



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

VII ELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Búzios - RJ - 2011

IMPACTO DA OCUPAÇÃO URBANA NA AMBIÊNCIA TÉRMICA DA CIDADE: ESTUDO A PARTIR DO CASO DO BAIRRO DE MOEMA, SÃO PAULO

Rafael Silva Brandão (1); Marcia Peinado Alucci (2)

(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Artes Aplicadas, rbrandao@ufsj.edu.br
Universidade Federal de São João Del Rei, DAUAP, Avenida Visconde do Rio Preto, s/nº (Rodovia BR 494,
km 02), São João Del Rei – MG, 36301-360, Tel: (32) 3379 3967

(2) PhD, Professora do Departamento de Tecnologia da Arq. e do Urbanismo, marcia.alucci@gmail.com
Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e
Eficiência Energética, Rua do Lago, 876, São Paulo -SP, 05508-080, Tel.: (11) 3091 4538 r211

RESUMO

Este trabalho trata da influência das estruturas construídas pelo homem no clima, tendo por objetivo estabelecer uma relação entre variáveis de ocupação urbana, comumente utilizadas no planejamento urbano, e a ambiência térmica de uma área da cidade. Para isso, foi utilizado como estudo de caso uma área do bairro de Moema, na cidade São Paulo, SP (23°37'S, 46°39'W). A ocupação da área foi definida quadra a quadra, a partir de três parâmetros de ocupação básicos – taxa de ocupação (TO), coeficiente de aproveitamento (CA) e recuos médios (RM) – e quatro parâmetros avançados – rugosidade (Zd e Z0), ângulo de obstrução equivalente (Obst), índice de compactidade (IC) e variabilidade das alturas (DpH e DpH%). Os cálculos foram realizados por meio de uma ferramenta de geoprocessamento. Utilizando-se modelos analíticos e programas computacionais, foram avaliados, também quadra a quadra, três parâmetros ambientais – insolação, ventilação e ambiência térmica (descrita pela amplitude térmica e pelas temperaturas máxima e média do ar). Os resultados foram transpostos para o mapa georreferenciado, permitindo a elaboração de equações de regressão linear múltipla que correlacionassem parâmetros de ocupação a parâmetros ambientais. O estudo indicou uma relação entre a ocupação e as características climáticas locais, mas não estabeleceu determinismo inequívoco entre ambas. Recomendou-se a expansão da base de dados, aplicando o método a outras realidades, com características diversas, de modo a refinar os resultados e torná-los mais diretamente aplicáveis nos processos de gestão e planejamento urbanos.

Palavras-chave: clima urbano, planejamento urbano, balanço térmico.

ABSTRACT

This paper deals with the influence of human made structures and the climate. The objective is to relate urban occupation variables, commonly used in urban planning, and the thermal environment of a city. In order to do so, the Moema district, in São Paulo, SP (23°37'S, 46°39'W) was selected as a study case. Occupation of the area was described for each block, using three basic parameters – building footprint, plot ratio and average setbacks – and four advanced parameters – roughness, equivalent obstruction angle, compactness index and height variability. Calculations were made using geoprocessing tools. Through analytical modeling and computational resources, three environmental parameters were also assessed for each block – solar incidence, ventilation and thermal environment (composed by thermal range and maximum and average air temperatures). Results were transferred to the georeferenced map, allowing for the calculation of multiple linear regression equations, relating occupation and environmental parameters. The study indicated a relationship between urban occupation and local climate, but was not enough to establish unequivocal determinism between them. Recommendation is for applying the method in other areas, with different patterns, in order to refine results and make them more applicable in urban planning.

Keywords: urban climate, urban planning, thermal balance.

1. INTRODUÇÃO

O processo de aquecimento causado pela ocupação urbana vem sendo descrito desde 1833 (OKE, 1982), embora seu estudo só tenha sido devidamente sistematizado a partir de meados da década de 1970. Os trabalhos mais relevantes neste sentido foram produzidos por Timothy Oke, correlacionando inicialmente o aumento de temperatura e a população da cidade (OKE, 1973), evoluindo pra a observação dos fluxos de calor no ambiente urbano. Oke (1982) inovou a abordagem da questão ao estabelecer correlações entre as variáveis de planejamento e o clima da cidade, tratando-a como um sistema termodinâmico fechado de entradas e saídas conhecidas que poderia, portanto, ser avaliado a partir de um cálculo de balanço energético.

Em um de seus trabalhos mais significativos sob a ótica do planejamento urbano, Oke (1988) enumera as principais interrelações entre o clima e a cidade. Tomando como unidade o “canion urbano” entendido como a composição formada por uma rua margeada por séries de edifícios, Oke discute as relações dimensionais entre os edifícios e os efeitos no clima, com impactos na ventilação, qualidade do ar, insolação e capacidade energética do tecido urbano.

No Brasil, os estudos de clima urbano tomaram impulso também na década de 1970, por meio do professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, que propôs uma abordagem sistêmica do clima urbano através de um modelo descritivo predominantemente verbal (MONTEIRO & MENDONÇA, 2003). Em levantamento das pesquisas realizadas sobre o tema no Brasil, Assis (2005) aponta para uma carência de interdisciplinaridade no tratamento da questão e identifica que, ao longo da década de 1990, houve uma concentração da produção científica sobre o tema na área da arquitetura e do urbanismo, com ênfase em abordagens empíricas e descritivas, de pouca capacidade de generalização. A autora indica a utilização da modelagem energética da cidade como caminho preferencial para integração de diretrizes climáticas no planejamento urbano, seguindo a abordagem proposta por Oke.

Um dos principais obstáculos a esta estratégia é a parametrização dos modelos de balanço a partir das variáveis utilizadas nas atividades de planejamento. Torna-se necessária a descrição da ocupação urbana nos termos apropriados para o cálculo do balanço energético, de modo que a análise climática possa ser efetivamente incorporada no processo de elaboração da legislação urbana e de gestão das cidades.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar uma avaliação da ambiência térmica de uma área urbana delimitada, buscando estabelecer relações entre a estrutura física da ocupação urbana e a ambiência térmica dos espaços configurados.

3. METODOLOGIA

Considerando-se a proposta de Brandão (2010) a partir de Oke (2004), são focadas aqui intervenções de micro-escala (ordem de grandeza do quarteirão – 10^2 a 10^4 m), compostas por elementos da ordem de grandeza dos edifícios (10^1 a 10^2 m). Os impactos de alterações urbanas nesta escala se estendem para além do entorno imediato do usuário, que não mais consegue determinar com exatidão qual o elemento responsável pela geração de condições diferenciadas. Nessa escala são definidas as condições climáticas médias dos denominados recintos urbanos, que afetam o desempenho dos edifícios e contribuem para o conforto ou desconforto do pedestre, uma vez que determinam condições de contorno para elementos de menor escala. O impacto climático é significativo e a adaptação do usuário torna-se difícil devido à maior extensão espacial da intervenção. A área selecionada como estudo de caso é o bairro de Moema (Figura 1), na cidade de São Paulo, Brasil. A cidade está localizada à latitude de $23^{\circ}37'S$ e à longitude $46^{\circ}39'W$.

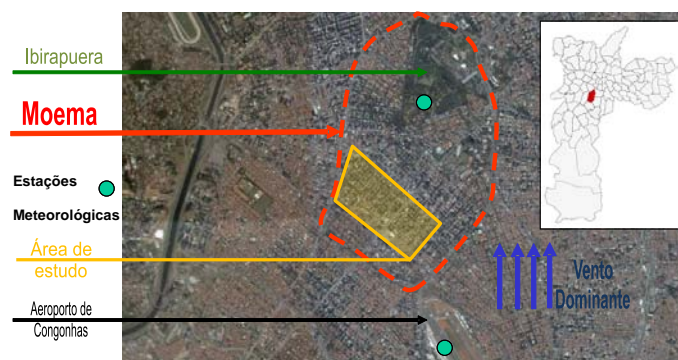


Figura 1 – Bairro de Moema.

O local encontra-se em região de clima tropical de altitude. Apesar da altitude de 802m, localiza-se a apenas 50 km da costa, em uma região denominada Planalto Atlântico, sendo influenciado pelas condições oceânicas (TARIFA & AZEVEDO, 2001)

O bairro apresentou-se como estudo de caso ideal por apresentar uniformidade topográfica e diversidade de ocupação, além de contar com duas estações meteorológicas no seu interior ou entorno.

Para estabelecer a relação entre as características de ocupação e a ambiência térmica local, a área de estudo foi mapeada utilizando-se um programa de geoprocessamento (MapInfo), que associa um banco de dados a elementos espaciais georreferenciados. Com isso, dados referentes às duas categorias de variáveis (ocupação e ambiência) puderam ser trabalhados sobre uma mesma base, permitindo o estabelecimento de correlações entre eles. A unidade escolhida para as avaliações foi a da quadra, cujos valores médios para cada parâmetro e variável eram calculados e mapeados. Além do mapeamento bidimensional, foi utilizado um modelo tridimensional da área para a realização de simulações computacionais.

3.1. Determinação das características de ocupação

A ocupação urbana é descrita a partir de parâmetros de ocupação, divididos entre básicos e avançados. Os parâmetros básicos são aqueles derivados diretamente das legislações de parcelamento do solo e de uso e ocupação. São calculados a partir das seguintes variáveis: área construída total (A_c), área do terreno (A_T); área de projeção da edificação (A_p) e distância até o edifício vizinho (R)

Os parâmetros básicos, no entanto, permitem diversas organizações espaciais, que produzirão diferentes impactos nas condições ambientais locais. Para isso, foram desenvolvidos parâmetros avançados que podem fornecer idéias mais precisas das trocas de calor envolvidas. Estes parâmetros trabalham com as seguintes variáveis, além daquelas utilizadas para os parâmetros básicos: área de silhueta para a direção de vento (A_s), altura (h), altura média (h_m) e perímetro do edifício (P). A definição destas variáveis, bem como os parâmetros envolvidos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1– Parâmetros de ocupação

	Parâmetro	Definição	Variáveis de cálculo
Básicos	Coefficiente de aproveitamento (CA);	Fator que, multiplicado pela área do terreno, define a área máxima computável admitida nesse mesmo terreno. Este é o fator que determina a densidade construtiva de uma determinada área, embora não defina por si só a configuração urbana.	$\frac{A_c}{A_T}$
	Taxa de ocupação (TO);	Razão entre a área de projeção da edificação ou edificações sobre o plano horizontal e a área do lote ou terreno. A taxa de ocupação dá uma idéia da porcentagem de cobertura do solo, mas não da densidade construída.	$\frac{A_p}{A_T}$
	Recuos médios (RM).	Determinam a distância média da borda do terreno a partir da qual as edificações se localizam. Suas recomendações se sobrepõem com o resultado da combinação dos outros fatores, podendo inclusive impedir a realização do potencial construtivo do terreno determinado pelas outras variáveis;	R
Avançados	Rugosidade (Z_d e Z_0);	Medida do atrito que aquela superfície oferece ao fluido que se desloca sobre ele, sendo fator fundamental no estudo da ventilação urbana. Uma das maneiras mais comuns de medir a rugosidade é através da rugosidade aerodinâmica (z_0), que é definida pela distância da superfície a partir da qual a velocidade média é igual a zero. Quando elementos de rugosidade da superfície estão dispostos próximos uns dos outros, eles elevam todo o perfil de velocidades em um valor conhecido como deslocamento do plano de rugosidade (z_d).	$\frac{z_d}{h_m} = 1 + 3,39^{-A_s} \cdot (1 - A_p \cdot h_m)$ $\frac{z_0}{h_m} = \left(1 - \frac{z_d}{h_m}\right) \cdot \exp\left\{-\left[3,75 \cdot \left(1 - \frac{z_d}{h_m}\right) \cdot A_s\right]^{0,5}\right\}$ (MACDONALD, GRIFFITHS & HALL, 1994)
	Ângulo de obstrução equivalente (Obst);	Dado pelo arco tangente da razão entre a altura das edificações e a distância entre os prédios vizinhos. Permite o cálculo do fator de visão de céu.	$\text{atan}\left(\frac{h}{R}\right)$
	Índice de compacidade (IC).	Razão entre o volume e a área superficial dos edifícios, que permite avaliar a capacidade de troca da massa edificada com a atmosfera. Para eliminar a interferência da dimensão do objeto dividiu-se a menor relação possível entre área superficial e volume pela relação obtida, fazendo com que o valor estivesse sempre entre 0 e 1 para qualquer sólido.	$IC = \frac{(A_p + h_m \cdot P) \cdot \sqrt[3]{2 \cdot (A_p \cdot h_m)}}{6 \cdot (A_p \cdot h_m)}$ (BRANDÃO, 2009)
	Variabilidade na altura (DpH e DpH%)	Variabilidade das alturas, dado a partir do desvio padrão de altura em cada quadra. Pode ser dado em valores absolutos ou em porcentagem da altura média	$\sqrt{\frac{\sum [A_p \cdot (h - h_m)^2]}{\sum A_p}}$

Os cálculos para a área de estudo foram realizados no próprio programa de geoprocessamento, que atribuiu os valores médios a cada uma das quadras da área de estudo e gerava mapas como os das Figuras 2 e 3.



Figura 2 – Mapeamento do Coeficiente de aproveitamento



Figura 3 – Mapeamento do Índice de compacidade

O mapeamento permitiu observar a existência de uma região mais densa ao norte da área de estudo, onde a legislação de uso e ocupação permite a construção de edifícios verticais. Na área mais ao sul/sudoeste, rota de aproximação do aeroporto de Congonhas, a altura dos edifícios é mais restrita e, quando edifícios verticais se apresentam, isso ocorre de modo esparsos. Observou-se ainda uma inversão entre o coeficiente de aproveitamento e a taxa de ocupação: quanto maior a área construída total, menor era a cobertura do terreno.

3.2. Determinação das condições ambientais

As características ambientais da área de estudo foram determinadas por meio de modelos computacionais, utilizando dados da estação meteorológica do aeroporto de Congonhas para os dias 04 de fevereiro e 05 de setembro de 2007. As datas foram selecionadas por coincidirem com medições de campo realizadas para validação dos modelos. Para validação parcial dos modelos, os resultados obtidos na modelagem foram comparados com medidas de campo realizadas em transecto de cinco pontos para as mesmas datas acima. Esta comparação é apresentada em Brandão (2010), mas recomenda-se a aplicação destes modelos a outras realidades ambientais, verificando sua capacidade de generalização e permitindo ajustes e adaptações.

3.2.1. Insolação

As condições de sombreamento e exposição ao sol dos edifícios e dos espaços urbanos foram estudadas utilizando-se o programa, a partir de um modelo digital da área. Os resultados foram avaliados a partir do cálculo das horas de insolação para um dia, feito sobre uma malha ortogonal pré-determinada. Foi adotada uma malha de 100 x 100 elementos com aproximadamente 13 m de distância entre os pontos.

O resultado foi exportado para o programa de geoprocessamento utilizando uma malha georreferenciada com mesmas dimensões e número de elementos, desenhada em programa de CAD.

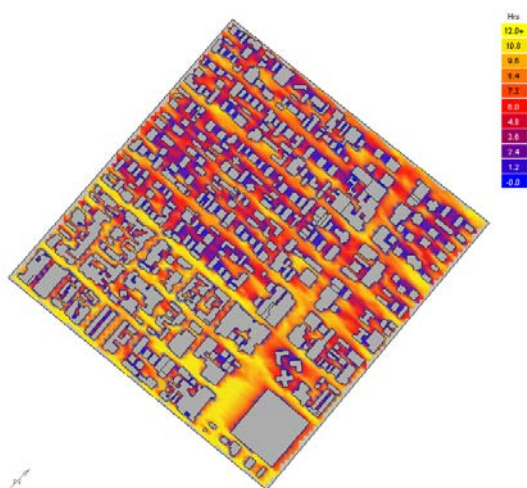


Figura 4 – Simulação de insolação (Ecotect).

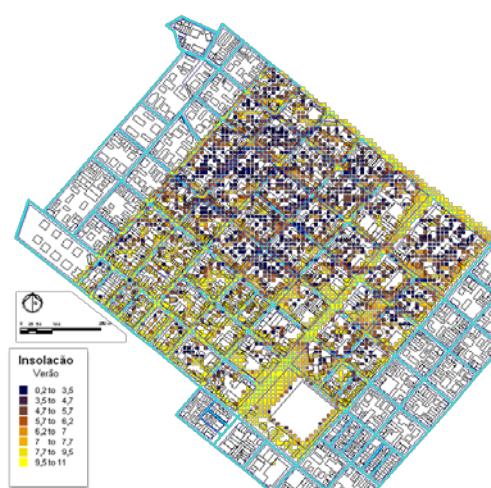


Figura 5 – Simulação de insolação (MapInfo)

Com este resultado (Figuras 4 e 5), foram calculados os valores médios para cada quadra.

3.2.2. Ventilação

A simulação de ventilação foi realizada utilizando-se o programa CFX 5.7. Como o modelo de clima urbano deveria permitir a variação na direção de incidência do vento, adaptou-se o modelo utilizado para o estudo de insolação com a adição de um domínio octogonal. Foram respeitadas as medidas recomendadas para elaboração do domínio, a distância mínima a sotavento deve ser 15 vezes a altura do maior elemento, sendo da ordem de 1350 m..

Embora a condição de contorno das aberturas do domínio seja uniforme, foram determinadas oito partes laterais, de modo que fosse possível estabelecer condições diferenciadas para as diferentes regiões. Além destas partes, foram criadas partições referentes ao piso, aos edifícios e ao topo do modelo, que se manteve como superfície sem atrito.

A malha foi estabelecida com os seguintes parâmetros: elemento máximo de 64 m, elemento mínimo de 0,5 m e número máximo de células entre as lacunas de 3. Os perfis de entrada de vento logarítmicos, foram baseados no modelo de cálculo de rugosidade e em uma velocidade padrão de 5 m/s. Interessava, no caso, não determinar as velocidades absolutas no modelo, mas sim a relação das velocidades internas em diversos pontos e a velocidade do ar na estação de referência.

Para avaliação do vento médio, foi traçado um plano horizontal a 1,5 m de altura para cada simulação de vento realizada. Os valores foram exportados na forma de tabela, com informações das coordenadas da malha (X, Y e Z), a área de cada elemento e os valores de velocidade. Estas coordenadas foram atribuídas a pontos georreferenciados que permitiram a análise das condições médias de ventilação para cada quadra e para cada direção de vento (Figuras 6 e 7). Estas condições eram sempre dadas na forma de uma porcentagem da velocidade do vento de referência (5 m/s).

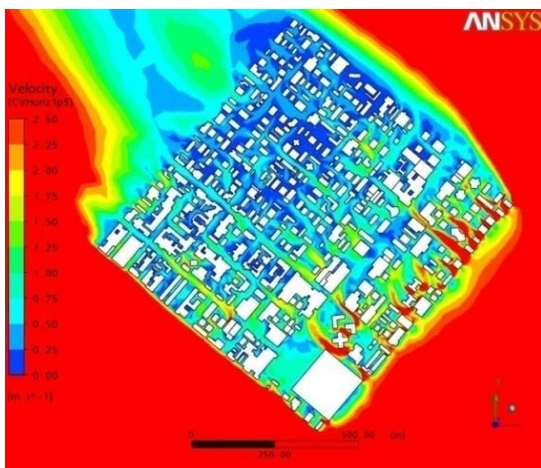


Figura 6 – Simulação de vento (CFX).

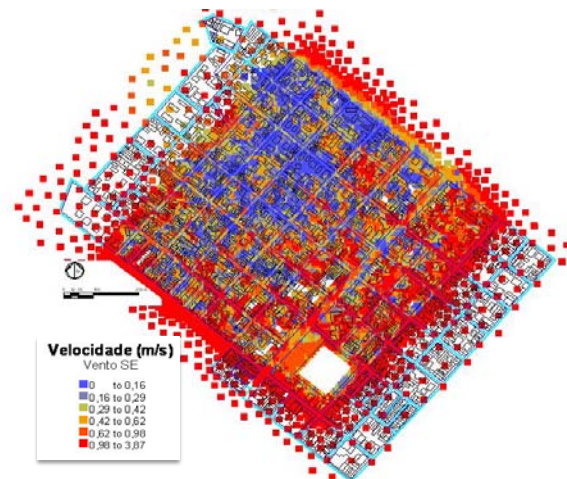


Figura 7 – Simulação de vento (MapInfo).

3.2.3. Comportamento térmico

O comportamento térmico dos ambientes urbanos foi simulado a partir de um modelo analítico de balanço de energia para canions urbanos (Figura 8), cujo modelo é apresentado em Brandão (2010).

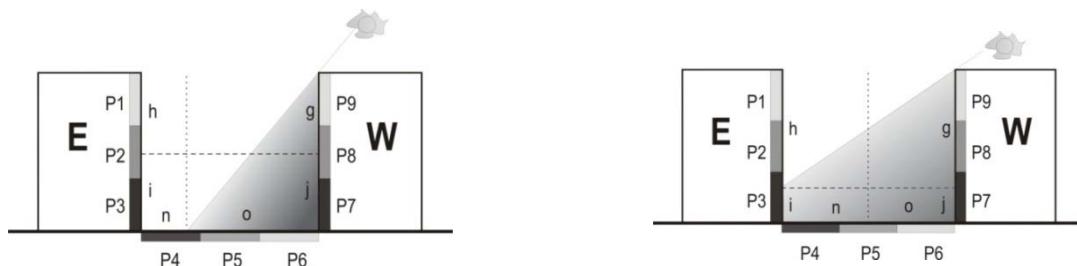


Figura 8 – Esquema geral do modelo analítico, com divisão de partes e de áreas baseada na incidência de sol

O canion é definido por três informações básicas: altura (H_C), largura (L_C) e azimute (Az_C). Os edifícios dos dois lados são sempre da mesma altura e o azimute pode variar de 0° a 180° . O edifício **E** é o edifício que tem a fachada voltada para leste; o edifício **W** tem a fachada sempre voltada para oeste. As superfícies do canion foram divididas em nove partes. As partes do edifício são iguais entre si, e o mesmo

critério se aplica para as partes da rua. Desse modo, a dimensão de cada parte é um terço de H_C e de L_C , respectivamente. As partes são sempre numeradas no mesmo sentido, do edifício E para o edifício W no sentido horário.

A partir da determinação de um dia para simulação, a planilha calcula o ângulo de incidência do sol e o comprimento da sombra para cada hora. A incidência já é dada pelo cosseno do ângulo, de modo a se tornar um coeficiente que multiplica a radiação solar direta. Sempre que a incidência é menor que zero, ela é considerada como zero. O piso é dividido entre a área n e o , sendo a primeira sempre a mais próxima do edifício leste. Caso o piso esteja totalmente sombreado ou totalmente insolado (no caso do azimute solar ser igual à orientação da rua), as áreas n e o são iguais. Os edifícios são também divididos em duas áreas – i e h para o edifício E, j e g para o edifício W. Como os edifícios são da mesma altura, a única possibilidade de ambas as fachadas estarem sombreadas é se os raios solares forem paralelos à rua. Assim, normalmente há pelo menos uma parte de uma fachada insolada e uma fachada totalmente sombreada. Caso a linha de sombra incida em um dos edifícios, a divisão de áreas será dada por essa linha para os dois prédios. Caso a linha de sombra incida sobre o piso, as áreas divididas serão do mesmo tamanho.

Os fatores de forma das áreas em relação umas às outras e em relação ao céu são determinados de acordo com Incropera e DeWitt (2003).

De acordo com a direção do sol, determinam-se quais áreas estão sombreadas e quais estão insoladas. São calculadas ainda até três interreflexões, com base no fator de forma e no albedo (refletância) das superfícies, que são adicionadas à radiação incidente diretamente.

O comportamento térmico de cada parte é calculado separadamente por uma planilha que utiliza o método das diferenças finitas (INCROPERA e DEWITT, 2003). Dentro dos edifícios, as divisórias entre as partes (lajes e paredes) são consideradas adiabáticas. O intervalo de tempo é determinado como função das características dos materiais e dos espaços de ar e é o mesmo para todas as partes. Os dados horários de temperatura, radiação, velocidade do vento, dentre outros, são interpolados para esse intervalo. As trocas por onda longa também são determinadas com base no fator de forma e na temperatura superficial do instante anterior. Com isso, obtém-se a radiação líquida na superfície. O nó superficial é calculado para as duas áreas existentes naquela fachada. As trocas entre o nó superficial e o primeiro nó interno são ponderadas na proporção da existência daquela área naquela parte.

A partir das trocas dos nós superficiais com o canion e das que este estabelece com a camada superior de ar (calculada a partir de MILLS, 1997). A planilha oferece como dados de saída a curva de entrada para até 1440 intervalos de tempo (com intervalos de um minuto, os resultados mostram um dia; com intervalo de 5 minutos, cinco dias, e assim por diante). Além disso, permite a avaliação de parâmetros específicos:

1. Temperatura máxima do período;
2. Temperatura média para o período;
3. Amplitude total para o período;
4. Diferença máxima entre a temperatura de referência e a temperatura do canion.

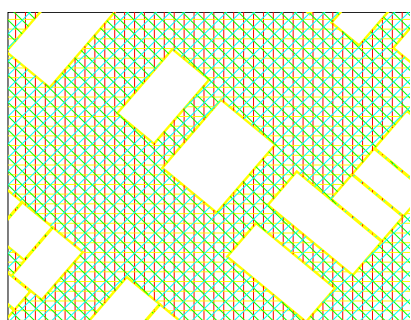


Figura 9 – Malha auxiliar

Para avaliação da área de estudo, foram criadas malhas auxiliares (Figura 9) orientadas nas quatro direções principais (Norte-Sul, Leste-Oeste, Nordeste-Sudoeste, Noroeste-Sudeste). Cada linha deu origem a uma zona de avaliação com altura igual à altura média dos edifícios limítrofes, comprimento equivalente à largura da rua e largura de 5 m. Foram ainda atribuídas a cada zona fatores de correção para a velocidade do vento nas direções estudadas, utilizando-se os dados obtidos nas simulações de vento. Os fatores eram aplicados à velocidade do vento medido na estação de referência para efeito de cálculo das trocas convectivas.

Os dados foram inseridos no modelo analítico para fins de cálculo e os resultados foram incorporados ao banco de dados georreferenciado, permitindo a análise das condições térmicas médias de cada quadra.

3.3. Correlações e análise de regressão múltipla

Para cada uma das variáveis consideradas, foi estabelecida uma correlação entre as variáveis calculadas e os valores médios para insolação, vento e temperatura simulados. Embora esta estratégia seja comum em pesquisas de clima urbano (ASSIS, 2005), o avanço neste trabalho é a conjugação da avaliação de correlação com a simulação, que permite uma base de dados mais ampla para os estudos

O universo destas regressões compreende 91 quadras, das quais 50 foram simuladas. Os intervalos e valores médios para cada variável são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2– Intervalos das variáveis de ocupação

Variável	Máximo	Mínimo	Médio
CA	4,52	0,44	2,11
TO	0,65	0,17	0,39
RM	89,8	7,8	32,9
Obst	56,7	16	35,3
Zd	25,26	2,098	8,26
Z0	21,29	0,05	1,70
IC	0,75	0,24	0,37
DpH	37,77	0,52	15,89
DpH%	2,76	0,025	1,05

Tabela 3– Intervalos das variáveis ambientais

Variável	Máximo	Mínimo	Médio
Δ Ampl	2,99	-2,44	0,62
Δ Tmáx	4,78	1,31	2,79
Δ Tméd	2,78	1,95	2,32
\bar{u}	3,68	0,07	1,45
HSverão	11	4,5	7,16
HSinverno	9	1,2	3,8

Foi feita uma matriz de correlação para determinar se as variáveis independentes apresentavam relação entre si. A multicolinearidade altera os cálculos de coeficiente de determinação, tornando-os menos confiáveis. Equações regredidas com variáveis correlacionadas apresentam fraca possibilidade de extrapolação, já que falham ao determinar a influência individual de cada variável. Deve-se, assim, evitar a utilização de variáveis correlacionadas como variáveis independentes em equações de regressão. A matriz de correlação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4– Matriz de correlação entre as variáveis independentes

	CA	TO	RM	Obst	Zd	ZO	IC	DpH1
DpH1%	0,24	-0,08	0,03	0,27	-0,08	0,10	0,10	0,68
DpH1	0,76	-0,52	0,30	0,75	0,50	0,22	-0,08	x
IC	0,03	-0,05	0,42	-0,20	-0,06	0,00	x	
ZO	0,72	-0,71	0,60	0,62	0,90	x		
Zd	0,89	-0,72	0,64	0,77	x			
Obst	0,85	-0,67	0,27	x				
RM	0,58	-0,63	x					
TO	-0,68	x						

Observa-se que as variáveis coeficiente de aproveitamento (CA), taxa de ocupação (TO) e recuos médios (RM) apresentam forte correlação entre si e com a maioria das outras variáveis. A existência de uma correlação entre estas variáveis é resultado de toda a área estar sujeita a uma mesma legislação de ocupação do solo que promove baixas densidades de ocupação do solo para maiores densidades totais de ocupação (conforme indica a correlação negativa).

Ainda assim, foi testada, para todos os casos a regressão múltipla com CA, TO e RM como variáveis independentes, por serem parâmetros usuais no planejamento urbano. Ainda assim, recomenda-se cautela na utilização das equações desenvolvidas, principalmente na extrapolação para condições de ocupação muito diferentes daquelas existentes em bairros densos com ocupação formal na cidade de São Paulo.

A avaliação foi feita através de uma análise progressiva, iniciando-se em uma variável base (inicialmente trabalhou-se sempre com CA e TO), adicionando outras variáveis progressivamente e verificando-se alterações na qualidade estatística da regressão. Esta qualidade é determinada através do coeficiente de correlação (r), do coeficiente de determinação (r^2), do erro padrão da estimativa (ep) e do fator F e da significância relacionada Análise de Variância da equação. Aumentos na correlação e na determinação e reduções no erro padrão e no fator F representam melhorias na estimativa da regressão. Obteve-se então a equação como melhor ajuste estatístico possível aos dados observados.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresentam-se como resultados deste trabalho o mapeamento da área de estudo e as correlações estabelecidas entre as variáveis ambientais e de ocupação.

4.1. Mapeamentos

Os resultados das simulações foram mapeados a partir das médias tiradas por quadra. Os mapas de insolação no verão e no inverno, além do mapeamento do vento médio, são apresentados na Figura 10.

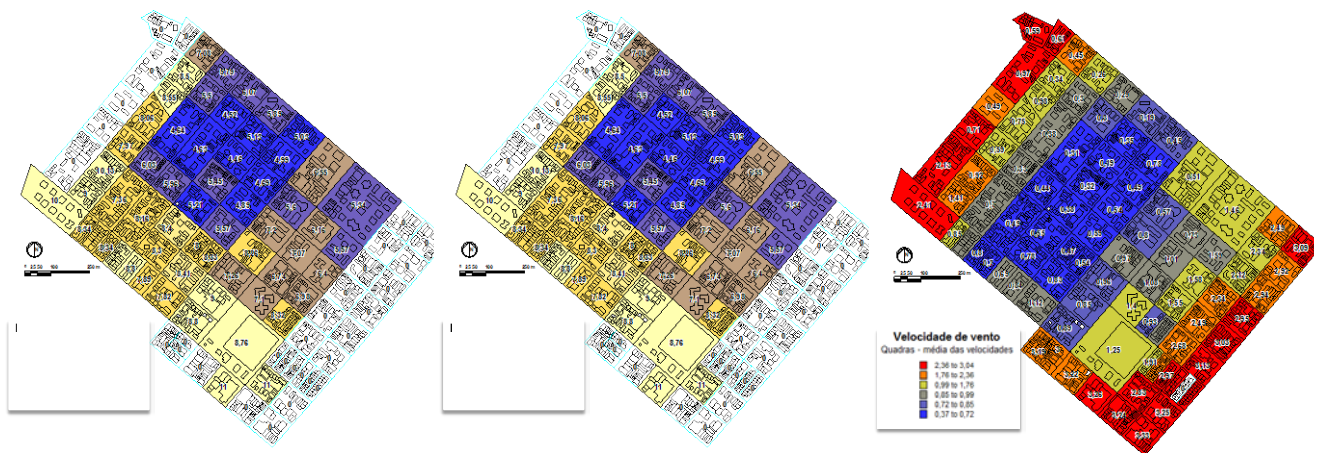


Figura 10 – Mapeamento de insolação de verão, insolação de inverno e velocidades de vento, respectivamente

Para análise térmica, foram calculados os valores médios por quadra foram: temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), temperatura média (Tmed) e Amplitude (Ampl). Os resultados foram então comparados com a temperatura de referência, medida na estação meteorológica. Deste modo são calculados os parâmetros: diferença máxima de temperatura (dMax), diferença entre amplitudes (dAmpl), diferença entre as temperaturas máximas (dTmax), diferença entre as temperaturas médias (dTmed). As três últimas variáveis foram utilizadas na análise de resultados (Figura 11).

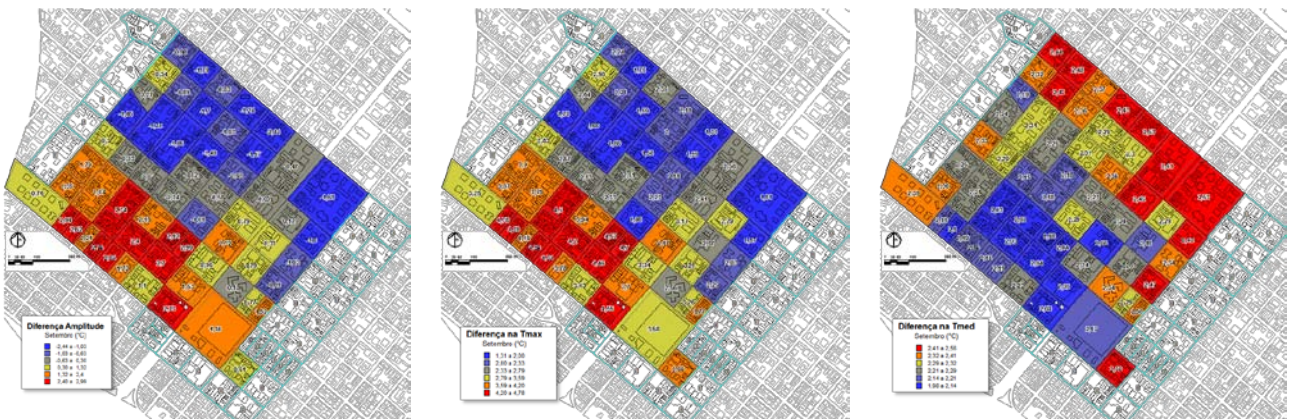


Figura 11 – Mapeamento das diferenças em amplitude térmica, temperatura máxima e temperatura média, respectivamente

4.2. Regressão de insolação

O resultado da correlação entre os parâmetros de ocupação e o número de horas de sol no solo ao nível do pedestre apresentou alta dispersão de dados e uma fraca correlação (módulo de r inferior a 0,4).

Para o verão, foram obtidas as equações, a partir das variáveis padrão e daquelas que apresentaram melhor ajuste, mostradas na Tabela 5.

Tabela 5– Equações de regressão para insolação (padrão e melhor ajuste)

Equação	Parâmetros estatísticos					
$HS_v = 3,537 + 0,0031 CA - 0,451 TO - 0,216 RM$	r =	0,420	r ² =	0,176	r ² aj =	0,146
	ep =	1,487	F =	3,92	p	0,0131
$HS_v = 4,896 - 0,051 Obst + 2,062 IC$	r =	0,400	r ² =	0,160	r ² aj =	0,145
	ep =	1,488	F =	5,33	p	0,0076

As equações de inverno apresentaram níveis de confiança maiores que 0,05 e, por isso, não foram apresentadas neste trabalho. Devido ao baixo valor do coeficiente de determinação, não se recomenda a utilização desta equação para a obtenção de parâmetros de planeamento.

4.3. Regressão de ventilação

A ventilação mostrou-se a variável mais complexa a ser avaliada pela regressão. Através dos modelos de rugosidade e do estudo dos perfis logarítmicos de velocidade, é relativamente simples estimar a velocidade do vento na camada limite urbana. Estimar o seu valor dentro da camada de rugosidade, no entanto, é uma tarefa complexa, pois a interferência combinada das estruturas produz efeitos de difícil previsão.

O vento na camada abaixo das coberturas (UCL) tende a apresentar grande variação, mas foi testada a hipótese de que a velocidade média poderia ser estimada a partir dos parâmetros de ocupação. Observou-se, no entanto, uma fraca correlação entre estas variáveis (módulo de r inferior a 0,4). Mesmo as variáveis aerodinâmicas Z_d e Z_0 não apresentaram correlações satisfatórias. Considerou-se, assim, que a velocidade do vento não pode ser determinada exclusivamente pelas características da quadra.

Foi então verificada a hipótese de que isto se deve à histerese espacial do vento, sendo necessário estudar o caminho percorrido pelo ar para se determinar adequadamente a sua velocidade na quadra específica. Para isto, foram construídos mapas com linhas paralelas a cada direção do vento, espaçadas em 100 m. As linhas foram divididas em trechos, delimitados por cada quadra e a informação das quadras foi transferida para os trechos através do programa de geoprocessamento. Neste estudo não se observou relação entre a velocidade e os parâmetros de ocupação das quadras, mas adicionando-se uma linha de tendência polinomial à relação entre distância e velocidade, conseguiu-se um ajuste com uma equação de segundo grau. Como a equação da curva variava para cada linha e sentido de vento e apresentava desvios da curva de regressão, foi estudada a possibilidade de que a inclinação da curva em um determinado ponto pudesse estar relacionada com as variáveis de ocupação. Isto foi feito comparando-se a variação da velocidade do vento sobre o comprimento do trecho com a variação de cada variável sobre o comprimento do trecho.

As regressões foram feitas para três grupos: cada sentido isoladamente; para os conjuntos dos sentidos perpendiculares à malha viária (SE, NW, SW, NE) e dos sentidos diagonais à malha viária (N, S, E, W), e para a totalidade dos dados disponíveis. Estavam disponíveis para análise 121 trechos SE-NW, 112 trechos SW-NE, 152 trechos N-S e 149 trechos E-W. As equações são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6– Equações de regressão para ventilação com incidência perpendicular e diagonal (padrão e melhor ajuste)

Equação	Parâmetros estatísticos					
$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta x} \text{per} = -0,0004 - 0,0062 \Delta CA - 1,1585 \Delta TO - 0,0026 \Delta RM$	r =	0,555	r ² =	0,308	r ² aj =	0,303
	ep =	0,0043	F =	42,06	p	<0,001
$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta x} \text{per} = 0,000008 - 0,0090 \Delta Obst - 1,0359 \Delta IC$	r =	0,580	r ² =	0,336	r ² aj =	0,334
	ep =	0,0042	F =	71,45	p	<0,001
$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta x} \text{diag} = 0,0022 + 0,0245 \Delta CA - 1,6117 \Delta TO - 0,0067 \Delta RM$	r =	0,669	r ² =	0,448	r ² aj =	0,445
	ep =	0,0049	F =	99,19	p	<0,001
$\frac{\Delta \bar{u}}{\Delta x} \text{diag} = 0,000013 - 0,0061 \Delta Obst - 1,1528 \Delta IC$	r =	0,563	r ² =	0,317	r ² aj =	0,315
	ep =	0,0054	F =	83,21	p	<0,001

4.3. Regressão de temperatura

Os resultados de temperatura aqui apresentados foram calculados considerando-se o conjunto de dados (estudos feitos com dados climáticos de fevereiro e setembro). Não foram avaliados os valores absolutos e sim as diferenças entre o valor obtido na simulação para o ponto e o valor medido na estação meteorológica para aquela variável. Os resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7– Equações de regressão para ambiência térmica (amplitude, temperatura máxima e média)

Equação	Parâmetros estatísticos					
$\Delta Amp = 1,008 - 0,768 CA + 2,058 TO + 0,017 RM$	r =	0,783	r ² =	0,613	r ² aj =	0,606
	ep =	0,802	F =	60,21	p	<0,001
$\Delta Amp = 4,110 - 0,089 Obst + 0,226 DpH\%$	r =	0,830	r ² =	0,689	r ² aj =	0,686
	ep =	0,715	F =	127,42	p	<0,001
$\Delta T_{m\acute{a}x} = 2,290 - 0,486 CA + 1,372 TO + 0,011 RM$	r =	0,761	r ² =	0,613	r ² aj =	0,686
	ep =	0,546	F =	52,15	p	<0,001
$\Delta T_{m\acute{a}x} = 4,999 - 0,056 Obst - 0,193 DpH\%$	r =	0,801	r ² =	0,641	r ² aj =	0,638
	ep =	0,502	F =	102,80	p	<0,001
$\Delta T_{m\acute{e}d} = 2,289 + 0,0588 CA - 0,251 TO - 0,00037 RM$	r =	0,506	r ² =	0,256	r ² aj =	0,243
	ep =	0,152	F =	13,10	p	<0,001
$\Delta T_{m\acute{e}d} = 1,816 + 0,009 Obst + 0,50 IC$	r =	0,580	r ² =	0,337	r ² aj =	0,331
	ep =	0,143	F =	29,19	p	<0,001

Para o total de dados as variáveis CA e Obst apresentaram-se com forte influência na amplitude térmica e na temperatura máxima locais. Foi possível ainda notar, ao contrário do esperado, a fraca influência de IC no resultado final. Analisando a influência de cada variável na regressão, observou-se que, apesar da utilização de DpH% nas equações, a obstrução foi praticamente suficiente para determinar a extensão da variação de temperatura máxima e na amplitude térmica da quadra.

A diferença na temperatura média assume valores menores e foi sempre positiva. A correlação com as variáveis de planejamento foi menor do que nos dois casos anteriores. O melhor ajuste foi obtido com as variáveis Obst e IC, embora a primeira, novamente, tenha apresentado maior significância que a segunda no resultado final.

5. CONCLUSÕES

Embora algumas das equações de regressão desenvolvidas apresentem validações estatísticas satisfatórias, as variáveis tradicionais de planejamento não são suficientes para se determinar a ambiência térmica urbana. O coeficiente de aproveitamento e a taxa de ocupação apresentaram uma boa correlação com os resultados das análises climáticas, mas as equações desenvolvidas contam com baixos coeficientes de determinação em relação à maioria das variáveis da ambiência térmica quando consideram as variáveis conjuntamente.

Outros fatores que normalmente não são considerados pela legislação, como o índice de compacidade e o ângulo de obstrução demonstraram ter papel fundamental na caracterização da ambiência térmica e dos espaços estudados. Soma-se a isso o fato de só haverem sido consideradas neste trabalho as trocas sensíveis externas ao canion, devendo-se prever que as correlações serão ainda menores quando se incluírem no estudo os efeitos da evapotranspiração e o calor antropogênico. Com isso, o trabalho aponta na direção de uma necessidade de revisão dos parâmetros urbanísticos utilizados nas legislações de uso e ocupação do solo.

Deve-se observar, no entanto, que a homogeneidade da área de estudo sob o ponto de vista da legislação vigente nos últimos anos limitou o intervalo das variáveis de planejamento utilizadas e determinou correlações entre os parâmetros de ocupação. Isto reduziu a capacidade de extrapolação das regressões realizadas. As equações de regressão desenvolvidas, embora limitadas pela base de dados que as gerou, apresentam-se como opção para produzir regras gerais de ocupação.

Para estudos futuros, aponta-se a possibilidade de aplicação do método a áreas com características de ocupação diversas, aumentando a base de dados para cálculo das equações de regressão e expandindo a capacidade de generalização e previsão do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, Eleonora. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCAC, 8, ELAC, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005, p. 92-101
- BRANDÃO, Rafael Silva. **As interações espaciais urbanas e o clima: incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano.** Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, 2009.
- BRANDÃO, Rafael Silva; ALUCCI, Marcia Peinado. Thermal behavior of urban canyons using numerical modeling, CFD simulation and GIS mapping. In: SIMBUILD 2010, 4, 2010. **Proceedings...** Nova York: IBPSA-USA, 2010 (formato eletrônico)
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003
- MACDONALD, R.W.; GRIFFITHS, R. F.; HALL, D.J.. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 11, 1857-1864, 1994
- MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. **Theoretical and Applied Climatology**, n 57, p. 229-244, 1997.
- MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo; MENDONÇA, Francisco. **Clima Urbano.** São Paulo: Contexto, 2003.
- OKE, T.R.. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**. London, Pergamon, v. 7, p. 769-779, 1973.
- _____. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: NATO/CCMS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING ON AIR POLLUTION MODELLING AND ITS APPLICATION, 27, 2004, Banff. **Proceedings...** Banff: Kluwer, 2004.p. 1-14.
- _____. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Building**. Amsterdam, Elsevier Science, 11, p. 103-113, 1988.
- _____. The energetic base of urban heat island. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**. London, Elsevier Science, v. 108, p. 1-24, 1982.
- TARIFA, José Roberto; AZEVEDO, Tarik Rezende de. **Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática.** São Paulo: FFLCH-USP, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.