

NOTAS CONCEITUAIS E METODOLÓGICAS EM CLIMA URBANO E ILHAS DE CALOR*

Andrews José de Lucena**

Resumo: o artigo aborda os principais trabalhos em clima urbano na literatura internacional recente, atendo-se a investigação da ilha de calor, principal manifestação do clima urbano. Inicialmente, traz-se uma fundamentação teórica sobre clima urbano e ilha de calor, discutindo-se a definição, caracterização, propriedades, tipologia, monitoramento e mitigação das ilhas de calor. A seção seguinte destaca os principais métodos utilizados no tratamento da ilha de calor, a análise de séries temporais, o sensoriamento remoto e a modelagem atmosférica. A última seção ressalta a importância das pesquisas, sugere métodos mais integrados e uma leitura mais consistente da teoria nos trabalhos de ilhas de calor.

Palavras-chave: climatologia; clima urbano; ilhas de calor; teoria; método.

CONCEPTUAL AND METHODOLOGICAL NOTES ON URBAN CLIMATE AND URBAN HEAT ISLANDS

Abstract: the article discusses the main works in urban climate on recent international literature, in particular on the investigation of urban heat islands, the main manifestation of the urban climate. Initially, it brings up a theoretical background about urban climate and urban heat island, discussing the definition, characterization, properties, typology, monitoring and mitigation of urban heat islands. The following section highlights the main methods used in the treatment of urban heat island, the time series analysis, remote sensing and atmospheric modeling. The last section highlights the importance of research, suggests more integrated methods and a more consistent reading of theory on the work of heat islands.

Keywords: climatology; urban climate; heat island; theory; methodology.

* Este artigo é parte da tese de doutorado do autor, "*A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro*", defendida em julho de 2012 no Programa de Engenharia Civil (habilitação em Ciências Atmosféricas em Engenharia) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

** Professor Assistente do curso de Geografia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – campus Seropédica. e-mail: lucenageo@yahoo.com.br.

CLIMAT URBAIN ET ÎLOTS DE CHALEUR: NOTES CONCEPTUELLES ET MÉTHODOLOGIQUES

Résumé: cet article veut récupérer la littérature internationale récente sur le climat urbain, en soulignant le phénomène des îlots de chaleur. Au début, on discute les fondements théoriques autour du climat urbain et des îlots de chaleur, cela veut dire la définition, la caractérisation, les propriétés, la typologie, le monitoring et la mitigation de ces îlots. Ensuite, on indique les principaux méthodes utilisés pour la compréhension des îlots de chaleur urbains : l'analyse de séries temporelles, la télédétection et la modélisation atmosphérique. Finalement, on signale l'importance des recherches autour de ces thèmes, même si l'on doit remarquer le besoin de méthodes plus intégrées et d'une interprétation plus consistante de la théorie en ce qui concerne les recherches sur les îlots de chaleur urbains.

Mots-clés: climatologie; climat urbain; îlots de chaleur; théorie; méthode.

1. Fundamentação teórica em clima urbano e ilhas de calor

O clima urbano é um sistema complexo, singular à cidade. Lugar de profundas alterações nos parâmetros atmosféricos, abrangendo circulação, turbulência e dispersão do ar, albedo e estocagem de calor, evapotranspiração e balanço de energia na superfície (TAHA, 1997; ARNFIELD, 2003; KANDA, 2006). A ilha de calor é a principal manifestação do clima urbano e um dos principais problemas ambientais do século XXI (RIZWAN *et al.*, 2008), embora outros fenômenos associados ou resultantes façam parte do sistema clima urbano, como a poluição atmosférica e as inundações.

No início do século XIX, em 1833, Howard inaugurou as primeiras pesquisas em clima urbano, que, mais tarde, sustentaram a análise da ilha de calor urbana,¹ ao comparar a temperatura da cidade com o meio rural, encontrando, na primeira, valores bem mais elevados, acima de 2°C (STEWART, 2011). Em meados do século XX, MANLEY (1958), pela primeira vez, denominou o gradiente térmico mais elevado, encontrado na cidade, como ilha de calor. Os trabalhos de Landsberg e Chandler para a cidade de

¹ Embora naquela época não fosse empregada a nomenclatura *ilha de calor urbana*, optou-se, ainda assim, por seu emprego nesse momento do texto.

Londres são obras clássicas para o estudo do clima urbano. LANDSBERG (1956) comparou o centro urbano de Londres com suas imediações e observou médias térmicas anuais superiores na cidade, principalmente no que concerne à temperatura mínima, bem como no que diz respeito às chuvas e ao nevoeiro. Em relação à umidade relativa e à velocidade do vento, foi observado um decréscimo de 6% e 25%, respectivamente. CHANDLER (1965) monitorou a ilha de calor urbana e encontrou diferenças de até 2,0°C na área central, no verão, em relação a sua circunvizinhança. No transcorrer do século XX, e do atual, novos estudos em ilhas de calor foram desenvolvidos (ARNFIELD, 2003; STEWART, 2011). TAHA (1997) esclarece as causas e efeitos da ilha de calor, de modo particular, o papel do calor antropogênico na sua intensificação, os impactos no albedo da superfície e na evapotranspiração. VOOGT e OKE (2003) resumem os principais aspectos, implicações e efeitos da ilha de calor, destacando sua forma, intensidade e a localização do seu núcleo mais quente. ROTH (2007) reúne os principais trabalhos sobre ilhas de calor para as regiões subtropicais. RIZWAN *et al.* (2008) discutem os conceitos básicos, metodologias e as ferramentas usadas na compreensão, determinação e mitigação da ilha de calor.

1.1. Definição, caracterização, propriedades e tipologia

A ilha de calor urbana² (do inglês *Urban Heat Island - UHI*) é o calor característico das áreas urbanas, quando comparadas com seus arredores (não-urbanizados) e, geralmente, refere-se ao aumento na temperatura do ar, mas pode igualmente referir-se ao calor relativo da superfície ou materiais subsuperficiais. Desse modo, a ilha de calor é uma medida de diferença (VOOGT, 2002), que não se evidencia a partir de uma medida absoluta da temperatura, indevidamente empregada em alguns trabalhos na literatura. Portanto, a definição conceitual e quantitativa do fenômeno ilha de calor é necessária para evitar incorreções nas análises espaciais do clima urbano.

² A literatura internacional geralmente emprega a nomenclatura *ilha de calor urbana*, pois se entende que o fenômeno é uma anomalia do “urbano”, isto é, da cidade. Entretanto, não será adotada a nomenclatura, haja vista que será proposta, na última seção do artigo, uma nomenclatura mais adequada para grandes áreas metropolitanas de países tropicais, a *ilha de calor metropolitana*.

Outras expressões derivadas da ilha de calor urbana surgem, a saber: ilha térmica, expressão sinônima; ilha de frescor urbana (IFU) ou vale urbano fresco (VUF) (RIZWAN et al, 2008), núcleos mais frios no interior ou ao redor das ilhas urbanas de calor; ilhota de calor (GARCÍA, 1999), núcleo secundário de calor, geralmente de menor proporção e intensidade que a ilha de calor principal da cidade, que aparece localizada nas áreas suburbanas e arredores; ilha seca (GARCÍA, 1999), fenômeno próprio dos núcleos mais quentes da ilha de calor, onde os setores mais quentes apresentam umidade relativa mais baixa que o subúrbio e arredores.

Uma categoria de ilha de calor urbana adotada atualmente é a ilha de calor urbana da superfície (do inglês *Surface Urban Heat Island* - SUHI). Essa categoria difere da UHI por captar a temperatura de superfície por meio do sensoriamento remoto, enquanto aquela se restringe em registrar a temperatura do ar por meio do termômetro de uma estação convencional ou automática ou de instrumentos de campanha de campo. A SUHI é uma medida indireta da temperatura e exige a correção das propriedades da superfície radiativa que influenciam a emissão e reflexão da radiação de comprimentos de ondas espectrais detectadas pelo sensor (VOOGT e OKE, 2003).

A ilha de calor é, assim, nomeada porque o padrão espacial do contorno das isotermas dá forma a uma ou a várias feições de ilhas. A distribuição das isotermas depende da configuração da área urbanizada, que se caracteriza por um elevado gradiente térmico no limite urbano-rural, seguida por uma ascensão gradual da temperatura em direção ao núcleo da cidade. Configura-se, deste modo, a ilha de calor clássica, com seu núcleo no centro da cidade ou na área central da cidade (*downtown*) que identifica o distrito comercial central (*central business district – CBD*) (Figura 1.1). Entretanto, identifica-se um outro padrão, com a disseminação de núcleos igualmente quentes pelo perímetro urbano, desfazendo a ilha de calor clássica, que, geralmente, ocorre em grandes regiões metropolitanas de uso do solo bastante heterogêneo.

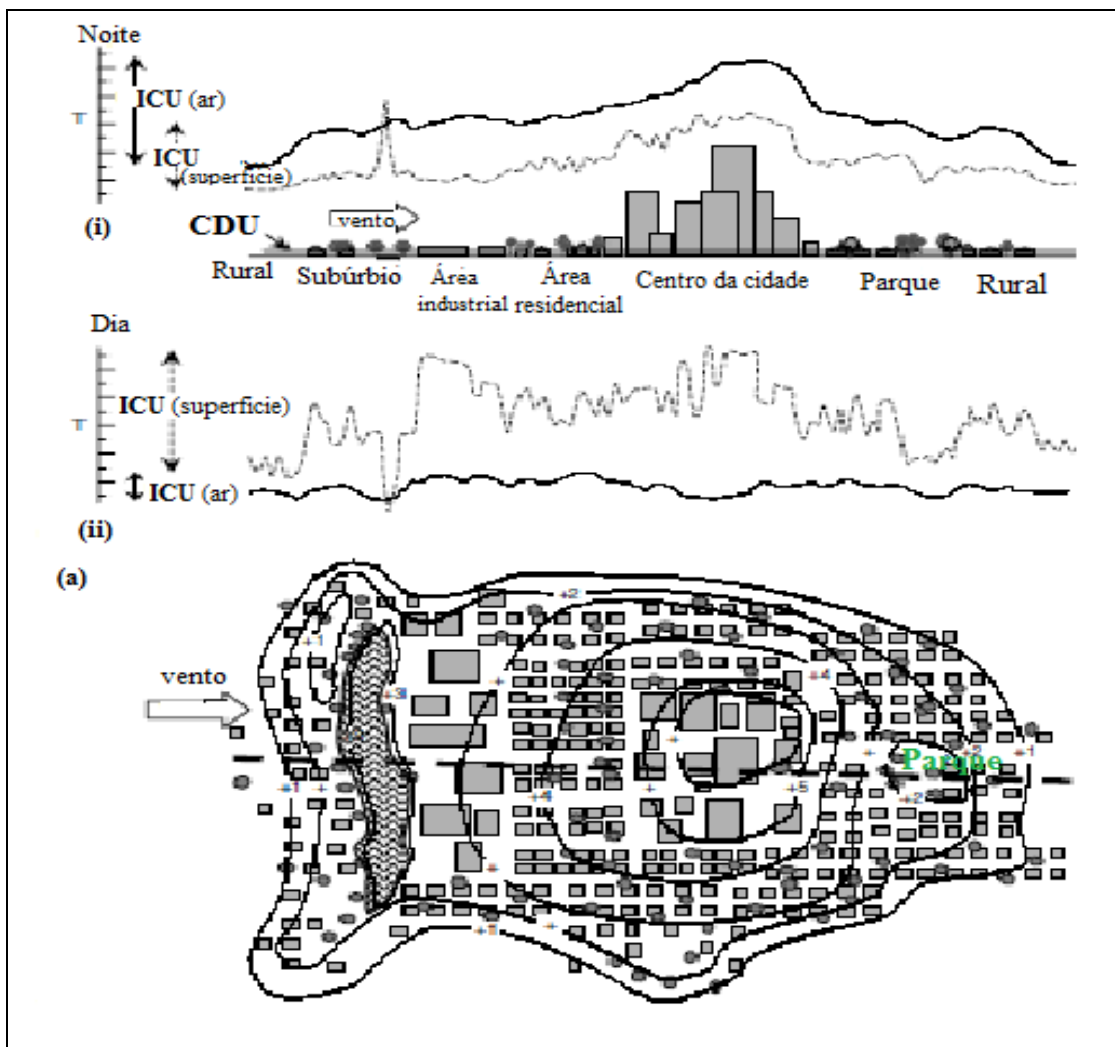


Figura 1.1: Esquema hipotético da configuração vertical e espacial da ilha de calor: a) as seções transversais de temperaturas do ar, medidas na CDU (camada do dossel urbano), e as temperaturas de superfície (i) à noite e (ii) de dia. b) Modelo que representa os padrões espaciais da temperatura do ar que compõe a ilha de calor urbana (ICU). No centro da figura, que demarca o centro da cidade (*downtown*), tem-se a maior isoterma (6°C), enquanto nas franjas e no parque as isotermas declinam (1° e 2°C , respectivamente).

Fonte: adaptado de VOOGT (2002).

A ilha de calor caracteriza-se por três aspectos principais: forma, intensidade e localização do seu núcleo mais quente. Esses aspectos são distintos em cada cidade, em função do momento do dia e da época do ano, do tempo atmosférico, da localização geográfica, incluindo sua morfologia natural, como morros, corpos hídricos e áreas verdes, e das propriedades térmicas dos materiais que compõem a superfície urbana.

A variabilidade diuturna e sazonal são fatores importantes. Durante o dia, podem ser detectados e contrastados os períodos mais favoráveis para a manifestação da ilha de calor, seja no horário de maior aquecimento diurno ou mesmo no momento de resfriamento noturno (SUN *et al.*, 2009). Sazonalmente, distintos sistemas atmosféricos atuam, ora no verão, ora no inverno, que determinam situações mais secas, que, geralmente, são marcadas por ilhas de calor mais intensas, ou úmidas, geralmente evidenciadas por ilhas de calor mais amenas (ROTH, 2007).

O padrão espacial é influenciado pelas características locais de superfície, como parques, corpos hídricos e adensamento das áreas construídas. A topografia, em conformação litorânea ou em uma situação de fundo de vale, por exemplo, pode alterar as características espaciais da ilha de calor.

A ilha de calor apresenta, assim como a variabilidade espacial, uma variabilidade temporal, isto é, diuturna, que ocorre em consequência das diferenças nas taxas de resfriamento entre áreas urbanas e rurais. Tais diferenças ocorrem em função da superfície urbana, das condições atmosféricas ou até mesmo da sazonalidade anual.

A intensidade da ilha de calor esteve associada ao tamanho da população da cidade, conforme sugere o trabalho de OKE e MAXWELL (1974). Neste caso, uma reta logarítmica sinaliza que cidades mais populosas favorecem o aumento da intensidade da ilha de calor, mais comum nas cidades da Europa e da América do Norte. A análise mostra que a maior intensidade da ilha de calor ocorre sob um céu sem nuvens e com a diminuição da velocidade do vento. No trabalho de PONGRACZ *et al.* (2006), para Budapeste, uma das cidades mais populosas da Hungria, os autores reconhecem uma correlação positiva da intensidade da ilha de calor com a sua densidade demográfica.

Contudo, as circunstâncias favoráveis para o desenvolvimento de uma ilha de calor são caracterizadas por uma concentração relativamente alta de fontes de calor nas cidades (OKE 1982; 1987; OKE *et al.*, 1991). As propriedades térmicas dos materiais das construções também facilitam a condução de calor mais rapidamente que o solo e a vegetação das áreas rurais, contribuindo para um aumento no contraste de temperatura. A perda de calor durante a noite, por radiação infravermelha para a atmosfera e para o espaço, é parcialmente compensada nas cidades pela liberação de

calor das fontes antropogênicas, tais como veículos, indústrias, construções em geral e materiais de construção relativamente densos.

Na cidade, a taxa de evapotranspiração, tipicamente mais baixa, acentua ainda mais o contraste de temperatura com suas redondezas. O sistema de drenagem (bueiros) rapidamente remove a maior parte da água das chuvas, de modo que apenas uma pequena parcela da radiação absorvida é utilizada para evaporação (calor latente) e a maior parte dessa radiação é utilizada para aquecer a superfície terrestre e o ar diretamente (calor sensível). Por outro lado, as superfícies úmidas das áreas rurais (lagos, riachos, solo e vegetação) aumentam a fração de radiação absorvida que é utilizada para evaporação (BRETZ *et al.*, 1998; TAHA, 1997; ARNFIELD, 2003).

O desenvolvimento das camadas não está isolado no perímetro urbano. O limite de influência é maior durante o dia, onde existe um aumento da convecção do ar aquecido pelos processos térmicos ou mecânicos (elevação do ar pela rugosidade da superfície). À noite, a camada limite contrai-se devido à estabilização vertical. Não obstante, a convecção térmica é capaz de desestabilizar o ar da zona rural durante a noite, produzindo advecção sobre a cidade. A camada limite urbana apresenta um perfil vertical térmico diferente das áreas adjacentes rurais, devido principalmente ao fluxo de calor sensível, antropogênico ou não, liberado pela camada do dossel urbano, além de um arrasto do ar friccionado, em movimentações provocadas pela ilha de calor.

Os ventos e as nuvens são importantes controladores atmosféricos da ilha de calor. A ilha de calor urbana desenvolve-se, na maior parte das vezes, quando ventos de escala sinótica são fracos, uma vez que fortes ventos misturariam o ar da cidade e das áreas rurais e diminuiriam o contraste de temperatura. Nessas condições, o aquecimento relativo da cidade, comparado com seus arredores, pode promover uma circulação convectiva do ar: o ar relativamente quente ascende sobre o centro da cidade e é trocado por ar mais frio e mais denso, convergente das zonas rurais. A coluna de ar ascendente acumula aerossóis sobre a cidade formando uma nuvem de poeira (poluentes), que podem se tornar muitas vezes, mais concentrados sobre uma área urbana do que sobre as áreas rurais. Em uma atmosfera turbulenta, a velocidade do

vento aumenta, de forma que a mistura turbulenta reduz diferenças exponenciais da temperatura do ar próximo à superfície (FREITAS e DIAS, 2005).

A umidade atmosférica também participa do controle. Quando elevada, reduz a intensidade da ilha térmica, enquanto a umidade mais baixa permite maior radiação da superfície. A advecção é igualmente um controle importante na caracterização e intensidade da ilha de calor. Os ventos terrestres em cidades litorâneas podem experimentar advecção mais fresca, no verão, quando as temperaturas da superfície do mar estão mais suaves do que aquelas da terra, e o aquecimento advectivo durante a estação do inverno, na medida em que a temperatura de superfície do mar está relativamente mais alta à temperatura da superfície continental. Sob tais circunstâncias, é importante avaliar o impacto relativo da advecção nas estações rurais e urbanas. A advecção em escala local, induzida por circulações da ilha de calor pode igualmente modificar temperatura e umidade locais e alterar as taxas de resfriamento (VOOGT, 2002). As Tabelas 1.1 e 1.2 resumizam as principais causas para a manifestação da ilha de calor e os controladores atmosféricos da sua magnitude.

Tabela 1.1: Possíveis causas da ilha de calor urbana (ICU)

Causa	Descrição
Superfície urbana	A ampliação da superfície conduz ao aquecimento devido a uma maior absorção de radiação solar; Construções pouco espaçadas reduzem o fator de visão do céu e reduzem a perda de calor radiativo particularmente à noite; O abrigo/telhado das construções reduz a perda de calor convectiva da superfície e próximo da superfície de ar.
Propriedades térmicas da superfície	Materiais de construções urbanas têm uma superfície termal maior, ampliando sua capacidade de estocar e suportar calor.
Condições da superfície	A impermeabilização da superfície urbana por construções e pavimentação reduz a evaporação; mais energia é canalizada em calor sensível ao invés de calor latente (calor retornado pela evaporação da água).
Calor antropogênico	Calor liberado por uso de energia urbana em construções e veículos e pelos próprios habitantes da cidade.
Efeito estufa urbano	A atmosfera poluída e mais quente emite mais radiação em direção à superfície da cidade. A umidade urbana reforçada pode também contribuir para esse efeito.

Fonte: adaptado de VOOGT (2002).

Tabela 1.2: Controles atmosféricos na magnitude da ilha de calor urbana (ICU)

Controle	Descrição
Vento	Aumento da velocidade do vento e de sua turbulência diminui a magnitude da ICU.
Vento (advecção)	Transporte horizontal de calor: advecção quente pode reforçar a ICU; advecção fria pode suprimi-la.
Nuvem	A nuvem reduz o arrefecimento radiativo pela superfície; nuvens espessas e baixas têm maior efeito em relação às nuvens finas e altas.
Umidade	Efeitos variáveis

Fonte: adaptado de VOOGT (2002).

A camada limite planetária (CLP) é fundamental para a compreensão do padrão espacial e temporal da ilha de calor (GRIMMOND, 2006). A CLP é uma região da atmosfera, junto à superfície, onde a turbulência é a característica dominante. A

intensidade da turbulência determina a distribuição espacial das propriedades termodinâmicas e dinâmicas e de sua extensão vertical. Sobre áreas continentais, a turbulência é mantida pela ação do vento ao longo do dia, intensificada pela convecção térmica, e contida pela camada de inversão de superfície, durante a noite. Sua extensão vertical varia de 300-1500 m, durante o dia, a 100-300 m na noite. É

“No cenário de um suposto aquecimento global, as ilhas de calor não são diretamente responsáveis, pois se trata de uma anomalia local do clima. Os impactos da ilha de calor são indiretos e têm efeitos sobre as observações de séries temporais de estações, usadas para construir a média da temperatura global. A maioria das estações está localizada nas cidades, e o efeito da ilha de calor pode conduzir a uma contaminação do registro da série.”

afetada pela superfície numa escala de tempo inferior a uma hora e numa escala vertical até 2 km (OKE, 1976; OKE, 1997).

Outra camada, a camada limite urbana (CLU), estende-se acima do nível dos telhados com características produzidas pela natureza da superfície urbana, cuja rugosidade, proporcionada pela presença de prédios relativamente altos, provoca uma aerodinâmica particular. A velocidade do vento reduz-se, mas ocorre um aumento da turbulência e no arrasto produzido pela fricção do ar. A camada do dossel urbano (CDU) é uma porção da CLU estratificada abaixo do nível dos telhados, produzida pelos processos

em microescala localizados nas ruas, entre os prédios (OKE, 1997; GRIMMOND, 2006). Um produto gerado ou identificado na CLD são os vales urbanos (*canyons urbanos*), que incluem as paredes dos edifícios que criam corredores entre edificações altas e concentradas separadas por ruas. Considera-se, para tal, a relação entre a altura, largura e comprimento das construções urbanas e as propriedades térmicas dos materiais que as constituem, como cobertura do solo e materiais de construção, entre outros. No interior do vale (*canyon*), a radiação sofre múltiplas reflexões entre as ruas e as paredes dos edifícios com diferentes absorções (OKE, 1981; OKE, 1987; GRIMMOND, 2006).

A Figura 1.2 sintetiza os processos atmosféricos que ocorrem nas escalas espaciais urbanas: (a) camada limite planetária, (b) camada limite urbana e (c) camada do dossel urbano, ou intraurbana, que representam, respectivamente, as escalas regional, local e micro. À medida que a escala de detalhe se amplia, mais complexa torna-se a compreensão dos processos formadores da ilha de calor.

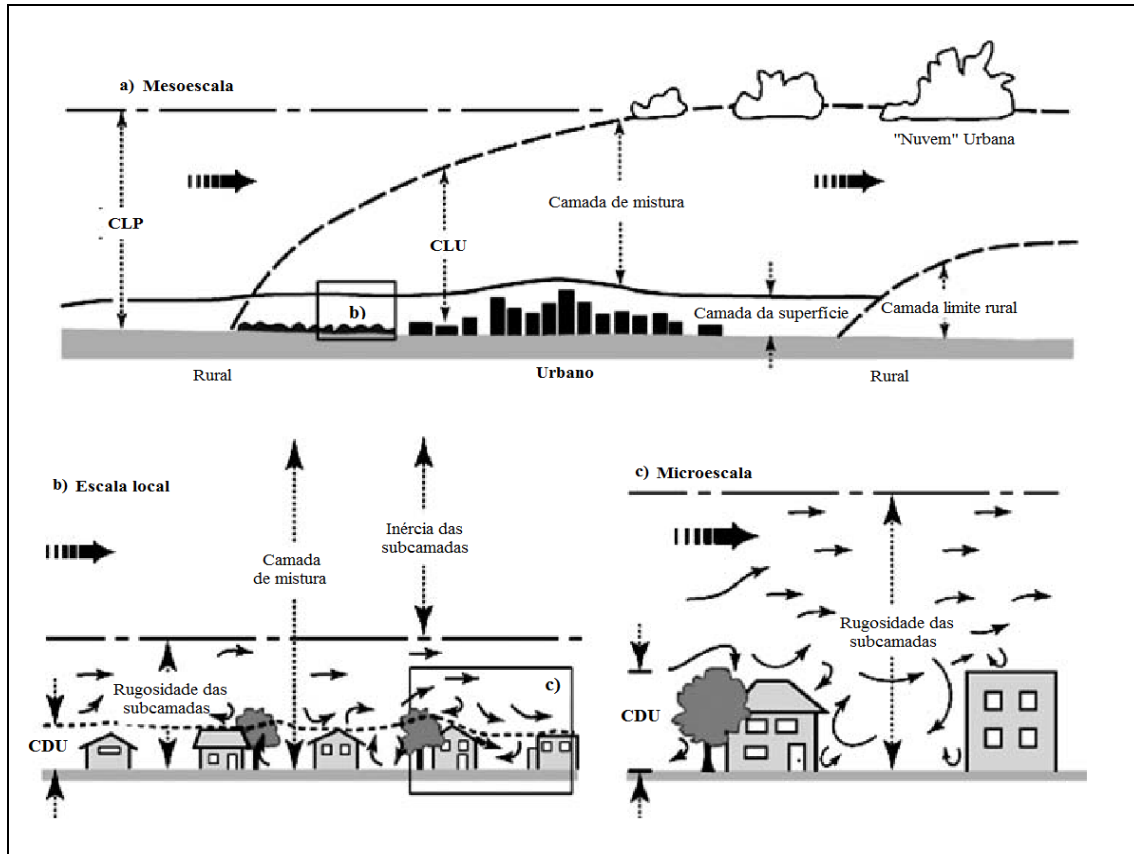


Figura 1.2: Processos atmosféricos nas três escalas espaciais urbanas: (a) camada limite planetária – CLP, (b) camada limite urbana – CLU e (c) camada do dossel urbano (CDU). A seta realçada em negrito em cada uma das figuras secundárias indica o sentido médio do vento. As setas menores, mostradas em (b) e em (c), indicam a natureza do fluxo médio e turbulento.

Fonte: adaptado de GRIMMOND (2006).

Os efeitos da ilha de calor são diversos e, em grande parte, negativos, trazendo implicações para o conforto e para a saúde humana (VOOGT e OKE, 2003). Sabe-se que a principal seqüela é o aumento da temperatura urbana com impactos ambientais, diretos e indiretos, que favorecem o aumento no consumo de energia para fins de refrigeração (KONOPACKI e AKBARI, 2002), a elevação no nível de ozônio na troposfera (ROSENFELD *et al.*, 1998) ou mesmo um aumento nas taxas de mortalidade

(CHANGNON *et al.*, 1996). Trata-se de impactos de alto custo ambiental com elevada pegada ecológica (SANTAMOURIS *et al.*, 2007).

OLESON *et al.* (2011) examinam as características da ilha de calor urbana em um modelo climático global e concluem que o aquecimento urbano e o uso do ar condicionado pode adicionar cerca de $0,01 \text{ W.m}^{-2}$ de calor distribuído globalmente, o que resulta em um pequeno aumento na ilha de calor. Desse modo, os modelos climáticos precisam levar em conta as superfícies urbanas para avaliar o impacto das alterações climáticas sobre o conforto das pessoas no ambiente onde vivem.

REN *et al.* (2010) analisam e revisam os progressos nos estudos dos mapas climáticos urbanos (UCMap). O ambiente térmico e as condições de ventilação do ar dentro da camada do dossel urbano (CDU) são os mais importantes pontos no processo de análise da avaliação climático-ambiental. Sugerem-se ações planejadas para diminuir a liberação de calor antropogênico, melhorando a ventilação do ar, proporcionando mais áreas sombreadas, aumentando a vegetação, criação de vias aéreas para dissipação do ar e o controle do crescimento dos edifícios. Essas ações são recomendações voltadas especialmente para as cidades em rápida expansão dos países em desenvolvimento.

No cenário de um suposto aquecimento global, as ilhas de calor não são diretamente responsáveis, pois se trata de uma anomalia local do clima. Os impactos da ilha de calor são indiretos e têm efeitos sobre as observações de séries temporais de estações, usadas para construir a média da temperatura global. A maioria das estações está localizada nas cidades, e o efeito da ilha de calor pode conduzir a uma contaminação do registro da série. Técnicas para remover os efeitos urbanos podem ser inadequadas (OKE, 1997; CHANGNON, 1999), além de limitarem a intenção em incluir o papel dos atributos urbanos sobre a sua atmosfera.

KRUGER *et al.* (2004) chamam a atenção para a análise de tendência das séries temporais na África do Sul, cuja maioria das estações meteorológicas são classificadas como urbanas, mas não comprometem a análise de tendências, pois estão situadas na periferia das cidades e, portanto, não são significativamente influenciadas pela ilha de calor urbana. Nesse caso, é clara a intenção dos autores em segregar as estações de

qualquer influência do ambiente urbano para que a temperatura registrada seja a do ar livre, valorizando o conceito tradicional do clima.

Em estudo recente, BORNSTEIN *et al.* (2012) investigam as possíveis relações que possam ocorrer entre as mudanças climáticas globais e as ilhas de calor urbana, reforçando a desigualdade entre escalas espaciais, isto é, global e local. Foi mostrada esta análise com dados de temperatura máxima para o período de 1970-2005 para uma região bastante populosa ao sul da Califórnia, que exibia um padrão complexo de resfriamento nas áreas costeiras e de aquecimento em áreas do interior. O resfriamento costeiro foi determinado pelo aquecimento de áreas interioranas, produzidas por invasões da brisa marítima, ou seja, uma reação inversa para o aquecimento global. Para investigar as interações entre aquecimento global e expansão da ilha de calor urbana, pares de locais foram identificados, próximo de fronteiras de resfriamento e aquecimento. Quanto maior o índice de crescimento da cidade, mais rápida é a dilatação da ilha de calor. O resfriamento costeiro é mais provável em climas marítimos da costa oeste, gerando ilhas frias urbanas que segregam o aquecimento global e reduzem o estresse térmico em climas de solo seco e rural, enquanto o aumento de eventos de estresse térmico é mais provável em climas de solos úmido e rural.

Nesse contexto das mudanças climáticas globais, KAWAMOTO *et al.* (2012) exaltam o papel da brisa marítima como uma mitigação da ilha de calor urbana na região metropolitana de Tóquio, no Japão. A brisa marítima da baía de Tóquio é um fator importante para mitigar o aumento da temperatura do ar, principalmente no verão. No entanto, a urbanização contínua mudou não apenas o mecanismo do balanço de energia na superfície urbana, mas também o sistema de brisa do mar na região. Para esclarecer os efeitos da urbanização, um modelo meteorológico de mesoescala foi adotado para análise. Os resultados da simulação sugerem que a expansão da área metropolitana de Tóquio, a partir dos anos de 1970 até a década de 1990, induziu a um aumento da temperatura de superfície, com maior diferença nas zonas interiores. Esses resultados sugerem que o processo de urbanização em curso pode elevar a

temperatura do ar e mudar o sistema de brisa marítima na região metropolitana de Tóquio.

1.2. Breve revisão sobre a produção, monitoramento e mitigação da ilha de calor

Os principais aspectos, implicações e efeitos da ilha de calor são analisados por VOOGT (2002). Para o autor, a ilha térmica é derivada de um clima adverso modificado pelas alterações atmosféricas e de superfície em áreas urbanas. Mudanças na radiação e no balanço de energia da superfície conduzem primeiramente à redução nas taxas de resfriamento nas áreas urbanas, comparadas àsquelas de seus arredores. Apresenta implicações para o conforto humano e saúde, na poluição do ar urbana, na gerência de energia e no planejamento urbano.

Os conceitos, métodos, metodologias e as ferramentas empregadas para compreender e mitigar a ilha de calor são discutidos por RIZWAN *et al.* (2008). Os autores frisam que a ilha de calor é causada pelo aquecimento solar indireto e pelo calor antropogênico. Há uma necessidade de desenvolver métodos para verificar a redução dos efeitos adversos do fenômeno a partir de projetos que utilizem os parâmetros oriundos dos resultados das pesquisas em clima urbano.

GRIMMOND (2006) reúne os recentes progressos na observação e medição do ambiente urbano. Uma atenção é dada à coleta e ao armazenamento de dados por longos períodos, particularmente nas cidades tropicais, e com grande diversidade morfológica e de usos urbanos.

OKE (2006) preocupa-se em melhorar a comunicação em clima urbano, haja vista que diversas áreas do conhecimento tem se interessado por esse tópico, tornando-o um tema interdisciplinar. Criar uma forma de facilitar a interação entre os diversos cientistas, incluindo aqueles que estudam os mecanismos e efeitos quanto à aplicação no planejamento e gestão do espaço geográfico. Uma alternativa eficiente será a utilização de um conjunto de símbolos e terminologias que melhor expressam os resultados, a fim de padronizar as variáveis e auxiliar na comparação e na comunicação dos resultados.

KANDA (2006) revisa os progressos realizados na meteorologia urbana nas últimas décadas. Inicialmente, é apresentada a dificuldade em generalizar superfícies urbanas devido a sua diversidade na aplicação de uma única lei física. A secção 2 descreve as características das superfícies urbanas como o limite inferior da atmosfera. A secção 3 explica as características do ambiente urbano, incluindo os campos de temperatura, de circulação do ar e de precipitação. Na última secção descrevem-se os recentes progressos na modelagem numérica e as tecnologias promissoras, revelando uma futura e possível orientação para estudos meteorológicos urbanos.

GÓMEZ *et al.* (1998) exploram a importância das áreas verdes na cidade de Valência na Espanha e descrevem o papel de amortecimento de áreas verdes em vários aspectos no espaço urbano. Em trabalho mais recente, ALEXANDRIA e JONES (2008) visam o efeito térmico dos telhados e paredes verdes sobre o ambiente construído em um *canyon* urbano de diferentes cidades do mundo (Londres, Montreal, Moscou, Atenas, Beijim, Riyadh, Hong Kong, Brasília e Mumbai). Partindo dessa pesquisa quantitativa, mostrou-se que há um potencial importante para redução das temperaturas urbanas quando o teto do edifício for coberto com vegetação. Em um clima mais quente e seco, o efeito da vegetação é maior. A redução da temperatura é afetada primeiramente pela própria vegetação. Quanto maior a radiação solar incidente, maior será a redução da temperatura quando a superfície é coberta por vegetação.

Sem esgotar a bibliografia, uma ampla discussão em clima urbano é encontrada em TAHA (1997), ARNFIELD (2003), OKE *et al.* (2006), GRIMMOND (2006), KANDA (2006), ROTH (2007) e RIZWAN *et al.* (2008). Um destaque é dado ao artigo de STEWART (2011), que realiza uma revisão crítica acerca das metodologias empregadas nas pesquisas sobre ilhas de calor, que, em sua maioria, revelam uma prática científica incipiente.

2. Métodos empregados nas pesquisas sobre ilhas de calor: breve revisão

A produção bibliográfica em clima urbano é significativa nos últimos 20 anos e tem se concentrado em contribuições nas metodologias e nas técnicas empregadas

(ARNFIELD, 2003; KANDA, 2006; STEWART, 2011), desde as abordagens mais tradicionais, como os estudos de séries temporais climatológicas com análises estatísticas variadas (CHUNG *et al.*, 2004; HOMAR *et al.*, 2010) e o emprego dos transectos de redes móveis e fixas (SUN *et al.*, 2009; MURPHY *et al.*, 2011), até os procedimentos mais recentes e robustos, como é o caso do sensoriamento remoto (STREUTKER, 2003; CHEVAL *et al.*, 2009; STATHOPOULOU and CARTALIS, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010) e da modelagem atmosférica (YOSHIKADO, 1994; EZBER *et al.*, 2007; VAN WEVERBERG *et al.*, 2007; KARAM *et al.*, 2010; OLESON *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2010).

Os métodos empregados delimitam ao menos quatro abordagens: o emprego de transectos fixos e móveis, análise de séries temporais, o sensoriamento remoto e a modelagem atmosférica.

Transectos em redes de estações móveis e fixas distribuem-se a partir de pontos espalhados pela cidade e visam colher os registros, preferencialmente de temperatura (mas também são colhidos dados de umidade relativa e de vento, sua direção e intensidade) em diferentes espaços, na tentativa de identificar contrastes térmicos que serão determinantes na magnitude da ilha de calor (ALCOFORADO e ANDRADE, 2006; SOFER e POTCHTER, 2006; SUN *et al.*, 2009; MURPHY *et al.*, 2011). Apesar da sua importância, a técnica com transectos não será priorizada nesta breve discussão.

A análise de séries temporais é a mais tradicional das técnicas e tem como principal atributo avaliar a evolução dos dados meteorológicos e como a ilha de calor urbana os influencia. Nesse caso, o conceito de ilha de calor refere-se à diferença entre a temperatura da estação urbana e rural -- a partir das diferenças entre as estações revela-se a ilha de calor, geralmente condicionada e intensificada nas estações urbanas. Entretanto, as séries temporais não necessariamente são analisadas a partir da separação entre estações urbanas e rurais para se estimar uma possível ilha de calor pontual temporalmente. Essas séries podem ser analisadas revelando sua evolução temporal e tendências observadas para melhor compreender o cenário do clima em que será espacializada a ilha de calor urbana.

De um modo geral, nos trabalhos revisados, os elementos analisados do clima são precipitação (pluviosidade) e temperatura (máxima, mínima e/ou média), cuja temporalidade dos dados varia desde diários, mensais, sazonais até anuais. Quanto à periodicidade, o período varia entre 35 e 110 anos de dados. Períodos mais curtos são inferiores a 40 anos, geralmente a partir de 1970 até o presente. Períodos bem curtos, como no trabalho de LEE e BAIK (2010) para Seoul na Coreia do Sul, utilizam uma série de apenas 4 anos (1999-2002) e comparam as estações urbanas e rurais a partir de dados horários de temperatura.

O conjunto de estações utilizadas considera o maior número possível, desde que apresentem dados confiáveis (a fonte) e/ou com uma série sem ou com poucos períodos interrompidos de dados faltosos. Neste caso, geralmente, muitos se utilizam de técnicas de preenchimento de dados. O acesso à série depende do registro histórico documentado e da disponibilidade por parte dos órgãos oficiais responsáveis.

Estudos que mostram interesse pelas cidades ou regiões metropolitanas concentram-se em uma única estação ou em um número pequeno (até 4) que melhor represente o clima urbano, aquele comprometido com o organismo funcional da cidade.

Em Nova York, GAFFIM *et al.* (2008) utilizaram a estação meteorológica do Central Park, em Manhattan, e a compararam com a média de 23 estações que cercam a cidade, com distâncias que variam de 50 a 150 quilômetros de seu centro. O objetivo foi comparar a estação urbana do Parque com as demais 23 estações rurais e/ou suburbanas e, assim, definir a evolução temporal da ilha de calor, assim como a sua magnitude.

Os métodos estatísticos mais comuns, utilizados para a análise de tendência, são o de regressão linear (simples e múltipla) e o teste de Mann-Kendall, este usado extensivamente em estudos de tendências hidrológicas. Adicionalmente, trabalhos que se utilizam da análise de componente principais (ACPs) são pouco utilizadas, mas importantes para sintetizar a análise dos grandes grupos de séries temporais (HANSEEN-BAUER e FORLAND, 2000).

XAVIER e PEREIRA FILHO (2007) enfatizam a importância das técnicas estocásticas para a análise de séries temporais, incluindo a análise de variância e a regressão linear. Os

autores utilizam essas técnicas para a análise dos dados de pluviosidade, temperatura, pressão e umidade relativa, diária e mensal, entre 1936 e 2005, da estação meteorológica da Universidade de São Paulo (USP).

Os cenários e tendências descritos pelas séries temporais são associados às causas de ordem natural, antrópica ou a ambas simultaneamente. O que se conclui, a princípio, é a grande dificuldade em atribuir uma única causa ou fenômeno, o comportamento descrito pela série temporal ou ainda estabelecer a relação de causa e efeito, muito comum nos estudos de clima urbano.

Os estudos de séries temporais são abundantes e contemplam grande parte da série de dados do século XX e tratam especialmente da temperatura. Maiores detalhes são encontrados, por exemplo, nos seguintes trabalhos: TAYANC e TOROS (1997) para a Turquia; BOHM (1998) para Viena na Áustria; CHENOWETH (1998) para as ilhas Bahamas na América Central; CHANGNON (1999) para os EUA; MONTAVEZ *et al.* (2000) para Granada na Espanha; TURKES *et al.* (2002) para diversas cidades da Turquia; KIM e BAIK (2004) para Seoul na Coreia do Sul; CHUNG *et al.* (2004) para diversas cidades da Coreia do Sul; CONWAY *et al.* (2004) para Addis Abeba na Etiópia; EZBER *et al.* (2007) para Istambul na Turquia; SAJJAD *et al.* (2009) para Karachi no Paquistão; HOMAR *et al.* (2010) para as Ilhas Baleares na Espanha; LAI e CHENG (2010) para Taiwan; LIU *et al.* (2010) para diversas cidades da China.

A terceira e quarta abordagem, o sensoriamento remoto (STREUTKER, 2003; CHEVAL e DUMITRESCU, 2008; STATHOPOULOU e CARTALIS, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010) e a modelagem atmosférica (YOSHIKADO, 1994; EZBER *et al.*, 2007; VAN WEVERBERG *et al.*, 2007; KARAM *et al.*, 2010; OLESON *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2010), englobam procedimentos mais recentes e com um alto grau de complexidade e sofisticação. Nesses métodos há uma grande vantagem sobre os demais por explorar a espacialização, restritos naqueles dois primeiros. Entretanto, em muitos trabalhos, o sensoriamento remoto e a modelagem têm sido empregados em conjunto com os transectos fixos e móveis buscando validar os dados remotos e simulados e, assim, complementar a metodologia de análise (SUN *et al.*, 2009).

O uso do sensoriamento remoto consiste em uma alternativa objetiva para os estudos de clima urbano, permitindo aplicá-lo na avaliação das ilhas de calor urbana (GALLO *et al.*, 1995) a partir do uso das bandas termais. RAO (1972), segundo a literatura pesquisada, foi um dos primeiros autores a mostrar a aplicação do sensoriamento remoto ao estudo do clima urbano. A partir da banda termal (10,2-12,5 um) do satélite TIROS (ITOS-I), a temperatura da superfície das cidades ao longo da costa do médio Atlântico foi mapeada. Simultaneamente e complementarmente, são utilizados índices a partir dos demais canais do sensor para reforçar as pesquisas em clima urbano, desde os mais clássicos índices de vegetação, FR, SAVI e NDVI (ZHA *et al.*, 2003; YUAN e BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG *et al.*, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010) até índices para áreas construídas, tais como o NDBI, IBI e ISA (ZHA *et al.*, 2003; CHEN *et al.*, 2006; XIAN e CRANE, 2006; YUAN e BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG *et al.*, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010).

Em uma edição especial do periódico científico *Remote Sensing of Environment*, CARLSON (2003) revisa as aplicações do sensoriamento remoto aos estudos urbanos. Para o autor, o progresso no monitoramento da urbanização por sensoriamento remoto é importante para cientistas e planejadores urbanos estreitarem a comunicação, unindo conhecimento técnico e gerenciamento da cidade. Nesta revisão, em todos os trabalhos, há o emprego de um ou mais satélites associados a outras ferramentas, como o sistema de informação geográfica (GIS). A preferência, nesses trabalhos, é por resoluções espaciais entre 15m e 30m, consideradas como ideais para muitas aplicações sociais, tais como a modelagem do crescimento urbano. Dentre os sensores utilizados, estão o Ikonos, Meteosat, Modis, Aster e o Landsat.

VOOGT e OKE (2003) revisam o uso da banda termal para fins de estudo do clima urbano, incidindo principalmente sobre o efeito ilha de calor. Embora ocorram progressos, o avanço é lento e tem se restringido à descrição qualitativa. Os autores salientam o surgimento de novos sensores e do uso cada vez mais difundido dos sensores infravermelhos, o que igualmente explora o monitoramento da ilha de calor e o entendimento do clima urbano.

Para VOOGT e OKE (2003), as pesquisas de sensoriamento remoto aplicadas ao clima urbano precisam ser aperfeiçoadas nas seguintes áreas: (1) determinação apropriadamente da radiação das estruturas da superfície (por exemplo, a emissividade) para melhor descrever a superfície urbana e assegurar se são apropriados para o uso em modelos atmosféricos urbanos; (2) modelos de transferência radiativa entre as edificações e modelos de balanço de energia para melhor simular e compreender a anisotropia termal urbana e a ligação entre as temperaturas de superfície, o balanço de energia da superfície e a temperatura do ar no interior e acima da camada intra-urbana; (3) executar estudos observacionais com o objetivo de obter melhores validações dos parâmetros de superfície derivados por sensoriamento remoto.

WENG e QUATTROCHI (2006), em outra edição especial do periódico *Remote Sensing of Environment*, revisam a utilização do sensoriamento remoto para as áreas urbanas com a utilização da banda termal. Os autores discutem a utilização de imagens de satélite de média resolução como o Landsat TM/ETM+ e o Aster e de alta resolução (até 10 metros) do ATLAS. A revisão é agrupada em quatro sub-temas: (1) descrição e análise quantitativa da temperatura da superfície, as ilhas de calor urbanas e suas relações com características da superfície e morfologia da cidade; (2) validação da radiação térmica e da temperatura da superfície terrestre com medições *in situ* e calibração de imagens termais para uma melhor quantificação e análise dos dados termais sobre áreas urbanas; (3) análise da temperatura da superfície terrestre a partir de correções para efeitos atmosféricos, emissividade da superfície, rugosidade superficial e anisotropia; (4) fluxos de energia em áreas urbanas e as interações entre temperatura da superfície da terra, a vegetação, o solo e a água e interações terra-atmosfera.

Os modelos numéricos são ferramentas muito utilizadas para a análise dos fenômenos atmosféricos dentro de uma escala temporal e espacial. Para as áreas urbanas, os grupos de modelos operados são os de mesoescala, espaços com dimensões de poucos metros ou quilômetros, como a área central da cidade, ou a mais de uma centena de quilômetros, como as grandes regiões metropolitanas.

KANDA (2006) descreve o progresso na modelagem urbana a partir de experimentos em laboratório e ao ar livre que usam uma disposição semelhante ao ambiente urbano, com obstáculos e elementos rugosos, tais como cubos, blocos e cilindros. WEBER e PUISSANT (2003) modelam o crescimento urbano para a região metropolitana da Tunísia e destacam as tendências futuras com a utilização de imagens de satélite.

Modelos atmosféricos exclusivos para áreas urbanas são conhecidos a partir dos trabalhos de MASSON (2000), LEMONSU *et al.* (2004) e PIGEON *et al.* (2006). A utilização da modelagem para os estudos de ilhas de calor tornou-se uma prática recorrente nas últimas décadas, como bem destacam as revisões de HAFNER e KIDDER (1999) e KANDA (2006). Para um nível de maior complexidade da superfície urbana, isto é, a camada limite urbana (CLU) e a camada limite do dossel (CLD), tem se aplicado os modelos tridimensionais, mais eficientes para estimar o balanço de energia da superfície (SEB) no interior dos vales (*canyons*) urbanos (VUKOVICH e KING, 1980; ARNFIELD, 1984; OKE, 1987; GRIMMOND e OKE, 1991; GRIMMOND e OKE, 2002; YOSHIKADO, 1992; MASSON, 2000; KUSAKA *et al.*, 2001; MARTILLI *et al.*, 2002). Os modelos de mesoescala, de menor complexidade, como o *mesoscale model* (MM-5) e o *regional atmospheric modeling system* (RAMS), tem sido amplamente utilizados para simular a ilha de calor urbana (KINOUCI e YOSHITANI, 2001; VELAZQUEZ-LOZADA, 2006; LIN *et al.*, 2010).

O uso atual dos modelos de mesoescala mostra a habilidade de reproduzir o fenômeno da ilha de calor urbana e seus efeitos correlatos, que simulam não somente a intensidade, mas também sua estrutura espacial e sua dinâmica temporal. Dentre os efeitos, estão os impactos dos fluxos de calor, o início de uma tempestade, as brisas de terra e mar, as brisas urbanas e a poluição atmosférica.

A aplicação desses modelos abre perspectivas na mitigação da ilha de calor, como a avaliação do papel de sistemas de condicionamento de ar ou o impacto da dinâmica urbana na poluição do ar. Contudo há uma necessidade de validar os diferentes modelos urbanos com a parametrização das variáveis urbanas.

3. Considerações finais

Este artigo é uma pequena parte da revisão bibliográfica elaborada para a tese de doutorado do autor, que abordou a problemática da ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro (LUCENA, 2012). A intenção do artigo foi resgatar e discutir as bases conceituais do clima urbano e explorar as técnicas e métodos usuais de pesquisa, dedicados ao fenômeno da ilha de calor.

A ilha de calor, como um produto do clima urbano (OKE, 1987) e uma modalidade de mudanças climáticas, é um fenômeno anômalo do espaço urbano e, portanto, tem gerado interesse de diversos campos da ciência. O interesse científico se justifica pela sua interferência em muitos sistemas-objeto de estudo, como a própria atmosfera, objeto de estudo da Meteorologia e da Climatologia; a bacia hidrográfica, principal unidade espacial do planejamento ambiental e objeto da Hidrologia e Engenharias afins; e o planejamento urbano, objeto de análise das Engenharias, da Arquitetura e Urbanismo e da Geografia. Em virtude da sua influência sobre o espaço urbano, ainda mais quando representada em espaços metropolitanos, o tratamento dado à análise teórica e metodológica da ilha de calor necessita de um maior desdobramento, de forma que seu estudo não se mostre rudimentar ou mesmo inconsistente. Neste contexto, algumas proposições são recomendadas nos parágrafos seguintes.

Nos estudos de séries temporais, além da clássica análise de tendência por regressão linear, sugere-se a incorporação da ANOVA, análise de variância, que incorpora o nível de significância das amostras para validar estaticamente as mudanças preexistentes.

Para as análises de tendências, nos moldes delineados para a análise de regressão linear e a sua significância estatística por meio da variância, é indicada a análise de

“A quantificação da ilha de calor identificada por sensoriamento remoto é, muitas vezes, controversa e incorreta, pois geralmente se baseia somente na temperatura absoluta, ao passo que a ilha de calor é um cálculo de diferença, e não pode ser confundida com os valores absolutos.”

Fourier e a análise espectral e outros testes para a significância estatística da análise linear, como os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis.

Para o tratamento de uma grande quantidade de dados, recomenda-se a análise por componentes principais, uma técnica de regionalização e identificação de grau de similaridade entre os dados. A técnica pode ser trabalhada em conjunto com a análise de regressão linear.

A diversidade de alternativas metodológicas para emprego do sensoriamento remoto é uma grande vantagem para os estudos do clima urbano. A adoção da temperatura da superfície continental (TSC) é a principal delas. A TSC não deve ser confundida com a temperatura de brilho, que não carrega qualquer correção dos contaminantes atmosféricos, dissimulando, assim, a temperatura real da superfície. Esta é uma prática comum nos estudos de ilha de calor, que erroneamente denominam a temperatura de brilho como temperatura da superfície continental, um grave erro instrumental que compromete a quantificação e mapeamento espacial da temperatura.

Um cálculo razoável de obtenção da TSC deve utilizar, após o processo de correção radiométrica e do cálculo da temperatura de brilho, a correção atmosférica que leva em conta o mascaramento de nuvens, a transmitância atmosférica e a emissividade. Trata-se de uma expressiva contribuição em sensoriamento remoto para as áreas urbanas nas pesquisas de ilha de calor.

Índices obtidos em sensoriamento remoto podem ser analisados em conjunto com a TSC. Além do tradicional índice para área vegetada, o índice de vegetação por diferença normalizada, o NDVI, e outros índices, pouco conhecidos ou aplicados na literatura, podem ser incorporados, como o índice de área construída (IBI), a área impermeável da superfície (ISA), índice de área construída por diferença normalizada (NDBI), índice de condição de temperatura (TCI), índice de condição de vegetação (VCI), entre outros. Os índices podem ser adotados como indicadores complementares na análise integrada entre a temperatura, a vegetação e a área construída, diversificando as aplicações do sensoriamento remoto no ambiente urbano, em particular quando o interesse é aprofundar as técnicas de sensoriamento remoto para uma melhor interpretação da ilha de calor na metrópole.

A quantificação da ilha de calor identificada por sensoriamento remoto é, muitas vezes, controversa e incorreta, pois geralmente se baseia somente na temperatura absoluta, ao passo que a ilha de calor é um cálculo de diferença, e não pode ser confundida com os valores absolutos. Propõe-se um cálculo por meio de grupos de classes, como as classes de uso do solo, a partir da diferença entre pixels de classes de solo “urbano” e “rural” ou entre “urbano” e “vegetação”. Certamente que novos métodos e cálculos devem ser testados e construídos para quantificar, espacializar ou qualificar a ilha de calor, desde que acordados com os princípios teóricos elementares, isto é, tratando da diferença entre valores, e não de valores absolutos.

A modelagem atmosférica é uma ferramenta interessante quando se pretende comparar seus resultados com aqueles obtidos com o sensoriamento remoto e com os dados de estações meteorológicas. Neste caso, a simulação da temperatura é um dos principais produtos resultantes da modelagem e que se pretende comparar com a TSC estimada por sensoriamento remoto e com a temperatura do ar registrada em estações meteorológicas. Recomenda-se incluir outros produtos da modelagem, como os campos de calor latente e sensível, os campos de vento e altura da camada limite e os campos de umidade do ar e do solo. São parâmetros que podem oferecer um melhor panorama para a compreensão da ilha de calor, principalmente em regiões com relativa complexidade em sua paisagem natural, com a presença conjunta de morros, florestas e corpos hídricos oceânicos e continentais.

A integração de mais de uma técnica para o tratamento de dados primários ou gerados e a investigação por mais de uma fonte de dados, isto é, seja de estações meteorológicas, seja por sensoriamento remoto ou por modelagem atmosférica, tende a consubstanciar, de fato, o conhecimento da ilha de calor, incorporando uma robustez teórico-conceitual e metodológica.

4. Referências bibliográficas

ALCOFORADO, M.J., ANDRADE, H., 2006, “Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): main features and modelling attempts”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 84, pp. 151–159;

- ALEXANDRIA, E. L., JONES, P., 2008, "Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates", *Building and Environment*, vol. 43, n. 4 (April), pp. 480–493;
- ARNFIELD, A.J., 1984, "Simulating radiative energy budgets within the urban canopy layer", *Modeling and Simulation*, vol. 15, pp. 227–233;
- ARNFIELD, A.J., 2003, "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island" *International Journal Climatology*, vol. 23, pp.1–26;
- BOHM, R., 1998, "Urban bias in temperature time series – a case study for the city of Vienna, Austria", *Climatic Change*, vol. 38, pp. 113–128;
- BORNSTEIN, R., STYRBICKI-IMAMURA, R., GONZÁLEZ, J.E., LEBASSI, B., 2012, "Interactions of Global-Warming and Urban Heat Islands in Different Climate-Zones". In: Fernando, H. J. S., Klaić, Z., McCulley, J.L. (eds), National security and human health implications of climate change. Nato science for peace and security series C: environmental security, chapter 5, Dordrecht, Netherlands, Springer;
- BRETZ, S., AKBARI, H., ROSENFELD, A., 1998, "Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands", *Atmospheric Environment*, vol. 32, n. 1, pp. 95-101;
- CARLSON, T., 2003, "Applications of remote sensing to urban problems", *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, pp. 273–274;
- CHANDLER, T. J., 1965, *The climate of London*. London, Hutchinson e Co. Publishers LTD;
- CHANGNON, S. A., 1999, "A rare long record of deep soil temperatures defines temporal temperature changes and an urban heat island", *Climate Change*, vol. 42, pp. 531–538;
- CHANGNON, S. A., KUNKEL, K. E., REINKE, B. C., 1996, "Impacts and responses to the 1995 heat wave: a call to action", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 77, pp.1497–1505.
- CHEN, X., L., ZHAO, H. M., LI, P. X. et al., 2006, "Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes", *Remote Sensing of Environment*, vol. 104 pp. 133–146;
- CHENOWETH, M., 1998, "The early 19th century climate of the Bahamas and a comparison with 20th century averages", *Climatic Change*, vol. 40, pp. 577–603;

- CHEVAL, S., DUMITRESCU, A., 2008, "The July urban heat island of Bucharest as derived from Modis images", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 91, n.1-4, pp. 1-9;
- CHUNG, U., CHOI, C., YUN, J.I., 2004, "Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951–1980 and 1971–2000 in Korea", *Climatic Change*, vol. 66, pp. 127–136;
- CONWAY, D., MOULD, C., BEWKET, W., 2004, "Over one century of rainfall and temperature observations in Addis Ababa, Ethiopia", *International Journal Climatology*, vol. 24, pp. 77–91;
- EZBER, Y., SEN, O.L., KINDAP, T., KARACA, M., 2007, "Climatic effects of urbanization in Istanbul: a statistical and modeling analysis", *International Journal Climatology*, vol. 27, pp. 667–679;
- FREITAS, E. D., DIAS, P. L. S., 2005, "Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor", *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, pp. 355-366;
- FUJIBE, F., 2009, "Detection of urban warming in recent temperature trends in Japan", *International Journal Climatology*, vol. 29, pp. 1811–1822;
- GAFFIN, S. R., ROSENZWEIG, C., KHANBILVARDI, R., et al., 2008, "Variations in New York city's urban heat island strength over time and space", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 94, n. 1-2 (Set), pp.1-11;
- GALLO, K. P., TARPLEY, J. D., MCNAB, A. L. et al., 1995, "Assessment of urban heat islands: a satellite perspective", *Atmospheric Research*, vol. 37, pp. 37-43;
- GARCÍA, M. C. M., 1999, *Climatologia Urbana*. Edicions de la Universitat de Barcelona, Barcelona.
- GÓMEZ, F., GAJA, E., REIG, A., 1998, "Vegetation and climatic changes in a city", *Ecological Engineering*, vol. 10 pp. 355–360;
- GRIMMOND, C. S. B., 2006, "Progress in measuring and observing the urban atmosphere", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 84, pp. 3–22;
- GRIMMOND, C.S.B., OKE, T.R., 1991, "An evapotranspiration–interception model for urban areas", *Water Resources Research*, vol. 27, pp. 1739–1755;
- GRIMMOND, C.S.B., OKE, T.R., 2002, "Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS)", *Journal Applied Meteorology*, vol. 41, pp. 792–810;

- HAFNER, J., KIDDER, S. Q., 1999, "Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 38, pp. 448–465;
- HANSSEN-BAUER, I., FØRLAND, E., 2000, "Temperature and precipitation variations in Norway 1900–1994 and their links to atmospheric circulation", *International Journal Climatology*, vol. 20, pp. 1693–1708;
- HOMAR, V., RAMIS, C., ROMERO, R., ALONSO, S., 2010, "Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain)" *Climatic Change*, vol. 98, pp.199–211;
- IMHOFF, M.L, ZHANG, P., WOLFE, R.E., BOUNOUA, L., 2010, "Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA", *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, pp. 504–513;
- KANDA, M., 2006, "Progress in the scale modeling of urban climate: Review". *Theoretical Applied Climatology*, vol. 84, pp. 23–33;
- KARAM, H.A., PEREIRA FILHO, A.J., MASSON, V., NOILHAN, J., MARQUES FILHO, E.P., 2010, "Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme", *Theoretical Applied Climatology*, vol. 101, pp.109–120;
- KAWAMOTO, Y., YOSHIKADO, H., OOKA, R., HAYAMI, H., HUANG, H. e KHIEM, M., 2012, "Sea Breeze Blowing into Urban Areas: Mitigation of the Urban Heat Island Phenomenon". In: Kato, S., Hiyama, K. (eds), *Ventilating Cities. Air-flow Criteria for Healthy and Comfortable Urban Living*, Dordrecht (Netherlands), Heidelberg (Germany), London (England), New York (EUA), Springer;
- KIM, Y.H., BAIK, J.J., 2004, "Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 79, pp. 151–164;
- KINOUCI, T., YOSHITANI, J., 2001, "Simulation of the urban heat island in Tokyo with future possible increases of anthropogenic heat, vegetation cover and water surface" *3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, 6p, Tempe, Arizona, EUA, 5-8 December;
- KONOPACKI, S., AKBARI, H., 2002, *Energy savings for heat island reduction strategies in Chicago and Houston (including updates for Baton Rouge, Sacramento, and Salt Lake City)*. Draft Final Report, LBNL-49638, University of California, Berkeley;
- KRUGER, A.C., e SHONGWE, S., 2004, "Temperature trends in South Africa: 1960–2003", *International Journal of Climatology*, vol. 24, pp. 1929–1945;

- KUSAKA, H., KONDO, H., KIKEGAWA, Y., KIMURA, F., 2001, "A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models", *Boundary Layer Meteorology*, vol. 101, pp. 329–358;
- LAI, L.W., CHENG, W.L., 2010, "Air temperature change due to human activities in Taiwan for the past century", *International Journal of Climatology*, vol. 30, pp. 432–444;
- LANDSBERG, H. E. 1956. *The Climate of towns*. Ed. THOMAS, W. E., Man`s role in changing the face of the earth. Pub. for the Wenner Grem Foud. for Antropological Research and the National and Cience Found. University of Chicago Press;
- LEE, S.H., BAIK, J.J., 2010, "Statistical and dynamical characteristics of the urbanheat island intensity in Seoul", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 100, pp. 227–237;
- LEMONSU, A., GRIMMOND, C. S. B., MASSON, V., 2004, "Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city: Marseille", *Journal Applied Meteorology*, vol. 43, pp. 312–327;
- LIN, W., WANG, B., LI, J., WANG, X., ZENG, L., YANG, L., LIN, H., 2010, "The impact of urbanization on the monthly averaged diurnal cycle in october 2004 in the Pearl river delta region", *Atmósfera*, vol. 23, n. 1 (Jan), pp. 37-51;
- LIU, B., HENDERSON, M., ZHANG, Y., XU, M., 2010, "Spatiotemporal change in China`s climatic growing season: 1955–2000", *Climatic Change*, vol. 99, pp. 93–118;
- LUCENA, A.J., 2012, "A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro", Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRRJ;
- MANLEY, G., 1958, "On the frequency of snowfall in metropolitan England", *Quart. Journal Royal Meteorological Society*, vol. 84, pp.70–72.
- MARTILLI, A., CLAPPIER, A., ROTACH, M.W., 2002, "An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models", *Boundary Layer Meteorology*, vol. 104, pp. 261–304;
- MASSON, V., 2000, "A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models". *Bound-Layer Meteorology*, vol. 94, pp. 357-397.
- MONTAVEZ, J.P., RODRIGUEZ, A., JIMENEZ, J.I., 2000, "A study of the urban heat island of Granada", *International Journal Climatology*, vol. 20, pp. 899–911;
- MURPHY, D.J., HALL, M.H., HALL, C.A.S., HEISLER, G.M., STEHMAN, S.V., ANSELMIMOLINA, C., 2011, "The relationship between land cover and the urban heat island

in northeastern Puerto Rico”, *International Journal Climatology*, vol. 31, n. 8 (June), pp. 1222–1239;

OKE, T. R., 1981, “Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observation”, *Journal of Climatology*, vol. 1. pp. 237-254.

OKE, T. R., 2006, “Towards better scientific communication in urban climate”, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 84, pp. 179–190.

OKE, T. R., MAXWELL, G. B., 1974, Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver, *Journal of Climatology*, vol. 9. pp. 192-200.

OKE, T.R., 1976, “The distinction between canopy and boundary-layer heat islands”. *Atmosphere*, vol. 14, pp. 268–277;

OKE, T.R., 1982, “The energetic basis of the urban heat island”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, pp. 1–24;

OKE, T.R., 1987, *Boundary Layer climate*. 2 ed. Methuen, London

OKE, T.R., 1997, “Surface climate processes”. In: Bailey, W.G., Oke, T.R., Rouse, W.R. (eds), *Surface climates of Canada*, chapter 4, Montreal, McGill-Queen’s University Press;

OKE, T.R., JOHNSON, G.T., STEYN, D.G., WATSON, I.D., 1991 “Simulation of Surface Urban Heat Islands Under ‘Ideal’ Conditions at Night. Part 2: Diagnosis of Causation”, *Bound Layer Meteorology*, vol. 56, pp. 339–358;

OLESON, K.W., BONAN, G.B., FEDDEMAB, J., JACKSON, T., 2011, “An examination of urban heat island characteristics in a global climate model”, *International Journal of Climatology*, vol. 31, pp. 1848–1865;

PIGEON, G., LEMONSU, A., LONG, N., BARRIÉ, J.E., MASSON, V., DURAND, P., 2006, “Urban thermodynamic island in a coastal city analysed from an optimized surface network”, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 120, pp. 315–351;

PONGRACZ, R., BARTHOLY, J., DEZSO, Z., 2006, “Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis”, *Advances in Space Research*, vol. 37, pp. 2191–2196;

RAO, P.K., 1972, “Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite”, *Bulletin American Meteorology Society*, vol. 53, pp. 647-648;

REN, C., YAN-YUNG NG, E., KATZSCHNER, L., 2010, “Urban climatic map studies: a review”, *International Journal of Climatology*, vol. 31, n. 15 (Dez), pp. 2213–2233;

- RIZWAN, A. M., DENNIS, Y.C., LEUNG, L. C., et al., 2008, "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island", *Journal of Environmental Sciences*, vol. 20, pp. 120–128;
- ROSENFELD, A. H., ROMM, J. J., AKBARI, H., POMERANTZ, M., 1998 "Cool Communities: Strategies for Heat Islands Mitigation and Smog Reduction," *Energy and Buildings*, vol. 28, n. 1, pp.51–62;
- ROTH, M. 2007, "Review of urban climate research in (sub) tropical regions", *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp. 1859–1873;
- SAJJAD, S.H., HUSSAIN, B. KHAN., M. A; RAZA, A., B. ZAMAN, B., AHMED, I., 2009, "On rising temperature trends of Karachi in Pakistan", *Climatic Change*, vol. 96, pp. 539–547;
- SANTAMOURIS, M., PARAPONIARIS, K., MIHALAKAKOU, G., 2007, "Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece", *Climatic Change*, vol. 80, pp. 265–276;
- SOFER, M., e POTCHTER, O., 2006, "The urban heat island of a city in an arid zone: the case of Eilat, Israel", *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 85, pp. 81–88;
- STATHOPOULOU, M., CARTALIS, C., 2009, "Downscaling AVHRR land surface temperatures for improved surface urban heat island intensity estimation", *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, pp. 2592–2605;
- STEWART, I.D., 2011, "A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature", *International Journal Climatology*, vol. 31, pp. 200–217;
- STREUTKER, D.R., 2003, "Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas", *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, pp.282–289;
- SUN, C.Y., BRAZEL, A.J., CHOW, W.T.L., HEDQUIST, B.C., PRASHAD, L., 2009, "Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques" *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 98, pp.323–335;
- TAHA, H., 1997, "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat", *Energy and Buildings*, vol. 25 pp. 99-103;
- TAYANC, T., TOROS, H., 1997, "Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of Turkey", *Climatic Change*, vol. 35, pp. 501–524;

- TURKES, M., SUMER, U.M., DEMIR, I.L., 2002, "Re-evaluation of trends and changes in mean, maximum and minimum temperatures of Turkey for the period 1929–1999", *International Journal Climatology*, vol. 22, pp. 947–977;
- VAN WEVERBERG, K., DE RIDDER, K., VAN ROMPAEY, A., 2007, "Modeling the contribution of the Brussels heat island to a long temperature time series", *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 47, pp. 976-990;
- VELAZQUEZ-LOZADA, A., GONZALEZ, J. E., WINTER, A., 2006, "Urban Heat island effect analysis for San Juan, Puerto Rico", *Atmospheric Environment*, vol. 40, pp. 1731–1741;
- VOOGT, J. A., 2002, "Urban Heat Island, Causes and consequences of global environmental change", *Encyclopedia of Global Environmental Change*, vol. 3, pp. 660-666.
- VOOGT, J. A., OKE, T. R., 2003, "Thermal remote sensing of urban climates", *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, pp. 370–384;
- VUKOVICH, F. M., KING, W.J., 1980, "A theoretical study of the St. Louis heat island: comparisons between observed data and simulation results on the urban heat island circulation" *Journal Applied Meteorology*, vol. 19, pp. 761–770;
- WEBER, C., PUISSANT, A., 2003, "Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area", *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, pp. 341–352.
- WENG, Q. E., QUATTROCHI, D. A., 2006, "Editorial. Thermal remote sensing of urban areas: an introduction to the special issue", *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, pp. 119–122;
- XAVIER, T.M.B.S., PEREIRA FILHO, A.J., 2007, Análise das medições e observações meteorológico-climáticas de superfície. In: Pereira Filho, A.J., Santos, P.M., Xavier, T.M.B.S. (eds), *Evolução do tempo e do clima na região metropolitana de São Paulo*, capítulo 6, Linear B; IAG/USP;
- XIAN, G., CRANE, M., 2006, "An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, pp. 147–156;
- XU, H., 2008, "A new index for delineating built-up land features in satellite imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n. 14, pp. 4269- 4276;
- YOSHIKADO, H., 1992, "Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze", *Journal Applied Meteorology*, vol. 31, pp. 1146-1164;

- YOSHIKADO, H., 1994, "Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations", *Journal Meteorology Societal of Japan*, vol. 72, pp.139-143;
- YUAN, F., BAUER, M.E., 2007, "Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery", *Remote Sensing Environment*, vol. 106, pp. 375-386;
- ZHA, Y., GAO, J, N.I.S., 2003, "Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, pp. 583–594;
- ZHANG, N., GAO, Z., WANG, X., CHEN, Y., 2010, "Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China", *Theoretical and Applied Climatology*, vol.102, pp.331–342;
- ZHANG, Y., ODEH, I.O.A., HAN. C., 2009, "Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis", *International Journal Applied Earth Observed and Geoinformation*, vol. 11, pp. 256–264.