

**Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada
ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil**

***Modeling of Urban Heat Island
Applied to the Litoraneous Environment – Ubatuba/Brazil***

Washington Paulo Gomes

Universidade Estadual Paulista - Campus de Presidente Prudente
wpgomes2@gmail.com

Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim

Universidade Estadual Paulista - Campus de Presidente Prudente
mccta@fct.unesp.br

Vincent Dubreuil

l'Université Rennes 2, France
vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

Recebido (*Received*): 28/05/2017
DOI: 10.11606/rdg.v34i0.133193

Aceito (*Accepted*): 26/10/2017

Resumo: A estimativa da temperatura do ar por meio da modelagem das ilhas de calor urbanas é um importante instrumento para a gestão do espaço urbano, sendo possível contribuir para intervenções mais localizadas que podem amenizar as ilhas de calor atmosféricas ligadas ao processo de urbanização. Deste modo, o procedimento da modelagem da ilha de calor urbana tem como objetivo estimar a temperatura do ar no ambiente urbano e rural próximo, onde não houve pontos de registro, considerando-se as características de uso e ocupação da terra, delimitando a área de representatividade de cada ponto analisado. Para tanto, foram realizadas correlações estatísticas entre as temperaturas medidas em 17 pontos fixos de registros em relação às características da superfície, tais como a porcentagem de vegetação, a densidade de construções, a distância do mar e as temperaturas de superfície. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de explicar cerca de 60% da variabilidade das temperaturas na área urbana de Ubatuba, localizada no Litoral Norte do Estado de São Paulo. A distribuição das temperaturas no intraurbano e no entorno rural se apresentaram entre 23°C e 28°C com a formação de ilha de calor bem definida na área central da cidade, apresentando intensidade máxima de 5°C em relação ao entorno rural.

Palavras-Chave: Temperatura; Ilha de calor; Modelagem; Clima urbano; Sensoriamento Remoto; Ubatuba (SP) - Brasil.

Abstract: *The estimation of the air temperature through the modeling of the urban heat islands is an important instrument for the management of the urban space, being possible to contribute to more localized interventions that can soften the atmospheric heat islands linked to the urbanization process. Thus, the procedure of modeling of heat island aims to estimate the air temperature in the surrounding urban and rural environment, where there were no recording points, considering the characteristics of land use and occupation, delimiting the area of each analyzed point. For this, statistical correlations were performed between the measured temperatures at 17 fixed points of records in relation to the surface characteristics, such as vegetation percentage, construction density, sea distance and surface temperatures. The results showed that the model was able to explain about 60% of the temperature variability in the urban area of Ubatuba, located in the North Coast of the State of São Paulo. The temperature distribution in the intra-urban and rural areas was between 23°C and 28°C with the formation of a well-defined heat island in the central area of the city, presenting maximum intensity of 5°C in relation to the rural environment.*

Keywords: *Temperature; Heat island; Modeling; Urban climate; Remote sensing; Ubatuba (SP) – Brazil.*

1. INTRODUÇÃO

O diagnóstico das ilhas de calor urbanas é um importante instrumento para a gestão do espaço urbano, na medida em que a espacialização das diferenças das temperaturas intraurbanas e rurais próximas pode oferecer subsídios para amenizar a magnitude das ilhas de calor (DUBREUIL *et al.*, 2010).

De acordo com Amorim *et al.* (2015), a maioria dos estudos se utiliza de transectos móveis ou medidas fixas para diagnosticar as ilhas de calor urbanas e se produzir a representação espacial das mesmas. No entanto, o conhecimento real do clima local ainda requer novas formas de representação, sobretudo, que levem em consideração as características de uso e ocupação da terra.

Vários autores têm proposto metodologias que se utilizam do SIG (Sistema de Informação Geográfica) para interpolar as temperaturas do ar através da incorporação de dados como a altura dos edifícios, superfícies impermeáveis e vegetação (OKE, 2004; STEWART e OKE, 2009; FOISSARD *et al.*, 2013; FOISSARD, 2015; TEIXEIRA e AMORIM, 2017; AMORIM *et al.*, 2015; TAPPER *et al.*, 1981). Deste modo, a espacialização da temperatura do ar baseada nos valores medidos associados às características da superfície oferece um avanço significativo em relação às formas tradicionais de representações cartográficas, auxiliando no maior detalhamento das características das temperaturas em locais onde não foram coletadas informações.

A estimativa da temperatura do ar por meio da modelagem das ilhas de calor urbanas, considerando-se a densidade de construções, vegetação, relevo e neste caso, a distância do mar, se mostra como um importante instrumento para a gestão do espaço urbano sendo possível contribuir para intervenções mais localizadas que podem amenizar as ilhas de calor atmosféricas ligadas ao processo de urbanização.

A urbanização gera uma grande extensão de superfícies impermeáveis e a redução das superfícies ocupadas por vegetação. Essas mudanças na ocupação da terra produzem a modificação do balanço energético na cidade favorecendo o aprisionamento da radiação, sobretudo, devido à configuração em “*canyons*” das ruas e das fachadas dos edifícios, resultando na pequena diminuição da temperatura na cidade após o pôr do sol, formando ilhas de calor urbanas noturnas (OKE, 1978). Deste modo, o procedimento da modelagem da ilha de calor urbana a partir da classificação do uso da terra tem como objetivo, estimar a temperatura do ar no ambiente urbano e rural próximo, onde não houve pontos de registro, considerando-se as características da superfície (área construída, vegetação, distância do mar e temperatura da superfície), delimitando a área de representatividade de cada ponto analisado.

Neste sentido, considerando-se a carência de estudos sobre a qualidade do ambiente urbano, sobretudo, em cidades de pequeno e médio porte em áreas litorâneas no Brasil, e a necessidade de se realizar pesquisas que se referem à qualidade ambiental necessária para o desenvolvimento da vida humana, foi proposta a aplicação das técnicas da modelagem da ilha de calor urbana para a cidade de Ubatuba-SP.

O município de Ubatuba está localizado no Litoral Norte do estado de São Paulo, na latitude do Trópico de Capricórnio (**Figura 1**). Apresenta uma área continental de 723 km² (IBGE, 2010) e situa-se numa área de transição climática entre os sistemas atmosféricos intra e extratropicais, apresentando maior atuação dos sistemas tropicais, polares e grande atividade frontal (SANT' ANNA NETO, 1994).

Além da circulação atmosférica, outros fenômenos também interferem para gerar uma singularidade do ponto de vista climático, bem como, a grande quantidade de umidade do ar proveniente dos ventos alísios que fortalecem o efeito orográfico na região e a geração de zonas de instabilidades que contribuem de forma significativa na produção de chuvas, sendo que na sua dinâmica natural atuam diversos fatores do clima que influenciam de forma muito efetiva na sua complexidade (GOMES e AMORIM, 2015).

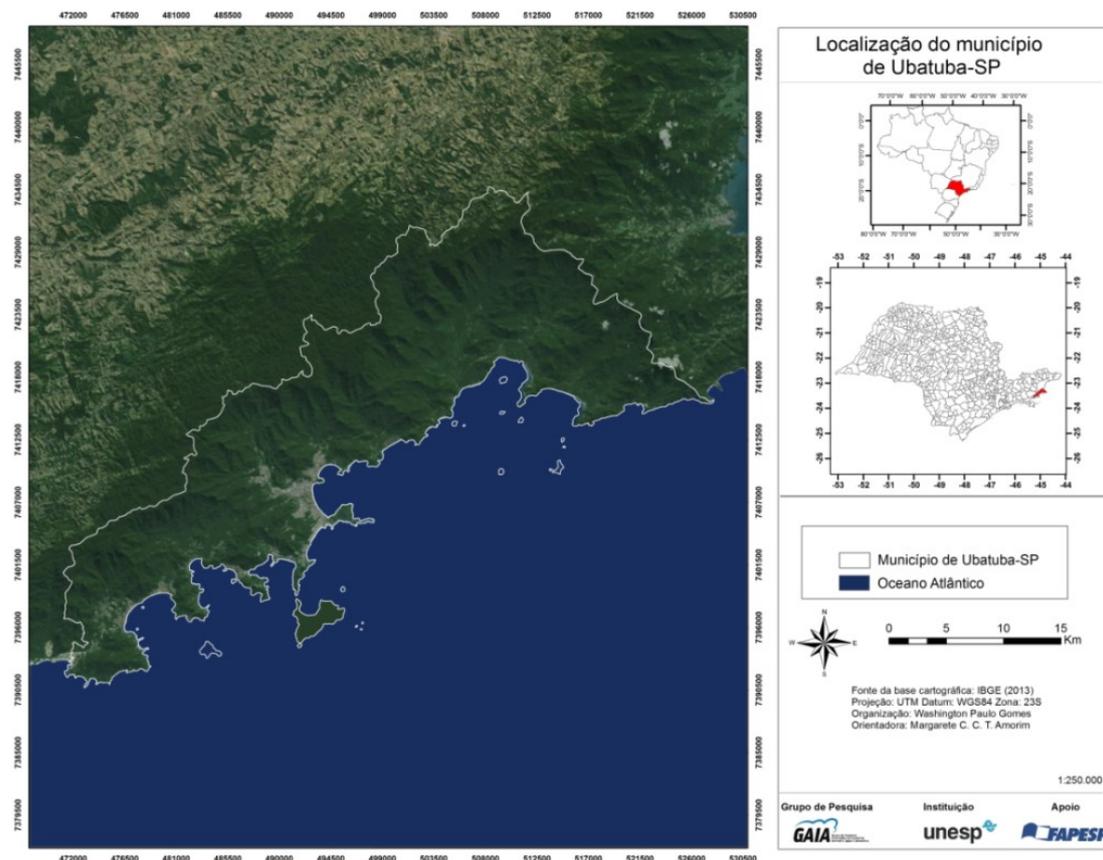


Figura 1: Localização do município de Ubatuba-SP

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem da ilha de calor urbana foi realizada a partir de dados da temperatura do ar registradas por sensores automáticos *Humidity-temperature logger* da marca ThermaData™ às 21 horas do dia 14 de novembro de 2015 em 17 pontos fixos distribuídos na área urbana de Ubatuba. Os pontos de coletas de temperatura do ar foram inseridos levando em consideração as diferentes características da superfície, como, por exemplo, o uso da terra, o relevo, a densidade de construções e a vegetação arbórea. Para a identificação dos tipos de cobertura da terra foram utilizadas as imagens do satélite *Landsat8*, adquiridas gratuitamente no site <http://earthexplorer.usgs.gov/>, sem a presença de nuvens na data mais próxima a coleta dos dados de temperatura, capturadas no dia 16 de setembro de 2015.

Deste modo, um dos objetivos da modelagem, é delimitar a área de representatividade dos pontos de registros das temperaturas, por meio da correlação entre a distribuição das temperaturas observadas, e a fração de cobertura da terra no entorno de cada ponto. A fração de “vegetação baixa” está relacionada à presença de gramíneas, pastos e jardins. A fração de “vegetação alta” está ligada à presença de árvores de grande porte e a fração de “área construída” está ligada a presença de edifícios, estacionamentos e superfícies impermeáveis.

2.1 Composição colorida

O processo de realização da modelagem das ilhas de calor urbana foi realizado no aplicativo *IDRISI* e se iniciou com a elaboração da composição colorida das bandas 3, 5 e 4 do satélite *Landsat 8* (**Figura 2**). A composição colorida permite diferenciar as áreas urbanas (tons de rosa) e rurais (tons de verde) e pode auxiliar na identificação das diferentes coberturas da terra na área de estudo.

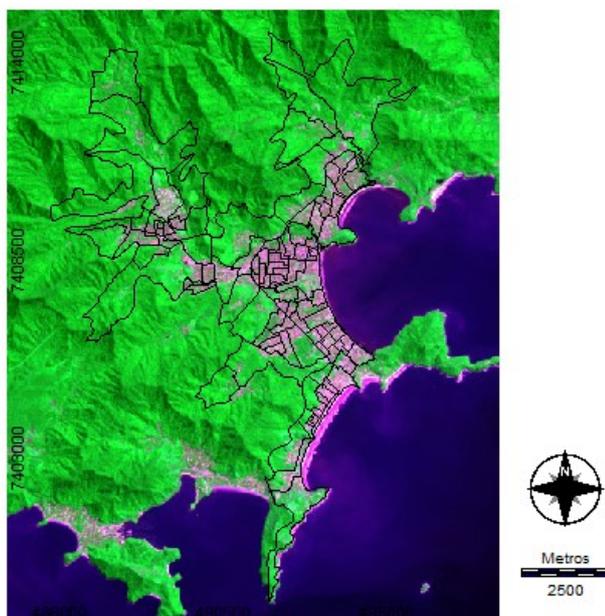


Figura 2: Composição colorida, elaborada a partir das bandas 3, 5 e 4 do satélite *Landsat 8*, 16/09/2015.

2.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Na sequência, por meio da junção das bandas 4 e 5 do satélite *Landsat 8* foi realizado o procedimento para obtenção do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que permite identificar a distribuição da densidade de vegetação (**Figura 3**). Os maiores valores se referem às áreas com grande densidade de vegetação (tons de verde), localizadas nas encostas da serra do mar, e as áreas urbanas (tons de amarelo e vermelho) apresentaram os menores valores de densidade de vegetação.

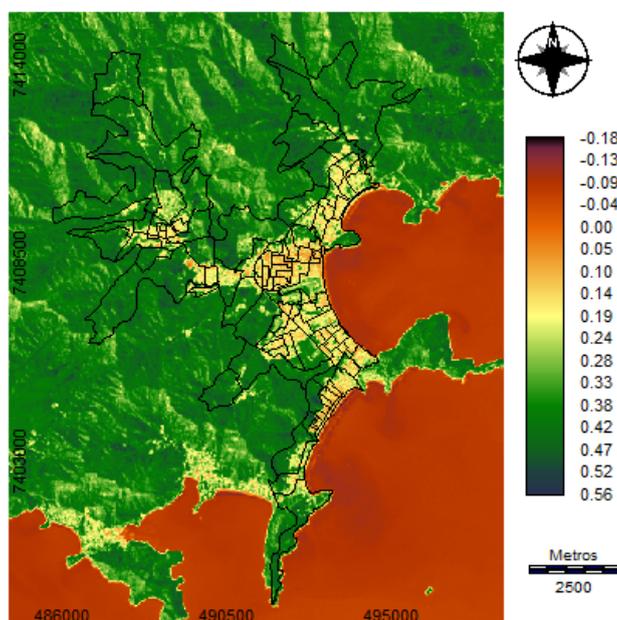


Figura 3: Carta de NDVI, elaborada a partir das bandas 4 e 5 do satélite *Landsat 8*, 16/09/2015.

2.3 Classificação cluster não supervisionada

Posteriormente foi realizada a classificação automática do uso da terra a partir da técnica *cluster*. Para definição do método de classificação não supervisionada foram utilizados os componentes NDVI e composição colorida. A classificação não supervisionada agrupa os *pixels* segundo as suas características espectrais organizando-os em agrupamentos de acordo com as classes de uso da terra. A imagem é automaticamente classificada em classes espectrais com base no agrupamento natural encontrado nos dados que resultam na identificação de tipos de cobertura da terra. Neste caso, foram geradas onze diferentes classes (**Figura 4**).

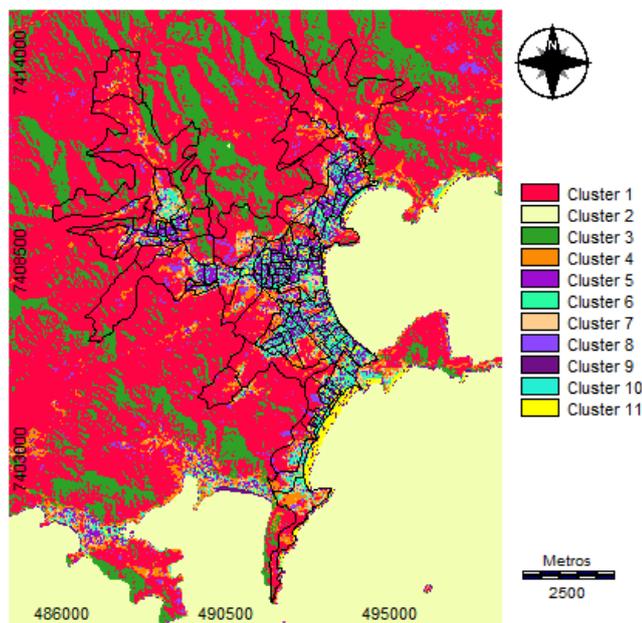


Figura 4: Classificação cluster, elaborada a partir das bandas 3, 5, 4 e do NDVI do satélite *Landsat* 8, 16/09/2015.

A partir da classificação *cluster* realizou-se o agrupamento das classes por meio da análise da carta de composição colorida, extração dos valores NDVI, imagens do Google Earth e do conhecimento de campo. Deste modo, foi gerada a classificação final com a redução para quatro classes levando-se em consideração o elemento que predominou em cada *pixel*: área urbana, vegetação baixa (rasteira), vegetação alta (densa) e água (**Figura 5**).

Essas classes foram escolhidas por serem fundamentais para diferenciar as temperaturas do ar e contribuir para a geração das ilhas de calor urbana (LOWRY, 1977; OKE, 2004; STEWART e OKE, 2009; FOISSARD, 2015; AMORIM *et al.*, 2015). A classe “vegetação alta” reuniu as áreas com cobertura vegetal arbórea presentes nas áreas das encostas da serra do mar, nos parques e nos fundos de vale. A “vegetação baixa” considerou as áreas de pastagens, os terrenos urbanos sem construções com presença de gramados e as áreas de transições entre a área urbana e a serra do mar. A classe “área urbana” agrupou todas as áreas impermeabilizadas tanto com alta, média e baixa densidade de construções. A classe “água” surge como um dos diferenciais em relação a outras aplicações da técnica da modelagem da ilha de calor urbana e a sua utilização foi fundamental para diferenciar a superfície aquática das outras segmentações, visto que não foram coletadas medidas de temperatura do ar no mar.

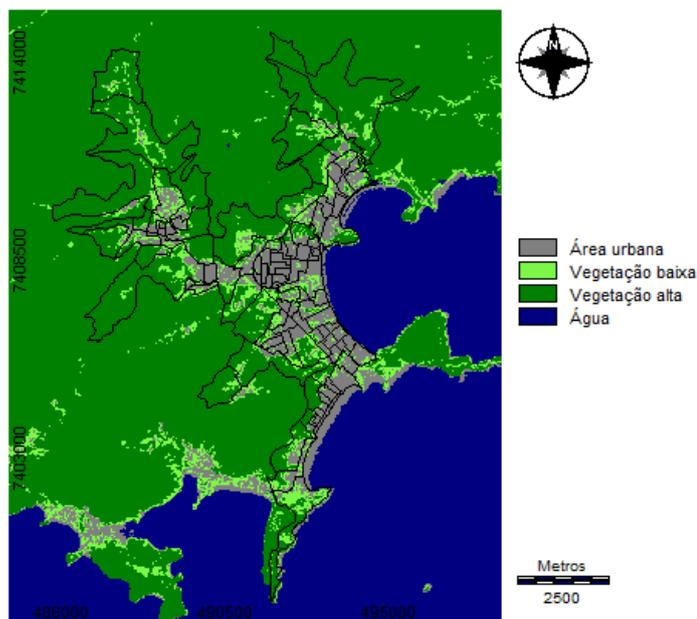


Figura 5: Carta de uso da terra, por meio do agrupamento da classificação cluster, elaborada a partir das bandas 3, 4, 5 e do NDVI do satélite *Landsat 8*, 16/09/2015.

2.4 Distância do Mar

Posteriormente foi elaborada a carta de distância do mar (em metros) a partir da imagem SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), disponibilizada no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) junto ao banco de dados Geomorfométricos do Brasil pelo projeto Topodata (**Figura 6**). A elaboração deste procedimento foi de fundamental importância para o desenvolvimento da pesquisa e se apresentou como um diferencial em relação aos outros trabalhos devido às especificidades do sítio e as características da área de estudo, pois a aplicação da modelagem da ilha de calor urbana na zona costeira requer a aplicação de novas técnicas e adaptações.

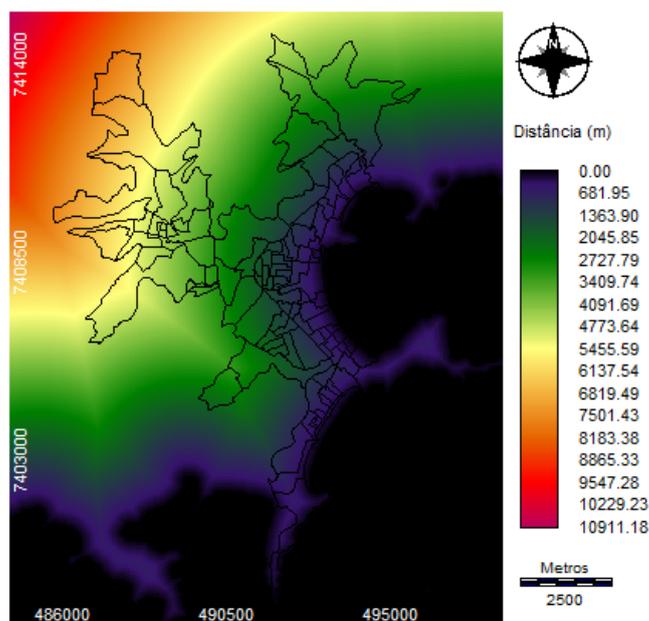


Figura 6: Carta de distância do mar elaborada a partir da imagem Topodata

2.5 Correlação entre a temperatura do ar e o uso da terra

Com o objetivo de calcular a relação entre a temperatura do ar e o uso da terra, inicialmente buscou-se avaliar quantos *pixels* de cada classe estavam no entorno de cada ponto de temperatura medida. Para tanto, foi realizado o procedimento para identificar a frequência em porcentagem para cada classe de uso da terra.

Em seguida, chegou-se à correlação entre a temperatura do ar medida e a frequência de cada classe de uso da terra em janelas móveis de tamanho variável entre 3x3 *pixels* (90 x 90 metros), 5x5 *pixels* (150 x 150 metros) e de 9x9 *pixels* (270 x 270 metros) e assim por diante, considerando que a resolução espacial do *Landsat 8* nas bandas selecionadas são de 30 metros. Esse procedimento é fundamental porque não se sabe inicialmente qual a área de influência do uso da terra sobre as medidas de temperatura para cada ponto e isso justifica o teste com essas janelas de tamanho “móveis” (AMORIM *et al.*, 2015).

Essa etapa objetivou selecionar a área de abrangência onde a relação estatística entre a temperatura do ar e a classe de uso da terra foimelhor estabelecida. A estatística é trabalhada em planilhas do aplicativo *Excel*, onde os dados da extração das porcentagens são relacionados com a temperatura do ar a partir do gráfico de dispersão que exhibe o coeficiente de correlação (TEIXEIRA e AMORIM, 2017).

No presente estudo, o processo de realização das correlações estatísticas foi realizado nas classes 1 (área urbana), 2 (vegetação baixa) e 3 (vegetação alta). Neste caso, conforme citado anteriormente, não foram realizadas correlações entre a temperatura medida e a classe 4 (água) pelo fato de que não foram realizadas medidas de temperaturas do ar sobre o mar.

As melhores correlações estatísticas entre as classes 1 (área urbana), 2 (vegetação baixa) e 3 (vegetação alta) e a temperatura do ar ocorreram em diferentes janelas. No caso da classe 1, a maior correlação entre a temperatura do ar e a área urbana foi encontrada na janela de 41x41 *pixels* com 0,68. Na classe 2, a maior correlação também foi encontrada na janela de 41x41 *pixels* com 0,59. Na classe 3, a maior correlação foi encontrada na janela de 7x7 *pixels* com 0,71. As maiores correlações entre a área urbana e a temperatura do ar ocorreram em janelas maiores (41x41) pelo fato de que as temperaturas no intraurbano são bastante representativas pelas características do entorno e possuem uma área de abrangência maior do que os pontos localizados na área rural.

Para a aplicação no modelo foram usadas as classes que obtiveram os maiores valores na correlação, ou seja, as classes 1 (área urbana) e 3 (vegetação alta). Estas classes e janelas se mostraram mais representativas na relação entre a temperatura do ar e o uso da terra devido aos coeficientes de regressão e, por este motivo, foram selecionadas para a composição do modelo.

2.6 Regressão linear múltipla

Com essas informações foram feitas relações estatísticas por meio da regressão linear múltipla entre a intensidade da ilha de calor atmosférica nos locais onde as temperaturas foram registradas e os parâmetros geográficos da superfície. O modelo discriminou os melhores indicadores espaciais para cada categoria de forma a estimar os resultados para toda a imagem através de regressão linear múltipla.

O uso da regressão linear múltipla descreve uma relação entre as variáveis geográficas “explicativas” (ocupação da terra) e a variável a ser “explicada” (temperatura) pelo modelo.

A regressão linear múltipla é descrita pela **Equação 1**:

$$Y' = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + b \quad (1)$$

Essa equação é definida pela temperatura estimada (Y'), as variáveis geográficas (X_n) e os parâmetros a serem determinados (β_n e b). A equação da nuvem de pontos observados segundo as variáveis explicativas é descrita pela **Equação 2**. Onde “ Y ” corresponde a temperatura observada e “ ε ” representa o conjunto dos resíduos definidos pela **Equação 3**.

$$Y = \beta^0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = Y - Y' \quad (3)$$

A análise dos resíduos é importante para verificar a adequabilidade do modelo. Como observado na **Equação 3**, o resíduo é dado pela diferença entre a temperatura medida (observada) e a temperatura estimada (modelizada). Assim sendo, quanto menor for a diferença da temperatura modelizada em relação à temperatura medida em cada ponto, melhor e mais fiel à realidade será o modelo.

Deste modo, com o objetivo de analisar a ilha de calor atmosférica diagnosticada em Ubatuba no episódio do dia 14 de novembro de 2015, elaborou-se um exemplo de modelagem das temperaturas do ar generalizadas em cada ponto, levando em consideração quatro variáveis.

Com base nas informações adquiridas em todo o processo de elaboração, a melhor correlação obtida para o modelo baseado em quatro variáveis explicativas (área urbana, vegetação alta, distância do mar e temperatura de superfície), foi definida pela **Equação 4**:

$$Ta = 17.8250 + 0.0078 * C1 - 0.0367 * C3 - 0.0002 * D + 0.3211 * TP \quad (4)$$

Onde:

Ta é a temperatura do ar modelizada

$C1$ é a porcentagem da classe 1 (área urbana) no uso da terra dentro da janela 41x41 *pixels* em torno da cada estação

$C3$ é a porcentagem da classe 3 (vegetação alta) no uso da terra dentro da janela 7x7 *pixels* em torno da cada estação

D é a distância do mar

TP é a temperatura de superfície

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto de procedimentos das correlações entre a frequência do uso da terra em relação a temperatura do ar, geram os resultados do coeficiente de determinação (R^2). De modo geral, o coeficiente de determinação indica quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados, sendo uma medida da proporção da variabilidade de uma variável, explicada pela variabilidade da outra. Pode ser usado como uma estatística de teste para avaliação da existência de uma relação útil, entre a variável dependente e independente, em um modelo de regressão linear.

Neste caso, a relação entre a temperatura do ar e a frequência da classe 1 (área urbana) por *pixel* na janela 41x41 (1230x1230 metros), apresentou o valor de R^2 igual a 0,46, mostrando o aumento da temperatura de acordo com o aumento da frequência em porcentagem da área construída (área urbana). O coeficiente de determinação deve ser interpretado como a proporção de variação total da variável dependente Y que é explicada pela variação da variável independente X . Assim sendo, pode-se concluir que 46% das variações de Y (temperatura do ar) são explicadas pela variação de X (área urbana).

Da mesma forma, a relação entre a temperatura do ar e a frequência da classe 3 (vegetação alta) por *pixel* na janela 7x7 (210x210 metros), apresentou o valor de R^2 igual a 0,51, ou seja, 51% das variações de Y (temperatura do ar) são explicadas pela variação de X (vegetação alta). Neste caso, a temperatura diminui de acordo com o aumento da vegetação.

Posteriormente foram inseridas outras duas variáveis no modelo que se apresentaram importantes nas fases de testes. A primeira é a correlação da temperatura do ar em relação à distância do mar. Embora os valores de correlações não sejam muito elevados, esse fator surge como uma importante variável no modelo por se tratar de uma zona costeira, onde a maritimidade influencia de forma efetiva na distribuição da temperatura do ar, tanto pelos efeitos da brisa marítima, da brisa terrestre e da inércia térmica.

Apenas 10% das variações da temperatura do ar podem ser explicadas pela distância do mar. Isso ocorre devido à complexidade da área de estudo onde outras variáveis adquirem importâncias significativas no que se refere às condições climáticas locais, e entre elas, a distribuição da temperatura do ar. Outra importante variável inserida no modelo foi a correlação entre a temperatura do ar e a temperatura de superfície elaborada por meio do tratamento da banda termal do satélite *Landsat 8*. Neste caso, conforme ocorreu o aumento da temperatura da superfície também ocorreu o aumento da temperatura do ar nos pontos coletados. O resultado do coeficiente de determinação foi de 31%.

Vale ressaltar que também foram realizados testes de aplicação do modelo com a utilização da variável das características de altitude do relevo, porém os resultados não foram significativos e se apresentavam como fator de confusão nas análises. Assim sendo, as características do relevo foram retiradas do processo de elaboração dos modelos finais e consequentemente os modelos foram desenvolvidos apenas para as regiões com altitudes inferiores a 100 metros, pois não havia dados medidos de temperatura do ar em altitudes superiores.

Na **Figura 7** é possível observar a matriz da correlação geográfica da ilha de calor urbana com as variáveis de uso e ocupação da terra e a correlação entre as variáveis descritivas da modelagem e a nuvem de pontos ilustrando a estrutura das correlações.

De acordo com Dubreuil *et al.*, (2002), no caso de aplicação da regressão linear múltipla é importante que as variáveis independentes descritas ($X_1, X_2, X_3...X_n$) não tenham boas correlações entre elas. Pois, quanto maior a correlação entre as variáveis independentes (covariância), maior será a variabilidade de Y sendo explicada pelas mesmas variáveis.

Em um exemplo hipotético de regressão linear múltipla com duas variáveis independentes (X_1, X_2) e uma variável dependente (Y), se os valores do R^2 de X_1 e X_2 forem iguais a 0,5 e a covariância entre elas for nula, significa que cada uma das variáveis explica 50% da variabilidade de Y, totalizando 100% de explicação do modelo. Entretanto, quando a covariância entre os dados não for nula, significa que uma mesma parcela da variabilidade de Y é explicada por X_1 e também por X_2 (**Figura 8**).

Os resultados da regressão linear múltipla com a utilização de quatro variáveis explicativas (área urbana, vegetação alta, distância do mar e temperatura de superfície) apresentaram uma correlação global de $R = 0.77$ e de $R^2 = 0.60$. Neste caso, o modelo explicou 60% da variabilidade da temperatura. De acordo com os coeficientes apresentados na **Equação 4**, nota-se que cada uma das variáveis obteve diferentes valores de importância nos parâmetros multiplicadores da regressão linear múltipla. A maior importância foi dada ao aumento da temperatura do ar em relação ao aumento da temperatura de superfície, com multiplicador positivo (0.3). Em seguida, a classe representativa da área urbana obteve o coeficiente positivo (0.007) e isso significa a importância das áreas densamente construídas para o aumento das temperaturas e geração da ilha de calor urbana. Em seguida, a diminuição da temperatura de acordo com a presença de vegetação, obteve multiplicador negativo (-0.03), juntamente com a diminuição da temperatura em relação à distância do mar (-0.0002).

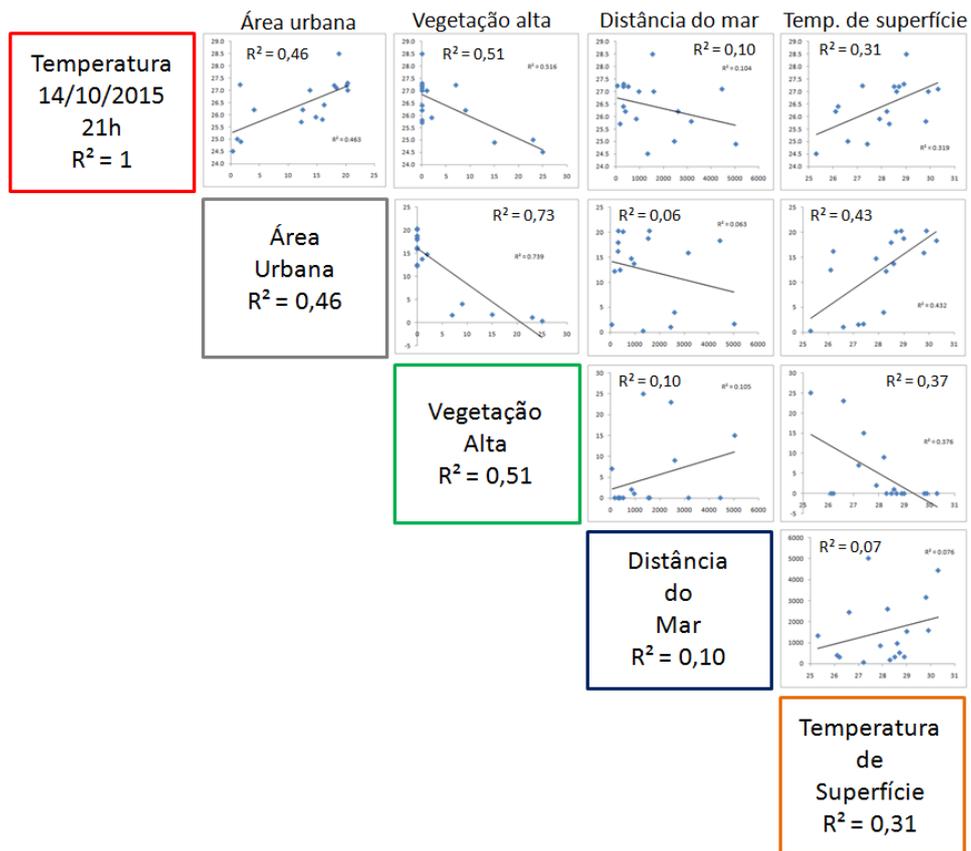


Figura 7: Matriz de correlação da modelagem ilha de calor e das variáveis de ocupação da terra. Adaptado de Foissard (2015).

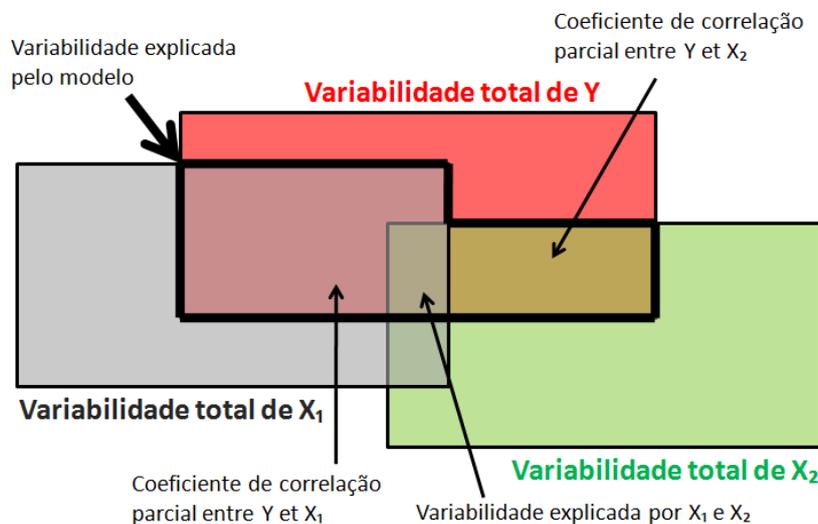
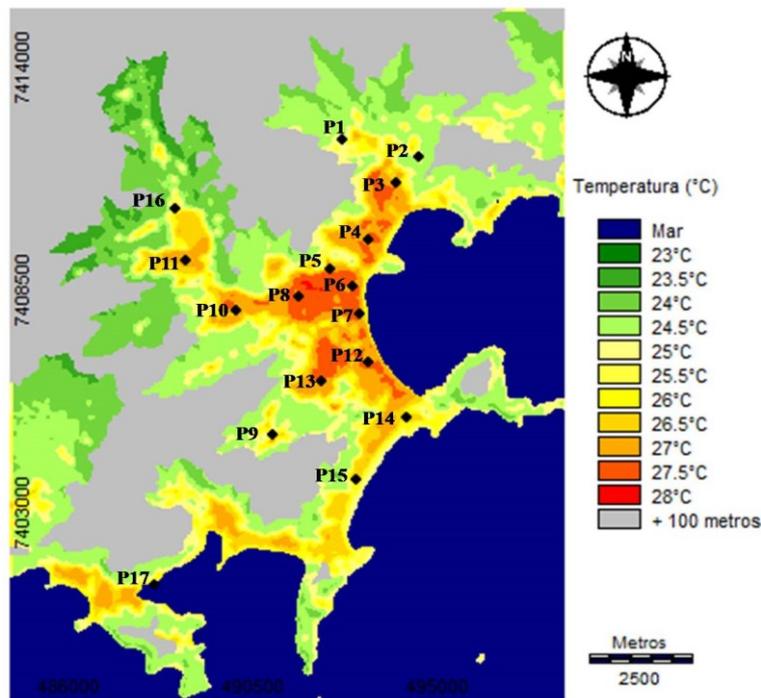


Figura 8: Esquema da variância de cada elemento na modelagem. Adaptado de Foissard (2015)

No dia da realização das medidas foi registrada ilha de calor de alta magnitude que atingiu a intensidade de 5°C , segundo a classificação de García (1996). A atmosfera permaneceu estável, sem precipitação, sob a atuação da massa Tropical Atlântica. A estação meteorológica do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) registrou temperatura de $24,9^{\circ}\text{C}$ e ventos fracos de $1,2 \text{ km/h}$ provenientes de sudeste às 21h.

Os resultados da modelagem da ilha de calor urbana estão espacializados na **Figura 9**. Como se pode observar, a distribuição das temperaturas no intraurbano e no entorno rural se apresentaram entre 23°C e 28°C . De modo geral, é possível visualizar diferenças no intraurbano, com a formação de ilha de calor bem definida na área central da cidade e próximo a linha de costa, apresentando uma intensidade de 5°C em relação ao entorno rural.



Resíduos do modelo

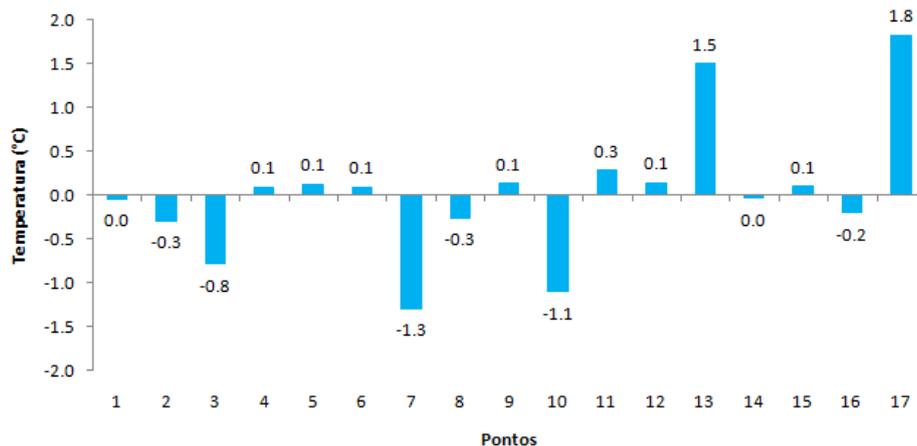


Figura 9: Modelagem espacial da ilha de calor e análise dos resíduos na área urbana de Ubatuba -SP -14/11/2015 às 21h

As áreas com temperaturas mais elevadas (26°C a 28°C) ocorreram nas regiões centrais da cidade, densamente edificadas, pouco arborizadas e próximas ao mar. As áreas mais distantes do mar, sobretudo, aquelas com a maior presença de vegetação densa, apresentaram as menores temperaturas entre 23°C e 24°C. Conforme se aproxima das áreas de transição entre a vegetação densa e as áreas urbanizadas, principalmente aquelas com a presença de vegetação rasteira, apresentaram temperaturas entre 24°C e 25,5°C.

Neste caso, a utilização da imagem termal foi fundamental para verificar com maior nível de detalhes as diferenças de temperaturas no intraurbano. A mesma permite caracterizar as diferentes respostas térmicas no intervalo espectral do infravermelho termal em relação aos diferentes tipos de materiais construtivos, como, por exemplo, telhados de fibrocimento, alumínio e cerâmicas. Ou até mesmo, áreas com presença de vegetação, como parques, praças e alguns bairros socioeconomicamente privilegiados que se utilizam de materiais construtivos que armazenam menos calor.

Com base nos resultados apresentados pelos resíduos e na estrutura do modelo, verificou-se a existência de uma grande correlação entre as características da ocupação da terra e a modelagem da ilha de calor urbana. Entretanto, o modelo apresentou algumas diferenças entre as

temperaturas observadas e as temperaturas estimadas, sendo possível visualizar no gráfico de resíduos (**Figura 9**).

Neste caso, observa-se que em doze pontos as diferenças foram menores ou iguais a 0,3°C, sendo oito menores do que 0,1°C, mostrando uma grande aproximação do modelo com a realidade nestes pontos. Da mesma forma em que nos pontos anteriores se aproximaram da realidade, outros quatro pontos apresentaram diferenças superiores a 1°C, chegando a 1,8°C no ponto 17, onde a temperatura medida foi de 27,2°C e a temperatura estimada no modelo foi de 25,4°C. Essa diferença também minimiza de alguma forma os efeitos das diferenças no intraurbano do modelo.

Os valores positivos no gráfico se referem aos pontos em que a temperatura medida (registrada) é maior do que a temperatura estimada (modelizada) e, conseqüentemente, os valores negativos se referem aos pontos em que as temperaturas estimadas são maiores do que a realidade. Neste modelo, nove pontos obtiveram valores positivos, seis pontos obtiveram valores negativos e dois pontos ficaram muito próximos de zero, mostrando uma boa eficácia da aplicação do modelo.

As áreas com a existência expressiva de cobertura vegetal arbórea, materiais construtivos adequados, loteamentos maiores que facilitam a circulação do ar, contribuem para a diminuição das temperaturas e conseqüentemente propiciam condições favoráveis para o conforto térmico, sem a necessidade de utilização de formas artificiais como a climatização dos ambientes internos. Assim, estudos dessa natureza em cidades de pequeno e médio porte permitem ações efetivas no planejamento das cidades, com o objetivo de contribuir para que medidas sejam tomadas para que as situações de desconforto térmico sejam minimizadas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, desenvolvida na área urbana do município de Ubatuba, a adaptação da metodologia da modelagem da ilha de calor urbana, baseada nos trabalhos desenvolvidos por Foissard (2013 e 2015) surge como um avanço nas técnicas apresentadas em relação às outras formas tradicionais de representação espacial das ilhas de calor por meio das interpolações.

Os resultados mostraram a importância da vegetação nas áreas urbanas como fator fundamental para a diminuição das temperaturas. As áreas com a presença de 20% a 25% de vegetação apresentaram diferenças de temperaturas de 3°C a 4°C em relação às áreas densamente construídas. Outro resultado importante se refere aos diferentes tamanhos das janelas móveis utilizadas durante o procedimento. Neste estudo, foi possível observar que as maiores janelas foram utilizadas para a classe de urbanização, mostrando o efeito global de aumento da temperatura na escala da aglomeração urbana, e as menores janelas mostraram o papel local da vegetação para diminuir a temperatura e minimizar a intensidade da ilha de calor urbana (LANDSBERG, 1970; TAHA *et al.*, 1988; KOLOKOTSA *et al.*, 2009; CARREGA, 2013).

De modo geral, no dia analisado, o modelo com a utilização das características de ocupação da terra (área construída e vegetação alta) em conjunto com as variáveis distância do mar e as temperaturas de superfície se aproximaram da realidade.

É válido ressaltar que se trata de um ambiente muito complexo, onde o modelo foi capaz de explicar cerca de 60% das variações da temperatura ocorridas na área urbana de Ubatuba. Neste caso, se outras variáveis tão importantes quanto às características de ocupação da terra pudessem entrar no modelo, tais como, os efeitos da maritimidade, as brisas marítimas e terrestres e os valores correspondentes à capacidade de inércia térmica do mar, provavelmente os resultados dos modelos seriam mais completos.

Esta metodologia se apresenta como uma inovação no campo da climatologia urbana e está bem adequada na escala de estudo das cidades pequenas e médias, minimizando os efeitos microclimáticos e permitindo uma cartografia na escala da aglomeração, tornando-se um importante instrumento para a gestão do espaço urbano, sendo possível contribuir para intervenções mais localizadas que podem amenizar as ilhas de calor atmosféricas (AMORIM *et al.*, 2015).

REFERÊNCIAS

- AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. S. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP) - Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 11, v. 16, p. 29-45, 2015.
- CARREGA, P. Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté: synthèse par approche inductive. **Climatologie**, v. 10, p. 09-34, 2013.
- DUBREUIL, V.; MONTGOBERT, M.; PLANCHON, O. Une méthode d'interpolation des températures de l'air en Bretagne : combinaison des paramètres géographiques et des mesures infrarouge NOAA-AVHRR. **Hommes et Terres du Nord**, 2002-1, pp.26-39, 2002.
- DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; FOISSARD, X.; PLANCHON, O. Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes. In: P. CLERGEAU (Org.) Ville et biodiversité: les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire. Presses Universitaires de Rennes, 2010, p.105-122.
- FOISSARD, X.; QUENOL, H.; DUBREUIL, V. Analyse et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'agglomération rennaise. In: XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 2013, Bénin, **Anais eletrônicos...Bénin**, 2013. Disponível em: <<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00861539>> Acesso em: 13 mai. 2016.
- FOISSARD, X. **L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise**. (Tese de Doutorado). Université Rennes 2 Haute-Bretagne, Rennes, França. 2015.
- GARCÍA, F. F. **Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación**. Madrid: Editorial Síntesis, S.A., 1996. 285p.
- GOMES, W. P.; AMORIM, M. C. C. T. A. A gênese das chuvas no município de Ubatuba-SP. In: XVI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2015, Teresina, **Anais...Teresina**, 2015. p. 737-744
- KOLOKOTSA, D.; PSOMAS, A.; KARAPIDAKIS, E. Urban heat island. In southern Europe: The case study of Hania, Crete. **Solar Energy**, n. 83, p. 1871-1883, 2009.
- LANDSBERG, H. E. Meteorological observations in urban areas. **Meteorological Monographs**, v. 11, n. 33, p. 91-99, October, 1970.
- LOWRY, W. P. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. **Journal of applied meteorology**. v. 16, p. 129-135, fev. 1977.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Co, 1978.
- OKE, T. R. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: Air Pollution Modeling and its Application XVII, Boston, **Anais eletrônicos...Boston**, 2004, p. 615-631, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-68854-1_66> Acesso em: 20 mar. 2015.
- SANT'ANNA NETO, João Lima. Dinâmica atmosférica e o caráter transicional do clima na zona costeira paulista. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, v. 8, p. 35-49, 1994.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. In: Symposium & Eighth Symposium on Urban Environment, Vancouver, **Anais eletrônicos...Vancouver**, 2009, p. 1-6, 2009. Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_150476.htm> Acesso em: 12 abri. 2016.
- TAHA, H.; AKBARI, H.; ROSENFELD, A.; HUANG, J. Residential cooling loads and the urban heat island - the effects of albedo. **Building and Environment**, v. 23, Issue 4, p. 271-283, 1988.
- TAPPER, N. J.; TYSON, P. D.; OWENS, I. F.; HASTIE, W. J. Modeling the winter urban heat island over Christchurch, New Zealand. **Journal of Applied Meteorology**, v. 20, p. 365-376, 1981.
- TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor: representações espaciais de cidades de pequeno porte por meio de modelagem. **GEOUSP (USP)**, v. 21, p. 239-256, 2017.