

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)**



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia



Universidade de Brasília

Reitora
Vice-Reitor

Márcia Abrahão Moura
Enrique Huelva

EDITORA



UnB

Diretora

Germana Henriques Pereira

Conselho editorial

Germana Henriques Pereira (Presidente)
Fernando César Lima Leite
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende
Carlos José Souza de Alvarenga
Estevão Chaves de Rezende Martins
Flávia Millena Biroli Tokarski
Jorge Madeira Nogueira
Maria Lidia Bueno Fernandes
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos
Sely Maria de Souza Costa
Verônica Moreira Amado

EDITORA



UnB

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni
(Organizadores)



Pesquisa,
Inovação
& Ousadia

Coordenadora de produção editorial
Preparação e revisão

Equipe editorial

Luciana Lins Camello Galvão
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:
Editora Universidade de Brasília
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF
Telefone: (61) 3035-4200
Site: www.editora.unb.br
E-mail: contatoeditora@unb.br

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

S614 Simulação, ambiente e energia no espaço construído /
 organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :
 Editora Universidade de Brasília, 2020.
 284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

Sumário

Prefácio	7
<i>Otto Ribas</i>	
Apresentação	9
Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz	
Capítulo 1. Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 2. Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
Capítulo 3. Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
Capítulo 4. Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia

Capítulo 5. Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil 173

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

Capítulo 6. Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília 215

Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim

Capítulo 7. Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e
Maria Vitória Duarte Ferrari*



Parte 1

Inputs – conforto, vento e luz



CAPÍTULO 1

Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met

Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero

Este capítulo está organizado em cinco tópicos. Apresenta, num primeiro momento, o primeiro tópico com um breve panorama sobre as relações entre a revolução digital e a análise do desempenho do ambiente construído. No segundo tópico, apresenta-se o conceito de *simulação computacional bioclimática*, para, num terceiro tópico, apresentar uma proposta de caracterização climática para o Distrito Federal (DF). O quarto tópico dedica-se à apresentação das configurações, critérios e parâmetros do *software* ENVI-met; em resumo, os procedimentos metodológicos da pesquisa. Em seguida, tem-se o tópico cinco, que apresenta o real desempenho térmico das cavidades urbanas, seguido do tópico seis com as Considerações finais do capítulo. Por fim, tem-se o tópico sete com as referências bibliográficas utilizadas neste capítulo.

1. A revolução digital e o ambiente construído

A partir do século XX, com a revolução digital, toda a carreira dos profissionais ligados ao planejamento, à construção e à manutenção do ambiente construído foi

impactada pela chegada do computador. Esse novo cenário apontou para a necessidade de domínio de novas ferramentas, tanto para a elaboração e o monitoramento dos projetos quanto para a garantia de desempenho deles. Nesse sentido, o domínio de algum *software* tornou-se uma demanda natural para arquitetos, engenheiros e urbanistas, sobretudo desde o fim de 1990 (MONTENEGRO, 2001).

No contexto da revolução digital, marcada pelo manuseio do computador, a profissão do arquiteto e urbanista teve seu processo de trabalho bastante impactado, sendo possível observar benefícios como a agilidade na produção de um desenho técnico, a facilidade no entendimento de um projeto na terceira dimensão e mesmo a possibilidade de replicar um projeto com poucos cliques.

A tecnologia pode ser encarada como “uma das quatro variáveis básicas do desenvolvimento, acompanhada das outras variáveis: recursos humanos, recursos naturais e qualidade de vida” (LEDO, 1996, p. 14), o que implica dizer que a tecnologia se tornou necessária para o desenvolvimento das habilidades humanas. Dessa forma, as profissões devem incorporá-la na nova práxis, fazendo que ela seja um vetor para que se possa atingir um maior grau de qualidade no ambiente construído. A busca da qualidade exige um conhecimento prévio do território. Nesse sentido, diferentes metodologias de pesquisa buscam formas de compreender o território.

Uma das estratégias metodológicas para a compreensão do território é a modelagem. Neste livro, o conceito de *modelagem* é ampliado para *modelagem ambiental*, representando uma abstração do mundo natural e realizando a previsão de eventos baseados em princípios gerais (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A chegada dos diversos tipos de *software* trouxe mais alternativas e incrementou às formas de compreender o ambiente ao redor, de forma que nunca foi tão fácil modelar a realidade, nunca foi tão acessível e, ao mesmo tempo, tão complexo transpor a realidade para o mundo digital.

A construção de um modelo é encarada por Anjos (2008) como etapa fundamental para a melhor compreensão do objeto de estudo. O autor explica o processo de elaboração de tipos lembrando que:

O mundo real mostra-se tão complexo que é impossível reproduzir todas as suas características, as suas relações funcionais e todo o conjunto de interdependências. Uma característica que nos parece muito relevante ao tratarmos da elaboração de um tipo é que este pode ser estruturado de forma que os aspectos importantes selecionados do mundo real sejam manipulados, relacionados e explorados visando a uma representação, uma simplificação. (ANJOS, 2008, p. 88).

Ainda que anteriores às técnicas de simulação computacional, as técnicas de modelagem na área de arquitetura, engenharia e urbanismo são permeadas por muitos desafios e dificuldades. Alguns programas computacionais focam na modelagem, ou seja, o arquétipo é o seu produto final. Entre eles, os mais conhecidos na área de arquitetura e urbanismo são os programas *Computer-aided Design* (CAD). Outra gama de programas compõem a geração do *Building Information Modeling* (BIM), pois compreendem a modelagem arquitetônica e todas as suas informações como o produto a ser construído.

Numa dimensão mais analítica, a simulação na área do bioclimatismo não é totalmente incorporada pelos programas utilizados pelos arquitetos e engenheiros. Com a chegada da tecnologia BIM, vê-se alguns *plug-ins* associados a essas ferramentas que passam a oferecer breves estudos, como análise da máscara de sombra por meio de dados simplificados como a latitude em relação ao Sol. No entanto, os estudos mais aprofundados de bioclimatismo desenvolvidos por meio da lógica BIM não o tornam por isso um programa de simulação ambiental. Alguns aplicativos e *plug-ins* surgem para apoiar as novas tecnologias e torná-las uma ferramenta integrada de avaliação do desempenho, mas essa realidade ainda não atinge o *workflow* dos projetistas.

2. Simulação computacional bioclimática: construindo um conceito

O uso da simulação computacional em pesquisas no ambiente construído tem se disseminado rapidamente nas últimas décadas. Isso se justifica, em parte, pelo avanço na tecnologia dos computadores – cada vez mais complexos.

A área da simulação computacional é complexa e desafiadora (BARBIRATO, 1999; IRVING, 1988). Muitas vezes, a técnica da simulação computacional existe, é aplicada em estudos de caso, mas não traz uma contribuição factível para a área de arquitetura e urbanismo (SOUZA *et al.*, 2010).

Os estudos computacionais, para serem considerados confiáveis, devem passar por um processo de certificação ou validação que, segundo Irving (1988, p. 282), tem a finalidade de “estabelecer a exatidão das soluções produzidas, de determinar os campos de valores para os quais os tipos são válidos e de adaptá-los aos domínios de aplicação”. Esse autor salienta que “o tempo dedicado à validação de grandes programas de simulação pode ultrapassar os 60% do tempo total de desenvolvimento”.

Irving (1988) aponta três técnicas de validação para esses tipos: “verificação analítica, comparação entre tipos e validação empírica”. Neste capítulo, utiliza-se a técnica de comparação entre tipos, que carrega a vantagem de minimizar os erros, uma vez que mantém muitas variáveis imutáveis, preservando a pureza dos dados, quando comparados.

A simulação computacional e a disponibilidade de interfaces aprimoradas permitem aos usuários criar tipos tridimensionais de construção, realizar uma simulação e exibir os resultados de forma a entender a tendência do comportamento de fenômenos naturais como a luz natural (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). Nesse sentido, a prática da simulação computacional torna-se uma ferramenta cada vez mais viável para análises que envolvem uma grande quantidade de variáveis.

Depois da virada do milênio, há, cada vez mais, iniciativas que visam à universalização de tecnologias computacionais associada ao acesso, cada vez maior, à rede mundial de computadores. Nesse novo cenário, pretende-se que a consulta de dados climáticos se torne rotina para profissional projetista de arquitetura ou de projeto urbano, uma postura necessária para que a produção de um espaço – arquitetônico ou urbanístico – com qualidades ambientais possibilite, segundo Romero (2010), “uma sustentabilidade progressiva”. Assim, os recursos tecnológicos disponíveis hoje devem ser, cada vez mais, empregados na tentativa de monitorar um espaço que possa ser mais sustentável ambientalmente.

O uso de ferramentas computacionais na avaliação do conforto térmico é desafiador (ARZTEGUI, 1995), porém registram-se estudos de casos em programas bastante complexos e que, ainda incipientes, contribuem significativamente para o avanço da área no Brasil (AKUTSU; VITTORINO; YOSHIMOTO, 1995). Quando fornece respostas práticas e de ordem econômica, a simulação computacional ocupa cada vez mais espaço (RAUBER *et al.*, 1993).

Ainda na década de 1990, Aroztegui (1995) desenvolve pesquisas precursoras que utilizam novos métodos para a avaliação do conforto térmico. O autor afirma que o conforto térmico dos espaços exteriores está fundamentalmente determinado pela ação combinada de variáveis complexas, de modo que ações orientadas para o monitoramento e a preservação da qualidade do ambiente são bem-vindas. Ainda de acordo com ele, “a complexidade das variáveis de conforto térmico impulsiona a criação de instrumentos de quantificação que forneçam as bases para critérios de gestão do espaço urbano”. (ARZTEGUI, 1995, p. 342).

Aroztegui (1995) dizia que

[...] era inviável modelar, experimental ou matematicamente, as variadas situações do efeito térmico produzido pelo vento sobre os pedestres em espaços urbanos, tendo em vista que os dados fornecidos nas estações meteorológicas são médias mensais que devem ser corrigidos pelos índices de rugosidade. (ARZTEGUI, 1995, p. 343).

Esse depoimento do pesquisador esclarece as dificuldades encontradas no desenvolvimento de pesquisas na área de conforto térmico e clima urbano e denuncia a fragilidade dos dados oferecidos pelas estações climatológicas. Hoje, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) oferece os valores horários, contribuindo significativamente para a precisão das pesquisas; além disso, a qualidade dos programas computacionais desenvolve, cada vez mais, algoritmos balizados por valores típicos, evitando o tratamento com valores médios que, por vezes, camuflam os resultados e agravam a qualidade dos dados pesquisados.

Por outro lado, o uso da simulação computacional passou a ser um instrumento cada vez mais presente em estudos de viabilidade e previsão de problemas, em decorrência da disponibilidade dos dados objetivos e sua maior precisão.

Em uma discussão acerca dos novos modos de modelagem computacional, como a tecnologia BIM, o presidente da *American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) discute a efetividade do uso da simulação computacional na avaliação integrada da arquitetura. Lynn (1981) garante que o processo de simulação pode gerar economia real de energia e melhorias do seu desempenho de construção quando o projeto é feito de modo integrado. Assim, deve-se investir para que se continue a desenvolver o BIM para automatizar a criação de tipos das áreas da arquitetura, da engenharia mecânica e da engenharia elétrica, para que se consiga, assim, projetos mais controlados e com a sua qualidade mensurada.

Rauber *et al.* (1993) afirma que o uso de *software* na avaliação do desempenho ambiental da arquitetura e do urbanismo tem grande espaço quando atinge a dimensão econômica, pois é possível mensurar com precisão os impactos econômicos advindos de tipos fictícios que atendam a diferentes demandas e contextos. Nesse sentido, vê-se que:

A utilização de ferramentas computacionais é especialmente importante no aspecto energético-econômico, por estimar gastos com condicionamento de ar e permitir uma otimização da edificação neste sentido. Seguindo esta tendência, vários programas de simulação de desempenho térmico de edificações foram implementados. (RAUBER *et al.*, 1993, p. 107).

Barbirato (1999) destaca que uma das dificuldades encontradas em trabalhos de simulação consiste na escassez de parâmetros de entrada e de dados físicos e meteorológicos, o que leva a estimativas ou suposições baseadas em informações disponíveis, muitas vezes, não apropriadas para a realidade local. Essa dificuldade

impede maior avanço no campo da simulação bioclimática, o qual só se verificará com a realização de maior número de investigações que digam respeito a dados climáticos para as regiões tropicais.

Souza *et al.* (2010) complementam alertando que, apesar dos diversos estudos hoje existentes sobre simulações computacionais,

[...] poucas são as ferramentas práticas disponíveis para que possam ser estabelecidas diretrizes de planejamento urbano. Este quadro se agrava ainda mais quando considerado o caso de cidades localizadas em países em desenvolvimento, para os quais frequentemente existe uma carência de dados básicos para este fim. (SOUZA *et al.*, 2010, p. 10).

Nesse sentido, visualiza-se uma lacuna na área das simulações computacionais na avaliação do desempenho do ambiente construído, em que mais pesquisas devem dedicar esforços. Sendo assim, todo o campo do ambiente construído pode ser beneficiado com a contribuição das ferramentas computacionais que passaram a servir como subsídios técnicos quando o seu uso promove a qualidade ambiental urbana no contexto climático das cidades. Nesse sentido, as simulações que contribuem com o maior entendimento dos fenômenos ambientais e que visam avaliar o desempenho do ambiente construído podem ser denominadas como *simulações bioclimáticas*.

3. Proposta de caracterização climática para o Distrito Federal

Estudos climáticos que visam uma caracterização climática brasileira são sempre genéricos ao descrever o clima do DF. Na Norma Brasileira de número 15.220, em sua parte 3, a ABNT (2005) apresenta o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ZBB), apresentando Brasília como uma cidade pertencente à Zona Bioclimática (ZB) 4, com presença de inverno e verão. Em estudos mais recentes, Roriz (2012) apresenta uma proposta de revisão deste zoneamento. O pesquisador

apresenta dados de temperatura média anual de 21,39 °C para Brasília, e de 21,59 °C, para Planaltina, indicando uma leve diferença entre os respectivos núcleos urbanos. No entanto, o estudo apresenta uma proposta de zoneamento que mantém o DF inserido numa única Zona Bioclimática (RORIZ, 2012), não discute e não apresenta diferenças entre as Regiões Administrativas (RAs) do DF.

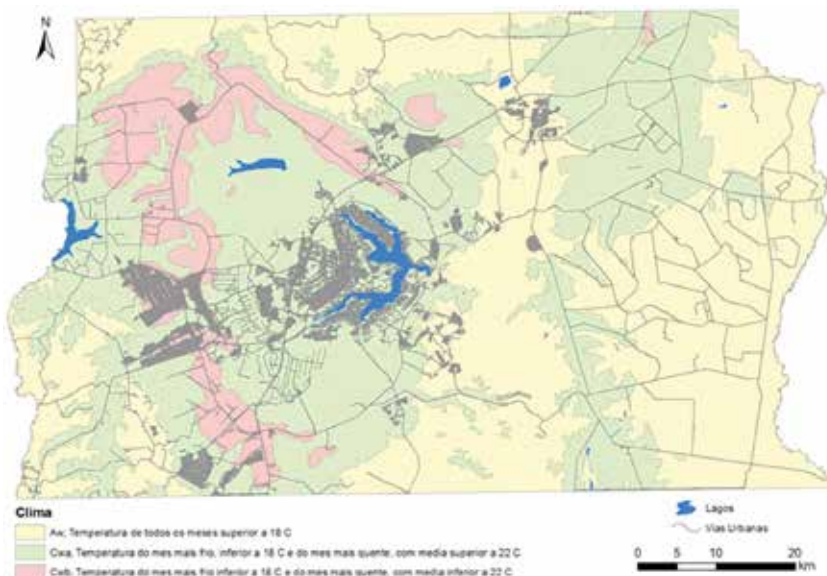
Diante da compreensão de que território do DF é polinucleado de centros urbanos, com RAs que se localizam do extremo norte do DF, como Sobradinho e Planaltina, até o extremo sul, como Santa Maria e São Sebastião, ou do extremo leste, como o Paranoá, até o extremo oeste, como Ceilândia e Brazlândia, busca-se outra forma de caracterizar climaticamente este território.

Para uma compreensão espacial mais aproximada, apresentam-se os mapas geomorfológicos e climáticos do DF. O mapa geomorfológico foi desenvolvido pela Codeplan (1986) e trata-se de um entendimento topográfico e suas relações de espacialidade territorial do DF. Como é sabido, há uma grande relação entre a geomorfologia e o comportamento do clima. O mapa climático, por sua vez, é um estudo original que segue a metodologia de Köppen-Geiger (1948) e é utilizado como parâmetro de classificação dos climas na escala topoclimática.

As RAs Planaltina (ao norte do DF) e cidade de Luziânia (ao sul e já no estado de Goiás) possuem estações meteorológicas que registram seus valores climáticos e podem indicar um desempenho ambiental diferente de Brasília, onde está localizada a estação meteorológica oficial do DF. Essas diferenças ficam evidentes ao se analisar o mapa geomorfológico proposto pela Codeplan (1986) (Figura 1).

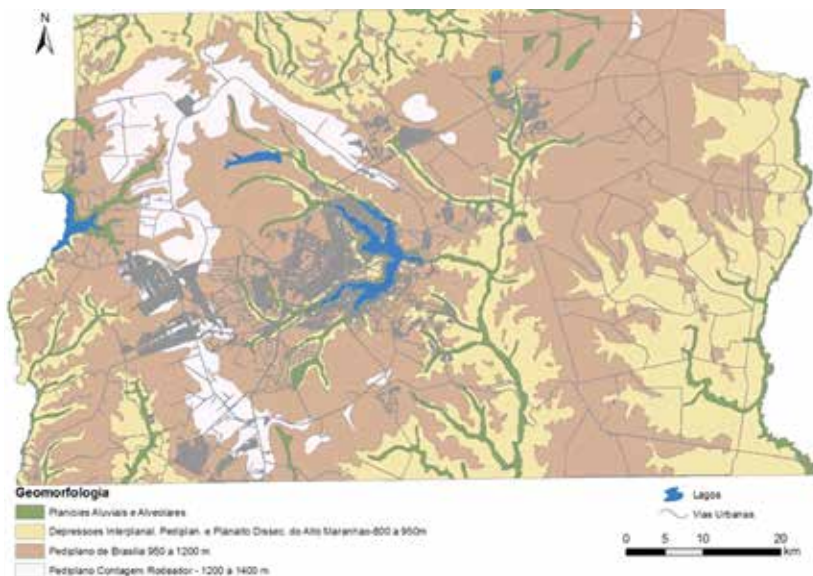
É possível discutir uma redefinição para a caracterização climática do DF e da cidade de Brasília. Para isso, é fundamental um conhecimento prévio das características ambientais da região de estudo. A partir dos problemas ambientais derivados e ligados ao clima urbano, como o fenômeno das ilhas de calor sinalizadas por Oke (1987), algumas pesquisas já apontam para a necessidade de elaboração de mapas de zoneamentos climáticos (ALVAREZ *et al.*, 2014; CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014).

Figura 1: Mapa geomorfológico do DF



Fonte: CODEPLAN (1986).

Figura 2: Mapa climatológico do DF



Fonte: CODEPLAN (1986).

Em um dos estudos normatizados, apresenta-se o ZBB. De acordo com o ZBB, Brasília e todo o DF estão inseridos na ZB 4, a qual se refere às características ainda marcantes de verão (período chuvoso) e inverno (seco), comportamento climático típico do clima tropical de altitude.

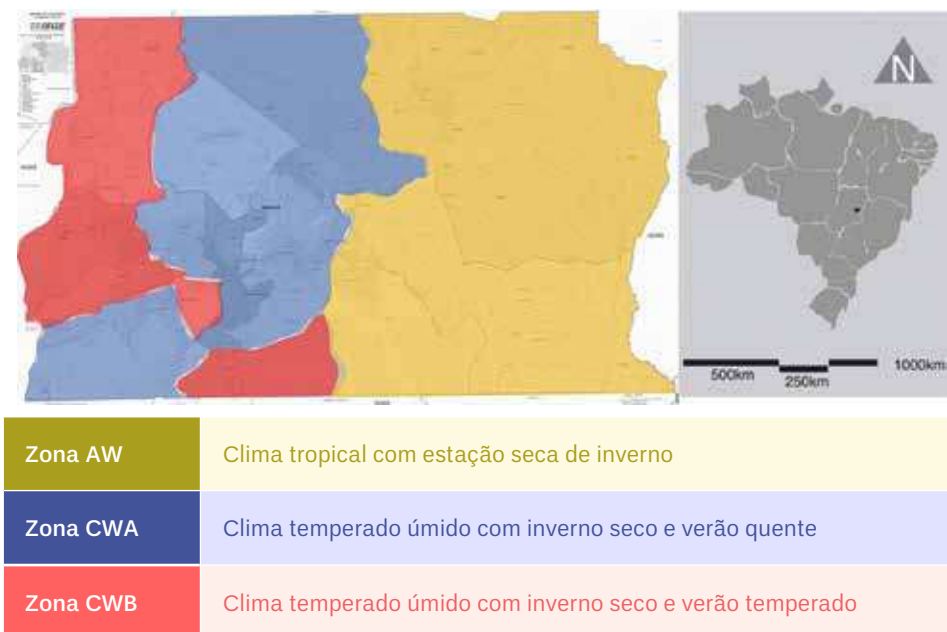
Amplia-se a caracterização climática de Brasília para as demais cidades do DF pela carência de estudos mais específicos e precisos. Nesse sentido, o atlas da Codeplan (1986) apresenta uma análise mais pormenorizada do cenário bioclimático do DF (Figura 1 e Figura 2). Os mapas têm validade, uma vez que se trata da dimensão geomorfológica cuja dinâmica temporal não se altera em curto espaço de tempo.

De acordo com a classificação de Köppen (1948), o DF enquadra-se no tipo climático Aw – clima tropical com estação seca no inverno. Discute-se, no entanto, que, no território do DF, há heterogeneidade climática que não justifica o uso de uma única categoria climática para a sua representação. Nesse sentido, o mapa climatológico, associado ao mapa geomorfológico, tornam marcantes três agrupamentos territoriais que representam três tipologias climáticas com nuances diferentes: zonas Aw, Cwa e Cwb, identificadas pelas cores amarela, verde e vermelha, respectivamente (Figura 3).

Analisando-se os mapas, vê-se que o perfil climático do DF tem forte correlação com a topografia e o relevo da região. No estudo, são identificados três tipos climáticos segundo a metodologia de Köppen (1948): Aw, Cwa e Cwb. Associando essas imagens à divisão política do DF, em que o mesmo é subdividido em regiões administrativas, percebe-se que os tipos climáticos conformam três diferentes áreas bioclimáticas distintas.

Tomando como base os estudos de Köppen (1948) e a revisão sistematizada por Roriz (2012) do ZBB para a região de Brasília, Silva (2013) apresenta uma proposta de Zoneamento Mesoclimático (ZM) para o DF baseada nos respectivos estudos supracitados, além da compreensão das normais climatológicas de Brasília (Figura 3).

Figura 3: Tipos climáticos das poligonais¹ Distrito Federal a partir da divisão política



Fonte: Silva *et al.* (2016, p. 285).

Destaca-se que, a partir da identificação das três subcategorias climáticas, de escala mesoclimática, os grupos de cidades podem ter a sua definição climática de forma mais precisa, com diretrizes mais específicas, voltadas para as demandas de proteção solar, acesso aos ventos, etc., o que exigirá, por sua vez, prescrições urbanísticas diferenciadas. Dessa forma, torna-se possível orientar a legislação urbanística mais focada no comportamento climático de cada região do DF e, assim, traçar diretrizes mais específicas para as diversas cidades ou sub-regiões do DF.

Para a distribuição das RAs, conforme o seu mesoclima específico, foi respeitado o limite da poligonal da RA, o que, muitas vezes, não permite uma leitura imediata com os mapas climatológicos e geomorfológicos que serviram de base para essa

¹ As poligonais do mapa referem-se ao agrupamento de RAs para fins documentais. Mais de uma RA compõe uma poligonal do mapa. Logo, as 31 RAs estão incluídas nas 18 poligonais indicadas.

separação. Sendo assim, Silva (2013) aponta que se justifica o desajuste entre esses mapas em virtude do peso legal de se estabelecer prescrições urbanísticas específicas.

Elaborou-se uma caracterização das três zonas mesoclimáticas para o DF por meio dos dados das normais climatológicas de Brasília. Para a nomenclatura das três subzonas, 4A, 4B e 4C – com os respectivos perfis mesoclimáticos –, foi utilizada a classificação da ZB para Brasília, que, segundo a NBR 15.220, pertence à ZB 4 (Quadro 1).

Quadro 1: Quadro das Mesozoneas Bioclimáticas do DF

Mesozonea Bioclimática	Perfil Mesoclimático
4A	Segundo ZBB e sua proposta de revisão apresentado por Roriz (2012), Planaltina está localizado na mesma zona da cidade de Brasília. Porém, segundo Köppen, o clima da região leste do DF tem um comportamento mesoclimático diferente da porção central e sudoeste do DF. Nesta porção 4A, de clima classificado como tropical, todas as temperaturas do ano são superiores a 18°C. O período da seca coincide com o período de inverno. Logo, tem o período de verão mais marcante e exige diretrizes mais voltadas para os períodos mais quentes.
4B	O ZBB utiliza os dados oficiais de Brasília, a partir da estação climatológica localizada no Plano Piloto (Sudoeste); logo, a zona 4B representa o clima tropical de altitude de Brasília. Köppen classifica este mesoclima como temperado úmido com inverno seco e verão quente, com médias mensais que superam 22°C. O clima temperado desta porção central do DF significa que o clima tem grandes amplitudes térmicas.
4C	O ZBB não possui dados oficiais desta porção sudoeste do DF, o que, a princípio, recebe a mesma classificação climática de Brasília. Köppen, no entanto, classifica esse clima como temperado no verão e inverno seco. As médias mensais não superam os 22°C, portanto, é a zona mesoclimática menos quente do DF. A partir dos dados oficiais do INMET, a ausência de um verão com temperaturas altas mais marcantes nesta zona permite que sejam orientadas diretrizes para evitar o desconforto por frio, ou seja, desenvolver estratégias que promovam o aquecimento solar passivo nos meses de inverno.

Fonte: Elaboração dos autores (2016).

O contexto climático do DF abordado neste tópico enquanto aporte físico, concreto, permitiu uma abordagem de um clima com dados precisos, o que tornou a pesquisa mais confiável e os dados das simulações computacionais mais palpáveis. O processo de modelagem e de simulação computacional foram desenvolvidos para o clima de Brasília (4B) por meio do *software* que modela o microclima urbano – o ENVI-met –, que será objeto do próximo tópico.

4. ENVI-met: simulação microclimática do clima urbano

De modo geral, uma característica observada no âmbito dos programas analíticos do desempenho ambiental utilizados hoje é o foco na dimensão energética. Muitos dos *softwares* disponíveis são desenvolvidos e regidos pelas demandas da engenharia mecânica, estando baseados em algoritmos matemáticos focados nos sistemas prediais e no edifício, e não na ciência urbana, em que deve ocorrer uma compreensão do comportamento sistêmico dos fenômenos ambientais. Assim, dentro de uma visão prospectiva, foi possível observar que o desenvolvimento de ferramentas de simulação tem sido de grande auxílio no entendimento dos fenômenos que se referem ao comportamento térmico do espaço construído e sua relação, em alguns programas, com o clima urbano. Este é o caso do programa ENVI-met.

O programa ENVI-met foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa chefiado pelo professor Michael Bruse (2007), que considera a abordagem climática urbana em uma microescala própria do entendimento do urbanista. O programa tem quatro perfis para uso (básico, estudante, pesquisador e empresarial); o perfil básico é gratuito e permite o desenvolvimento de simulações sem exigir a aquisição da licença comercial.

O programa foi submetido a processos de validação no centro de pesquisa da Universidade de Mainz (Alemanha) e em pesquisas de campo na Universidade de Brasília (UnB) (CASTELO BRANCO, 2009; SILVA, 2013; ROMERO, 2010). O ENVI-met oferece diversos parâmetros ambientais ligados ao clima urbano, pois opera por meio de uma plataforma tridimensional que avalia as interações entre

a vegetação, o solo e o ar. Considera, entre diversos parâmetros, a temperatura, a umidade, a radiação e a ventilação. O tipo de cálculo inclui: a radiação de onda curta e longa, o fluxo de sombreamento, a reflexão e a irradiação do edifício e a vegetação. As relações e inter-relações entre esses diversos parâmetros demonstram como o *software* é capaz e complexo.

Quanto ao funcionamento básico do programa ENVI-met, o diagnóstico do grau de conforto térmico é obtido por meio de cálculos matemáticos facilitados pela simulação computacional.

No que se refere às superfícies construídas, o programa considera as projeções de sombras, as reflexões e a reirradiação de sistemas edificados e a sua relação com a transpiração da vegetação, a evaporação e o fluxo de calor sensível da vegetação.

As simulações computacionais expostas neste capítulo utilizam a plataforma do programa ENVI-met,² presente nas pesquisas de Hirashima (2010), Werneck (2018), Silva (2009), Castelo Branco (2009), Souza *et al.* (2010) e Silva (2013). Um dos primeiros exemplos marcantes da eficácia do tipo de cálculo desenvolvido pelo programa ENVI-met está na pesquisa de Han, Mun e Huh (2007), quando investigaram as mudanças do microclima e a redução na escala urbana da carga de refrigeração resultantes do córrego Cheonggye, em Seul. O referido corpo de água restaurado resgatou a qualidade ambiental para a região, e o procedimento de revitalização dessa área contou com simulações computacionais do ENVI-met.

Embora o programa trabalhe com a interface tridimensional do clima situada em uma dimensão geográfica, os tipos desenvolvidos na análise são objetos projetados na microescala urbana, objeto de trabalho do arquiteto e urbanista. Dessa maneira, é fundamental compreender a dimensão bioclimática da configuração do espaço construído. Para isso, pode-se avaliar o impacto do microclima do espaço aberto no desenvolvimento das atividades humanas, visto que são inúmeras as interferências microclimáticas no meio urbano, como, por exemplo, a distribuição

² O *software* ENVI-met foi desenvolvido por Michael Bruse, Universidade de Bochum, Alemanha. Mais informações sobre esse programa, vide tópico 5 do Capítulo 2.

do tráfego, que pode tornar o impacto do microclima muito maior e mais visível. A conformação do espaço aberto é capaz de criar diferentes microclimas, dependendo do seu arranjo configuracional. Desse modo, investiga-se qual arranjo seria capaz de contribuir para, nas palavras de Bruse (2007), obter um “clima otimizado”.

O ENVI-met permite a geração de inúmeros tipos com agilidade, além de apresentar resultados com satisfatória precisão de cálculos. Outra vantagem do ENVI-met é a possibilidade de gerar resultados espacializados para diversas horas do dia; são mapas gerados pelo *plug-in* Leonardo que permitem a criação de mapas com legendas autoexplicativas e a extração de dados tanto no plano horizontal (x-y) quanto no plano vertical (x-z) ou (y-z). A plataforma computacional ENVI-met foi escolhida pela simplicidade da execução do processo de modelagem. O *software* também foi selecionado em outros estudos precursores no DF (CASTELO BRANCO, 2009; WERNECK, 2018).

4.1 Critérios e parâmetros do ENVI-met

Requisitos mínimos para a simulação bioclimática urbana participam da criação do arquivo de configuração climática exigido pelo programa ENVI-met, além da definição dos horários de simulação organizados neste tópico.

Os horários definidos para a simulação buscaram abranger a maior parte do dia: 6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h, tendo sido registradas as simulações para cada 3h em virtude de orientação técnica da Organização de Meteorologia Mundial (OMM). Em um segundo momento, um horário para cada turno do dia foi selecionado para uma análise pormenorizada.

Antes do início do processo de simulação, são marcados os parâmetros a serem avaliados. Para essas simulações, foi selecionado exclusivamente o índice PMV-value, parâmetro que já é oferecido pelo programa ENVI-met como uma das opções de resultados, ou *output*. A partir disso, o programa utiliza algoritmo de cálculo segundo a fórmula de Fanger para o PMV, parâmetro adotado para a

avaliação do grau de conforto térmico. Os dados utilizados nas simulações de PMV estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Configuração básica para o índice PMV

Configuração PMV	Dados
Configuração de caminhada do pedestre	0,3 m/s
Energia e metabolismo do pedestre	116
Índice de percentual de vestimenta	0,5

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

A configuração climática para a cidade de Brasília a ser utilizada no programa foi calibrada por intermédio dos valores pesquisados por Castelo Branco (2009), validados por pesquisa de campo realizada pela equipe do Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e Urbanismo (LaSUS), em 2009, durante o Estudo de Impacto de Vizinhança da Região do Gama (SILVA, 2009; ROMERO, 2010).

Tabela 2: Configuração climática básica do programa ENVI-met (3.0)

Dados	Época seca	Época úmida
Dia típico	08.09.2008	13.01.2009
Horário de início de simulação	6 h	6 h
Velocidade do vento a 10 m (m/s)	1,4	1,2
Direção do vento (0:N;90:E.180:S.270:W)	90°	315°
Rugosidade da superfície de referência	1	1
Temperatura atmosférica inicial (K)	311	309
Umidade específica a 2.500 m (gWater/Kg air)	5,05	9,66
Umidade relativa a 2,0 (%)	17	61

Fonte: Castelo Branco (2009, p. 46).

Os dados que alimentam a configuração climática do programa são pesquisados na estação climatológica de referência da cidade analisada, no caso, de Brasília. Em caso de indisponibilidade dessas informações, são utilizados dados oficiais disponibilizados nas estações dos aeroportos, neste caso, do Aeroporto de Brasília. Ressalta-se que os dados apresentados na tabela como conformadores da configuração climática de Brasília foram avaliados em várias situações durante uma ampla pesquisa desenvolvida no âmbito do LaSUS (ROMERO, 2010). Dessa forma, passou-se a ter alguma confiabilidade dos dados obtidos por Castelo Branco (2009) (Tabela 2).

Os dados de Castelo Branco foram atualizados por Werneck (2018) para o uso da versão 4.0 do programa ENVI-met (Tabela 3).

Tabela 3: Configuração climática básica do programa ENVI-met (versão 4.0)

(continua)

Dados	Época seca
Dia típico	Setembro
Horário de início de simulação	06 h
Velocidade do vento a 10 m (m/s)	2,42
Direção do vento (0:N;90:E.180:S.270:W)	114° (Média do dia – INMET)
Rugosidade da superfície de referência	0,01
Umidade específica a 2.500 m (gWater/Kg air)	9,11
Umidade relativa a 2,0 m (%) Mínima (Hora)	44 %% (16 h)
Umidade relativa a 2,0 m (%) Máxima (Hora)	87 % (02 h)
Temperatura do Ar (oC) Mínima (Hora)	19° C (06 h)
Temperatura do Ar (oC) Máxima (Hora)	27,2° C (15 h)
Temperatura Atmosférica Inicial (K)	293 K

Tabela 3: Configuração climática básica do programa ENVI-met (versão 4.0)

(conclusão)

Dados	Época seca
Umidade relativa – camada superficial (0-20 cm)	50%
Umidade relativa – camada abaixo de 50 cm	60%
Nebulosidade (oitavas) baixas/médias/altas	4,00/0/0

Fonte: Werneck (2018, p. 82).

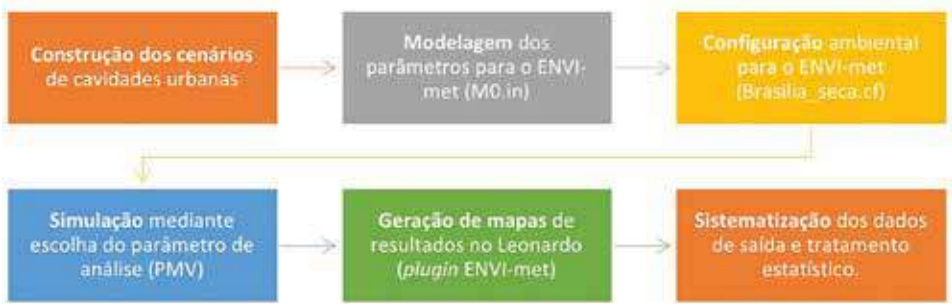
Com a finalidade de destacar os horários cujas mudanças de microclima sejam mais sensíveis, percebeu-se que o horário inicial da manhã (9h) e do final da tarde (18h) mantiveram um alto grau de variação em relação aos diferentes aspectos levantados. Assim, pesquisas semelhantes desenvolvidas na área do microclima urbano endossam a definição de utilizar o horário das 18h da tarde. Ballester-Olmos (2010) afirma que os contrastes térmicos são mais sensíveis no fim da tarde, o que pode ser apoiado na pesquisa mencionada desenvolvida pelo LaSUS, quando os horários das 18h foram aqueles cujos tipos destacaram mais claramente as áreas que elevaram o grau de desconforto na maioria dos tipos analisados. Após configuração climática do *software*, é necessário apresentar, de modo simplificado, os procedimentos metodológicos.

4.2 Procedimentos metodológicos da simulação com o ENVI-met

O fluxograma a seguir descreve os primeiros passos metodológicos que conduziram a etapa de avaliação computacional da pesquisa, ou seja, o percurso pelo desenvolvimento de tipos de cavidades urbanas, pelo posterior processo de modelagem 3D na interface no ENVI-met, pela configuração climática para a época seca de Brasília, considerando a inserção das especificações de simulação com o parâmetro PMV a ser avaliado, pela extração dos dados simulados, pela organização de

quadros para simplificar a sua interpretação, e, por fim, pela elaboração de planilhas dos dados simulados para, após tratamento estatístico, gerar com mais qualidade os resultados da pesquisa (Figura 4).

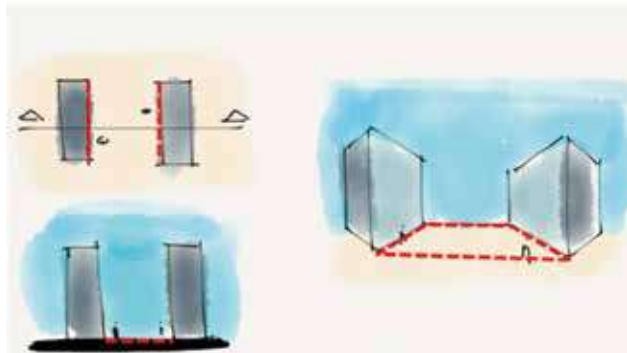
Figura 4: Fluxograma de procedimentos metodológicos para a simulação



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Os cenários criados são hipotéticos, e os números da sua configuração urbana, representados neste capítulo pela relação largura-altura da rua em relação aos edifícios que a limitam, são conhecidos como W/H , ou na literatura internacional como H/W . Os valores de W/H foram calculados utilizando-se números próximos a valores de configurações urbanas comuns em cenários urbanos, onde a superfície do solo é o que representa a cavidade urbana (Figura 5).

Figura 5: Desenho esquemático de exemplo de cavidade urbana



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Em um segundo momento, foram extraídos os valores de alturas a partir das alturas regulares de edifícios (por exemplo, um pavimento, dois pavimentos, três pavimentos) e larguras comuns de ruas (por exemplo, uma faixa de rolamento, duas faixas de rolamento, três faixas de rolamento).

Para controlar a área da análise em questão, foi definida uma área quadrada de 100 m^2 , de modo que a dimensão do comprimento da rua também foi definida como 10 m. Com base nessa rua hipotética, foram definidas as diferentes alturas das edificações.

Uma caixa viária fictícia de 10 m de largura no plano da base, que representa a variável W na fórmula do W/H , serviu como base para que fossem calculados diferentes valores para a altura do conjunto edificado, de forma que conformaria a cavidade urbana.

Na pesquisa, em que os tipos representam cenários urbanos corriqueiros, foram criados 21 cenários representativos. O tipo 0 (também chamado de M_0) parte da menor relação analisada: 0,1, finalizando no tipo 20 (M_{20}), cuja relação é a maior analisada: 10. Acredita-se que, com os 21 cenários, grande parte das relações existentes entre altura edificada e recuo entre os edifícios esteja representada. Nesse sentido, tem-se a análise do desempenho do ambiente urbano configurado pelas cavidades urbanas.

5. Desempenho térmico das cavidades urbanas

São indicados os valores de PMV organizados por materiais, por horário e por orientação. Dessa forma, é possível obter o desempenho isolado das cavidades de melhor desempenho e associar o grau de conforto térmico ao seu material de configuração: árvore, grama, pedra, solo natural, asfalto ou concreto.

5.1 Orientação leste-oeste

É possível concluir que para os tipos orientados para leste-oeste, no horário da manhã (9h), apenas os tipos configurados com árvore ou grama obtiveram valores de PMV menores que 2,0. A partir do M_{14} , os valores de PMV atingem os valores

mais baixos, iguais a 1,25. Outro tipo que obteve desempenho regular é o M01. No horário da manhã, ainda é possível concluir que os materiais concreto e pedra obtiveram os piores desempenhos térmicos (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (9h)

(continua)

Modelos (L)	Gramma	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	2,75	2,75	2,75	1,75	2,25	2,25
M1	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M2	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M3	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M4	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M5	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M6	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M7	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M8	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M9	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M10	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M11	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M12	1,75	1,75	1,75	2,75	2,75	2,75
M13	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M14	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Tabela 4: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (9h)

(conclusão)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M15	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M16	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M17	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M18	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M19	1,75	1,75	2,25	2,75	2,75	2,75
M20	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

No horário da tarde (18h), há uma grande uniformidade de desempenho térmico, quando os valores máximos de PMV causam desconforto térmico. Apenas os tipos configurados com árvore e grama possuem valores de PMV abaixo dos valores extremos, ou seja, tipos acima do M14. O tipo M1 também obteve, isoladamente, valor de PMV inferior ao valor máximo, ou seja, 2,25 (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (18h)

(continua)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M1	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M2	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75

Tabela 5: Resultados de PMV para tipos orientados para leste (18h)

(conclusão)

Modelos (L)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M3	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M4	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M5	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M6	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M7	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M8	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M9	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M10	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M11	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M12	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M13	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M14	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M15	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M16	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M17	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M18	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M19	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M20	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

5.2 Orientação norte-sul

Os tipos orientados para norte-sul, no horário da manhã (9h), possuem resultados mais variados. Vê-se também que os tipos configurados como árvore ou grama obtiveram valores de PMV menores que 1,5. No entanto, também é notório que tipos inferiores a M7 são os com melhor desempenho em todas as configurações.

Ainda no horário da manhã (9h), o tipo M01 destaca-se dos demais, pois possui valores que denotam uma leve sensação de frio (PMV = -0,25). Os tipos M02, M3, M4 e M5 (especialmente) possuem valores de PMV inferiores a 1,0, que implica uma sensação de leve calor e, portanto, considerada aceitável.

Os materiais concreto, asfalto e pedra acumularam os maiores valores de PMV e, por isso, conformam situações de maior desconforto térmico. Entre todos, os tipos a partir do M07 possuem concreto e asfalto já em condição de desconforto extremo (valor de PMV superior a 2,5) (Tabela 6).

Tabela 6: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (9h)

(continua)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
M1	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25	-0,25
M2	0,25	0,25	0,25	0,75	0,75	0,75
M3	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
M4	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
M5	0,25	0,25	0,25	0,75	0,25	0,75
M6	0,75	2,25	0,75	0,75	0,75	0,75
M7	2,25	1,75	0,75	0,75	2,75	2,75

Tabela 6: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (9h)

(conclusão)

Modelos (N)	Gramma	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M8	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M9	2,25	2,25	0,75	2,75	2,75	2,75
M10	2,25	2,25	0,75	2,75	2,75	2,75
M11	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M12	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M13	2,25	1,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M14	1,25	2,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M15	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M16	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M17	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M18	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75
M19	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M20	1,25	1,25	1,75	2,25	2,25	1,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Observando o horário da tarde (18h), é possível detectar que os tipos de M06 a M14 possuem desempenho regular. Os tipos de menor desempenho térmico são os tipos de M01 a M05 e os tipos superiores a M15. Visualizam-se, portanto, três patamares de cavidades urbanas (Tabela 7).

Tabela 7: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (18h)

(continua)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M0	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
M1	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M2	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M3	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M4	2,25	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75
M5	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M6	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M7	1,75	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25
M8	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M9	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M10	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M11	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M12	1,75	1,75	1,75	2,25	2,25	2,25
M13	1,75	1,25	1,75	2,25	2,25	2,25
M14	2,25	2,75	1,25	1,75	1,75	1,75
M15	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M16	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75
M17	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M18	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Tabela 7: Resultados de PMV para tipos orientados a norte (18h)

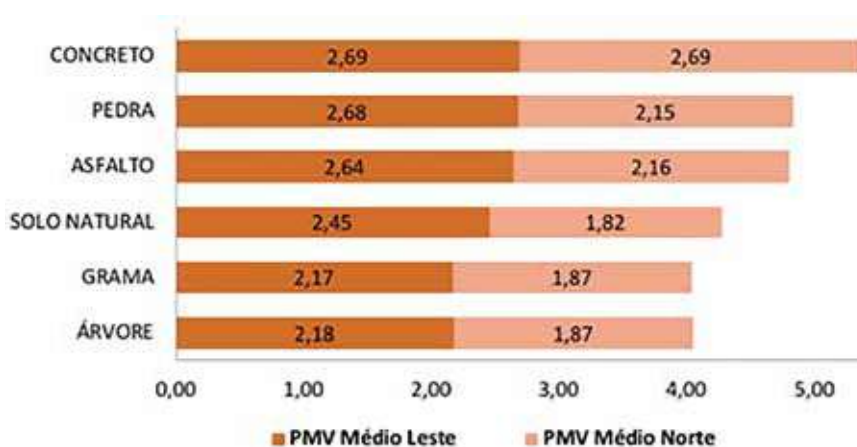
(conclusão)

Modelos (N)	Grama	Árvore	Solo natural	Pedra	Concreto	Asfalto
M19	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75
M20	2,25	2,25	2,75	2,75	2,75	2,75

Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Apresentam-se no Gráfico 2 as contribuições de cada material urbano para o índice PMV de conforto térmico. Os resultados mostram que os materiais impermeáveis (asfalto, concreto e pedra) são os maiores responsáveis pelo aumento do valor de PMV e, portanto, pela sensação de desconforto. Em contrapartida, os materiais permeáveis (árvore, grama e solo natural) são os que menos contribuem para o desconforto térmico. A contribuição de cada material para o índice PMV pode ainda ser obtida por meio dos valores médios de PMV para os cenários simulados para as horas de referência 9h e 18h (Gráfico 1).

Gráfico 1: Contribuição dos materiais urbanos para o índice PMV



Fonte: Elaboração dos autores (2013).

Analisando-se os materiais permeáveis representados pelos modelos com árvores, grama e solo natural contribuem para o conforto térmico, assumindo melhor efeito nos tipos de orientação norte-sul. Nos tipos de orientação leste-oeste, esses materiais conferem um melhor desempenho térmico a quase todos os tipos, especialmente do tipo M01 ao tipo M14.

5.3 Resultados e categorização das cavidades urbanas

Este tópico desenvolve a análise final das cavidades urbanas. Durante a análise, conceitua-se e cria-se categorias de cavidades quanto ao seu desempenho térmico. Para isso, foi feita uma análise de variância aliada ao teste de Tukey por meio do *software* PAST (Versão 3.19). Os valores do índice PMV foram extraídos, em todas as simulações, das seis configurações de elementos de revestimento do solo. De acordo com ele, é possível concluir quais dos materiais avaliados apresentam valores de PMV com variância significativa, ou seja, que represente uma categoria de cavidade urbana.

Por meio dos resultados da análise de variância, é possível selecionar os cenários que, submetidos às mesmas condições climáticas, possuem resultados mais estáveis e, logo, confiáveis, o que permite uma análise de dados mais precisa.

Os altos valores de PMV (acima de 1,5) no horário das 18h mostram que os edifícios bloqueiam o vento leste predominante na região de Brasília, o qual é fundamental para favorecer as trocas térmicas do solo com o ar. Esse horário representa o pico de desconforto durante o dia, e essa morfologia impede que a superfície urbana perca calor com a chegada das brisas noturnas a partir desse horário.

Os altos valores de PMV no horário noturno mostram que edifícios de maior gabarito podem bloquear o vento leste, pois essa configuração impede que a superfície urbana perca calor com a chegada das brisas noturnas.

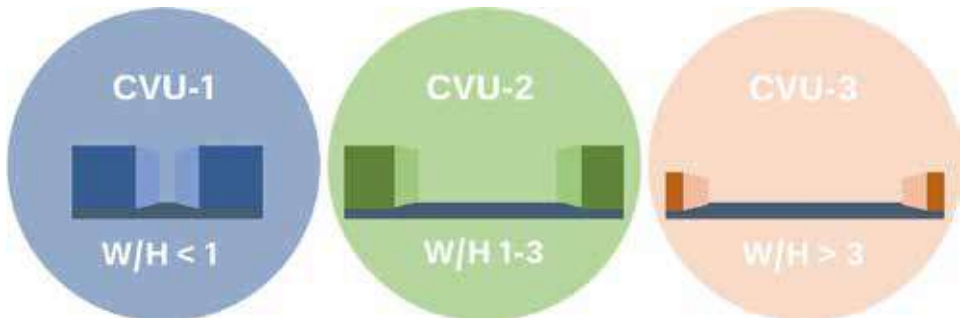
É possível concluir que, para os tipos orientados para leste-oeste, no horário da manhã (9h), apenas os tipos configurados como permeáveis obtiveram uma

situação de conforto mais adequado. No horário da tarde (18h), há uma grande uniformidade de desempenho térmico.

Na análise dos resultados dos níveis de PMV, entre os 21 tipos analisados, não foi identificada uma diferença significativa entre os materiais componentes do cenário urbano; no entanto, calculou-se uma correlação entre a relação W/h de todos os modelos e o nível de conforto atingido. Por isso, partiu-se para a definição de categorias de tipos, uma vez que a observação dos valores de PMV permitiu uma compreensão das categorias de cavidades urbanas. Sendo assim, os dados analisados foram submetidos à análise de variância.

Por fim, chegou-se à definição de três categorias de cavidades urbanas com base na relação W/h e no seu desempenho climático (Figura 6):

Figura 6: Categorias de cavidades urbanas



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Os tipos que representam as cavidades com W/h superiores a 7 não possuem o desempenho climático previsível como o das demais cavidades, logo, compreende-se que o microclima de configurações com relação W/h superiores a 7 não são conformados por essa configuração urbana. Sendo assim, chega-se ao conceito de cavidade urbana: significa a conformação urbana cuja relação W/h tem valores entre 0 e 7, uma vez que valores acima de 7 não possuem o seu microclima condicionado pela configuração urbana da microescala, mas do mesoclima ou do macroclima.

6. Considerações finais

A compreensão do ambiente construído passa a ter, com o uso das tecnologias, outro nível de aprofundamento. Aliado a isso, a previsão de problemas de ordem ambiental por meio de simulações computacionais pode apontar importantes soluções com baixo custo operacional. Especificamente no caso no ENVI-met, pode-se afirmar o baixo custo operacional, uma vez que se trata de um *freeware*.

A experiência no uso de simulações computacionais permitiu que fosse recortado um grande número de tipos para que elas fossem suficientes para a obtenção de resultados palpáveis. Essas simulações realizadas puderam oferecer um resultado útil que servirá de subsídio para uma planilha de análise de cavidades urbanas.

O uso da ferramenta computacional mostrou-se como uma estratégia útil, pois possibilitou a ampla análise de 252 cenários diferentes. Com essa avaliação, iniciou-se o preenchimento de planilhas do Excel, nas quais foi possível tabular e analisar estatisticamente os valores calculados pelas simulações de modo mais rápido e organizado.

Para a confiabilidade dos dados, no entanto, é essencial que a fonte deles seja segura e de uma estação climatológica mais próxima possível da área de estudo. Assim, reafirma-se que o uso de ferramentas computacionais na avaliação ambiental pode auxiliar na tomada de decisões em estudos prognósticos e na construção de um espaço mais qualificado ambientalmente. Dessa forma, pesquisas específicas que consigam oferecer propostas objetivas que amenizem o impacto ambiental causado pelo processo de urbanização são muito válidas.

Por outro lado, conforme apontado neste capítulo, há a limitação de acesso ao banco de dados do INMET e a do contexto climático do DF, que exige uma abordagem restrita.

A apresentação dos temas climatologia e conforto térmico baseada em um ponto de vista urbanístico foi destaque em muitas pesquisas voltadas para as

alterações que as atividades urbanas geraram no espaço construído. Nesse sentido, este capítulo se posiciona como um instrumento didático para que arquitetos e urbanistas compreendam melhor a dinâmica do clima urbano, sobretudo daquele que se processa na microescala urbana, e passem a assumir o papel de construtores de um microclima urbano mais confortável, visto que, a cada dia, são disponibilizados mais instrumentos de controle da qualidade ambiental. Observa-se que o programa ENVI-met concentra a modelagem e a simulação, facilitando o processo de trabalho e evitando o uso de outra ferramenta. Logo, o próprio programa é o responsável pela geração de todos os dados modelados e simulados; outra vantagem dele está na simplificação no processo de modelagem e na gratuidade para o desenvolvimento das simulações.

Para facilitar a interpretação dos resultados de conforto térmico, optou-se pelo uso do índice PMV de Fanger. O uso desse índice mostrou-se de fácil compreensão, pois trabalha com o conceito de *equilíbrio térmico*. Os valores foram sempre de interpretação direta e, ao serem utilizados na plataforma do programa ENVI-met, poupou-se um conjunto de operações e retrabalho, como não ocorreria se fosse empregado outro índice para os dados coletados em campo. Essa definição do índice PMV e da utilização do programa ENVI-met buscou evitar erros advindos da falta de controle de informações, caso fossem manipuladas outras ferramentas.

Com os dados obtidos pelas simulações de conforto térmico realizadas nas cavidades urbanas modeladas, obteve-se um banco de informações técnicas contendo o desempenho térmico de diferentes morfologias urbanas, as quais, por sua vez, eram compostas por diferentes materiais urbanos, todos submetidos ao contexto climático do DF. Dessa forma, analisa-se o desempenho de diferentes frações urbanas quanto ao seu nível de conforto térmico, para que, em um segundo momento, possa se estabelecer diretrizes específicas comprometidas com a construção de um espaço urbano com mais qualidade ambiental do ponto de vista do conforto térmico.

Por fim, com base na relação W/h e no seu desempenho climático, as cavidades foram classificadas em três categorias, com as suas respectivas recomendações para o contexto climático de Brasília:

- CVU-1: de W/h entre 0 e 1: não são recomendadas para o clima de Brasília, pois geram acúmulo de calor (exceção: ZB 4C, ausência de verão mais rigoroso). São consideradas cavidades urbanas desconfortáveis termicamente.
- CVU-2: de W/h 1 a 3: são recomendadas, desde que a base da cavidade conformada com solo seja permeável. São consideradas, portanto, cavidades confortáveis termicamente.
- CVU-3: de W/h entre 3 e 7: são indiferentes à morfologia urbana, portanto, podem ser recomendadas independentemente do tipo de solo da base, mas não garantem o conforto térmico.

Para trabalhos futuros, há a proposta da elaboração de uma ferramenta de análise do microclima do ambiente urbano em sua realidade mesoclimática e na compreensão da sazonalidade do clima, o que pode ser uma limitação dos experimentos desenvolvidos pelo ENVI-met por conta do seu único arquivo climático.

O acesso aos dados de análise do desempenho do ambiente urbano auxilia, didaticamente, o projetista do espaço urbano. Com base na morfologia de sua fração urbana projetada ou analisada e na definição de materiais de revestimento das superfícies urbanizadas, ele pode detectar qual o grau de conforto térmico proveniente de sua proposta urbanística, após tê-lo submetido aos diferentes períodos climáticos do DF.

No âmbito das legislações locais, uma maneira de contribuir é buscando métodos de avaliação aplicáveis na escala intraurbana, visto que nesta escala o ambiente pode ser modificado com mais agilidade, e a sociedade pode obter respostas mais emergentes. Nesse sentido, uma das formas viáveis de oferecer intervenções

urbanísticas que qualifiquem as cidades é monitorar a sua qualidade por meio de índices, como o de conforto térmico adotado na pesquisa.

Outra prospecção da pesquisa é fomentar o uso da simulação computacional para o ambiente urbano. Além disso, pretende-se disseminar a lógica da retroalimentação, que implica utilizar os dados simulados para a compreensão dos fenômenos climáticos urbanos e do seu impacto no ambiente construído e, assim, com base nesse comportamento, avaliar e testar as soluções mais adequadas, compreendendo o método da simulação como uma parte do processo na busca por cenários mais sustentáveis.

Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). *NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social*. Rio de Janeiro, 2005.

ALVAREZ, Clayton *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2015.

AKUTSU, Maria; VITTORINO, Fúlvio; YOSHIMOTO, Mitsuo. Método expedito para avaliação do desempenho térmico de habitações. In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO., 1995, Gramado, RS. *Anais [...]*, 1995.

ANJOS, Rafael Sanzio Araújo dos. *Dinâmica territorial: cartografia, monitoramento e modelagem*. Brasília, DF: Mapas Editora & Consultoria, 2008.

ARZTEGUI, José Miguel. Cuantificación del impacto de las sombras de los edificios. In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO., 1995, Gramado, RS. *Anais [...]*, 1995.

BALLESTER-OLMOS, José Francisco. *Interacciones de la vegetación urbana con el microclima*. Barcelona: Editora Universitat Politècnica de València, 2010.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Estudo multitemporal do fenômeno Ilhas de Calor no Distrito Federal. *Revista Meio Ambiente*, n. 2, p. 3-17, 2002.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. Ilhas Urbanas de Calor. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 8, p. 54-59, 2003.

BARBIRATO, Giana Melo. O uso da modelagem climática no planejamento dos espaços urbanos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Fortaleza, 1999.

BRUSE, Michael. Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi-Agent System. In: WITTKOPF, St.; TAN, B. K. (Ed.). *Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA*, 2007. p. 699-706.

BRUSE, Michael. *ENVI-met 3.0 On-line Manual*. Disponível em: <http://www.ENVI-met.com>. Acesso em: 13 out. 2016.

BRUSE, Michael; FLEER, Heribert. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, n. 13, p. 373-384, Oct. 1998.

CASTELO BRANCO, Lorena Mileib Burgos. *Microclimas urbanos no Plano Piloto de Brasília: o caso da Superquadra 108 Sul*. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CARDOSO, Murilo Raphael Dias; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; BARROS, Juliana Ramalho. Classificação Climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e Distrito Federal. *ACTA Geografia*, v. 8, n. 16, p. 40-55, jan. mar. 2014.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgar Blucher, 1999.

CODEPLAN (Companhia de Planejamento do Distrito Federal). *Atlas de Mapas do Distrito Federal*, 1986. Disponível em: <http://www.sedhab.df.gov.br>. Acesso em: 20 ago. 2012.

GIVONI, Baruch. Urban design in different climates. *WMO/TD*, n. 346. World Meteorological Organization, 1989.

GIVONI, Baruch. *Man, Climate and Architecture*. Amsterdam; London; New York: Elsevier Publishing Company Limited, 1969.

HAN, Soo-Gon; MUN, Sun-Hye; HUH, Jung-Ho. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. *Proceedings: Building Simulation*, 2007.

HIRASHIMA, Simone Queiroz da Silveira. *Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG*. 225f. 2010. Dissertação (Mestrado Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, Belo Horizonte, 2010.

INSTITUTO Nacional de Meteorologia. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fundamentos das Normais Climatológicas do Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 13 out. 2016.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Atlas das normais climatológicas*, 2009.

IRVING, A. D. Validation of dynamic thermal models. *Energy and Buildings*, Lausanne, Switzerland, v. 10, n. 3, p. 213-220, Jan. 1988.

KÖPPEN, Wladimir. *Climatologia*. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LABORATÓRIO de Sustentabilidade Aplicada à Arquitetura e ao Urbanismo. *Projeto do Centro de Recuperação de Áreas Degradadas*. Disponível em: <http://www.lasus.unb.br>. Acesso em: 13 out. 2016.

LEDO, Andrés Reudo. *Ciudad y desarrollo urbano*. Madrid: Sintesis, 1996. (Colección Espacios e Sociedades.).

LYNCH, Kevin. *A boa forma da cidade*. Tradução de José Manuel Costa Almeida e Pinho. Lisboa: Edições 70, 1981.

LYNN, M. Presentation in SIMBUILD Conference. *American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*, 2010.

MONTENEGRO, Gildo A. *Desenho arquitetônico*. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2001.

OKE, Timothy R. *Boundary layer climates*. London; New York: Routledge, 1987.

RAUBER, D. L. *et al.* Comparação de *softwares* de análise térmica de edificações: resultados para um projeto padrão e interface programa-usuário. In: ENTAC/SOBRAC/ABERGO. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. *Anais...* Florianópolis, 1993.

REINHART, Christoph. F.; MARDALJEVIC, John.; ROGERS, Zack. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, v. 3, n. 1, p. 7-31, July 2006.

RORIZ, Maurício. *Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro*. Relatório do Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, São Carlos, 2012.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Urbanismo sustentável*. Notas de Aula. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2010.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. *Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília*. São Paulo: Nova Técnica, 2011.

SILVA, Caio Frederico e. *Simulação computacional aplicada à reabilitação urbana de setores do Distrito Federal*. 2009. Monografia de Especialização, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, Caio Frederico e; UWAI, Paulo A. Ribeiro; OLIVEIRA, Isabella F. Capanema de. Computer simulation of three Mesoclimatic urban the Federal District of Brazil. *Procedia Engineering*, v. 169, p. 280-288, Elsevier, 2016.

SOUZA, Léa Cristina Lucas de. Identificação de ilhas urbanas de calor através da interpretação de imagem de satélite. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* Florianópolis, 1993.

SOUZA, Léa Cristina Lucas de *et al.* Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. *Ambiente Construído*, 2010.

SOUZA, Léa Cristina Lucas; RODRIGUES, Daniel S.; MENDES, José F. G. Sky view factor estimatin using a 3D-GIS extension. Proceedings of Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands, p. 1227-1234, 2003.

WERNECK, Daniela Rocha. *Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília-DF*. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília, 2018.

Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



UnB