,93	12,21	13,46
<b>4.0</b>	11,84	11,49	10,92	10,82	10,62	11,69	10,67	11,16	11,15
<b>4.5</b>	6,92	7,91	8,65	8,15	7,25	9,41	8,29	8,04	8,08
<b>&gt; 4.5</b>	2,21	2,34	2,21	2,08	2,46	3,65	3,14	3,68	2,72

A análise das frequências por intervalos de 0.5 m/s indica que as zonas com tendência para a estagnação do fluxo de ar (valores inferiores a 1 m/s) são verificadas com maior frequência na direção Sul para ambas macroáreas (20,82% para M5 e 10,45% para a M6). As possíveis zonas de aceleração do fluxo de ar (classes com velocidade acima de 4 m/s) são verificadas com maior intensidade na direção SO, com 11,58% dos espaços urbanos na M5 e 13,06% para a M6 (Figura 110 e 111).

As tipologias de espaços urbanos que compõem as macroáreas da MZ2 - Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental são predominantemente de usos residenciais e conjuntos habitacionais populares, que apresentam diversos tipos de precariedades (territoriais e sanitárias), irregularidades fundiárias e déficits na oferta de serviços, equipamentos e infraestruturas urbanas (PDE, 2014).



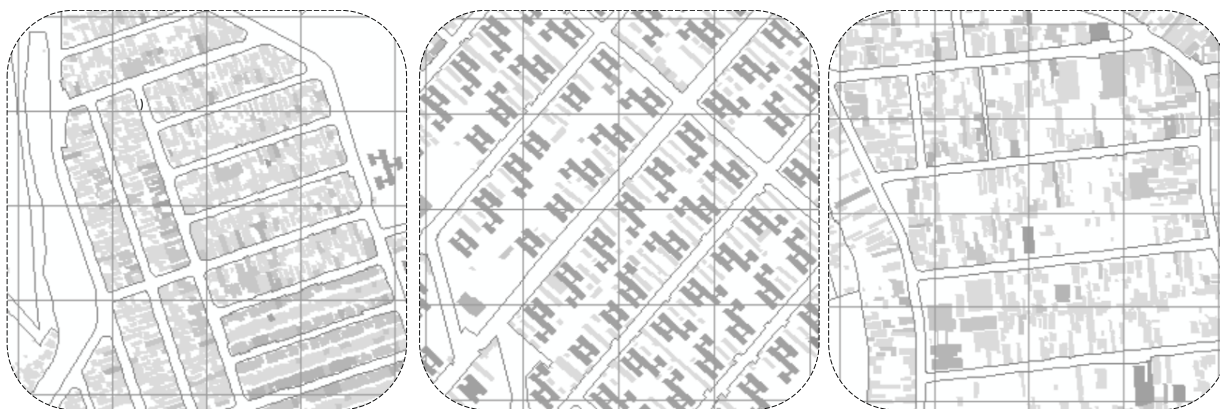
**Figura 110** - Classes de velocidades do vento por direções na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana e Recuperação Ambiental (M5 - MRVURA).



**Figura 111** - Classes de velocidades do vento por direções na Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA).

A M6 - MCQUA também apresenta algumas das características de ocupação citadas anteriormente, no entanto esta macroárea difere-se pela existência de muitos vazios intraurbanos (com ou sem cobertura vegetal). Na M6 - MCQUA ocorre, ainda, diversas áreas de reflorestamento, exploração mineral, e algumas áreas com concentração de atividades industriais (Figura 112).

A análise morfoclimática para a M5 - MRVURA e M6 - MCQUA, indicam os menores percentuais de valores extremos para as propriedades relacionadas com as estruturas urbanas em sua geometria e espacialização. Para as propriedades do tecido urbano segundo os critérios de textura (oclusividade e porosidade) e de desempenho aerodinâmico (rugosidade e verticalidade), os resultados para valores mais elevados (classe acima de 0,8) perfazem menos de 0,20% dos espaços urbanos nestas macroáreas.



**Figura 112** - Exemplos de tipologias do Sistema de Espaços Urbanos da Macrozona de Proteção e Recuperação Ambiental.

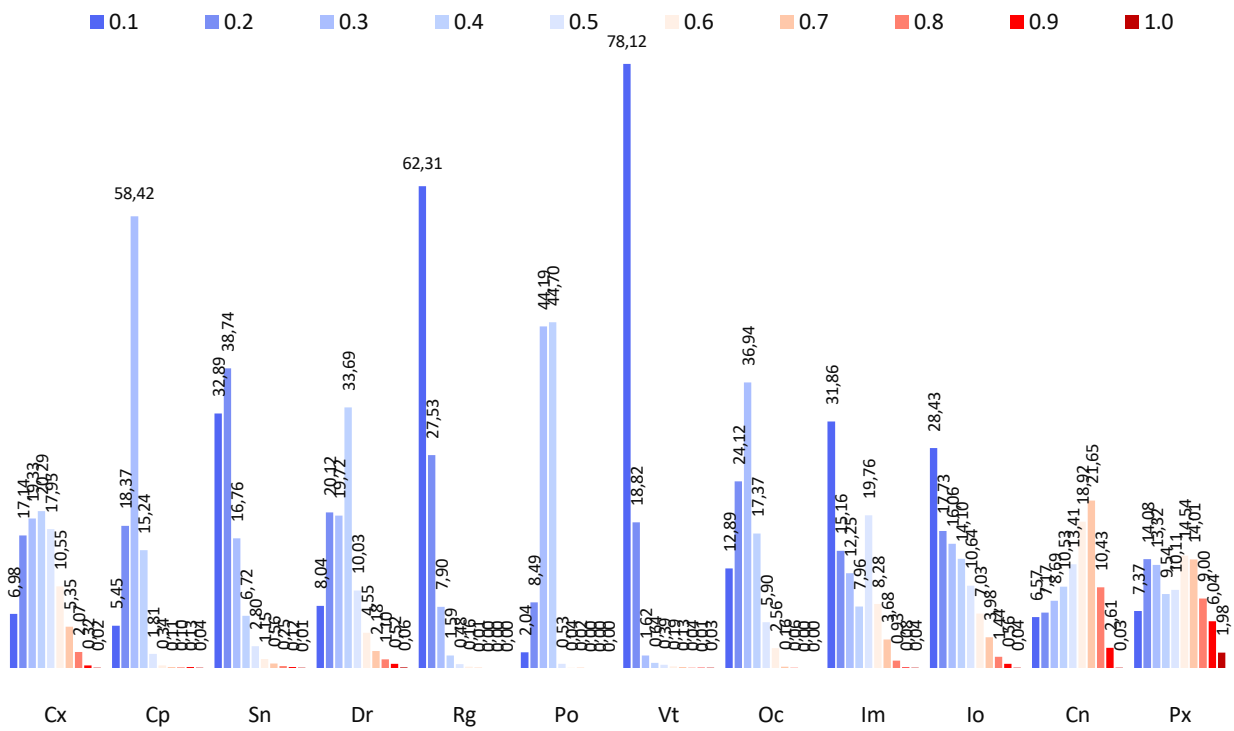
As propriedades de impermeabilidade e intensidade de ocupação relacionadas com as coberturas urbanas, concentraram os resultados na primeira metade do histograma e a menor concentração de valores máximos (acima de 0.8) dentre as macroáreas analisadas (Tabelas 36 e 37). No entanto, verifica-se que devido ao padrão de ocupação destas zonas com forte presença de conjuntos habitacionais populares, a proximidade com que alguns assentamentos estão instalados, configura limiares elevados para esta propriedade morfoclimática (Figuras 1132 e 114).

**Tabela 36**– Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana e Recuperação Ambiental (M5 - MRVURA).

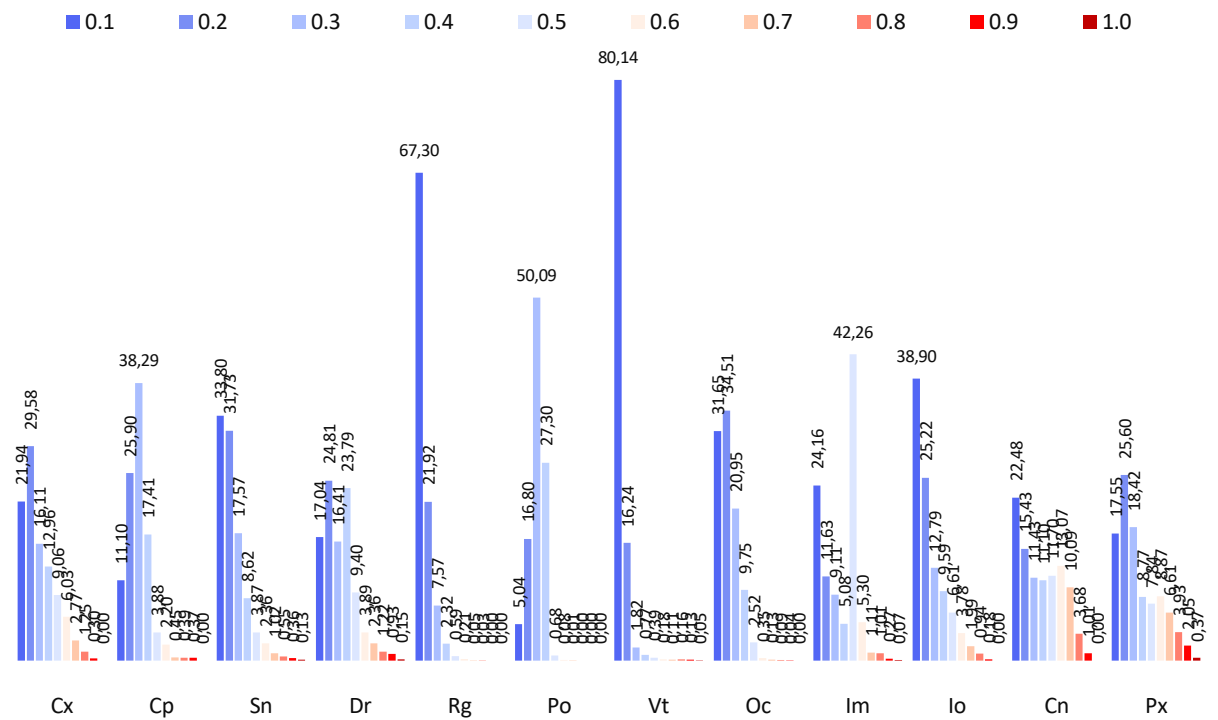
classe/ <sup>Índice</sup>	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	6,98	5,45	32,89	8,04	62,31	2,04	78,12	12,89	31,86	28,43	6,57	7,37
<b>0.2</b>	17,14	18,37	38,74	20,12	27,53	8,49	18,82	24,12	15,16	17,73	7,17	14,08
<b>0.3</b>	19,33	58,42	16,76	19,72	7,90	44,19	1,62	36,94	12,25	16,06	8,69	13,32
<b>0.4</b>	20,29	15,24	6,72	33,69	1,59	44,70	0,64	17,37	7,96	14,10	10,53	9,54
<b>0.5</b>	17,95	1,81	2,80	10,03	0,48	0,53	0,39	5,90	19,76	10,64	13,41	10,11
<b>0.6</b>	10,55	0,34	1,15	4,55	0,16	0,04	0,19	2,56	8,28	7,03	18,92	14,54
<b>0.7</b>	5,35	0,11	0,56	2,18	0,01	0,02	0,13	0,16	3,68	3,98	21,65	14,01
<b>0.8</b>	2,07	0,10	0,25	1,10	0,00	0,00	0,04	0,06	0,93	1,44	10,43	9,00
<b>0.9</b>	0,32	0,13	0,12	0,52	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08	0,56	2,61	6,04
<b>1.0</b>	0,02	0,04	0,01	0,06	0,00	0,00	0,03	0,00	0,04	0,04	0,03	1,98

**Tabela 37**– Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA).

classe/ <sup>Índice</sup>	Cx	Cp	Sn	Dr	Rg	Po	Vt	Oc	Im	Io	Cn	Px
<b>0.1</b>	21,94	11,10	33,80	17,04	67,30	5,04	80,14	31,65	24,16	38,90	22,48	17,55
<b>0.2</b>	29,58	25,90	31,73	24,81	21,92	16,80	16,24	34,51	11,63	25,22	15,43	25,60
<b>0.3</b>	16,11	38,29	17,57	16,41	7,57	50,09	1,82	20,95	9,11	12,79	11,43	18,42
<b>0.4</b>	12,96	17,41	8,62	23,79	2,32	27,30	0,77	9,75	5,08	9,59	11,10	8,77
<b>0.5</b>	9,06	3,88	3,87	9,40	0,59	0,68	0,39	2,52	42,26	6,61	11,70	7,84
<b>0.6</b>	6,03	2,20	2,36	3,89	0,21	0,08	0,18	0,35	5,30	3,78	13,07	8,87
<b>0.7</b>	2,77	0,45	1,02	2,36	0,05	0,01	0,11	0,13	1,11	1,99	10,09	6,61
<b>0.8</b>	1,25	0,39	0,55	1,22	0,03	0,00	0,16	0,09	1,01	0,94	3,68	3,93
<b>0.9</b>	0,30	0,37	0,36	0,93	0,00	0,00	0,13	0,04	0,27	0,18	1,01	2,05
<b>1.0</b>	0,00	0,00	0,13	0,15	0,00	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,00	0,37



**Figura 113** - Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Redução da Vulnerabilidade Urbana e Recuperação Ambiental (M5 - MRVURA).



**Figura 114** - Propriedades morfoclimáticas na Macroárea de Controle e Qualificação Urbana e Ambiental (M6 - MCQUA).

## 5.9. Corredores de Ventilação Urbana

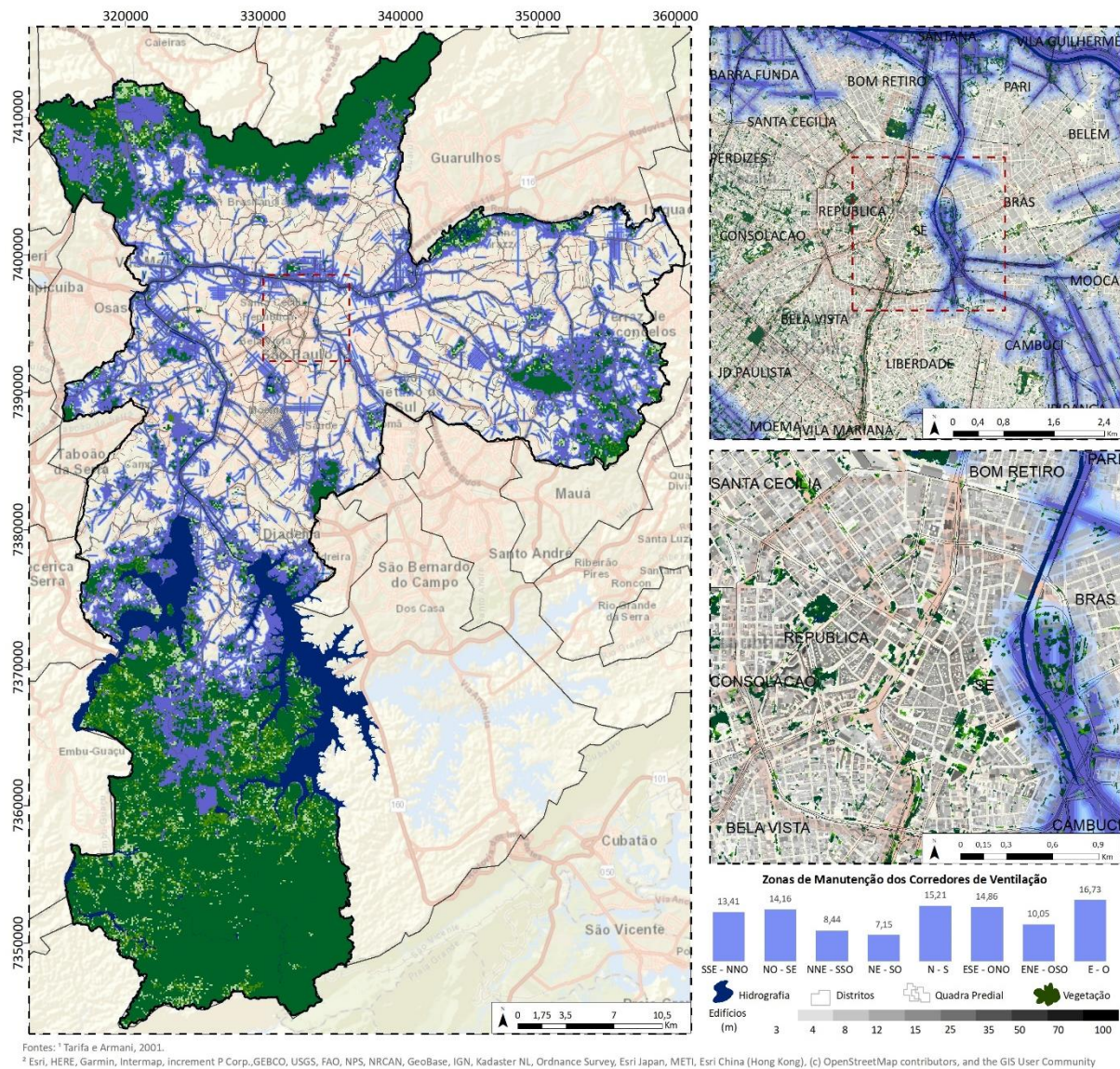
A cartografia dos possíveis corredores de ventilação urbana foi elaborada com base na relação entre as propriedades e indicadores morfoclimáticos e algumas métricas morfológicas. Procurou-se por meio das técnicas em SIG delimitar as áreas em que o Subsistema de Espaços Construídos – SEC apresenta condições favoráveis ao escoamento contínuo do fluxo de ar, como por exemplo áreas com baixa verticalidade. Este modelo considerou também as características do Subsistema de Espaços de Integração Urbana - SEIU e do Subsistema Espaços Livres de Construção – SELC, os quais permitem o escoamento contínuo, com o mínimo possível de interrupções no fluxo de ar em comprimento retilíneo de 1km (Matzarakis e Mayer, 1992; Correia et al., 2013; Santos et al., 2017).

Os resultados da delimitação dos corredores de ventilação urbana indicam que o SEU em São Paulo apresenta somente 8,30% da área total, como possíveis áreas com condições para serem corredores de ventilação urbana (Figura 113 e 114). Nestes espaços as frequências foram de sentido: E – O (16,73 %), N – S (15,21%) ESE – ONO (14,86%) e SE – NO (14,16%) Os valores intermediários estão representados pelos vetores em direção SSE – NNO (13,41 %) e ENE– OSO (10,05%) e os menores valores para as direções de vento de NNE – SSO (8,44%) e NE – SO (7,15%) (Figura 115 e 116).

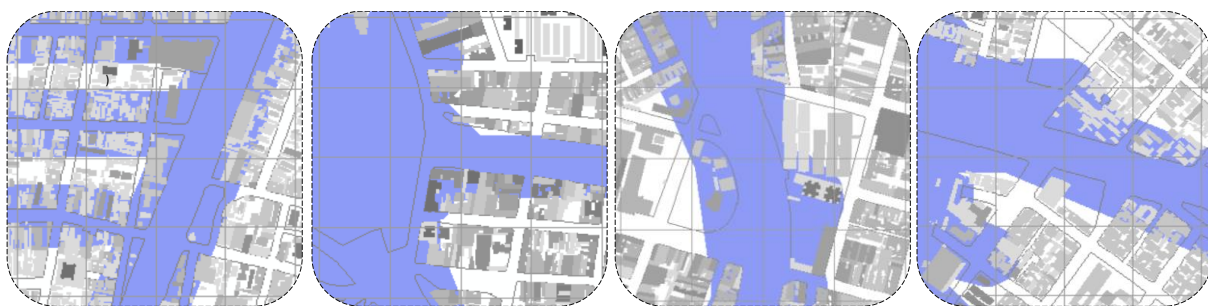
A espacialização dos resultados concentrou-se principalmente nas áreas de várzeas ocupadas pelo Rio Tietê e parte do Rio Pinheiros e em algumas regiões próximas às áreas mais periféricas da cidade. Este cenário de espacialização dos corredores de ventilação combinado com a frequência de ventos de SE indicaram boas condições para a ventilação natural avançar sobre as áreas mais urbanizadas que compreendem a região central, escoando o fluxo de ar das áreas mais frescas em direção ao centro, ainda que, nas áreas centrais ocorram poucos corredores de boa ventilação urbana.

As maiores frequências de corredores de ventilação urbana orientados nos sentidos NO – SE e N – S, vetores de direção do vento predominante da cidade (SE e S), representam uma oportunidade de maximização do potencial efeito da ventilação natural no arrefecimento dos espaços urbanos mais críticos verificados na análise da  $T_{SUP}$ , ainda que muitos corredores estejam situados em possíveis áreas com tendência para a estagnação do fluxo de ar.

A delimitação dos possíveis corredores de ventilação urbana combinado com o zoneamento das diferentes classes de densidade morfoclimática configuram ferramentas úteis ao ordenamento do território para proposição de diferentes medidas de adaptação de caráter intervencionista. Estas cartografias podem ser utilizadas e um primeiro momento para identificar aspectos na morfologia urbana em relação as suas tipologias de estruturas, tecidos e coberturas urbanas e assim trabalhar em diferentes escalas para promover melhores condições de arrefecimento, saúde e qualidade do ar.



**Figura 115 -** Mapa de corredores de ventilação urbana em São Paulo.



**Figura 116 -** Sistema de Espaços Urbanos com possibilidade de corredores de ventilação urbana em São Paulo.

### 5.10. Considerações a cerca dos resultados

$T_{SUP}$  - A análise da  $T_{SUP}$  identificou os espaços urbanos que representam os *hotspots* da Ilha de Calor Urbano de Superfície ( $ICU_{SUP}$ ) relacionados com a morfologia urbana e a topografia local, para esta análise as primeiras conclusões são:

- O padrão diurno da  $T_{SUP}$  apresentou um valor médio na ordem de 25°C, com gradientes que variam entre 20°C e 29°C considerando a média global para toda a área urbanizada. Durante o período quente e úmido a  $T_{SUP}$  mínima média foi de 23°C e máxima de 37°C, já para o período frio e seco a mínima média foi na ordem de 16°C e a máxima de 28°C em média. A diferença de  $T_{SUP}$  entre o período quente e úmido em relação ao período frio e seco foi em média na ordem de 13°C. Estes resultados corroboram em partes com estudos prévios de  $T_{SUP}$  para a MSP, apresentados na tese de Lombardo (1985) e outros autores em termos da espacialização dos *hotspots* da  $ICU_{SUP}$  em São Paulo. A autora identificou gradientes de temperatura similares em São Paulo (10°C), associados principalmente aos episódios de atuação de massas de ar polar. O estudo realizado posteriormente por Barros (2016) também indicou este perfil de comportamento das  $T_{SUP}$ , tanto em termos de valores médios quanto na espacialização das áreas mais críticas.
- Os resultados indicaram que São Paulo apresenta temperaturas da  $T_{SUP}$  iguais ou superiores a 29°C em 15,63% dos espaços urbanos. Estas áreas podem ser verificadas em quase todos pontos da cidade, mas em concentrações diferentes. Em partes, os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  decrescem em direção as áreas periféricas da cidade, e podem ser associados as tipologias de estruturas, tecidos e coberturas da morfologia urbana, que configuram um cenário de baixa densidade horizontal e vertical característico da M5 - MRVURA e M6 – MCQUA.
- Verificou-se em algumas áreas da M2 – MUC, maior influência da topografia na espacialização da  $T_{SUP}$ , sobrepondo-se aos aspectos da morfologia urbana. Durante o período frio e seco, os espaços urbanos densamente verticalizados situados em áreas topos, vertentes, colinas e serras, chegam a apresentar uma diferença média de 12°C em comparação com o período quente e úmido.
- Em outras áreas o impacto da morfologia urbana em sua geometria, orientação, perfil aerodinâmico e intensidade de ocupação, sobrepõe aos efeitos topográficos e exerce maior influência na regulação das taxas de aquecimento das superfícies, como foi verificado na M1 - MEM. Nesta macroárea, os espaços urbanos considerados *hotspots* da  $ICU_{SUP}$  podem ser associados a presença de elevada densidade horizontal, verificado com maior intensidade também na M3 – MQU e em alguns pontos da M2 – MUC.
- Na M1 – MEM, a concentração dos valores mais elevados de  $T_{SUP}$  podem ser verificados principalmente em duas regiões: I) nas áreas intersectados pelo rio Tamanduateí na Zona Central e

na direção Este do Município (distritos da Mooca, Cambuci, Vila Prudente e Ipiranga), no qual a morfologia urbana é caracterizada pela presença de grandes blocos de edificado que serviram de galpões industriais no passado; e, II) nos distritos que constituem o antigo centro da cidade (República, Brás, Pari, Santa Cecília, Bom Retiro e Sé), devido a intensidade de ocupação, impermeabilização e proximidade entre as coberturas com elevada capacidade térmica dos espaços construídos.

- Ao lado da M1 – MEM, os distritos situados próximos ao Espigão Central da Avenida Paulista (Bela Vista, Consolação, Liberdade, Vila Mariana, Jardim Paulista) que constituem grande parte da M2 - MUC, apresentaram diversos espaços construídos destinados ao uso residencial e espaços de integração urbana arborizados, em contraste com espaços construídos verticalizados, no qual predominam-se as tipologias de “arranha-céus”. Nestes locais, a morfologia urbana e a topografia local acabam por criar condições de sombreamento que impedem que a radiação solar atinja o nível mais baixo dos *canyons* urbanos na maior parte do dia, podendo ocorrer maior sensação de conforto térmico e a  $T_{SUP}$  apresentar valores intermediários.
- O aprisionamento da radiação nos *canyons* urbanos revestidos de materiais espelhados com elevada admitância térmica e o intenso tráfego que configuram a região da M2 - MUC, podem ter reflexos significantes no balanço radiativo, na elevação da temperatura do ar, na concentração de poluentes e no conforto bioclimático, e, portanto, estes espaços devem ser priorizados em futuras pesquisas científicas para verificar com precisão o efeito de balanceamento da topografia local e as condições de ventilação natural.
- Em direção às áreas periféricas, a M3 – MQU foi a macroárea que apresentou o maior perfil de elevação das  $T_{SUP}$ . Apesar da M3 – MQU estar situada em relevo de transição entre topos, colinas, vertentes em contraste com baixos terraços e áreas de várzeas dos principais rios, verificou-se um padrão semelhante na distribuição dos valores de  $T_{SUP}$  e na análise das propriedades morfoclimáticas em relação aos resultados da M1 – MEM (considerada a macroárea mais crítica do ponto de vista climático). Os valores mais elevados de  $T_{SUP}$  na M3 – MQU, representam em média 31°C e estão associados principalmente a presença de grandes blocos de edifícios geminados, com elevada proximidade. Nestes espaços o controle dos processos de adensamento construtivo e a regularização fundiária, que atualmente configuram os principais objetivos estabelecidos no PDE (2014), necessitam ser redefinidos com medidas de adaptação e requalificação do SEU, uma vez que, grande parte da M3 – MQU, concentra além de diversos *hotspots* da  $ICU_{SUP}$ , as áreas com tendência a estagnação do fluxo de ar.

**Ventilação Natural** – De acordo com o que foi demonstrado no Capítulo III, o vento em contato com as áreas urbanas apresenta diversas modificações na sua velocidade e direção, e, portanto, as áreas centrais

das cidades podem ter o efeito de dissipação de calor e limpeza dos poluentes já reduzido em relação as áreas periféricas. Estas condições numa região metropolitana como São Paulo, podem ter reflexos significantes na ventilação natural. Somam-se a estas condições da área de estudo o fato de que as conclusões apresentadas a seguir são baseadas no modelo WAsP, que considera apenas a topografia e a rugosidade em mesoescala, e, portanto, movimentos de origem térmica não foram considerados apesar de sua importância. Apresentadas essas premissas as principais conclusões da análise da ventilação são:

- São Paulo apresenta ventos em média inferiores à 3 m/s, segundo a análise dos dados da estação do Aeroporto de Congonhas indicaram. Os ventos predominantes correspondem às direções SE e S, seguido dos ventos de E, NO e N. Os resultados das frequências por direções principais corroboram com a ordem de frequência dos ventos na análise prévias de Tarifa e Armani (2001a). Na direção do vento predominante de SE, cerca de 16,59% do SEU apresentou tendência para estagnação do fluxo de ar (valores inferiores à 1 m/s) e na direção S, este valor aumentou para 19,57%. Somente 9,35% dos espaços urbanos em São Paulo podem ser classificados como possíveis zonas de tendência à aceleração do vento (maior que 4.5 m/s). Na direção SE e na direção S, este valor é na ordem de 10,17%. Os ventos de N foram os que mais sofreram com o aumento das possíveis áreas de estagnação do fluxo de ar (27,92%) e com redução das áreas de aceleração (2,7%).
- Em algumas áreas da MSP ocorre um aumento das possíveis zonas de aceleração do fluxo de ar em contato com os espaços urbanos densamente verticalizados situados em áreas de topos, serras e altas colinas. Em seguida, verificou-se uma diminuição drástica nos valores da ventilação natural nos espaços urbanos situados a sotavento. Este cenário foi verificado com maior intensidade na região do Espigão Central da Avenida Paulista e suas áreas envolventes na M2 – MUC.
- Na M3 – MQU e na M1 – MEM, ocorreram as maiores concentrações de espaços caracterizados como possíveis zonas de estagnação do fluxo de ar (até 1 m/s) para quase todas direções. De acordo com os resultados observados, na M1 – MEM a média de áreas com tendência para a estagnação do fluxo de ar foi superior em 11% à média global, ao passo que, os distritos que compõem a M3 – MQU, apresentaram a menor velocidade média máxima dos ventos (2 m/s). Este panorama de redução das áreas de aceleração é verificado tanto nos distritos situados em direção ao centro antigo como nos distritos que acompanham as áreas de adensamento vertical que constituem as margens do Rio Pinheiros (Pinheiros, Alto Pinheiros e Itaim Bibi).
- O fato de a M3 – MQU ser constituída predominantemente de usos residenciais, com um padrão médio de urbanização horizontal em transição para a verticalização, podem ter reflexos significantes no uso sustentável dos recursos naturais, na qualidade do ar e na eficiência energética. Somam-se as condições climáticas citadas a existência de uma coincidência espacial entre as áreas que tendem a estagnação do fluxo de ar em todas as direções com as áreas consideradas os *hotspots* da  $T_{SUP}$ . A

M1 – MEM e a M3 – MUC representam os cenários mais críticos sob o ponto de vista das componentes climáticas analisadas nesta tese, que podem estar associados ainda, com a concentração do ar quente e poluído, com necessidade de maior investigação em microescala.

**Morfologia Urbana** - A análise morfoclimática proposta nesta tese procurou compreender a relação da morfologia urbana em suas estruturas, tecidos e coberturas, com a ventilação natural e a  $T_{SUP}$ . Procurou-se por meio da adoção de critérios (geometria, espacialidade, desempenho aerodinâmico, textura, ocupação e organização) analisar as propriedades morfoclimáticas mais pertinentes a este tipo de estudo, tendo como base o uso de uma unidade de análise em comum (células similares as dimensões de uma quadra urbana). Neste sentido as primeiras conclusões são:

- A caracterização morfoclimática da área urbanizada de São Paulo, indicou um SEU extremamente heterogêneo, mutável e em constante transformação, produto do intenso processo de urbanização ocorrido no último século, como foi destacado Lencioni (1998) e Meyer et al. (2015), no qual o traçado disforme e o padrão de organização dos elementos básicos da forma urbana refletem na dificuldade de caracterização e agrupamento para definição de um zoneamento e a proposição de medidas ao ordenamento do território para fins climáticos.
- Os resultados da análise global demonstraram de maneira consistente que poucas áreas apresentam a prevalência de uma única tipologia de forma urbana. Considerando uma unidade de análise de 100m, poucas áreas apresentaram estruturas urbanas com a mesma orientação ou geometria, padrões contínuos de texturas e perfil aerodinâmico no tecido urbano, ou ainda o predomínio de uma única tipologia de cobertura das superfícies em termos de organização e ocupação.
- A análise dos resultados por macroáreas propostas pelo atual Plano Diretor Municipal (PDE, 2014) indicou que na MZ2 (M5 – MRVURA e M6 - MCQUA) situadas em direção às regiões periféricas da MSP, os resultados da análise morfoclimática apresentaram um padrão semelhante de distribuição dos valores por classes de intensidade, não permitindo identificar grandes contrastes morfoclimáticos. O agrupamento dos resultados na primeira metade dos histogramas, indicam a presença de estruturas, tecidos e coberturas que interagem com o fluxo de ar de modo a facilitar o seu escoamento sem interrupções contínuas e minimizam a concentração e o estresse térmico por parte da radiação solar.
- A M1 – MEM representa a área mais preocupante de São Paulo devido ao perfil de adensamento horizontal e vertical, no qual predominam espaços construídos impermeáveis, com elevada intensidade de ocupação e volumetria, situados muito próximos uns aos outros, em diversos casos geminados. Verificou-se que em alguns pontos da M1-MEM, a morfologia urbana está associada não

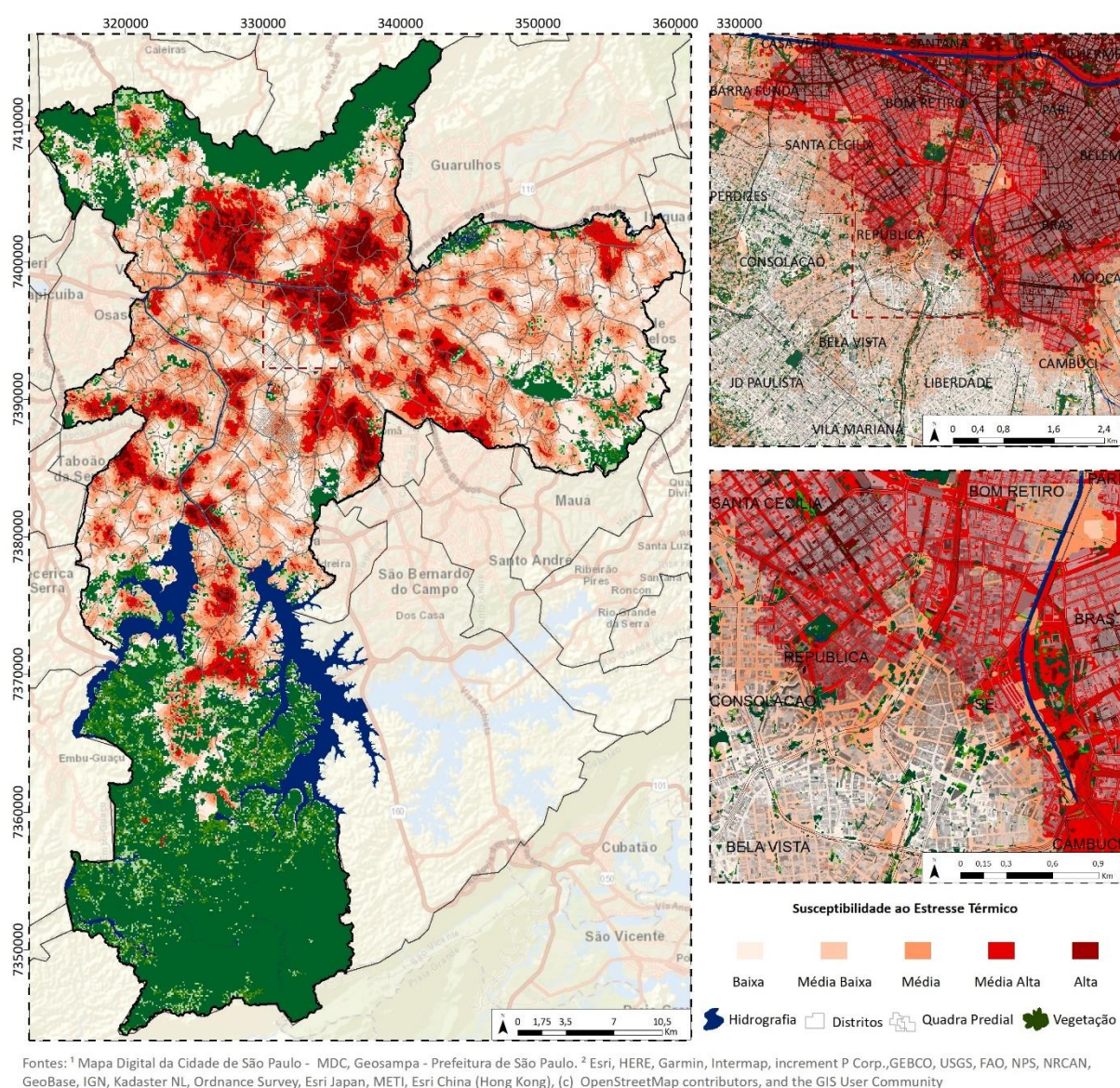
somente às áreas com tendência a redução da ventilação natural, mas também representam os *hotspots* da  $ICU_{SUP}$ .

- Em seguida, a M2 – MUC apresentou o maior perfil de adensamento vertical, com espaços construídos de elevada volumetria e alta intensidade de ocupação e impermeabilização, além de um padrão de estruturas urbanas com geometrias complexas. Nas análises de  $T_{SUP}$  e ventilação natural, a M2 – MUC aparece como uma possível área de aceleração do fluxo de ar, com baixo estresse térmico devido ao nível de sombreamento dos espaços verticalizados e a topografia de topos e vertentes. Este panorama de verticalidade em áreas de topos e vertentes apresentou reflexos imediatos a sotavento nas áreas envolventes.
- A Análise do Índice de Densidade Urbana Morfoclimática identificou os espaços considerados mais críticos localizados principalmente nos distritos da Sé, Bela Vista, República, Consolação. Os espaços urbanos com a presença maciça de áreas impermeáveis, edifícios geminados em blocos situados próximos uns aos outros, com baixo nível de espaços intersticiais foram verificados principalmente em áreas dos distritos da República, Brás, Pari, Belém, Sé, Santa Cecília, Mooca e Bom Retiro. No conjunto de distritos formado pela Bela Vista, Consolação, Liberdade, Vila Mariana, Jardim Paulista, e em diversos pontos dos distritos citados anteriormente, predominam-se as estruturas urbanas do tipo “arranha-céus” e a presença de texturas oclusas e pouco porosas que dificultam as interações entre as superfícies e a atmosfera.
- Com relação ao nível de correlação entre as propriedades morfoclimáticas, pode-se concluir que as métricas que compõem cada indicador morfoclimático tornam algumas propriedades por vezes redundantes, principalmente para efeitos visuais em mesoscala. No entanto, cada propriedade tem objetivos específicos de análise em escala local e micro, os quais não devem ser desconsiderados dependendo do tipo de estudo, zoneamento e intervenção a que se propõe. A propriedade de intensidade de ocupação por exemplo, utiliza métricas de área e número de pavimentos no cálculo, e, portanto, a correlação espacial com a impermeabilidade (área) e até mesmo a porosidade (volume) acaba por ser evidente. No entanto, como foi referido por Arantes (2006, p.223), para fins de ordenamento do território, esta propriedade pode estar associada ao maior consumo energético, pois revela a subdivisão de um espaço construído pelo número de pavimentos que o compõe, o que pode ser muito diferente de uma estrutura urbana com a mesma área ou volume, que configura uma antiga fábrica de apenas um pavimento.

## CAPÍTULO VI – ORIENTAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

### 6.1. Susceptibilidade ao Estresse Térmico

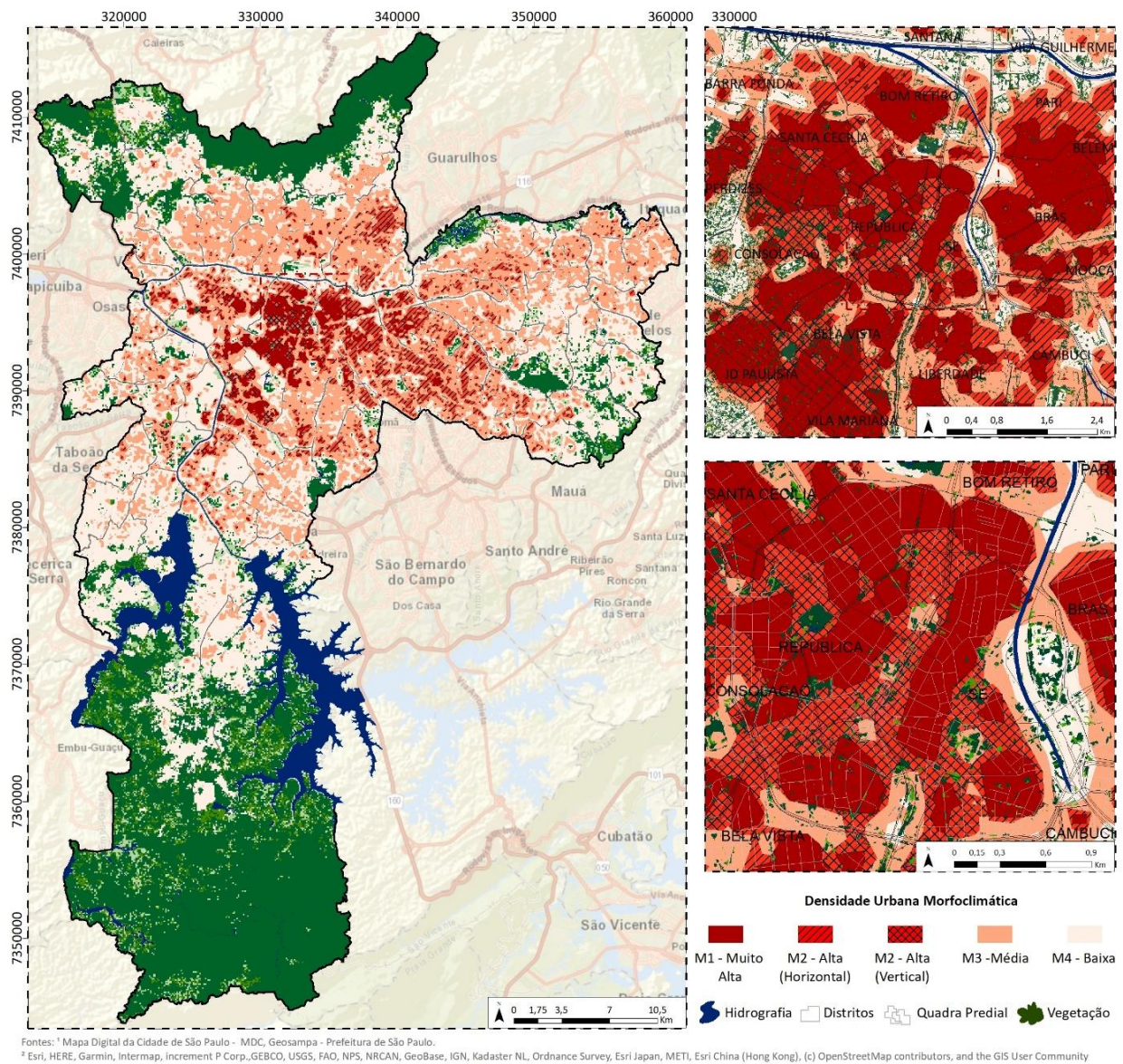
Na sequência das análises apresentadas em relação ao clima e a morfologia urbana em São Paulo procedeu-se a elaboração de uma cartografia de síntese da susceptibilidade ao estresse térmico (Figura 117), delimitando-se os espaços urbanos em 5 classes de intensidade. Esta cartografia também serviu de base para a cartografia final de síntese ao ordenamento do território, delimitando os espaços que necessitam de medidas de intervenção, monitorização, adaptação e manutenção de acordo com a susceptibilidade ao estresse térmico.



**Figura 117** – Susceptibilidade ao estresse térmico para ordenamento do território em São Paulo.

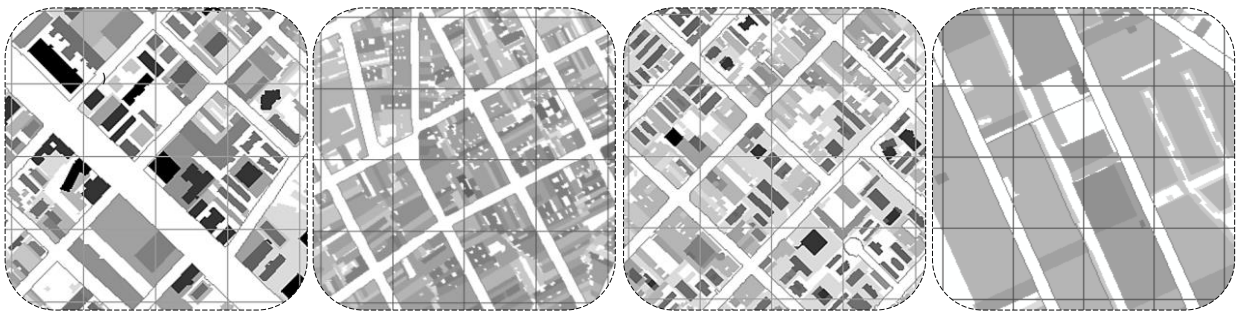
## 6.2. Densidade Urbana Morfoclimática

A segunda cartografia de síntese ao ordenamento do território identificou quatro principais grupos de macroáreas de densidade urbana morfoclimática (muito baixa, média, alta vertical e horizontal e muito alta). A seguir é apresentada uma caracterização das macroáreas de densidade urbana morfoclimática de acordo com a predominância dos tipos de propriedades da forma urbana e o nível de adensamento no interior das células como unidades de análise (Figura 118).



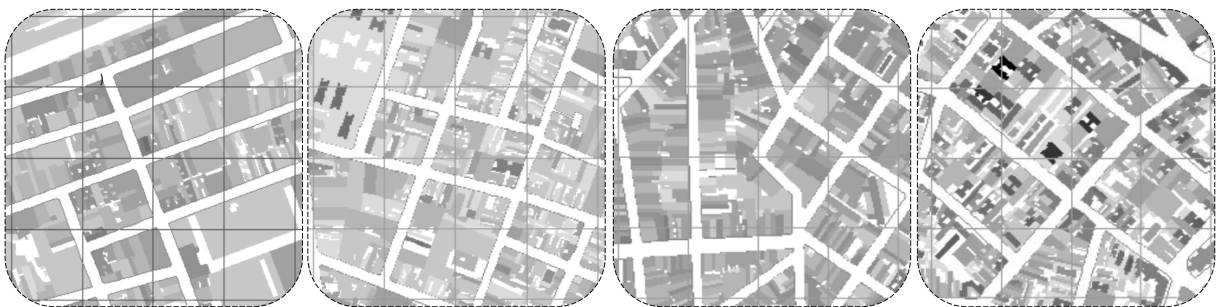
**Figura 118** - Densidade urbana morfoclimática em São Paulo.

I) Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Elevada - concentra os níveis mais elevados dos resultados de todas as propriedades morfoclimáticas:  $C_p > 4.25$ ,  $C_x > 1.58$ ,  $S_n > 3.11$ ,  $D_r > 1.20$ ,  $R_g > 2.0$ ,  $P_o > 1.26$ ,  $O_c > 2.15$ ,  $V_t > 0.70$ ,  $I_m > 0.75$ ,  $I_o > 0.82$ ,  $C_n > 0.84$ ,  $P_x > 1.40$ . Nestes espaços verificou-se um perfil de adensamento vertical e horizontal sem a presença de corredores de ventilação urbana, no qual os espaços construídos configuram alta intensidade de ocupação, impermeabilização, verticalidade, volumetria e um padrão organizacional que tende a exercer incontestável pressão sobre os espaços de integração urbana e os espaços livres de construção (Figura 119).



**Figura 119** - Espaços urbanos na Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Elevada.

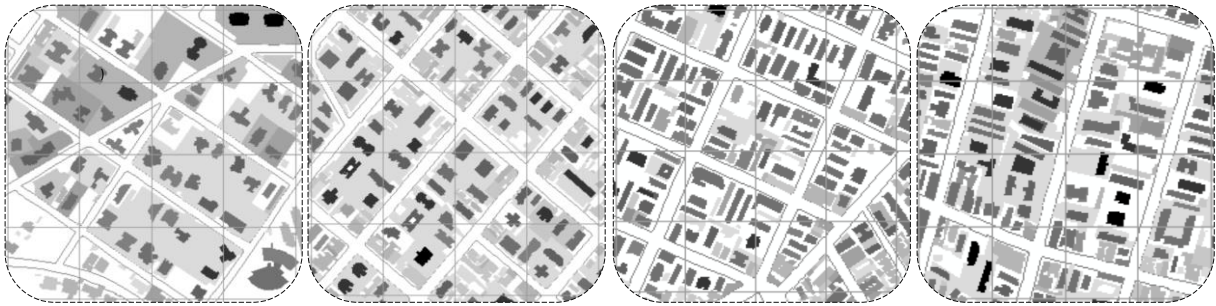
II) Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Horizontal Elevada - compreende os espaços urbanos impermeáveis, com e elevada intensidade de ocupação, situados muito próximo uns aos outros e em diversos casos com paredes geminadas, seguido de um padrão médio alto de verticalização. Nesta macroárea os espaços mais densos compreendem o nível de saturação das coberturas urbanas, seguido dos resultados das propriedades das estruturas e tecidos urbanos:  $C_p - 3.66$ ,  $C_x - 1.15$ ,  $S_n - 2.21$ ,  $D_r - 0.88$ ,  $R_g - 1.0$ ,  $P_o - 1.01$ ,  $O_c - 1.51$ ,  $V_t - 0.58$ ,  $I_m - 0.75$ ,  $I_o - 0.85$ ,  $C_n - 0.84$ ,  $P_x - 1.40$  (Figura 120).



**Figura 120** - Espaços urbanos na Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Horizontal Elevada.

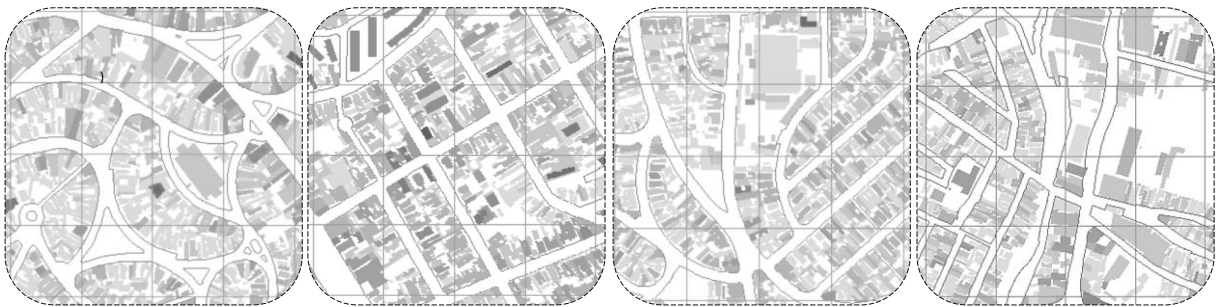
III) Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Vertical Elevada- compreende os espaços urbanos mais densos sob o ponto de vista morfoclimático do tecido urbano, seguido dos valores intermediários de coberturas e estruturas urbanas:  $C_p - 1.91$ ,  $C_x - 0.84$ ,  $S_n - 3.11$ ,  $D_r - 1.20$ ,  $R_g - 2.0$ ,  $P_o -$

1.26, Oc - 2.15, Vt - 0.70, Im - 0.62, Io - 0.55, Cn - 0.61, Px - 0.93. Nesta macroárea a altura dos espaços construídos se sobrepõe em diversas vezes a largura dos espaços envolventes, configurando áreas oclusas e rugosas que criam um perfil aerodinâmico verticalizado de elevada intensidade de ocupação e volumetria (Figura 121).



**Figura 121** - Espaços urbanos na Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Vertical Elevada.

IV) Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Média - expressa os níveis intermediários dos resultados de todas as propriedades morfoclimáticas: Cp - 1.37, Cx - 0.40, Sn - 1.23, Dr - 0.47, Rg - 0.70, Po - 0.73, Oc - 0.95, Vt - 0.41, Im - 0.43, Io - 0.41, Cn - 0.49, Px - 0.61. Nesta macroárea o SEU apresenta maior equilíbrio entre a proporção de espaços construídos em relação aos espaços de integração urbana e livres de construção, com um perfil de adensamento horizontal médio e vertical médio baixo (Figura 122).



**Figura 122** - Espaços urbanos na Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Média.

V) Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Baixa - apresenta o agrupamento dos espaços urbanos com valores mínimos para as propriedades morfoclimáticas: Cx - 0.72, Cp - 0.18, Sn - 0.69, Dr - 0.20, Rg - 0.35, Vt - 0.11, Po - 0.33, Oc - 0.60, Im - 0.20, Io - 0.21, Cn - 0.18, Px - 0.23. Nesta macroárea predominam os espaços urbanos com geometrias retilíneas de baixa verticalidade que não configuram grandes obstáculos para a ventilação, e apresentam boas condições de espaçamento entre os edifícios, baixo nível de impermeabilização do SEU (Figura 123).

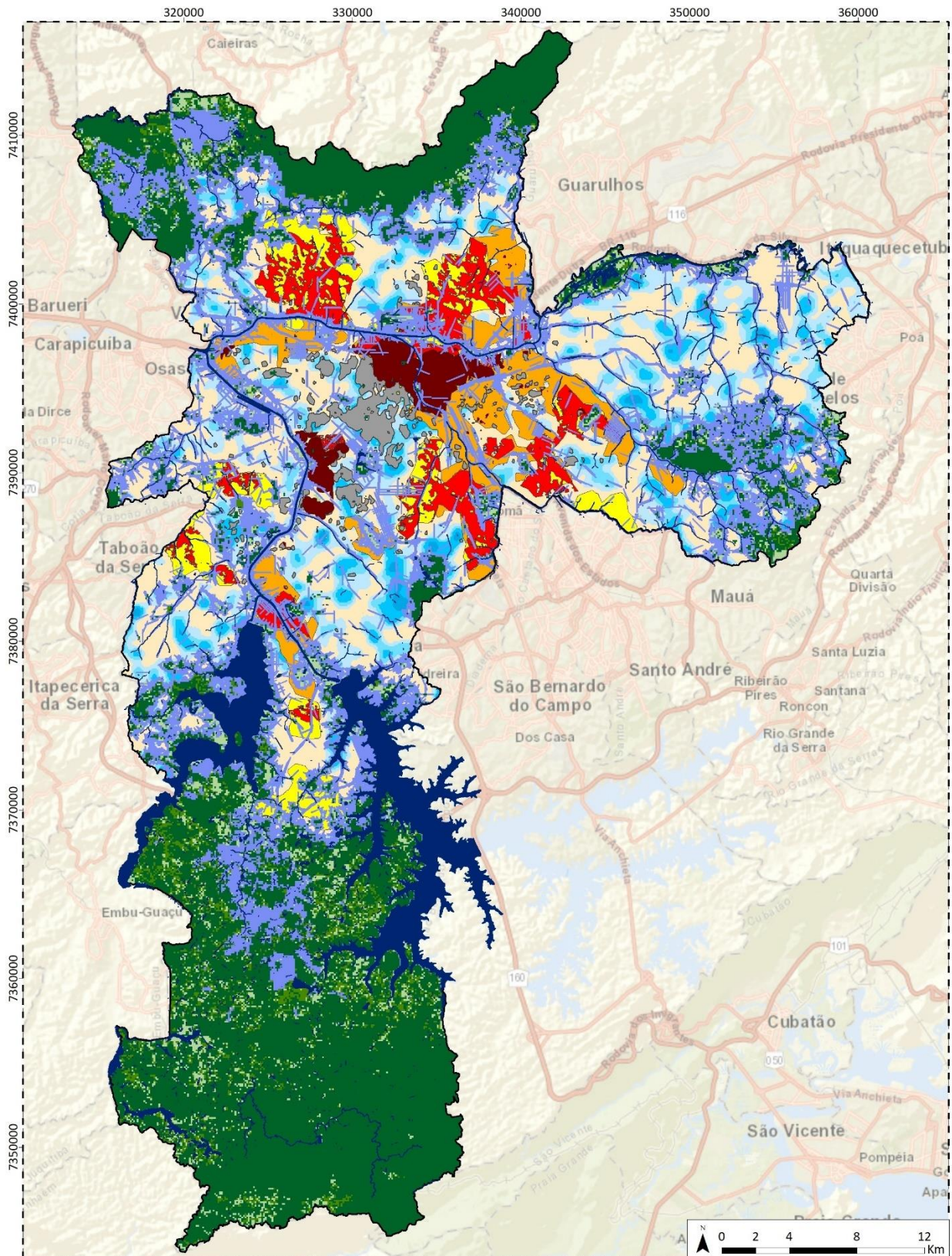


**Figura 123** - Espaços urbanos na Macroárea de Densidade Urbana Morfoclimática Baixa.

### **6.3. Cartografia de Síntese e Orientações ao Ordenamento do Território**

A última parte da tese procurou organizar todo o conhecimento científico produzido em uma cartografia de fácil interpretação para servir ao ordenamento do território de modo a orientar a aplicabilidade da informação climática no âmbito de novos projetos de intervenções urbanísticas e na possível revisão do Plano Diretor Municipal. Dada complexidade e os contrastes morfoclimáticos que o território de São Paulo apresenta, procurou-se por meio de uma cartografia de síntese final a delimitar os espaços urbanos segundo a necessidade de medidas de: I) intervenção; II) adaptação e monitorização; III) expansão; e, IV) manutenção (Figura 124).

Para as classes de intervenção foram propostas orientações ao ordenamento do território com base em diversos estudos de cidades como Lisboa (Lopes, 2003; Alcoforado et al., 2006; Alcoforado, 2008); Roma (Battisti et al., 2018); Berlin (Thierfelder et al., 2016); Hong Kong (Fung et al., 2006; Ng et al., 2011; Ng, 2012); Tokyo (Ashie et al., 2005); San Francisco (Kim, 2014); Manchester (Skelhorn et al., 2014); Graz (Lazar e Podesser, 1999); Wellington - Nova Zelândia (Donn, 2011); Nova York - EUA (Rosenzweig et al., 2009).



- Zoneamento Morfoclimático em São Paulo**
- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. I. 1 – Áreas de Intervenção Prioritária</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #808080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. I. 2 – Áreas de Intervenção de Densidade Morfoclimática Muito Alta</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FF0000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. I. 3 – Áreas de Intervenção para Redução do Estresse Térmico</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFA500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. A. 1 - Áreas de Adaptação e Monitorização de baixa Ventilação Natural</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. A. 2 - Áreas de Adaptação e Monitorização de alta TSUP</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A. E. – Áreas de Expansão Urbana</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A.M.1 - Áreas de Manutenção do Corredores de Ventilação Urbana</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A.M.2 - Áreas de Manutenção da Ventilação Natural</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #008000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> A.M.3 – Áreas de Manutenção dos Espaços Verdes</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #000080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Hidrografia</li> </ul> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fontes: <sup>1</sup> Mapa Digital da Cidade de São Paulo - MDC, Geosampa - Prefeitura de São Paulo. <sup>2</sup> Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), (c) OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

**Figura 124 - Mapa do zoneamento morfoclimático para o ordenamento do território em São Paulo.**

**A. I. 1 – Áreas de Intervenção Prioritária** - Representa os espaços urbanos mais críticos na MSP, no qual ocorre os maiores níveis de densidade morfoclimática (horizontal e vertical) situados em terrenos climaticamente susceptíveis ao estresse térmico devido a tendência de estagnação do fluxo de ar e maiores  $T_{SUP}$ . Estes espaços são prioritários para futuras intervenções urbanísticas e o aprofundamento de análises científicas em microescala, os quais tem como principais orientações:

Subsistema de Espaços Construídos - SEC

- Limitar o aumento do número de pisos nos edifícios com vistas a conter o adensamento vertical ( $Vt < 0.4$ );
- Evitar e reduzir as superfícies impermeáveis por meio da ampliação do uso de materiais de construção com coberturas de baixa condutividade e elevado albedo;
- Priorizar a intensificação do verde urbano como telhados e paredes verdes como cobertura dos espaços construídos;
- As direções predominantes do vento (Sul e Sudeste) e movimento da massa de ar devem ser consideradas quando os edifícios forem desenvolvidos e reposicionados.

Subsistema de Espaços de Integração Urbana - SEIU

- Garantir a ventilação de áreas mais frescas, principalmente de fora da cidade através de cursos d'água e áreas verdes;
- Intensificar as árvores de arruamento nos espaços de integração urbana que não estão orientados na direção dos ventos dominantes e que não estejam situados em áreas de várzeas, com vistas a minimizar os riscos de quedas e o aumento da rugosidade aerodinâmica;
- Intensificar a montagem de pontos de observação climática e controle da poluição atmosférica.

Subsistema de Espaços Livres de Construção - SELC

- Ampliar o número de áreas verdes nos espaços livres de construção no qual a vegetação arbórea seja o elemento dominante;
- Limitar a ampliação dos espaços construídos sobre os espaços intersticiais com vistas a conter o adensamento horizontal.

**A. I. 2 – Áreas de Intervenção de Densidade Morfoclimática Muito Alta** - Representa os espaços urbanos mais densos do ponto de vista morfoclimático, no qual a morfologia urbana configura cenários desfavoráveis à ventilação, dispersão de poluentes e dissipação de calor tanto no ar quanto nas superfícies. Nestes espaços as medidas intervencionistas visam conter o aumento da densidade urbana horizontal e

vertical, e, portanto, as orientações quanto a procedimentos intervencionistas para cada tipo de subsistema de espaço urbano seguem as descrições anteriores. Com vistas a garantir melhores condições de conforto bioclimático e qualidade de vida, algumas estratégias relacionadas com a morfologia dos espaços urbanos devem ser consideradas do ponto de vista da tipologia de densidade morfoclimática como será descrito a seguir.

#### Subsistema de Espaços Construídos – SEC

- Priorizar geometrias urbanas aerodinâmicas de baixa complexidade ( $C_x < 0.4$ ), que facilitam o escoamento do fluxo de ar;
- Aumentar o uso de materiais com baixa capacidade térmica e elevado albedo, sobretudo nos grandes blocos de edifícios com geometria compacta ( $C_p > 2.0$ );
- Manter os limiares de altura, área e volume ( $P_o < 0.7$ ) dos espaços construídos monitorados para evitar maior nível saturação do SEU.

#### Subsistema de Espaços de Integração Urbana – SEIU

- Priorizar a implantação dos corredores de ventilação urbana de modo a conectar as áreas mais frescas aos espaços mais densos;
- Reduzir o nível de obstrução nas vias e áreas circundantes ( $O_c < 1.0$ ) que estejam orientadas aos ventos dominantes;
- Intensificar os pontos de controle e monitoramento da qualidade do ar e da temperatura.

#### Subsistema de Espaços Livres de Construção - SELC

- Intensificar a presença da cobertura vegetal nos espaços livres de construção;
- Priorizar o espaçamento e a organização dos espaços livres de construção com lacunas suficientes entre os blocos de construção de modo a garantir caminhos para a ventilação natural e a aumentar a permeabilidade urbana.

**A. I. 3 – Áreas de Intervenção para Redução do Estresse Térmico** - Representam os espaços urbanos mais críticos do ponto de vista do estresse térmico medido pela  $T_{SUP}$  associados às áreas de possível estagnação do fluxo de ar. Nestes espaços o efeito topográfico sobrepõe as tipologias de morfologia urbana com medidas de intervenção similares as descritas anteriormente na A.I.1. Algumas medidas específicas com relação as áreas que representam os *hostpots* da  $ICU_{SUP}$  e a baixa capacidade de ventilação natural são descritas a seguir.

**A. A. 1 - Áreas de Adaptação e Monitorização de baixa Ventilação Natural** - Representa os espaços urbanos em que a morfologia urbana e a topografia atuam como barreiras a progressão do fluxo de ar, criando áreas em que a ventilação natural tende a estagnação e redução da capacidade do vento de “limpar” a cidade, dispersar poluentes e dissipar o calor.

**A. A. 2 - Áreas de Adaptação e Monitorização de alta  $T_{SUP}$**  - Representa os espaços urbanos em que a topografia e a morfologia urbana condicionam as trocas entre as superfícies e atmosfera, criando um padrão diurno dos valores mais elevados da  $ICU_{SUP}$ . Nestes espaços devem ser proporcionadas sombra suficiente pelas árvores e edifícios, para melhorar o conforto térmico.

- Evitar o adensamento do uso do solo para fins residenciais, uma vez que, estes espaços podem estar associados a concentração de poluentes e aos maiores níveis de desconforto térmico;
- Evitar o adensamento horizontal e instalação de novos empreendimentos em estruturas urbanas geminadas ( $C_n < 0.5$ ) em grandes blocos de edifícios sem espaçamento entre os edifícios ( $P_x < 0.6$ );
- Limitar o adensamento vertical e aumento do número de pisos por pavimentos ( $I_o < 0.4$ ), de modo a garantir boas condições de sombreamento sem constituir tecidos urbanos com elevada rugosidade aerodinâmica ( $R_g < 0.7$ );
- Priorizar as pesquisas científicas em larga escala para proposição do uso de materiais com baixa admitância térmica e melhores condições de ventilação interna nos edifícios;
- Reduzir o uso de coberturas urbanas que tendem ao acúmulo de calor e intensificar a arborização nas áreas de *hotspots* da  $ICU_{SUP}$ ;
- Aumentar os pontos de monitoramento dos níveis de estresse térmico e poluentes;
- Priorizar a alocação dos espaços livres de construção com elevada densidade arbórea e o uso intensivo de árvores de arruamento em direções de fraca frequência dos ventos na MSP.

**A. E. – Áreas de Expansão e Requalificação Urbana** – Representa os espaços urbanos com menor susceptibilidade ao estresse térmico e que ao mesmo tempo a morfologia urbana constitui um padrão de maior equilíbrio entre as frações de espaços construídos, livres de construção e espaços de integração urbana. Nestas áreas o adensamento vertical e horizontal pode ser ordenado de modo a garantir melhores condições de ventilação natural e redução das  $T_{SUP}$ , por meio da intensificação do uso da ventilação natural para arrefecimento interno dos edifícios e melhorias nas condições de iluminação interna, garantindo melhor uso sustentável dos recursos energéticos e maximização do potencial da morfologia urbana em termos morfoclimáticos.

**A.M.1 - Áreas de Manutenção do Corredores de Ventilação Urbana** - Representam os espaços em que a morfologia urbana e a densidade morfoclimática apresentam condições favoráveis ao escoamento do fluxo de ar (devido a largura dos espaços, o comprimento retilíneo sem obstruções por mais de 1km de distância), com necessidade de serem mantidos e ampliados. Nestes espaços as árvores de arruamento devem ser espaçadas de modo a não constituírem barreiras contínuas ao fluxo de ar, e especial atenção deve ser dada aos espaços em que os corredores de ventilação urbana estão situados em áreas de aceleração do fluxo de ar, pois estas condições podem estar associadas ao risco de queda. Deve-se limitar a construção de edifícios altos ou médios com a fachada orientada perpendicularmente aos ventos dominantes (SE e S).

**A.M.2 - Áreas de Manutenção da Ventilação Natural** - Representam os espaços urbanos em que a ventilação natural apresenta tendência para a aceleração do fluxo de ar devido a topografia acidentada e a morfologia urbana. Portanto, constituem os espaços com condições bioclimáticas favoráveis durante o período quente e úmido, melhores condições para dissipação de calor e dispersão dos poluentes, com potencialidade de uso da ventilação natural para o arrefecimento interno dos espaços construídos. Nestes espaços o ordenamento do território deve priorizar a manutenção dos limiares de altura e volume dos espaços construídos para redução do impacto que a rugosidade e verticalidade do tecido urbano causam na aceleração do fluxo de ar seguida de uma forte estagnação dos espaços a sotavento. As estruturas urbanas devem ser orientadas ao escoamento dos ventos predominantes (SE e S), com formas aerodinâmicas que facilitem o fluxo de ar escoar das partes mais elevadas para as regiões de várzeas para melhor conectar as áreas mais frescas da cidade aos espaços críticos.

**A.M.3 – Áreas de Manutenção dos Espaços Verdes** – Representam os espaços urbanos que devem ser mantidos e ampliados, de modo a favorecer a diversificação e o equilíbrio entre os tipos de SEU. Nestas áreas a presença de cobertura vegetal arbórea deve ser priorizada garantindo a eficiência das áreas verdes em termos de funções estéticas, ecológicas e sociais. A conexão entre os espaços verdes deve ser priorizada garantindo a existência de uma infraestrutura verde que integra as partes mais frescas da cidade com as áreas mais críticas, limitando seu uso apenas aos corredores de ventilação urbana que estão orientados às direções do vento dominante e que constituem áreas de aceleração da ventilação natural.

## CONCLUSÕES

---

O acelerado processo de urbanização ocorrido durante as primeiras oito décadas do século XX em São Paulo, transformaram a capital da província cafeeira na atual maior metrópole do continente americano. Este intenso processo de transformação na capital paulista, conjugado com a ausência de ordenamento do território com vistas às questões ambientais, fizeram de São Paulo um espaço de intensos contrastes morfológicos e climáticos que resultam, atualmente, em diversas áreas críticas do ponto de vista da concentração de calor, da baixa capacidade de ventilação natural e elevada densidade urbana.

Esta tese teve como objetivo compreender a morfologia urbana de São Paulo em suas estruturas, tecidos e coberturas, em conjunto com a análise de duas componentes fundamentais da climatologia urbana ( $T_{SUP}$  e ventilação natural), para fins de ordenamento do território e requalificação dos espaços urbanos. Procurou-se por meio de diferentes modelos, propor um zoneamento morfoclimático para delimitar os espaços urbanos que necessitam de futuras medidas de manutenção, requalificação e intervenção, garantindo melhorias na saúde e qualidade de vida, na eficiência energética e na procura por uma cidade mais sustentável.

Com base nas análises obtidas a sustentação das hipóteses apresentadas inicia-se pela confirmação parcial da primeira hipótese de que “a Ilha de Calor de Superfície (ICUSUP) na Metrópole de São Paulo não ocorre de modo aleatório, sua intensidade e espacialização é sobretudo condicionada por fatores que envolvem morfologia urbana em suas estruturas, tecidos, coberturas”.

Os resultados obtidos por meio do uso de imagens Landsat indicaram que a morfologia urbana (sobretudo a análise das coberturas urbanas) controla em grande parte o padrão diurno da  $T_{SUP}$  em São Paulo, com resultados que encontram conformidade com o embasamento teórico apresentado e coincidência espacial significativa (em média 70% dos resultados). Embora São Paulo apresente diversos espaços urbanos com o predomínio de coberturas urbanas impermeáveis situadas muito próximas umas às outras, a espacialização dos *hotspots* da  $ICU_{SUP}$  não ocorre igualmente em todo o território municipal.

Em alguns pontos, principalmente próximo ao Espigão Central da Avenida Paulista, as cartografias produzidas indicaram gradientes até 12°C de diferença devido ao efeito de sombreamento intensivo durante o período diurno, e, portanto, mesmo com níveis extremos de densidade urbana morfoclimática, o efeito da topografia local interage com a morfologia urbana criando áreas pouco susceptíveis ao estresse térmico. Estes espaços devem ser priorizados em futuras investigações, para avaliar também o padrão noturno da  $ICU_{SUP}$  e com relação a temperatura do ar, uma vez que, espaços urbanos densamente verticalizados tendem a aprisionar a radiação na maior parte do dia e dificultar a dispersão dos poluentes, o que pode ter reflexos significativos nas temperaturas do ar e das superfícies que revestem as fachadas.

Os resultados da análise da ventilação natural por meio do modelo WAsP, permitiu identificar os espaços urbanos em São Paulo que apresentam tendência para a estagnação do fluxo de ar e para a criação de zonas de aceleração, com resultados que confirmam parcialmente a segunda hipótese de que “existe uma propensão elevada do território da Metrópole de São Paulo em apresentar condições desfavoráveis a ventilação natural, sendo fraca a capacidade de resposta dos espaços urbanos para o dissipar calor e dispersar poluentes”.

Embora existam áreas em que a morfologia urbana dos elementos em superfície, interage com o fluxo de ar, criando zonas de aceleração e estagnação, os resultados não seguem um padrão homogêneo em todo o território. Verificou-se que o SEU de São Paulo apresenta baixa capacidade para criação de corredores de ventilação urbana (8,30% do território), e os resultados da análise morfoclimática, sobretudo das propriedades do tecido urbano (rugosidade, verticalidade, oclusividade e porosidade) que configuram os níveis mais elevados de densidade urbana vertical, representam na maior parte dos casos, as áreas de menor velocidade dos ventos, configurando zonas de possível estagnação do fluxo de ar. No entanto, a espacialização das velocidades médias dos ventos em todas as direções, indicaram que, em áreas densamente verticalizadas situadas próximas ao Espigão Central da Avenida Paulista, ocorreu uma intensificação dos movimentos de aceleração dos ventos, seguida de uma queda abrupta na velocidade a sotavento. Nestes espaços a topografia local interage com a morfologia urbana sobrepondo-se ao efeito de barreira dos elementos em superfície. Nas demais áreas com elevada densidade vertical, situadas em relevos pouco acidentado, verificou-se a conformidade dos resultados para a tendência de estagnação do fluxo de ar.

Após analisar os resultados por valores globais e por macroáreas definidas pelo atual Plano Diretor Estratégico (PDE, 2014), a hipótese de que “o conhecimento dos padrões de intensidade e espacialização dessas componentes climáticas e as propriedades da morfologia urbana poderiam sustentar um conjunto de ferramentas ao ordenamento do território de modo a delimitar os espaços urbanos de acordo com suas características morfoclimáticas” foi confirmada.

A análise dos resultados por macroáreas propostas pelo atual Plano Diretor Municipal (PDE, 2014), constatou que o macrozoneamento do PDE (2014) acaba por generalizar importantes contrastes morfoclimáticos, os quais mesmo ao nível da subdivisão por distritos não seria suficiente, devido a diversidade de combinações morfológicas do SEU. Neste sentido, a investigação das propriedades morfoclimáticas possibilitou elaborar um perfil de predominâncias e resultou na delimitação dos espaços urbanos de acordo com os níveis e o tipo de densidade urbana morfoclimática (horizontal, vertical e ambas) e o nível de susceptibilidade ao estresse térmico em que o território está exposto devido à baixa capacidade de ventilação natural, elevada  $T_{SUP}$  ou ainda às áreas mais críticas em que ocorre as duas condições citadas.

Por último, os resultados obtidos pela análise das propriedades morfoclimáticas, da ventilação natural e da  $T_{SUP}$  permitem confirmar a última hipótese de que “é possível sustentar a determinação das adaptações na morfologia urbana para manutenção dos corredores de ventilação natural e urbanos e

planejar a disposição dos espaços construídos para minimizar a obstrução do fluxo de ar, permitindo maior capacidade de ventilação natural com potencial de dispersão de poluentes e dissipação de calor”.

Como diversos estudos apontam, o espaço urbano é um sistema mutável e em constante transformação, no qual a proposição de medidas ao ordenamento do território é um desafio contínuo. Neste sentido os SIG foram fundamentais nesta tese, pois possibilitam a criação de um conjunto de técnicas e ferramentas ao ordenamento do território, conferindo celeridade e continuidade ao processo de monitoramento e manutenção de áreas estratégicas, além de permitir que este tipo de estudo seja utilizado como base em análises multidisciplinares futuras. Um dos pontos mais relevantes no modelo apresentado com base no uso da gelha composta por células como unidade de análise é a facilidade de monitoramento e atualização dos dados (valores das propriedades morfoclimáticas e a inserção de informações sejam elas climáticas, do sistema de espaços urbanos ou de outros campos de investigação), que possibilitam delimitar as áreas de acordo com a necessidade de gestão (intervenção prioritária, requalificação e manutenção), em conformidade aos estudos mais recentes de ordenamento do território para fins climáticos.

### **Perspectivas de investigação para trabalhos futuros**

Os resultados alcançados nesta tese, embora sejam significativos para compreensão das relações entre a morfologia urbana e o clima urbano, devem ser interpretados como um ponto de partida para o desenvolvimento de futuros trabalhos em São Paulo e em outras localidades. A fiabilidade dos resultados será consolidada à medida que novos estudos forem realizados, principalmente nas áreas delimitadas com necessidade de maior investigação.

Apesar do relativo sucesso dos modelos aplicados nesta tese, algumas limitações tornaram-se evidentes, com aspectos a serem considerados em futuras análises e no aprimoramento da informação morfoclimática produzida. De fato, São Paulo necessita de uma rede de monitoramento do clima em larga escala, condizente com os espaços urbanos que sofrem com sobreaquecimento das superfícies e possível estagnação do fluxo de ar. Este aspecto acaba por limitar as investigações em escalas local e micro, como aconteceu neste trabalho. Numa segunda fase de investigações, após a realização de medições locais e simulações das condições climáticas em microescala, estes espaços podem ser utilizados para análise e definição do tipo e a densidade de vegetação arbórea necessária para reduzir as  $T_{SUP}$ , melhorar o conforto térmico e reduzir a poluição nas áreas envolventes.

Sobre as  $T_{SUP}$ , de acordo com o Capítulo II, as imagens orbitais dificilmente retratam a realidade total da temperatura de superfície, sendo comumente imageado apenas o topo das superfícies e algumas áreas adjacentes, além de outras limitações com relação a resolução espacial e temporal. Portanto, apesar do método utilizado mostrar-se eficiente na delimitação dos *hostspots* da  $ICU_{SUP}$ , a análise em larga escala

de imagens Landsat representa apenas o padrão diurno das  $T_{SUP}$ , e, portanto, a análise por outras imagens de satélite pode aprimorar os resultados alcançados e conferir maior fiabilidade a este tipo de estudo.

As componentes do clima urbano tratadas nesta tese envolveram diferentes escalas de mensuração, o que no caso da ventilação natural foi muito abrangente. Os resultados da análise da ventilação natural não correspondem as velocidades reais em termos absolutos para a escala local e micro, o uso e interpretação dos resultados para simulações das condições de conforto térmico, ventilação interna e magnitude das turbulências exigem medições locais. A ausência de modelos climáticos para modelação do vento em diferentes escalas do meio urbano, acaba por dificultar a parametrização da informação espacial, configurando grande parte dos desafios em estabelecer correlações, e ao mesmo tempo suportam motivações para análises futuras. Os modelos de ventilação natural para cidades grandes e áreas urbanas inteiras estão ausentes e os modelos climáticos urbanos disponíveis que fornecem propostas de resolução imprecisas ou cobrem apenas pequenas áreas urbanas.

O modelo utilizado nesta tese deve ser considerado com algumas limitações, como foi referenciado ao falar da simulação pelo *software* WASP. É recomendado o aprofundamento das análises com base em outro modelo, que considere ainda os efeitos térmicos na ventilação natural, pois podem produzir contrastes na espacialização do fluxo de ar, sobretudo, nas áreas mais verticalizadas. Apesar das limitações citadas, o modelo foi utilizado por exemplo, em Lisboa, por Lopes (2003), em Santos litoral de São Paulo por Prata-Shimomura (2006), Campinas por Prata-Shimomura et al., (2015), no Funchal por Lopes (2016), com resultados satisfatórios que contemplam a produção de cartografias da ventilação natural para o ordenamento do território.

A análise do clima urbano para fins de ordenamento do território não se limita apenas às componentes analisadas nesta tese e o aprimoramento da informação climática é uma tarefa contínua que necessita constante revisão. Em futuras análises, para a delimitação das áreas mais vulneráveis do ponto de vista climático, seria relevante a obtenção de informações da umidade e temperatura do ar em larga escala, com vista a permitir uma melhor avaliação dos espaços urbanos em termos de uma análise climática que contemple aspectos relevantes da ICU das superfícies e do ar.

Face às dificuldades e limitações encontradas no desenvolvimento desta tese, sugere-se ainda que estudos futuros, procedam à atualização da base de dados disponibilizada pelo Mapa Digital da Cidade de São Paulo (MDC), com vista à construção de informações mais condizente com o atual estado das estruturas, tecidos e coberturas urbanas que formam este complexo sistema de espaços urbanos, e que, informações relacionadas com as áreas de favelas e assentamentos precários também possam ser investigadas nos modelos apresentados.

O uso da grelha e das células como unidade de análise mostrou-se uma ferramenta extremamente eficiente e promissora ao possibilitar que a informação morfoclimática seja constantemente atualizada para viabilizar o aprofundamento dos estudos neste domínio. Adicionalmente, seria importante ensaiar a

modelação em diferentes escalas com as propriedades morfoclimáticas que se mostraram mais determinantes na delimitação dos espaços urbanos mais densos do ponto de vista climático em *software* como o Envi-met, UMEP etc.

Os resultados desta investigação mostram-se relevantes ao ordenamento morfoclimático do território de São Paulo, espera-se que os futuros trabalhos venham a integrar este prisma do conhecimento acadêmico que reforça a interdisciplinaridade e que este estudo sirva de insumo à futuras intervenções urbanas, além de fornecer informações, modelos, ferramentas úteis para os planejadores, geógrafos, *designers*, arquitetos e engenheiros que lidam com o processo de ordenamento do território.

Esta tese que procurou reafirmar as pontes do conhecimento entre estes dois campos de investigação que tanto podem colaborar na promoção de cidades mais sustentáveis. O clima urbano e a morfologia urbana são neste sentido fundamentais de serem investigados e o uso eficiente da informação científica por parte da gestão das cidades pode ter reflexos diretos na qualidade de vida, no conforto bioclimático, valorização mobiliária através de medidas de requalificação do sistema de espaços urbanos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Adamek, K., Vasan, N., Elshaer, A., English, E., & Bitsuamlak, G. (2017). Pedestrian level wind assessment through city development: A study of the financial district in Toronto. *Sustainable cities and society*, 35, 178-190.
- Adolphe, L. (2001). A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and planning B: planning and design*, 28(2), 183-200.
- Aida, M. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure—A model experiment. *Boundary-layer meteorology*, 23(4), 405-413.
- Aida, M., & Gotoh, K. (1982). Urban albedo as a function of the urban structure—A two-dimensional numerical simulation. *Boundary-layer meteorology*, 23(4), 415-424.
- Aires, F., Prigent, C., Rossow, W. B., & Rothstein, M. (2001). A new neural network approach including first guess for retrieval of atmospheric water vapor, cloud liquid water path, surface temperature, and emissivities over land from satellite microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D14), 14887-14907.
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar energy*, 70(3), 295-310.
- Akman, S. D. (2017). *Parametric Landscape Urbanism: A Model Proposal For Operational Framework*. Master Thesis. Middle East Technical University.
- Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., & Moghtaderi, B. (2018). The Significance of the Orientation on the Overall buildings Thermal Performance—Case Study in Australia. *Energy Procedia*, 152, 372-377.
- Alberti, M. (1999). Modeling the urban ecosystem: a conceptual framework. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(4), 605-629.
- Alberti, M., & Marzluff, J. M. (2004). Ecological resilience in urban ecosystems: linking urban patterns to human and ecological functions. *Urban ecosystems*, 7(3), 241-265.
- Alcoforado, M. J., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005). *Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa (relatório 4)*. Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa: Lisboa, Portugal.
- Alcoforado, M. J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning: the example of Lisbon (Portugal). *Landscape and urban planning*, 90(1-2), 56-65.
- Alcoforado, M. J., & Matzarakis, A. (2010). Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographica*, 57, 5-39.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and environment*, 41(2), 94-108.
- Álvarez, A., & Ritchey, T. (2015). Applications of general morphological analysis. *Acta Morph. Gen*, 4(1).
- Andrade, M. F., Kumar, P., de Freitas, E. D., Ynoue, R. Y., Martins, J., Martins, L. D., ... & Gonçalves, F. L. T. (2017). Air quality in the megacity of São Paulo: Evolution over the last 30 years and future perspectives. *Atmospheric environment*, 159, 66-82.
- Arantes, L. (2013). *L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*. Tese de Doutorado, Grenoble.
- Arnfield, A. J. (1982). An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities. *Physical Geography*, 3(2), 97-122.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International journal of climatology*, 23(1), 1-26.
- Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American planning Association*, 62(2), 243-258.
- Artis, D. A., & Carnahan, W. H. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 12(4), 313-329.

- Artmann, M., Kohler, M., Meinel, G., Gan, J., & Loja, I. C. (2019). How smart growth and green infrastructure can mutually support each other—A conceptual framework for compact and green cities. *Ecological indicators*, 96, 10-22.
- Ashie, Y., Komatsu, N., Kono, T., & Takahashi, K. (2005). Numerical simulation of urban thermal environment in the waterfront area of Tokyo. *Annual report of the earth simulator center April*, 83-87.
- Ayoade, J. (1983). *Introdução à Climatologia para os Trópicos 14*. Rio de Janeiro-RJ: Bertrand.
- Balocco, C., & Grazzini, G. (2000). Thermodynamic parameters for energy sustainability of urban areas. *Solar Energy*, 69(4), 351-356.
- Bardhan, R., Kurisu, K., & Hanaki, K. (2015). Does compact urban forms relate to good quality of life in high density cities of India? Case of Kolkata. *Cities*, 48, 55-65.
- Barr, J., & Cohen, J. P. (2014). The floor area ratio gradient: New York City, 1890–2009. *Regional Science and Urban Economics*, 48, 110-119.
- Bärring, L., Mattsson, J. O., & Lindqvist, S. (1985). Canyon geometry, street temperatures and urban heat island in Malmö, Sweden. *International Journal of Climatology*, 5(4), 433-444.
- Barros, H. R. D. A relação entre ilha de calor urbana, o uso e cobertura do solo e o balanço de energia no município de São Paulo: avaliação do campo térmico nos parques públicos de lazer. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo.
- Barros, H. R., & Lombardo, M. A. (2016). A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo no município de São Paulo-SP. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, 20(1), 160-177.
- Baskaran, A., & Kashef, A. (1996). Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques. *Engineering Structures*, 18(11), 861-875.
- Battisti, A., Laureti, F., Zinzi, M., & Volpicelli, G. (2018). Climate Mitigation and Adaptation Strategies for Roofs and Pavements: A Case Study at Sapienza University Campus. *Sustainability*, 10(10), 3788.
- Batty, M., & Xie, Y. (1996). Preliminary evidence for a theory of the fractal city. *Environment and Planning A*, 28(10), 1745-1762.
- Bechle, M. J., Millet, D. B., & Marshall, J. D. (2011). Effects of income and urban form on urban NO<sub>2</sub>: Global evidence from satellites. *Environmental science & technology*, 45(11), 4914-4919.
- Benevolo, L. (1971). *Le origini dell'urbanistica moderna*. Laterza.
- Bennett, J. (2007). *Wind Design Guide*, Architectural aerodynamics course Reading. University of Wellington. [http://www.victoria.ac.nz/architecture/centres/cbpr/publications/architectural-aerodynamics/pdfs/BBSC\\_433\\_Jessica-Bennett\\_Wind-Design-Guide.pdf](http://www.victoria.ac.nz/architecture/centres/cbpr/publications/architectural-aerodynamics/pdfs/BBSC_433_Jessica-Bennett_Wind-Design-Guide.pdf).
- Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat: application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique". Tese de Doutoramento. Université de Nantes.
- Bereitschaft, B., & Debbage, K. (2013). Urban form, air pollution, and CO<sub>2</sub> emissions in large US metropolitan areas. *The Professional Geographer*, 65(4), 612-635.
- Berghauer Pont, M., & Haupt, P. (2007). The relation between urban form and density. *Urban Morphology*, 11(1), 62.
- Bhandari, P. S., Chandiwala, A. K., & Pachchigar, K. S. (2015). Analysis and Design of the Sky Scraper Structure Subjected to Wind Load Using Software Etabs 2015. *Development*, 2(12).
- Bosch, G. and Rodi, W. (1998). Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 28(4), 601–616.
- Boudon, R., & Bourricaud, F. (2002). Ideologies. In *A Critical Dictionary of Sociology*. Routledge.
- Bottema, M. (1995). Aerodynamic roughness parameters for homogeneous building groups—Part 2: Results. *Document Sub-Meso*, 23.
- Bourdic, L., Salat, S., & Nowacki, C. (2012). Assessing cities: a new system of cross-scale spatial indicators. *Building Research & Information*, 40(5), 592-605.
- Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343-347.
- Boyko, C. T., & Cooper, R. (2011). Clarifying and re-conceptualising density. *Progress in Planning*, 76(1), 1-61.

- Brabec, E., Schulte, S., & Richards, P. L. (2002). Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of planning literature*, 16(4), 499-514.
- Braga, A., Pereira, L. A. A., Böhm, G. M., & Saldiva, P. (2001). Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, (51), 58-71.
- Bramley, G., & Power, S. (2009). Urban form and social sustainability: the role of density and housing type. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(1), 30-48.
- Cavalheiro, F., & Del Picchia, P. C. D. (1992). Áreas verdes: conceitos, objetivos e diretrizes para o planejamento. *Encontro Nacional sobre Arborização Urbana*, 4, 29-38.
- Cavalheiro, F., Nucci, J. C., Guzzo, P., & Rocha, Y. T. (1999). Proposição de terminologia para o verde urbano. *Boletim informativo da SBAU*, 7(3), 7.
- Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street canyon geometry effects on microclimate and comfort; a case study in Thessaloniki. *Procedia environmental sciences*, 38, 643-650.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable cities and society*, 33, 85-101.
- Chang, C. H., & Meroney, R. N. (2003). The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91(8), 1039-1050.
- Chen, L., Hang, J., Sandberg, M., Claesson, L., Di Sabatino, S., & Wigo, H. (2017). The impacts of building height variations and building packing densities on flow adjustment and city breathability in idealized urban models. *Building and Environment*, 118, 344-361.
- Chen, Y. (2012). Fractal dimension evolution and spatial replacement dynamics of urban growth. *Chaos, Solitons & Fractals*, 45(2), 115-124.
- Chen, Y. (2016). Equivalent Relation between Normalized Spatial Entropy and Fractal Dimension. *arXiv preprint arXiv:1608.02054*.
- Chen, Y., Wang, J., & Feng, J. (2017). Understanding the fractal dimensions of urban forms through spatial entropy. *Entropy*, 19(11), 600.
- Cheng, H., & Castro, I. P. (2002). Near wall flow over urban-like roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 229-259.
- Choi, Y., Lee, S., & Moon, H. (2018). Urban Physical Environments and the Duration of High Air Temperature: Focusing on Solar Radiation Trapping Effects. *Sustainability*, 10(12), 4837.
- Cholley, A. (1950). Morphologie structurale et morphologie climatique. In *Annales de géographie* (Vol. 59, No. 317, pp. 321-335). Société de géographie.
- Christen, A. (2014). Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Climate*, 10, 241-260.
- Christen, A., & Vogt, R. (2004). Energy and radiation balance of a central European city. *International journal of climatology*, 24(11), 1395-1421.
- Churchman, A. (1999). Disentangling the concept of density. *Journal of Planning Literature*, 13(4), 389-411.
- Cleugh, H., & Grimmond, S. (2011). Urban climates and global climate change. *The Future of the World's Climate* (Second Edition), 47-76.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46.
- Collins, J. P., Kinzig, A., Grimm, N. B., Fagan, W. F., Hope, D., Wu, J., & Borer, E. T. (2000). A new urban ecology: modeling human communities as integral parts of ecosystems poses special problems for the development and testing of ecological theory. *American scientist*, 88(5), 416-425.
- Conzen, M. R. (2004). Thinking about urban form: papers on urban morphology, 1932-1998.
- Correia, E.; Lopes, A.; Marques, D. (2015). An automatic GIS procedure to calculate urban densities to use in Urban Climatic Maps. In: 9th International Conference on Urban Climate 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse – France.

- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 477-493.
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(4), 477-493. DOI: 10.1175/JAM2462.1
- Crósta, A. P. (1999). Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. UNICAMP/Instituto de Geociências.
- Curreli, A., & Coch Roura, H. (2010). Solar access in the compact city: a study case in Barcelona. In PALENC 2010 (pp. 1-11).
- Daemei, A. B., Khotbehsara, E. M., Nobarani, E. M., & Bahrami, P. (2019). Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient. *Ain Shams Engineering Journal*.
- Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of remote sensing*, 23(13), 2563-2594.
- Davenport, A. G., Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., & Wieringa, J. (2000, May). Estimating the roughness of cities and sheltered country. In *Proceedings 12th Conference on Applied Climatology*, Asheville, NC, American Meteorological Society, Boston (pp. 96-99).
- Davies, C., Hansen, R., Rall, E., Pauleit, S., Laforteza, R., De Bellis, Y., ... & Tosics, I. (2015). Green infrastructure planning and implementation. The status of European green space planning and implementation based on an analysis of selected European city-regions, University of Copenhagen, Copenhagen.
- Del Rio, V. (1990). *Introdução ao desenho urbano no processo de planejamento*. Editora Pini.
- Department of the Environment, Transport and the Regions (DETR) (1998). *Planning research programme: The use of density in urban planning*. London: TSO.
- DESA, U. N. Revision of world urbanization prospects. UN Department of Economic and Social Affairs, v. 16, 2018.
- De Villiers, M. (2006). *Windswept: The story of wind and weather*. New York: Jacobus Communications Corp.
- Di Giulio, G. M., Bedran-Martins, A. M., da Penha Vasconcellos, M., & Ribeiro, W. C. (2017). Mudanças climáticas, riscos e adaptação na megacidade de São Paulo, Brasil. *Sustentabilidade em Debate*, 8(2), 75-87.
- Dodman, D. (2009) Blaming Cities for Climate Change? An Analysis of Urban Greenhouse Gas Emissions Inventories. *Environment and Urbanization* 21(1): 185-201.
- Donn, M. (2011). *Criteria for wind comfort and safety in cities: pragmatic application in wellington for 25 years*. Wellington (New Zealand): Victoria University of Wellington.
- Edussuriya, P., Chan, A., & Ye, A. (2011). Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4789-4803.
- Eliasson, I. (1990). Urban geometry, surface temperature and air temperature. *Energy and buildings*, 15(1-2), 141-145.
- Eliasson, I. (1996). Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, 30(3), 379-392.
- Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C. S. B., & Lindqvist, S. (2006). Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 40(1), 1-16.
- Elotefy, H., Abdelmagid, K. S., Morghany, E., & Ahmed, T. M. (2015). Energy-efficient Tall buildings design strategies: A holistic approach. *Energy Procedia*, 74, 1358-1369.
- Emmanuel, R., Rosenlund, H., & Johansson, E. (2007). Urban shading—a design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka. *International journal of climatology*, 27(14), 1995-2004.
- Eskin, N., & Türkmen, H. (2008). Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey. *Energy and Buildings*, 40(5), 763-773.
- Explorer, U. E. (2010). Disponível em < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em, 10. Jan. 2018.
- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable?. *Journal of the American planning association*, 63(1), 107-126.

- Farias, W. R. G., Pinto Jr, O., Naccarato, K. P., & Pinto, I. R. C. A. (2009). Anomalous lightning activity over the Metropolitan Region of São Paulo due to urban effects. *Atmospheric Research*, 91(2-4), 485-490.
- Fehrenbach, U., Scherer, D., & Parlow, E. (2001). 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*, 35(32), 5605-5615.
- Fernando, H. J. S. (2010). Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Annual review of fluid mechanics*, 42, 365-389.
- Fleming, S. (2015). *Buildings and Wind: A Software-Based Design Methodology*. Dissertação de Mestrado. University of Waterloo.
- Frank, H. P., Landberg, L., Rathmann, O., Mortensen, N. G., & Petersen, E. L. (2001). The numerical wind atlas. The KAMM/WAsP method. In *Windpower 2001*. American Wind Energy Association (AWEA).
- Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A. G., Krüs, H. W., Schatzmann, M., Westbury, P. S., ... & Wright, N. G. (2004). Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In *Cost action C*, Vol. 14, p. C1.
- Frankhauser, P. "The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations." *Population: an english selection* (1998): 205-240.
- Frankhauser, P. (2005). La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale. *Revue géographique de l'Est*, 45(3-4), 145-160.
- Franzetti, C., Fraise, G., & Achard, G. (2004). Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. *Energy and Buildings*, 36(2), 117-126.
- Freitas, E. D. D. (2003). *Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes*. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo.
- Fung, W. Y., Lam, K. S., Hung, W. T., Pang, S. W., & Lee, Y. L. (2006). Impact of urban temperature on energy consumption of Hong Kong. *Energy*, 31(14), 2623-2637.
- Futcher, J. A., Kershaw, T., & Mills, G. (2013). Urban form and function as building performance parameters. *Building and environment*, 62, 112-123.
- Gál, T., & Unger, J. (2009). Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment*, 44(1), 198-206.
- Gál, T., Lindberg, F., & Unger, J. (2009). Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate. *Theoretical and applied climatology*, 95(1-2), 111-123.
- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H., Coleman, S., & Freihage, J. (2001). Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept. *Housing policy debate*, 12(4), 681-717.
- Gan, Y., & Chen, H. (2016). Discussion on the applicability of urban morphology index system for block natural ventilation research. *Procedia Engineering*, 169, 240-247.
- Gandemer, J. (1975). Wind environment around buildings: aerodynamic concepts. In *Proc., 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow* (pp. 423-432).
- Gao, X., Asami, Y., & Katsumata, W. (2006). Evaluating land-use restrictions concerning the floor area ratio of lots. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 24(4), 515-532.
- Garratt, J.R. 1992 *The atmospheric boundary layer*. Cambridge atmospheric and space science series, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Garratt, J. R. (1994). The atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, 37(1-2), 89-134.
- Gauthier, P., & Gilliland, J. (2006). Mapping urban morphology: a classification scheme for interpreting contributions to the study of urban form. *Urban Morphology*, 10(1), 41.
- Gauthiez, B. (2004). The history of urban morphology. *Urban morphology*, 8, 71-90.
- Gehl, J. (2011). *Life between buildings: using public space*. Island press.
- Gehl, J. (2013). *Cities for people*. Island press.
- Georgakis, C., & Santamouris, M. (2004). On the air flow in urban canyons for ventilation purposes. *International Journal of Ventilation*, 3(1), 53-65.

- Gillen, M. (2006). The challenge of attaining a sustainable urban morphology for South East Queensland. *Planning, Practice & Research*, 21(3), 291-308.
- Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. Y. (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and buildings*, 36(6), 525-534.
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455-465.
- Golden, J. S., & Kaloush, K. E. (2006). Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects. *The international journal of pavement engineering*, 7(1), 37-52.
- Gordon, P. and Richardson, H.W. (1997) Are compact cities a desirable planning goal? *Journal of the American Planning Association*, 63(1), pp. 95-106.
- Grimm, N. B., Grove, J. G., Pickett, S. T., & Redman, C. L. (2000). Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems: Urban ecological systems present multiple challenges to ecologists—Pervasive human impact and extreme heterogeneity of cities, and the need to integrate social and ecological approaches, concepts, and theory. *BioScience*, 50(7), 571-584.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of applied meteorology*, 38(9), 1262-1292.
- Grimmond, C. S. B., Potter, S. K., Zutter, H. N., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. *International journal of climatology*, 21(7), 903-913.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 792-810.
- Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., ... & Freitas, E. (2010). Climate and more sustainable cities: climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 247-274.
- Groleau, D., & Marenne, C. (1995). Environmental specificities of the urban built forms. *Rebuilt-rebuilding in the European City-Integration*, Corfou, 29-30 juin, 8.
- Gromke, C. (2011). A vegetation modeling concept for building and environmental aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies. *Environmental pollution*, 159(8-9), 2094-2099.
- Gromke, C., & Ruck, B. (2012). Pollutant concentrations in street canyons of different aspect ratio with avenues of trees for various wind directions. *Boundary-Layer Meteorology*, 144(1), 41-64.
- Grosso, M. (1998). Urban form and renewable energy potential. *Renewable energy*, 15(1-4), 331-336.
- Guerreiro, M. R. (2008). Interstícios urbanos e o conceito de espaço exterior positivo. In *Forum Sociológico. Série II. No. 18*, pp. 13-19.
- Gustafson, E. J., & Parker, G. R. (1994). Using an index of habitat patch proximity for landscape design. *Landscape and Urban Planning*, 29(2-3), 117-130.
- Guzzo, P. (1999). Estudos dos espaços livres de uso público e da cobertura vegetal em área urbana da cidade de Ribeirão Preto-SP. 1999. 106f. Dissertação de Mestrado em Geociências. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.
- Habitat, U. N. (2016). Urbanization and development emerging futures. *World cities report*.
- Hang, J., Sandberg, M., & Li, Y. (2009). Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. *Atmospheric Environment*, 43(4), 869-878.
- Hang, J., & Li, Y. (2010). Wind conditions in idealized building clusters: macroscopic simulations using a porous turbulence model. *Boundary-layer meteorology*, 136(1), 129-159.
- Harman, I. N., Best, M. J., & Belcher, S. E. (2004). Radiative exchange in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 110(2), 301-316.
- Harvey, D. (1973). *Social justice and the city*. London: Edward Arnold.
- He, B. J., Ding, L., & Prasad, D. (2019). Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society*, 101472.
- Hillier, B. (2007). *Space is the machine: a configurational theory of architecture*. Space Syntax.

- Hopwood, B., Mellor, M., & O'Brien, G. (2005). Sustainable development: mapping different approaches. *Sustainable development*, 13(1), 38-52.
- Hu, Z., Yu, B., Chen, Z., Li, T., & Liu, M. (2012). Numerical investigation on the urban heat island in an entire city with an urban porous media model. *Atmospheric environment*, 47, 509-518.
- Hu, T., & Yoshie, R. (2013). Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 112, 39-51.
- Huang, J., Lub, X., Sellers, J.M. (2007). A global comparative analysis of urban form: applying spatial metrics and remote sensing. *Land. Urban Plan.* 82 (1), 184–197.
- Ignatius, M., Wong, N. H., & Jusuf, S. K. (2015). Urban microclimate analysis with consideration of local ambient temperature, external heat gain, urban ventilation, and outdoor thermal comfort in the tropics. *Sustainable Cities and Society*, 19, 121-135.
- INMET-Instituto Nacional de Meteorologia. (2017). Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. BDMEP.
- Instituto Brasileiro de Geografia. (2010). Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2010 (No. 7). Brasília/DF: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível a partir de: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>. Acesso em dez, 2018.
- Instituto Brasileiro de Geografia. (2016). Projeção da população do Brasil. (2016). e das Unidades da Federação. Brasília/DF: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível a partir de: <http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. Acesso em dez, 2018.
- Jiru, T. E., & Bitsuamlak, G. T. (2010). Application of CFD in modelling wind-induced natural ventilation of buildings-A review. *International Journal of Ventilation*, 9(2), 131-147.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and environment*, 41(10), 1326-1338.
- Joshi, K. K., & Kono, T. (2009). Optimization of floor area ratio regulation in a growing city. *Regional Science and Urban Economics*, 39(4), 502-511.
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Castelo Branco, M., & Zêzere, J. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal.
- Júnior, J. C. U., & Amorim, M. C. D. C. T. (2016). Reflexões acerca do Sistema Clima Urbano e sua aplicabilidade: Pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. *Revista do Departamento de Geografia, (spe)*, 160-174.
- Khanduri, A. C., Stathopoulos, T., & Bédard, C. (1998). Wind-induced interference effects on buildings—a review of the state-of-the-art. *Engineering structures*, 20(7), 617-630.
- Kim, H. (2014). *Urban Form, Wind, Comfort, and Sustainability: The San Francisco Experience* (Doctoral dissertation, UC Berkeley).
- Kondo, A., Ueno, M., Kaga, A., & Yamaguchi, K. (2001). The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorology*, 100(2), 225-242.
- Konopka, J., Lopes, A., & Matzarakis, A. (2018). An Original Approach Combining CFD, Linearized Models, and Deformation of Trees for Urban Wind Power Assessment. *Sustainability*, 10(6), 1915.
- Krier, R., & Rowe, C. (1979). *Urban space*. London: Academy editions.
- Krueger, R., & Gibbs, D. (2008). 'Third wave'sustainability? Smart growth and regional development in the USA. *Regional Studies*, 42(9), 1263-1274.
- Kubota, T., Miura, M., Tominaga, Y., & Mochida, A. (2008). Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. *Building and Environment*, 43(10), 1699-1708.
- Lamas, J. M. R. G., & Universidade Técnica de Lisboa. (1993). *Morfologia urbana e desenho da cidade*.
- Landsberg, Helmut E. *The urban climate*. Vol. 28. Academic press, 1981.
- Larkham, P. J. (2006). The study of urban form in Great Britain. *Urban Morphology*, 10(2), 117.
- Lazar, R., & Podesser, A. (1999). An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austria). *Atmospheric environment*, 33(24-25), 4195-4209.

- Lencioni, S. (1998). Mudanças na metrópole de São Paulo (Brasil) e transformações industriais. *Revista do Departamento de Geografia*, 12, 27-42.
- Lettau, H. (1969). Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of applied meteorology*, 8(5), 828-832.
- Levy, A. (1999). Urban morphology and the problem of the modern urban fabric: Some questions for research. *Urban Morphology*, 3(2), 79-85.
- Lima, A. M. L. P., Cavalheiro, F., Nucci, J. C., Sousa, M. A. L. B., Fialho, N. D. O., & Del Picchia, P. C. D. (1994). Problemas de utilização na conceituação de termos como espaços livres, áreas verdes e correlatos. In *Congresso Brasileiro sobre Arborização Urbana*. Vol. 2, pp. 539-550.
- Lin, B. B., Gaston, K. J., Fuller, R. A., Wu, D., Bush, R., & Shanahan, D. F. (2017). How green is your garden? Urban form and socio-demographic factors influence yard vegetation, visitation, and ecosystem service benefits. *Landscape and Urban Planning*, 157, 239-246.
- Lindberg, F., Eliasson, I., & Holmer, B. (2003). Urban geometry and temperature variations. In *Proc. 5th Int Conf Urban Climate* (Vol. 1, pp. 205-208).
- Liu, X., & Sweeney, J. (2012). Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO2 emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 46, 359-369.
- Llardent, L. R. A. (1982). Zonas verdes y espacios libres en la ciudad. Instituto de Estudios de Administración Local.
- Lombardo, M. A. (1985). Ilha de calor nas metrópoles o exemplo de São Paulo. *Hucitec*, 244 p.
- Lombardo, M. A. (2011). Mudanças climáticas recentes e ação antrópica. *Revista do Departamento de Geografia*, 8, 29-34.
- Longley, P. A., & Mesev, V. (2000). On the measurement and generalisation of urban form. *Environment and Planning A*, 32(3), 473-488.
- Lopes, A. (2003). Modificações no clima de Lisboa como consequência do crescimento urbano. Vento, ilha de calor de superfície e balanço energético. Tese de doutoramento. Universidade de Lisboa.
- Lopes, A. (2006). O sobreaquecimento das cidades. Causas e medidas para a mitigação da ilha de calor de Lisboa. *Territorium*, 15, 39-52.
- Lucena, A. J., Rotunno Filho, O. C., Peres, L. F., & França, J. R. A. (2012). A evolução da ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Geonorte*, 2(5), 8-21.
- Lu D, Weng Q (2006). Use of impervious surface in urban land-use classification. *Remote Sens Environ*, 102(1-2): 146-160.
- Lynch, K. (1960). *A Imagem da Cidade*. Arte e Comunicação. Edições 70. Lisboa.
- Lyra, G. B., & Pereira, A. R. (2007). Dificuldades de estimativa dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica pelo perfil logarítmico do vento sobre vegetação esparsa em região semi-árida. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(2), 187-197.
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., & Hall, D. J. (1998). An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric environment*, 32(11), 1857-1864.
- March, L. (2015). Mathematics and architecture since 1960. In *Architecture and Mathematics from Antiquity to the future* (pp. 553-578).
- Marciotto, E. R., Oliveira, A. P., & Hanna, S. R. (2010). Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. *Building and Environment*, 45(11), 2497-2505.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Da Rocha, R. P., Alves, L. M., Cuadra, S. V., Valverde, M. C., ... & Ferraz, S. E. (2010). Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, 35(6), 1073-1097.
- Marques Filho, O., & Neto, H. V. (1999). *Processamento digital de imagens*. Brasport.
- Marshall, S. (2004). *From streets to patterns*. In *Streets and Patterns*. Routledge.
- Martins, L. D., Vasconcellos, P. C., Carvalho, L. R. F., & Andrade, M. F. (2006). Estimated impact of biogenic hydrocarbon emissions on photochemical oxidant formation in São Paulo during two periods of the winters of 1999-2000. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 21(2), 190-200.

- Martins, T. L., Bonhomme, M., & Adolphe, L. (2013). Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. *Ambiente Construído*, 13(4), 213-233.
- Martins, T. L. (2014). De condicionantes solares às oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical. Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Martins, T. L., Adolphe, L., Bastos, L. E. G., & Martins, M. A. L. (2016). Sensitivity analysis of urban morphology factors regarding solar energy potential of buildings in a Brazilian tropical context. *Solar Energy*, 137, 11-24.
- Masson, V., Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (2002). Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of applied meteorology*, 41(10), 1011-1026.
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1992). Mapping of urban air paths for planning in Munich. *Wiss. Ber. Inst. Meteor. Klimaforsch. Univ. Karlsruhe*, 16, 13-22.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *International journal of biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Mendonça, F., & Monteiro, C. A. D. F. (Eds.). (2003). *Clima urbano*. Editora Contexto.
- Meneses, P. R., & Almeida, T. D. (2012). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Universidade de Brasília, Brasília.
- Merlier, L., Kuznik, F., Rusaouën, G., & Salat, S. (2018). Derivation of generic typologies for microscale urban airflow studies. *Sustainable cities and society*, 36, 71-80.
- Mesev, T. V., Longley, P. A., Batty, M., & Xie, Y. (1995). Morphology from imagery: detecting and measuring the density of urban land use. *Environment and Planning A*, 27(5), 759-780.
- Meyer, R. M. P., Galvão, R. F. P., & Longo, M. R. (2015). São Paulo e suas escalas de urbanização: cidade, metrópole e macrometrópole. *Revista Iberoamericana de Urbanismo*, (12), 7-31.
- Mfula, A. M., Kukadia, V., Griffiths, R. F., & Hall, D. J. (2005). Wind tunnel modelling of urban building exposure to outdoor pollution. *Atmospheric Environment*, 39(15), 2737-2745.
- Miana, A. C. (2010). *Adensamento e forma urbana: inserção de parâmetros ambientais no processo de projeto*. Tese de doutorado. São Paulo: FAUUSP.
- Milano, M. S. (1992). A cidade, os espaços abertos e a vegetação. In *Congresso Brasileiro De Arborização Urbana*. Vol. 1, pp. 3-14.
- Mills, G. (2008). Luke Howard and the climate of London. *Weather*, 63(6), 153-157.
- Mills, G., Cleugh, H., Emmanuel, R., Endlicher, W., Errell, E., McGranahan, G., ... & Steemer, K. (2010). Climate information for improved planning and management of mega cities (needs perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 228-246.
- Ministério de Minas e Energia. (2014). Brasília/DF: *Balanco Energético Nacional*. Disponível a partir de: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2014>. Acesso em dez, 2018.
- Miranda, R. M., de Fatima Andrade, M., Fornaro, A., Astolfo, R., de Andre, P. A., & Saldiva, P. (2012). Urban air pollution: a representative survey of PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air quality, atmosphere & health*, 5(1), 63-77.
- Mittal, H., Sharma, A., & Gairola, A. (2019). Numerical simulation of pedestrian level wind flow around buildings: Effect of corner modification and orientation. *Journal of Building Engineering*, 22, 314-326.
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522-538.
- Montavon, C. (1998). Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 74, 273-282.
- Monteiro, C. A. F. (1976). *Teoria e clima urbano* In: Série Teses e Monografias, n. 25—Instituto de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 181.
- Mooneghi, M. A., & Kargarmoakhar, R. (2016). Aerodynamic mitigation and shape optimization of buildings. *Journal of building engineering*, 6, 225-235.

- Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate: An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568-577.
- Mortensen, N. G. (2013). Planning and development of wind farms: wind resource assessment and siting.
- Mortensen NG, Landberg L, Troen I, Petersen EL (1993) 'Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Vol. 2: User's guide.' Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Moudon, A. (1997). Urban morphology as an emerging interdisciplinary field. *Urban Morphology* 1, 3- 10.
- Moudon, A.V. (1994) 'Getting to know the built landscape: typomorphology', in Frank, K.A. and Schneekloth, L.H. (eds) *Ordering space. Types in architecture and design* (Van Nostrand Reinhold, New York) 289-311.
- Moura, A. C. M. (2003). *Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano*. Belo Horizonte, Ed da Autora, 294 p.
- Naccarato, K. P., Pinto Jr, O., & Pinto, I. R. C. A. (2003). Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. *Geophysical Research Letters*, 30(13).
- Nakata-Osaki, C. M., Souza, L. C. L. D., & Rodrigues, D. S. (2016). Impacto da geometria do canyon urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. *Ambiente Construído*, 16(3), 73-87.
- Ndossi, I. M., & Avdan, U. (2016). Application of open source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: a PyQGIS plugin. *Remote sensing*, 8(5), 413.
- Ng, E. (2012). Towards planning and practical understanding of the need for meteorological and climatic information in the design of high-density cities: A case-based study of Hong Kong. *International Journal of Climatology*, 32(4), 582-598.
- Ng, E., Yuan, C., Chen, L., Ren, C., & Fung, J. C. (2011). Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. *Landscape and Urban planning*, 101(1), 59-74.
- Ng, E., Chen, L., Wang, Y., & Yuan, C. (2012). A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Building and Environment*, 47, 256-271.
- Nichol, J. E. (1996). High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: A satellite-based study. *Journal of applied meteorology*, 35(1), 135-146.
- Nichol, J. (2005). Remote sensing of urban heat islands by day and night. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(5), 613-621.
- Nie, Q., & Xu, J. (2015). Understanding the effects of the impervious surfaces pattern on land surface temperature in an urban area. *Frontiers of Earth Science*, 9(2), 276-285.
- Nobre, C. A., Young, A. F., Saldiva, P., Marengo, J. A., Nobre, A. D., Alves Jr, S., ... & Lombardo, M. (2010). Vulnerabilidades das megacidades brasileiras às mudanças climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. *Embaixada Reino Unido, Rede Clima e Programa FAPESP em Mudanças Climáticas*.
- Norman, J. M., & Becker, F. (1995). Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3-4), 153-166.
- Nucci, J. C. (2001). *Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília, MSP*. Humanitas, FFLCH/USP.
- Nucci, J. C., Westphalen, L. A., Buccheri-Filho, A. T., Neves, D. L., Oliveira, F. A., & Kroker, R. (2003). Cobertura vegetal no bairro Centro de Curitiba/PR. *Revista GEOUERJ, número especial*, Rio de Janeiro.
- Obiakor, M. O., Ezeonyejaku, C. D., & Mogbo, T. C. (2012). Effects of vegetated and synthetic (impervious) surfaces on the microclimate of urban area. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 16(1), 85-94.
- Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. S. B., & Holmer, B. (2007). Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(2), 273-292.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* Routledge. London: Mathuem & CO.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings*, 11(1-3), 103-113.
- Oke, T. R. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*. 84(1-3), 179-190.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

- Oliveira, F. L. (2017). *Green Wedge Urbanism: History, Theory and Contemporary Practice*. London, UK: Bloomsbury Academic. 285 pp. ISBN 978-1-4742-2918-0.
- Park, S. B., Baik, J. J., Raasch, S., & Letzel, M. O. (2012). A large-eddy simulation study of thermal effects on turbulent flow and dispersion in and above a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(5), 829-841.
- Parlow, E. (1998). Net radiation of urban areas. *Future trends in remote sensing*. Rotterdam: Gudmansen P. Ed., Balkema Publishers, 221-226.
- Pessenlehner, W., & Mahdavi, A. (2003). Building morphology, transparency, and energy performance. *Eighth International IBPSA Conference Proceedings, Eindhoven, Netherlands (2003)*, pp. 1025-1032.
- Pickett, S. T., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Nilon, C. H., Pouyat, R. V., Zipperer, W. C., & Costanza, R. (2001). Urban ecological systems: linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual review of ecology and systematics*, 32(1), 127-157.
- Pivetta, M. (2012). Da garoa à tempestade. *FAPESP: Pesquisa FAPESP, São Paulo*, (194), 40-45.
- Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. A., & Ottle, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12(3-4), 175-224.
- Prata, A. R. (2005). *Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Qiu, G. Y., Zou, Z., Li, X., Li, H., Guo, Q., Yan, C., & Tan, S. (2017). Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat international*, 68, 30-42.
- Rapoport, A. (1975). Toward a redefinition of density. *Environment and Behavior*, 7(2), 133-158.
- Ratti, C., Di Sabatino, S., & Britter, R. (2006). Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3), 77-90.
- Ren, C., Ng, E. Y. Y., & Katzschner, L. (2011). Urban climatic map studies: a review. *International journal of climatology*, 31(15), 2213-2233.
- Ribeiro, H. (1996). *Ilha de calor na cidade de São Paulo: sua dinâmica e efeitos na saúde da população*. Tese de Livre-docência. Faculdade Saúde Pública da Universidade de São Paulo.
- Rizk, A. A., & Henze, G. P. (2014). Survey of airflow around multiple buildings. *American Journal of Energy Engineering*, 2(1), 27-36.
- Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P., & Schofield, J. (2014). Cities and energy: urban morphology and residential heat-energy demand. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 41(1), 138-162.
- Rogers, R. (2000). *Cidades para um pequeno planeta*; Editorial Gustavo Gili, SL. Barcelona: ISBN 84-252-1889-6.
- Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Parshall, L., Lynn, B., Cox, J., Goldberg, R., ... & Dunstan, F. (2009). Mitigating New York City's heat island: Integrating stakeholder perspectives and scientific evaluation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(9), 1297-1312.
- Rouse Jr, J., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*.
- Sailor, D. J., & Fan, H. (2002). Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmospheric Environment*, 36(4), 713-725.
- Sailor, D. J., & Lu, L. (2004). A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmospheric environment*, 38(17), 2737-2748.
- Salat, S. (2009). Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, 37(5-6), 598-609.
- Salat, S., Nowacki, C., & Vialan, D. (2011). *Morphological indicators for assessing the sustainability of cities*. Urban Morphology Laboratory, CSTB, Paris, France Salat, S., Bourdic, L., & Labbe, F. (2014). *Breaking Symmetries and Emerging Scaling Urban Structures: A Morphological Tale of 3 Cities: Paris, New York and Barcelona*. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR*, 8(2), 77-93.
- Salat, S. (2011). *Les et les formes. Sur L'urbanisme durable.*, first ed., CSTB, Paris

- Saldiva, P. H., Lichtenfels, A. J. F. C., Paiva, P. S. O., Barone, I. A., Martins, M. A., Massad, E., ... & Bohm, G. M. (1994). Association between air pollution and mortality due to respiratory diseases in children in São Paulo, Brazil: a preliminary report. *Environmental research*, 65(2), 218-225.
- Salmond, J. A., Oke, T. R., Grimmond, C. S. B., Roberts, S., & Offerle, B. (2005). Venting of heat and carbon dioxide from urban canyons at night. *Journal of Applied Meteorology*, 44(8), 1180-1194.
- Salmond, J. A., Roth, M., Oke, T. R., Christen, A., & Voogt, J. A. (2012). Can surface-cover tiles be summed to give neighborhood fluxes in cities? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(1), 133-149.
- Samuels, I. (1986). Urban morphology in developed countries. Joint centre for Urban Design, Oxford Polytechnic.
- Samuels, I. (1990). Architectural practice and urban morphology. In *The built form of western cities: essays for MRG Conzen on the occasion of his eightieth birthday*. Edited by TR Slater. 415-435.
- Sanaieian, H., Tenpierik, M., van den Linden, K., Seraj, F. M., & Shemrani, S. M. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 551-560.
- Sanders, P. S., & Schroder, N. (2008). The genealogy of urban form: Brisbane case study. In: *Subtropical Cities 2008: From Fault-lines to Sight-lines - Subtropical Urbanism in 20-20*.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I., & Asimakopoulos, D. (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33(27), 4503-4521.
- Santos, D. D., & Nucci, J. C. (2009). *Paisagens Geográficas: Um tributo a Felisberto Cavalheiro*. Campo Mourão, Editora da FECILCAM.
- Santos, R. G. (2014). Geoprocessamento aplicado ao mapeamento do índice de vulnerabilidade DRASTIC, no Sistema Aquífero Guarani em Ribeirão Bonito-SP.
- Santos, R. G., Prata-Shimomura, A. R., Correia, E., Franco, M. D. A. R., & Lopes, A. S. (2017). Morfologia Urbana e Corredores de Ventilação como subsídio à Resiliência Urbana. *Revista LABVERDE*, 8(2), 12-37.
- São Paulo. (2016). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano /Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente. Atlas. MDC - Mapa Digital da Cidade de São Paulo. <<http://downloadfolhasscm.prefeitura.sp.gov.br>>
- São Paulo (2002). Secretaria Municipal de Planejamento Urbano /Secretaria Municipal do Verde e Meio Ambiente. Atlas Ambiental do Município de São Paulo. São Paulo.
- Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., ... & Lewis, P. (2002). First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote sensing of Environment*, 83(1-2), 135-148.
- Schwarz, N. (2010). Urban form revisited—Selecting indicators for characterising European cities. *Landscape and urban planning*, 96(1), 29-47.
- Setzer, J., & de Macedo, L. V. (2015). Combining local and transnational action in the adoption and implementation of climate policies in the city of Sao Paulo. In *The Urban Climate Challenge* (pp. 111-128). Routledge.
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35(1), 61-68.
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Beha, H. D., & Parlow, E. (1999). Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 4185-4193.
- Shishegar, N. (2013). Street Design and Urban Microclimate: Analyzing the Effects of Street Geometry and Orientation on Airflow and Solar Access in Urban Canyons. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(1).
- Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129-140.
- Silva, I., Santos, R., Lopes, A., & Araújo, V. (2018). Morphological Indices as Urban Planning Tools in Northeastern Brazil. *Sustainability*, 10(12), 4358.
- Silva, L.O. da - Subsídios para formulação de uma política para áreas verdes no Município de São Paulo - Sempla. In: *Questão Ambiental Urbana - cid. de São Paulo, PMSP, 1993, p. 425-449,767p.*
- Smith, N. (1986). Gentrification, the frontier, and the restructuring of urban space. *Gentrification of the City*, 15, 17.

- Smith, C., & Levermore, G. (2008). Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world. *Energy policy*, 36(12), 4558-4562.
- Silva, L. T., Oliveira, M., & Silva, J. F. (2014). Urban form indicators as proxy on the noise exposure of buildings. *Applied acoustics*, 76, 366-376.
- Sini, J. F., Anquetin, S., & Mestayer, P. G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric environment*, 30(15), 2659-2677.
- Srifuengfung, S., & Peerapun, W. (2013). Investigation of the ventilation rate around different urban morphological property types: High rise-VS-Low rise in Bangkok's high density areas. *ABAC Journal*, 33(3).
- Stathopoulos, T., & Baskaran, B. A. (1996). Computer simulation of wind environmental conditions around buildings. *Engineering structures*, 18(11), 876-885.
- Steeners, K., Baker, N., Crowther, D., Dubiel, J., Nikolopoulou, M. H., & Ratti, C. (1997). City texture and microclimate. *Urban Design Studies*, 3, 25-50.
- Steeners, K. (2003). Energy and the city: density, buildings and transport. *Energy and buildings*, 35(1), 3-14.
- Stewart, I. D., & Oke, T. (2009). A new classification system for urban climate sites. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(7), 922.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- Sukopp H. (1998). Urban ecology—scientific and practical aspects. In: Breuste J., Feldman H. and Uhlmann O. (eds), *Urban Ecology*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 3–16.
- Sun, Y. (2008). Retrieval and application of land surface temperature. *Geo. UTexas. Edu*, 1(1), 1-27.
- Takebayashi, H., Kiyama, Y., & Yamamoto, N. (2017). Analysis of wind and radiant environment in street canyons for production of urban climate maps at district scale. *Journal of Heat Island Institute International Vol*, 12, 2.
- Tannier, C., & Thomas, I. (2013). Defining and characterizing urban boundaries: A fractal analysis of theoretical cities and Belgian cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, 41, 234-248.
- Tarifa, J. R. (1991) *Qualidade do Ar no Município de São Paulo. Trabalho composto por 11 mapas na escala 1:50.000 desenvolvido como subsídio ao Plano Diretor do Município de São Paulo. Parcialmente publicado in Atlas Ambiental do Município de São Paulo. Prefeitura do Município de São Paulo.*
- Tarifa, J. R., & Armani, G. (2001a). Os climas “naturais”. Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. (Tarifa, J.R., Azevedo, T.R. organizadores). GEOUSP, FFLCH, Universidade de São Paulo, *Novos Caminhos*, 4, 34-70.
- Tarifa, J. R., & Armani, G. (2001b). As unidades climáticas urbanas da cidade de São Paulo. *Atlas Ambiental do Município de São Paulo*. São Paulo, 400.
- Tarifa, J. R., & Azevedo, T. R. D. (2001). *Climas na cidade de São Paulo: teoria e prática*. In *Climas na cidade de Sao Paulo: teoria e prática*. USP.
- Taseiko, O. V., Mikhailuta, S. V., Pitt, A., Lezhenin, A. A., & Zakharov, Y. V. (2009). Air pollution dispersion within urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 43(2), 245-252.
- Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., Van Hove, L. W. A., & Holtslag, A. A. M. (2014). Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(684), 2197-2210.
- Theurer, W. (1999). Typical building arrangements for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, 33(24-25), 4057-4066.
- Thierfelder, H., & Kabisch, N. (2016). Viewpoint Berlin: Strategic urban development in Berlin—Challenges for future urban green space development. *Environmental science & policy*, 62, 120-122.
- Thomas, I., Frankhauser, P., & De Keersmaecker, M. L. (2007). Fractal dimension versus density of built-up surfaces in the periphery of Brussels. *Papers in regional science*, 86(2), 287-308.
- Thomas, I., Frankhauser, P., & Biernacki, C. (2008). The morphology of built-up landscapes in Wallonia (Belgium): A classification using fractal indices. *Landscape and urban planning*, 84(2), 99-115.
- Torres, H. D. G. (1997). *Desigualdade ambiental na cidade de São Paulo. Tese de Doutorado, Unicamp.*
- Troppmair, H., & Galina, M. (2003). *Áreas Verdes. Território & Cidadania*. Rio Claro, (2).

- Tsai, Y. H. (2005). Quantifying urban form: compactness versus 'sprawl'. *Urban studies*, 42(1), 141-161.
- Unger, J., Sümeghy, Z., & Zoboki, J. (2001). Temperature cross-section features in an urban area. *Atmospheric Research*, 58(2), 117-127.
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1), 59-80.
- Unger, J., Lelovics, E., Gál, T. (2014). Local Climate Zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hung. Geogr. Bull.* 63 (1), 29–41.
- United Nations General Assembly. (1987). Report of the world commission on environment and development: Our common future. Oslo, Norway: United Nations General Assembly, Development and International Co-operation: Environment. Disponível a partir de: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>. Acesso em jan, 2019.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric environment*, 37(2), 155-182.
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (1997). Complete urban surface temperatures. *Journal of applied meteorology*, 36(9), 1117-1132.
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (1998). Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 19(5), 895-920.
- Vos, P. E., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: to tree or not to tree? *Environmental pollution*, 183, 113-122.
- Xiao, R. B., Ouyang, Z. Y., Zheng, H., Li, W. F., Schienke, E. W., & Wang, X. K. (2007). Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(2), 250-256.
- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Lau, K. K. L., ... & Ng, E. (2017). Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 167, 212-224.
- Wania, A., Bruse, M., Blond, N., & Weber, C. (2012). Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of environmental management*, 94(1), 91-101.
- Weng, Q. (2001). A remote sensing? GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International journal of remote sensing*, 22(10), 1999-2014.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote sensing of Environment*, 89(4), 467-483.
- Weng, Q., Hu, X., & Liu, H. (2009). Estimating impervious surfaces using linear spectral mixture analysis with multitemporal ASTER images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4807-4830.
- Whitehand, J. W. (1992). Recent advances in urban morphology. *Urban studies*, 29(3-4), 619-636.
- Whitehand, J. W. (2001). British urban morphology: the Conzenion tradition. *Urban morphology*, 5(2), 103-109.
- Whitehand, J. (2010). Urban morphology and historic urban landscapes. *World Heritage Papers*, 27, 35-44.
- Wiren, B. G. (1983). Effects of surrounding buildings on wind pressure distributions and ventilative heat losses for a single-family house. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 15(1-3), 15-26.
- Wong, M. S., Nichol, J. E., To, P. H., & Wang, J. (2010). A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Building and Environment*, 45(8), 1880-1889.
- Wong, N. H., Jusuf, S. K., & Tan, C. L. (2011). Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool. *Landscape and urban planning*, 100(4), 386-389.
- World Bank. (2002). A revised forest strategy for the World Bank Group. Disponível a partir de: <http://www.worldbank.org/forestry>. Acesso em jan, 2019.
- Wu, K., & Hsieh, C. (2017). Computational Fluid Dynamics Application for the Evaluation of a Community Atrium Open Space Design Integrated with Microclimate Environment. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 1815-1831.
- Yang, F., Qian, F., & Lau, S. S. (2013). Urban form and density as indicators for summertime outdoor ventilation potential: A case study on high-rise housing in Shanghai. *Building and environment*, 70, 122-137.

- Yang, J., Wong, M. S., Menenti, M., & Nichol, J. (2015). Study of the geometry effect on land surface temperature retrieval in urban environment. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 109, 77-87.
- Yersel, M., & Goble, R. (1986). Roughness effects on urban turbulence parameters. *Boundary-Layer Meteorology*, 37(3), 271-284.
- Yu, B., Liu, H., Wu, J., & Lin, W. M. (2009). Investigating impacts of urban morphology on spatio-temporal variations of solar radiation with airborne LIDAR data and a solar flux model: a case study of downtown Houston. *International Journal of Remote Sensing*, 30(17), 4359-4385.
- Yu, C., & Hien, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and buildings*, 38(2), 105-120.
- Yuan, C., & Ng, E. (2012). Building porosity for better urban ventilation in high-density cities—A computational parametric study. *Building and Environment*, 50, 176-189.
- Yuan, C., & Ng, E. (2014). Practical application of CFD on environmentally sensitive architectural design at high density cities: A case study in Hong Kong. *Urban Climate*, 8, 57-77.
- Yuan, C., Norford, L., & Ng, E. (2017). A semi-empirical model for the effect of trees on the urban wind environment. *Landscape and Urban Planning*, 168, 84-93.
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of environment*, 106(3), 375-386.
- Yuan, M., Song, Y., & Guo, L. (2018). Exploring Determinants of Urban Form in China through an Empirical Study among 115 Cities. *Sustainability*, 10(10), 3648.
- Zajic, D., Fernando, H. J. S., Calhoun, R., Princevac, M., Brown, M. J., & Pardyjak, E. R. (2011). Flow and turbulence in an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(1), 203-223.
- Zhang, A., Gao, C., & Zhang, L. (2005). Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), 891-904.
- Zhang, A., Bokel, R., van den Dobbelen, A., Sun, Y., Huang, Q., & Zhang, Q. (2017). The effect of geometry parameters on energy and thermal performance of school buildings in cold climates of china. *Sustainability*, 9(10), 1708.
- Zhao, C., Fu, G., Liu, X., & Fu, F. (2011). Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Building and Environment*, 46(5), 1174-1183.
- Zheng, Y., Ren, C., Xu, Y., Wang, R., Ho, J., Lau, K., & Ng, E. (2018). GIS-based mapping of local climate zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban climate*, 24, 419-448.
- Zhu, X., & Anderson, W. (2019). Turbulent flow over urban-like fractals: prognostic roughness model for unresolved generations. *Journal of Turbulence*, 1-22.