

UMA ANÁLISE DE TÉCNICAS NOS ESTUDOS DE CLIMA URBANO PARA A REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO

AN ANALYSIS OF TECHNIQUES IN URBAN CLIMATE STUDIES FOR THE METROPOLITAN AREA OF RIO DE JANEIRO.

Andrews Lucena¹

¹ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Correspondência para Andrews Lucena (lucenageo@yahoo.com.br)

doi: 10.12957/geouerj.2019.40954

Recebido em: 15 ago. 2018 | Aceito em: 21 nov. 2018



RESUMO

Este artigo discute as vantagens e limitações de quatro técnicas para a análise do clima urbano e da ilha de calor urbana, considerando a região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) como área de estudo. As técnicas apresentadas e discutidas são: a análise de série temporal de estação meteorológica padrão, os transectos fixos e móveis, o sensoriamento remoto (Landsat) e a modelagem numérica (Mesoscale Model Version 5 – MM-5). A primeira técnica é a mais clássica nos estudos do clima urbano, mas se limita a apenas um ponto da superfície, enquanto os transectos fixos e móveis abrangem mais pontos para o mapeamento espacial. O sensoriamento remoto e a modelagem numérica ampliam a abrangência espacial e acessam toda a área de estudo, oferecendo maior detalhamento e conhecimento do clima urbano. Conclui-se que um estudo do clima urbano mais abrangente e completo é dado com o uso combinado dessas técnicas.

Palavras-chave: Clima Urbano. Séries Temporais. Transectos fixos e móveis. Sensoriamento remoto da atmosfera. Modelagem numérica de mesoescala.

ABSTRACT

This paper discusses the advantages and limitations of four techniques for urban climate and the urban heat island analysis considering the Metropolitan Area of Rio de Janeiro (MARJ) as the study area. The techniques presented and discussed are the time series analysis of the standard meteorological station, fixed and mobile transects, remote sensing (Landsat) and numerical modeling (Mesoscale Model Version 5 – MM-5). The first technique is most classical in urban climate studies, but it is limited to only one point on the surface, while fixed and mobile transects cover more points for spatial mapping. Remote sensing and numerical modeling extend spatial coverage and access the entire study area, providing detail and knowledge of the urban climate. We conclude that a more comprehensive and complete urban climate study is given with the combined use of these techniques.

Keywords: Urban Climate. Time Series. Fixed and Mobile Measurements. Remote sensing of the atmosphere. Mesoscale numerical modeling.

INTRODUÇÃO

A Climatologia Urbana mostrou um grande avanço nas últimas décadas em seu quadro teórico, metodológico, nas técnicas adotadas e nas propostas de mitigação. Isto repercute em pesquisas sobre as derivações no fluxo do ar, na radiação e no balanço de energia, no balanço hídrico, na umidade e na condensação (VOOGT; OKE, 2003; GRIMOND, 2006; KANDA, 2007). Neste cenário, a ilha de calor

urbana é o principal fenômeno do clima urbano difundido na literatura pretérita e atual, tornando-se um dos principais temas dos estudos no seio da Climatologia Urbana (ARNFIELD, 2003).

O avanço no conhecimento do fenômeno da ilha de calor urbana muito se deve ao interesse nos estudos da radiação e da energia na cidade que, por sua vez, estoca e (re) produz mais energia (ARNFIELD, 2003). Este interesse desenvolveu métodos e técnicas que auxiliassem na caracterização, na definição das propriedades e elaboração de tipologias, assim como na análise espacial, temporal, quantitativa e qualitativa.

Quanto aos métodos para o estudo do clima urbano, há uma diversidade de opções, conforme Oke et al. (2017) atualizaram em recente obra, a saber: a) as observações de campo, que inclui o uso de estações fixas e móveis e as técnicas de sensoriamento remoto; b) a modelagem física, que inclui a teoria de similaridade, os modelos com experimentos em laboratório e os modelos ao ar livre; c) a modelagem numérica, que inclui as equações governantes do modelo, os modelos de clima urbano (UCMs) em escala local e micro e os modelos urbanos de mesoescala; e, finalmente, d) os modelos empíricos, que se baseiam em uma relação estatística entre diferentes sistemas, obtidos por observações de campo ou por modelos mais sofisticados, e inclui aqueles que simulam os fluxos de calor latente e sensível, por exemplo. Destes quatro todos atendem à análise da ilha de calor urbana, e se adequam as especificidades regionais e locais dos campos de pesquisa.

O campo de estudo da climatologia urbana tem protagonismo no espaço das grandes cidades e regiões metropolitanas (MATSUMOTO et al., 2017). O espaço metropolitano é o lugar das principais transformações, sendo o foco dos estudos ambientais, em suas múltiplas abordagens, dentre as quais o estudo do clima urbano.

Neste contexto, este trabalho apresenta quatro técnicas para a análise do clima urbano, a saber, a análise de série temporal, os transectos fixos e móveis, o sensoriamento remoto e a modelagem atmosférica, com foco na ilha de calor urbana, para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O interesse é comparar as técnicas e avaliar as potencialidades, vantagens, limites e possibilidades de cada uma delas.

O trabalho foi dividido em sete seções: nesta breve introdução, seguida pela área de estudo com uma apresentação geral da RMRJ. A terceira seção apresenta a técnica 1, a análise de série temporal, com as observações de campo por análise de estação meteorológica convencional fixa. A quarta seção apresenta a técnica 2, os transectos fixos e móveis, com as observações de campo combinadas com medições fixas e móveis. A quinta seção apresenta a técnica 3, as observações do campo térmico por sensoramento remoto da atmosfera. A sexta seção apresenta a técnica 4, a modelagem numérica com um modelo de mesoescala, o MM-5. Finalmente, a sétima e última seção, as Considerações Finais, expõe um balanço das técnicas adotadas.

ÁREA DE ESTUDO

A região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), no estado do Rio de Janeiro, é o segundo pólo de concentração demográfica e de atividades econômicas do Brasil, contendo um grande volume de atividades e fluxos, oferta de bens e serviços mais especializados e uma alta taxa de urbanização. A RMRJ é um espaço altamente complexo em virtude do seu sítio, morfologia e ocupação urbana e de sua circulação atmosférica. O espaço físico é marcado por paisagens fisiográficas bem distintas: as baixadas, os maciços e colinas cristalinas, as baías, lagoas e lagunas.

A figura 1, que representa a RMRJ, é anterior a 2014, com 19 municípios, situação que se alterou em 2014 e, atualmente, conta com mais dois municípios, a nordeste e leste, Cachoeiras de Macacu e Rio Bonito, respectivamente. Neste trabalho a RMRJ como objeto de estudo compõe a delimitação antiga, que se deve ao recorte da imagem de satélite Landsat, cena 217-76, que inclui parcialmente os dois novos municípios. Um mosaico das cenas vizinhas, 217-75 e 218-76, seria uma solução caso a hora e o dia de passagens fossem idênticas a cena 217-76, o que não ocorre por conta da órbita do satélite.

As pesquisas em clima urbano na cidade do Rio de Janeiro são pioneiras com o trabalho de Gallego (1972) seguido por Brandão (1987; 1996), que inaugurou na década de 1990 o Laboratório de Pesquisa em Climatologia Geográfica, o CLIMAGEO (atualmente extinto), do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Do CLIMAGEO uma série de estudos, que resultaram ou foram

oriundos de trabalhos monográficos ou pesquisas de mestrado, foram desenvolvidos para a cidade do Rio de Janeiro e a sua região metropolitana, considerando importantes temas na linha dos estudos em clima urbano, a saber, a poluição, as tormentas e a ilha de calor urbanas (BRANDÃO, 2001; RUSSO, 2002; FIALHO, 2002; LUCENA, 2002).

Outras obras, inseridas em uma Climatologia e Meteorologia Urbana, também avançaram, como os trabalhos de Marques Filho et al. (2009) que estudou a termodinâmica e sua evolução temporal na RMRJ, e Karam et al. (2010) que simularam a ilha de calor diurna na RMRJ por um modelo meteorológico urbano (t-TEB) e compararam com dados observados.

Nestes últimos 15 anos, foram atualizadas e inovadas as técnicas para o estudo do clima urbano na RMRJ, que resultou em alguns trabalhos (LUCENA, 2012; LUCENA et. al, 2013a; LUCENA et. al, 2013b; LUCENA et. al, 2015; PERES et al., 2018), bem como na composição de importantes laboratórios de pesquisa, como o Laboratório de Estudos da Dinâmica do Clima Urbano de Regiões Metropolitanas – DCLURME (Departamento de Geografia/UFRRJ) e do Laboratório de Análise de Satélites Ambientais – LASA (Departamento de Meteorologia/UFRJ).

Segue, nas próximas seções, a apresentação das técnicas adotadas, com suas vantagens e limitações para o estudo do clima urbano e da ilha de calor urbana na RMRJ.

Técnica 1: As observações de campo por análise de estação meteorológica convencional fixa – análise de série temporal

Das 12 estações existentes da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) com longa série temporal (com dados entre 1951 e 2009) onze estão na cidade do Rio de Janeiro (Figura 1). Foi selecionada a estação meteorológica mais antiga, desde 1917, situada na Praça XV, área central da cidade, e adotadas as técnicas de regressão linear e análise por variância clássica..



Figura 1. A RMRJ e a distribuição das estações meteorológicas.

A análise por regressão linear avalia a tendência de linearidade e a possível existência de um padrão regular de crescimento ou de decréscimo no comportamento da temperatura, quantificando-o. A análise por variância detecta a diferença entre médias de classes por meio dos seus intervalos de confiança (PEREIRA FILHO et. al, 2007). Para a aplicação do modelo de regressão linear simples considerou-se o tempo como variável explicativa, medido em meses, e, como possíveis variáveis respostas à temperatura. O nível de significância (p-valor) estipulado foi de 0,05 (ou 5%), isto é, um intervalo de confiança de 95%, para testar a hipótese de tendência crescente ou decrescente em comparação com a hipótese dita nula de que não houve mudança estatisticamente significativa. A tendência baseia-se na equação da reta dada pela regressão. O tratamento e análise estatística dos dados foram operados no pacote estatístico R versão 2.8.0, disponível gratuitamente em <http://www.R-project.org>.

A análise por variância clássica, de estatística paramétrica (ANOVA), se destina à detecção da diferença entre médias de classes ou grupos, além da determinação dos seus intervalos de confiança (PEREIRA FILHO et al., 2007). Os dados mensais médios sazonais foram agrupados em classes dentro de um intervalo de 10 anos. Cada década foi numerada iniciando em 1 e, então, organizadas: 1(1921-1930); 2(1931-1940); 3(1941-1950); 4(1951-1960); 5(1961-1970); 6(1971-1980); 7(1981-1990); 8(1991-2000); 9(2001-2009). A última década, referente aos anos 2000, agrupa um ano a menos, por não possuir o ano de 2010. Foram elaborados gráficos de intervalos de confiança das médias, cujo eixo

das abscissas (x) representa o fator, que corresponde à classe, e com o eixo das ordenadas (y) correspondente à resposta (temperatura). Junto aos gráficos, foram estipulados a média, o desvio padrão, o limite superior, o limite inferior e o p-valor de 5% para um intervalo de confiança de 95%. Todos os gráficos e operações estatísticas foram gerados no código computacional Action 1.1, disponível em <http://portalaction.com.br>.

Considerando tão somente a temperatura média, a tendência das curvas de regressão linear é crescente em todos os regimes sazonais, mais pronunciado na primavera-verão com um incremento médio anual de 0,021oC e 0,023oC, respectivamente. Para o período de 90 anos, utilizando-se os coeficientes das equações da reta ajustadas, o incremento médio estimado é de 1,9oC e 2,1oC, respectivamente. Embora o R² e o R² ajustado se mostrem abaixo de 50%, o p-valor para o intervalo de confiança de 95% é altamente significativo (Figura 3; Tabela 1).

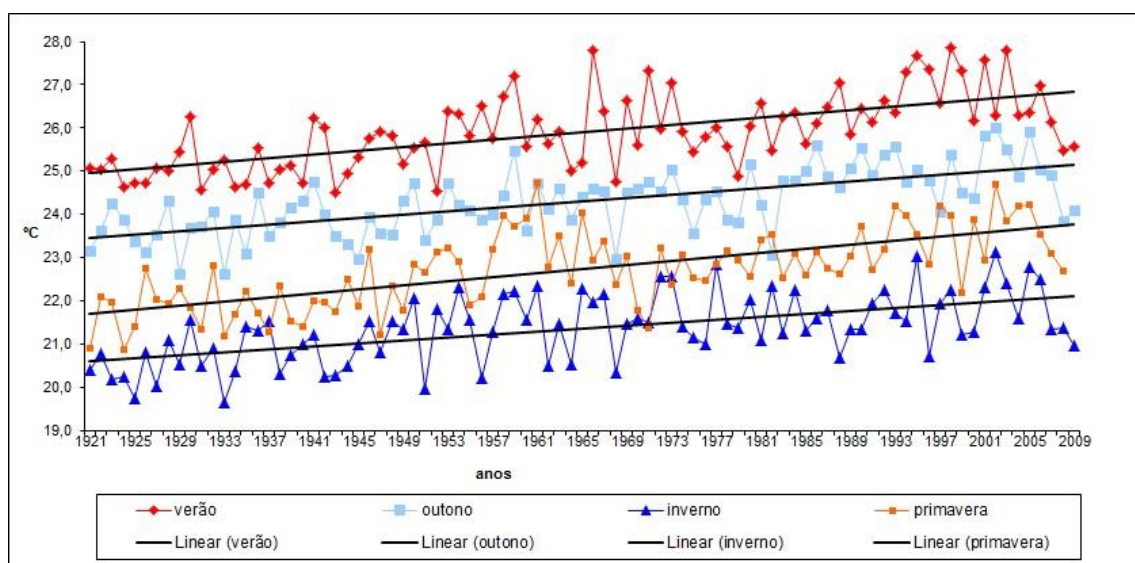


Figura 3. Variação sazonal da temperatura média na Praça XV/RJ entre 1921 e 2009.

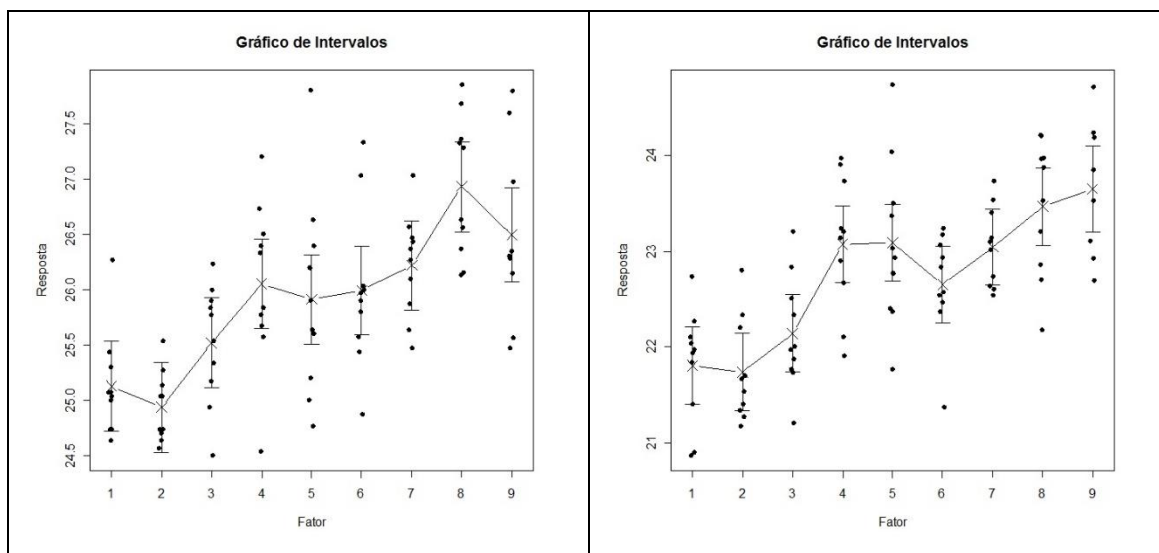
Estações	Equação	Variação anual (°C)	Variação ao longo de 1921-2009 (°C)	R ²	R ² ajustado	p-valor (95% IC)
Verão	0,0214x + 24,943	0,0214	1,9	0,411	0,404	0,00
Outono	0,019x + 23,445	0,019	1,7	0,424	0,418	0,00
Inverno	0,0171x + 20,593	0,0171	1,5	0,320	0,312	0,00
Primavera	0,0232x + 21,686	0,0232	2,1	0,439	0,433	0,00

Tabela 1. Estatística da variação sazonal da temperatura média na Praça XV/RJ entre 1921 e 2009

As médias da temperatura por década para o verão e a primavera e os respectivos intervalos de confiança são mostradas nas Figuras 4 e 5 e revelam uma elevada significância estatística com p-valor igual a zero. No verão, a década de 1930 é a mais fria (média de 24,9oC), com intervalo de confiança entre 24,5oC e 25,3°C, enquanto a década de 1990 é a mais quente (média de 26,9oC), com intervalo de confiança entre 26,5oC e 27,3°C, ou seja, seus intervalos não se cruzam. A diferença entre as duas décadas aproxima-se da média total do aumento para todo o período (2,1oC). A evolução da temperatura média no verão mostra uma ascensão abrupta entre a década de 1930 e 1950. Entre os anos 1950 e 1980 há uma leve estabilidade com tendência ao aumento que culmina na década de 1990, a mais quente. Em 2000, ocorre uma queda com relação à década de 1990 (de 26,9oC para 26,5oC), a segunda década mais quente, confirmando as duas últimas décadas como as as mais aquecidas de toda a série.

Na primavera e no verão a década mais fria foi a de 30 (média de 21,7°C), com intervalo de confiança entre 21,3°C e 22,1°C, mas a mais quente foi a de 2000 (média de 23,6°C), com intervalo de confiança entre 23,2°C e 24,1°C, ou seja, seus intervalos não se cruzam. A evolução da curva térmica tem uma ascensão exponencial a partir dos anos 30 e culmina nos anos 60 (média de 23,1°C), quando, então, descende na década de 70. A partir dessa década, a média da temperatura volta a se elevar continuamente até atingir seu ápice em 2000, a mais quente. A diferença entre a década mais quente e a mais fria é a média total de todo o período, isto é, 1,9°C.

Este quadro revela uma possível aproximação entre o crescimento urbano da cidade do Rio de Janeiro, que se intensificou da segunda metade até a última década do século XX, e sua influência no campo térmico, discussão explorada por Brandão (1987) e mais recentemente por Lucena (2012). O aumento ocorreu em todas as estações do ano, o que pode reforçar o papel da urbanização sobre a atmosfera local, que não é uma afirmação tão simples conforme discutem Wang and Yan (2016). Para assegurar essa relação é indispensável a aplicação das técnicas estatísticas ou qualquer outro procedimento que garanta a correlação estatística (ENGLEHART and DOUGLAS, 2003; WANG et. al., 2014). Contudo, neste trabalho pode-se inferir tal possibilidade o que é uma importante contribuição para o estudo e análise do clima urbano.



Figuras 4 e 5. Intervalo de confiança (95%) por década para a temperatura média na Praça XV/RJ no verão (à esquerda) e primavera (à direita) entre 1921-2009.

A análise por série temporal é, ainda, uma importante técnica para os estudos em clima urbano, dada a representatividade de uma estação meteorológica convencional padrão. Não obstante, a sua adoção, ora isolada, pode se mostrar inexpressiva, em se tratando de uma pesquisa em clima urbano, principalmente em uma área do porte territorial e urbanizado da RMRJ, pois requer um maior detalhamento da atmosfera, ineficaz com apenas uma observação em um ponto padrão.

Técnica 2: observações de campo combinadas com medições fixas e móveis – transectos fixos e móveis

A técnica combinada de transectos fixos e móveis analisa a variabilidade espaço-temporal do campo térmico, que está condicionada ao sítio, a situação sinótica dominante e aos mais diferentes padrões de uso do solo. Esses experimentos são uma estratégia para “adentrar a cidade”, como expressou Monteiro (2003), para “sondar” o clima e revelar possíveis derivações do ar no interior da cidade.

As técnicas por transectos fixos e móveis se destacam por ampliar a cobertura de dados, inviável apenas por meio de uma estação meteorológica convencional, como se mostrou na análise da técnica anterior. O avanço dessas técnicas amadureceu a compreensão e a análise da ilha de calor, uma vez que expandiu a coleta pontual de dados e favoreceu a criação de uma rede para o mapeamento espacial da temperatura.

Foi selecionado o espaço geográfico da Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, nomeada como Área de Planejamento 5 (AP-5), onde se buscou a compatibilização de informações sobre os aspectos do uso do solo, que serviu de base para a seleção dos pontos amostrais aos experimentos de campo. A importância da região se deve a diversidade da sua natureza física e humana, que configura um mosaico de paisagens naturais e urbanas das mais complexas em toda RMRJ, que se expressam, por exemplo, no registro das temperaturas máximas e mínimas da cidade, e ao acelerado processo de ocupação desde a década de 1980, principalmente por uma população de baixa renda.

Para obter a maior quantidade de áreas, com diferentes características físicas e de uso do solo, foram selecionados 64 pontos amostrais, dos quais 18 correspondem aos pontos de medida fixa (transecto fixo) e 46 aos pontos de medida móvel (transecto móvel), conforme visualizada na Figura 6. Os transectos foram realizados nos dias 26 de janeiro de 2004 (episódio de verão) e 29 de julho de 2004 (episódio de inverno).

A técnica de medidas fixas consiste na seleção de pontos amostrais que durante um período diário (estipulado neste trabalho das 8 às 20 horas) uma equipe realiza medições e observações horárias dos elementos do tempo atmosférico (temperatura, umidade, vento). Para o transecto fixo foram selecionados três pontos amostrais (Pontos A, B e C) em cada bairro principal da Zona Oeste (Realengo, Bangu, Campo Grande, Barra de Guaratiba, Santa Cruz e Sepetiba), totalizando 18 pontos (Figuras 7, 8, 9, 10 e 11). Dos três pontos, o ponto “A” equivale a um “ambiente aberto” (de baixa ou nenhuma densidade construída e/ou baixo fluxo de atividades e veículos) e/ou “arborizado” (como uma praça); e os outros pontos (“B” e “C”) equivalem à rua ou avenida com maior movimento (intenso fluxo de atividades) e de maior densidade construída.

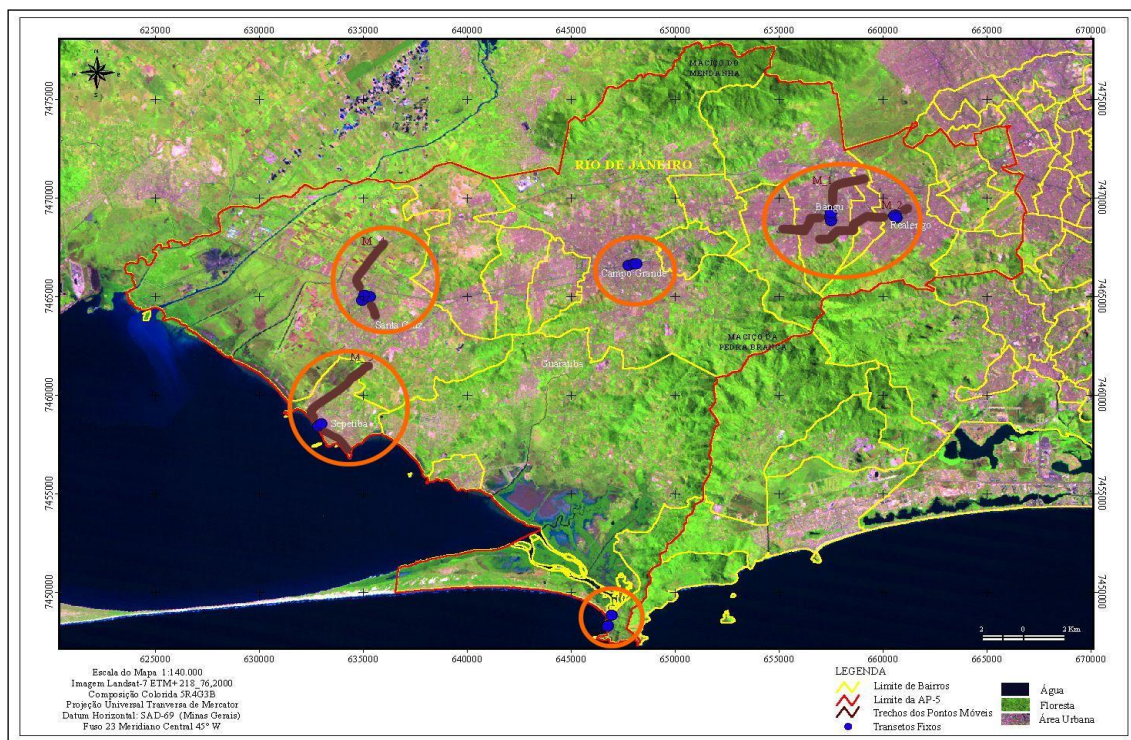


Figura 6. Distribuição dos transectos fixos e móveis na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro.

Para a seleção de cada ponto amostral realizou-se a compartimentação dos atributos naturais do sítio (vegetação) e dos componentes antrópicos (uso do solo, densidade construída etc). Para isso, realizou-se uma análise detalhada do mapa de uso do solo da cidade do Rio de Janeiro, do Mapa de Zoneamento na escala 1:10.000 e do Mapa de Gabarito, também na escala 1:10.000. E, por fim, realizou-se uma pesquisa de campo para observar as características de cada ponto selecionado, fotografados e referenciados em GPS (*Global Position System*) para a posterior plotagem em mapa.

Em cada bairro, das 8 às 20 horas, duas pessoas realizaram observações horárias da temperatura e umidade do ar, através do Psicrômetro de Funda¹, da cobertura do céu (catalogada por observações da disposição das nuvens no campo visual do espaço local, medida em oitavos [8]), direção e intensidade do vento (segundo a Escala de Beaufort), fluxo de veículos (obtido através da contagem durante 1 minuto, feita simultaneamente com a coleta dos outros dados, tendo como campo visual o cruzamento entre as duas ruas mais próximas) e a situação do tempo presente (céu claro ou nublado).

¹ Aparelho com dois termômetros de coluna de mercúrio, um com o bulbo seco e outro coberto por uma musselina que quando umedecido se estabelece como o bulbo úmido.

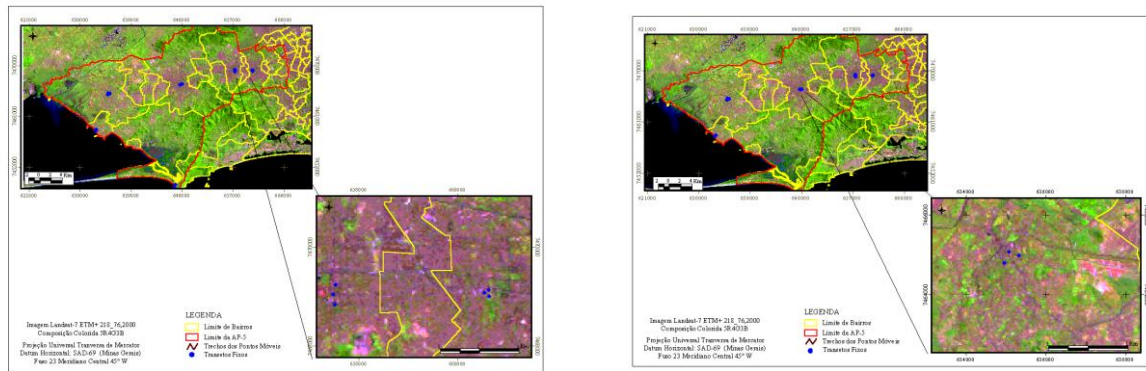


Figura 7 e 8. Transecto fixo em Realengo e Bangu (à esquerda) e Transecto fixo em Campo Grande (à direita).

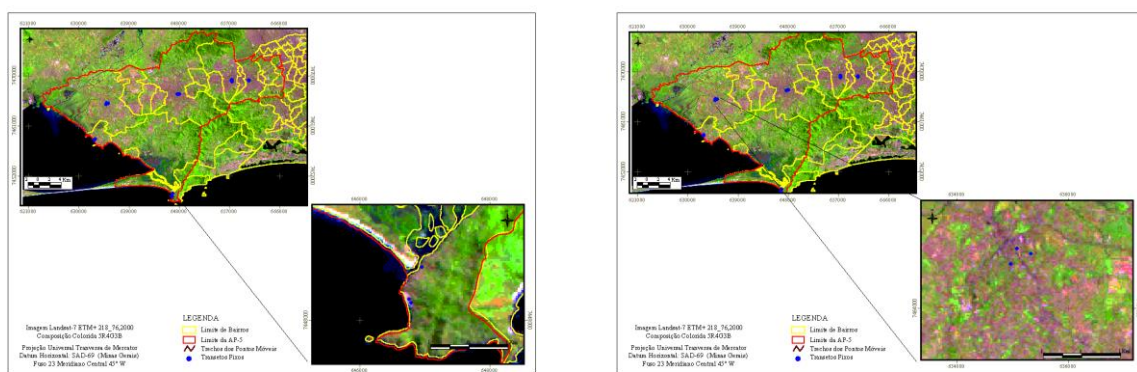


Figura 9 e 10. Transecto fixo em Barra de Guaratiba (à esquerda) e Transecto fixo em Santa Cruz (à direita).

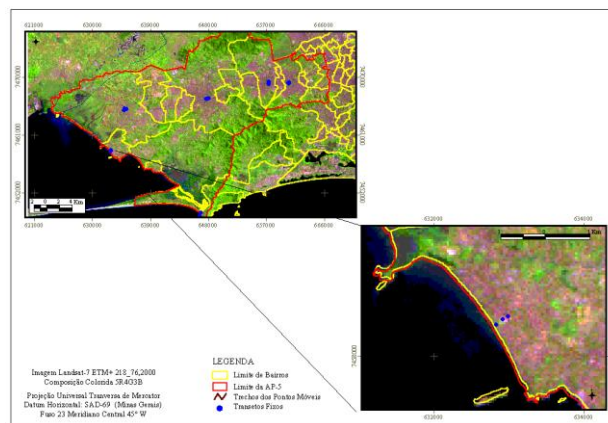


Figura 5. Transecto fixo em Sepetiba.

A técnica por transectos móveis abrange uma área espacial maior e torna as medições mais rápidas, não necessitando de uma equipe de voluntários que fique restrita às medições fixas durante várias horas do dia o que requer, antes de tudo, disponibilidade e preparação técnica. O transecto móvel equivale ao percurso das áreas amostrais em automóvel (que pode ser feito por bicicleta ou motocicleta), equipado com sensor térmico protegido por um material isolante. O sensor protegido, situado a 1,5 metros do solo, mensura a temperatura interna e externa ao veículo a cada ponto que pode ocorrer com o veículo em

movimento (medição móvel intermitente) ou com uma parada em cada ponto (medição móvel contínua). Para este trabalho foram realizados 4 transectos móveis² (Figuras 12 e 13) com a medição móvel contínua, em que o automóvel se locomoveu em velocidade média de 50 Km/h e o tempo e a quilometragem do percurso flutuaram entre 18 e 40 minutos e 6 e 9,2Km, respectivamente.

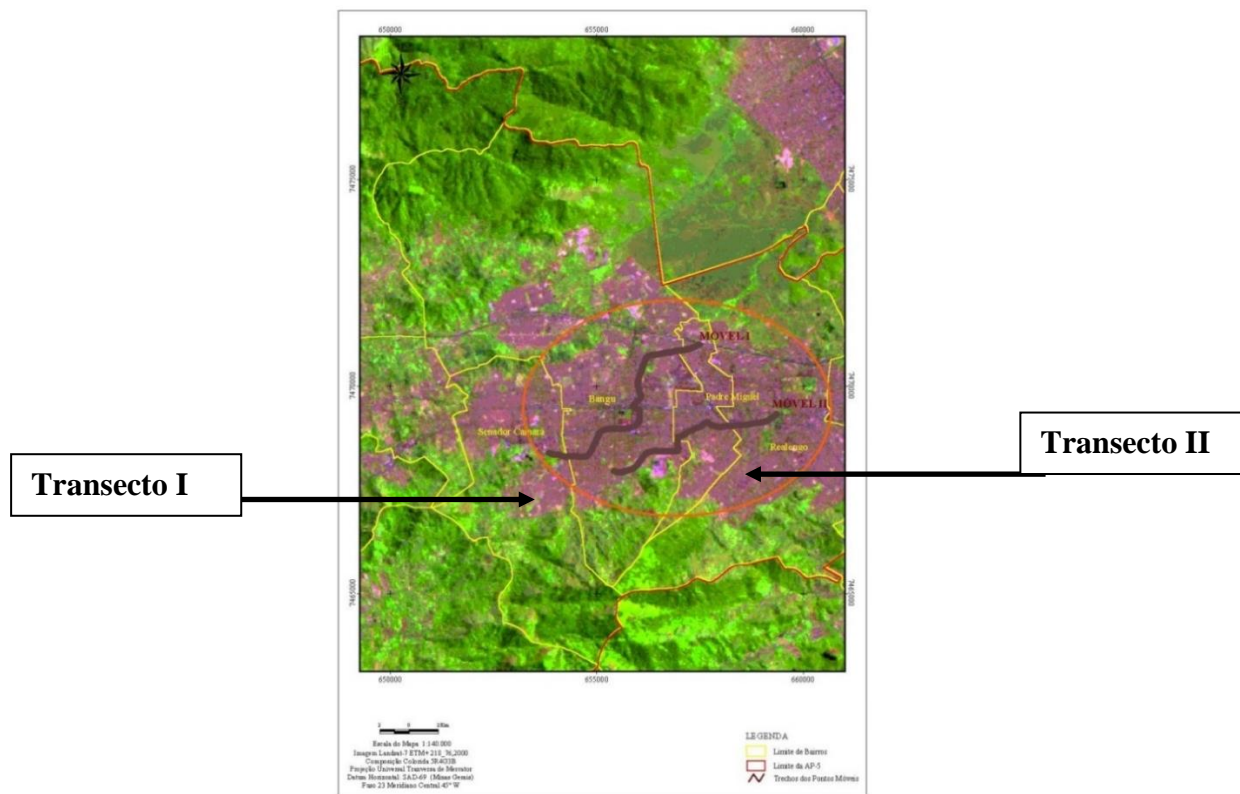


Figura 12. Transecto móvel I (Bangu-Avenida Brasil) e II (Bangu-Realengo).

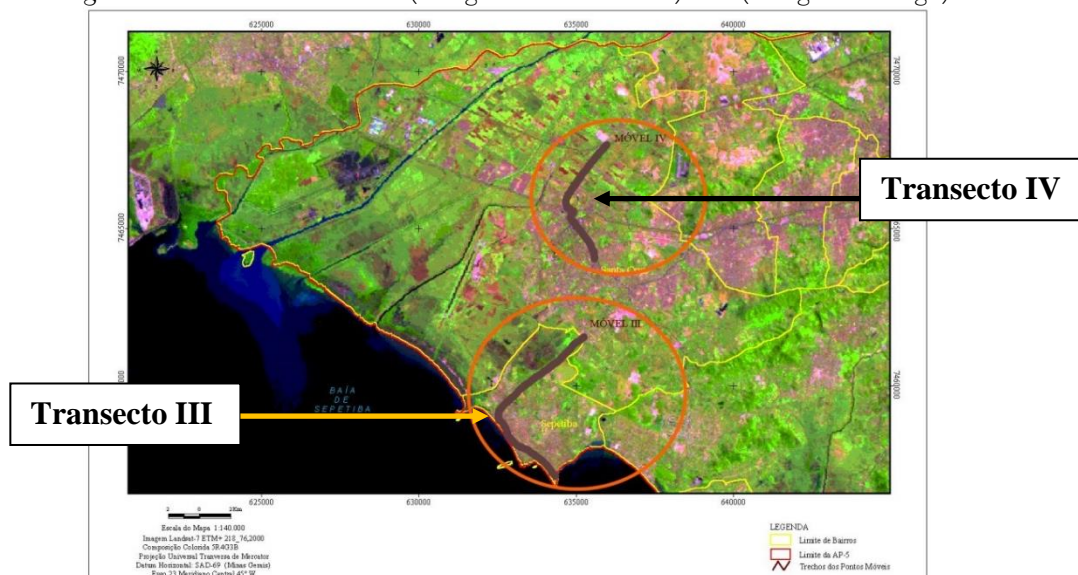


Figura 13. Transecto móvel III (Santa Cruz-Sepetiba) e IV (Santa Cruz - Avenida Brasil) Fonte: ?????

² O detalhamento espacial dos transectos fixos e móveis podem ser explorados em Lucena (2005). Neste artigo pretende-se apenas dar uma visão geral de como a técnica foi adotada

Cada automóvel estava equipado com um termohigrômetro³ digital a 1,5 metro do solo, acoplado a um duplo tubo de plástico, situado no sentido transversal do automóvel e mantido ao lado do carona. Simultaneamente às medições digitais de temperatura e umidade, os integrantes do automóvel observaram a cobertura do céu e a velocidade do vento. Três horários padrões foram selecionados para a realização dos transectos móveis: 6, 13 e 20h. O horário das 6h caracteriza a fase final do processo de resfriamento noturno, quando por volta deste horário se estabelece a temperatura mínima do dia; às 13h se configura, geralmente, o pico do aquecimento diurno estando próximo da temperatura máxima diária; às 20h encontra-se no período de “transferência” da radiação de ondas longas para a atmosfera, decorrendo, portanto, o processo de resfriamento noturno.

Finalmente, calculou-se a ilha de calor urbana, classicamente definida pela diferença entre um ponto ou área urbana de um ponto ou área rural. Com o avanço das áreas urbanas sobre as rurais e das regiões metropolitanas, o conceito sofreu adaptações. Neste artigo a ilha de calor urbana é uma diferença entre os diferentes espaços intraurbanos da Zona Oeste, uma vez que a região é totalmente urbana, conforme classificação do IBGE. Portanto, a “ilha de calor urbana” foi definida como a diferença entre o ponto de temperatura mais alta que excede o de temperatura mais baixa, para o mesmo horário, sendo um fenômeno relativo da temperatura das áreas observadas.

A temperatura mais baixa foi tomada como a “temperatura zero”, nomeada como a “ilha de frescor”, e a temperatura mais alta foi tomada como a intensidade máxima da ilha de calor. Foi calculada a magnitude da ilha de calor, a saber: Fraca (0-2,0°C); Moderada (2,1-4,0°C); Forte (4,1-6,0°C); Muito Forte (> 6,0°C). Tanto para o mapeamento dos pontos fixos como para os móveis, os valores utilizados foram os relativos, isto é, a diferença entre os dados de temperatura.

Neste estudo foram considerados os resultados obtidos para o episódio de verão (26/01), que segundo as cartas sinóticas de superfície e as imagens de satélite do dia, um sistema de baixa pressão foi responsável pelo alto índice de nebulosidade, que esteve associada a Zona de Convergência do Atlântico

³ Termômetro que registra os valores de temperatura dentro (“in”) e fora (“out”) do automóvel - e da umidade relativa do ar. Para o trabalho os valores utilizados são os da temperatura externa (“out”).

Sul (ZCAS). Ventos de nordeste, com fraca intensidade, e alto teor de umidade, proveniente do Oceano, também foram constantes.

O transecto fixo

A intensidade da ilha de calor variou durante o dia de fraca a muito forte. Até o meio dia a intensidade máxima, o “core”, não ultrapassou a magnitude “moderada” enquanto à tarde e à noite oscilou entre “forte” e “muito forte”. O core da ilha de calor manteve-se estacionária, diariamente, sem mobilidade espacial, no bairro de Campo Grande. Sua magnitude variou entre moderada (pela manhã) e forte (à tarde e à noite). Às 13 e às 14 horas o bairro Bangu e às 10 e às 17 horas o bairro Sepetiba apresentam magnitude forte, que se aproximam dos valores registrados em Campo Grande. A ilha de frescor se desenvolveu no bairro de Barra de Guaratiba entre às 12 e às 20 horas, enquanto pela manhã a ilha de frescor restringiu-se ao bairro Realengo (Figura 14).

O eixo Realengo, Bangu e Campo Grande apresenta duas importantes peculiaridades: está encaixado no vale da Baixada de Bangu e concentra os mais elevados números de população absoluta da região. Estas peculiaridades conjugadas são determinantes para a manutenção e elevação e temperaturas mais altas, contribuindo para a definição na intensidade da ilha de calor urbana. Campo Grande é o bairro mais quente, o que surpreende, haja vista que o bairro não sustenta um histórico com temperaturas tão altas na Zona Oeste, como em Bangu e Realengo, bairros que continham estação meteorológica.

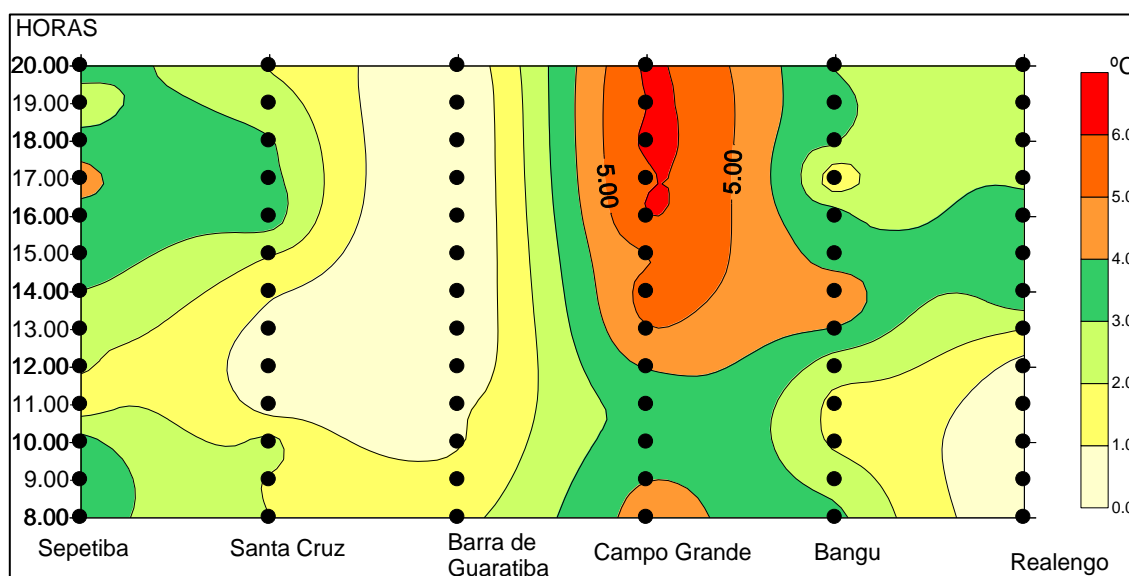


Figura 14. Variação horária e intensidade da ilha de calor no transecto fixo Realengo-Sepetiba no dia 26/01/2004.

Em Realengo a ilha de calor urbana apresentou baixas magnitudes, se aproximando dos espaços mais frescos da Zona Oeste. Empiricamente esperava-se valores mais altos pelo fato da sua localização mais próxima a Bangu, como ainda por conta da temperatura coletada na extinta estação meteorológica do bairro, quando em muitos momentos ultrapassou a temperatura coletada na estação meteorológica de Bangu.

Barra de Guaratiba, localizado na Baixada de Guaratiba, e Santa Cruz e Sepetiba localizados na Baixada de Santa Cruz apresentam magnitudes mais amenas da ilha de calor urbana, sendo em Barra de Guaratiba a área da ilha de frescor diurna e noturna. Muito provavelmente este quadro reflete a situação geográfica dos bairros: suas baixadas abertas para a baía de Sepetiba e os números mais baixos da população absoluta, que coincide com uma ocupação mais rarefeita e menos densa. Ainda assim, a ilha calor de Sepetiba diferencia-se bastante de Santa Cruz e Barra de Guaratiba, quando em grande parte do dia registra magnitudes superiores a Realengo.

O transecto móvel

Quatro transectos (dois na Baixada de Bangu e dois na Baixada de Santa Cruz) foram realizados com o fim de verificar as diferenças espaciais da temperatura nestes dois sítios da Zona Oeste. O transecto II (Bangu-Realengo) foi descartado, em função dos problemas no termohigrômetro digital, o que deixa claro os imprevistos ocorridos neste tipo de experimento.

A Figura 15 representa a distribuição espacial da ilha de calor entre os 36 pontos dos três transectos. A coordenada das abscissas considera os transectos da seguinte forma: 1-13 (Transecto I Bangu-Av. Brasil), 1-11 (Transecto III Santa Cruz-Sepetiba) e 1-12 (Transecto IV Santa Cruz-Av. Brasil). A coordenada das ordenadas considera a variação da ilha de calor. Em síntese, o gráfico demonstra que nos três horários os valores mais elevados da ilha de calor se espacializou no transecto I.

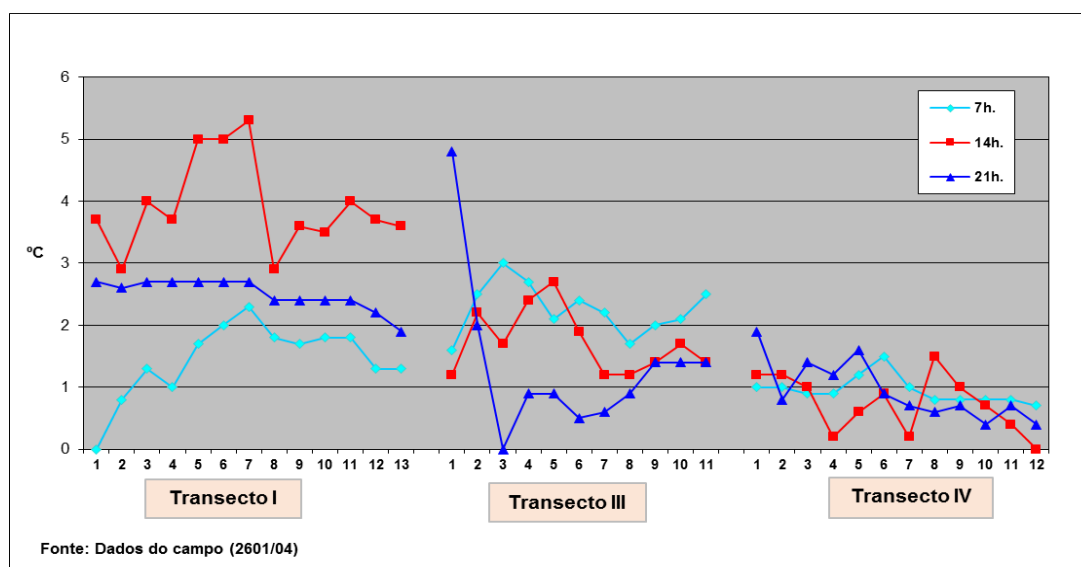


Figura 15. Variação horária (7h, 14h e 21h.) da ilha de calor entre os transectos móveis I, III e IV no dia 26/01/04.

Às 7 horas a intensidade da ilha de calor urbana variou de magnitude fraca a moderada, atingindo o core de 3°C no ponto 3 do transecto III; em oposição a ilha de frescor se manifestou no ponto 1 do transecto I. Neste horário os núcleos mais intensos da ilha de calor urbana oscilaram entre o transecto I e III, porém mais concentrado no transecto III.

No transecto I os núcleos mais amenos, inclusive a ilha de frescor, se concentraram nos primeiros cinco pontos, que correspondem à área residencial de Bangu, situado bem próximo a encosta do maciço da Pedra Branca, e nos pontos 12 e 13, ambos situados nas proximidades do Maciço do Mendanha.

No transecto III os núcleos mais quentes da ilha de calor urbana estão situados nas vias de maior circulação, que correspondem aos pontos 1, 2, 3, 4 e 11. No setor praiano e mais interiorizado, área residencial do bairro, se concentrou o núcleo mais ameno da ilha de calor urbana. Assim como no anterior, no transecto IV os núcleos mais elevados da ilha de calor urbana se concentraram nas principais vias de circulação, como os pontos de 1 a 6, mas com intensidades, em média, abaixo de 1°C o que revela que os núcleos foram bem amenos, quando comparados aos outros dois transectos.

Às 14 horas o transecto I concentra todos os núcleos mais quentes da ilha de calor urbana, que variou entre todas as magnitudes, fraca, moderada e forte. O core (5,3°C) ocorreu em frente a Estação

ferroviária. Neste horário as variações da intensidade da ilha de calor urbana não são muito díspares, pois todos os pontos recebem quantidade de energia semelhante, assumindo temperaturas bem elevadas.

O transecto III desenvolve os núcleos mais quentes da ilha de calor urbana, variando a magnitude de fraca a moderada. Os pontos mais quentes foram os localizados no início do percurso (entre os pontos 1-6), dos quais os quatro primeiros correspondem às vias de grande circulação.

O transecto IV concentra núcleos bem amenos da ilha de calor urbana, de fraca intensidade, pouco ultrapassando 1,0°C. O ponto 8 registra a média mais alta do horário (1,5°C). É neste transecto que se localiza a ilha de frescor diurna, individualizada no último ponto (12), trecho final da mais importante via expressa da cidade (a Avenida Brasil), com grau de ocupação e densidade construída reduzidos.

As 21 horas o transecto I abriga os núcleos mais quentes, variando sua magnitude de fraca a moderada, mas que não ultrapassou 3°C. Entre os pontos não há muita variação, a diferença entre os pontos da área comercial com a área residencial é baixa (0,3°C). No transecto III os núcleos são ainda mais amenos, cuja intensidade da ilha de calor urbana variou na magnitude “fraca”, isto é, até 2°C. Contudo, a intensidade máxima da ilha de calor urbana noturna situou-se no ponto 1 (4,8°C) e a ilha de frescor se situou ainda neste transecto, no ponto 3. O transecto IV seguiu um comportamento semelhante ao anterior, com núcleos intercalados até 2°C, de fraca magnitude. Os valores mais elevados (acima de 1°C) se desenvolveram nos primeiros cinco pontos, distribuídos ao longo da principal rua do bairro de Santa Cruz, e os valores mais amenos (abaixo de 1°C) oscilaram entre as vias secundárias do setor residencial e a Avenida Brasil.

A ilha de calor urbana é uma realidade na Zona Oeste. Historicamente a região abriga temperaturas bastante elevadas (registrada em suas estações meteorológicas de Bangu e Santa Cruz), muito em função das condições naturais do sítio. É a região de maior dimensão territorial da cidade, como também comporta a maior população absoluta e os maiores indicadores de crescimento populacional atual e, portanto, necessita de atenção quanto ao papel do clima no planejamento urbano e ambiental.

A técnica por transectos fixos e móveis é satisfatória e mostra eficiência pela abrangência de um número expressivo de espaços intra-urbanos com diferentes características geoecológicas e de uso do solo, além do empenho na pesquisa de campo e pela incorporação na análise dos tipos de tempo atuante no experimento. É uma técnica complexa e de alto custo por conta dos equipamentos, da infraestrutura requerida e pelo número de pessoas envolvidas nele. Há limitações e precisa ser aperfeiçoado, principalmente no que se refere à qualidade e aferimento dos instrumentos e a incorporação de outros mais modernos, como as estações automáticas ou o uso de Veículo aéreo não tripulado (VANT) e drones, que poderão ampliar o número de amostras e de medidas em uma mesma ou diferentes situações sazonais.

Técnica 3: as observações de campo por sensoriamento remoto – sensoriamento remoto da atmosfera.

Inicialmente, foi elaborado um mapa de uso do solo a partir de uma imagem-base de 02/08/2007. Com uma amostra representativa da imagem, denominada como imagem verdade, identificou-se, visualmente, as classes Urbano, Rural ou Urbano de baixa densidade, Corpos de água e Vegetação. Após o processo de classificação, as imagens foram comparadas à imagem verdade segundo os índices de exatidão global e Kappa. O método que obteve os melhores resultados foi o Bhattacharya.

Ao final do processamento, foram extraídas quatro classes, Urbano, Rural ou Urbano de Baixa Densidade (RUBD), Vegetação e Corpos de água, consideradas as mais relevantes para análise temporal-espacial do uso do solo. A classe “urbano” foi definida como as áreas de maior densidade construída, como o adensamento de construções e grandes vias de circulação. Nessa classe, entram as áreas residenciais e comerciais, horizontais ou verticalizadas, assim como grandes áreas de favelas. A classe “rural ou urbano de baixa densidade” é definida como áreas de ocupação mais rarefeita, isto é, construções mais espalhadas, com pouco adensamento, um maior alinhamento horizontal, mistura de usos entre o asfalto e solo nu (sem asfalto) e área com vegetação ou mesmo de uso agrícola, presente em extensas áreas da zona oeste carioca e na Baixada Fluminense. A classe “vegetação” foi estabelecida como toda e qualquer área verde sem distinção de tipo ou espécie vegetal ou de bioma. Desse modo, áreas de “mata nativa”, como em encostas e topos de morros, assim como áreas de parques e praças

urbanas com vegetação foram assim classificadas. Finalmente, a classe corpo de água foi definida como todas as áreas hídricas, incluindo água do mar, baías e lagoas até os rios que o algoritmo classificador identificou.

Reuniu-se uma série temporal com 112 imagens da plataforma Landsat-5 e 7 entre 1984 e 2010. Todas as imagens estão situadas na órbita-ponto 217-76, que abrange a cidade do Rio de Janeiro e a sua região metropolitana, e correspondem ao período matutino. Oscila entre as 12h e 12h50m (GMT), isto é, entre 9h e 9h50m no horário local (hora de Brasília) para as imagens de outono-inverno, e entre 10h e 10h50m no horário local (horário brasileiro de verão) para grande parte das imagens de primavera-verão. Dois critérios foram adotados para a seleção. O primeiro é a ausência ou a baixa presença de nuvens sobre a área continental da RMRJ. A qualidade radiométrica da imagem foi outro critério adotado, isto é, a presença de ruídos em uma das bandas que impedisse o processamento radiométrico. Com base nos dois critérios adotados, 13 imagens da série temporal de 112 foram excluídas, restando 99 para processamento e análise.

As imagens passaram por um tratamento digital e, posteriormente, georeferenciadas a partir de uma correção geométrica. Em sequência adotou-se a correção radiométrica que transformou os dados brutos, inicialmente em números digitais (ND), em dados de radiância e convertidos em valores de reflectância. Essas transformações foram feitas conforme equações e constantes de calibração presentes nos trabalhos de Chander and Markham (2003) e Chander et al. (2009). Em seguida, foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens, técnicas adaptadas ao Landsat: 1) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda do vermelho; 2) técnica do limiar bruto (gross threshold) e 3) técnica Q.

Estimou-se a Temperatura da Superfície Continental (TSC) utilizando a banda 6 do Landsat com base em diferentes parametrizações (QIN et al., 2001; SOUZA e SILVA, 2005), onde a correção atmosférica é realizada utilizando-se dados de estações meteorológicas. A TSC será resultado da combinação entre a temperatura de brilho na banda 6 e um fator de correção que considera a influência atmosférica e a emissividade da superfície no sinal registrado pelo instrumento a bordo do satélite. A emissividade foi obtida a partir do NDVI de acordo com Van de Griend and Owe (1993).

O uso do solo na RMRJ (Figura 16) apresenta uma concentração da classe urbano no entorno do setor leste e oeste da baía de Guanabara e em direção a sudoeste. A classe “rural ou urbano de baixa densidade” é rarefeita, mas homogênea no extremo leste da baía. A classe “vegetação” está concentrada nas áreas dos maciços da cidade do Rio de Janeiro (Tijuca, Pedra Branca e Mendanha), na serra do Mar e nas áreas de mangue ao fundo e ao norte da baía de Guanabara e no entorno das lagoas costeiras. As pequenas serras a leste da baía também resguardam grande parte da classe “vegetação”.

A TSC (Figura 17) tem seus maiores valores, em tons de vermelho, acima dos 30°C, na área mais urbanizada, à margem leste da baía de Guanabara e nas áreas planas entre os três maciços costeiros (Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha). Esses espaços definem os núcleos mais intensos da ilha de calor urbana que se concentram na classe “urbano” na cidade do Rio de Janeiro. Em direção ao extremo oeste e à faixa litorânea sul, há uma segunda mancha quente (TSC entre 24 e 30°C), definindo núcleos secundários da ilha de calor, correspondendo a transição entre a classe “urbano” e o “rural ou urbano de baixa densidade”. Essas duas áreas são mais urbanizadas de padrão mais recente que mesclam usos mistos, entre o urbano, o periurbano, o solo exposto e o uso agrícola. Finalmente, nas áreas em tons verde (TSC entre 15 e 24°C), na área dos maciços costeiros, estão registrados os valores mais baixos de TSC, entre as classes de “vegetação” e do “rural ou urbano de baixa densidade”.

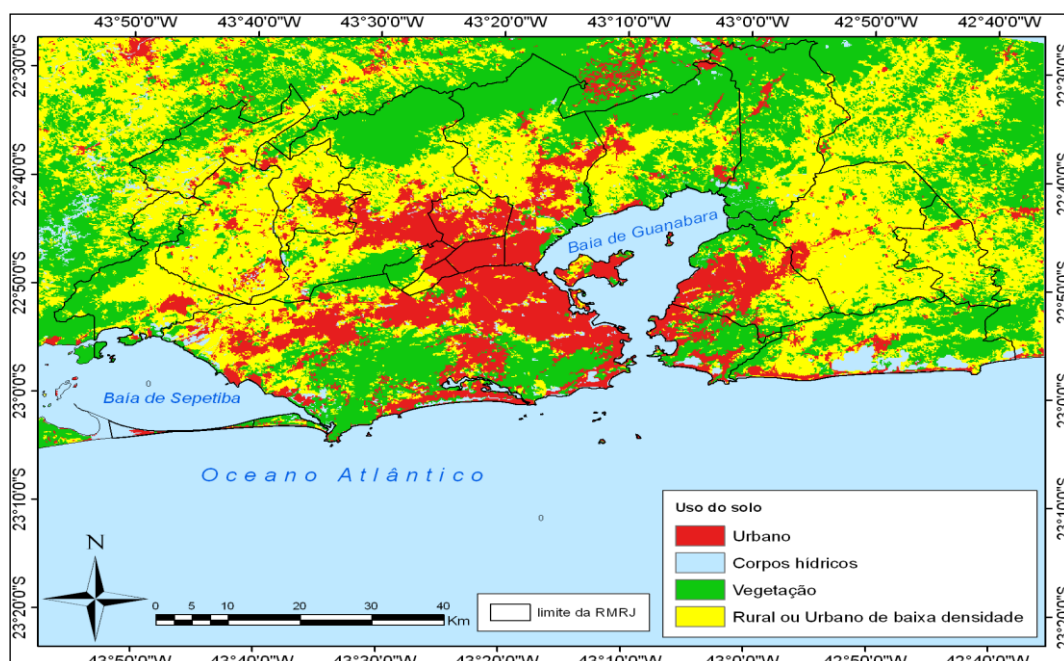


Figura 16. Uso do solo na RMRJ.

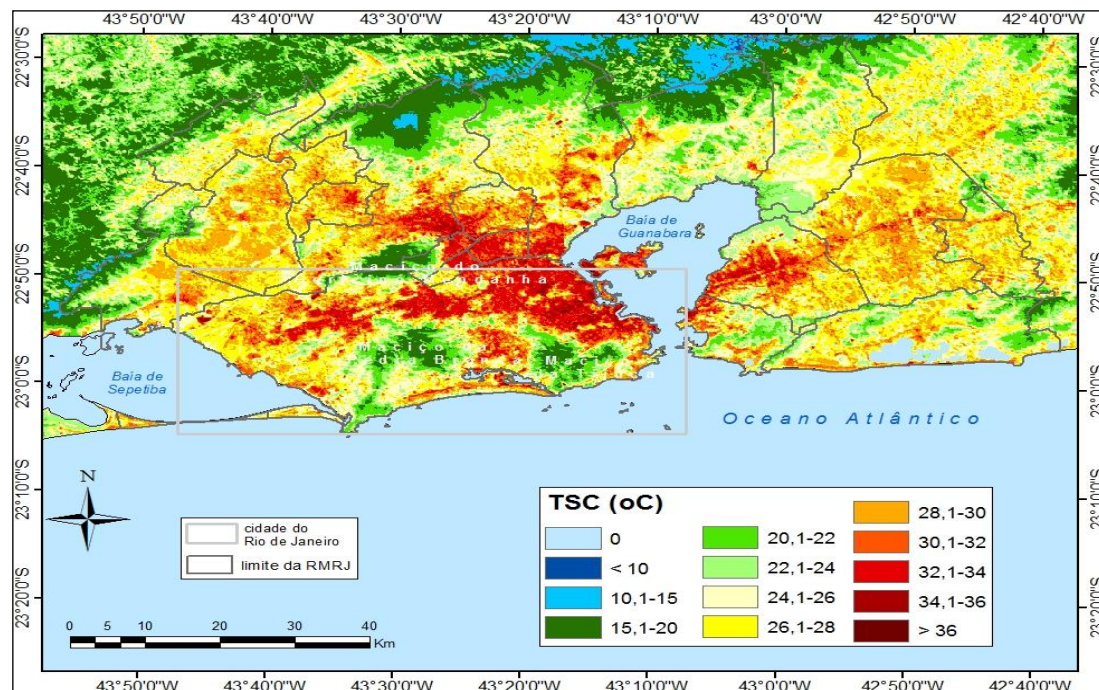


Figura 17. Temperatura da Superfície Continental (TSC) na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no período 1984-2010.

Além dos limites administrativos da cidade do Rio de Janeiro, as outras cidades da RMRJ reproduzem um padrão espacial térmico semelhante, que obedece a seguinte lógica: áreas mais quentes se encontram nos locais mais urbanizados decrescendo em direção às áreas de “vegetação”, com vegetação ou floresta. Não obstante, é possível observar valores altos de TSC em espaços não urbanizados, de uso “rural ou urbano de baixa densidade”, identificados no setor nordeste e noroeste, em tons amarelo-laranja, ao passo que em áreas densamente urbanizadas há pixels com TSC abaixo de 20°C, que se assemelha as áreas verdes, que se deve aos redutos de área verde permanentes ou artificiais, configurando espaços de “ilhas de frescor”.

O sensoriamento remoto é essencial para o mapeamento do campo térmico e detecção da ilha de calor urbana, por conta da sua abrangência espacial, que não pode ser atingida por transectos fixos e móveis, por mais que haja muitos pontos amostrais. A partir de suas diferentes técnicas, muitos produtos, além da TSC, podem ser incorporados na análise espacial do campo térmico, conjugado com um detalhado mapa de uso do solo, como é o caso do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), o IBI (Índice de Área Construída), a ISA (Área Impermeável da Superfície), entre outros.

As imagens da plataforma Landsat utilizadas (dos sensores 5 e 7) são de grande representatividade no mapeamento da temperatura, que se deve a sua extensa série temporal disponível, sendo esta a grande vantagem da plataforma. O horário regular de passagem do satélite varia entre as 9h e 11h para o hemisfério sul, período em curso do aquecimento diurno, e a sua passagem ocorre a cada 16 dias. Outros sensores, como o ASTER e o MODIS, precisam ser incorporados nas análises do clima urbano, e que já estão em curso. O ASTER tem diversos dias e horários alternativos de passagem, além de possuir inúmeras bandas termais, que alimentam o cálculo da TSC. O MODIS tem uma periodicidade diuturna, manhã e noite, o que sugere uma análise do ciclo diurno da ilha de calor. Deve-se, portanto, dar continuidade ao uso da série Landsat, atualmente na série 8, e procurar comparar suas respostas espectrais com os outros sensores.

Técnica 4: Modelagem numérica com modelo de mesoescala – MM-5

Foram realizadas 11 simulações com o modelo de mesoescala MM5 (Mesoscale Model Version 5) entre 2007 e 2010, ano com disponibilidade de dados meteorológicos do modelo global GFS (Global Forecast System Model) do National Centers for Environment Prediction (NCEP), que são a entrada para a inicialização do modelo, até 2010. Destas simulações selecionou-se uma data de verão, 23/02/2007, para este trabalho, que coincide com a passagem de uma imagem Landsat. A configuração do modelo MM5 (GRELL et al., 1995), o domínio das grades, a resolução espacial, o aninhamento (ou sub rotinas) de grade e as parametrizações físicas basearam-se em Corrêa (2004) e Moraes et. al. (2005). As simulações utilizaram três domínios aninhados, centralizados sobre a cidade do Rio de Janeiro, com resoluções horizontais de 27, 9 e 3 km, respectivamente. Todos os domínios utilizaram topografia e categorias de uso do solo originados do United State Geological Survey (USGS) com resoluções espaciais de 19, 9 e 1 km, respectivamente.

As simulações abrangem os mesmos recortes espaciais da imagem Landsat. Assim, o campo simulado de temperatura da superfície foi extraído do aninhamento⁴ de maior resolução, ou seja, 3 km. A

⁴ é uma expressão da linguagem de programação que significa sub-rotinas acopladas a outras, muito utilizada nas modelagens.

temperatura da superfície do Modelo é definida como “skin temperature”, que representa a temperatura da superfície do solo. Campos de calor latente e sensível, umidade relativa do ar e umidade do solo, altura da camada limite, direção e velocidade do vento gerados pela simulação do MM-5 são adicionados para apoiar a análise comparativa da temperatura do modelo a do Landsat.

Dados horários de temperatura do ar de estações meteorológicas foram utilizados para comparar com a temperatura do MM5, buscando a sua validação estatística e o comportamento da temperatura, resultado que não será explorado neste trabalho. As mesmas coordenadas geográficas das estações meteorológicas foram utilizadas como pontos de comparação entre a temperatura da superfície do MM-5 com a TSC do Landsat. Foram elaborados gráficos comparativos da série temporal de 48 horas entre os dados das estações meteorológicas e do MM5, que não serão explorados na análise, e gráficos comparativos para às 11h, horário mais próximo da passagem do satélite, entre os dados do MM5 e do Landsat.

Para descrever o tempo atmosférico e integrar a análise das condições atmosféricas dominantes aos resultados gerados, recorreu-se à consulta de imagens GOES de vapor de água, ao CPTEC/INPE, e a carta sinótica de superfície a 1000 mb, recorrida a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN). Procurou-se o horário mais próximo da passagem do sensor Landsat (10h40m) e das simulações do MM5 (11h), a saber, 9h30m (10h30m) ou 9h45m (10h45m) para as imagens GOES e 9h (10h) para as cartas sinóticas de superfície.

A utilização da modelagem em conjunto com o sensoriamento remoto é importante para os estudos em clima urbano (FREITAS e SILVA DIAS, 2005). Os modelos em mesoescala mostram habilidade em reproduzir o fenômeno da ilha de calor urbana e seus efeitos correlatos, que simulam sua intensidade, estrutura espacial e dinâmica temporal. Nessa etapa, o objetivo foi simular a temperatura da RMRJ pelo Modelo MM5 e comparar com as imagens termais do Landsat, sua TSC.

Para o dia da amostra da simulação e a sua comparação com a imagem termal, 23/02/2007, o tempo sinótico foi de estabilidade, sem nuvens e com ventos fracos de norte e leste. A Figura 18 mostra a distribuição pontual da temperatura da estação meteorológica, do modelo numérico e do satélite em 10

pontos da RMRJ. A temperatura estimada pelo satélite é a mais alta, seguida pelo modelo e pela estação meteorológica. A única exceção ocorre na Marambaia, quando a temperatura da estação é levemente superior ao modelo. A temperatura estimada pelo satélite revela gradiente muito alto quando comparada as outras fontes da temperatura, principalmente com a estação meteorológica. A média de todas as localidades entre a temperatura do satélite com a estação é de 16,3°C (27°C em Jacarepaguá-Metar) e cai para 11,4°C com o modelo (o valor máximo absoluto é de 22,8°C, também em Jacarepaguá-Metar). Por outro lado, quando se compara a média do gradiente entre o MM5 e a estação meteorológica, o valor é mais baixo, 5,9°C (atinge 9,1°C em Niterói).

O gradiente térmico discrepante entre a temperatura estimada pelo Landsat-5 com a estação meteorológica deve-se pela natureza da superfície fonte. Enquanto a primeira corresponde à temperatura da superfície (TSC), a segunda registra a temperatura do ar, livre do atrito, acima 1,5 metro da superfície. São consideradas as sucessivas técnicas para a correção atmosférica da primeira visando a descontaminação do píxel. No entanto, a temperatura do modelo, que se baseia na temperatura da superfície (skin temperature), possui um gradiente mais distante ao satélite e um pouco mais próximo da estação. Essa resposta pode estar relacionada aos componentes da simulação desenvolvida pelo MM5, ou ainda, a temperatura a 1,5 metro da superfície pode alcançar um gradiente de 15°C inferior à superfície em um dia ensolarado e calmo.

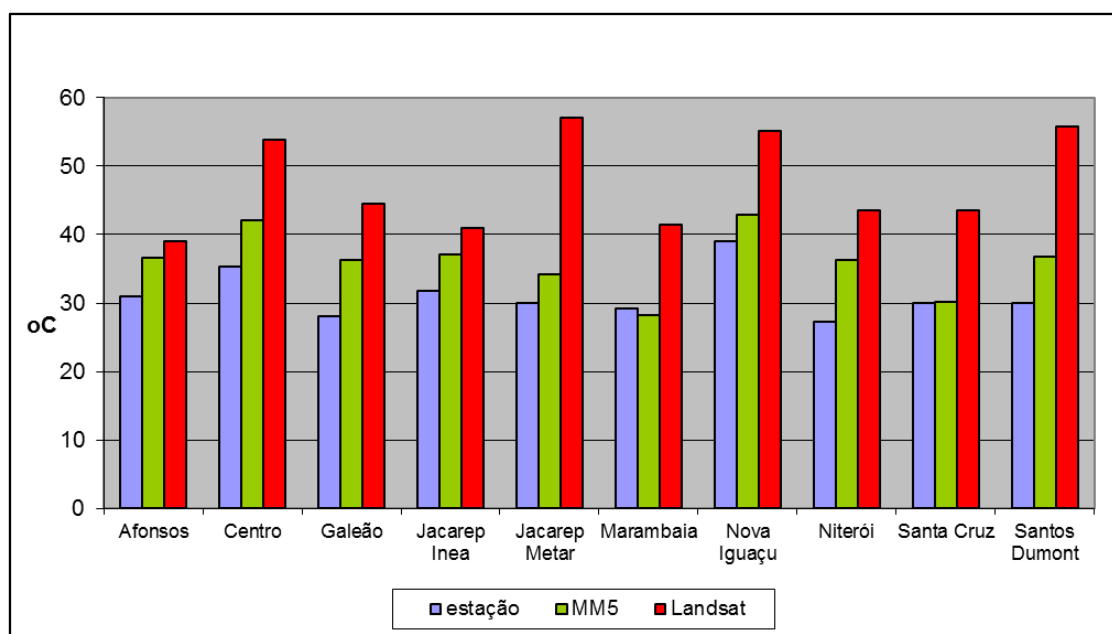


Figura 18. Variação da temperatura observada pela estação meteorológica, da temperatura simulada pelo modelo MM5 (skin temperature) e da temperatura estimada pelo satélite Landsat-5 (TSC) em 23/02/2007 às 10h em 10 pontos da RMRJ.

Na comparação entre a TSC estimada pelo Landsat-5 e a temperatura simulada pelo MM5, a primeira concentra seu núcleo mais quente na borda leste da baía de Guanabara e nas áreas planas entre os três maciços costeiros, em direção ao extremo oeste e ao setor centro-norte (Figura 19), áreas mais urbanizadas. É um núcleo com temperaturas acima de 46°C, que pode atingir 70°C. As áreas mais amenas, abaixo de 30°C, estão nas áreas mais vegetadas. A skin temperature simulada pelo MM5, em suas devidas proporções, concorda com a espacialização da temperatura estimada pelo Landsat e ratifica as áreas sujeitas à geração da ilha de calor urbana. Áreas em tom vermelho mais escuro, abrigam o núcleo mais quente, acima de 34°C, e conforma-se nas bordas leste e oeste da baía de Guanabara com extensão a oeste (Figura 20). As áreas mais amenas, salvo exceções, aderem àquelas mostradas pelo Landsat, mais evidente na porção norte da Figura com valores que podem estar abaixo de 28°C e bem próximo a 20°C. O modelo identifica os três maciços costeiros em tons de amarelo e laranja (entre 25 e 30°C) revelando a função da vegetação no rebaixamento da temperatura.

Considerando os outros produtos do modelo para complementar a análise da temperatura, o calor latente e sensível (Figuras 21 e 22) são bons indicadores para estimar a perda ou o ganho de energia. É notória a baixa disponibilidade de calor latente, abaixo de 130 W.m², na densa área urbana onde se localizaram os valores mais elevados da temperatura. Nas áreas com altos valores de calor sensível correspondem aos valores mais baixos de calor latente.

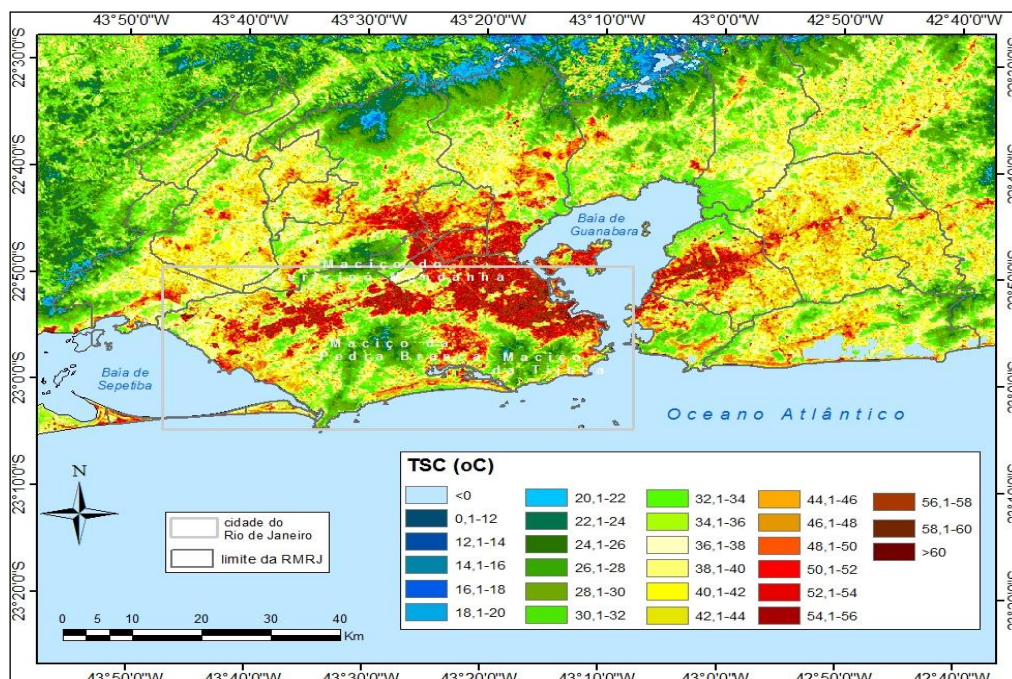


Figura 19. Temperatura da Superfície Continental (TSC) na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no dia 23/02/2007 às 12h46 (GMT) pelo Landsat-5.

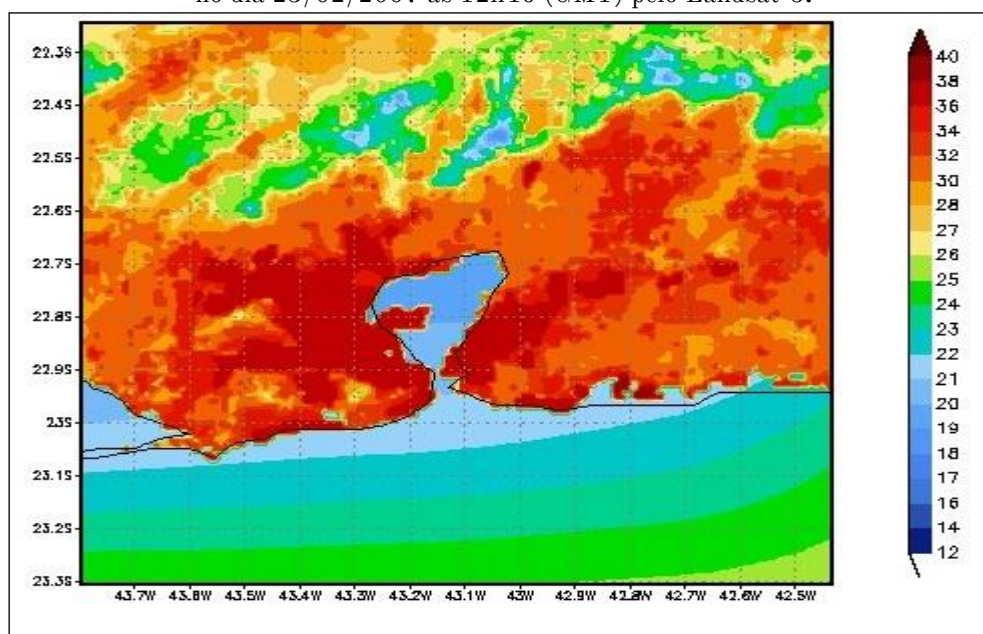


Figura 20. Temperatura da superfície (skin temperature) simulada pelo Modelo MM5 na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no dia 23/02/2007 às 12h (GMT).

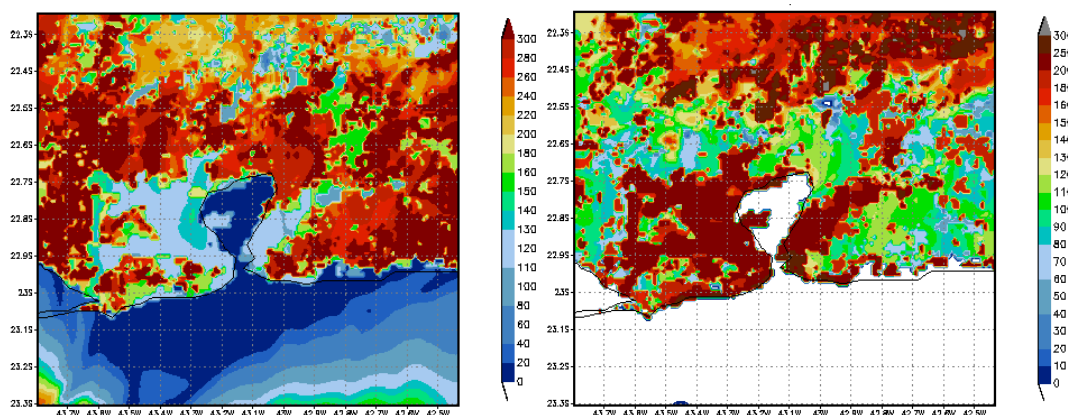


Figura 21 e 22. Temperatura da superfície (skin temperature) simulada pelo Modelo MM5 na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no dia 23/02/2007 às 12h (GMT).

A baixa disponibilidade de calor latente se estende mais para a Zona Oeste e para o interior da Baixada Fluminense. Os valores mais altos, acima de 240 W.m^{-2} , propagam-se no entorno da RMRJ e nos maciços costeiros do Rio de Janeiro e Niterói. A configuração da mancha mais alta de calor sensível é oposta ao calor latente e também tende a se perpetuar para além da baixada de Bangu e para o interior da Baixada Fluminense. Infere-se que a área urbana da metrópole conforma um ambiente favorável ao acúmulo de calor destinado muito mais ao aquecimento do que para a evaporação.

Para a camada limite (Figura 23), nas áreas urbanas as elevações estão acima de 1km, provavelmente favorecidas pela convecção térmica. Em algumas localidades, a altura alcança quase 1,5km, como na Zona Norte da cidade do Rio de Janeiro. Áreas não definidas como “urbanos” ultrapassam 1,5km, como a área peri-urbana de Nova Iguaçu, Paracambi e Maricá. A convecção térmica pode não está restrita ao aquecimento das áreas mais urbanizadas, mas também a áreas de densidade urbana mais baixas e a áreas abertas, comum na Baixada Fluminense e na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro.

Quanto ao vento (Figura 24), em função do relevo acidentado e do litoral recortado, diversas direções são possíveis, mas sua velocidade pouco variou e se configurou, em média, abaixo de 7m/s. O vento mostra direções terra-mar ou mar-terra. Esse último é dominante no litoral a leste da baía de Guanabara e no interior da própria baía. A oeste da baía de Guanabara predomina fluxos do oceano e do continente. Este é oriundo dos maciços da Tijuca e da Pedra Branca, principalmente do primeiro, que gera as brisas de montanha. No interior do continente, há também dois fluxos predominantes: a leste da baía, migram

ventos em direção à região serrana; a oeste da baía de Guanabara, o fluxo é inverso, advindo da serra do Mar e varrendo a baixada Fluminense com velocidade acima de 10m/s. Há intensa calmaria entre os maciços da Pedra Branca e do Mendanha na Zona Oeste, enclausurando o ar nesta área da baixada de Bangu. No extremo oeste e a noroeste, o vento é um pouco mais intenso. Desloca-se da serra do Mar em direção a baía de Sepetiba a uma velocidade de 12 m/s.

A umidade relativa do ar (Figura 25) mostra baixa variação espacial, predominando em torno de 40% e 60%. Porcentagens um pouco mais elevadas são observadas nos maciços costeiros do Rio de Janeiro (entre 60% e 75%) e na serra do Mar (acima de 90%). A baixa umidade do solo (Figura 26) é definida pela mesma mancha das altas temperaturas e de calor sensível. Equivalem-se também a maior elevação da altura da camada limite e as baixas taxas de calor latente. Assim, essas respostas estão associadas às áreas urbanas onde predominam uma superfície mais impermeável com baixa massa vegetal. A umidade tende a aumentar em direção às áreas periurbanas ou semi-vegetadas na Zona Oeste, Baixada Fluminense e a leste da baía de Guanabara.

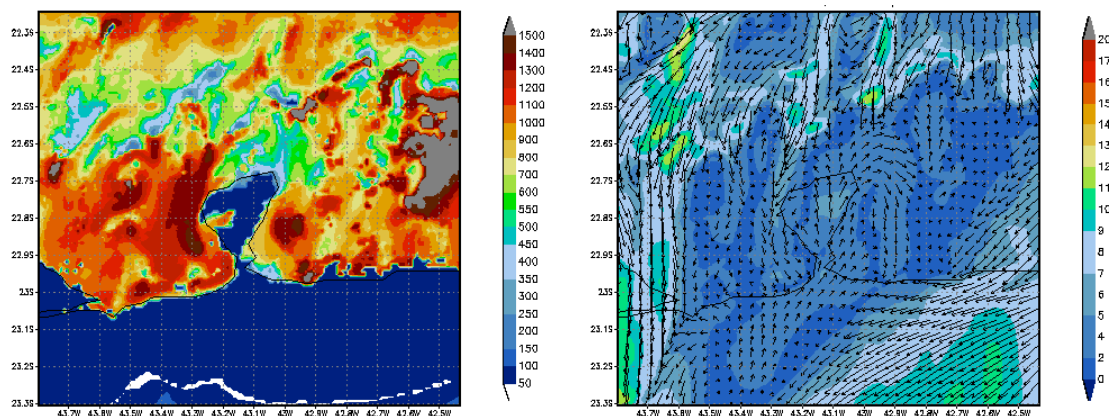


Figura 23 e 24. Altura da camada limite (à esquerda, em metros) e vento em superfície (à direita, em m/s) na RMRJ em 23/02/2007 às 12GMT.

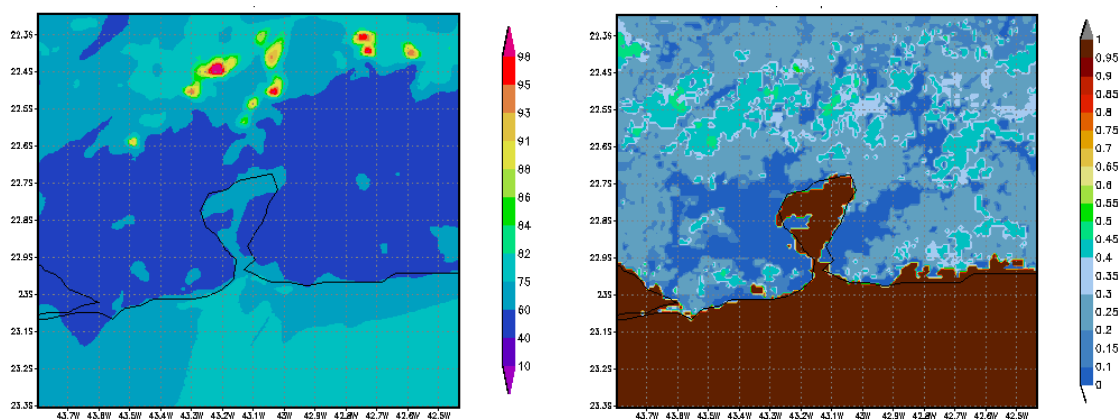


Figura 25 e 26. Altura da camada limite (à esquerda, em metros) e vento em superfície (à direita, em m/s) na RMRJ em 23/02/2007 às 12GMT.

A modelagem da temperatura com o MM5 reforçou o mapeamento da TSC pelo Landsat. As áreas mais quentes da RMRJ obtiveram respostas similares entre a temperatura da superfície simulada pelo MM5 e a TSC estimada pelo Landsat. Com o adicional de outros campos simulados pelo MM5, a análise do campo térmico foi mais ampla, inserindo outras componentes que serviram de suporte para o entendimento de algumas dinâmicas de comportamento dos padrões espaciais de temperatura. Os campos de calor latente e sensível, por exemplo, clarificaram o comportamento da TSC em diferentes áreas da metrópole, principalmente entre as áreas urbanas densas e as áreas com maior área de vegetação, fornecendo informações acerca da distribuição e acúmulo de energia. Esses dois campos foram fundamentais na verificação da altura da camada limite, que se comportou inversamente proporcional ao primeiro e diretamente proporcional ao segundo.

Com os resultados da modelagem outras pesquisas precisam ser estimuladas visando a integração de imagens Landsat, por exemplo. Uma importante recomendação é a inserção do mapa termal e do mapa de uso do solo como entradas do modelo, além do mapa fisiográfico, que, provavelmente, trarão novos cenários com maior detalhamento dos resultados e novas configurações, talvez antes omitidas. Outros modelos atmosféricos de mesoescala, e mais robustos, como o Advanced Regional Prediction System (ARPS), são importantes na integração ao sensoriamento remoto para avaliar a temperatura simulada e estimada, mas também para cooperar no avanço da melhor compreensão da gênese e da formação das chuvas urbanas, uma categoria de interesse para observação de possíveis relações com o fenômeno da ilha de calor urbana. Sugere-se, ainda, e não menos importante, a adoção de modelos para escalas

espaciais mais detalhadas, restritos a camada limite urbana, que podem alcançar os vales (canyons) urbanos e simular eficientemente os fluxos de energia, o calor latente e o calor sensível, bem como o papel do vento com a rugosidade do solo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo se propôs apresentar e discutir quatro técnicas para a análise do clima urbano com foco na ilha de calor urbana: quatro procedimentos a análise da série temporal da estação da Praça XV, os transectos fixos e móveis na Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, o sensoriamento remoto das imagens Landsat para a RMRJ e a modelagem atmosférica com o modelo MM-5, igualmente para a RMRJ.

As técnicas podem ser empregadas, ora isoladamente, ou combinadas (considerando a análise temporal), que foi a proposta deste artigo, o que permitiu uma análise em perspectiva mais inovadora para o clima urbano. E dada a complexidade do clima urbano e de um de seus principais fenômenos, a ilha de calor urbana, em uma região do porte da RMRJ, daquelas quatro técnicas pelo menos três foram empregadas em uma perspectiva combinada e integrada, que se deu inicialmente pela análise mais clássica, a partir da série temporal com 90 anos de dados (1921-2010), seguida pelo sensoriamento remoto com 26 anos de dados da série Landsat (1984-2010) e pela modelagem atmosférica com uma amostra no verão de 2007. Os transectos fixos e móveis ocorreram em outra perspectiva, desvinculados daqueles três, em uma situação temporal específica, um episódio sazonal do verão de 2004.

A análise de série temporal é adequada e apropriada quando se pretende estudar tendências e apontar cenários do clima. A análise por meio da regressão linear e pela ANOVA foram os modelos estatísticos adotados e apontou uma tendência ao aquecimento, com os maiores acréscimos ocorridos nos meses mais quentes, em particular na primavera, atingindo 2,4°C. Este resultado pode ser um indicativo do papel da urbanização que se configura no fenômeno da ilha de calor urbana e eleva a temperatura nas áreas urbanas.

A análise de série temporal pode estimular pesquisas de modelagem das mudanças climáticas de natureza local ou regional com as mudanças climáticas de natureza global, integrando as diferentes escalas espaciais e os seus diferentes fatores morfológicos, urbanos e atmosféricos. Inclui-se nesta perspectiva a necessidade e a oportunidade para incorporar outros elementos além da temperatura e da pluviosidade, que são os mais comuns e abundantes nos trabalhos de cenários e tendências.

O uso das técnicas por transectos fixos e móveis é uma importante estratégia quando se pretende selecionar uma área para experimentação com diferentes áreas de uso do solo, ou espaços intraurbanos, como um bairro ou região de uma cidade, que foi o caso da Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro. As medições fixas e móveis de verão mostraram o core da ilha de calor urbana no bairro de Campo Grande e em Bangu, respectivamente, importantes áreas, inseridas nas imediações da Baixada de Bangu.

Considerando a extensão territorial da Zona Oeste (que corresponde a 50% da área total da cidade do Rio de Janeiro) e a sua dinâmica urbano-ambiental atual, os pontos amostrais fixos e móveis adotados (64) ainda são inferiores ao ideal. A rede de monitoramento em campo deve ser expandida para outras regiões de extensas baixadas, como Guaratiba e Santa Cruz, aos “sub-bairros” do extenso bairro de Campo Grande e para a faixa leste, área urbanizada mais consolidada da Zona Oeste e limítrofe com a Zona Norte da cidade. A expansão do monitoramento em uma região tão extensa como a Zona Oeste, que também pode ser adotada para outras regiões do Brasil, tem o interesse de ratificar ou confrontar os resultados já encontrados visando o entendimento sobre o campo térmico da Zona Oeste.

Com o uso do sensoriamento remoto foram identificadas nas áreas da classe de uso do solo “urbano” os valores mais elevados da Temperatura da Superfície Continental (TSC) na RMRJ. Além das áreas mais centrais, há uma importante participação do subúrbio e da periferia na consolidação das áreas quentes na RMRJ. Na classe “vegetação” estão os valores mais baixos da TSC, ao passo que nas áreas da classe “rural ou urbano de baixa densidade”, que atende boa parte das áreas de subúrbio, também mostraram valores bem elevados. Toda esta perspectiva espacial do campo da temperatura na RMRJ só foi possível por conta do uso do sensoriamento remoto, sendo esta, sem dúvida, a grande contribuição e vantagem da técnica.

A modelagem atmosférica com o MM5 identificou as mesmas áreas, mais quentes, como as obtidas por sensoriamento remoto. Os campos de calor latente e calor sensível permitiram melhor compreender e distinguir o comportamento da TSC entre as áreas urbanas densas e as áreas com maior classe de vegetação. Esses dois campos foram fundamentais na verificação da altura da camada limite, que se comportou inversamente proporcional ao primeiro e diretamente proporcional ao segundo. O campo do vento, por sua vez, é uma variável de alta variabilidade direcional e indefinição espacial, determinada pela morfologia complexa e situação geográfica da RMRJ.

Assim como o sensoriamento remoto, a modelagem atmosférica também tem como grande vantagem o mapeamento espacial de uma extensa área como a RMRJ. A modelagem também é vantajosa por simular outros produtos, além da temperatura, como foi o caso deste trabalho. Para Wang and Yan (2016) uma melhor modelagem com informações de alta resolução sobre as mudanças da superfície ajudará a entender e quantificar o efeito da urbanização na temperatura local, ao contrário das séries históricas de temperatura em estações meteorológicas, onde há grandes incertezas por conta da qualidade dos dados ou das técnicas usadas para estimar o efeito de urbanização.

A aplicabilidade entre a modelagem e o sensoriamento remoto converge em um tratamento mais sofisticado, como requer a complexidade da RMRJ, de heterogeneidade marcante de paisagens, devida a sua situação geográfica, à configuração topográfica e aos altos índices de urbanização, que em conjunto, atuam como diferentes forçantes no funcionamento desta metrópole. A modelagem e o sensoriamento remoto podem ser os mais aplicados no campo da Geografia, ou no segmento da Geografia Física, uma vez que suas técnicas priorizam a abrangência espacial com o uso recorrente de imagens como entrada ou produto.

Por fim, este trabalho se aproximou de uma proposta mais completa e complexa para o estudo do clima urbano e da compreensão da ilha de calor urbana, que é um dos principais fenômenos do clima urbano. É importante ressaltar que o estudo do clima urbano vai além do campo térmico e da análise da ilha de calor urbana. Outros canais têm suas especificidades, como a poluição do ar e as chuvas intensas,

analisadas em conjunto ou não com a ilha de calor urbana, que podem requerer técnicas distintas daquelas apresentadas e discutidas.

REFERÊNCIAS

- 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 Climatology*, v. 23, p.1–26. 2003;
- BRANDÃO, A. M. P. M. As Alterações Climáticas na Área Metropolitana do Rio de Janeiro: Uma provável influência do crescimento urbano. In: ABREU, Maurício de Almeida (org.). *Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Biblioteca Carioca, 1992. p. 143-200;
- BRANDÃO, Ana Maria de Paiva Macedo. Clima urbano e enchentes na cidade do Rio de Janeiro. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista (org). *Impactos Ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 47-109;
- BRANDÃO, Ana Maria de Paiva Macedo. *O Clima Urbano da Cidade do Rio de Janeiro*. 1996. 362f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1996;
- BRANDÃO, Ana Maria de Paiva Macedo. *Tendências e Oscilações Climáticas na Área metropolitana do Rio de Janeiro*. 1987. 320p, vol. 1. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1987;
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 41, p. 2674–2677. 2003;
- CHANDER, G., MARKHAM, B.L., HELDER, D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, p. 893–903. 2009;
- CORRÊA E., B., N., O., MORAES, R., M., SILVA, L., S., SOUZA., M., CATALDI e L., C., G., PIMENTEL. Análise da sensibilidade do modelo MM-5 aos refinamentos e aninhamentos de grades – um estudo de caso sobre a cidade do Rio de Janeiro. In: *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2004, Fortaleza/Ceará;
- ENGLEHART, P.J.; DOUGLAS, A.V. Urbanization and seasonal temperature trends: observational evidence from a data-sparse part of North America. *International Journal of Climatology*, v. 23, p.1253–1263. 2003;
- FIALHO, Edson Soares. *Análise Têmporo-Espacial do Campo Térmico na Ilha do Governador/RJ em episódios de verão e inverno*. 2002. 164f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002;
- FREITAS, E. D., DIAS, P. L. S. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, p. 355-366. 2005;
- GALLEGO, Lucy P. *Tipos de tempo e poluição atmosférica no Rio de Janeiro (um ensaio em Climatologia urbana)*. 1972. 104f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1972;
- GRELL, G. A., DUDHIA, J., STAUFFER, D. R. A description of the fifth generation Penn State/ NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical NOTE, NCAR/TN-398+STR, 117 p. 1995;
- GRIMMOND, C. S. B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 84, p. 3–22. 2006;

- KANDA, M. Progress in Urban meteorology: a review. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85B, p.363-383. 2007;
- KARAM, H.A., PEREIRA FILHO, A.J., MASSON, V., NOILHAN, J., MARQUES FILHO, E.P. Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, p.109–120. 2010;
- LUCENA, A.J., PERES, L.F, ROTUNNO FILHO, O.C., FRANÇA, J.R.A. Algorithms implementation for land surface temperature estimation based on Landsat data as an indicator of urban heat island. **Urban Remote Sensing Event (JURSE)**, p. 262-266, 2013.
- LUCENA, A.J., PERES, L.F, ROTUNNO FILHO, O.C., FRANÇA, J.R.A. Estimation of the urban heat island in the Metropolitan Area of Rio de Janeiro - Brazil. **Urban Remote Sensing Event (JURSE)**, p. 1-4, 2015.
- LUCENA, A.J., ROTUNNO FILHO, FRANÇA, J.R.A., O.C., PERES, L.F., XAVIER, L.N.R. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical Applied Climatology**, v. 111. p. 497-511. 2013;
- LUCENA, Andrews José de. **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. Tese de Doutorado. Programa em Engenharia Civil. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012;
- LUCENA, Andrews José de. **A ilha de calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. 2012. 373f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas em Engenharia). INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE). UFRJ. Rio de Janeiro. 2002;
- LUCENA, Andrews José de. **O campo térmico na Zona Oeste do Rio de Janeiro/RJ: uma contribuição ao estudo do clima urbano**. 2005. 154f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geografia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005;
- LUCENA, Andrews José de. **O clima de Bangu no contexto do Clima Urbano da cidade do Rio de Janeiro**. 2002. 91f. Monografia (Bacharelado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002;
- MARQUES FILHO, E.P., KARAM, H.A., MIRANDA, A.G., FRANÇA, J.R.A. Rio de Janeiro's urban climate. **Urban Climate News - Quarterly Newsletter of the International Association of Urban Climate (IAUC)**, v. 32 (June), p.5-9. 2009;
- MATSUMOTO, J; FUJIBE, F; TAKAHASHI, H. Urban climate in the Tokyo metropolitan area in Japan, **Journal of Environmental Sciences**, Vv. 59, p. 54-62. 2017;
- MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e Clima Urbano. In: MONTEIRO, Carlos Augusto Figueiredo; MENDONÇA, Francisco. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. p. 9-67.;
- MORAES, N. O. MARTON, E., PIMENTEL, L. C. G. Simulações numéricas da formação de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 28, n.2, p. 116-138. 2005;
- OKE, T.R; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J.A. **Urban Climates**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2017. 525p;
- PEREIRA FILHO, A.J., SANTOS, P.M., XAVIER, T.M.B.S. **Evolução do tempo e do clima na região metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Linear B, 2007. 299p;
- PERES, L.F.; LUCENA, A.J., ROTUNNO FILHO, O.C. FRANÇA, J.R.A. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 104-116. 2018;

- QIN, Z., KARNIELI, A., BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3719–3746. 2001;
- RUSSO, Paulo Roberto. **A distribuição das concentrações de partículas em suspensão na atmosfera da porção centro-oriental do município do Rio de Janeiro: considerações preliminares sobre a correlação saúde pública e poluição atmosférica**. 2002. 158p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002;
- SOUZA, J.D., SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 349-358. 2005;
- VAN DE GRIEND, A.A., OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 1119–1131. 1993;
- VOOGT, J. A., OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 370–384. 2003;
- WANG, J.; YAN, Z. W. Urbanization-related warming in local temperature records: a review. **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, v. 9:2, p.129-138. 2016;
- WANG, Y.; JI, W.; YU, X.; XU, X.; JIANG, D.; WANG, Z.; ZHUANG, D. The Impact of Urbanization on the Annual Average Temperature of the Past 60 Years in Beijing. **Advances in Meteorology**, p. 1-9. 2014.