



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Uso da geostatística na avaliação da distribuição de material particulado respirável na cidade de Fortaleza, Ceará

Ícaro Breno da Silva<sup>1</sup>, Tanara Lima Silva<sup>1</sup>, Camille Arraes Rocha<sup>2</sup>, Rivelino Martins Cavalcante<sup>3</sup>, Marcus Vinícius Chagas da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduandos em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-CE. E-mail para correspondência: [icarobrenos@hotmail.com](mailto:icarobrenos@hotmail.com) (Silva, I.B.). E-mail: [tanara\\_lima@hotmail.com](mailto:tanara_lima@hotmail.com); <sup>2</sup>Mestranda em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará-UFC. E-mail: [camillearraesrocha@hotmail.com](mailto:camillearraesrocha@hotmail.com); <sup>3</sup>Prof. do Instituto de Ciências do Mar-LABOMAR/UFC, Fortaleza-CE. E-mail: [rivelino@ufc.br](mailto:rivelino@ufc.br), [mvcs81@hotmail.com](mailto:mvcs81@hotmail.com).

Artigo submetido em 05/11/2015 e aceito em 26/03/2016.

### RESUMO

Nos centros urbanos, as principais fontes poluidoras antropogênicas são oriundas do tráfego de veículos e, quando existente, da atividade industrial. Tal problemática faz da poluição atmosférica urbana um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida da população. Entre as variáveis que influenciam no transporte e difusão dos poluentes podemos citar as condições meteorológicas, onde a ocorrência de ventos e precipitações podem interferir no tempo de permanência dos poluentes na atmosfera. Desta forma, o trabalho objetivou avaliar a distribuição dos níveis de material particulado respirável (MPR) na cidade de Fortaleza. A área de estudo abrange nove localidades distribuídas geograficamente pela cidade. O mapa de concentração do MPR foi obtido a partir de uma proposta geoestatística de interpolação chamada Krigagem Ordinária (KO) trabalhada em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Foi ratificado que a precipitação diminui a concentração do poluente, reduzindo o tempo de permanência do particulado no ar e que as edificações prejudicam a ação dos ventos na dispersão do MPR. Os mapas produzidos alertam para a qualidade do ar em alguns locais de Fortaleza, que justifica-se pelo intenso fluxo veicular, aliado ao efeito de cânions urbanos nessa região.

**Palavras-chave:** Krigagem, Material Particulado, Qualidade Ambiental Urbana, Fortaleza.

## Use of geostatistics in the assessment of respirable particulate matter distribution in the city of Fortaleza, Ceará

### ABSTRACT

In urban centers, the main anthropogenic pollution sources are derived from vehicular traffic and when present, from industrial activity. Such problems make urban air pollution one of the main degradation factors of the population's quality of life. Among the variables that influence the transportation and diffusion of pollutants, one of them is the weather conditions, where the occurrence of winds and rainfall can interfere with the time the pollutants stay in the atmosphere. Therefore, the study aimed to evaluate the distribution of the levels of respirable particulate matter (RPM) in the city of Fortaleza. The study area included nine locations geographically distributed by city. The map of RPM concentration was obtained from a geostatistical interpolation proposal called Ordinary Kriging (KO) worked on in a Geographic Information System (GIS). It was ratified that precipitation decreases the concentration of the pollutant, reducing the particulate residence time in the air and the buildings impair the action of the winds in the dispersion of the MPR. The maps produced warn of air quality in some locations of Fortaleza, which is justified by the intense vehicular flow, coupled with the effect of urban canyons in this region.

**Keywords:** Kriging, Particulate Matter, Urban Environmental Quality, Fortaleza.

### Introdução

O estabelecimento de sítios urbanos causa impactos sobre a natureza. As mudanças nos componentes naturais ocorrem em detrimento da

qualidade ambiental, a qual acarreta em consequências negativas para o meio natural e à qualidade de vida do homem (Schmidt e Nucci, 2010). Segundo Pinto et al. (2014) os grandes

centros urbanos vêm apresentando problemáticas em relação a poluição atmosférica. Para ele, o adensamento populacional juntamente com as elevadas emissões industriais e veiculares colaboram com a degradação da qualidade do ar devido ao aumento de poluentes na atmosfera.

A poluição do ar caracteriza-se pela liberação de substâncias (partículas ou gases) na atmosfera que altere a constituição natural da mesma. Essas substâncias acabam por afetar negativamente o homem, a fauna e a flora (Radicchi, 2012). Segundo Damilano (2006), os principais fatores que influenciam no processo de transporte e difusão dos poluentes em centros urbanos são: as edificações, a topografia urbana e as condições meteorológicas. Tais variáveis estão diretamente relacionadas com a concentração destes poluentes em determinados locais das cidades. O regime dos ventos e a ocorrência de chuvas são alguns fatores climáticos locais que podem interferir no tempo de permanência dos poluentes na atmosfera.

Em Fortaleza, a direção predominante dos ventos é leste e sudeste (Leite, 2010). O clima da cidade é classificado como do tipo AW' da classificação de Köppen. Este refere-se ao macroclima da faixa costeira que apresenta clima tropical chuvoso, quente e úmido, com chuvas de verão a outono (PDDU, 1992).

Entre os principais sistemas atmosféricos que atuam na cidade, temos: o Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAS): com origem no oceano Atlântico entre novembro e março. O fenômeno é caracterizado pelo turbilhamento do ar em altos níveis na atmosfera, havendo formação de nuvens causadoras de chuva na sua periferia; as Ondas de Leste: que possuem sua origem associada a área de influência dos ventos alísios e que deslocam-se de oeste para leste. Tal fenômeno, em condições oceânicas e atmosféricas favoráveis, provocam chuvas no Ceará entre junho e agosto; as brisas marítimas e terrestres: que são oriundas do gradiente térmico entre a superfície terrestre e a aquática. Ao longo do dia o continente se aquece mais rapidamente do que a superfície aquática, gerando uma baixa térmica sobre o continente com ventos que sopram do mar para o continente (brisa marítima). Durante a noite o gradiente de pressão é invertido, passando o vento a soprar em direção ao mar (brisa terrestre); e a Zona de Convergência intertropical (ZCIT): principal sistema responsável pela geração de chuvas em Fortaleza, bem como em todo o nordeste do Brasil. Esta zona é formada pela confluência dos

alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul (Ferreira e Mello, 2005; Moura, 2008; Ayoade, 2010).

As características climáticas da cidade de Fortaleza sofreram influência do crescimento urbano e, conseqüentemente, trouxe problemas ambientais como a poluição atmosférica (Branco, Zanella e Sales, 2012). Entre os principais poluentes atmosféricos, segundo Rios e Boechat (2011), destaca-se o material particulado (MP). O mesmo pode ser classificado, de acordo com seu diâmetro, em partículas grossas, finas e ultrafinas, podendo causar danos as vias aéreas inferiores e alvéolos quando inaladas. O termo material particulado refere-se a uma complexa mistura de pequenas partículas sólidas ou líquidas em suspensão no ar, de origem natural ou antrópica. Dentre as formas de emissão podemos citar a dispersão mecânica do solo, esporos, combustão emitida pelas termelétricas e automóveis. Sua dispersão dá-se pelo vento podendo alcançar longas distâncias até sedimentar no solo ou na água (Silva e Mendes, 2006; Kaur; Nieuwenhuijsen; Colville, 2007; Gonçalves Jr., 2014).

No Brasil, os padrões nacionais de qualidade do ar foram instituídos a partir da Portaria Normativa IBAMA nº 348 de 14/03/90 e da resolução CONAMA nº 003 de 28/06/1990. Na lei, não são considerados valores limites para o material particulado respirável (MPR).

Estas partículas apresentam diâmetros menores que 2,5 µm e são resultantes, em geral, de atividades antropogênicas, como os processos de combustão (Silva e Mendes, 2006).

Para a representação espacial da concentração do MPR sobre a cidade de Fortaleza, utilizou-se da geoestatística. Tal método surge com Krige (1951) que, estudando dados de concentração de ouro na área de exploração mineral, chega à conclusão de que as variâncias obtidas da variável em estudo não faziam sentido caso não fossem levados em consideração a distância entre as amostras. A partir daí surge o conceito de geoestatística, que passa a considerar a localização geográfica e a dependência espacial das amostras. Posteriormente este método foi utilizado com sucesso em mapeamento hidrológico (Hoeksema e Kitanidis, 1984), mapeamento de áreas de risco à saúde pública (Lourenço e Landim, 2005) entre outras áreas de estudo.

O nível de dependência entre as variáveis regionalizadas é representado pelo semivariograma (Equação 1). O mesmo é

estimado, segundo Rossi et al. (1994), pela seguinte equação:

$$\gamma(H) = \frac{1}{2N(H)} \sum_{i=1}^N [Z_{(T_i)} - Z_{(T_i+H)}] \quad (1)$$

Onde:  $\gamma(H)$  é o valor da semivariância estimada para a distância  $H$ ;  $N(H)$  representa o número de pares de valores medidos,  $Z_{(T_i)}$  e  $Z_{(T_i+H)}$ , separados pela distância  $h$ ; e  $Z_{(T_i)}$  e  $Z_{(T_i+H)}$  são valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $T_i$  e  $T_i+H$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor  $h$ .

Segundo Reis (2013), ao obter o semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo de modo a definir os seguintes parâmetros: alcance ( $a$ ), patamar ( $C$ ) e efeito pepita ( $C_0$ ).

Camargo (1998), por sua vez, salienta que o processo de ajuste não é direto e automático, mas sim interativo, pois o interprete ajusta e verifica a adequação do modelo teórico até considera-lo satisfatório. O mesmo autor ainda define os parâmetros do semivariograma da seguinte forma: alcance ( $a$ ): determinada distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; patamar ( $C$ ): é o valor correspondente a seu alcance ( $a$ ). A partir deste ponto, pode-se dizer que não há mais dependência espacial entre as amostras; efeito pepita ( $C_0$ ): corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo “y”, ou seja, quando a distância é 0 (zero); e Contribuição ( $C_1$ ): que é representado simplesmente pela diferença entre o patamar ( $C$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ). É importante que o modelo ajustado represente a tendência de  $\gamma(H)$  em relação a  $H$ . Deste modo, as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais exatas e, portanto mais confiáveis.

De acordo com Teixeira (2013), os modelos teóricos estão divididos em dois tipos: os que atingem o patamar e os que não possuem patamar. Os modelos aqui apresentados serão apenas os primeiros, onde os mais utilizados, segundo Camargo (1998), são: modelo esférico, exponencial e gaussiano, representados por suas respectivas equações abaixo.

O primeiro (Equação 2) apresenta um comportamento linear e um crescimento rápido na origem. Comumente é o mais utilizado nas variáveis em geociências (Andriotti, 2003).

$$\gamma(H) = \begin{cases} 0, & \text{se } H = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{H}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{H}{a} \right)^3 \right], & 0 < H \leq a \\ C_0 + C_1, & \text{se } H > a \end{cases} \quad (2)$$

O segundo modelo (Equação 3) é caracterizado por ter um comportamento linear na origem. Ele alcança o patamar assintoticamente, ou seja, quando  $H$  tende a infinito (Andriotti, 2003).

$$\gamma(H) = \begin{cases} 0, & \text{se } H = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-3 \left( \frac{H}{a} \right)} \right], & \text{se } H \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

O último modelo (Equação 4) apresenta uma grande continuidade da variável estudada – devido ao seu crescimento suave – e tem comportamento parabólico nas vizinhanças da origem (Teixeira, 2013).

$$\gamma(H) = \begin{cases} 0, & \text{se } H = 0 \\ C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-3 \left( \frac{H}{a} \right)^2} \right], & \text{se } H \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Assim, o semivariograma é considerado uma ferramenta básica que representa quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, dando suporte as técnicas de krigagem (Liu, 2015).

A krigagem é uma proposta geoestatística de interpolação. A mesma estima valores de variáveis espacialmente distribuídas a partir de valores adjacentes interdependentes considerando os principais fatores necessários para se ter uma boa acurácia (Ortiz, 2002). Segundo Reis (2013), tal acurácia pode ser influenciada pelos seguintes fatores: número de vizinho adotados durante a interpolação, a quantidade de amostras utilizadas e o índice de dependência espacial entre elas.

As diferentes maneiras de como se atribuem os pesos aos pontos amostrados define o método de interpolação utilizado. Existem outros métodos para a interpolação de dados, como por exemplo, interpolação linear simples e o inverso do quadrado da distância. No primeiro, os pesos são todos iguais a  $1/n$  ( $n$  = número de amostras); já no segundo método, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados. Contudo, o que diferencia a krigagem dos outros métodos de interpolação é que esta leva em consideração a continuidade existente entre os valores dos pontos amostrados e o não amostrado para o qual se pretende obter uma estimativa. Além disso, este método considera a distância entre os pontos amostrados e entre os pontos amostrados e não amostrados (Camargo, 1998; Gumpertz, 2001; Reis, 2013). Assim, a krigagem é um dos métodos geoestatísticos mais utilizados e considerado por

autores (Faraco et al., 2008) como bastante adequada para a geração de mapas.

Segundo Bagnara, Prietto e Timbola (2012), no processo de interpolação utilizando a krigagem do tipo ordinária, a estimativa de uma variável em locais não amostrados ( $v^*$ ) é obtida a partir da combinação linear dos  $n$  dados amostrados ( $v_i$ ) disponíveis na vizinhança do ponto analisado. A equação da krigagem ordinária é expressa abaixo (Equação 5), sendo  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) os pesos atribuídos a cada amostra. A melhor estimativa é alcançada quando são atendidas as seguintes condições: não tendenciosidade e variância mínima.

$$v^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot v_i \quad (5)$$

Desta forma, o trabalho objetivou avaliar a distribuição dos níveis de MPR na cidade de Fortaleza. Nesse contexto o SIG é capaz de realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, combinando conhecimento geral com informações específicas (Câmara; Davis; Monteiro, 2001; Longley et al., 2013).

**Material e métodos**

A presente pesquisa foi realizada na cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, inserida no nordeste brasileiro (Figura 1). Sua pluviosidade anual é de 1.338,0 mm e a

temperatura média varia de 26°C a 28°C. Tal cidade apresentou um crescimento em relação a sua população e a sua frota veicular no período de 1991-2014 (Figura 2) (IPECE, 2014).

Foram amostrados, entre os anos de 2014/2015, nove locais em Fortaleza. Nesses locais, as amostragens foram realizadas em período chuvoso e seco, fazendo, posteriormente, a média anual da concentração do MPR. A partir desses pontos pôde-se gerar os mapas temáticos.

Para isso, os níveis de MPR foram obtidos por amostragem ativa a partir de levantamentos de campo e subsidiados em técnicas de geoprocessamento, inseridos em um Sistema de Informações Geográficas.

*Dados raster*

Devido a sua alta resolução espacial (0,60 cm), foram adquiridos recortes de imagens georreferenciadas do satélite QuickBird, compondo uma cena correspondente à área urbana da cidade de Fortaleza (Figura 3), onde foram representados os nove pontos monitorados (Figura 4). No estudo foi adotado como sistema de coordenadas geográficas o SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e o sistema de projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) fuso 24 com coordenadas métricas.

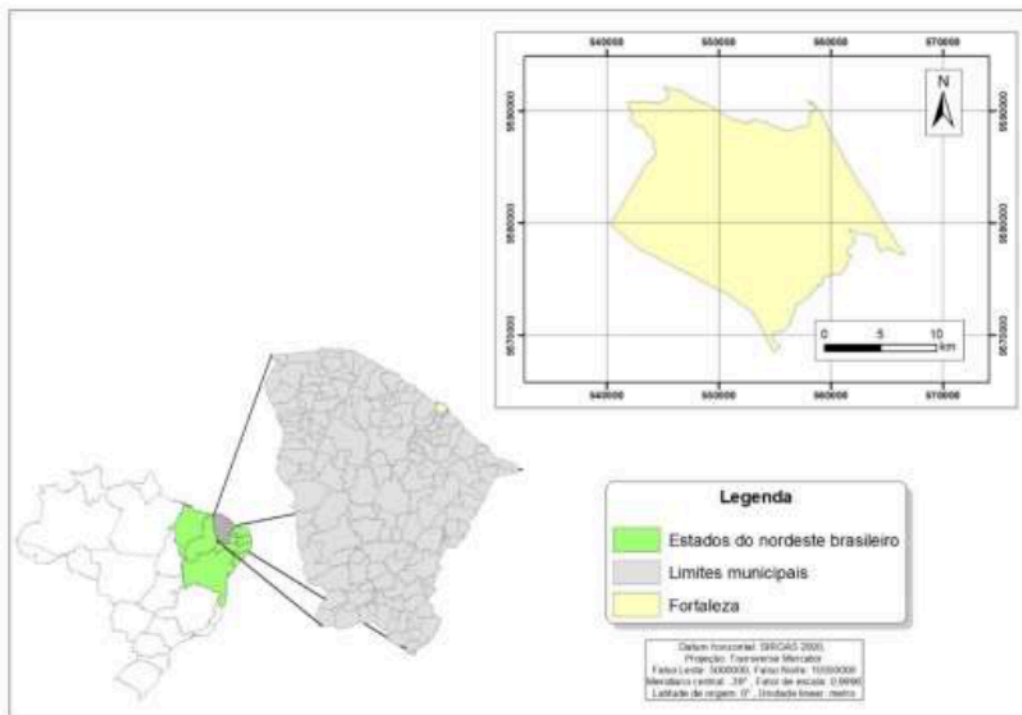


Figura 1. Situação geográfica da área de estudo. Elaboração: Silva, Í. B.

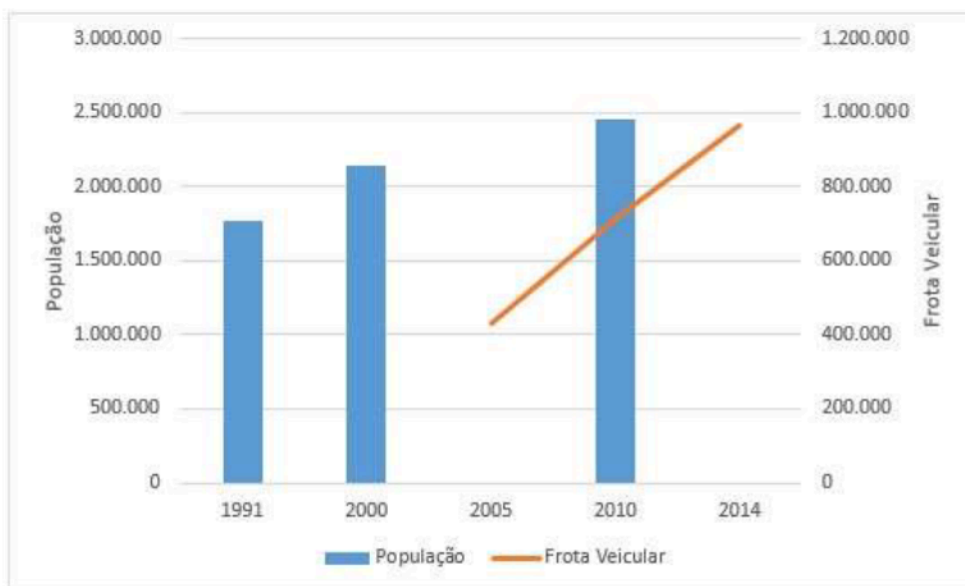


Figura 2. Crescimento populacional e da frota veicular na cidade de Fortaleza. Fonte: IPECE (2014).

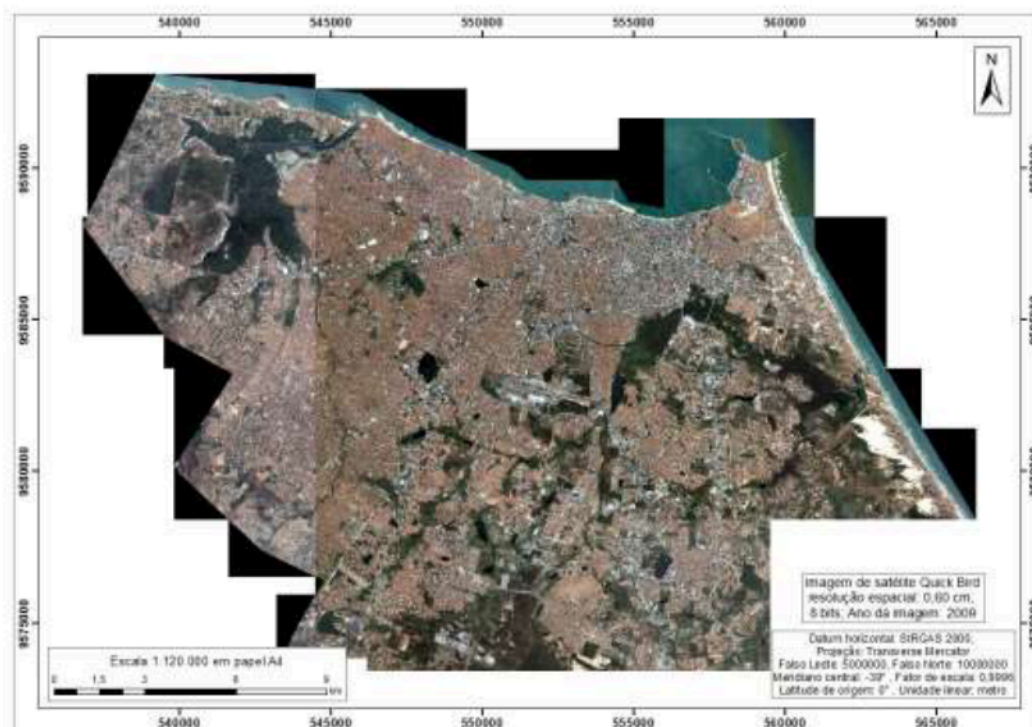


Figura 3. Mosaico de imagens do satélite QuickBird, projetadas e georreferenciadas, correspondente a cidade de Fortaleza. Elaboração: Silva, Í. B.

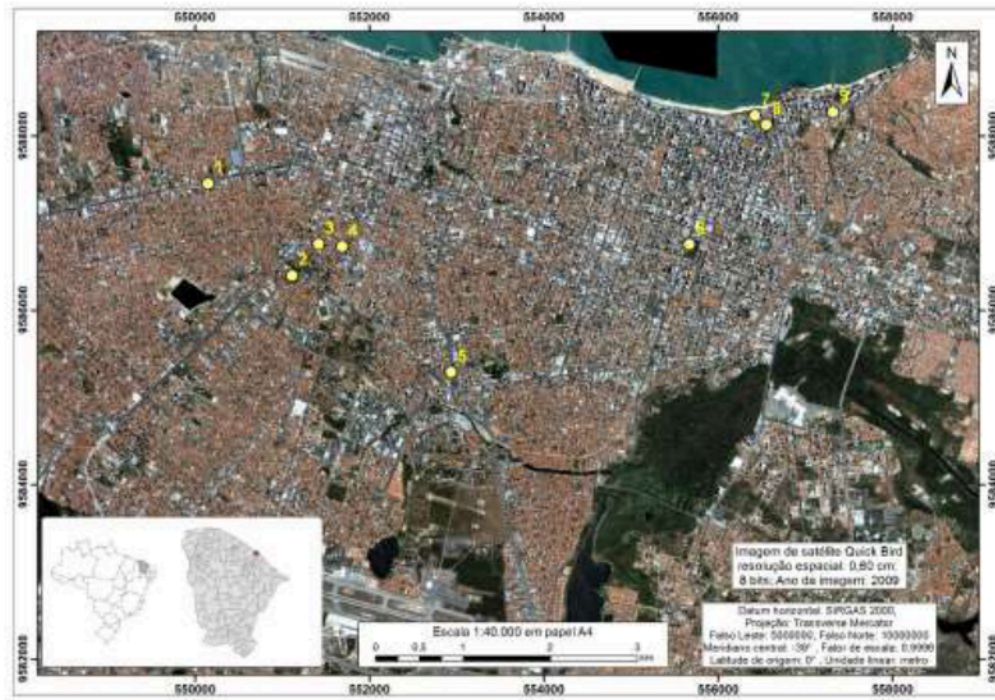


Figura 4. Localização dos pontos de monitoramento. Elaboração: Silva, Í. B.

*Identificação da caracterização urbana*

O processo de vetorização se deu no programa ArcMap 10.1 onde foram representadas as áreas mais verticalizadas da cidade, assim como a resultante do vento (Figura 5). Tal resultante foi inserida segundo a rosa dos ventos de Leite (2010) (Figura 6). Para isso, a

imagem QuickBird utilizada no estudo serviu como referência e base para a vetorização das geometrias (arquivos vetoriais) que integram o banco de dados geográficos. Para a validação dos dados foram realizados levantamentos de campo a fim de registrar, por meio de fotos, as diferenças na topografia urbana da cidade.

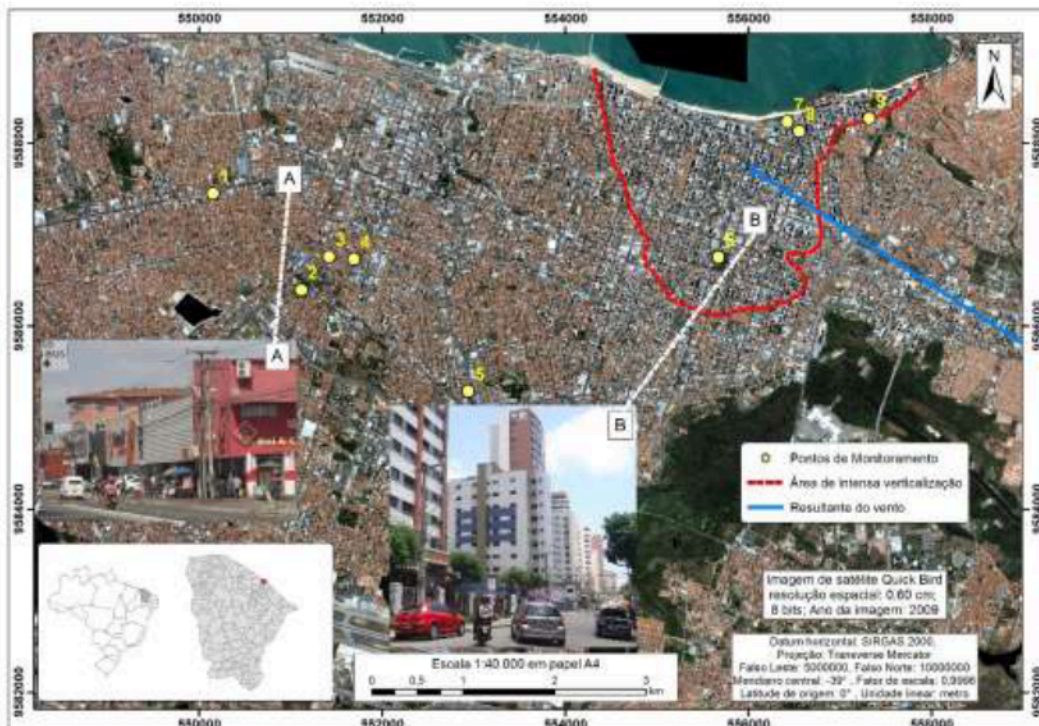


Figura 1. Representação da principal área verticalizada da cidade e da resultante do vento. (a) Av. Bezerra de Menezes; (b) Rua Leonardo Mota. Elaboração: Silva, Í. B.

Para melhor representar as variações do terreno, também foi realizado, a altimetria da região em estudo (Figura 7). Para isso, utilizou-

se como base o arquivo de curvas de nível de Fortaleza com intervalo de 5 metros (Souza et al., 2009).

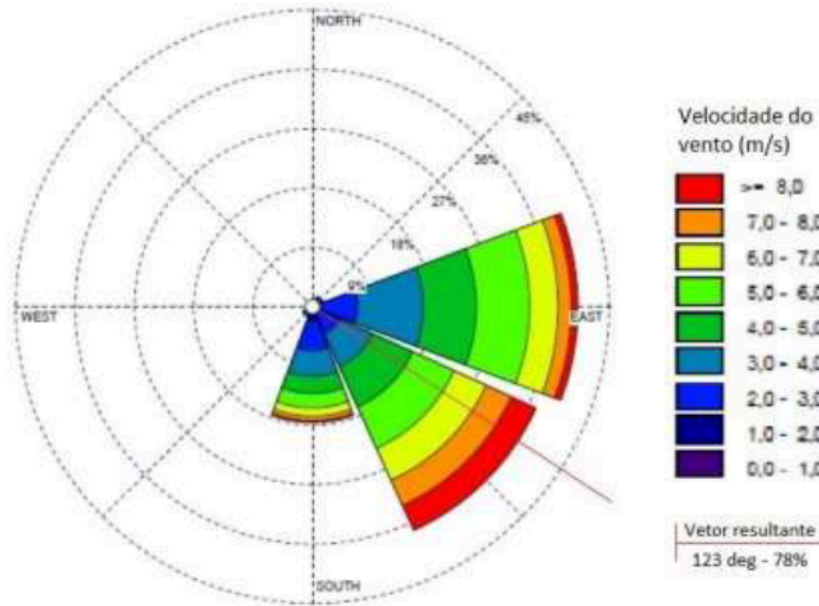


Figura 2. Rosa dos ventos para a cidade de Fortaleza. Fonte: Leite (2010).

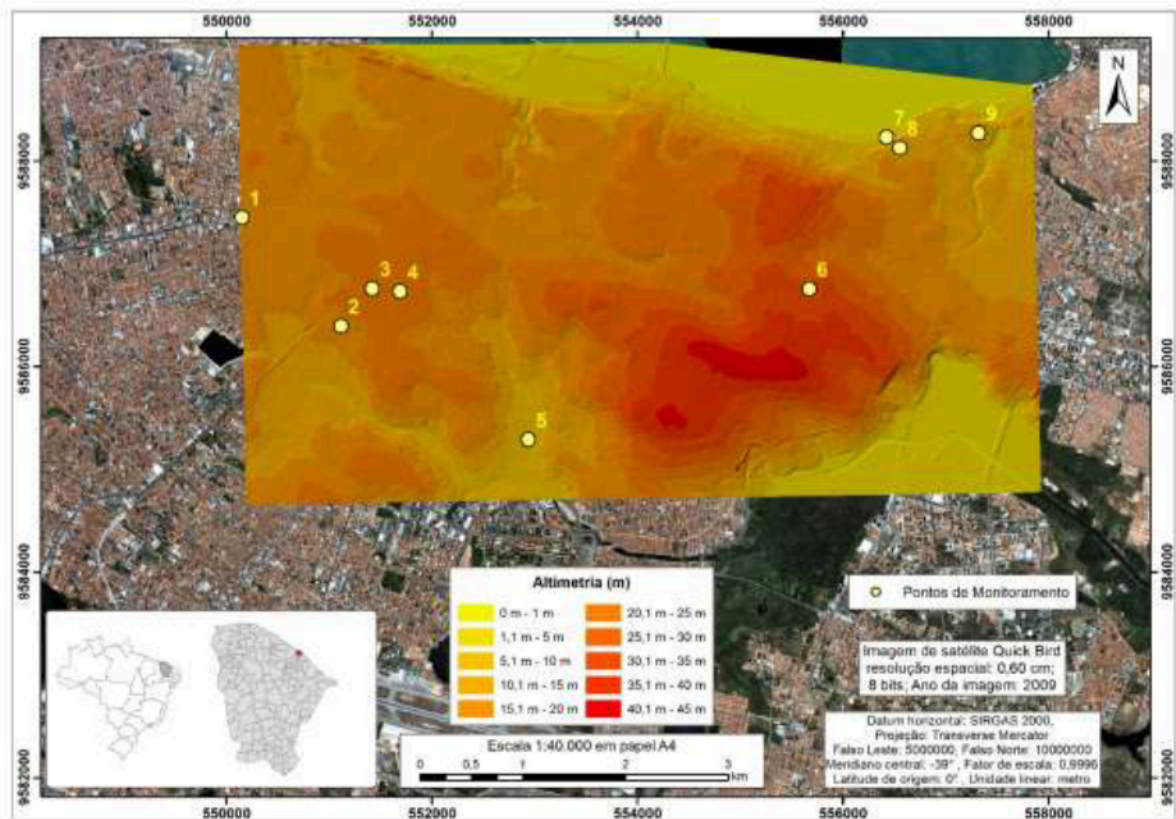


Figura 7. Topografia urbana da região estudada. Elaboração: Silva, Í. B.

*Geoestatística*

Os dados geoestatísticos foram obtidos a partir da interpolação dos níveis de concentração do MPR. A geoestatística foi realizada no programa ArcMap 10.1 e o método utilizado foi a krigagem ordinária. O modelo escolhido para o semivariograma foi o exponencial. O mesmo apresentou os seguintes parâmetros: efeito pepita de 65, patamar de 665,38 e um número de lags igual a 12. O lag representa uma distância pré-estabelecida que será utilizada no cálculo do semivariograma. Neste caso, o valor estabelecido do lag foi de aproximadamente 759,40 metros. O semivariograma foi medido na direção 0° com ângulo de tolerância de 45° e largura de banda de 3°. Tais valores são definidos com o objetivo de incluir no cálculo do semivariograma o maior número possível de pares de observações.

As Figuras 8 e 9 representam o valor da semivariância estimada, de cada amostra, em diferentes distâncias e os parâmetros escolhidos para o semivariograma. Para Camargo (1998), o

valor de cada ponto está diretamente relacionado com os valores situados a certa distância H, sendo que quanto maior a distância entre os pontos menor será a relação entre eles. Isto pode ser melhor observado ao analisar a nuvem do semivariograma (Figura 8), onde cada ponto vermelho representa um par de observações. Próximo a origem a semivariância apresenta valores mais baixos, pois há uma forte correlação espacial entre as amostras, principalmente entre as que estão mais próximas umas das outras. Porém, a medida que a distância aumenta os valores também vão aumentando até não haver mais correlação espacial entre as amostras. A distância dentro da qual ainda ocorre tal correlação entre as amostras é chamado de alcance e o mesmo foi atingido em 5.998 m, onde há um achatamento da nuvem do semivariograma e a sua curva torna-se constante.

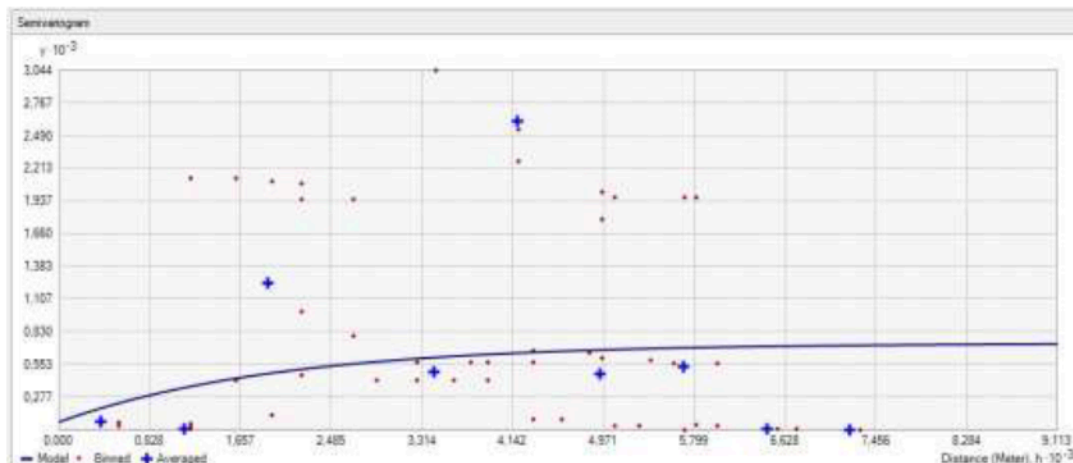


Figura 8. Gráfico ajustado do semivariograma. Elaboração: Silva, Í. B.



Figura 9. Parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma. Elaboração: Silva, Í. B.

### Resultados e discussão

As concentrações diárias do MPR, nos nove locais amostrados, são apresentadas na Tabela 1.

Já o resultado da krigagem pode ser visualizado na Figura 10. Percebe-se nessa imagem a nítida influência dos ventos na concentração dos poluentes, onde três das cinco menores concentrações encontram-se próximo ao litoral (pontos 7, 8 e 9), região de ventos de maior intensidade. Ao afastar-se da orla, a influência da topografia urbana (delimitado pela linha tracejada) modifica a velocidade, direção e intensidade dos ventos, criando áreas menos

ventiladas, o que dificulta a dispersão dos poluentes. Tal fenômeno é favorecido pela presença de cânions urbanos nessa região, onde, de acordo com Aguiar (2016), predominam cânions regulares e cânions profundos. Ou seja, são locais com uma razão elevada entre os valores da altura dos edifícios e a largura da rua. Esta influência da topografia urbana é verificada pelo gradiente de cor entre as plumas de concentração dos pontos do litoral em relação ao ponto 6, que apresenta um acréscimo na concentração do poluente a medida que aproxima-se do interior da cidade. O mesmo ponto (6) também apresentou a maior concentração de MPR durante todo o período amostrado.

O restante das amostras apresenta-se distante da área verticalizada da cidade,

apresentando um padrão de edificações de pequeno porte, com um a dois pavimentos, porém também estão localizadas em avenidas bastante movimentadas. Os pontos de 1 a 4, por sua vez, apresentaram valores próximos aos da orla, mesmo estando em áreas de grande fluxo veicular. A explicação para este fato está no período chuvoso, onde a precipitação age como um “limpador” natural da atmosfera, favorecendo a sedimentação do material particulado suspenso (Bruno, 2007). O mesmo autor ainda comprovou a influência da sazonalidade climática na concentração de MPR, comparando as concentrações obtidas em período chuvoso e em período seco na cidade de São Carlos/SP.

Tabela 1. Concentração de MPR amostrados.

Ponto	MPR ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )
1	19,68
2	23,37
3	16,45
4	4,39
5	53,50
6	82,41
7	18,49
8	15,45
9	20,00

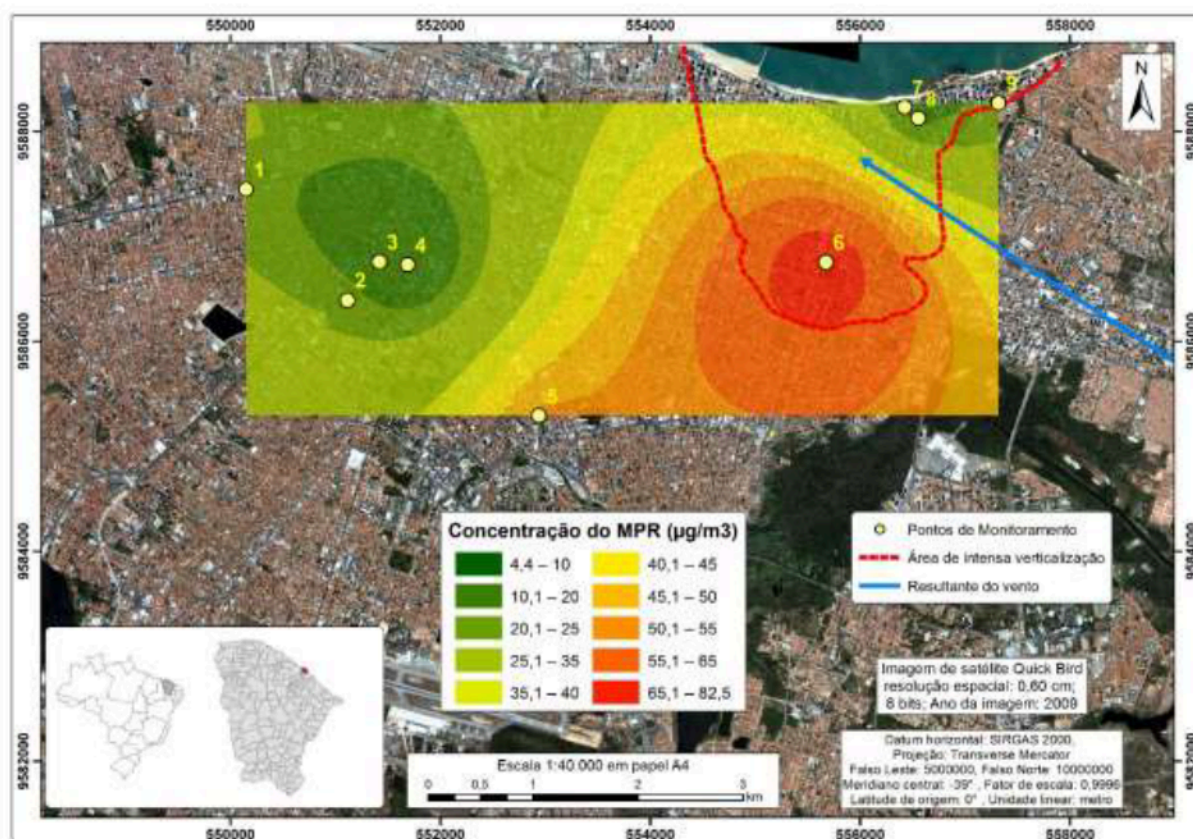


Figura 10. Mapa de concentração do MPR elaborado a partir das técnicas de krigagem. Elaboração: Silva, Í. B.

### Conclusão

A ferramenta SIG mostrou-se como uma ótima ferramenta de suporte à decisão para gestores, aliando dados de poluição, topografia urbana e vento em um banco de dados geográficos. Já os métodos geoestatísticos utilizados no presente trabalho foram de grande importância para a geração do mapa de concentração de MPR, servindo também como uma valiosa ferramenta de gestão urbana. Nesse caso, a krigagem ordinária baseado no modelo de semivariograma exponencial foi o que melhor representou a realidade levando em consideração as condições de topografia e vento da região de estudo.

Em relação aos parâmetros climáticos analisados, a precipitação mostrou-se como um fenômeno responsável por limpar a atmosfera e diminuir a concentração dos poluentes. Já em relação ao vento, percebe-se que o mesmo tem a capacidade de dispersar os poluentes, diminuindo assim, a sua concentração em determinadas localidades da cidade. Porém, nas áreas de intensa verticalização, a formação de corredores de vento desfavorece a dispersão dos

poluentes em áreas menos ventiladas, podendo ocasionar grandes concentrações de MPR nesses locais.

Os mapas produzidos alertam para a qualidade do ar em alguns locais de Fortaleza, como no ponto 6, o que pode prejudicar a saúde das pessoas que habitam ou frequentam este local. Tal situação pode ser amenizada a partir de um planejamento do uso do solo, como a implantação de áreas verdes na cidade.

### Agradecimentos

Os autores agradecem pelos recursos e bolsas do projeto "Como aferir a qualidade do ambiente para garantia de espaços adequados na prática esportiva e de lazer: um projeto de políticas públicas para valorização do meio ambiente em Fortaleza-Ce" (processo: 487853/2013-0) custeado pelo CNPq.

### Referências

Andriotti, J.L.S., 2003. Fundamentos de Estatística e Geoestatística. 1. ed. UNISINOS, São Leopoldo.

- Ayoade, J.O., 2010. Introdução à Climatologia para os Trópicos, 13 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Bagnara, D.; Prietto, P.D.M.; Timbola, R.S., 2012. Aplicação da krigagem ordinária na modelagem do pH e da dureza da água subterrânea na área central de Passo Fundo – RS. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil* 12, 15-22.
- Branco, K.G.C.; Zanella, M.E.; Sales, M.C.L., 2012. O clima em áreas verdes intra-urbanas de Fortaleza. *Revista Geonorte* 2, 443-454.
- BRASIL, 1990. Lei nº 003, de 28 de junho.
- BRASIL, 1990. Lei nº 348, de 14 de março.
- Bruno, R.L., 2005. Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos-SP: quantificação e identificação de fontes. Tese (Doutorado). São Carlos, UFSCar.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V., 2001. Introdução à Ciência da Geoinformação. 1. ed. INPE, São José dos Campos.
- Camargo, E.C.G., 1998. Geoestatística: fundamentos e aplicações, in: Câmara, G.; Medeiros, J.S. (Org.), *Geoprocessamento para projetos ambientais*. 1 ed. INPE, São José dos Campos, pp. 119-154.
- Damilano, D.C.R., 2006. Estudo da influência da poluição atmosférica e das condições meteorológicas na saúde em São José dos Campos. Relatório final de projeto de iniciação científica. São José dos Campos, INPE.
- Faraco, M.A., Uribe-Opazo, M.A., Silva, E.A.A., Johann, J.A., Borsoi, J.A., 2008. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 463-476.
- Ferreira, A.G., Mello, N.G.S., 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia* 1, 15-28.
- Fortaleza, 1992. Lei nº 7.061, de 16 de janeiro.
- Gonçalves Júnior, S.J., 2014. Avaliação da participação de material particulado e seus impactos à saúde humana em escolas próximas a vias de tráfego veicular e refinaria de petróleo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Curitiba, UFPR.
- Gumpertz, M., 2001. *Applied Spatial Statistics*. Disponível: <http://www.stat.ncsu.edu/people/gumpertz/courses/st733/oldindex.html>. Acesso: 24 jul. 2015.
- Hoeksema, R.J., Kitanidis, P.K., 1984. An application of geostatistical approach to the inverse problem in two-dimensional groundwater modeling. *Water Resources Research* 20, 1003-1020.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2014. Perfil básico municipal. Disponível: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil\\_basico/pbm-2014/Fortaleza.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2014/Fortaleza.pdf). Acesso: 2 out. 2015.
- Kaur, S., Nieuwenhuijsen, M.J., Colville, R.N., 2007. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. *Atmospheric Environment* 41, 4781-4810.
- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa* 52, 119-139.
- Leite, R.C.V., 2010. Fortaleza: terra do vento: a influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. São Paulo, USP.
- Liu, W.T.S., 2015. Classificação de imagem digital. In: Liu, W.T.S. (Org.), *Aplicações de Sensoriamento Remoto*. 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo, pp. 724-757.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W., 2013. *Sistemas e Ciência da Informação Geográfica*. 3. ed. Bookman, Porto Alegre.
- Lourenço, R.W., Landim, P.M.B., 2005. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. *Cadernos de Saúde Pública* 21, 150-160.
- Moura, M.O., 2008. O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico. Dissertação de Mestrado em Geografia. Fortaleza, UFC.
- Ortiz, G.C., 2002. Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Piracicaba, USP.
- Pinto, J.P., Martins, L.D., Sabino, F.C., Amado, I.R., Solci, M.C., 2014. Caracterização de MP2,5 e MP10 em ar ambiente de estacionamento fechado de estabelecimento

- comercial em Londrina-Paraná. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry* 6, 1-7.
- Radicchi, A.L.A., 2012. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população. *Revista Brasileira de Estudos de População* 29, 195-198.
- Reis, C.P., 2013. Simulação de fatores que afetam as predições obtidas por krigagem ordinária. Dissertação de Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria. Viçosa, UFV.
- Rios, J.L., Boechat, J.L., 2011. Poluição intra e extradomiciliar. *Revista Brasileira de Alergia e Immunopatologia* 34, 42-48.
- Rossi, R.E., Dungan, J.L., Beck, R.L., 1994. Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 49, 32-40.
- Schmidt, E., Nucci, J.C., 2010. Avaliação da qualidade ambiental urbana do bairro de Santa Felicidade, Curitiba/PR. *Revista Geografia: Ensino & Pesquisa* 14, 51-61.
- Silva, L.T., Mendes, J.F.G., 2006. Determinação do índice de qualidade do ar numa cidade de média dimensão. In: *Anais do Congresso Luso Brasileiro Para o Planejamento Urbano Regional Integrado e Sustentável*. Braga. p. 5-16.
- Souza, M.J.N., Meneleu Neto, J., Santos, J.O., Gondim, M.S., Brito, É.G., 2009. Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza: Subsídios ao Macrozoneamento Ambiental e à Revisão do Plano Diretor Participativo-PDPFor. 1. ed. Prefeitura Municipal de Fortaleza, Fortaleza.
- Teixeira, M.B.R., 2013. Comparação entre estimadores de semivariância. Dissertação de Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária. Lavras, UFLA.