



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE SOBRE O IMPACTO DA GEOMETRIA URBANA NO CONFORTO TÉRMICO EXTERIOR EM CLIMA TROPICAL

Tathiane A. L. Martins (1); Luc Adolphe (2); Cláudia B. Krause

(1) MSc, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, tathianemartins@gmail.com

(2) DSc, Professor do Instituto Nacional de Ciências Aplicadas de Toulouse, luc.adolphe@gmail.com

(3) DSc, Professora do Programa de Pós-graduação em Arquitetura, barroso.krause@gmail.com

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Av. Brigadeiro Trompowski, s/n°, sala 433, Edf. Reitoria, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, Tel.: (21) 2598.1661.

RESUMO

As cidades brasileiras têm crescido de forma rápida e intensa ao longo das últimas décadas. Esse acelerado processo de urbanização, entretanto, não tem acompanhado um planejamento urbano adequado que garanta níveis satisfatórios de qualidade ambiental nos seus espaços construídos. Em clima tropical, a mudança do clima local pode encaminhar ao estresse térmico, afetando negativamente o conforto e a saúde humana, bem como as atividades sociais e comerciais em espaços abertos. Nesse contexto, este artigo propõe examinar as respostas de conforto térmico exterior, considerando as modificações microclimáticas produzidas por diferentes configurações geométricas urbanas, conforme os parâmetros morfológicos propostos recentemente pelo código de edificações de uma cidade situada na região de clima tropical semiárido. Utilizando uma abordagem estatística experimental, cenários urbanos contrastados foram submetidos à análises microclimáticas realizadas por meio de simulações computacionais e o conforto térmico dos pedestres calculado pelo índice de temperatura fisiológica equivalente. O método estatístico permitiu realizar uma análise de sensibilidade de modo a identificar a contribuição relativa de cada parâmetro morfológico na mitigação do estresse térmico. Resultados sugerem que os afastamentos progressivos propostos pelo código local, gerando um tecido urbano mais poroso com prospectos maiores, foram importantes na promoção de conforto térmico exterior nesse contexto.

Palavras-chave: código de edificações, planejamento de experimentos, microclima urbano, conforto térmico exterior.

ABSTRACT

In many developing countries, such as Brazil, cities have been rapidly growing over the past decades without an effective planning. This urbanization process has encountered important impacts on the natural and built environment. In tropical climate, the local climate change has led to thermal stress, affecting negatively comfort and human health, as well as social and commercial outdoor activities. In Brazilian semi-arid region, many cities have just been elaborating their municipal building regulation. This paper examines different urban geometries generated from the building regulation guidelines of a Brazilian city located in the context of a tropical semi-arid climate. The urban scenarios were submitted to microclimatic analysis performed through computational simulation and pedestrian thermal comfort was then assessed by means of Physiological Equivalent Temperature (PET) index. The impact of the design parameters was evaluated through sensitivity analysis, which allowed identifying their relative importance through each scenario. Results suggested that the progressive building setbacks imposed by the local building regulation which lead mainly to an open-set urban fabric with wider street canyons may be desirable regarding the outdoor thermal comfort in a tropical climate. However, changes worked in buildings proportions and orientations have triggered some important variations..

Keywords: Building regulation, Design of experiments, Urban microclimate, Outdoor thermal comfort,.

1. INTRODUÇÃO

A densificação urbana associada aos processos atuais de urbanização têm contribuído para as mudanças climáticas locais e globais, alterando as propriedades físicas da superfície do solo, afetando o caráter térmico, radiante e aerodinâmico da atmosfera urbana em várias escalas (OKE, 1987). Um dos principais efeitos desses processos, é o efeito da ilha de calor urbano, que consiste na elevação de alguns graus na temperatura do ar nas cidades, quando comparada as temperaturas registradas nas zonas menos urbanizadas (ou rurais) do seu entorno. A redução da velocidade do vento devido ao aumento da rugosidade do solo urbano e da presença das edificações, a diminuição do efeito do resfriamento evaporativo (proporcionados por planos d'água ou da vegetação, cada vez menos presentes em meios urbanos) e, ainda a 'retenção' da radiação solar pela estrutura urbana e pelas superfícies, em geral de elevada absorção (e.g. asfalto, concreto), contribuem expressivamente, na intensificação desse fenômeno. Duas consequências imediatas podem ser verificadas. O impacto negativo na qualidade ambiental dos espaços públicos e privados e um importante incremento na demanda de energia para condicionamento ambiental e manutenção de condições apropriadas de conforto nos espaços interiores das edificações urbanas.

Golany (1996) argumenta que os planejadores urbanos devem ter a responsabilidade de oferecer formas urbanas adaptativas, baseadas no estudo do clima local. O impacto da forma urbana sobre o clima local, bem como, as influências deste último na gestão de energia dos edifícios, no entanto, permanecem ainda pouco abordados em escala maior.

A melhoria da qualidade ambiental dos espaços urbanos e, conseqüentemente, do desempenho ambiental e energético dos edifícios passa pelo importante conhecimento do clima local, bem como de sua interação com o ambiente construído. Portanto e, especialmente para os novos centros urbanos em crescimento, decisões dos planejadores urbanos e arquitetos desempenham um papel crucial na criação de regras que determinarão fortemente o desempenho ambiental dos espaços urbanos.

Nesse sentido, instrumentos como planos diretores e códigos de edificações deveriam atuar no controle da qualidade ambiental dos espaços coletivos e na regulação adequada do solo urbano. Constituído por instrumentos restritivos e reguladores do desenvolvimento urbano e do uso do solo nas cidades, os códigos de edificações devem ser estabelecidos de modo a "garantir qualidade ambiental e sanitária, segurança, bem-estar e conveniência a população, nos espaços interiores e no entorno das edificações urbanas" (IMRIE e STREET, 2011).

No Brasil, muitos códigos ainda preservam uma estrutura baseada em regras gerais de caráter higienista. E apesar de já estar sendo vastamente discutido, em âmbito nacional, a importância de se integrar diretrizes para eficiência energética e adequação ambiental nas regulamentações nacionais e nos códigos de edificações de alguns municípios brasileiros (CARLO et al, 2003; BAHIA, 1997), diretrizes e parâmetros que norteiem decisões de projeto na escala urbana local, com vistas a atender uma demanda de conforto térmico de espaços externos, ainda são pouco tratados nestes documentos.

A forma como esses códigos locais afetam a forma urbana e, conseqüentemente, a qualidade ambiental dos espaços exteriores é o foco deste trabalho, que busca examinar o desempenho dos parâmetros morfológicos urbanos recentemente propostos para uma cidade situada na região de clima semiárido no Brasil.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar as respostas de conforto térmico exterior, considerando as alterações microclimáticas induzidas por diferentes configurações geométricas urbanas. O objetivo principal é quantificar a contribuição relativa de cada um dos parâmetros morfológicos, no sentido da mitigação do estresse térmico dos pedestres, na escala microclimática urbana.

3. MÉTODO

A fim de atender ao objetivo definido neste trabalho, foram obedecidas quatro etapas metodológicas principais:

- a. Definição dos modelos geométricos conforme os parâmetros do código de edificações e padrões construtivos locais, utilizando a metodologia estatística do planejamento de experimentos por método fatorial;
- b. Análises por simulação computacional dos cenários urbanos em escala microclimática por meio do programa Envimet® (BRUSE, 2004);

- c. Cálculo da temperatura fisiológica equivalente para todos os cenários microclimáticos resultantes (PET - *Physiological Equivalent Temperature*);
- d. Análise de sensibilidade e magnitude de efeito dos parâmetros morfológicos.

3.1. Estudo de caso

Nesta investigação, foi utilizada, como estudo de caso, a cidade de Petrolina, situada na mesorregião do semiárido do estado de Pernambuco.

Situada na latitude 9°22' Sul e longitude 40°32' Oeste, a 375m de altitude, a cidade de Petrolina apresenta clima que se caracteriza por ser bastante quente ao longo do ano, porém com importantes oscilações sazonais de temperatura do ar e umidade relativa do ar, caracterizando a existência de uma longa estação quente com até 8 meses secos, e outra quente e úmida, durante o período de inverno. O lugar apresenta importante amplitude térmica diária, de 12,3°C em média, e entre estações, uma amplitude de 4,6°C. A temperatura do ar, nos meses de verão, registra média das máximas de 33,5°C e média das mínimas de 19°C. Apresenta, na maior parte do ano e, principalmente, no longo período quente e seco, céu claro e elevada radiação solar.

3.1.2. Dados urbanos

Petrolina é um dos municípios mais populosos situados nas margens do Rio São Francisco, na zona semiárida do Brasil, com 294 mil habitantes. Sua população cresceu 380% desde 1970 e 34,5% só entre 2000 e 2010. Tal fenômeno pode ser justificado pelo promissor crescimento da economia local que tem, recentemente, atraído um grande número de pessoas a migrarem para a cidade. Como consequência, o centro urbano de Petrolina passa por um processo de rápida verticalização que tem modificado a paisagem ao longo das margens do rio (Figura 1).

Para estabelecer controle e regulação do solo urbano da cidade, o plano diretor de Petrolina prevê, com a Lei nº 1.875, em seu título IV sobre ordenamento territorial, o capítulo V que trata dos parâmetros urbanísticos acerca do uso e ocupação do solo visando à ordenação do seu centro urbano. Sua lei do uso e ocupação do solo, publicada em 2006, prevê um conjunto de instrumentos restritivos para suas construções, definidos pelos seguintes parâmetros: (a) Taxa de ocupação (T.O); (b) Coeficiente de Aproveitamento (C.A); (c) Recuos iniciais e recuos progressivos; (d) Taxa de solo natural (TSN) (Tabela 1). Tais parâmetros apresentam, no entanto, valores específicos que obedecem ao macrozoneamento urbano da cidade que a divide em sete zonas. Para cada zona, foram estabelecidos prioridades de ocupação e adensamento. Neste trabalho, examina-se a tipologia residencial referente à zona residencial 1 (ZR-1) (Figura 1). A escolha dessa zona tipológica é justificada pelo interesse em compreender o impacto de uma tendência forte de verticalização e adensamento incentivado nesta região da cidade, que não apresenta em seu código nenhum limite de altura.



Figura 1- Zoneamento urbano para Petrolina-PE (à esquerda); adensamento e verticalização da orla do Rio (centro e direita) (Fonte: Prefeitura de Petrolina-PE, 2011; Martins, 2011).

Embora gabarito tenha sido estabelecido como um parâmetro no código local, com o coeficiente de aproveitamento (CA) juntamente a restrição dos recuos progressivos (tabela 1), é possível, em cada situação, identificar uma altura mais conveniente, em função de um bom compromisso entre a área total disponível e a área da lâmina (de cada pavimento).

Tabela 1 - Parâmetros urbanísticos de uso e ocupação do solo de Petrolina-PE, por zona e tipologia, destacando as zonas residenciais de interesse nesse estudo (Fonte: Prefeitura de Petrolina, 2006).

Zona	CA	TO	Residencial unifamiliar (até 2 pavimentos)		Residencial multifamiliar (até 4 pavimentos)		Cálculo do recuo resultante (RF – Recuo frontal RL – Recuo lateral e fundos)
			AF	ALF	AFI	ALFI	
ZR1(*)	4,0	0,7	3,00	0	5,00	2,00	RF = AFI + (n-4) x 0,20 RLF = ALFI + (n-4) x 0,20
ZR2	3,0	0,7	3,00	0	5,00	2,00	
ZR3	3,0	0,7	3,00	0	5,00	2,00	
ZR4	3,0	0,7	2,00	0	5,00	2,00	
CA– Coeficiente de aproveitamento; TO – Taxa de ocupação; AF – Afastamento frontal; ALF – Afastamento laterais e fundos; AFI – Afastamento Frontal Inicial; ALFI- Afastamentos Laterais e de Fundos Iniciais; n –Número de pavimentos.							

3.1.3. Definição das variáveis e intervalos de investigação

Seguindo os parâmetros do código de edificações de Petrolina, foram consideradas quatro variáveis geométricas principais para as edificações: o número de pavimentos (altura), a largura, a profundidade e os recuos. Tendo a ZR-1 (Zona Residencial 1), como zona de referência neste estudo, primeiramente, foi realizada uma análise da morfologia dos lotes, das quadras e ruas existentes. A partir dessas informações, chegou-se a alguns padrões estimativos de referência locais que permitiram estabelecer variações para cálculo dos cenários por meio de um estudo experimental, conforme será descrito abaixo. Num segundo momento, as geometrias resultantes foram calculadas de acordo com os parâmetros restritivos (incluindo os afastamentos resultantes) (Tabela 2).

3.2. Abordagem por meio de uma estratégia experimental

Diante de um certo número de variáveis e de um largo espectro de valores possíveis, infinitas combinações de parâmetros (ou cenários) podem ser estabelecidas. Quais cenários examinar? Como definir uma amostra representativa de um problema de modo a quantificar o impacto dos diferentes parâmetros envolvidos? Como identificar quais são os parâmetros mais influentes?

Como a avaliação de fenômenos climáticos urbanos a partir de métodos numéricos pode representar um elevado custo computacional (no caso do programa Envimet®, utilizado nesse trabalho, a simulação de um ciclo diário de um único cenário pode levar mais de um dia), torna-se inviável examinar todo o espaço de busca possível, o que no caso desse trabalho - utilizando apenas três variações do intervalo para as cinco variáveis consideradas, por exemplo - poderia corresponder a 3⁵ cenários, ou seja, 243 cenários diferentes.

Para explorar o espaço de busca de forma racional e de modo a não induzir um determinado comportamento ou resposta (o que pode acontecer ao adotar-se uma amostra aleatória, por exemplo), faz-se necessário utilizar uma abordagem estatística experimental.

Entre os vários métodos existentes, nesse trabalho foi realizado um planejamento de experimentos adotando-se o método fatorial fracionado, ou seja, uma meia fração de um planejamento fatorial completo com dois níveis (alto e baixo). Essa é uma técnica de planejamento bastante utilizada uma vez que é capaz de fornecer resultados representativos com uma quantidade menor de experimentos, buscando eliminar observações redundantes e assim reduzir o tempo e os recursos necessários para esse tipo de análise. A partir dos resultados obtidos, os efeitos principais e interação do fator principal considerado (conforto térmico exterior) podem ser testados quanto à sua significância por meio do teste *t* de Student (teste de hipótese) (MONTGOMERY e RUNGER, 2005) ou análise de sensibilidade dos parâmetros morfológicos mais significativos, ou seja, que causam maior impacto na resposta de interesse.

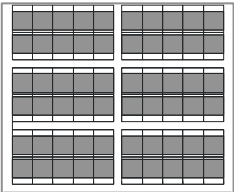
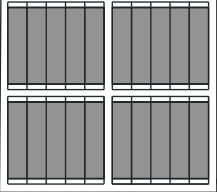
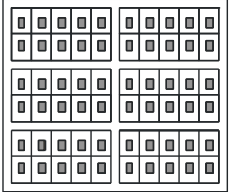
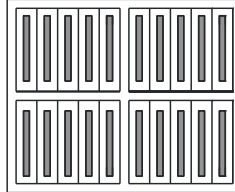
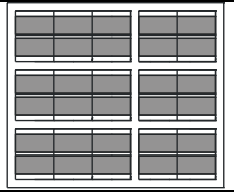
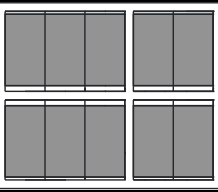
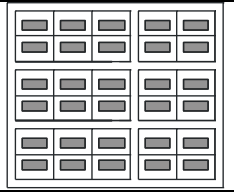
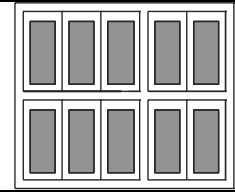
A análise de sensibilidade proporciona uma melhor compreensão do comportamento do modelo em estudo e fornece informações acerca da significância das variáveis de projeto, o que possibilita a simplificação do modelo para uma futura análise de otimização, por exemplo. Os cenários gerados pelo planejamento de experimentos empregado podem ser encontradas na tabela abaixo.

Tabela 2 - Experimentos urbanos.

Exp	Largura (m)	Profundidade (m)	Altura (m)	Dimensões resultantes(L;P;A)	Rua (m)	Orientação
I	15	20	6	15; 14; 6	6	N-S; E-W
II	15	60	6	15; 54; 6	6	N-S; E-W
III	15	20	60	4; 6; 60	6	N-S; E-W
IV	15	60	60	4; 46; 60	6	N-S; E-W
V	30	20	6	30; 14; 6	6	N-S; E-W
VI	30	60	6	30; 54; 6	6	N-S; E-W
VII	30	20	60	20; 6; 60	6	N-S; E-W
VIII	30	60	60	20; 46; 60	6	N-S; E-W

Para todos os cenários urbanos, foi considerada a mesma largura da rua (6m), assim como o mesmo tipo de quadra em uma trama regular ortogonal. Para cada um dos oito modelos, foi igualmente considerado duas orientações diferentes, de modo a verificar o impacto de cada fator morfológico em diferentes situações de implantação urbana. As geometrias contrastadas resultantes estão ilustradas na tabela 3 abaixo.

Tabela 3- Cenários urbanos contrastados.

I	II	III	IV
			
V	VI	VII	VIII
			

De acordo com o coeficiente de aproveitamento (CA) estabelecido pelo código, os cenários IV e VIII consistiriam em cenários restritos, visto que estes excedem a área total construída permitida. No entanto, esses cenários foram também considerados como parte de amostra para o teste estatístico, a fim de possibilitar a avaliação da magnitude de efeito das variáveis de projeto de interesse nesta análise.

Na tabela 5, todas as geometrias resultantes do estudo experimental são descritas por meio de um conjunto de indicadores de desempenho ambiental da forma urbana.

Os indicadores escolhidos para caracterização ambiental e análise climática dos cenários urbanos neste trabalho foram os propostos por Adolphe (2001). Estes foram empregados a fim de agregar informações qualitativas da morfologia construída, relacionando-as com as variáveis microclimáticas urbanas e auxiliando na leitura do fenômenos envolvidos.

Associar as análises morfológicas com as respostas microclimáticas pode também permitir a criação de uma linguagem integrada que pode ser, posteriormente, interpretada e utilizada por planejadores urbanos. Os indicadores empregados nesse trabalho foram os seguintes: a densidade construída, a compacidade, a contiguidade, o fator de visão do céu (FVC) e o prospecto médio (Tabela 4).

Tabela 4 - indicadores ambientais da forma urbana empregados no trabalho (Adolphe, 2001).

Densidade construída	A densidade do edifício é definida como sua área útil total construída dividida pela área construída no solo.	$DS_{N\ const} = \frac{S_{tot_i}}{S_{sol_i}}$ Onde, S_{tot} é a Área útil total construída do edifício i ; S_{sol_i} = Área construída no solo do edifício i .
Compacidade	Consiste na relação entre a área de envoltória exterior dos edifícios na malha e o volume destes elevado à 2/3 potência.	$Comp_{edf} = \frac{S_{env\ ext}}{(V_{edf_i})^{2/3}}$ Onde, $S_{env\ ext}$ = Área da envoltória exterior; V_{edf_i} = Volume do edifício i .
Contiguidade	A contiguidade de um edifício é calculada como a área das paredes geminadas sobre a área total da envoltória.	$Cont_i = \frac{S_{env\ tot} - S_{env\ ext}}{S_{env\ tot}}$ $S_{env\ tot}$ = Área total da envoltória do edifício; $S_{env\ ext}$ = Área da envoltória exterior.
Prospecto médio	Relação da altura média ponderada pela largura da rua.	$P_M = H_{med}/l$ Onde, H_{med} = Altura média ponderada dos edifícios na malha; l = Largura da rua.
Fator de visão do céu	Relação da área do céu visível a partir de um ponto observador pela área total da abóbada.	$FVC = \frac{S_{sky}}{S_{disk}}$

Tabela 5 - Síntese dos indicadores de desempenho ambiental para cada modelo morfológico.

Indicadores	(I)	(II)	(III)	(IV)
	Densidade construída	0,69	0,90	0,08
Compacidade	0,31	0,20	0,85	0,56
Contiguidade	0,43	0,65	0,00	0,00
Fator de Visão do Céu	0,66	0,66	0,49	0,43
Prospecto médio	0,43	0,43	2,73	2,73
	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)
	Densidade construída	0,70	0,90	0,2
Compacidade	0,31	0,20	0,45	0,16
Contiguidade	0,19	0,27	0,00	0,00
Fator de Visão do Céu	0,66	0,66	0,38	0,36
Prospecto médio	0,43	0,43	2,73	2,73

3.3. O modelo numérico

Para realização das análises microclimáticas foi utilizada a ferramenta computacional ENVI met versão 3.1. A grande vantagem deste *freeware* é ser um dos poucos a realmente reproduzir os importantes processos físicos da atmosfera que afetam o clima urbano na microescala, baseando-se em um conjunto de modelos físicos bem fundamentados que se encontram documentadas em Bruse e Fleer (1998) e disponível também em Bruse (2004).

Algumas das variáveis de entrada cadastradas no programa consistem nas características: das edificações (albedo para cálculo do balanço da radiação, estimando ainda o cálculo para o calor antropogênico), do solo e subsolo (temperatura e umidade), da vegetação (espécies), e dados da biometeorologia para estimar a resposta de conforto térmico exterior. Para as variáveis climáticas do caso deste trabalho, foi considerada uma situação típica de referência para uma dia de verão em Petrolina (Tabela 6).

Tabela 6 - resumo das condições de contorno adotadas no processo de simulação com Envimet®.

Simulação	Dia da simulação	21/DEZ	Clima	Temperatura atmosférica inicial	300K
	Intervalo tempo	60 min		Umidade relativa média (2m)	63%
	Localização	Petrolina/PE/ Brasil [9°40' S; 40°50' W]		Velocidade do vento à 10m (m/s)	4
	Tipo de clima	TROPICAL SEMI-ÁRIDO		Direção do vento	LESTE
				Coefficiente de rugosidade	0,25

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Para realizar a análise dos dados de saída (para todos os cenários), considerou-se os dados médios de um percurso virtual realizado pelo pedestre, sempre do mesmo lado rua. Foi analisado um ciclo diário completo para uma condição de verão. Cálculos foram realizados para uma resolução de malha espacial de 1m x 1m x 2m no modelo tridimensional de análise microclimática, ENVI met®. E os dados foram extraídos para 1,6m acima do solo. Os principais resultados serão apresentados e discutidos na sequência.

4.1. Análises comparativas dos cenários urbanos

Duas das variáveis mais decisivas na definição da temperatura fisiológica equivalente (PET) dos pedestres no contexto climático em estudo são a temperatura média radiante, associada as taxas de velocidade do vento. Assim, o percentual de sombreamento cumpre papel crucial, como uma das principais estratégias na manutenção das áreas urbanas mais frescas, uma vez que não só protege os pedestres contra a radiação solar direta, como também mantém as superfícies construídas (envoltórias dos edifícios) menos aquecidas durante o dia. Consequentemente, os cenários com maior prospecto (altura dos edifícios/distância entre os mesmos) apresentaram melhores resultados, ou seja, condições mais favoráveis para atenuação do potencial de temperatura do ar ambiente. Além disso, verificou-se também que a taxa de velocidade de vento atua, de um lado, como atenuador nas respostas de conforto (PET), mas igualmente, em outras situações, como fator

agravante do desconforto - como é possível se verificar nos cenários IV e VIII, que apresentaram as maiores taxas de velocidade de vento (6,8 m/s e 5,5m/s, respectivamente). O importante aumento da PET nesses casos, foi dado principalmente à combinação de taxa elevadas de velocidade do vento, associadas a temperaturas do ar extremamente elevadas, aumentando a sensação térmica de desconforto por calor.

4.2. Temperatura Média Radiante e velocidade do vento

Quanto maior o percentual de sombra projetada no passeio do pedestre (produzido pelos cenários de maior prospecto e menor Fator de Visão do Céu - FVC), menores as taxas de temperatura radiante médias alcançadas no ciclo diário (e.g. 27,66°C para o cenário VII e 29,65°C para o cenário III), o que parece evidente. No entanto, os outros dois cenários, IV e VIII, que registraram 32°C e 33°C em média respectivamente (com o mesmo prospecto, porém mais densamente construídos), ambos apresentaram os maiores valores de temperatura durante o período noturno. Essa condição particular pode ser justificada pela radiação de onda longa que fica retida no cânion urbano por mais tempo, devido a elevada densidade construída associada à elevada compactidade dos edifícios nesses cenários (o que significa maior exposição solar da superfície das envoltórias externas em relação ao volume construído dos mesmos).

Com exceção dos cenários acima mencionados (que são os cenários com restrição, como mencionado anteriormente), é possível que os afastamentos progressivos sejam responsáveis por dois fenômenos importantes: uma maior dispersão da radiação de onda longa (especialmente durante a noite), atenuando temperatura média radiante e contribuindo para um tecido urbano mais poroso, encaminhando a uma maior velocidade do vento nas ruas, ao nível do pedestre. A perda de calor por radiação durante o período noturno é ainda mais flagrante em climas áridos, como é o caso de Petrolina no verão, pois nestas regiões a temperatura da abóbada celeste é bastante reduzida, a umidade menor e o tipo de céu menos encoberto. Diferente da situação em clima quente e úmido, por exemplo, onde as características de céu e a elevada umidade reduzem de forma significativa este efeito. Para as mesmas morfologias, mas na orientação Norte-Sul, verificou-se temperaturas radiantes ligeiramente mais baixas (em média diária), porém ainda com elevadas temperaturas para a maioria dos cenários.

Com um prospecto mais estreito, a velocidade do vento tende a ser maior, quando este parâmetro está também associado a uniformidade (ou nesse caso, continuidade) desse prospecto. Ao examinar o cenário onde as edificações possuem a mesma contiguidade, porém um com o prospecto mais estreito e outro mais largo, este último apresenta taxas de velocidade do vento menores. Quanto menor a seção, maior a velocidade. Tendo em vista, evidentemente, a direção do vento no mesmo sentido da rua Leste-Oeste.

Outra análise relevante nesse aspecto, corresponde ao comportamento relativo aos cenários verticais com densidade construída no solo diferentes (caso dos cenários III, pouco denso, e IV/VIII, mais denso, por exemplo). O escoamento do vento no cenário de maior densidade é dado de forma menos uniforme, criando zonas importante de estagnação do ar entre os edifícios (sobretudo quando assumida a direção Leste para o vento), tendo em vista a disposição dos edifícios em tabuleiro de xadrez e a proximidade relativa entre as laterais desses. Pode-se inferir também sobre o comportamento da forma quanto a profundidade dos edifícios (no cenário IV), para esta direção do vento, gerando um impacto extremamente importante, como será visto mais adiante na análise de magnitude de efeito das principais variáveis geométricas. Em contraponto a este comportamento, o cenário menos denso e, portanto, constituindo em malha mais porosa, possibilitou uma permeabilidade na distribuição entre os edifícios mais satisfatória (para as direções Leste e Norte do vento).

4.3. Conforto térmico exterior

A avaliação das respostas de conforto exterior para cada cenário microclimático, foi realizada por meio do uso do índice de temperatura fisiológica equivalente (PET).

O índice PET, primeiramente publicado por Höppe (1999), é definido como a temperatura do ar em que o balanço térmico pode ser mantido nas mesmas temperaturas do corpo e da superfície da pele, em uma situação de referência. A PET possui sua unidade em graus Celsius e pode, portanto, ser mais facilmente interpretada por planejadores para fins de projeto (ALI-TOUDERT e MAYER, 2005). Para esta pesquisa, o cálculo da PET foi realizado por meio do uso do programa RayMan, desenvolvido por Matzarakis (2010) e equipe.

Foi verificado, ao longo do ciclo diário avaliado, que para todos os cenários, as maiores PET foram registradas às 18h. Sendo os cenários urbanos II e VI (edifícios baixos, sem afastamentos laterais) aqueles que apresentaram os mais altos níveis de PET (ou de desconforto térmico) durante quase o dia inteiro. Isto pode ser explicado pelo baixo prospecto, que gera o mais elevado valor de fator de visão do céu entre os cenários estudados (FVC = 0,66). Além disso, e no entanto, esses mesmos cenários apresentaram os níveis mais baixos de temperatura durante no início da manhã até as 10h, devido a sua configuração de rua cânion

(mesmo que um cânion baixo) que leva a uma redução substancial na radiação solar direta vivenciada pelos pedestres nesses horários, quando comparado aos outros cenários (visto que não há nenhuma penetração dos raios do sol através dos recuos laterais dos edifícios). Devido à área sombreada gerada pelas torres de 60 m (cenários III e VII), a PET apresentou os menores valores comparados aos cenários dos cânions baixos. No entanto, com o maior ângulo solar, a proporção de sua geometria e seu alto nível de compacidade (de aproximadamente 0,45 - mostrando mais superfícies refletivas expostas ao exterior) ainda apresentam altas PET no período diurno (fenômeno comumente verificado, especialmente em baixas latitudes) e prolongada até a noite (PET de 34,9°C e 33,7°C as 18h). Isso pode ser justificado pela a radiação de onda longa ainda retida no interior do dossel urbano nesses cenários.

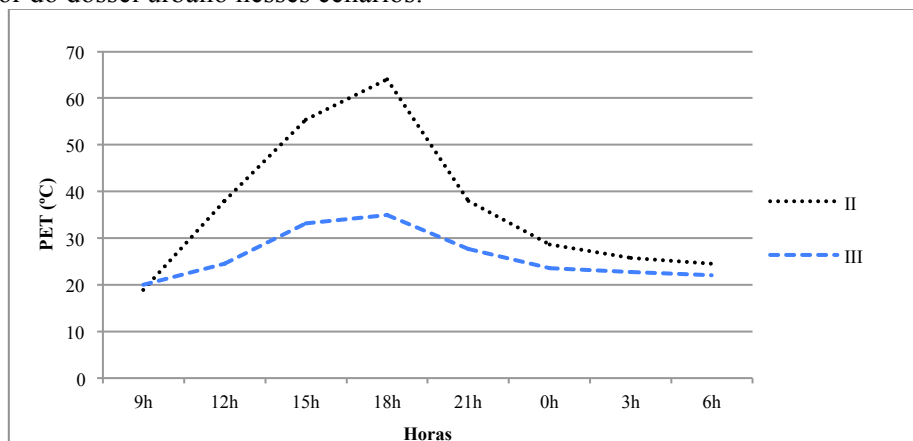


Figura 2 - comparação dos resultados da PET para um ciclo diário completo entre os cenários II (configuração em cânion baixo com edificações geminadas) e III (torres altas com afastamentos laterais).

4.4. Análise paramétrica da magnitude de efeito

Para compreender a relação de efeito das variáveis morfológicas estudadas na resposta da PET, aplicou-se uma análise estatística de magnitude de efeito.

Conforme discutido acima e ilustrado no gráfico que segue, é possível verificar um efeito de maior magnitude para o número de pavimentos e para a profundidade dos edifícios. Isso pode ser justificado pelos afastamentos progressivos estabelecidos pelo código local para edifícios mais verticais (Figura 3). A magnitude de efeito do número de pavimentos em relação a PET foi verificada numa relação inversa, ou seja: quanto maior o número de pavimentos do edifício (que também significa maiores distâncias entre edifícios), menor a PET. Considerando-se um teste *t* para duas amostras, assumindo variâncias iguais, o intervalo de confiança do efeito estimado das variáveis foi de 0,006.

Além disso, no que se refere a magnitude de efeito sobre a taxa de velocidade de vento, identificou-se uma relação de efeito direta com a profundidade do edifício que, dependendo da orientação da rua, desempenha papel decisivo na atenuação da PET (Figura 3).

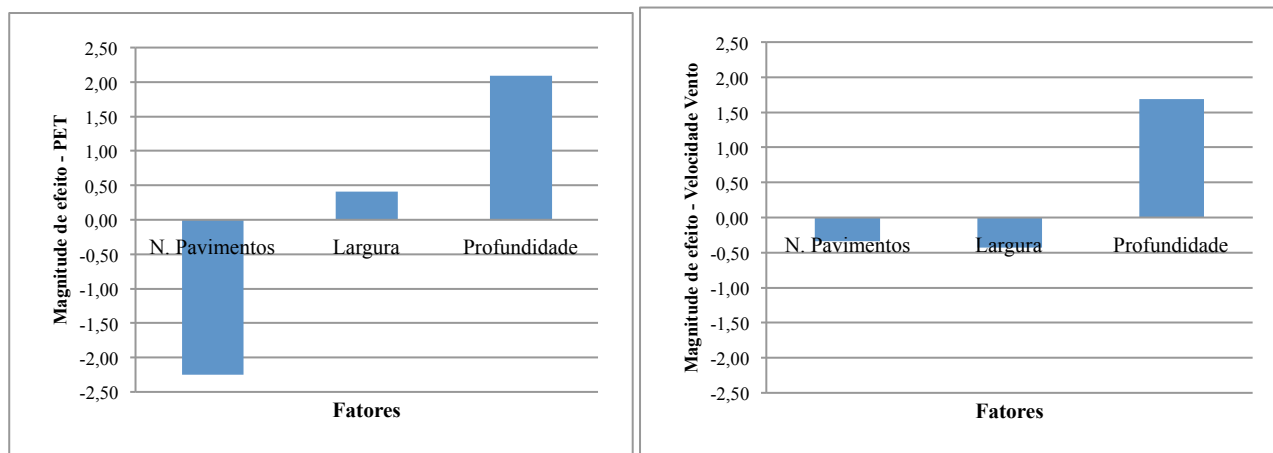


Figura 3 - magnitude de efeito das principais variáveis geométricas dos edifícios na resposta de conforto PET e nas taxas de velocidade do vento.

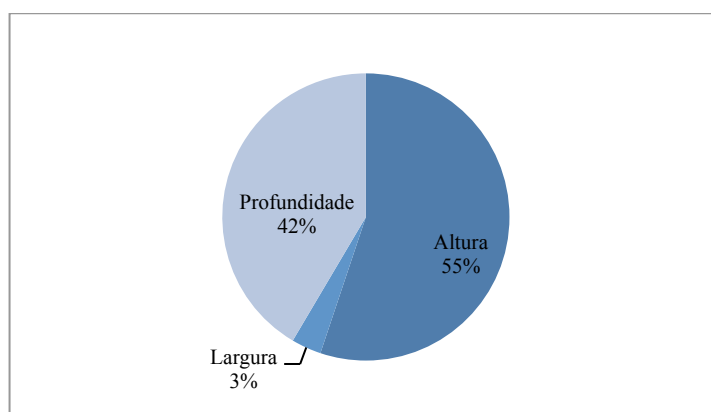


Figura 4 - Resultado da análise de sensibilidade para as variáveis geométricas na resposta da Temperatura Média radiante.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados de uma análise estatística experimental sobre as respostas microclimáticas e de conforto térmico exterior para os principais parâmetros estabelecidos recentemente pelo código de edificações de uma cidade em região tropical semiárida do Brasil. Um conjunto de cenários gerados pelo método experimental (fatorial fracionado) foram submetidos a simulações computacionais no modelo ENVI-met® e, em seguida, analisados individualmente e por meio do cálculo de sensibilidade, no sentido de identificar estatisticamente a magnitude da relação entre as variáveis morfológicas estudadas e suas respostas no conforto térmico.

Apesar do código de edificações não considerar um gabarito específico para a zona estudada, os recuos progressivos (que por fim sugerem o número de pavimentos) parecem cumprir um papel importante na mitigação de estresse térmico no microclima urbana em clima tropical semiárido.

É possível ainda concluir que cenários urbanos com menor prospecto podem ser compensados implementando-se outras estratégias de sombreamento, como a inserção de vegetação urbana ou dispositivos arquitetônicos, tais como galerias urbanas, marquises etc.

Outrossim, os atributos morfológicos empregados na análise microclimática possuem um importante potencial de informação e operacionalização, podendo atuar como indicadores de desempenho em diretrizes quantitativas nos códigos de edificações/urbanismo.

A problemática investigada nesse trabalho, consiste em conjunto de fenômenos bastante complexos que merece ser mais detalhado em testes estatísticos incluindo um maior número de variáveis resposta e fatores de análise. Além disso, a comparação de resultados das simulações com dados obtidos por meio de medições em campo consiste em outra importante abordagem, a fim de validar o estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro na forma de bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLPHE, L. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, 28, 2001. P.183–200.
- ADOLPHE, L.; CHATELET, A.; AIT-AMEUR, K. et al. **SAGACités, Système d’Aide à la Gestion des Ambiances urbaines**, Rapport final. MENRT, Action Concertée Incitative Ville, 2002.
- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. 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. 2006. p. 94-108.
- ARNFIELD, J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 2003. P.1–26.
- ASSIS, E. S. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, N.10. 2006. p. 20-25.
- BAHIA (1997). **Manual para Elaboração de Código de Obras e Edificações**. Rio de Janeiro: Eletrobrás/IBAM, 2011.138p.
- BRUSE, M. ENVI-met V3.0, a microscale urban model. **IAUC Newsletter [online]**. juin 2004, n°5, [réf. 10 outubro de 2006], p. 2-4. Disponível em: <http://www.urbanclimate.org/>
- BRUSE M., FLEER H. **Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model**. *Envir. Model. Software* 13: 373-384. 1998.
- BRUSE M. ENVI-met manual. Available at : <http://www.envi-met.com.> [16 Octobre 2011].
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Dep. Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília, DNMET, 1992. 84p.
- ESCOURROU, G. **Le climat et la ville**. Presses universitaires Nathan : Paris, 1991.

- FISHER, R.A. **The Design of Experiments**. Macmillan, 9 Ed., 1971.
- GOLANY, G. S. Urban design morphology and thermal performance. **Atmospheric Environment**, vol.30, n°3, 1996, p. 455-465.
- GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, 2009.
- HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal Biometeorology**, 43. 1999. p. 71-75.
- IBGE. **Censo Demográfico 2010: Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo**. IBGE. 2010. 270p.
- IMRIE, R.; STREET, E. **Architectural design and regulation**. John Wiley & Sons Ltd: USA.
- LANDSBERG, H.E. **The urban climate**. International Geophysics Series, vol.28, Academic Press, New York, 1981.
- MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos**. In: MONTEIRO, C.A.F.; MENDONÇA, F. *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistical and probability for engineer**. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003.
- MATZARAKIS, A., MAYER, H., IZIOMON, M. Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. **International Journal Biometeorology**, 43. 2000. p. 76-84.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2nd ed. USA: Methuen, Inc., 1987.
- OKE, T.R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, 11. 1988. p. 103-13.
- OKE T.R. **Overview of interactions between settlements and their environments**. WMO experts meeting on Urban and Building climatology, WPC-37, WMO, Genève. 1982.
- OKE, T.R. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. **Energy and buildings**, vol.7, n°1, 1984, p. 1-10.
- SALAT, S. **Les villes et les formes. Sur l'urbanisme durable**. CSTB. Laboratoire des Morphologies urbaines. Hermann Editeurs: Paris, 2011.