



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/01.07.10.21-PUD

**MODELOS HIDROLÓGICOS E CLIMÁTICOS EM  
AMBIENTES URBANOS COMO CONTRIBUIÇÃO  
PARA O PLANEJAMENTO URBANO**

Mayumi Cursino de Moura Hirye

Monografia de Qualificação de  
Doutorado em Sensoriamento Re-  
moto orientada pelo Dr. Diógenes  
Salas Alves.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UN3QS2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):****Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/01.07.10.21-PUD

**MODELOS HIDROLÓGICOS E CLIMÁTICOS EM  
AMBIENTES URBANOS COMO CONTRIBUIÇÃO  
PARA O PLANEJAMENTO URBANO**

Mayumi Cursino de Moura Hirye

Monografia de Qualificação de  
Doutorado em Sensoriamento Re-  
moto orientada pelo Dr. Diógenes  
Salas Alves.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UN3QS2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 – Esquema conceitual do método Curve Number. ....	6
Figura 2 – Esquema de caracterização das cidades no MODCEL. ....	10
Figura 3 – Balanços de (a) energia e (b) água nas cidades. ....	15
Figura 4 – Diagrama esquemáticos das escalas verticais do clima urbano. ....	16
Figura 5 – Diagrama esquemáticos das escalas horizontais do clima urbano. ....	16
Figura 6 – Modelo de ilha de calor proposto por Oke (1973). ....	17
Figura 7 – Esquema do modelo proposto por Tso <i>et al.</i> (1990). ....	19
Figura 8 – Camadas envolvidas no estudo de clima urbano na escala local, relativa à “caixa” modelada pelo LUMPS, proposto por Grimmond e Oke (2002). ....	20
Figura 9 – Esquema simplificado de uma modelo de dossel urbano de camada única. ....	22
Figura 10 – Esquema simplificado de uma modelo de dossel urbano de múltiplas camadas. ....	22
Figura 11 – Acoplagem de esquemas de camada única ou camadas múltiplas ao nível atmosférico mais baixo. ....	26
Figura 12 – Os cenários simulados por Duarte <i>et al.</i> (2015). ....	29
Figura 13 – Os cenários simulados por Yahia e Johansson (2014). ....	29



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. MODELOS HIDROLÓGICOS EM AMBIENTES URBANOS.....	1
1.1. As águas e o planejamento urbano.....	1
1.2. O impacto das cidades sobre o ciclo hidrológico.....	3
1.3. Modelos hidrológicos urbanos.....	4
2. MODELOS CLIMÁTICOS EM AMBIENTES URBANOS .....	13
2.1. O clima e o planejamento urbano.....	13
2.2. Os processos climáticos nas cidades.....	14
2.3. Modelos climáticos urbanos .....	17
3. CONCLUSÕES .....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
ANEXO 1 – Modelos Hidrológicos .....	44
ANEXO 2 – Modelos climáticos.....	46





## 1. MODELOS HIDROLÓGICOS EM AMBIENTES URBANOS

### 1.1. As águas e o planejamento urbano

A relação entre as cidades e as águas evoluiu ao longo do tempo. Tucci (2008) identifica quatro fases em que as águas nas cidades foram tratadas de maneiras diferentes. A revolução industrial concentrou nas cidades as novas atividades fabris com seus operários. Repentinamente, as cidades passaram a ser superpopuladas, com problemas de saúde pública, falta de moradias, saneamento e infraestrutura. Entre 1800 e 1850, a população de Londres dobra, chegando a 2.2 milhões de habitantes, a de Manchester triplica, ultrapassando um milhão de habitantes (UNIVERSITY OF PORTSMOUTH, [S.d.]). É nesse contexto que o planejamento urbano, como atividade profissional, emerge, buscando organizar os novos problemas da convivência nas cidades industriais (BENEVOLO, 2001).

Assim, a primeira fase a que Tucci (2008, p. 100) faz referência é a de reconhecimento do problema do não tratamento dos efluentes urbanos e sua consequência na contaminação das fontes de abastecimento de água potável e proliferação de doenças nas cidades do início da era industrial.

Na fase seguinte, foram propostas soluções calcadas na ideia higienista da cidade: afastamento do esgoto para pontos a jusante do manancial de abastecimento, apenas transferindo o impacto das cidades, e canalização do leito natural dos rios, como medida para aumentar a capacidade e a velocidade de escoamento das drenagens naturais, que passaram a receber maior quantidade de águas pluviais devido ao aumento da impermeabilização. No Brasil, as ideias higienistas moldaram as reformas urbanísticas em diversas cidades, durante a primeira metade do século XX (SILVEIRA, 1999, p.9; NASCIMENTO *et al.*, 2013, p. 103).

A canalização e retificação do Rio Tietê na cidade de São Paulo é exemplo paradigmático do tipo de intervenção que nasceu das ideias higienistas. Seus objetivos, entretanto, foram modificados ao longo dos 50 anos que transcorreram entre os primeiros relatórios e a conclusão das obras: inicialmente, o foco era na melhoria do escoamento do rio, ao que se somou à necessidade de conter as enchentes e, por último, a necessidade do aproveitamento da várzea do rio para a ocupação urbana e implantação de infraestrutura viária e ferroviária (SEABRA, 1987). À despeito de outros modelos de intervenção apresentados, como, por exemplo, o de Saturnino de Brito que previa a regularização da vazão do rio e implantação de parque em sua várzea (FRANCO, 2005, p. 53; NASCIMENTO *et al.*, 2013, p. 112), a criação das avenidas de fundo de vale, a partir da canalização do curso d'água e do aproveitamento da várzea com a implantação de sistema viário, foi disseminada por toda a cidade de São Paulo (TRAVASSOS, 2010, p. 93).

A fase corretiva tem como marco, segundo Tucci (2008, p. 100), o '*Clean Water Act*' ('Lei de Água Limpa'), aprovado nos Estados Unidos na década de 1970, que estabeleceu a obrigatoriedade do tratamento dos efluentes para possibilitar

recuperação e conservação dos rios. A canalização dos rios começou a ser substituída por sistemas de amortecimento das águas pluviais (TUCCI, 2008, p. 101). No Brasil, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANASA), instituído em 1968, foi um esforço federal para prover recursos humanos, técnicos e financeiros com o objetivo de eliminar o déficit de atendimento dos sistemas de água e esgoto (PIRES, 1979, p. 30). Entretanto, em termos de drenagem, a opção no PLANASA foi pelo financiamento de obras para a implantação e melhoria de sistemas de drenagem com o objetivo de conter os problemas de enchentes e, adicionalmente, possibilitar a incorporação das áreas de várzeas (PIRES, 1979, p. 37). Atualmente, os serviços de água e esgoto ainda não foram universalizados, assim como as avenidas de fundo de vale continuam sendo uma solução bastante comum, embora soluções como a de implantação de parques lineares, similares à proposta de Saturnino de Brito no início do século passado, estejam ganhando espaço (TUCCI, 2005; TRAVASSOS, 2007).

A partir da década de 1990, no bojo das ideias de desenvolvimento sustentável, os modelos de tratamento das águas pluviais urbanas passaram a enfatizar o controle da urbanização e a preservação dos caminhos naturais do escoamento, priorizando a infiltração da água no solo (TUCCI, 2008, p. 101). As políticas de ‘Desenvolvimento de Baixo Impacto’ (*‘Low Impact Development’* – LID) propostas nos Estados Unidos (PATH, 2003), ou as Drenagem Sustentável de Superfícies (*‘Sustainable Drainage Systems’* – SUDS), no Reino Unido (ENVIRONMENT AGENCY, 2009), ou as de ‘Desenho Urbano Sensível à Água’ (*‘Water Sensitive Urban Design’* – WSUD), na Austrália (COUTTS *et al.*, 2012) são exemplos da aplicação de técnicas controle (com aumento) do volume de água infiltrado no solo. De fato, há um crescente reconhecimento de que soluções de infraestrutura adotada, características locais como topografia e materiais utilizados nas construções e pisos, além da própria morfologia dos edifícios e vizinhanças, impactam a taxa de transformação e o caminho dos fluxos de água (McGRANE, 2016, p. 2301).

No Brasil, as proposições alternativas de soluções de drenagem ainda são muito pontuais e limitadas à esfera municipal, das quais podem ser destacadas as iniciativas das cidades de Guarulhos, ao exigir a construção de reservatório para controle da drenagem urbana em lotes maiores a 1 ha, de São Paulo, com a mesma obrigatoriedade para lotes com mais de 500 m<sup>2</sup> e de Porto Alegre, que se baseiam no controle da vazão de água pluvial que será direcionada à rede de captação, deixando para o proprietário a definição do mecanismo de infiltração e/ou retenção a ser utilizado (TUCCI, 2012, p. 32).

A Quota Ambiental, criada na cidade de São Paulo em 2016, é uma tentativa de “promover a qualificação ambiental, em especial a melhoria da retenção e infiltração da água nos lotes, a melhoria do microclima e a ampliação da vegetação”, conforme estabelecido no artigo 4º da Lei de Uso e Ocupação (PMSP, 2016). O instrumento determina que as melhorias “ambientais” feitas nos lotes (reservatórios de retenção além dos que a lei já exigia, telhados e paredes verdes, jardins e cobertura vegetal em geral, entre outras melhorias) sejam consideradas num sistema de pontuação, para o qual há um mínimo a ser atingido, a depender das características e localização dos lotes.

O progressivo distanciamento das soluções de drenagem urbana das grandes obras é, ao mesmo tempo, a progressiva aproximação do planejamento urbano e da engenharia de saneamento e hidrologia. As disciplinas, mais e mais, se retroalimentam e desenvolvem soluções em conjunto, modificando o padrão de relação vigente nas primeiras fases do tratamento das águas urbanas, em que, conforme afirmou Tucci, “o planejador urbano desenvolve a ocupação ciente de que o engenheiro de transportes, de saneamento e de outras infraestruturas encontrará uma solução”(TUCCI, 2005, p; 108).

## **1.2. O impacto das cidades sobre o ciclo hidrológico**

A hidrologia urbana considera as interações complexas das atividades humanas concentradas nas cidades com a água, o ar, e a terra (McPHERSON, 1974, p.15). O desenvolvimento urbano progressivamente substitui a cobertura vegetal, alterando o ciclo hidrológico “natural”. Ao mesmo tempo, as construções e a impermeabilização do solo urbano vêm acompanhadas das redes de distribuição de água potável, coleta de esgotos e canalização das águas pluviais, que se constituem mecanismos artificiais de importar, exportar e transportar as águas pelas cidades. McGRANE (2016), em recente revisão dos impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e manejo de águas, observa na hidrologia urbana a emergência de uma abordagem integrada da dinâmica natural e da induzida pelos sistemas de engenharia.

A substituição da cobertura vegetal por materiais impermeáveis tem como efeito a redução da infiltração de água no solo, provocando a diminuição do nível do lençol freático (principalmente quando a área impermeabilizada é muito extensa) e o aumento do escoamento superficial, que, se não equacionado, pode resultar em enchentes. É importante destacar, no entanto, a dinâmica distinta de infiltração e evaporação de tipos de pavimentos: materiais como o tijolo ou o concreto poroso facilitam a infiltração, enquanto que o asfalto ou o concreto impedem a infiltração mas facilitam a perda de água por evaporação (MANSELL; ROLLET, 2006 e ARAÚJO *et al.*, 2000). Adicionalmente, as áreas permeáveis urbanas não podem ser consideradas da mesma maneira que as rurais, pois os solos urbanos, mesmo que mantidos permeáveis, podem ter sofrido compactação, modificações das estruturas de macroporos, revolvimento durante obras de escavação, adição de outros materiais (como cascalho), ou podem estar sobre estruturas de macrodrenagem, o que pode modificar suas propriedades hidrológicas e dinâmicas. A transformação de chuva em vazão no complexo mosaico de áreas impermeáveis e permeáveis nas cidades, é um processo ainda não totalmente estudado (McGRANE, 2016).

A substituição da cobertura do solo também provoca a redução da evapotranspiração das folhagens e do solo impactando, conseqüentemente, o microclima. Por outro lado, o regime de chuvas pode ser afetado pela elevação das temperaturas, que criam condições de movimento de ar ascendente que podem resultar no aumento da precipitação (TUCCI, 1999). A relação entre urbanização e aumento das chuvas nas cidades em relação às áreas rurais circundantes já havia sido observada no início do século XX, por Robert E. Horton; meio século depois, Stanley Changnon evidenciou essa relação para LaPort, no estado norteamericano de Indiana (SHEPHERD, 2005).

Muitos estudos se seguiram, comprovando a relação; no Brasil, Silveira (1997), baseado em análises para Porto Alegre, confirmou essa relação, apresentando a urbanização como a causa provável para o aumento das precipitações observado.

A concentração de pessoas e atividades nas cidades e as redes de infraestrutura de abastecimento, coleta e drenagem provocam, por um lado o aumento da demanda, tanto residencial quanto industrial, por água, extrapolando, por vezes, a disponibilidade hídrica local e, por outro lado, provocam o aumento da carga de águas residuais liberadas nos corpos d'água. Observa-se que a água carregada das chuvas não tem qualidade melhor que a do efluente de um tratamento secundário, sendo que a quantidade de material suspenso na drenagem pluvial é superior à encontrada no esgoto *in natura* (TUCCI, 1999). O lençol freático, por sua vez, pode ser impactado pela maior utilização de água subterrânea, embora um efeito adverso dos vazamentos no sistema de abastecimento de água possa voltar a alimentar o aquífero (TUCCI, 1999; McGRANE, 2016). Se os vazamentos forem na rede de drenagem pluvial ou nas estruturas de fossas sépticas, ainda muito comuns no Brasil, o risco é de contaminação do aquífero.

Sobre os corpos d'água, observam-se modificações em sua vazão e o aumento e deslocamento no tempo dos picos de vazão máxima, devido ao aumento da velocidade de escoamento pelos sistemas artificiais de drenagem, que pode causar também pontos de erosão nos locais de descarga. Além disso, os corpos d'água são também impactados pelo aumento de sedimentos e material sólido que podem causar o tanto o assoreamento da drenagem como a contaminação das águas. Modificações nas condições dos corpos d'água podem provocar alterações nos ecossistemas bióticos vinculados a eles.

### 1.3. Modelos hidrológicos urbanos

O Método Racional, proposto por Thomas J. Mulvony ainda na década de 1850, para estimar o escoamento superficial e embasar o cálculo dos sistemas de esgoto, de drenagem de águas pluviais e de vertedouros de reservatórios, é considerado como o primeiro modelo hidrológico (KAMPF; BURGESS, 2007; TODINI, 2007). O modelo desenvolvido para bacias pequenas, praticamente impermeabilizadas (como em áreas urbanas ou áreas montanhosas), utiliza o conceito de tempo de concentração para estimar o pico de vazão, que pode ser considerado puramente como um processo cinemático (TODINI, 2007). No Brasil, o Método Racional começou a ser introduzido a partir de 1930, com a seguinte formulação (SILVEIRA, 1998):

$$Q = C * i * A$$

sendo  $Q$  a vazão de projeto no exutório<sup>1</sup> da bacia (em pés cúbicos por segundo),  $C$  o coeficiente de escoamento em função do tipo de cobertura do

---

<sup>1</sup> Exutório: ponto de menor altitude de uma bacia hidrográfica, na foz do rio principal para onde converge todo escoamento superficial gerado no interior da bacia.

solo,  $i$  a intensidade da precipitação de projeto com uma duração igual ao tempo de concentração<sup>2</sup> (polegadas por hora) e  $A$  a área da bacia (em acres).

Até a década de 1980, segundo Silveira (1998), os sistemas de drenagem no Brasil eram concebidos sem que houvesse norma com recomendação de técnica de eficácia comprovada ou, pelo menos, a uniformização dos critérios a serem adotados. O manual de projeto de drenagem urbana do DAEE/CETESB, que passou a ser adotado à guisa de norma, consolidou a preferência pelo método racional, com a ressalva de que ele deveria ser aplicado em bacias de até 100ha. Para superfícies maiores, o manual sugeria o emprego de hidrogramas unitários sintéticos<sup>3</sup>. Outro método bastante utilizado foi o do *Soil Conservation Service*. Entretanto, os métodos eram aplicados sem eles fossem validados com dados locais.

O método do *Soil Conservation Service* (SCS) dos Estados Unidos foi originalmente publicado em 1975 e, da maneira como está implementado no manual TR-55 publicado em 1986 pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), órgão que substituiu o SCS, consiste de três procedimentos: o cálculo do volume de escoamento superficial, pelo método *Curve Number*, transformação da vazão em um hidrograma, pelo método do Hidrograma Unitário, e o cálculo da propagação da vazão, pelo método modificado de Att-Kin (NRCS, 1986, p.1).

O método '*Curve Number*' (CN), proposto na década de 1950, permite a transformação direta da chuva em escoamento superficial. O método (Figura 1) é baseado na ideia de que, depois se inicia a chuva, há um limiar que corresponde à quantidade de chuva que será interceptada, armazenada em depressões da superfície ou infiltrada, que deve ser atingido antes que o escoamento superficial ocorra; após isso, o volume de chuva que não é convertido em escoamento superficial corresponde, principalmente, à infiltração (RALLISON; MILLER, 1981). Esse limiar é referido nas notações do *Curve Number* como abstração inicial ( $I_a$ ). A interceptação e o armazenamento de água em depressões pode ser estimado a partir das condições da superfície e cobertura do solo; a infiltração, entretanto, é altamente variável e dependente de fatores como intensidade da chuva, existência de crostas e umidade do solo (NRCS, 1998). Assim, a abstração inicial foi, empiricamente, definida como sendo 20% do potencial máximo de retenção (NRCS, 1998). O potencial máximo de retenção ( $S$ ) é calculado a partir do valor tabelado do *Curve Number*, para cada tipo de cobertura da terra, considerando também sua condição e tipo de solo. Graficamente, à cada valor de *Curve Number*, corresponde uma curva que relaciona precipitação e vazão, considerando a abstração inicial. As curvas podem variar para uma mesma situação, devido aos efeitos da

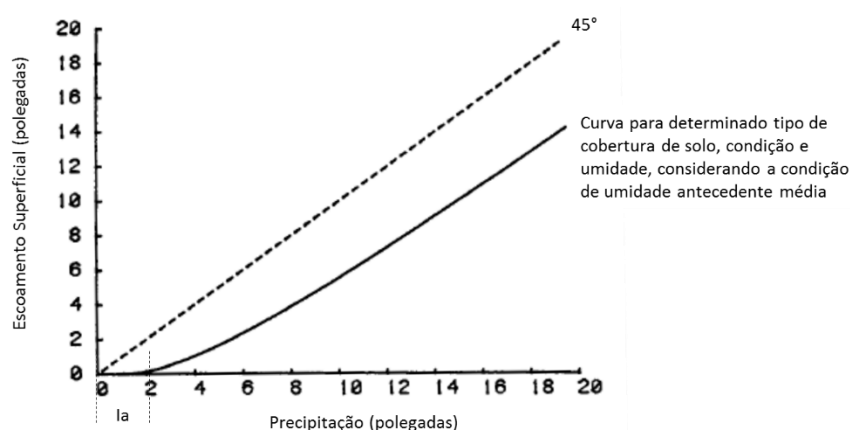
---

<sup>2</sup> Tempo de concentração: tempo que uma gota de chuva que atinge a região mais remota da bacia leva para atingir o exutório (OLLISCHONN; TASSI, 2008, p. 14).

<sup>3</sup> Hidrograma unitário sintético: hidrograma unitário estimado para bacias sem dados observados, a partir de características da bacia e dados regionalizados. Conceitualmente, o Hidrograma Unitário (HU) é o hidrograma do escoamento direto causado por uma chuva efetiva unitária (por exemplo, uma chuva de 1mm ou 1 cm), ao longo do tempo (OLLISCHONN; TASSI, 2008, p. 112).

variabilidade espacial e temporal da chuva, das propriedades da bacia, da qualidade dos dados de chuva medidos e do efeito de chuvas antecedente e a umidade do solo associada (PONCE; HAWKINS, 1996). O último efeito é tratado pela caracterização da condição de umidade antecedente, que considera os eventos chuvosos ocorridos nos cinco dias anteriores e distingue três situações: a de clima seco, a mediana e a de precipitação intensa e saturação do solo (NRCS, 2004, p. 10-4). Os valores de *Curve Number* são definidos para a situação mediana, sendo possível transpor, matematicamente, os valores para as duas outras situações. Embora as equações propostas não sejam baseadas em relações físicas explícitas, método satisfaz o princípio de conservação de massas (NRCS, 2004, p. 10-2). Trata-se de método bastante popular, para o qual foram propostas modificações e acréscimos, como em Mishra *et al.* (2006), entre outros.

Figura 1 – Esquema conceitual do método *Curve Number*.



Fonte: Adaptado de Rallison e Miller (1981).

Os valores tabelados de CN descrevem as cidades por (NRCS, 1986):

- espaços abertos com diferentes frações de vegetação rasteira: até 50%, de 50% a 75% e mais de 75%;
- áreas pavimentadas com diferentes tipos de impermeabilização: pavimento totalmente impermeabilizado, cascalho e terra; e,
- áreas urbanas com diferentes usos e percentuais de impermeabilização associados: industrial (85%), comercial (72%), residencial (65%, 38%, 30%, 25%, 20% e 12%) e áreas em processo de urbanização (5%).

Para possibilitar o cálculo de HUs de acordo com as condições brasileiras, Diaz e Tucci (1987) desenvolveram equações de regressão para os parâmetros de vazão de pico e do tempo de pico e outros tempos relacionados com o HU. Tucci (2003) refinou a base de dados utilizada anteriormente para evitar qualquer tendenciosidade e definiu novas equações de regressão para relacionar as características da bacia (área contribuinte total e taxa de impermeabilização) com os parâmetros do hidrograma unitário (vazão

máxima de pico do HU, vazão específica máxima<sup>4</sup>, tempo de pico e de concentração). As equações não consideram o comprimento do rio principal e a declividade, pois essas variáveis não se mostraram significativas na regressão. O autor recomenda a utilização do método em prognósticos de riscos de até 10 anos de tempo de recorrência<sup>5</sup> e em bacias com áreas impermeáveis maiores que 15% e área de drenagem menor que 50km<sup>2</sup>. Interessante notar que o autor propôs relações dos parâmetros do hidrograma com a densidade populacional nas bacias, ao invés da taxa de impermeabilização.

A partir da década de 1960, a revolução digital tornou possível a integração de diferentes componentes do ciclo hidrológico para a simulação completa dos processos de uma bacia hidrográfica (SINGH; WOOLHISER, 2002, p 271). Silveira (1998) aponta que essa tendência, com algum atraso, também começou a ser reproduzida no Brasil. Os modelos passam a incorporar, além do cálculo do volume de escoamento superficial, a propagação desse escoamento, livremente ou sob pressão, por canais e estruturas construídas de drenagem superficial e subsuperficial.

Os modelos poder ser classificados de variadas maneiras. As propostas de Clarke (1973) e Todini (1988), sintetizadas por Kampf e Burges (2007), são resgatadas aqui para propor a classificação dos modelos de acordo com sua formulação e discretização espacial. De acordo com o primeiro critério, os modelos podem ser diferenciados em empíricos ou conceituais, que consideram os processos físicos na sua formulação (CLARKE, 1973, p. 4). De acordo com o segundo critério, os modelos podem ser concentrados (do termo em inglês, 'lumped'), integrals distribuídos (ou semi-distribuídos) ou diferenciais distribuídos (totalmente distribuídos). Modelos concentrados não consideram a distribuição espacial das variáveis de entrada nem a variação espacial dos parâmetros que caracterizam os processos físicos (CLARKE, 1973, p. 5). Modelos integrais distribuídos podem ser vistos como um conjunto de modelos concentrados conectados, enquanto que os modelos diferenciais distribuídos consideram, de fato, os fluxos distribuídos (KAMPF; BURGES, 2007).

Cabral *et al.* (2009, p. 114) propõem ainda que os modelos sejam diferenciados de acordo com a forma de propagação do escoamento. Modelos de armazenamento são baseados somente no termo de movimento das equações de Saint-Venant<sup>6</sup>, considerando a propagação como uma relação apenas das vazões de entrada e saída e do armazenamento no trecho. Os outros seriam modelos hidrodinâmicos simplificados, que desprezam os termos de inércia e pressão da equação de

---

<sup>4</sup> Vazão específica máxima: vazão máxima de pico por unidade de área da bacia.

<sup>5</sup> Tempo de recorrência ou de retorno: é o período de tempo médio em que um determinado evento hidrológico é igualado ou superado pelo menos uma vez.

<sup>6</sup> Equações de Saint-Venant: conjunto de equações diferenciais parciais de continuidade e movimento que descrevem o escoamento em rios, considerados como unidimensionais e de baixa declividade (OLLISCHONN; TASSI, 2008, p. 220).

movimento de Saint-Venant, ou hidrodinâmicos completos que resolvem completamente as equações, possibilitando a representação de efeitos de translação, amortecimento e também efeitos de jusante sobre o escoamento a montante, como os efeitos de remanso e de reversão de fluxo.

Um exemplo de modelo empírico é o proposto por Santos e Filho (2003) para simular e prever as enchentes na bacia do rio Tamanduateí, na cidade de São Paulo, a partir de dados de chuva obtidos por radar meteorológico e dados do nível do rio no exutório, para período entre 1991 e 1995. O método utilizado foi o de rede neural artificial (RNA), com três camadas e o algoritmo de treinamento de simplex de mínimos quadrados lineares. Os resultados obtidos com RNA foram melhores que os obtidos com a auto-regressão de múltiplos parâmetros, considerada uma abordagem mais tradicional para bacias com predominância do escoamento superficial (SANTOS; FILHO, 2003). Os autores concluem que a RNA pode ser aplicada para modelar sistemas não lineares, sem a necessidade de explicitar os processos hidrológicos envolvidos, que não são suficientemente conhecidos. Os limites apontados pelos autores são a qualidade dos dados de entrada e a capacidade computacional para processar RNAs ou conjuntos de dados muito grandes.

Dois modelos conceituais concentrados foram desenvolvidos no Brasil, a partir da década de 1980: o modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o modelo de Análise de Bacias Complexas (ABC), na Universidade de São Paulo. O IPH-II, apresentado por Tucci, Ordonez e Simões em 1981, é baseado em algoritmos descritos na literatura, utilizados para calcular as perdas através da evaporação e interceptação, os volumes escoado e percolado e a propagação do escoamento superficial e do subterrâneo (GERMANO *et al.*, 1998). O algoritmo de separação do escoamento desenvolvido por Berthelot é empregado em combinação com a equação de infiltração de Horton e com uma função empírica para a percolação, sendo que a propagação do escoamento superficial no modelo é feita através do método de Clark, que utiliza os parâmetros tempo de concentração (tc) e o histograma tempo-área (BRAVO *et al.*, 2007). O modelo ABC, cuja primeira versão é de 1985, encontra-se na sexta versão atualmente. Neste modelo, a precipitação pode ser obtida pela entrada manual de dados de chuva ou pela utilização de curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF)<sup>7</sup> ou do banco de dados de diversas localidades do Brasil (DIAS, 2015). O volume de escoamento superficial pode ser calculada pelo método de Green-Ampt, Horton ou *Curve Number*; os hidrogramas podem ser construídos pelos métodos de Santa Bárbara, Clark ou SCS e o caminhamento de ondas de cheia em canais é calculado por modelo hidrodinâmico simplificado (DIAS, 2015).

---

<sup>7</sup> A curva IDF é obtida a partir da análise estatística de séries longas de dados de chuva observados. Os resultados são resumidos na forma de um gráfico, ou equação, com a relação das três variáveis: Intensidade, Duração e Frequência (ou tempo de retorno).



Um modelo conceitual semi-distribuído é o '*Storm Water Management Model*' (SWMM), desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (EPA) no final da década de 1960 (ROSSMAN; HUBER, 2016a). Trata-se de um modelo público e de código aberto, bastante popular e completo, que tem sido mantido e continuamente atualizado constantemente (CABRAL *et al.*, 2009). O modelo é composto por um módulo hidrodinâmico para o cálculo da transformação de chuva em vazão, do escoamento superficial, da infiltração e da evaporação; um módulo hidráulico, que possibilita a modelagem do escoamento pela rede construída de drenagem, e um módulo de qualidade da água e LID. O SWMM também tem capacidade para modelar: a acumulação e degelo da neve, a troca de fluxo entre aquíferos e sistema de drenagem e a entrada de poluentes no sistema, associada a diferentes usos do solo, e seu tratamento.

No SWMM, estão implementados diversos métodos alternativos para o cálculo em cada um dos componentes. O transporte hidráulico, por exemplo, pode ser calculado por modelo de armazenamento, onda cinemática ou onda dinâmica; já a infiltração pode ser calculada pelo método de Horton, método de Green-Ampt ou método da *Curve Number*. O modelo de qualidade da água no interior de condutos ou de unidades de armazenamento considera que estes se comportam como um tanque de mistura com fluxo permanente. Cada subárea de contribuição do modelo deve ser definida e caracterizada por sua área total, declividade média, percentual permeável de solo, dentre outros atributos. Os mecanismos de LID que são explicitamente modelados no SWMM são: células de bio-retenção (vegetação sobre solo tratado e cascalho), jardins de chuva (vegetação sobre solo tratado), trincheira de infiltração (depressão linear coberta com cascalho), vala com vegetação, pavimento permeável, pavimento poroso, cisterna, telhado verde e sistemas de lançamento de condutores de calhas em áreas verdes (ROSSMAN; HUBER, 2016b).

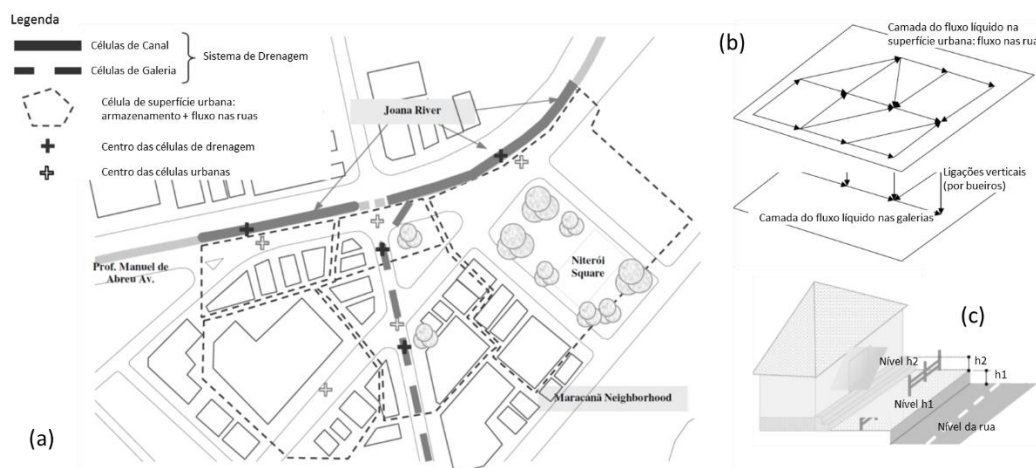
O modelo conceitual semi-distribuído IPHS1, foi desenvolvido por Tucci *et al.* (1989), incorporando o IPH-II e o IPH-III, também desenvolvido no IPH/UFRGS. O modelo consiste de um sistema modulado para as seguintes operações hidrológicas: transformação chuva-vazão; escoamento em rios; propagação em reservatórios; e, entrada, soma ou derivação de hidrogramas. Como o SWMM, o IPHS1 oferece alternativas para os cálculos de separação de escoamento (SCS, IPHII e HEC1) e propagação de escoamento na bacia (Clark, HEC1, HU, Hymo/Nash, SCS). O fluxo é transportado por equações do tipo armazenamento e hidrodinâmicas simplificadas. O IPH-IV, desenvolvido por Tucci *et al.* (1989) possui dois componentes principais: o módulo hidrológico, que simula o processo chuva-vazão pela versão IPH II e o módulo hidrodinâmico, que resolve completamente as equações de Saint-Venant.

Também um modelo conceitual semi-distribuído, o MODCEL tem sido desenvolvido Miguez e Mascarenhas desde a década de 1990, na COPPE / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Assim como o SWMM, o modelo é capaz de simular a cidade e sua rede de drenagem (natural e construída). Cada elemento é definido como uma célula de escoamento, que são integradas em grupos, formando uma rede de fluxo bidimensional

com possibilidade de escoamento em várias direções (MIGUEZ, 2001). As premissas do modelo são (MASCARENHAS; MIGUEZ, 2002; MIGUEZ *et al.*, 2011):

- O nível d'água em cada célula está diretamente relacionado com o volume de água contido na mesma, que é resultado dos processos hidrológicos internos à célula para transformação de chuva em vazão (modelo simplificado) e das vazões trocadas com as células vizinhas. Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula.
- As células são arranjadas em grupos, constituindo um esquema topológico, em que uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura (Figura 2 (a) e (b)).
- O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, estando as células da superfície e as da galeria associadas por uma ligação entre elas. Nas galerias, o escoamento é considerado inicialmente à superfície livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão. São também utilizadas as equações de Saint-Venant, na formulação completa ou simplificada, a equação de escoamento através de orifícios e de bueiros, entre outras.

Figura 2 – Esquema de caracterização das cidades no MODCEL.



Fonte: Adaptado de Miguez *et al.* (2011).

O modelo deve ser iniciado com as informações referentes ao arranjo geral das células e o estado inicial de alagamento das células. Para a caracterização de cada célula, são necessárias informações da área de contribuição e de armazenagem, da cota do terreno, número e tipos de ligações com células vizinhas e distância entre células. As células urbanas possuem um esquema pré-definido para o qual deve ser informado as frações de área de rua, de calçada e de edificações, assim como as alturas em que se encontram os dois últimos elementos (Figura 2(c)). São também dados de entrada, a precipitação sobre cada célula e as informações de contorno do modelo, como

hidrogramas de bacias contribuintes da área modelada, os limites físicos estabelecidos para o modelo etc.

Garcia e Paiva (2004) utilizaram módulo hidrodinâmico do SWMM para avaliar cenários futuros de impermeabilização no arroio Cancela, de 4,95 km<sup>2</sup>, na cidade de Santa Maria, RS, Brasil, e o potencial risco associado a enchentes em dois pontos do arroio. Os cenários 1 e 2 consideraram a taxa de ocupação<sup>8</sup> máxima prevista no Plano Diretor vigente e no plano em discussão, respectivamente. O cenário 3 considerou uma condição extrema de impermeabilização, a partir dos dados obtidos na região da bacia com maior grau de impermeabilização. Os resultados do modelo calibrado (correlação média de 0,96) mostraram que o cenário 3 provocará um aumento de 60% na vazão de pico e no volume escoado, em relação a situação atual e representará em risco nos dois pontos avaliados. Em trabalho posterior, os mesmo autores realizaram uma análise de sensibilidade das simulações realizadas, concluindo que os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade quanto à vazão de pico foram os que caracterizam as subáreas: porcentagem de área impermeável e largura do escoamento (GARCIA; PAIVA, 2006).

Alves (2015) utilizou o SWMM para simular diferentes cenários de planejamento urbano para avaliar as práticas de LID e a interceptação da chuva por diferentes espécies arbóreas. Para avaliar capacidade de diferentes espécies em interceptar a chuva, foram instalados na área de estudo, na cidade de Uruaçu/GO, pluviógrafos para registrar a precipitação em campo aberto e sob a copa das árvores. A autora concluiu que características individuais das espécies determinam diferenças na capacidade de interceptação de chuva por suas copas e na redução do escoamento superficial; também foram observadas variações nas interceptações em relação aos eventos chuvosos e durante suas ocorrências. Além disso, a pesquisa comprovou que o cenário que considera, conjuntamente, soluções de mobilidade (vias mais largas), de parcelamento (lotes maiores) e de LID (arborização, pavimento permeável e bacias de retenção), é capaz de reduzir significativamente o volume e vazão e retardo no tempo ao pico do escoamento, em relação aos outros, que consideram as soluções isoladamente.

Exemplos de aplicação do MODCEL em bacias urbanas são o de Mascarenhas e Miguez (2002), para avaliar as obras de drenagem propostas para a contenção de enchentes na cidade de Joinville, e o de Miguez *et al.* (2011), para a comparação de combinações de medidas de LID para a minimização das enchentes na bacia do rio Joana (11km<sup>2</sup>) na cidade do Rio de Janeiro. Nos dois estudos, as conclusões são de que o modelo é capaz de simular satisfatoriamente as situações descritas e avaliar as propostas para a contenção das enchentes.

Neves *et al.* (2008) utilizaram o modelo IHPS1 em conjunto com o módulo hidráulico do SWMM analisar as causas dos alagamentos e o impacto da implantação de uma bacia de retenção em uma sub-bacia do riacho Reginaldo, em Maceió (0,42km<sup>2</sup>). A simulação mostrou que, para um tempo de recorrência de 5 anos, apenas a bacia de

---

<sup>8</sup> Taxa de ocupação: a relação percentual entre a projeção da edificação e a área do terreno.

retenção não será suficiente evitar os episódios de cheia, causada pelo efeito de remanso provocado pela mesma. O reservatório será capaz de amortecer 41% da vazão, o que já contribui para uma diminuição significativa do diâmetro necessário do conduto a jusante.

Campana e Tucci (1999; 2001) aplicaram o modelo IPH-IV para simular o comportamento da bacia do Arroio Dilúvio (76 km<sup>2</sup>), em Porto Alegre, em virtude das alterações propostas pelo Plano Diretor (taxa de ocupação de 50%). Após a validação do modelo com dados observados (coeficientes de variação entre 0,903 e 0,992), os autores concluíram que, para uma enchente com tempo de recorrência de 25 anos, ainda existirão pontos de alagamento, causados pela obstrução do canal pelas pontes.

O modelo totalmente distribuído '*Distributed-Hydrology-Soil-Vegetation Model*' (DHSVM), proposto por Wigmosta *et al.* (1994 e 2002) foi adaptado por Cuo *et al.* (2008) para ser utilizado em áreas urbanizadas ou parcialmente urbanizadas, com a introdução de parâmetros para descrever as coberturas do solo urbano. O DHSVM é capaz de simular processos detalhados da interação solo, vegetação e atmosfera, a partir do balanço de energia, utilizando como base um modelo digital de elevação (MDE) e, considerando, explicitamente, as variações de cobertura do solo em cada célula (*pixel*) do MDE. O escoamento é calculado por modelo hidrodinâmico simplificado. Os parâmetros adicionados ao modelo original são: a fração de impermeabilização e fração de água armazenada em reservatório. Os dois parâmetros permitem o modelo simular o escoamento superficial e a detenção de parte do volume direcionado para cisternas, lagoas ou mesmo para o sistema de canais construídos. Os autores aplicaram o modelo proposto para bacia do Springbrook Creek, no estado norteamericano de Washington. A bacia possui 21,9km<sup>2</sup>, dos quais cerca de um terço é densamente urbanizado e outro terço é de urbanização medianamente densa. Os resultados obtidos com valores realistas de fração de impermeabilização, fração de escoamento de água armazenada em reservatório e parâmetros de detenção da drenagem apresentaram boa concordância com os valores medidos no exutório da bacia, com coeficientes de correlação de 0,83 e 0,85 para os períodos de calibração e validação, respectivamente.

Outro modelo totalmente distribuído foi proposto por Pereira (2008), a partir da combinação do método do SCS com a plataforma TerraME, para a modelagem dinâmica da propagação da chuva em um espaço celular. O cálculo do volume de vazão foi feito com o *Curve Number* e a distribuição da vazão no tempo foi aproximada pelo Hidrograma Unitário do SCS, com o cálculo da vazão de pico e vazão diária. A direção de escoamento de cada célula foi determinada a partir de modelo digital de elevação (DEM). O modelo foi testado na porção inicial do rio Piabanha, que corta a área urbana de Petrópolis, configurando uma bacia de cerca de 48 km<sup>2</sup>. O modelo foi capaz de reproduzir as variações de vazão com o mesmo padrão das variações de nível do curso d'água. A limitação existente no código implementado é a distribuição do volume de água escoado em apenas um tempo seguinte, o que não permite a distribuição do escoamento para os casos em que a precipitação efetiva leva um tempo maior do que dois passos de tempo para escoar totalmente.

## 2. MODELOS CLIMÁTICOS EM AMBIENTES URBANOS

### 2.1. O clima e o planejamento urbano

O estudo dos efeitos das cidades sobre o clima tem início somente no século XIX, a partir dos problemas trazidos pela revolução industrial às cidades. É nesse contexto que Luke Howard, tido como um dos pioneiros da climatologia urbana, realiza as medições do clima da cidade de Londres e constata o impacto da urbanização sobre o clima. Em seu estudo, *'The Climate of London'*, publicado em 1833, ele observa que “a temperatura da cidade não é para ser considerada como a do clima; ela é parte de um calor artificial, induzido pela estrutura [da cidade], por uma superpopulação e pelo consumo de grandes quantidades de combustível” (LUKE HOWARD, 1883, p. 2).

Avançando no entendimento das relações entre cidades e clima, o estudo *'Das Stadtklima'* de Albert Kratzer, publicado primeiramente em 1937 e complementado em 1956, buscou elucidar como e em que extensão o clima é modificado pelas cidades, considerando sua localização, tamanho, forma e, também, a energia que é consumida pelos habitantes e suas atividades (KRATZER, 1956). Por meio da análises da radiação, aerossóis, temperatura, ventos, umidade e precipitação, o estudo apresentou “explicações dos mecanismos de ilha de calor urbana, sistema de ventos, ventilação e estagnação, anomalias na precipitação, poluição e sua dispersão, além dos efeitos da direção do vento” (HEBBERT; JANKOVIC, 2013).

No período do pós-guerra, houveram avanços conceituais significativos e também avanços no sentido de descrever matematicamente as relações entre as cidades e o clima. Arnfield (2003), ao revisar os artigos publicados no *International Journal of Climatology* desde seu lançamento no início da década de 1980, observou a introdução ou a consolidação de novos conceitos vindos tanto do campo específico da climatologia urbana quanto da climatologia atmosférica. Barlow (2014), ao revisar os progressos na observação e modelagem do clima urbano, apontou os principais pontos de convergência do conhecimento acumulado até o momento: as diferentes escalas horizontais e verticais do clima urbano e as especificidades do balanço de energia urbano.

Apesar dos avanços da climatologia urbana para a construção de uma base científica consistente e apesar o aparecimento das mudanças climáticas nas agendas de pesquisa e também de planejamento econômico, ambiental e urbano, diversos autores apontam que os conhecimentos da climatologia urbana ainda não estão sendo incorporados de maneira sistemática ao processo de tomada de decisões de planejamento urbano (ASSIS, 2007; ERELL, 2008; MILLS *et al.*, 2010; HEBBERT, 2014).

Uma percepção recorrente por parte dos climatologistas é a de que a distância entre a climatologia e o planejamento é devida à falta de disseminação do conhecimento e da importância do tema e à falta de ferramentas adequadas comunicação (OKE, 2006; SOUCH; GRIMMOND, 2006; MILLS *et al.*, 2010). Hebbert e Jankovic (2013) creditam essa distância a um duplo movimento: de um lado, a tendência dos climatologistas de

se isolarem em seu campo de conhecimento e de outro lado, o desinteresse dos últimos nas “camadas atmosféricas invisíveis” (HEBBERT; JANKOVIC, 2013, p. 1340). Nesse sentido, Hebbert (2014) aponta que o clima urbano é parte da agenda apenas dos governos onde essa temática é apoiada por uma cultura política e por uma ativa participação da comunidade de pesquisa (Hebbert, 2014, p.209).

As decisões de planejamento que têm impacto sobre o clima, tanto na microescala (das ruas) quanto na escala local (dos bairros) ou na mesoescala (da cidade como um todo), são aquelas relacionadas com a forma urbana – altura das edificações, proporção de solo que é impermeabilizada, recuos, densidade de construções e áreas destinadas à infraestrutura (transportes, áreas verdes e grandes equipamentos de saneamento e energia) – e aquelas que afetam a quantidade de calor antropogênico liberado para a atmosfera. Da literatura, foram identificados três tipos de abordagens que promovem o diálogo entre climatologistas e planejadores urbanos:

- a) Recomendações gerais de desenho urbano elaboradas a partir de estudos empíricos das cidades. Essa abordagem é a que mais se aproxima da linguagem do planejamento urbano, sendo, muitas vezes, tratada em conjunto com o projeto arquitetônico. Os trabalhos dos arquitetos Baruch Givoni (GIVONI, 1998), Evyatar Erell em colaboração com David Pearlmutter e Terry Williamson (ERELLEEVYATAR *et al.*, 2011) e Rohinton Emmanuel (EMMANUEL, 2016) são exemplo desse tipo de abordagem. Em um dos seus trabalhos mais próximo do planejamento urbano, o geógrafo Tim Oke, nome de referência na climatologia moderna, identifica quais seriam as geometrias mais compatíveis com o clima das cidades a meia-latidade (OKE, 1988).
- b) Mapas de zonas climáticas urbanas, elaborados especificamente para cada cidade a partir de dados climáticos e de configuração urbana. Com diferentes nomes (zonas climáticas, mapas climáticos ou *klimaatlas*), eles consistem em um diagnóstico das características do clima associado às características da cidade (físicas, de uso e de ocupação do solo urbano). O objetivo final é elaborar recomendações de planejamento adequadas a cada zona climática urbana. Revisões e exemplos desse tipo de abordagem podem ser encontradas em Ren *et al.* (2011), Hebbert (2014) e Ng e Ren (2015).
- c) Modelos climáticos, que têm a vantagem de possibilitarem a comparação do impacto de diferentes decisões em uma mesma localidade. A revisão dos modelos é feita na seção 3.3.

## **2.2. Os processos climáticos nas cidades**

Para o entendimento dos sistemas que envolvem a atmosfera, os ciclos de água (massa) e de energia solar são fundamentais (OKE, 1987, p.8). Assim, a climatologia moderna está baseada no estudo da transferência, conversão e armazenamento de energia e massa (OKE, 1987, p.7). Os balanços de energia e de água podem ser

vinculados pela evapotranspiração, que é proporcional ao calor latente. Nas cidades, a formulação dos balanços é (OKE, 1987, p. 274):

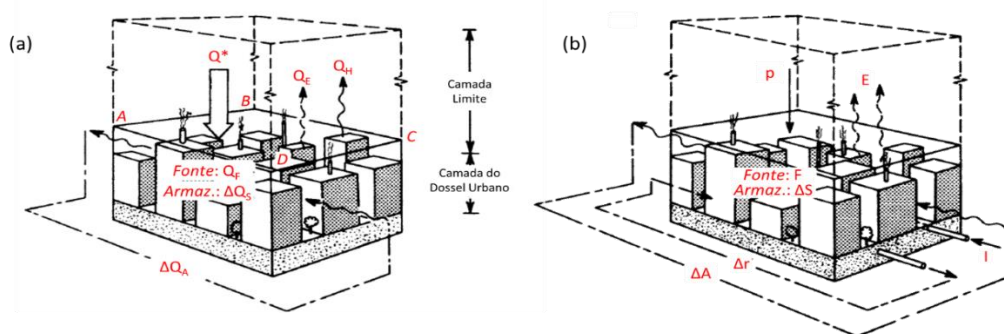
$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA$$

onde as entradas de energia no sistema são: radiação líquida ( $Q^*$ ) e calor antropogênico ( $QF$ ); e as saídas são: calor sensível ( $QH$ ), calor latente ( $QE$ ), saldo líquido de calor armazenado nas superfícies ( $\Delta QS$ ) e saldo líquido de calor transportado por advecção ( $\Delta QA$ ) (Figura 3 (a)); e,

$$p + F + I = E + \Delta r + \Delta S + \Delta A$$

onde as entradas de água são: precipitação ( $p$ ), água liberada na atmosfera por processos antropogênicos, como a combustão ( $F$ ) e suprimento de água canalizado de rios ou reservatórios ( $I$ ); e as saída são: evapotranspiração ( $E$ ), saldo líquido do escoamento ( $\Delta r$ ), saldo líquido de água armazenada no solo, nos edifícios e no ar contido neles ( $\Delta S$ ); saldo líquido de água transportada horizontalmente por advecção ( $\Delta A$ ) (Figura 3(b)).

Figura 3 – Balanços de (a) energia e (b) água nas cidades.



Fonte: Adaptado de OKE (1987).

Os processos climáticos ocorrem diferenciadamente no espaço. A camada atmosférica, também chamada de camada limite planetária, pode ser distinguida em camada limite urbana (CLU) e camada limite rural. A CLU é definida por fenômenos que variam em escalas horizontais mas que são governados pelas características das cidades (OKE, 1987, p. 274).

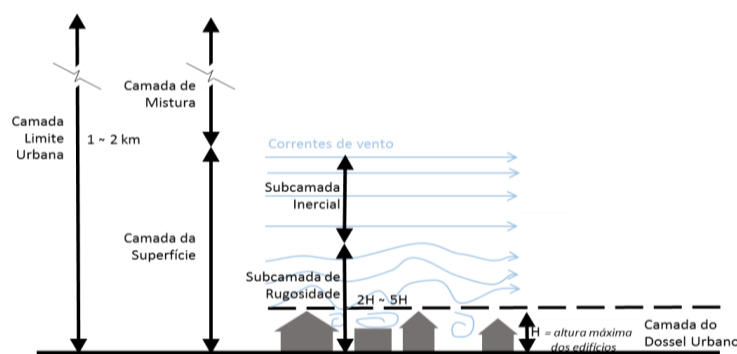
As escalas verticais da camada limite urbana (Figura 4) podem ser caracterizadas, de acordo o resumo oferecido por Ferreira (2010, p. 5), como:

- A **camada do dossel urbano**, definida pela altura média dos edifícios ( $H$ ).
- A **camada da superfície**, composta por duas subcamadas:
  - o A **subcamada de rugosidade**, com uma espessura entre  $2H$  e  $5H$ . Nesta subcamada os fluxos turbulentos são heterogêneos e dependem da configuração da rugosidade urbana (dependente de características como comprimento das edificações, altura e distância entre as construções, geometria das edificações, entre outras).
  - o Acima da subcamada de rugosidade, a **subcamada inercial**, apresenta extensão vertical de algumas dezenas de metros e nela se aplica a Teoria de

Similaridade de Monin-Obukhov<sup>9</sup>, sendo que, na direção horizontal, as propriedades estatísticas do escoamento turbulento também são uniformes.

- Acima da camada de superfície, a **camada de mistura** é a região onde o fluxo vertical turbulento de calor sensível varia linearmente e a temperatura potencial média permanece constante com a altura.

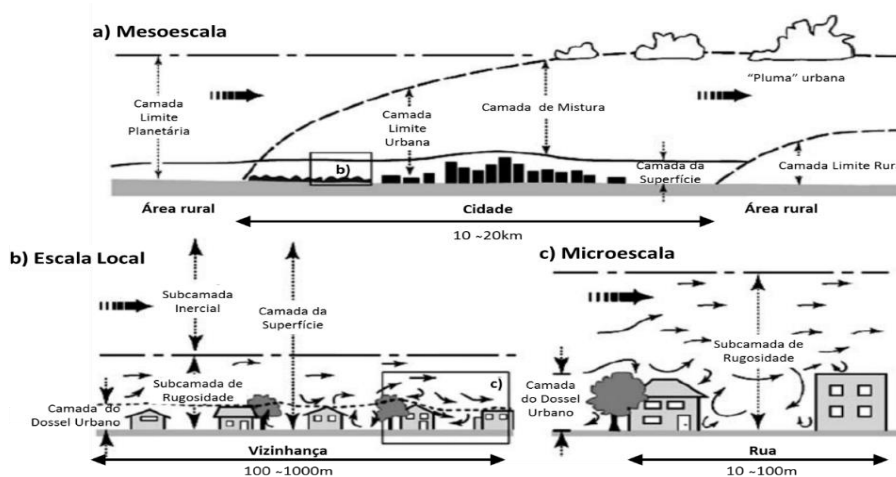
Figura 4 – Diagrama esquemáticos das escalas verticais do clima urbano.



Fonte: Adaptado de Barlow (2014) e Oke (1997).

As escalas horizontais são as da rua (microescala) com extensão de 10 a 100m, da vizinhança (escala local) com extensão de 100m a 1km e a da cidade (mesoescala) com extensão de 10 a 20km (Figura 5). Essas escalas horizontais podem ser interpretadas como as escalas nas quais as características urbanas são homogêneas e distintas do seu entorno (por exemplo, uma casa ou uma rua; o conjunto de edifícios de alturas e formas similares em um bairro ou a cidade como um todo que se distingue do entorno rural) (Barlow, 2014).

Figura 5 – Diagrama esquemáticos das escalas horizontais do clima urbano.



Fonte: Adaptado de Oke (1997).

<sup>9</sup> Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov: postula que os fluxos na camada de superfície têm variação uniforme com a altura (AMS, 2016b).

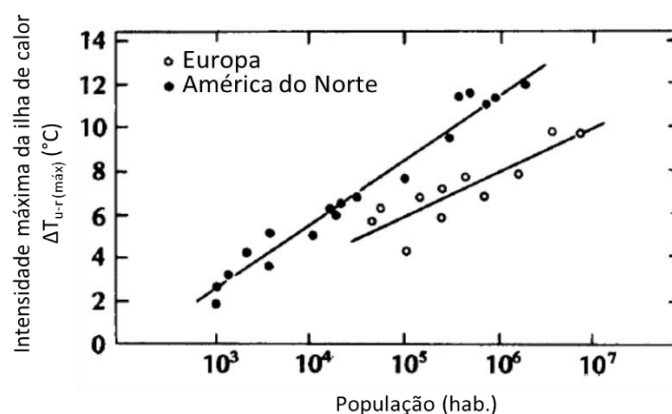


Oke (2004) postula que existem quatro características das cidades que afetam significativamente o clima urbano: as estruturas urbanas (dimensão dos edifícios e os espaços entre eles, largura das ruas e espaçamento entre elas), a cobertura do solo (impermeabilização, pavimentos, vegetação, solo exposto, água etc.), os materiais que compõem as coberturas (materiais de construção, materiais naturais etc.) e o metabolismo urbano (entendido como calor, água e poluentes gerados pela atividade humana) (OKE, 2004, p.9).

### 2.3. Modelos climáticos urbanos

Os primeiros modelos do clima urbano foram elaborados a partir das relações empíricas estabelecidas entre medidas climáticas e características urbanas. Um dos modelos mais simples é o proposto por Oke (OKE, 1973) para o estudo das ilhas de calor<sup>10</sup>, que relaciona o tamanho da população (como uma *proxy* do tamanho da cidade) e a diferença máxima de temperatura entre a área urbana e seu entorno rural (Figura 6).

Figura 6 – Modelo de ilha de calor proposto por Oke (1973).



Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Esse modelo foi aprimorado para considerar, ao invés da população, a relação entre altura e largura (relação H/W) dos edifícios em um cânion urbano<sup>11</sup> típico dos centros das cidades (OKE, 1987). Essa relação é um parâmetro mais adequado para sintetizar o fenômeno físico (relacionado ao sombreamento e formação de túneis de vento) e expressar a densidade construtiva das áreas centrais.

Duarte (2010) oferece uma revisão desses primeiros modelos e cita, além dos modelos desenvolvidos por Oke para as ilhas de calor (OKE, 1973; 1987), os modelos de Givoni

<sup>10</sup> Ilhas de calor: de uma maneira simplista, é a diferença observada entre as temperaturas na cidade e no seu entorno rural. O conhecimento atual permite definir tipos distintos de ilhas de calor, cada qual com suas características e diferentes combinações de processos de troca de energia (ARNFIELD, 2003).

<sup>11</sup> Cânion urbano: é uma representação abstrata da cidade, composta por uma rua, com largura determinada, margeada por séries de edifícios, com alturas determinadas.

(1998), baseado na densidade populacional, e de Steemers *et al.* (2004), baseado em um indicador chamado de grau de enclausuramento, que representaria melhor a forma urbana que a relação H/W. Para as cidades brasileiras, a autora cita o de Santos *et al.* (2003), baseado no fator de visão de céu<sup>12</sup> e a massa construída de Belo Horizonte, de Barbugli e Roriz (2005), baseado em parâmetros físicos da paisagem urbana de Araraquara (altitude, densidade de ocupação, projeção da área construída, área de asfalto, área cimentada, proximidade de água, presença de vegetação e ângulo de incidência solar) e o de sua autoria, para Cuiabá, baseado em indicador calculado a partir da taxa de ocupação, do coeficiente de aproveitamento e da percentagem de superfícies d'água e de arborização (DUARTE, 2000). Baseado nos parâmetros de uso e ocupação do solo urbano utilizados no modelo de Cuiabá, a autora propõe um modelo para a cidade de São Paulo, a partir de regressão múltipla dessas variáveis e da temperatura do ar, no verão e no inverno em três horários, 9h, 15h e 18h (DUARTE, 2010).

Esses modelos empíricos, apesar de simples e baseados em dados reais, não possibilitam extrapolações além das situações observadas, ainda que, como argumentou Duarte (2010), eles possam servir como uma aproximação entre os climatólogos e os planejadores urbanos. Para propósitos de planejamento, os modelos baseados no balanço de energia são uma abordagem mais promissora, por considerarem explicitamente as variáveis termodinâmicas do processo físico de interação entre os elementos da atmosfera e aqueles do tecido urbano e seus arredores e permitirem a comparação distintas soluções e seus impactos sobre condições variadas de clima (ASSIS, 2007, p.25).

No campo da meteorologia, os modelos de balanço de energia também representam uma oportunidade, já que são uma maneira de se incorporar a influência das cidades nas previsões meteorológicas regionais e globais (BEST, 2005). Os balanços de energia para superfícies de vegetação ou de água têm sido extensivamente observados e modelados por muitas décadas, enquanto que os balanços de energia de áreas urbanas e suburbanas, por sua complexidade e particularidades, somente a partir de 1990 começaram a ser desenvolvidos (MASSON, 2006, p. 36). A maior parte dos modelos tem sido desenvolvida para a resolver o balanço de energia na mesoescala, de forma que os modelos climáticos urbanos possam ser acoplados a modelos climáticos regionais, possibilitando assim a simulação dos efeitos da urbanização no clima regional ou das interações entre a cidade e o seu entorno não-urbano.

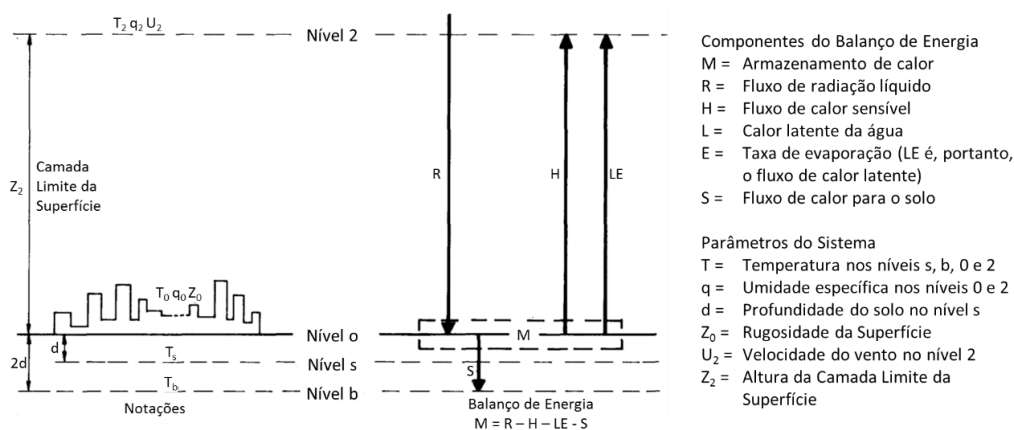
Modelos simplificados do balanço de energia, ou modelos empíricos, na classificação proposta por Masson (2006) utilizam poucos dados como forçantes do sistema (tipos de superfícies, radiação solar incidente etc.) e não requerem a solução de muitas equações, já que a abordagem pressupõe que o comportamento físico está expresso pelos dados observados (MASSON, 2006, p.36). A área urbana é parametrizada e representada como uma “placa”, ou um plano homogêneo e avolumétrico

---

<sup>12</sup> Fator de visão de céu: é uma medida adimensional da visão do céu, não obstruída, que se tem de determinado ponto da superfície (OKE, 1988).

Um dos primeiros modelos de balanço de energia urbano é o ‘*Surface Energy Balance Model*’ (SEBM), proposto por Tso *et al.* (1990), cuja solução analítica é apresentada em Tso *et al.* (1991). O SEBM é um modelo simplificado que quantifica o armazenamento de calor pela massa construída da cidade, considerada como uma placa, caracterizada por sua massa por unidade de superfície ( $m_c$ , em  $\text{kg}/\text{m}^2$ ), seu calor específico ( $C_c$ , em  $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ) e sua rugosidade ( $Z_0$ , em m), sendo posicionada no plano da superfície (nível 0, da Figura 7). O modelo assume que o solo, os edifícios e a temperatura do ar estão em equilíbrio térmico no nível 0. Assim, a premissa é de que há homogeneidade horizontal em todos os parâmetros meteorológicos e de solo, que os fluxos turbulentos de calor e vapor d’água são constantes entre os níveis 0 e 2 e temperatura, velocidade de vento e umidade específica são constantes na  $Z_2$ .

Figura 7 – Esquema do modelo proposto por Tso *et al.* (1990).



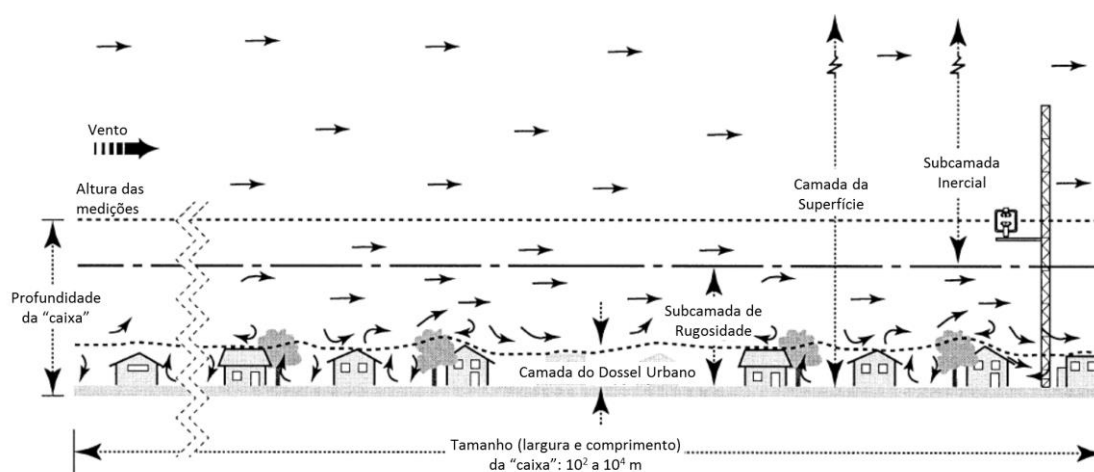
Fonte: Adaptado de Tso *et al.* (1990).

Barbirato (1998; 2010) utilizou o SEBM para comparar os efeitos do volume construído em diferentes pontos de Maceió sobre o microclima e simular os efeitos de uma futura verticalização dessas áreas. Os pontos foram selecionados para representar diferentes feições urbanas: o ponto 1 com alguma verticalização, edificações térreas e alguns terrenos vazios, de uso predominantemente residencial e com pouca vegetação; o ponto 2, verticalizado, de uso predominantemente residencial e com pouca vegetação; e o ponto 3, de construções térreas, de uso predominantemente residencial e com pouca vegetação. A autora mostrou que houve boa concordância do modelo com as observações meteorológicas feitas em cada ponto e que o calor armazenado ( $M$ ) variou em função da massa construída. No cenário futuro, a autora mostrou que o aumento da verticalização nos pontos 1 e 3, com o aumento da massa construída e da rugosidade da superfície, acarretará um comportamento diferenciado da curva de temperatura diária do ar, resultando em diminuição do valor da temperatura máxima e seu deslocamento das 12h para as 14h, além da diminuição do esfriamento das superfícies após o pôr-do-sol.

O modelo ‘*Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme*’ (LUMPS), proposto por Grimmond e Oke (2002) é também um modelo simplificado, que reproduz o balanço de energia urbano a partir de relações estatísticas derivadas de

observações meteorológicas (temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica) para a parametrização de diferentes tipos de cobertura de solo urbano. O modelo considera o balanço de energia em uma “caixa”, de dimensões entre  $10^2$  a  $10^4$ m, cuja parte superior está localizada na subcamada inercial e a parte inferior, a uma profundidade onde não há mais troca de calor (Figura 8). O modelo LUMPS é composto por uma série de equações encadeadas que permite o cálculo do fluxo calor armazenado ( $\Delta QS$ ), calor latente ( $Q_E$ ) e sensível ( $Q_H$ ). A radiação total líquida ( $Q^*$ ), caso não seja diretamente medida, é calculada a partir de medições meteorológicas, como a radiação incidente de ondas curtas ( $K\downarrow$ ), temperatura do ar ( $T_a$ ), pressão real de vapor ( $e_a$ ) e fração de nuvens ( $c_f$ ), e de propriedades radiativas das superfícies, Albedo ( $\alpha_K$ ) e emissividade ( $\epsilon_s$ ).

Figura 8 – Camadas envolvidas no estudo de clima urbano na escala local, relativa à “caixa” modelada pelo LUMPS, proposto por Grimmond e Oke (2002).



Fonte: Adaptado de Grimmond e Oke (2002).

O fluxo de calor armazenado ( $\Delta QS$ ) é estimado por meio do ‘Objective Hysteresis Model’ (OHM) (GRIMMOND *et al.*, 1991), considerando três coeficientes,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , que parametrizam o conhecimento sobre o fluxo de radiação total em escala local dos materiais que compõem cada tipo de superfície considerada: áreas pavimentadas / impermeabilizadas ( $F_{Im}$ ); áreas verdes ( $F_V$ ); e coberturas de edificações ( $F_R$ ). Grimmond e Oke (1999) e Meyn (2000) apresentam a listagem completa dos coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , implementados no LUMPS. Os fluxos turbulentos de calor sensível ( $Q_H$ ) e latente ( $Q_E$ ) são calculados a partir de observações meteorológicas (temperatura do ar,  $T_a$ , e pressão,  $P$ ) e de dois coeficientes definidos empiricamente a partir da proporção de superfície vegetada ( $F_V$ ) ou irrigada ( $F_{Ir}$ ):  $\alpha$ , que está relacionado à forte correlação de  $Q_H$  e  $Q_E$  com a diferença entre  $Q^*$  e  $\Delta QS$  e  $\beta$ , que corresponde à parte não correlacionada. A proposição dos autores é de  $\alpha$  seja estimado a partir da umidade das superfícies vegetadas ( $F_V$ ) e que  $\beta$  seja um valor constante ( $3Wm^{-2}$ ). O fluxo de calor antropogênico

não é explicitamente considerado, pois como o LUMPS é baseado em medidas observadas, os termos parametrizados do modelo já incorporam os efeitos desse fluxo.

Os modelos derivados dos Esquemas de Transferência Solo-Vegetação (*'Soil Vegetation Transfer Scheme'* – SVAT) são uma maneira de incorporar as cidades nos modelos climáticos regionais (MASSON, 2006). Para reproduzir as áreas urbanas, as adaptações feitas nesses esquemas podem ser sintetizadas, de acordo Masson (2006), em:

- Modificações para considerar os efeitos dinâmicos das cidades, considerando duas abordagens: a adoção de um comprimento de rugosidade, no qual a fricção devido à rugosidade da superfície é posicionada na primeira camada acima da superfície; ou a incorporação, nas equações de momento e de energia cinética da turbulência, de um termo para a força de arrasto, posicionada na altura dos edifícios mais altos, possibilitando a representação desse efeito sobre a superfície, à semelhança do que é feito em modelos de dossel florestal.
- Modificações para considerar os efeitos radiativos das cidades, adotando, usualmente, um albedo menor para a superfície urbana, para simular a radiação de ondas curtas que é “aprisionada” no dossel urbano. Nos modelos que adotam a força de arrasto, é possível incluir a parametrização da atenuação da radiação solar à medida que penetra no dossel urbano.
- Modificações no termo de evapotranspiração do balanço de energia: de modo geral, os modelos consideram que a água, em áreas densamente construídas, é removida do sistema pelas estruturas de drenagem e a evapotranspiração é bastante reduzida. Em áreas suburbanas, são assumidos coeficientes intermediários entre as áreas vegetadas e as urbanas densas.
- Modificações no termo de armazenamento de calor do balanço de energia: a abordagem mais simples é a substituição da vegetação dos SVATs por concreto. Entretanto, isso não é suficiente para reproduzir o armazenamento de calor das estruturas urbanas, que é favorecido pelo fluxo turbulento de calor sensível devido à maior profundidade da subcamada de rugosidade sobre as cidades. Assim, o autor, em concordância com Dandou *et al.* (2005), aponta como alternativa a utilização do OHM proposto por Grimmond *et al.* (1991).
- Modificações para a inclusão de um termo adicional, relativo ao calor produzido por fontes antropogênicas.

Dandou *et al.* (2005) afirmam que ao considerarem a camada de superfície como uma aproximação da camada de fluxo constante, obedecendo à similaridade de Monin-Obukhov, os modelos derivados de SVATs consideram apenas numericamente os fluxos turbulentos na subcamada de rugosidade, sem serem capazes de reproduzir a estrutura vertical desses fluxos.

Os modelos de dossel urbano foram desenvolvidos para resolver o balanço de energia em um cânion urbano, representado em três dimensões. Neles, o balanço de energia é resolvido separadamente para telhados, ruas e paredes e as interações radiativas

entre ruas e paredes são explicitamente consideradas (MASSON, 2006). As diferentes superfícies são especificadas a partir dos materiais que as compõe, permitindo o cálculo do armazenamento de energia pelo método simplificado de força-restauração<sup>13</sup> ou do método mais realístico e também computacionalmente mais caro, que considera as diferentes camadas de cada material (MASSON, 2006). Esses modelos são usualmente divididos em modelos de dossel urbano de camada única (*'single-layer models'*) e modelos de dossel urbano de múltiplas camadas (*'multi-layer models'*). A diferença entre eles é que, no primeiro caso, a representação tridimensional da cidade interage apenas uma camada da atmosfera e utiliza a parametrização do movimento do ar no cânion, no segundo caso, a interação se dá com diversas camadas de ar e é utilizado a abordagem da força de arrasto (Figuras 9 e 10).

Figura 9 – Esquema simplificado de uma modelo de dossel urbano de camada única.

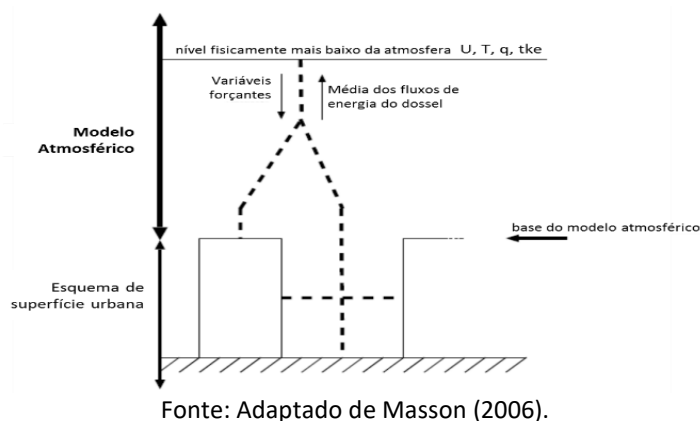
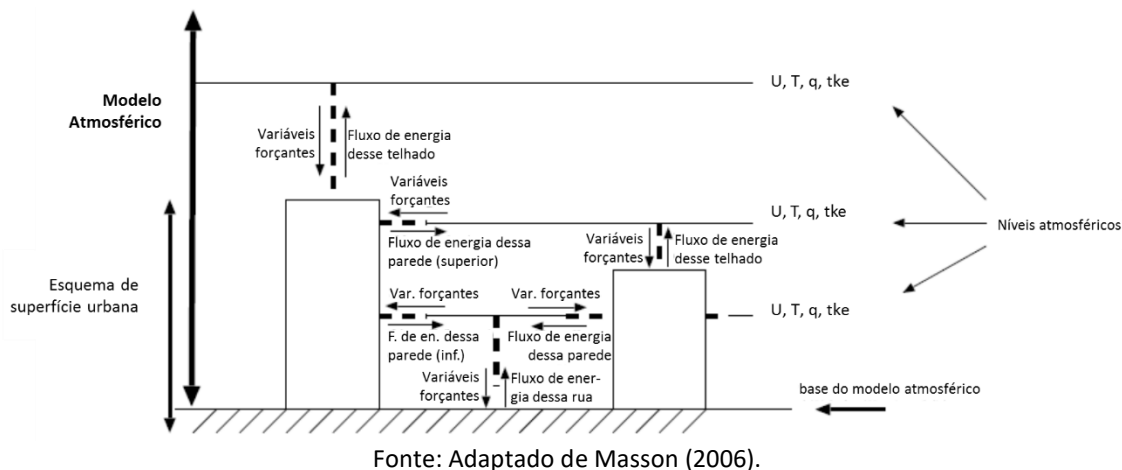


Figura 10 – Esquema simplificado de uma modelo de dossel urbano de múltiplas camadas.



<sup>13</sup> Método de força-restauração (*'force-restore method'*): utilizado em modelos de solo, que é conceitualmente dividido em duas camadas, uma mais final, próximo ao topo e com temperatura uniforme e outra, mais profunda, com temperatura distinta, mas também uniforme. O resultado líquido é que o fluxo de energia que vem da camada mais profunda, tende a restaurar a energia na camada do topo, opondo-se a qualquer forçante radiativa da atmosfera (AMS, 2016a).

O modelo '*Town Energy Budget*' (TEB) é exemplo de um modelo de camada única, que considera a abordagem de cânion urbano, generalizado pela extensão horizontal da cidade. O tratamento separado das paredes e ruas permite considerar diferentemente processos derivados de, por exemplo, distintos fatores de visão de céu, estruturas termais ou fontes de aquecimento dentro dos edifícios, além de processos influenciados pela presença de água ou neve sobre as ruas (MASSON, 2000). As características das cidades são consideradas no TEB como (MASSON, 2000):

- Os edifícios têm a mesma altura e largura na malha do modelo, com o nível da cobertura sendo o nível da superfície do modelo atmosférico.
- O cânion urbano é definido pelo espaço entre os edifícios locados frente a frente ao longo de uma rua, de extensão maior que sua largura. Não são considerados os efeitos de sombreamento dentro do cânion.
- Qualquer orientação de rua é possível e todas possuem a mesma probabilidade de existir. Os valores que caracterizam cada superfície do cânion são a média dos valores considerando os efeitos da orientação.

As características do ar dentro do cânion são dados que devem ser informados. A temperatura e umidade do ar são consideradas uniformes dentro do cânion. Para o perfil da velocidade do vento, o modelo assume o decaimento logarítmico a partir da primeira camada do modelo atmosférico até o topo dos edifícios e o decaimento exponencial dentro no cânion.

Karam *et al.* (2010) propuseram o t-TEB, que incorpora modificações do TEB para adaptá-lo às condições de uma cidade tropical. O t-TEB considera a maior intensidade do aquecimento das superfícies urbanas, a presença de condição de convecção natural e um sistema de drenagem mais realista, que impõe restrições à transferência de água interceptada pelas coberturas e ruas para as camadas subsuperficiais do solo, permitindo a simulação das enchentes. Além disso, foram feitas modificações para melhor caracterizar a cidade tropical, incorporando alguma assimetria no cânion urbano e a complexidade de seu perfil vertical (que possui uma rugosidade média e elementos individuais que se sobressaem em altura), assim como as condições maior instabilidade de seu clima. O t-TEB foi validado com dados observados para a cidade do Rio de Janeiro.

O '*Single-layer urban canopy model*' (SLUCM), desenvolvido por Kusaka *et al.* (2001), é similar ao TEB, com a diferença que utiliza múltiplos esquema de cânion, tratados independentemente. Wang *et al.* (2011 e 2013) incorporaram ao esquema do SLUCM a possibilidade de discriminar diversos materiais (concreto, asfalto, grama, tijolo, cascalho etc.) para cada face do cânion. Além disso, os autores implementaram um módulo hidrológico, para representar o fluxo e o armazenamento de água, considerando processos de evaporação da vegetação e outros pavimentos porosos, heterogeneidade no transporte da água e sistemas de múltiplas camadas de cobertura verde. Yang *et al.* (2015) implementaram novas parametrizações no esquema do balanço de energia SLUCM para considerar processos hidrológicos relativos ao calor latente produzido por fonte

antropogênica, à irrigação de jardins urbanos, à evaporação em pavimentos e ao aumento da evapotranspiração potencial da vegetação em áreas construídas (efeito oásis).

O '*Vegetated Urban Canopy Model*' (VUCM), desenvolvido por Lee e Park (2007), incorporam a vegetação ao modelo SLUCM, possibilitando considerar seus efeitos sobre a velocidade do vento, assim como a distribuição da energia dentro do cânion. O VUCM também pode considerar os balanços de energia da vegetação e do solo.

Freitas *et al.* (2007) utilizaram o *Town Energy Budget* (TEB), acoplado ao *Regional Atmospheric Modelling System* (RAMS) (PIELKE *et al.*, 1992) para simular a propagação da brisa marítima pela Região Metropolitana de São Paulo, em duas situações, com e sem a área urbanizada (e a ilha de calor formada por ela). Para a parametrização do TEB, a área urbanizada foi dividida em dois tipos: o tipo urbano 1, de predominância de prédios altos que, de acordo com mapeamento de imagem do sensor Landsat-5, ocupava 400km<sup>2</sup>; e o tipo urbano 2, de áreas residenciais e industriais com baixa altura, que ocupava 1.097km<sup>2</sup>. Os autores comparam os resultados obtidos com o TEB a resultados obtidos com a utilização do modelo que já está acoplado ao RAMS, a versão 2 do *Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model* (LEAF-2) (WALKO *et al.*, 2000). O LEAF-2 é uma SVAT que adapta a representação das cidades aos parâmetros biofísicos utilizados para modelar superfícies naturais (FREITAS *et al.*, 2007, p. 45). Estão parametrizadas no LEAF-2 40 classes de uso do solo (WALKO; TREMBACK, 2005), das quais os autores utilizaram: 'áreas de cerrado' ('*wooded grassland*'), 'áreas de cultivo / áreas mistas' e 'áreas urbanas'.

O RAMS é um esquema de aninhamento múltiplo de grades, em que as equações são simultaneamente resolvidas em malhas computacionais interativas para diferentes escalas espaciais, sendo que as grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes de sistemas atmosféricos de menor escala, como escoamentos sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície, e as grades de menor resolução, por sua vez, são usadas para simular sistemas atmosféricos de grande escala, que interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades de maior resolução, fornecendo as condições de fronteira (GOUVÊA, 2007, p. 25). O modelo assume que em cada ponto da grade existem diferentes tipos de cobertura, chamados de *patches*, que interagem apenas verticalmente (com a coluna de ar), de acordo com a sua cobertura fracional, desprezando-se as interações horizontais (entre os diferentes *patches*) (GOUVÊA, 2007, p. 31).

Os autores afirmam que a parametrização biofísica do LEAF-2 é satisfatória para análises de longas séries temporais ou áreas bastantes extensas, mas não para a previsão meteorológica em cidades ou análises em mesoescala a escala local (FREITAS *et al.*, 2007, p.45). De fato, os resultados obtidos pelos autores, para as duas grades aninhadas de 16 e 4km, mostram a superioridade do TEB em modelar o balanço de energia em São Paulo para um período de 48 horas: a temperatura do ar modelada pelo TEB obteve um coeficiente de concordância de 0,90 com a temperatura observada; para a umidade, o coeficiente foi ligeiramente menor, 0,85 (FREITAS *et al.*, 2007).



Em estudos mais recentes, Souza *et al.* (2016) e Morais *et al.* (2016) utilizaram modelos acoplados à versão do RAMS desenvolvida para o Brasil, o *Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) (FREITAS *et al.*, 2009), em duas (10 e 5km) e três (16, 4 e 1km) grades aninhadas, respectivamente.

No estudo de Souza *et al.* (2016), o balanço de energia da cidade de Manaus foi modelado com o TEB com o objetivo de simular os impactos da urbanização sobre o clima regional e o clima da cidade em um cenário futuro, onde a extensão da área urbanizada é o dobro da atual. As modificações previstas no cenário futuro são a de aumento da temperatura do ar e da precipitação na cidade, afetando a qualidade de vida de seus moradores. Além disso, essas modificações devem influenciar também a dispersão da pluma de poluição e a concentração de aerossóis na região. Assim, os autores apontam para a necessidade de políticas públicas que promovam um crescimento ordenado da cidade, capaz de garantir o conforto ambiental da população.

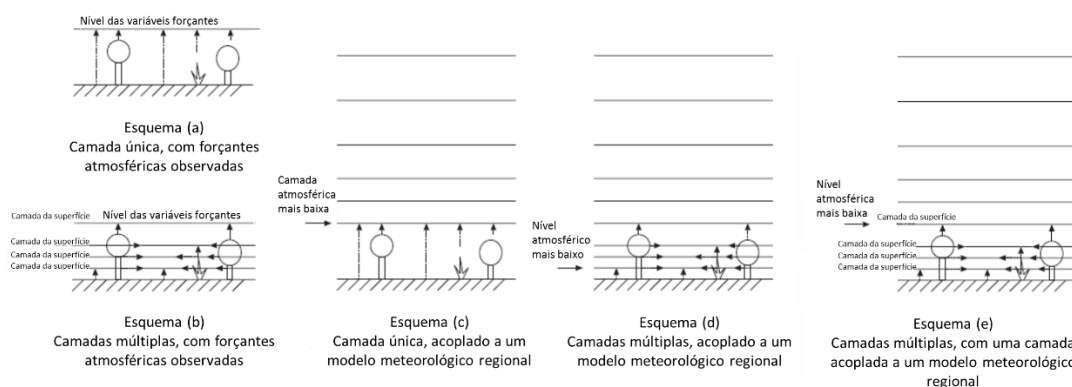
No estudo de Morais *et al.* (2016), o objetivo foi avaliar o impacto (positivo) da vegetação no clima da cidade de São Paulo, corroborando outros estudos que mostram que a presença da vegetação contribui para a diminuição da temperatura do ar. O estudo apresenta uma metodologia para incorporar as diferenças na morfologia da cidade e a presença da vegetação no cálculo do balanço de energia. O TEB foi utilizado para modelar quatro tipos distintos de ocupação urbana, conforme identificados por Gouvêa (2007) em imagens do satélite CBERS-2B: o urbano 1, com alta densidade de edificações e de desenvolvimento vertical; o urbano 2, com uma mescla de edificações de alto e médio porte; o urbano 3, com edificações menores e ruas estreitas; e o suburbano, que é transição entre as regiões urbanizadas e a região rural. Já a vegetação, identificada em mapeamento de imagens do satélite Landsat 7, foi modelada com o LEAF, versão 3, que já está acoplado ao BRAMS.

Yang *et al.* (2015) avaliaram as novas parametrizações implementadas no SLUCM para simular a resposta do balanço de energia à determinados processos hidrológicos. Os autores utilizaram um esquema de acoplagem com o modelo meteorológico '*Weather Research and Forecasting*' (WRF) (CHEN *et al.*, 2011) e observaram que as novas parametrizações melhoraram o desempenho do modelo, em especial para o fluxo de calor latente, mais impactado pelos processos hidrológicos. As simulações em quatro cidades (Pequim, Vancouver, Phoenix e Montreal) obtiveram boa concordância com os dados observados. Dos processos considerados, os autores observaram que a evaporação nas superfícies de pisos permeáveis tem a menor contribuição relativa (<0.1%), por que o processo dura apenas enquanto há chuva e por um curto período após a chuva. A contribuição da irrigação varia de perto de 7% em Pequim a cerca de 69% em Phoenix. O efeito oásis contribui mais em Phoenix, Vancouver e Montreal (>10%) que em Pequim. A adoção de telhados verdes foi simulada, observando-se a redução da temperatura de superfície dos telhados e do fluxo de calor para dentro dos edifícios o que contribui para a eficiência energéticas dos mesmos.

O m-TEB foi desenvolvido como um esquema de camadas múltiplas por Hamdi e Masson (2008) e Masson e Seity (2009). O propósito foi implementar um esquema de múltiplas camadas, que permite a descrição mais detalhada dos processos em toda a extensão vertical do dossel urbano, em um esquema de camada única, que pode ser facilmente acoplados aos modelos regionais.

Como em outro modelo de múltiplas camadas, o ‘*Urban Canopy Parameterization*’ (UCP) proposto por Martilli *et al.* (2002), uma força de arrasto é aplicada em cada uma das camadas do dossel urbano para considerar o efeito dos edifícios. Entretanto, o balanço de energia é calculado, não por camada, mas sim por face da parede do cânion, permitindo a representação física desse efeito em apenas uma camada (Figura 11 (e)). Além disso, o UCP tem um maior grau de detalhamento das estruturas urbanas, considerando a orientação das ruas (e paredes) e diferentes alturas de edificações. Atualmente o UCP é chamado de ‘*Building Effect Parameterization*’ (BEP).

Figura 11 – Acoplagem de esquemas de camada única ou camadas múltiplas ao nível atmosférico mais baixo.



Fonte: Adaptado de Hamdi e Schayes (2008).

Outras modificações do TEB, propostas por Lemonsu *et al.* (2012) no TEB-Veg, resultaram da incorporação da vegetação ao cânion urbano. A inclusão da vegetação é feita com um esquema simplificado que considera um gramado, que não produz sombra sobre os demais elementos e que tem um arranjo equiprovável, para a qual é atribuído o mesmo fator de visão de céu, de maneira que a única variável é a fração de vegetação. Esse esquema é oriundo do modelo ‘*Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere*’ (ISBA) (NOILHAN e PLANTON, 1989), um esquema de SVAT largamente utilizado para pesquisa e previsão meteorológica. Outras modificações do esquema são definição de uma orientação específica para a rua e, conseqüentemente, a distinção da evolução termal das duas paredes que conformam o cânion. Com isso, as sombras na vegetação são também consideradas. Além disso, foi utilizada uma nova parametrização, baseada em Santiago e Martilli (2010) para determinar o comprimento da mistura, que fecha a equação de energia cinética turbulenta. Essa versão do TEB já conta com a modelagem de camadas múltiplas, conforme desenvolvido no TEB-ml, por Hamdi e Masson (2008) e Masson e Seity (2009). O modelo foi validado para dois cânions urbanos situados no campus de Sde-Boqer, em Israel.

Martilli (2014) propôs um esquema de acoplagem do WRF com o modelo de dossel urbano BEP (MARTILLI *et al.*, 2002) (Figura 11 (d)), associados ao modelo energético de edifícios '*Building Energy Model*' (BEM) (SALAMANCA *et al.*, 2010), para avaliar como as características da cidade e a atmosfera impactam o conforto térmico, a qualidade do ar e o consumo de energia para o aquecimento e resfriamento dos edifícios. O estudo simulou uma cidade hipotética, de 10 milhões de habitantes, localizada em clima quente e seco, a meia latitude com diferentes configurações de densidade populacional e presença de vegetação. Maior densidade populacional com pequena proporção de vegetação configura a cidade compacta, como Hong Kong; no outro extremo, menor densidade com grande proporção de vegetação configura a cidade dispersa, como as norte-americanas. A resolução espacial horizontal utilizada foi a grade de 1 km. As conclusões desse estudo corroboram as de outros autores, indicando que, do ponto de vista global, as cidades compactas, com pequena proporção de superfície por volume de edifício, são mais eficientes no consumo de energia, porém, do ponto de vista do conforto térmico nas ruas, elas são mais desconfortáveis, pois a combinação de edifícios altos com ruas estreitas reduz a possibilidade de resfriamento noturno e aumenta a concentração de calor antropogênico emitido pelos sistemas de ar-condicionado. O aumento da proporção de vegetação, no clima quente e seco da cidade simulada, é positivo tanto porque reduz a temperatura do ar durante o verão, quanto porque reduz a disponibilidade de terrenos (forçando, portanto, a construção de edifícios altos, com pequena proporção de superfície por volume de edifício) ou quanto porque amplia os espaços para a dispersão de poluentes.

Além desse esquema de acoplagem proposto por Martilli *et al.* (2002), no WRF podem ser utilizados também: a abordagem de massa, que desconsidera os efeitos da urbanização; a acoplagem com o modelo '*Single-layer urban canopy model*' (SLUCM), desenvolvido a partir de Masson (2000) e Kusaka *et al.* (2001) e a acoplagem somente com o BEP.

Ohashi *et al.* (2007) utilizou a acoplagem de outro modelo de dossel urbano multicamadas, o '*Multi-layer urban canopy model*' (MUCM) (KONDO; LIU, 1998 e KONDO *et al.*, 2005) ao modelo energético de edifícios proposto por Kikegawa *et al.* (2003). As forçantes do modelo foram dados meteorológicos observados (Figura 11 (b)). O objetivo foi simular a temperatura do ar na escala local, em um bairro de edifícios de escritórios em Tóquio. A simulação dos dias de semana e de fins de semana, mostrou a importância do calor antropogênico emitido pelos sistemas de ar condicionado, que causaram o aumento de 1 a 2 °C na temperatura dos dias de semana, quando os sistemas estavam em funcionamento.

Os modelos 'computacionais fluido-dinâmicos' (CFD) são alternativa para determinar a estrutura vertical do dossel urbano, já que possibilitam que a atmosfera seja discretizada em vários volumes de controle menores, para os quais são realizados cálculos do balanço de massa, energia e momento individualmente (DANDOU *et al.*, 2005, p.2; BRANDÃO, 2009, p.69). O aspecto negativo desses modelos é seu custo

computacional (DANDOU *et al.*, 2005, p.2). Devido a isso, BRANDÃO (2009) não conseguiu realizar a modelagem fluido-dinâmica completa, incluindo os efeitos do aquecimento das superfícies na movimentação do ar, de seu estudo de caso – cerca de 40 quadras no bairro de Moema em São Paulo.

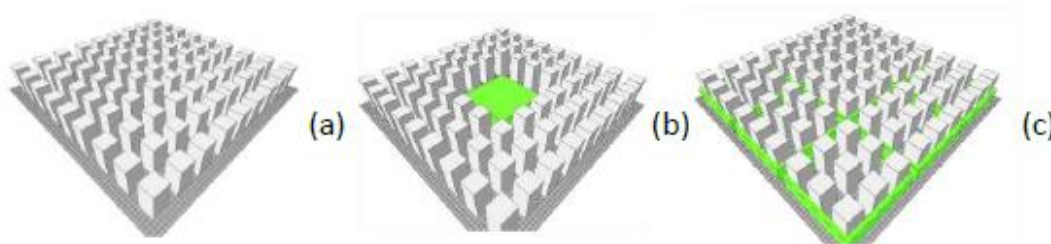
O ENVI-met, proposto por Bruse e Fler (1998), é também um modelo de camadas múltiplas baseado nas leis fundamentais da dinâmica de fluidos e na termodinâmica. O modelo simula a interação entre superfícies construídas, vegetação e atmosfera no ambiente urbano, em microescala: tipicamente 0,5m de resolução espacial e de 1 a 5 segundos de resolução temporal, em um período que varia normalmente entre 24 e 72 horas. Assim é possível avaliar mudanças pontuais no ambiente urbano, como a substituição de um material de determinada fachada do cânion, ou a abertura de algum jardim ou o plantio de árvores nas calçadas. São quatro módulos iterativos: atmosférico, que calcula os campos de velocidade, umidade, poluentes, vapor e temperatura; solo, que calcula temperatura e umidade no solo e corpos d'água; superfícies, que calcula os fluxos nas superfícies horizontais e verticais, pavimentos, telhados e paredes dos edifícios; e, vegetação, que calcula a temperatura da folhagem, trocas de calor sensível e latente no nível das copas. O ambiente urbano é modelado por uma malha, não um cânion, sendo que para cada ponto da malha é possível atribuir características dos materiais e coberturas e sua altura. A vegetação é considerada com grande detalhe, a partir de parâmetros como o 'Leaf Area Density' (LAD) e altura de início e fim das copas. Por sua escala, representação realística do ambiente urbano e interface intuitiva, o ENVI-met é bastante utilizado por arquitetos para avaliar as condições de conforto ambiental no nível do pedestre.

Johansson *et al.* (2013) propuseram a combinação de dados do modelo regional BRAMS acoplado ao TEB, com dados do modelo de microescala ENVI-met, para avaliar o conforto térmico em diferentes localidades da cidade de São Paulo. As localidades escolhidas são representativas de diferentes combinações de uso e cobertura do solo: área asfaltada, sem árvores ou edifícios (aeroporto de Congonhas); área de edifícios de baixa altura sem vegetação (Brás); área de edifícios altos sem vegetação (Sé); área de edifícios baixos com vias arborizadas (Jardim Europa); área de edifícios altos com vias arborizadas (Jardim Paulista); e áreas de vegetação arbórea (Parque do Ibirapuera). O modelo regional BRAMS/TEB, na configuração proposta por Freitas *et al.* (2007), foi utilizado para simular a temperatura e umidade relativa do ar e a velocidade média diurna do vento, na grade final de 1km. Esses dados foram forçantes para o modelo de microescala que calculou a temperatura de superfície, a temperatura média radiante e a velocidade do vento no nível da rua, em uma grade de 4m, para áreas selecionadas de 2,2 ha nos diferentes tecidos urbanos. O esquema, embora não tenha sido validado com dados observados, permitiu a diferenciação das condições de conforto térmico em cada localidade.

Duarte *et al.* (2015) e Yahia e Johansson (2014) avaliaram o impacto de diferentes configurações urbanas com o modelo ENVI-met e dados meteorológicos observados. No primeiro caso, uma área de 10.000m<sup>2</sup> (9 quadras de 100x100m), densamente

construída no bairro da Bela Vista em São Paulo, foi simulada em três cenários: (a) existente, com todas as quadras ocupadas por nove edifícios de 15 andares (45m de altura uma densidade de 1764 hab/ha); (b) futuro, com a implantação de um parque na quadra central, perfazendo 1000m<sup>2</sup>; e (c) futuro, com a mesma quantidade de área verde que o cenário (b), porém com essa área distribuída ao longo das ruas (Figura 12). Os resultados da simulação comprovaram o efeito “oásis”, de resfriamento, que os parques têm sobre as áreas densamente construídas das cidades. Esse mesmo efeito é menos intenso no cenário (c) e é restrito aos pontos sob as árvores.

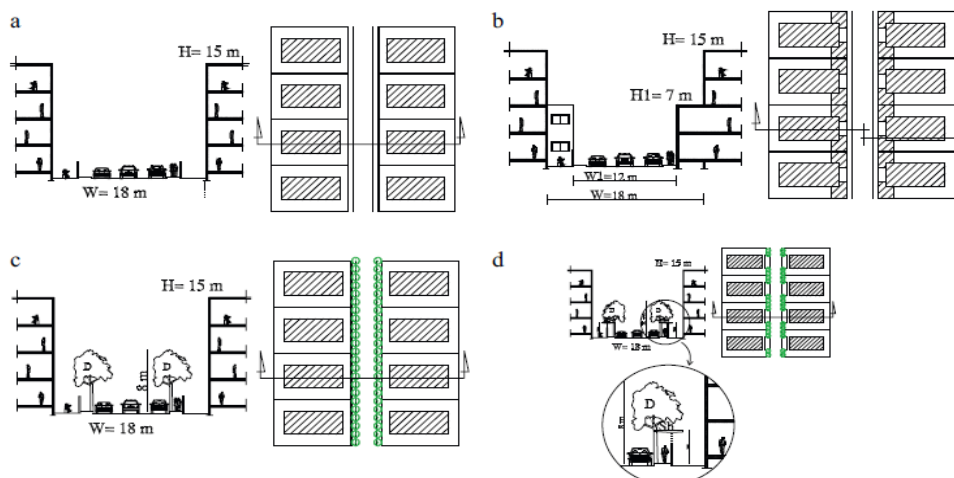
Figura 12 – Os cenários simulados por Duarte *et al.* (2015).



Fonte: Duarte *et al.* (2015).

Yahia e Johansson (2014) avaliaram soluções distintas de desenho urbano, considerando a forma dos prédios e sua combinação com elementos de vegetação e de sombreamento (Figura 13), e de orientação das ruas para atenuar o desconforto no verão quente e no inverno frio, do clima seco da cidade de Damasco. Os resultados da simulação mostram a importância da orientação das ruas na promoção do conforto térmico do pedestre, não só nas calçadas, mas também entre os prédios. Assim, os autores recomendam a incorporação desses espaços nos projetos de desenho urbano. Embora a vegetação proporcione um maior conforto no verão, no inverno a situação se inverte. Os autores também recomendam a adoção de elementos móveis de sombreamento ou espécies decíduas, que permitam que a radiação solar alcance o chão nos dias de inverno.

Figura 13 – Os cenários simulados por Yahia e Johansson (2014).



Fonte: Yahia e Johansson (2014).

### 3. CONCLUSÕES

Os modelos hidrológicos desde muito têm sido utilizados para entender o que acontece com a chuva e dimensionar os dispositivos adequados para lidar com as águas pluviais em nas cidades. Embora o recorte espacial, por excelência, seja o da bacia hidrográfica, alguns modelos possuem a capacidade de tratar o fluxo distribuído em células especificadas de acordo com cada problemática. Outro avanço observado foi a conjunção de modelos hidrológicos, para a determinação do volume e escoamento da vazão, com modelos de propagação da vazão pelo sistema urbano, representado por suas superfícies impermeáveis, permeáveis, seus corpos d'água e suas redes de infraestrutura. Determinados modelos são capazes de modelar o transporte de sedimentos e material inorgânico para analisar a qualidade da água.

Mais recentes, os modelos climáticos têm sido utilizados para simular o impacto da urbanização no clima regional e as condições climáticas no interior das cidades. Progressivamente os modelos têm avançado no detalhamento da representação das características das cidades, como diversidade de alturas das edificações ou materiais de construção, reproduzindo seus efeitos sobre o clima regional com maior precisão. Por outro lado, o aumento da capacidade computacional, contribui para a simulação mais fiel das condições microclimáticas.

São muitos os modelos, esquemas e métodos utilizados para a simulação e os cálculos climáticos, hidrológicos e hidráulicos. Os modelos climáticos e, em menor proporção os hidrológicos, são muito diversos em relação aos dados de entrada e os resultados adicionais oferecidos por cada modelo. Para fins dessa revisão, os modelos hidrológicos e climáticos foram agrupados de acordo com o conceito por trás de sua formulação matemática e sua discretização espacial. É de interesse também a comparação de como a vegetação urbana é representada. Tanto os modelos que foram descritos nas seções 2.3 e 3.3, quanto outros modelos semelhantes, que foram encontrados na consulta à literatura são apresentados nos Anexos 1 e 2. Ressalta-se que os modelos foram selecionados, não de maneira exaustiva, mas sim, a partir de estudos urbanos recentes realizados, sobretudo, no Brasil.

A maior parte dos modelos foram validados individualmente. A comparação direta dos modelos foi feita apenas recentemente, para os modelos climáticos. O *'Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes'* (PILPS) (GRIMMOND *et al.*, 2009; 2010 e 2011) teve como objetivo é identificar as abordagens que minimizam os erros na simulação dos fluxos e determinar qual o grau de complexidade necessária para simulações acuradas. Das conclusões do projeto, destaca-se que nenhum modelo foi capaz de simular com acurácia todos os fluxos do balanço de energia. Os resultados sugerem, portanto, que a maior complexidade do modelo, não necessariamente se reflete em seu melhor desempenho (GRIMMOND *et al.*, 2010). Há evidências claras de que a má escolha de valores para os parâmetros pode provocar grandes modificações no desempenho dos modelos (GRIMMOND *et al.*, 2011). Para tanto, os autores sugerem que os modelos sejam aplicados com cautela e com consciência das

implicações e limitações para a tomada de decisões. Essas conclusões são complementares às de Masson (2006). Aplicáveis também aos modelos hidrológicos, suas recomendações são de que objetivo da simulação deve guiar a escolha do modelo e que, para os estudos de casos em que há dados observados de boa qualidade, os modelos empíricos são suficientes.

Aspectos como a implementação dos modelos em softwares ou a disponibilidade de documentação que permita reproduzi-los, além da possibilidade de adequação dos modelos às condições climáticas e às especificidades das cidades brasileiras, também devem ser considerados. Adicionalmente, deve-se observar a capacidade de cada modelo de reproduzir as características urbanas de interesse. A incerteza associada a cada simulação não é mencionada em muitos trabalhos, ainda que esse seja um aspecto de crucial importância quando se trata de políticas públicas.

A configuração das cidades tem impacto no clima e nos processos hidrológicos urbanos. O planejamento urbano deve ordenar a ocupação da cidade, por meio da definição de suas estruturas (dimensões máximas e mínimas dos edifícios e espaços entre eles, largura das ruas e espaçamento entre elas), da cobertura do solo (impermeabilização, pavimentos, vegetação, solo exposto, água etc.), dos materiais construtivos e do metabolismo (entendido como calor, água e poluentes gerados pela atividade humana).

O regime de chuvas é impactado pela urbanização, trazendo consequências tanto para os processos hidrológicos, quanto climáticos nas cidades. Para além disso, é preciso considerar processos como a transferência de calor latente produzido por fontes antropogênicas, a irrigação urbana, a evaporação da água sobre superfícies impermeabilizadas e aquecidas pelo sol e o aumento da evapotranspiração potencial da vegetação circundada por áreas construídas, considerados em Yang *et al.* (2015).

Em que pese o conhecimento teórico da relação entre processos hidrológicos e climáticos nas cidades, eles foram tratados separadamente na maior parte dos modelos, com a exceção de alguns poucos modelos climáticos que buscaram incorporar o ciclo da água em sua formulação. Mais comum, é a representação de mecanismos como os reservatórios de retenção e infiltração, as áreas alagáveis com vegetação ou não, os telhados verdes entre outros, para avaliar sua eficácia na diminuição e retardo do pico de vazão ou na diminuição da temperatura do ar ou na eficiência energética dos edifícios. A incorporação desses mecanismos é uma oportunidade para a abordagem integrada do ciclo de água e energia nas cidades.

Os modelos certamente são ferramentas úteis para simular cenários futuros para avaliar as consequências de cada proposição urbanística. Entretanto, como aponta a arquiteta Eleonora Assis, é preciso reconhecer os limites da modelagem e do planejamento, sem deixar-se levar pelo pensamento racionalista “de que o mundo poderia ser controlado e organizado, se eu pudesse apreendê-lo e representá-lo corretamente” (ASSIS, 2007, p. 135).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, P. L. **Capacidade de interceptação pelas árvores e suas influências no escoamento superficial urbano**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, 2015.
- ARAÚJO, C. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 21–29, 2000.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 1, p. 1–26, jan. 2003.
- ARONICA, G.; CANNAROZZO, M. Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model. **Journal of Hydrology**, v. 238, n. 1–2, p. 35–43, 2000.
- ASSIS, E. S. de. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. RUA - **Revista de Arquitetura e Urbanismo**, v. 9, p. 20–25, 2007.
- ASSIS, E. S. de. Bases teóricas para a aplicação da climatologia ao planejamento urbano. *In*: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Salvador: AUUFBA/LACAM-ANTAC, p. 134–139, 1997.
- BARBIRATO, G. M. **Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió – AL**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, 1998.
- BARBIRATO, G. M. Modelo de balanço de energia aplicado ao caso da cidade de Maceió – AL, e suas implicações para o planejamento urbano. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 3, n. 2, 2010.
- BARBUGLI, R. A.; RORIZ, M. Mapeamento das temperaturas do ar na cidade de Araraquara, São Paulo, Brasil. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 2005, Maceió. **Anais...** Maceió, 2005.
- BARLOW, J. F. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. **Urban Climate**, v. 10, n. P2, p. 216–240, 2014.
- BENEVOLO, L. **História da arquitetura moderna**. 3a. ed. Editora Perspectiva, 2001.
- BEST, M. J. Representing urban areas within operational numerical weather prediction models. **Boundary-layer Meteorology**, v. 114, n. 1, p. 91–109, jan. 2005.
- BRANDÃO, R. S. **As interações espaciais urbanas e o clima: incorporação das análises térmicas e energéticas no planejamento urbano**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Planejamento) – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2009.



BRAVO, J. M.; GUSTAVO, D.; PICCILLI, A.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais. *In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Anais...*, São Paulo: ABRH, 2007.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling & Software**, v. 13, n. 3, p. 373–384, 1998.

CABRAL, J. J. S. P.; MASCARENHAS, F. B.; CASTRO, M. A. H.; MIGUEZ, M. G.; PEPLAU, G. R.; BEZERRA, A. A. *In: RIGHETTO, A. M. (Org.). Modelos computacionais para drenagem urbana*. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 112–148.

CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. . Predicting floods from urban development scenarios: case study of the dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban Water*, v. 3, n. 1–2, p. 113–124, 2001.

CAMPANA, N. A; TUCCI, C. E. M. Previsão da vazão em macrobacias urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. **Revista brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, p. 19–33, 1999.

CHEN, F.; KUSAKA, H.; BORNSTEIN, R.; CHING, J.; GRIMMOND, C. S. B.; GROSSMAN-CLARKE, S.; LORIDAN, T.; MANNING, K. W.; MARTILLI, A.; MIAO, S.; SAILOR, D.; SALAMANCA, F. P.; TAHA, H.; TEWARI, M.; WANG, X.; WYSZOGRODZKI, A. A.; ZHANG, C. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 273–288, 2011.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, v. 19, n. 1, p. 1–20, 1973.

COUTTS, A. M.; TAPPER, N. J.; BERINGER, J.; LOUGHNAN, M.; DEMUZERE, M. Watering our cities: the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the australian context. **Progress in Physical Geography**, v. 37, n. 1, p. 2–28, 2012.

CUO, L.; LETTENMAIER, D. P.; MATTHEUSSEN, B. V.; STORCK, P.; WILEY, M. Hydrologic prediction for urban watersheds with the distributed hydrology-soil-vegetation model. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 21, p. 4205–4213, 2008.

DANDOU, A.; TOMBROU, M.; AKYLAS, E.; SOULAKELLIS, N.; BOSSIOLI, E. Development and evaluation of an urban parameterization scheme in the Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D10, p. D10102, 2005.

DIAS, V. S. **Uso de modelo hidrológico em bacia hidrográfica urbana para previsão de enchentes. Estudo de caso: Microbacia do córrego Jataí - Uberlândia/MG**. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU).  
Uberlândia: 2015.

DIAZ, O.; TUCCI, C. E. M. Regionalização de hidrogramas unitários de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Engenharia**, v. 7, n. 2, p. 19–30, 1987.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 2000.

DUARTE, D. H. S. Variáveis urbanísticas e microclimas urbanos - modelo empírico e proposta de um indicador. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v. 3, n. 2, 2010.

DUARTE, D. H. S.; SHINZATO, P.; GUSSON, C. DOS S.; ALVES, C. A. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 2015.

EMMANUEL, R. (Org.). **Urban Climate challenges in the tropics: rethinking planning and design opportunities**. 1a. ed. London: Imperial College Press, 2016.

ENVIRONMENT AGENCY. **Sustainable Drainage Systems (SUDS)**. Bristol BS32: 2009. Disponível em: <[http://www.irha-h2o.org/files/newsletters/attachments/n27/3\\_SUDS.pdf](http://www.irha-h2o.org/files/newsletters/attachments/n27/3_SUDS.pdf)>. Acesso em: nov. 2016.

ERELL, E. The application of urban climate research in the design of cities. **Advances in Building Energy Research**, v. 2, n. 1, p. 95–121, 2008.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings**. 1a. ed. New York: Earthscan, 2011.

ERELL, E.; WILLIAMSON, T. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. **International Journal of Climatology**, v. 26, n. 12, p. 1671–1694, out. 2006.

FERREIRA, M. J. **Estudo do balanço de energia na superfície da cidade de São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 2010.

Force-restore method. *In*: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). **Glossary of Meteorology**. 2a. ed. 2016a. Disponível em: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Force-restore\\_method](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Force-restore_method)>. Acesso em: 20 jun. 2010.

FRANCO, F. D. M. **A construção do caminho: a estruturação da metrópole pela conformação técnica das várzeas e planícies fluviais da bacia de São Paulo**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 2005.

- FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; DIAS, P. L. S. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43–65, 2007.
- FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the regional atmospheric modeling system (CATT-BRAMS) – part 1: model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 8, p. 2843–2861, 2009.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. DE. Avaliação das cheias em bacia urbana com diferentes graus de impermeabilização. *In*: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA. 2004, **Anais...** 2004.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. DE. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do arroio Cancela - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99–108, 2006.
- GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Estimativa dos parâmetros do modelo iph ii para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 4, p. 103–120, 1998.
- GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- GOUVÊA, M. L. **Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 2007.
- GRIMMOND, C. S. B. *et al.* Initial results from phase 2 of the international urban energy balance model comparison. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 244–272, 2011.
- GRIMMOND, C. S. B. *et al.* The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 49, n. 6, p. 1268–1292, 2010.
- GRIMMOND, C. S. B. *et al.* Urban surface energy balance models: model characteristics and methodology for a comparison study. *In*: BAKLANOV, A.; SUE, G.; ALEXANDER, M.; ATHANASSIADOU, M. (Org.). **Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 97–123.
- GRIMMOND, C. S. B.; CLEUGH, H. A.; OKE, T. R. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment**. part b. **Urban Atmosphere**, v. 25, n. 3, p. 311–326, 1991.

- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, p. 922–940, 1999.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 7, p. 792–810, 2002.
- HAMDI, R.; MASSON, V. Inclusion of a drag approach in the town energy balance (TEB) scheme: offline 1d evaluation in a street canyon. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 10, p. 2627–2644, 2008.
- HAMDI, R.; SCHAYES, G. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. 7, p. 973–982, 2008.
- HEBBERT, M. Climatology for city planning in historical perspective. **Urban Climate**, v. 10, n. p2, p. 204–215, 2014.
- HEBBERT, M.; JANKOVIC, V. Cities and climate change: the precedents and why they matter. **Urban Studies**, v. 50, n. 7, p. 1332–1347, 2013.
- JOHANSSON, E.; SPANGENBERG, J.; GOUVÊA, M. L.; FREITAS, E. D. Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil. **Urban Climate**, v. 6, p. 24–43, 2013.
- KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. **Water Resources Research**, v. 43, n. 5, 2007.
- KARAM, H. A.; FILHO, A. J. P.; MASSON, V.; NOILHAN, J.; FILHO, E. P. M. Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 109–120, 2010.
- KIKEGAWA, Y.; GENCHI, Y.; YOSHIKADO, H.; KONDO, H. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. **Applied Energy**, v. 76, n. 4, p. 449–466, 2003.
- KONDO, H.; GENCHI, Y.; KIKEGAWA, Y.; OHASHI, Y.; YOSHIKADO, H.; KOMIYAMA, H. Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: structure of the urban canopy model and its basic performance. **Boundary-layer Meteorology**, v. 116, n. 3, p. 395–421, 2005.
- KONDO, H.; LIU, F.-H. A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model. **Journal of Japanese Society of Atmospheric Environmental**, v. 33, p. 179–192 (em japonês), 1998.
- KRATZER, A. **The climate of cities (Das Stadtklima)**. Traduzido pela American Meteorological Society. 1956.

- KUSAKA, H.; KONDO, H.; KIKEGAWA, Y.; KIMURA, F. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. **Boundary-layer Meteorology**, v. 101, n. 3, p. 329–358, 2001.
- LEE, S.-H.; PARK, S.-U. A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling. **Boundary-layer Meteorology**, v. 126, n. 1, p. 73–102, 2007.
- LEMONSU, A.; MASSON, V.; SHASHUA-BAR, L.; ERELL, E.; PEARLMUTTER, D. Inclusion of vegetation in the town energy balance model for modelling urban green areas. **Geoscientific Model Development**, v. 5, n. 6, p. 1377–1393, 2012.
- HOWARD. L. The Climate of London. London: 1883. Disponível em: <<http://www.urban-climate.org/resources/classic-texts/>>. Acesso em: 15 out. 2016.
- MANSELL, M.; ROLLET, F. Water balance and the behaviour of different paving surfaces. **Water and Environment Journal**, v. 20, n. 1, p. 7–10, 2006.
- MARTILLI, A. An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality. **Urban Climate**, v. 10, n. 2, p. 430–446, 2014.
- MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M. W. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. **Boundary-layer Meteorology**, v. 104, p. 261–304, 2002.
- MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. Urban flood control through a mathematical cell model. **Water International**, v. 27, n. 2, p. 208–218, 2002.
- MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G.; MAGALHES, L. P. C. MODCEL: an integrated cell model for river basin simulation. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 104, p. 75–86, 2007.
- MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-layer Meteorology**, v. 94, n. 3, p. 357–397, 2000.
- MASSON, V. Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, n. 1–3, p. 35–45, 2006.
- MASSON, V.; SEITY, Y. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 7, p. 1377–1397, 2009.
- MCGRANE, S. J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 13, p. 2295–2311, 2016.
- McPHERSON, M. B. **Hydrological Effects of urbanization**. Paris: UNESCO, 1974.
- MEYN, S. K. **Heat fluxes through roofs and their relevance to estimates of urban heat storage**. Tese (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – University of British Columbia. 2000.

MIGUEZ, M. G. **Modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro: 2001.

MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B.; VERÓL, A. P. MODCEL: a mathematical model for urban flood simulation and integrated flood control design. *In: CONVEGNO NAZIONALE DI IDRAULICA URBANA. Anais...* Venezia: 2011.

MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 57, n. 3–4, p. 229–244, 1997.

MILLS, G.; CLEUGH, H.; EMMANUEL, R.; ENDLICHER, W.; ERELL, E.; MCGRANAHAN, G.; NG, E.; NICKSON, A.; ROSENTHAL, J.; STEEMER, K. Climate information for improved planning and management of mega cities (needs perspective). **Procedia Environmental Sciences**, v. 1, p. 228–246, 2010.

MISHRA, S. K.; SAHU, R. K.; ELDHO, T. I.; JAIN, M. K. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. **Water Resources Management**, v. 20, n. 5, p. 643–660, 2006.

Monin–obukhov similarity theory. *In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY (AMS). Glossary of meteorology*. 2a. ed., 2016b. Disponível em: <[http://glossary.ametsoc.org/wiki/Monin-obukhov\\_similarity\\_theory](http://glossary.ametsoc.org/wiki/Monin-obukhov_similarity_theory)>. Acesso em: Out. 2016.

MORAIS, M. V. B. DE; FREITAS, E. D. DE; URBINA GUERRERO, V. V.; MARTINS, L. D. A modeling analysis of urban canopy parameterization representing the vegetation effects in the megacity of São Paulo. **Urban Climate**, v. 17, p. 102–115, 2016.

MOTA JR., J. C. **Simulação hidrológica de uma bacia urbana: arroio Dilúvio**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 1982.

NASCIMENTO, N. DE O.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L.; BRITTO, A. L. Águas urbanas na passagem do século XIX ao XX: o trabalho de Saturnino de Brito. **Revista Da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 1, p. 102–133, 2013.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **Estimation of direct runoff from storm rainfall**. 2a. ed. Washington, DC: U.S. Dept. of Agriculture, 2004. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/viewerFS.aspx?hid=21422>>. Acesso em: Out. 2016.

NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Washington: U. S. Department of Agriculture (USDA), 1986. (TR-55).

NEVES, M. G. F. P. DAS; PEPLAU, G. R.; SOUZA, V. C. B. DE. Simulações hidrológico-hidrodinâmicas de alternativas para mitigação de problemas de drenagem urbana em Maceió - AL. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. Anais...* Salvador: 2008.

NG, E.; REN, C. (Org.). **The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning**. Routledge, 2015.

NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 536–549, 1989.

OKE, T. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Geneve, 2004.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2a. ed. Psychology Press, 1987.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 8, p. 769–779, 1973.

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, n. 1–3, p. 103–113, 1988.

OKE, T. R. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, n. 1–3, p. 179–190, 2006.

OKE, T. R. The study of the physical climates of cities is young. *In*: W.G. BAILEY; TIMOTHY R. OKE; WAYNE R. ROUSE (Org.). Urban environments. Surface climates of Canada. McGill-Queen's University Press, 1997. 303–327 p.

OLESON, K. W.; BONAN, G. B.; FEDDEMA, J.; VERTENSTEIN, M.; GRIMMOND, C. S. B. An urban parameterization for a global climate model. part i: formulation and evaluation for two cities. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 47, n. 4, p. 1038–1060, 2008.

OLLISCHONN, W.; RUTINÉIA, T. Introduzindo hidrologia. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2008. Disponível em: <[http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila\\_hidrologia/apostila.html](http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html)>. Acesso em: Out. 2016.

PARTNERSHIP FOR ADVANCING TECHNOLOGY IN HOUSING (PATH). **The Practice of Low Impact Development**. Washington: U.S. Department of Housing and Urban Development, 2003.

PEREIRA, L. M. **Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: 2008.

PEREIRA FILHO, A. J.; DOS SANTOS, C. C. Modeling a densely urbanized watershed with an artificial neural network, weather radar and telemetric data. **Journal of Hydrology**, v. 317, n. 1–2, p. 31–48, 2006.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A

- comprehensive meteorological modeling system - RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 49, p. 69–91, 1992.
- PIRES, I. M. PLANASA: avaliação dos resultados e perspectivas. **Revista DAE**, v. 121, p. 30–37, 1979.
- PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 11–19, 1996.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). **Lei nº16.402, de 22 de março de 2016. Lei de Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo.**
- RALLISON, R. E.; MILLER, N. Past, present, and future scs runoff procedure. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAINFALL-RUNOFF MODELING. 1981, Mississipi. Anais... Mississipi: [S.N.], p. 14, 1981.
- REN, C.; NG, E. Y.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2213–2233, dez. 2011.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2016a.
- ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality**. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency (EPA), 2016b.
- SALAMANCA, F.; KRPO, A.; MARTILLI, A.; CLAPPIER, A. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations—part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, n. 3–4, p. 331–344, 2010.
- SANTIAGO, J. L.; MARTILLI, A. A dynamic urban canopy parameterization for mesoscale models based on computational fluid dynamics Reynolds-averaged Navier–Stokes microscale simulations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 137, n. 3, p. 417–439, 2010.
- SANTOS, I. G.; LIMA, H. G.; ASSIS, E. S. DE. Influência da geometria urbana e da inércia térmica na alteração do clima urbano: uma abordagem preditiva. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** São Paulo: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2003.
- SANTOS, C. C. DOS; FILHO, A. J. P. Modelagem hidrológica urbana por meio de redes neurais artificiais: uma aplicação para a bacia do rio Tamanduateí em São Paulo, SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 2, p. 149–159, 2003.
- SEABRA, O. C. DE L. **Os meandros dos rios nos meandros do poder Tietê e Pinheiros: valorização dos rios e das várzeas na cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 1987.



- SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M. E. Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 61–68, 2003.
- SHEPHERD, J. M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. **Earth Interactions**, v. 9, n. 12, p. 1–27, jul. 2005.
- SILVEIRA, A. L. L. Hidrologia urbana no Brasil. *In*: BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M. (Org.). **Drenagem Urbana, Gerenciamento, Simulação, Controle**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.
- SILVEIRA, A. L. L. DA. Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, p. 93–107, 1997.
- SILVEIRA, A. L. L. DA; DESBORDES, M. Modelo hidrológico distribuído urbano com poucos parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, n. 1, p. 35–48, 1999.
- SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 270–292, jul. 2002.
- SOUCH, C.; GRIMMOND, S. Applied climatology: urban climate. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 2, p. 270–279, 2006.
- SOUZA, D. O. DE; ALVALÁ, R. C. DOS S.; NASCIMENTO, M. G. DO. Urbanization effects on the microclimate of Manaus: a modeling study. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 237–248, 2016.
- STEEMERS, K.; RAMOS, M.; SINOUE, M. Urban diversity. *In*: STEEMERS, K.; STEANE, M. A. (Org.). **Environmental diversity in architecture**. 1a. ed. Spon Press, 2004. p. 85–100.
- TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrological Earth System Science**, v. 11, n. 1, p. 468–482, 2007.
- TODINI, E. Rainfall-runoff modeling - past, present and future. **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1–3, p. 341–352, 1988.
- TRAVASSOS, L. R. F. C. O esgotamento do binômio: canalização de córregos e construção de avenidas de fundo de vale. *In*: ENCONTRO NACIONAL DA ANPUR. 2007, Belém. **Anais...** Belém: 2007.
- TRAVASSOS, L. R. F. C. **Revelando os rios: novos paradigmas para a intervenção em fundos de vale urbanos na cidade de São Paulo**. Tese (Doutorado em Ciência Ambiental) - Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: 2010.
- TSO, C. P.; CHAN, B. K.; HASHIM, M. A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. **Energy and Buildings**, v. 14, n. 2, p. 143–152, 1990.
- TSO, C. P.; CHAN, B. K.; HASHIM, M. A. Analytical solutions to the near-neutral atmospheric surface energy balance with and without heat storage for urban

climatological studies. **Journal of Applied Meteorology**, v. 30, n. 4, p. 413–424, abr. 1991.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. *In*: REBOUÇAS, A. DA C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Org.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 1a. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 1999.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana**. Brasília: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das Inundações Urbanas**. Porto Alegre: Global Water Partnership, 2005.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, p. 195–9, 2003.

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B.; SILVEIRA, A. L. L. Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas. **RBE caderno de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, 1989.

TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J.; SIMÕES-LOPES, M. Modelo IPH II para simulação de precipitação-vazão na bacia: alguns resultados. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 1981. p. 83–103,

TUCCI, C. E. M.; ZAMANILLO, E. A.; PASINATO, H. D. **Sistema de Simulação Precipitação Vazão I- PHS1**. Porto Alegre: UFRGS-curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 1989.

UNIVERSITY OF PORTSMOUTH. A vision of Britain through time. Disponível em: <<http://www.visionofbritain.org.uk>>. Acesso em: 16 out. 2016.

WALKO, R. L. *et al.* Coupled atmosphere–biophysics–hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, n. 6, p. 931–944, 2000.

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. **Modifications for the Transition from LEAF-2 to LEAF-3**. Boulder: Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies, 2005.

WANG, J.; ENDRENY, T. A.; NOWAK, D. J. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 44, n. 1, p. 75–85, 2008.

WANG, Z. H.; BOU-ZEID, E.; SMITH, J. A. A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 139, n. 675, p. 1643–1657, 2013.

WANG, Z. H.; BOU-ZEID, E.; SMITH, J. A. A spatially-analytical scheme for surface temperatures and conductive heat fluxes in urban canopy models. **Boundary-layer Meteorology**, v. 138, n. 2, p. 171–193, 2011.

WIGMOSTA, M.; NIJSSEN, B.; STORCK, P. The distributed hydrology soil vegetation model. *In*: SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. (Org.). **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications**. Littleton, CO: Water Resource Publication, 2002. 7–42 p.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, 1994.

XIAO, Q.; MCPHERSON, E. G.; SIMPSON, J. R.; USTIN, S. L. Hydrologic processes at the urban residential scale. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 16, p. 2174–2188, 2007.

YAHIA, M. W.; JOHANSSON, E. Landscape interventions in improving thermal comfort in the hot dry city of Damascus, Syria - the example of residential spaces with detached buildings. **Landscape and Urban Planning**, v. 125, p. 1–16, 2014.

YANG, J.; WANG, Z.-H.; CHEN, F.; MIAO, S.; TEWARI, M.; VOOGT, J. A.; MYINT, S. Enhancing hydrologic modelling in the coupled weather research and forecasting–urban modelling system. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 155, n. 1, p. 87–109, 2015.

### ANEXO 1 – Modelos Hidrológicos

Formulação	Discretização Espacial	Ano	Modelo	Vegetação	Fonte
Conceitual	Concentrado	1971	SCS/CN SCS/Curve number	Considerada implicitamente	NRCS (1986)
		1981	IPH II	Considerada implicitamente	Tucci <i>et al.</i> (1981)
		1985	ABC Análise de Bacias Completas	Considerada implicitamente	<a href="http://www.labsid.eng.br">http://www.labsid.eng.br</a>
		1989	IPHS1	Considerada implicitamente	Tucci <i>et al.</i> (1989a)
Conceitual	Semi-distribuído	1969	SWMM Storm Water Management Model	Considerada explicitamente como área permeável ou LID	Rossman e Huber (2016a e 2016b)
		1982	IPH III	Considerada implicitamente	Mota Jr. (1982)
		1989	IPH IV	Considerada implicitamente	Tucci <i>et al.</i> (1989)
		2000	Semi-distributed linear non-linear model	Considerada explicitamente como área permeável	Aronica e Cannarozzo (2000)
		2005	MODCEL	Considerada explicitamente como área permeável	Miguez (2001); Mascarenhas e Miguez (2002); Mascarenhas <i>et al.</i> (2007)
		2007	Physically based numerical model to understand hydrologic processes at the urban residential scale	Considerada explicitamente	Xiao <i>et al.</i> (2007)
		2008	UFORE-Hydro Urban Forest Effects – Hydrology	Considerada explicitamente	Wang <i>et al.</i> (2008)

Formulação	Discretização Espacial	Ano	Modelo	Vegetação	Fonte
Conceitual	Completamente distribuído	1999	Modelo Hidrológico Distribuído Urbano com Poucos Parâmetros	Considerada explicitamente	Silveira e Desbordes (1999)
	Completamente distribuído	2008	Modelo Hidrológico Distribuído para estimativa do escoamento superficial em uma microbacia urbana	Considerada explicitamente	Pereira (2008)
	Completamente distribuído	2008	DHSVM Distributed-Hydrology-Soil-Modificado Vegetation Model	Considerada explicitamente	Cuo <i>et al.</i> (2008)
Empírico	Concentrado	2003	Redes Neural Artificial	Considerada implicitamente	Pereira Filho e Santos (2006)

## ANEXO 2 – Modelos climáticos

Formulação	Discretização Espacial	Ano	Sigla	Modelo	Vegetação	Fonte
Simplificado	Placa	1990 1991	SEBM	Surface Energy Balance Model	Considerada implicitamente	Tso <i>et al.</i> (1990 e1991)
		2002	LUMPS	Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme	Considerada implicitamente	Grimmond e Oke (2002)
SVAT	Massa	2005	NKUA	Penn State/NCAR Mesoscale Model with urban modifications	Separada	Dandou <i>et al.</i> (2005)
Dossel Urbano	Camada única	1997	UCLM	Urban canopy-layer climate model	Separada	Mills (1997)
		2000	TEB	Town Energy Balance	Separada	Masson (2000)
		2001	SLUCM	Single Layer Urban Canopy Model-	Separada	Kusaka <i>et al.</i> (2001)
		2006	CAT	Canyon Air Temperature	Considerada explicitamente	Erell e Williamson (2006)
		2007	VUCM	Vegetated Urban Canopy Model	Considerada explicitamente	Lee e Park (2007)
		2008	CLMU	Community Land Model - Urban Areas	Considerada explicitamente	Oleson <i>et al.</i> (2008)
		2010	t-TEB	Tropical Town Energy Balance	Separada	Karam <i>et al.</i> (2010)
2002 2004	GCTTC	Green Cluster Thermal Time Constant	Considerada explicitamente	Shashua-Bar e Hoffman (2003)		

Formulação	Discretização Espacial	Ano	Sigla	Modelo	Vegetação	Fonte
Dossel Urbano	Camada múltipla	1998 2005	MUCM	Multi-layer urban canopy model	Considerada explicitamente	Kondo e Liu (1998) e Kondo <i>et al.</i> (2005)
		2002	BEP	Building Effect Parameterization	Separada	Martilli <i>et al.</i> (2002)
		2008 2009	TEB-ml	Town energy balance with multi-layer option	Separada	Hamdi e Masson (2008)
		2012	TEB-Veg	Town energy balance - Vegetation	Considerada explicitamente	Lemonsu <i>et al.</i> (2012)