



Análise da intensidade da ilha de calor em cidade de médio porte de clima tropical

Diana Carolina Jesus de Paula

Professora Doutora, UNIVAG, Brasil
diana.paula@univag.br

Natallia Sanches e Souza

Professora Doutora, UNIVAG, Brasil
natallia@univag.edu.br

Keylyane Santos da Silva Alves

Doutora, UFMT, Brasil
keylyanesds@gmail.com

Jeane Aparecida Rombi de Godoy

Professora Doutora, UNIVAG, Brasil.
urbanista.jeane@gmail.com

RESUMO

A cidade de Cuiabá-MT continua apresentando crescimento demográfico (IBGE, 2022), acompanhado de expansão urbana com planejamento urbano à revelia das questões climáticas, o que contribui para gerar impactos negativos socioespaciais, além de impactar a saúde humana. Este cenário vem se conformando ao longo dos anos, na medida em que o processo de urbanização avança se desvincilhando dos bens ambientais, áreas vegetadas vão se perdendo e aumentando a superfície impermeabilizada. Frente a este contexto, este artigo teve por objetivo geral analisar a dependência espacial da ilha de calor urbana em relação as características de uso e cobertura do solo. Para a mensuração da intensidade da ilha de calor urbana, foram utilizados registros de transectos móveis e da estação de referência considerada “estação rural”. Analisando o comportamento da ilha de calor nas estações do verão e do inverno, foi observado que no verão a intensidade da ilha de calor é mais clara, com média de intensidade de 4,70°C, podendo estar associada à diminuição de cobertura permeável e aumento de cobertura impermeável. Contudo, a ilha de frescor observada nos transectos ficou mais evidente durante o inverno com intensidade média de -4,26°C, destacando-se que áreas sob influência de grandes massas de vegetação apresentaram características próprias com microclimas diferentes às outras áreas da cidade. A aplicação da geoestatística, especialmente a utilização de semivariograma demonstrou-se satisfatória na análise de dados, demonstrando dependência espacial de moderada a forte entre as variáveis.

Palavras Chave: Urbanização. Climatologia urbana. Geoestatística.

1 INTRODUÇÃO

No 6º relatório divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas – IPCC (UNEP, 2022), os pesquisadores afirmam ser inegável a influência antropogênica sobre o aquecimento da terra, causando perturbações cada vez mais perigosas e generalizadas na natureza, além de impactar gravemente a vida de bilhões de pessoas, apesar dos esforços em reduzir os seus efeitos.

Além disso, existem desigualdades de saúde, especialmente nas cidades em desenvolvimento, que são ainda agravadas pelo aquecimento urbano, como ondas de calor, precipitação extrema, inundações interiores e costeiras, deslizamentos de terra, secas, aumento da aridez, escassez de água e poluição do ar. No caso do Brasil, os impactos socioambientais das mudanças climáticas são agravados devido à questão social.

Neste contexto, desafios envolvendo o clima e a infraestrutura das cidades estão relacionados ao ambiente construído (conforto térmico), uma vez que elevadas temperaturas e forte radiação solar causam impactos indiretos na saúde cardiorrespiratória da população. Neste sentido, são enfatizadas estratégias como respostas aos extremos climáticos atuais e futuros no contexto urbano, como à mitigação de Ilhas de Calor Urbanas (ICU) a partir de estratégias voltadas ao resfriamento (EMMANUEL, 2016).

A Ilha de calor Urbana é definida como a diferença entre a temperatura medida num espaço urbano em relação ao seu entorno (COHEN et al., 2012). À medida que as cidades se tornam cada vez mais urbanizadas, há uma necessidade de integrar a climatologia nos processos de planejamento urbano e compreender os processos envolvidos no clima urbano local (ALCHAPAR et al. 2016).

De acordo com Oke (1978), o clima urbano pode ser definido como o resultado de mudanças causadas por processos de urbanização na superfície terrestre e pela perturbação da urbanização nas características atmosféricas de locais específicos.

Desta maneira, as cidades geram seu próprio clima devido à interferência de todos os fatores que ocorrem na camada limite urbana, ou seja, a camada entre o solo e o limite superior, em relação a altura média dos edifícios. Compreendendo a microescala, que representa o clima de pequenas áreas ao redor de edifícios, árvores e estradas, estendendo-se de 1m X 1km. Portanto, a construção de novos elementos afeta os microclimas existentes e cria microclimas novos e mais complexos, que estão

associados a geometria, densidade e funcionalidade do edifício, e o impacto destes elementos na elevação da temperatura do ar, em decorrência do aquecimento das superfícies urbanas, devido ao tipo de materiais utilizados nos edifícios e na cobertura do solo, as superfícies artificiais absorvem mais calor do sol do que a vegetação natural (MONTEIRO, 1976; GARTLAND, 2010).

Devido à complexidade térmica presente na escala intraurbana, a obtenção de conforto térmico em áreas abertas requer um delicado equilíbrio entre o uso e ocupação do solo e os fatores climáticos locais, regionais e globais. Em outras palavras, a geometria das construções e a disposição paisagística têm um impacto direto na quantidade e distribuição de energia disponível (ondas curtas e longas) para as trocas térmicas entre as superfícies e a atmosfera. (OKE et al., 2017).

Desta maneira, muito ainda precisa ser feito para mitigar o efeito da ICU, estudos apontam que a adoção de planejamento urbano sensível ao clima é um facilitador chave da adaptação às mudanças climáticas, especialmente em cidades com demanda por resfriamento e de clima tropical (EMMANUEL, 2016; HUNG et al., 2006; ROTH, 2007), como é o caso do município de Cuiabá/MT/Brasil.

Deste modo se faz necessário entender como a distribuição espacial da ICU frente as diversas coberturas do solo se comportam, isto é, a influência do tecido urbano da cidade na elevação da temperatura do ar.

À vista disso, Vendrusculo e Carvalho (2004) relatam que o semivariograma é uma ferramenta importante para a representação quantitativa da variabilidade espacial e temporal de uma determinada variável, sendo a mais indicada para medir a dependência espacial. As diversas pesquisas realizadas sobre esta temática comprovam a eficiência de tal procedimento, creditando em subsídios para novos protocolos, em específicos, aqueles a serem empregados pelos planejadores urbanos na tomada de decisões relacionadas a estratégias de mitigação nos efeitos da ICU.

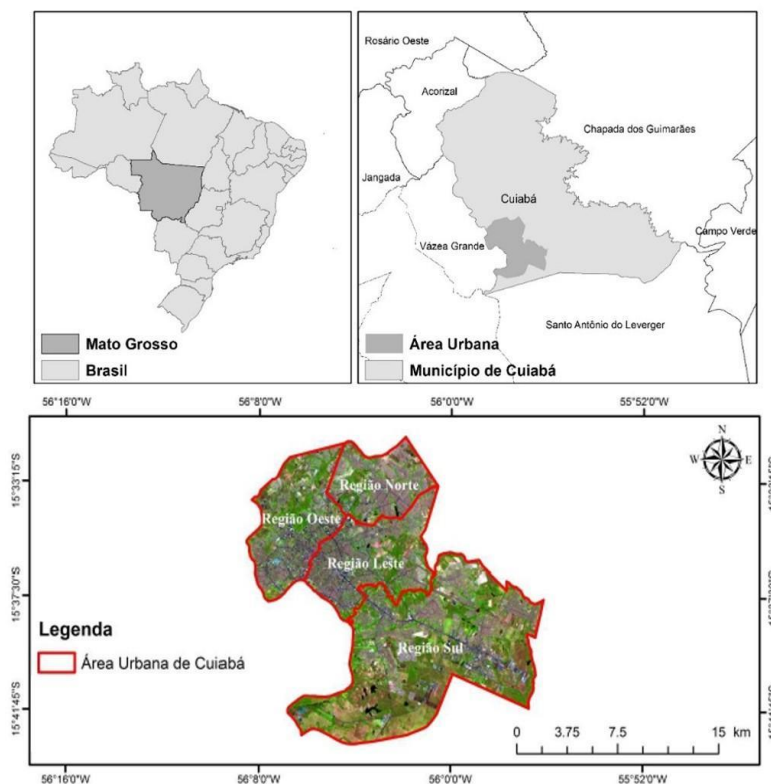
A Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá/MT (RMVRC/MT), território habitado por quase um milhão de pessoas, é conhecida pelo seu rigor climático, com máximas de temperatura do ar acima de 36°C. Diante de um cenário tão crítico, foi realizada a análise da variabilidade espacial da cobertura do solo e a ICU, em específico na cidade de Cuiabá/MT. Com o objetivo de identificar a correlação espacial entre as variáveis de cobertura do solo e ICU nas estações do Inverno e Verão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Cuiabá é considerada uma cidade de médio porte e está situada na região sul do estado de Mato Grosso (Figura 1), com altitude média inferior a 200m, latitude 15°35'46'' S e longitude 56°05'48'' O. A área do município é de 5.077,181km², sendo que 254,57km² correspondem a área urbanizada ocupada por uma população urbana estimada de 623.614 (IBGE, 2022).

Figura 1 – Mapa da localização da área urbana de Cuiabá, MT, Brasil.



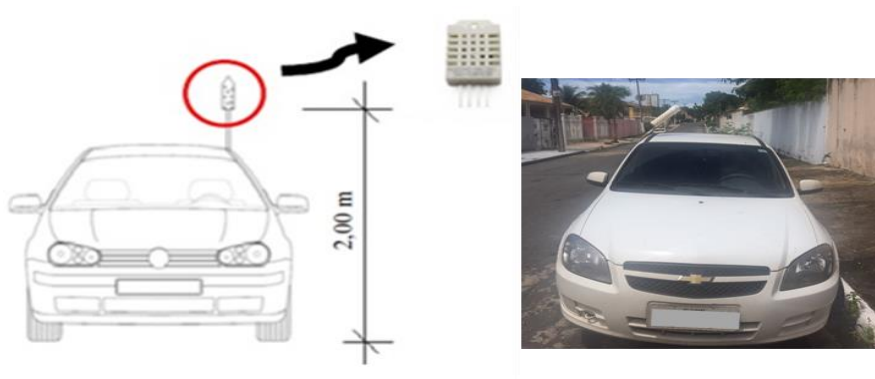
Fonte: adaptado de SOUZA (2019)

O perfil climático é o tropical continental semiúmido do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com duas estações bem definidas, uma seca (outono-inverno) e uma chuvosa (primavera-verão). A temperatura média anual em Cuiabá oscila entre 25 a 26°C, enquanto as máximas ultrapassam 35°C e as mínimas oscilam entre 18 a 21°C, a Umidade relativa do ar tem média anual de 70%, contudo durante o período quente-seco chega a 12% e insolação total média de 2.179horas (SANTOS, 2013).

Diante dessas características, observa-se que os fatores e elementos climáticos, a geometria urbana, os materiais que recobrem o solo, associados à expansão da cidade, resultam em uma cidade com rigor climático cada vez mais acentuado.

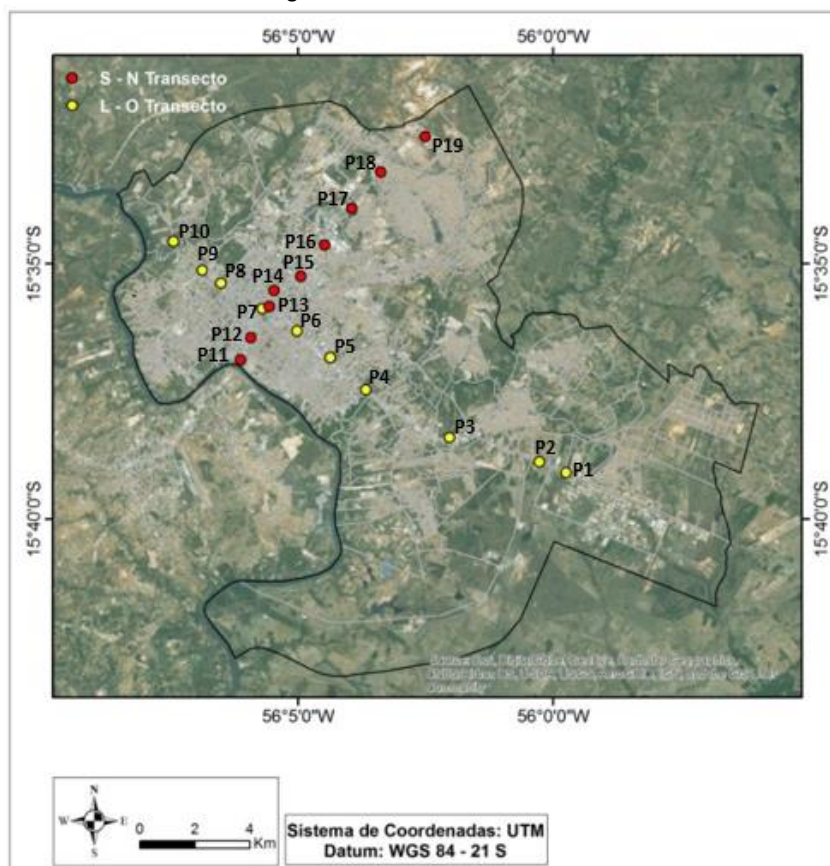
Neste contexto, para as coletas das variáveis climáticas adotou-se a metodologia de transecto móvel noturno, com veículo automotor, protocolo adotado quando o percurso a ser realizado é muito extenso. Para a medição da temperatura do ar e umidade relativa do ar, utilizou-se um datalogger, modelo AM2302, protegido por um abrigo, acoplado na lateral do veículo com aproximadamente 2m do solo (Figura 2).

Figura 2 – Foto do Veículo com datalogger protegido por abrigo



As aferições iniciavam sempre às 20 horas com velocidade do veículo variando entre 30 e 40 km/h, em dias com condições climáticas estáveis, com ventos leves e céu claro (OKE, 2004; VALIN Jr., 2019) passando por 19 pontos na cidade, sendo o transecto Leste-Oeste (L-O) com 10 pontos (19,76km) e o transecto Sul-Norte (S-N) com 9 pontos (11,6km), durante as estações do verão e o inverno de 2016 (Figura 3).

Figura 3 – Transectos



Para a precisão dos locais de medição dos pontos e obtenção das altitudes, o Datalogger contemplava GPS, e as coordenadas eram obtidas em UTM (Universal Transversa de Mercator), Zona 21S.

2.2 Determinação da ICU

Oke (1987) propõe que a ilha de calor urbana seja representada pela diferença das temperaturas do ar medidas entre os espaços urbanos e espaço rural que o rodeia. Destaca que a intensidade de ilha de calor geralmente é observada cerca de três a quatro horas após o pôr do sol.

Para a mensuração da intensidade da ilha de calor urbana foram utilizados os registros de temperatura do ar a partir dos transectos móveis, ponto por ponto e da estação de referência considerada “estação rural”.

A estação rural foi a Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (Código OMM: 86705), localizada no Aeroporto Marechal Rondon, em Várzea Grande - MT, cidade adjacente a Cuiabá-MT.

2.3 Cobertura do Solo

Katzschner (1997) propôs a integração da escala climática e da escala de planejamento urbana para fornecer uma ligação entre o clima urbano e o planejamento. Para Prakasam (2010) a cobertura do solo se refere aos componentes que revestem a superfície terrestre, englobando solos e rochas, vegetação e florestas, água e neve, refletindo o estado biofísico do sistema terrestre. Enquanto, que o uso do solo está relacionado com as atividades humanas sobre a terra, tais como: agricultura e pastagem, construções, lazer e turismo, mineração, desflorestamento, envolvendo a modificação dos ambientes naturais.

Foram adotadas 6 classes de revestimento do solo, isto é, cobertura paisagística (vegetação rasteira), cobertura arbórea, solo exposto, área pavimentada, área edificada e corpos d'água. Os mapas foram gerados empregando o método de classificação supervisionada, através da técnica MAXVER (máxima verossimilhança), obtendo as porcentagens referentes a cada classe de interesse, sendo apresentado os resultados em forma de gráfico.

2.4 Geoestatística

Para a caracterização do padrão de variabilidade espacial será empregada a análise geoestatística, com a construção de semivariogramas baseados nos cálculos da semivariância, ou seja, a dependência espacial entre as amostras, é definida pelo semivariograma.

Neste caso, os parâmetros utilizados são o Efeito Pepita, que revela a continuidade ou descontinuidade do fenômeno observado. O Alcance, está relacionado a correlação espacial das variáveis, o Patamar, corresponde ao alcance no gráfico do semivariograma, ou seja, a partir deste ponto não existe mais dependência espacial entre as variáveis, e a Variância estrutural, que é resultante da diferença entre o patamar e o efeito pepita (VENDRUSCULO e CARVALHO, 2004).

Zanzarini et. al. (2013), evidenciam que o modelo mais utilizado para a descrição de variáveis relacionadas às ciências ambientais, é o modelo esférico.

Para a verificação do melhor modelo de Semivariograma, frequentemente são utilizados indicadores para a tomada de decisão, neste sentido o coeficiente de determinação (R^2) é adotado, variando entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1 melhor o modelo.

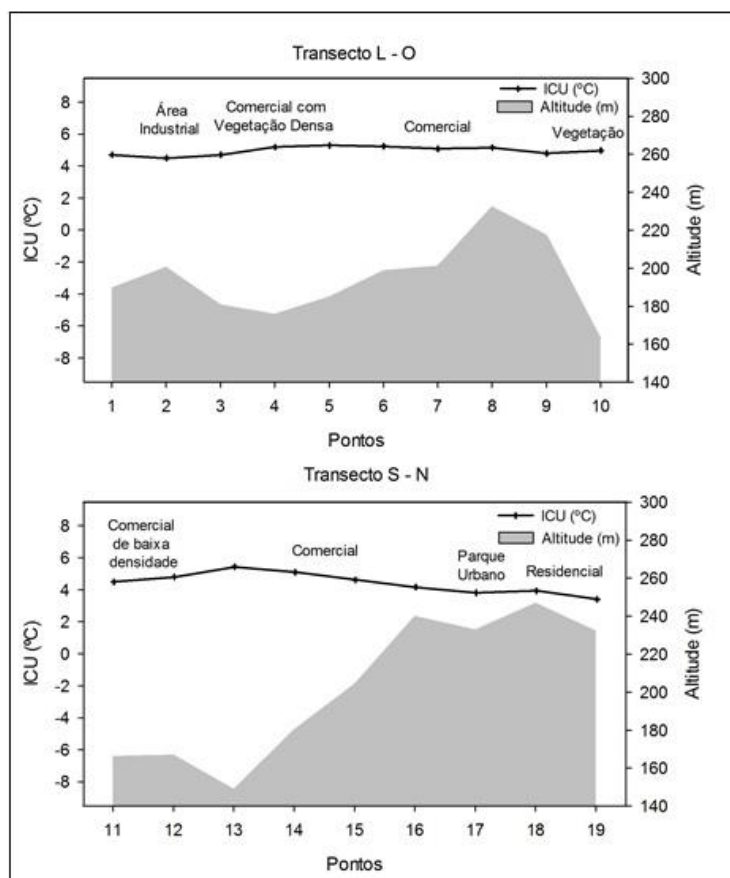
A análise estatística utilizou de Semivariograma, realizado no software Gamma Design e posteriormente a krigagem dos dados, resultando em mapas térmicos dos transectos das estações do inverno e verão de 2016, realizados por meio do software Surfer v.13 (Golden Software).

A krigagem é um processo de interpolação que preenche os pontos não amostrados na confiabilidade dos valores estimados (VENDRUSCULO e CARVALHO, 2004).

3 RESULTADOS/ DISCUSSÕES

De acordo com a Figura 4, Cuiabá expressa ilha de calor urbana média de 4,70°C no verão, com variação térmica de 1°C. Ademais, as intensidades de ICU são observados nos pontos 4, 5, 6, 7, 8, 13 e 14, variando entre 5,00 a 5,40°C.

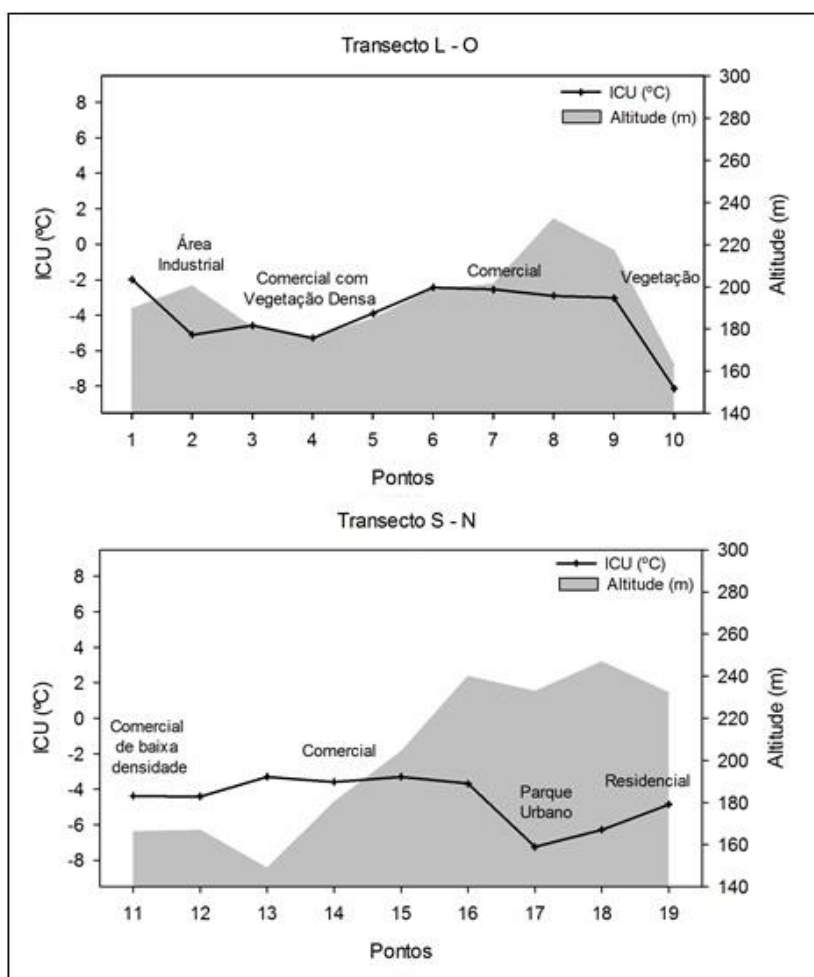
Figura 4 – ICU média Verão e Altitude dos pontos



Analisando os transectos, L-O e S-N, observa-se que diferença média de ICU expressa entre eles é de 0,5°C, isto é, 4,90 e 4,40°C, respectivamente. As menores intensidades de ICU, são observadas no transecto S-N, nos pontos 17, 18, e 19, sendo o ponto 17.

No inverno todos os pontos manifestaram valores negativos de ICU, caracterizando assim, presença de ilha de frescor, com média de -4,26°C. Entretanto, a variação térmica observada nesta estação é de 6°C, nos pontos 1 e 10 (Figura 5).

Figura 5 – ICU média Inverno e Altitude dos pontos



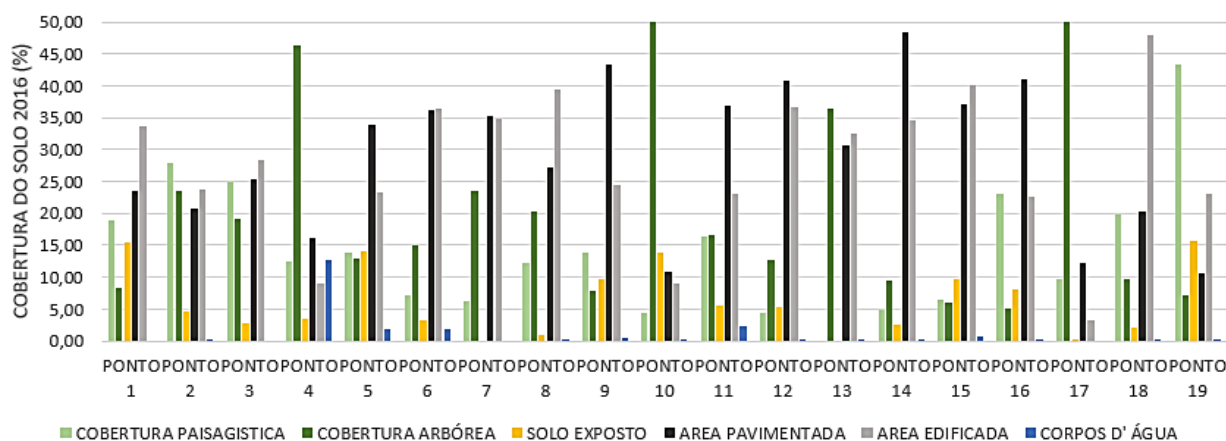
Ao considerarmos os dois transectos, L-O e S-N, observa-se que diferença média de ICU expressa entre eles é de 0,6°C, isto é, 4,00 e 4,60°C. Todavia, em ambos os transectos nesta estação, nota-se maior variação entre os pontos.

Oke (1981) recomenda para averiguação da ilha de calor urbana, a estação do verão. No entanto em Cuiabá, foi na estação do inverno que se observou a melhor relação da ICU com as características de uso e ocupação do solo, em função do período quente-seco, isto é, a baixa precipitação característica do período (SANTOS, 2013).

No que se refere a relação entre altitude e ICU, a média da altitude entre os transectos é de aproximadamente 198m. Desta maneira, observa-se que em 47% dos pontos as ICUs mais elevadas estão nos pontos de menor altitude, ou seja, abaixo de 198m, em maior concentração no sentido L-O.

Quanto a cobertura do solo, as menores intensidades de ICU, são observadas no transecto S-N, nos pontos 17, 18, e 19, sendo o ponto 17 localizado em área vegetada - parque urbano, e o ponto 19 em área residencial com presença marcante de vegetação. Por sua vez, as maiores intensidades foram registradas nos pontos 4, 5, 6, 7, 8, 13 e 14, em áreas que a cobertura do solo é predominantemente impermeável com atividades comerciais e de serviços, conforme figura 6.

Figura 6 – Cobertura do solo em 2016

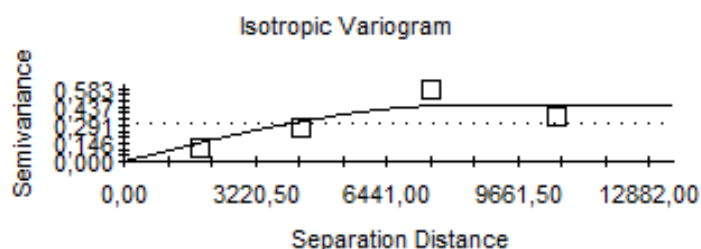


Sabe-se que as cidades podem alterar significativamente as condições naturais das superfícies e propriedades atmosféricas, resultando em diferentes padrões de aquecimento na área urbana (CARDOSO et al. 2017).

Assim como a forte relação entre a cobertura do solo e a temperatura do ar, principalmente no que diz respeito à densidade urbana e vegetação. Pereira et al. (2002) afirmam que a variação espaço-temporal da temperatura do ar é condicionada pelo balanço de energia na superfície, um dos efeitos mais importantes da radiação solar.

O modelo semivariográfico utilizado para a krigagem da ilha de calor urbana foi o modelo esférico com distribuição normal. No verão (Figura 7), os dados possuem distribuição normal com curtose simétrica a esquerda, apresentou $R^2=0,76$, efeito pepita igual a 0,0010, patamar igual a 0,4540. A dependência espacial foi obtida por meio do alcance (Ao), nesta estação foi de 8400m, isto é, dependência moderada.

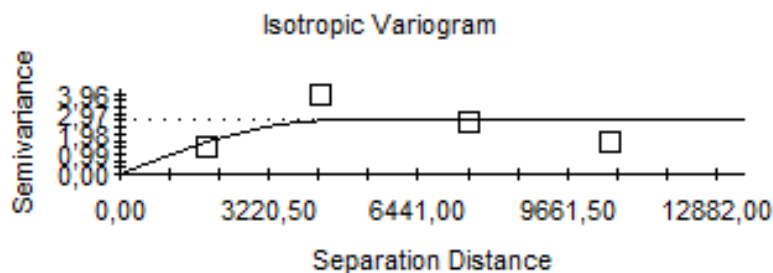
Figura 7 – Semivariograma utilizado para krigagem da ICU Verão



Spherical model ($C_0 = 0,0010$; $C_0 + C = 0,4540$; $A_0 = 8400,00$; $r^2 = 0,764$;
RSS = 0,0301)

No inverno (Figura 8), os dados possuem distribuição normal com curtose simétrica a direita com R^2 de 0,327, o efeito pepita foi de 0,0010 e o patamar igual a 2,6410. No que se refere ao alcance (A_0), nesta estação foi de 4480 m, ou seja, forte dependência.

Figura 8 – Semivariograma utilizado para krigagem da ICU Inverno

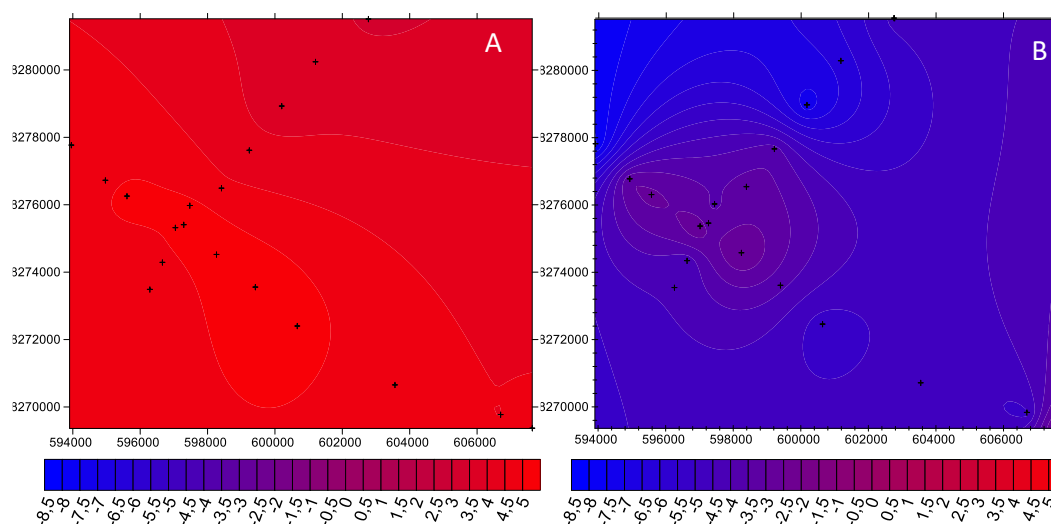


Spherical model ($C_0 = 0,0010$; $C_0 + C = 2,6410$; $A_0 = 4480,00$; $r^2 = 0,327$;
RSS = 2,97)

Neste estudo, estes modelos foram utilizados para krigagem das ICUs, os mapas resultantes podem ser observados na Figura 9. Observa-se um padrão nos pontos analisados, sendo as áreas centrais da cidade mais aquecidas seja na estação de verão ou de inverno.

Por meio da análise do comportamento da ilha de calor urbana nas estações verão e inverno, conclui-se que o verão é mais propício a observar a intensidade da ilha de calor urbana. No estudo realizado, foi registrada uma intensidade de $4,70^{\circ}\text{C}$, estando associada a diminuição de cobertura permeável e aumento de cobertura impermeável.

Figura 9 – Krigagem Ilha de calor urbana (°C), (A) Verão (B) Inverno



Enquanto que no inverno foi encontrado o fenômeno “ilha de frescor”, onde a cidade apresenta-se mais resfriada que a sua área rural, atingindo intensidade de $-4,26^{\circ}\text{C}$. Evidenciando que áreas sob influência de grandes massas de vegetação apresentaram características próprias com microclimas diferentes às outras áreas da cidade, em razão da perda de energia para o meio, utilizada nos processos de fotossíntese, evapotranspiração e trocas térmicas por convecção.

Corroborando com os estudos realizados por Franco et. al. (2012) e Paula et. al. (2016), sobre a forte influência que a impermeabilização do solo exerce sobre o comportamento térmico de um ambiente, posto que há liberação do calor absorvido pela superfície asfáltica e edificada.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise do comportamento da ilha de calor urbana nas estações verão e inverno, conclui-se que o verão é mais propício a observar os maiores picos de ilha de calor, refletindo em acréscimo de $4,70^{\circ}\text{C}$. Demonstrando que as mudanças provenientes da urbanização com uso de materiais impermeáveis, contribuem de forma considerável para o aumento da temperatura do ar e diminuição da umidade relativa do ar em escala microclimática.

Enquanto que no inverno foi encontrado o fenômeno “ilha de frescor”, onde a cidade apresenta-se mais resfriada do que o seu entorno, cerca de $-4,26^{\circ}\text{C}$. Destacando que áreas sob influência de grandes massas de vegetação apresentaram características próprias com microclimas diferentes às outras áreas da cidade.

Já a aplicação de geoestatística, especialmente a utilização de semivariograma demonstrou-se satisfatória na análise de dados. O modelo esférico apresentou distribuição normal ora a esquerda e ora a direita, efeito pepita de 0,0010 em ambas as estações, o patamar foi de 0,45 no verão e de 2,64 no inverno, e alcance de 8400 e 4480, respectivamente. Evidenciando a correlação e dependência espacial de moderada a forte, isto é, a ICU no inverno tem forte influenciada da cobertura do solo.

5 REFERÊNCIAS

- ALCHAPAR, N.L., PEZZUTO, C.C., CORREA, E.N. LABAKI, L. C. The impact of different cooling strategies on urban air temperatures: the cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. **Theor Appl Climatol**, v. 130, n 1-2, pp. 35-50. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1851-5>
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/> Acesso em 10/02/2022.
- CARDOSO, R. S.; DORIGON, L. P.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. T. Assessment of Urban Heat Islands in Small- and Mid-Sized Cities in Brazil. **Climate**, v. 5, n. 1, p. 14. doi:10.3390/cli5010014.
- COHEN, P.; POTCHER, O.; MATZARAKIS, A. Daily and seasonal climatic conditions of green urban open spaces in the Mediterranean climate and their impact on human comfort. **Building and environment**, 51, 285-295. 2012.
- EMMANUEL, R. (ed.), 2016. Urban Climate Challenges in the Tropics: Rethinking Planning and Design Opportunities, London: **Imperial College Press**, ISBN: 9781783268405, 366 pp
- FRANCO, M. F.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Análise microclimática em função do uso e ocupação do solo em Cuiabá-MT. **Mercator**. Fortaleza, v.11, p.157-170. 2012.
- GARTLAND, L. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 243p.
- KATZSCHNER, L. Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. In: IV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais**. Salvador, 1997.
- MONTEIRO, C. A. Teoria e clima urbano. 1976. 181f. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geografia. Universidade de São Paulo. São Paulo.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. Londres: Routledge, 1987.
- OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v.1, 1981.
- OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 542p. ISBN 9781107429536
- PAULA, D. C. J.; MIRANDA, S.A.; VALIN JR., M. O.; SOUSA, N.S.; NOGUEIRA, J. S; SANTOS, F.M.M.; NOGUEIRA, M.C.J.A. Comparação Termohigrométrica do impacto de intervenções urbanísticas em Cuiabá-MT-Brasil. In 7º Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável, **Anais**. Maceió, 2016.
- PRAKASAM, C. Land use and land cover change detection through remote sensing approach: a case study of Kodaikanal taluk, Tamil nadu. **International Journal of Geometrics and Geosciences**, v.1, p.150-158. 2010.
- ROTH, M. Review of urban climate research in (sub)tropical regions. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 14, p. 1859-1873, nov. 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1591>
- SANTOS, F. M. M. Clima Urbano de Cuiabá-MT-Brasil: ocupação do solo e suas influências. **Revista Monografias Ambientais**. v. 12, n. 2, pp. 2749-2763, 2013.
- SOUZA, N. S. **Análise da relação da radiação solar na formação de ilhas de calor em diferentes configurações urbanas em Cuiabá - MT**. 74f. Dissertação, (Mestrado em Física Ambiental), UFMT, Cuiabá, 2016.
- VALIN Jr., M. O. **Análise de abrigos termo-higrométricos alternativos para transectos móveis**. Cuiabá, 2019. 118f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2019.
- VENDRUSCULO, G. L. CARVALHO, J. R. P. Uso de Indicadores para escolha do melhor modelo de semivariograma. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais**. São Pedro, SP. 2004.
- ZANZARINI, F. V. PISSARA, T. C. T. BRANDÃO, F. J. C. TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.17, n.6, p.608-614, 2013.