



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR**  
**CURSO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**ÍCARO BRENO DA SILVA**

**SIG APLICADO À ESTIMATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAL  
PARTICULADO NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ.**

**FORTALEZA**

**2016**

**ÍCARO BRENO DA SILVA**

**SIG APLICADO À ESTIMATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAL  
PARTICULADO NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ.**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius Chagas da Silva.

Co-orientador: Prof. Dr. Rivelino Martins Cavalcante.

**FORTALEZA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Rui Simões de Menezes

---

S58s Silva, Ícaro Breno da.

SIG aplicado à estimativa de material particulado na cidade de Fortaleza, Ceará / Ícaro Breno da Silva – 2016.

70 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso Bacharelado em Ciências Ambientais, 2016.

Orientação: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Marcus Vinícius Chagas da Silva.

Co-Orientação: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Rivelino Martins Cavalcante.

1. Poluição do ar – Fortaleza (CE). 2. Geoestatística - Krigagem. I. Título.

---

CDD 577.276

**ÍCARO BRENO DA SILVA**

**SIG APLICADO À ESTIMATIVA DE DISTRIBUIÇÃO DE MATERIAL  
PARTICULADO NA CIDADE DE FORTALEZA, CEARÁ.**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências Ambientais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Ambientais.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcus Vinícius Chagas da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Cleyber Nascimento de Medeiros  
Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE)

---

Prof. Dr. Francisco Wagner Sousa  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Valéria e Airton.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conduzir e me capacitar para a realização de mais um sonho.

Aos meus pais, Valéria e Airton, por todo amor e apoio concedidos em todas as etapas de minha vida. Vocês são meus alicerces, meu tudo.

A minha família, por toda a confiança depositada em mim. Não poderia deixar de citar meu irmão, Ítalo Bruno e, minha tia, Sâmia, pelos momentos inesquecíveis que já passei com vocês.

A Gabriela Oliveira Ribeiro, por todo o seu amor e dedicação para com o nosso relacionamento ao longo desses anos. Você completou as nossas vidas com o presente mais valioso de todos: Theo. Amo vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcus Vinícius Chagas da Silva, pela orientação e aprendizado ao longo desses anos. Sou eternamente grato por acreditar no meu potencial desde os seus primeiros dias de Labomar.

A todo o corpo docente do Labomar, que, de alguma forma, auxiliaram na minha formação acadêmica. Agradeço, em especial, as professoras Kamila Vieira, Sandra Santaella e Danielle Garcez, pelas valiosas conversas e pelos momentos de descontração.

A minha turma de Ciências Ambientais (2012.1), por todas as brincadeiras e viagens inesquecíveis. Vocês me fizeram sentir, mesmo com toda a turbulência da vida acadêmica, os prazeres da vida universitária.

A Paulo Ipiranga (Gás), por todos os momentos de espontaneidade que nos proporcionaram inúmeras alegrias.

Aos meus amigos do Laboratório de Observação da Terra (LOT), em especial, Carlos Cattony, Lara Furtado, Sara Gomes e Taynah Garcia. Trabalhar com vocês é algo inestimável.

Aos meus amigos e irmãos, Daniel Rodrigues, Rennyer Holanda e Willame Cavalcante, que me auxiliam nas diferentes áreas do saber. Obrigado por todos os momentos de alegria descontração e pelas viagens ao interior do estado. Amigos que levarei por toda a vida!

Ao Laboratório de Contaminantes Orgânicos (LACOr), por toda a assistência ao longo dos anos de projeto. Agradeço especialmente a, grande amiga, Tanara Lima e ao Prof. Dr. Rivelino Martins Cavalcante.

Ao CNPq, que, com o auxílio financeiro, possibilitou a realização desta pesquisa.

“Não me entrego sem lutar, tenho, ainda, coração. Não aprendi a me render, que caia o inimigo, então.” – Renato Russo

## 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 edificações e as condições meteorológicas. Desta forma, o trabalho objetivou avaliar a distribuição dos níveis de material particulado respirável (MPR) durante os períodos chuvoso e seco, para a elaboração de uma carta de qualidade do ar no setor norte da cidade de Fortaleza. A área de estudo abrange nove localidades distribuídas geograficamente por toda a cidade, a saber: Escola Estadual Presidente Roosevelt, Centro de Humanidades da Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro Acadêmico de Finanças (UFC), Faculdade de Economia (UFC), Habitafor, Praça das Flores, calçadão da Beira Mar, Instituto de Ciências do Mar (UFC) e Paróquia de Nossa Senhora da Saúde. Os dados do MPR foram obtidos por amostragem ativa (bomba de fluxo para a sucção do ar) em um período de 12 horas. O mapa de concentração do MPR foi obtido a partir de uma proposta geoestatística de interpolação denominada Krigagem Ordinária (KO), trabalhada em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os mapas produzidos alertam para os níveis de MPR na Praça das Flores, Habitafor e no Centro de Humanidades, cujas concentrações ultrapassaram os padrões internacionais. Em relação aos parâmetros meteorológicos, o vento e a chuva mostraram-se como fatores que influenciam, respectivamente, na dispersão e no tempo de permanência do MPR na atmosfera, sendo as maiores concentrações registradas durante o período seco. Logo, a ferramenta SIG mostrou-se como uma técnica satisfatória de suporte à decisão para gestores, aliando dados de poluição, topografia urbana e condições meteorológicas em um banco de dados geográficos. Nesse contexto, a KO 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. Desta forma, o uso dessas ferramentas em planos de direcionamento do crescimento urbano é fundamental para uma melhor gestão urbana.

**Palavras-chave:** Krigagem. Material particulado respirável. Qualidade ambiental urbana.

## ABSTRACT

In urban centers, the main anthropogenic pollution sources are derived from vehicular traffic and when exists, from industrial activity. This problem 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, can be quoted buildings and weather conditions. Therefore, the study aimed to evaluate the distribution of the levels of respirable particulate matter (RPM) during the rainy and dry seasons, to elaborate a map of air quality of the northern sector in the city of Fortaleza. The study area covers nine locations geographically distributed throughout the city, which are: Escola Estadual Presidente Roosevelt, Centro de Humanidades da Universidade Federal do Ceará (UFC), Centro Acadêmico de Finanças (UFC), Faculdade de Economia (UFC), Habitafor, Praça das Flores, calçada da Beira Mar, Instituto de Ciências do Mar (UFC) and Paróquia de Nossa Senhora da Saúde. The RPM data was obtained by active sampling (flow pump for air suction) in a 12 hour period. The map of RPM concentration was obtained from a geostatistical interpolation proposal called Ordinary Kriging (OK) worked on in a Geographic Information System (GIS). The produced maps alerts to the RPM levels in the Praça das Flores, Habitafor and Centro de Humanidades, whose concentrations exceeded international standards. In relation to meteorological parameters, the wind and the rain appeared as factors that influence, respectively, in the dispersion and RPM residence time in the atmosphere, being the highest recorded concentrations during the dry season. As a result, the GIS tool has proved to be a satisfactory technical decision support for managers, combining pollution data, urban topography and weather conditions in a geographic database. In this context, the OK based on the exponential semivariogram model was the best one that represented the reality taking into account the conditions of wind and topography of the study area. Thus, the use of these tools in directing urban growth plans is essential to a better urban management.

**Keywords:** Kriging. Respirable particulate matter. Urban environmental quality.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Situação geográfica da área de estudo. ....	20
Figura 2 – Localização dos pontos de monitoramento. ....	25
Figura 3 – Representações vetoriais. ....	27
Figura 4 – Estrutura matricial. ....	27
Figura 5 – Representações matriciais com resolução distinta. ....	28
Figura 6 – Modelagem de dados segundo o paradigma dos quatro universos. ....	29
Figura 7 – Amostragem em duas dimensões de uma variável regionalizada, mostrando dois pontos separados pelo vetor H. ....	31
Figura 8 – Exemplo de amostras regularmente espaçadas. ....	32
Figura 9 – Exemplo de amostras irregularmente espaçadas. ....	33
Figura 10 – Ajuste do semivariograma, contendo os parâmetros Alcance (a), Patamar (C), Efeito Pepita (C <sub>0</sub> ) e Contribuição (C <sub>1</sub> ). ....	34
Figura 11 – Modelos teóricos que atingem o patamar. ....	35
Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos técnicos e operacionais. ....	38
Figura 13 – Mosaico de imagens do satélite QuickBird, projetadas e georreferenciadas, correspondente a cidade de Fortaleza. ....	39
Figura 14 – Representação da principal área verticalizada da cidade e da resultante do vento. (a) Av. Bezerra de Menezes; (b) Rua Leonardo Mota. ....	41
Figura 15 – Rosa dos ventos para a cidade de Fortaleza. ....	43
Figura 16 – Topografia urbana da região estudada. ....	44
Figura 17 – Semivariograma ajustado correspondente aos dados do período chuvoso. ....	48
Figura 18 – Semivariograma ajustado correspondente aos dados do período seco. ....	48
Figura 19 – Parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma correspondente ao período chuvoso. ....	49
Figura 20 – Parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma correspondente ao período seco. ....	50
Figura 21 – Mapa de concentração do MPR em período chuvoso elaborado a partir das técnicas de krigagem. ....	52
Figura 22 – Mapa de concentração do MPR em período seco elaborado a partir das técnicas de krigagem. ....	54
Figura 23 – Comparação da validação cruzada entre os períodos seco e chuvoso. ....	57
Figura 24 – Mapa de desvio padrão da predição geoestatística em período chuvoso. ....	58
Figura 25 – Mapa de desvio padrão da predição geoestatística em período seco. ....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões internacionais de qualidade do ar para MP <sub>2,5</sub> .....	23
Tabela 2 – Parâmetros das imagens do satélite QuickBird. ....	40
Tabela 3 – Padrão das edificações na Av. Bezerra de Menezes e sua influência na concentração do MPR.....	42
Tabela 4 – Padrão das edificações na Rua Leonardo Mota e sua influência na concentração do MPR.....	42
Tabela 5 – Concentração de MPR amostrados em período chuvoso. ....	45
Tabela 6 – Concentração de MPR amostrados em período seco.....	46

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Crescimento populacional da cidade de Fortaleza nas últimas décadas. ....	20
Gráfico 2 – Comparação da concentração de MPR em período chuvoso e seco. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLA	Camada Limite Atmosférica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FEAAC	Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
KO	<i>Krigagem</i> Ordinária
MP	Material Particulado
MPR	Material Particulado Respirável
OMS	Organização Mundial da Saúde
PDDU	Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano
SGBD	Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UFC	Universidade Federal do Ceará
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UTM	Universal Transversa de Mercator
Var	Variância
VCAS	Vórtice Ciclônico de Ar Superior
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{g}$	Micrograma
a	Alcance
C	Patamar
$C_0$	Efeito Pepita
$C_1$	Contribuição
cm	Centímetro
km	Quilômetro
m	Metro
$\text{m}^3$	Metro cúbico
mm	Milímetro
nm	Nanômetro
s	Segundo
$\lambda$	Lambda
$\Sigma$	Somatório

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	18
<b>2.1. Objetivo Geral</b> .....	18
<b>2.2. Objetivos Específicos</b> .....	18
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	19
<b>3.1. A cidade de Fortaleza e os principais sistemas atmosféricos atuantes</b> .....	19
<b>3.1.1. Camada Limite Atmosférica e sua Dinâmica na Cidade de Fortaleza</b> .....	21
<b>3.2. Qualidade do Ar</b> .....	22
<b>3.2.1. Padrões de Qualidade do Ar</b> .....	23
<b>3.2.2. Como a Qualidade do Ar Espelha a Qualidade Ambiental</b> .....	24
<b>3.3. Sistema de Informações Geográficas e Conceitos Utilizados</b> .....	26
<b>3.3.1. Geoestatística</b> .....	30
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	38
<b>4.1. Dados raster</b> .....	39
<b>4.2. Vetorização</b> .....	40
<b>4.3. Levantamento dos níveis de MPR na cidade de Fortaleza</b> .....	45
<b>4.4. Geoestatística</b> .....	46
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
<b>5.1. Concentração do Material Particulado Respirável em período chuvoso</b> .....	51
<b>5.2. Concentração do Material Particulado Respirável em período seco</b> .....	53
<b>5.3. Modelos Geoestatísticos e Validação Cruzada</b> .....	56
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	60
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	62
<b>ANEXO A – CARTA DE ACEITE PARA PUBLICAÇÃO DE ARTIGO</b> .....	71

## 1. INTRODUÇÃO

A história das cidades começa com a fixação do homem, sendo as primeiras cidades fruto da revolução agrícola. Posteriormente o aumento demográfico das cidades confirma a predominância dos espaços urbanos como a morada do homem moderno (MONTEIRO e MENDONÇA, 2003).

Porém, o estabelecimento de sítios urbanos causa impactos sobre a natureza. As mudanças nos componentes naturais ocorrem em detrimento da qualidade ambiental, acarretando em consequências negativas para o meio natural e à qualidade de vida do homem (SCHIMDT e NUCCI, 2010). Em relação a cidade de Fortaleza, a intensificação no adensamento urbano é observada a partir da consolidação da cidade como capital do estado e também é favorecido pela criação de sua região metropolitana na década de 70. O crescimento da cidade também veio com uma série de problemas ambientais cotidianos, como as mudanças no clima urbano local e a poluição atmosférica (BRANCO, ZANELLA e SALES, 2012). Nesse contexto, vale ressaltar que Fortaleza é a quinta capital mais populosa do país, apresentando a sétima maior frota veicular (IBGE, 2015; DENATRAN, 2015).

A poluição atmosférica caracteriza-se como a presença de substâncias estranhas no ar, resultantes de processos naturais ou antrópicos, em concentrações suficientes para interferir direta ou indiretamente na saúde, segurança e bem estar dos seres vivos (CANÇADO *et al.*, 2006). Entre os principais poluentes atmosféricos, destaca-se o material particulado (MP), devido aos impactos que causam sobre a atmosfera e a saúde humana. Tal poluente é alvo de inúmeras pesquisas científicas e de regulamentações legais para controlar os níveis de sua emissão (MAGALHÃES, 2005). No entanto, a concentração do MP apresenta relação direta com fatores locais, como a topografia urbana e a sazonalidade climática (DAMILANO, 2006).

Uma ferramenta aliada para detectar as variações na concentração do MP na cidade de Fortaleza ao longo do ano é o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Esse sistema é utilizado com o auxílio do computador para a aquisição, armazenamento, visualização e análise de dados geográficos, estabelecendo-se como uma ferramenta indispensável na área do planejamento urbano (EASTMAN, 1998; PRENZEL, 2004). Entre os modelos que podem ser rodados no SIG, temos a geoestatística. Este método é capaz de estimar valores em locais não amostrados, de variáveis espacialmente distribuídas, a partir de locais já amostrados, a partir de

uma técnica denominada *krigagem* (ORTIZ, 2002). Nesse contexto, tal técnica é considerada por autores como bastante adequada para a geração de mapas (FARACO *et al.*, 2008).

Deste modo, a presente pesquisa apresenta importância para o planejamento e o desenvolvimento urbano da cidade de Fortaleza. Pois, com ela, será gerado um modelo que representará a qualidade do ar na parte norte da cidade, servindo como subsídio, aos gestores municipais, para a tomada de decisões.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Elaborar uma carta de qualidade do ar no setor norte da cidade de Fortaleza a partir da interpolação dos níveis de Material Particulado Respirável (MPR) subsidiado em geoestatística.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Monitorar os dados da qualidade do ar;
- Organizar um banco de dados em *software* SIG com as informações coletadas;
- Identificar o modelo geoestatístico que se adequa as condições da área de pesquisa;
- Caracterizar os parâmetros meteorológicos da cidade de Fortaleza;
- Correlacionar os parâmetros meteorológicos com os dados de qualidade do ar em período chuvoso e seco.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. A cidade de Fortaleza e os principais sistemas atmosféricos atuantes

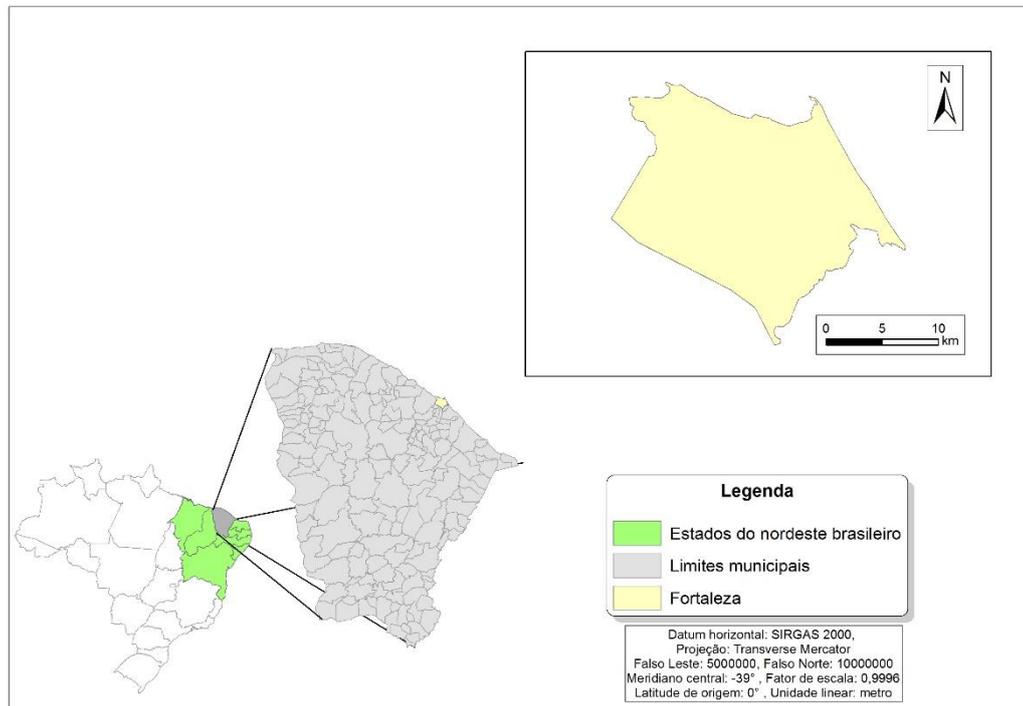
A cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará, está inserida no nordeste brasileiro (Figura 1). Sua pluviosidade anual é de 1.338,0 mm e a temperatura média varia de 26°C a 28°C. Tal cidade apresentou um crescimento populacional de 38,64% no período de 1991-2010 (Gráfico 1) (IPECE, 2014). Esse crescimento influi nas características climáticas locais e, conseqüentemente, trouxeram problemas ambientais como a poluição atmosférica (BRANCO, ZANELLA e SALES, 2012).

Em Fortaleza, a direção predominante dos ventos é leste e sudeste (LEITE, 2010). Segundo Bruno (2005), a variável vento sofre uma variação sazonal, de modo a apresentar maiores velocidades durante o período seco. 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 (FORTALEZA, 1992).

Entre os principais sistemas atmosféricos que atuam na cidade, segundo Ferreira e Mello (2005); Moura (2008); Ayoade (2010), verificamos:

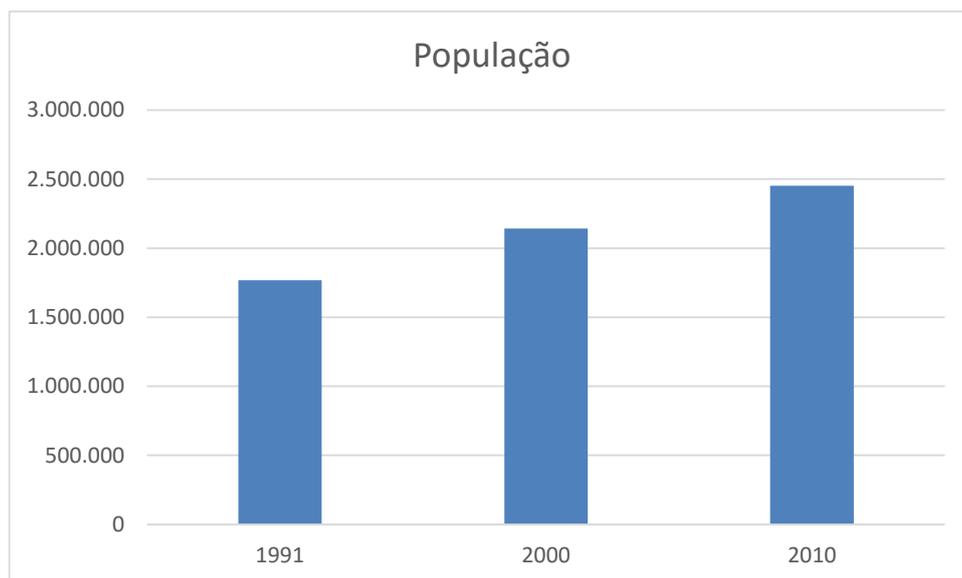
- Vórtice Ciclônico de Ar Superior (VCAS): com origem no oceano Atlântico entre novembro e março. O fenômeno é caracterizado pelo turbilhamento do ar em altos níveis na atmosfera, havendo formação de nuvens causadoras de chuva na sua periferia;
- Ondas de leste: que possuem sua origem associada a área 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.

Figura 1 – Situação geográfica da área de estudo.



Fonte: Autor.

Gráfico 1 – Crescimento populacional da cidade de Fortaleza no período de 1991-2010.



Fonte: IPECE (2014).

### 3.1.1. Camada Limite Atmosférica e sua Dinâmica na Cidade de Fortaleza

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é representada pela porção mais baixa da atmosfera e é influenciada diretamente pela mesma. A determinação de sua altura é, de fato, característica fundamental para estudos relacionados ao clima, previsão do tempo e qualidade do ar em ambiente urbano (SEIDEL *et al.*, 2010).

Um parâmetro de importância nesta camada é a sua altura. Tal característica exerce influência em diversos processos que ocorrem na troposfera, como a atividade convectiva do ar, a formação de nuvens, distribuição de aerossóis e a determinação do volume avaliável para dispersão de poluentes (MOREIRA, 2013). Estas informações são mais relevantes em áreas urbanas. Em virtude disso, o mesmo autor analisou campanhas de monitoramento realizadas nas cidades de Vitória (ES), São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ).

A altura desta camada não é constante ao longo do tempo e do espaço, dependendo do grau de alteração gerada pela superfície. Durante o dia, devido a superfície terrestre ser aquecida mais rapidamente pelo Sol, ocorre uma transferência ascendente de calor para a atmosfera, que encontra-se mais fria. Essa diferença de temperatura gera uma vigorosa movimentação térmica (convecção), possibilitando a extensão do topo da CLA. As variações na altura da CLA geralmente possuem um ciclo sazonal, onde as máximas ocorrem durante os meses de verão, devido as mudanças de temperatura da superfície, umidade, entre outros. Essas variações também estão relacionadas aos ciclos diários – devido as mudanças no fluxo de calor – e a questões de latitude da região a ser estudada (OKE, 1987; GRANADOS-MUÑOZ *et al.*, 2012).

No caso da cidade de Fortaleza, Sousa *et al.* (2013) comprovaram que os valores da CLA oscilaram entre 66 m no período noturno e 1.520 m no período diurno, com médias entre  $245 \pm 28$  m (durante a noite) e  $925 \pm 63$  (durante o dia). Esta pesquisa utilizou o método do perfil vertical da temperatura potencial, sendo realizadas 72 radiossondagens, do Projeto Chuva, durante o mês de abril de 2011.

### 3.2. Qualidade do Ar

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 flora e a fauna (RADICCHI, 2012). A origem dos poluentes se dá através de processos naturais ou de atividades antrópicas. Dentre as fontes naturais de poluição, podemos citar a queima acidental de biomassa e as erupções vulcânicas, caracterizando as mais antigas fontes de poluição do ar. Já a queima da biomassa, utilizada desde a pré-história, e a queima de combustíveis fósseis a partir da Revolução Industrial, tem sido uma das importantes fontes antropogênicas de poluição atmosférica (CANÇADO *et al.*, 2006).

Nos centros urbanos, as principais fontes poluidoras antropogênicas são oriundas do tráfego de veículos e, quando existente, da atividade industrial. Tal problemática se agrava devido, principalmente, ao crescimento desordenado dos centros urbanos e pelo consequente aumento dos níveis de tráfego rodoviário, fazendo da poluição atmosférica urbana um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida das populações (SILVA e MENDES, 2006).

Entre os principais fatores que influenciam no processo de transporte e difusão dos poluentes em centros urbanos, podemos citar: as edificações, topografia urbana e as condições meteorológicas. Tais variáveis estão diretamente relacionadas com uma maior ou menor concentração destes poluentes em determinados locais das cidades (DAMILANO, 2006).

Em relação as edificações, elas alteram a direção, intensidade e velocidade do vento, podendo causar acúmulo de poluentes (áreas com menor aeração); a topografia também está relacionada com os ventos, onde em áreas mais elevadas ocorrem melhores condições de ventilação, enquanto que regiões de vales tendem a acumular mais poluentes; já nos fatores meteorológicos, a ocorrência de chuvas pode interferir no tempo de permanência dos poluentes na atmosfera (DAMILANO, 2006).

Assim, tendo em vista as ideias abordadas, Rios e Boechat (2011) destacam o material particulado (MP) como um dos principais poluentes atmosféricos. O mesmo pode ser dividido, 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. A dispersão das partículas dá-se pelo vento podendo alcançar

longas distâncias até sedimentar no solo ou na água, causando sua acidificação. A exposição ao MP está associada à redução da função pulmonar, bem como o aumento dos sintomas de dificuldade respiratória (SILVA e MENDES, 2006; KAUR; NIEUWENHUIJSEN; COLVILE, 2007; RIOS e BOECHAT, 2011; GONÇALVES Jr., 2014).

### 3.2.1. Padrões de Qualidade do Ar

Os padrões de qualidade do ar definem legalmente o limite máximo de concentração de um poluente atmosférico, garantindo a proteção da saúde e do bem-estar dos seres humanos. São tratados como padrões os poluentes que apresentam grande frequência e que tornam-se nocivos para a população e o meio ambiente (GONÇALVES Jr., 2014).

Para efeitos de classificação, os padrões de qualidade do ar são divididos em primários e secundários. O primeiro refere-se às concentrações de poluentes atmosféricos que, se ultrapassadas, poderão causar riscos à saúde da população. Já os padrões secundários são as concentrações abaixo do que se espera o mínimo impacto adverso sobre o bem-estar da população, assim como o menor dano à flora, à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral (CONAMA, 1990).

Os padrões nacionais de qualidade do ar, no Brasil, foram instituídos a partir da Portaria Normativa IBAMA nº 348 de 14/03/90 e da resolução CONAMA nº 003 de 28/06/1990. No entanto, a legislação considera apenas as partículas inaláveis (grossas). O presente estudo trabalhou com dados de material particulado respirável (MPR) e seus limites são estabelecidos pela OMS (2006) e pela USEPA (2010). Tais valores podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrões internacionais de qualidade do ar para MP<sub>2,5</sub>.

Órgão Regulamentador	Poluente	Padrões	Concentração (µg/m <sup>3</sup> )	Tempo de Amostragem
CONAMA	PTS	Primário / Secundário	80 / 60	1 Ano
		Primário / Secundário	240 / 150	24 horas
OMS	MP <sub>2,5</sub>	-	10	1 Ano
		-	25	24 horas
USEPA	MP <sub>2,5</sub>	Primário	12	1 Ano
		Secundário	15	1 Ano
		Primário e Secundário	35	24 horas

Fonte: CONAMA (1990), OMS (2006) e USEPA (2010).

### 3.2.2. Como a Qualidade do Ar Espelha a Qualidade Ambiental

Segundo Pinto *et al.* (2014) os grandes centros urbanos vêm sofrendo com os poluentes atmosféricos. Para ele, o adensamento populacional somado as elevadas emissões industriais e veiculares colaboram com a degradação da qualidade do ar devido ao aumento de poluentes na atmosfera.

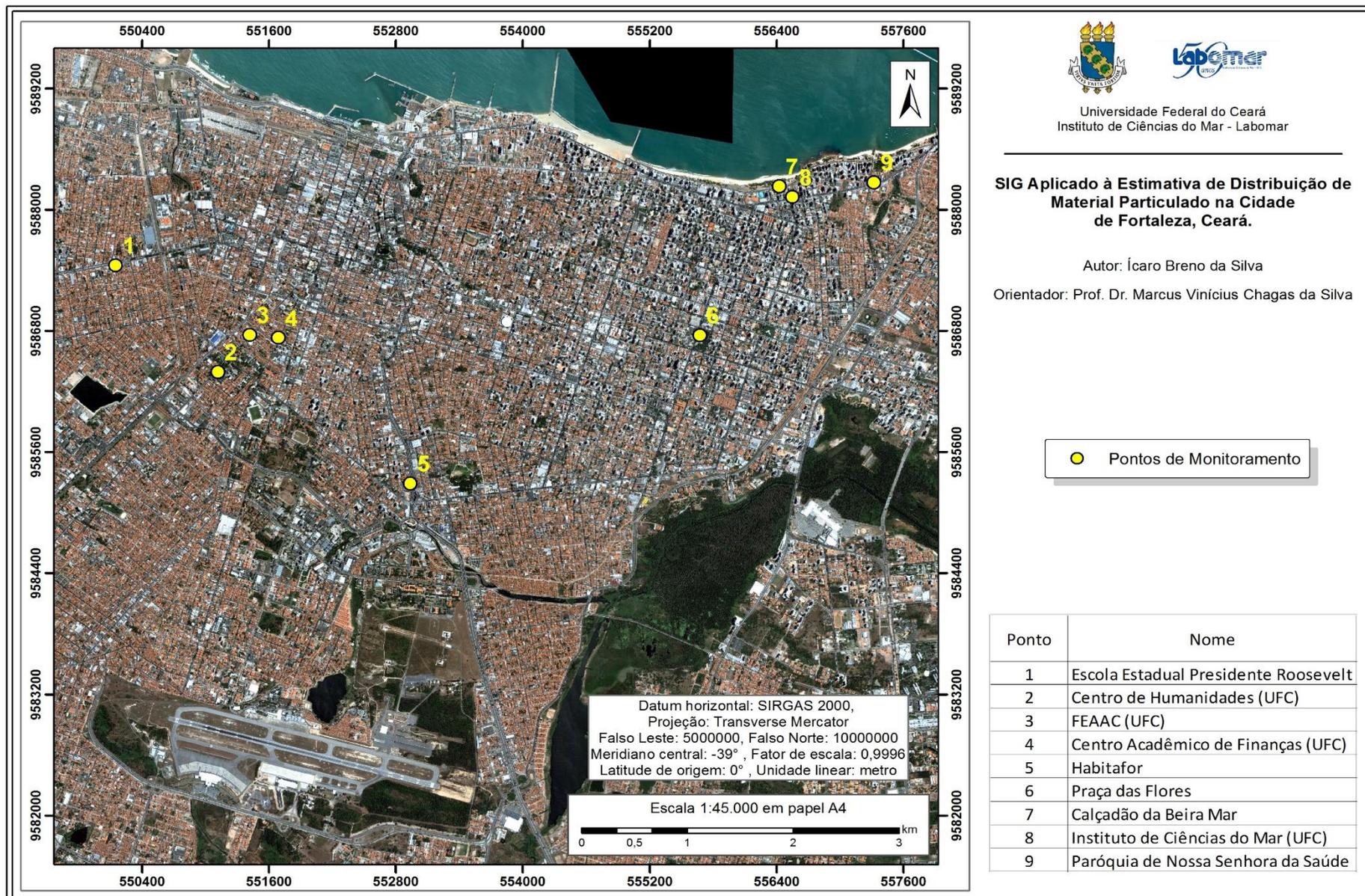
A urbanização é uma das provas de que o homem é capaz de causar grandes modificações na paisagem. Porém, essas mudanças acontecem em detrimento da qualidade ambiental, a qual acarreta em consequências negativas para o meio natural e à qualidade de vida do homem urbano (SCHMIDT e NUCCI, 2010).

Dentre os estudos que refletem como a qualidade do ar espelha a qualidade ambiental e a saúde da população, podemos citar Cançado *et al.* (2006), Bueno (2008), Rios e Boechat (2011), Ferreira *et al.* (2013), Nicolussi *et al.* (2014). Nesses trabalhos, a poluição atmosférica tem sido associada à piora da função pulmonar, ao aumento de sintomas adversos nos sistemas respiratórios e ao incremento das internações hospitalares por doenças respiratórias.

Assim, tendo em vista os padrões de qualidade do ar e os efeitos adversos potenciais que o MP pode causar, foram monitorados nove pontos no setor norte da cidade de Fortaleza com o objetivo de quantificar a concentração do MPR nesses locais (Figura 2).

Os pontos monitorados – escolhidos a partir 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" – foram obtidos por amostragem ativa (bomba de sucção do ar) em um período de 12 horas, que, segundo as pesquisas de Rocha (2014) e Silva (2016), foram: Escola Estadual Presidente Roosevelt, Centro de Humanidades (Universidade Federal do Ceará – UFC), Centro Acadêmico de Finanças (UFC), Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade (FEAAC – UFC), Habitafor, Praça das Flores, calçada da Beira Mar, Instituto de Ciências do Mar (UFC) e Paróquia de Nossa Senhora da Saúde.

Figura 2 – Localização dos pontos de monitoramento.



Fonte: Autor.

### 3.3. Sistema de Informações Geográficas e Conceitos Utilizados

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um sistema que é utilizado com o auxílio do computador para a aquisição, armazenamento, visualização e análise de dados geográficos (EASTMAN, 1998). O mesmo também é considerado como uma ferramenta de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente em um ambiente de respostas a problemas (COWEN, 1988).

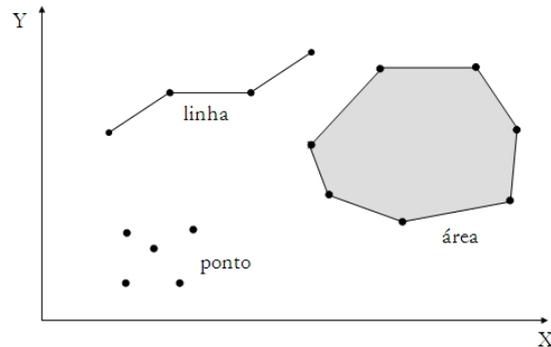
Nesse contexto o SIG é capaz de realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, combinando conhecimento geral com informações específicas (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001; LONGLEY *et al.*, 2013).

Para uma melhor compreensão do SIG, são apresentados alguns conceitos, como: mapas temáticos, modelo vetorial, modelo matricial, sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD), modelagem de dados e atributos.

Os mapas temáticos são mapas que procuram descrever a distribuição espacial de determinada grandeza geográfica, de forma qualitativa. Podemos citar como exemplo os mapas de pedologia ou de aptidão agrícola. Todos estes dados são obtidos a partir de reconhecimento de campo e entram no sistema a partir de digitalização ou classificação de imagens (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

No modelo vetorial (Figura 3) temos os limites ou o curso das feições sendo definidos por uma série de pontos que formam a representação gráfica de cada feição. Os pontos são representados por um par de coordenadas (X e Y) e são usados para identificar localizações ou ocorrências no espaço. Já linhas e polígonos são representados por um conjunto de pares de coordenadas. A primeira vem a ser formada por um conjunto de pontos conectados e o polígono (ou área) é uma determinada região do plano limitada por uma ou mais linhas conectadas. (EASTMAN, 1998; CÂMARA, 2005; FITZ, 2008).

Figura 3 – Representações vetoriais.

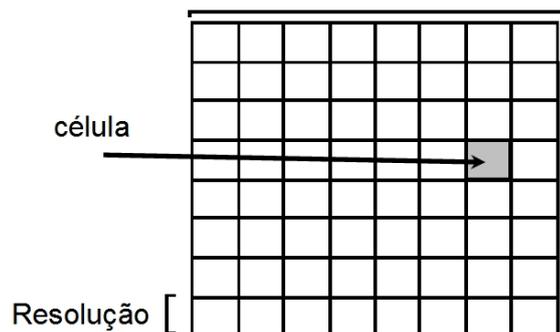


Fonte: Câmara *et al.* (2005).

Já o modelo matricial é representado por uma matriz com  $n$  linhas e  $m$  colunas (Figura 4) –  $M(n,m)$  – onde cada célula (*pixel*) apresenta um valor  $z$  que pode indicar uma cor ou um tom de cinza a ele atribuído. Em uma imagem georreferenciada, cada *pixel* apresenta um par de coordenadas planas ou geográficas e um valor  $z$  atribuído (FITZ, 2008).

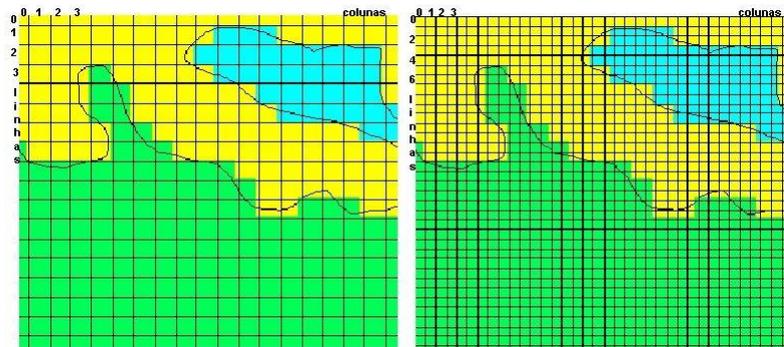
Neste tipo de representação, o espaço é tratado como uma superfície plana e a resolução do sistema é dada a partir da relação entre o tamanho da célula e a área por ela coberta (Figura 5). Assim, todo dado armazenado no raster controla diretamente a forma visível que vemos (EASTMAN, 1998; KURIMORI, 2012).

Figura 4 – Estrutura matricial.



Fonte: Câmara *et al.* (2005).

Figura 5 – Representações matriciais com resolução distinta.



Fonte: Câmara e Medeiros (1998).

Tendo em vista os conceitos dos dados vetoriais e matriciais, é importante citar o sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD). O mesmo caracteriza-se por ser um sistema de banco de dados que independe do sistema aplicativo para o seu funcionamento. Ele armazena dados em arquivos no disco rígido e carrega-os em memória para sua manipulação. Esse sistema de gerenciamento é capaz de armazenar os arquivos e dados não espaciais, ou seja, qualquer informação descritiva (nomes, tabelas, números, textos) que se relaciona a um único objeto ou a um conjunto deles, caracterizando determinado fenômeno geográfico (CÂMARA, 1995).

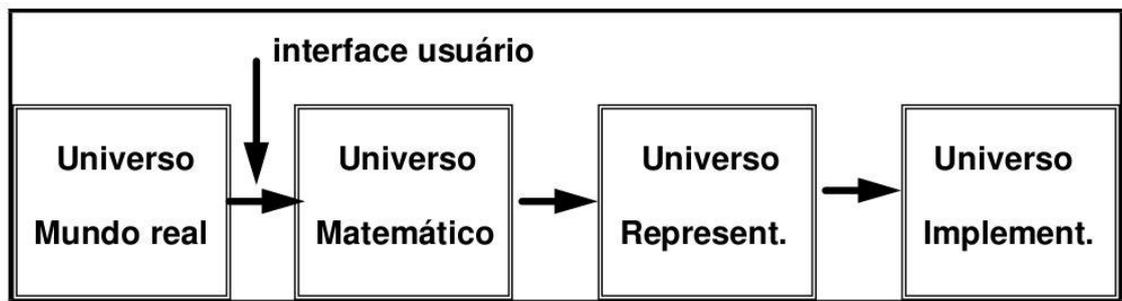
Para Medeiros e Pires (1998), os principais objetivos de um SGBD são:

- Permitir, através de interfaces amigáveis, a disponibilização de dados integrados para uma grande variedade de usuários;
- Garantir o compartilhamento de dados de forma organizada, atuando como mediador entre aplicações e banco de dados;
- Controlar a administração dos dados garantindo a manutenção de padrões de qualidade e integridade.

A modelagem de dados, por sua vez, é algo essencial no projeto de um SIG e o mesmo deve descrever como a realidade geográfica será representada no computador. Assim, um modelo de dados é caracterizado como um conjunto de ferramentas conceituais utilizadas para estruturar dados em um sistema computacional (CÂMARA, 1995). Neste contexto surge a abordagem de Gomes e Velho (1995) chamado “paradigma dos quatro universos” (Figura 6), que distingue:

- O universo do mundo real, que representa as entidades da realidade a ser modeladas no sistema.
- O universo matemático (ou conceitual), que inclui uma definição matemática das entidades a serem incluídas no modelo.
- O universo de representação, onde as variadas entidades serão mapeadas para representações geométricas.
- O universo de implementação, onde se escolhe as estruturas de dados e algoritmos baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados.

Figura 6 – Modelagem de dados segundo o paradigma dos quatro universos.



Fonte: Câmara, Davis e Monteiro (2001).

Por fim temos os atributos que, para serem representados em ambiente computacional, de acordo com Câmara, Davis e Monteiro (2001), deve-se associar a cada tipo de informação geográfica uma escala de medida e de referência. Essa escala de mensuração pode ser do tipo nominal, ordinal, intervalo e razão.

As duas primeiras classes são consideradas níveis temáticos, pois todas as medidas são atribuídas a um número ou nome, associando a observação a um tema ou classe. A escala nominal diferencia os objetos segundo classes distintas. Como exemplo temos as classes de solo (1 = latossolo, 2 = podzólico, ...). Já a classe ordinal associa a cada amostra valores ou nomes, gerando um conjunto ordenado de classes. Dados de susceptibilidade à erosão (1 = baixo, 2 = médio, 3 = alto) é um exemplo.

As duas últimas classes são denominadas de níveis numéricos, pois as atribuições de valores baseiam-se em uma escala de números reais. No nível de medida por intervalo há o ponto de referência zero, o qual é definido de maneira arbitrária, permitindo a atribuição de valores positivos e negativos. O sistema de coordenadas geográficas é um exemplo de escala de intervalo. Por último, no nível de medida por razão, o ponto de referência zero não é

arbitrário, mas definido por alguma condição natural. Logo, os valores negativos não fazem parte desta escala. Medidas de distância, peso, área e volume são exemplos deste tipo de escala.

Tendo sido discutido os conceitos acima, pode-se afirmar que o SIG tem as ferramentas necessárias para subsidiar o planejamento urbano, dando suporte as decisões a partir do diagnóstico das potencialidades e limitações do meio em relação ao uso e ocupação. Entre os autores que seguem essa linha de pesquisa, podemos citar: Schmidt e Nucci (2010) e Minaki e Amorim (2012).

### **3.3.1. Geoestatística**

A variabilidade espacial de fenômenos ambientais é uma das preocupações de pesquisadores que data desde o início do século. Montgomery (1913), por exemplo, já se preocupava com a variação de nitrogênio no solo e o possível efeito que o mesmo ocasionaria no crescimento de grãos. No entanto, naquela época, os estudos eram realizados utilizando-se os métodos de estatística clássica – onde se utilizava parâmetros como média e moda – que visavam descrever a distribuição espacial da variável em estudo. Tal método estatístico baseia-se na hipótese de que as variações que ocorrem no espaço, ou seja, de um local para o outro, são aleatórias (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

Estudando dados de concentração de ouro na área de exploração mineral, Krige (1951) 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.

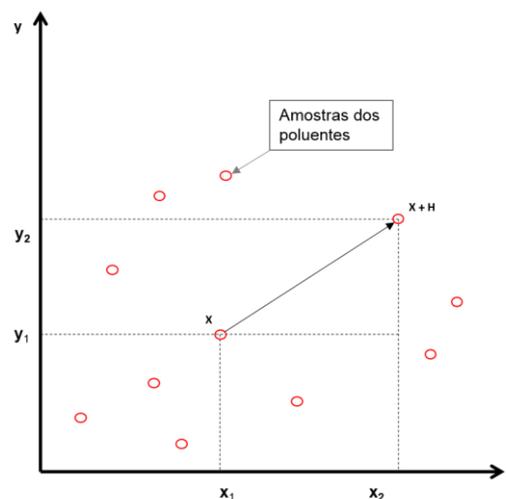
Porém, a geoestatística passa a ser impulsionada com Matheron (1971) que desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Segundo Carvalho e Vieira (2001), variável regionalizada baseia-se em variáveis que consideram aspectos espaciais onde foram observados os diversos valores a serem introduzidos nos modelos. Apresentam também estreita ligação, de maneira qualitativa, à estrutura do fenômeno em estudo, como localização, continuidade e anisotropia (varia com a direção).

Para Bettini (2007), na estatística clássica, diversas medidas (variância, desvio padrão, desvio absoluto médio, etc.) podem expressar a dispersão de uma variável aleatória. De

maneira análoga, a variabilidade espacial de uma variável regionalizada em todo o seu domínio pode ser representada por várias medidas, dentre as quais se destaca o semivariograma.

O mesmo é considerado uma ferramenta básica que representa quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço, dando suporte as técnicas de *krigagem* (LIU, 2015). Considere as seguintes variáveis regionalizadas,  $Z(X)$  e  $Z(X+H)$ . Elas se referem a um mesmo atributo (concentração de determinado poluente, por exemplo) medido em duas posições diferentes (Figura 7), onde  $H$  é um vetor distância que separa os devidos pontos e  $X$  representa uma posição em duas dimensões, com componentes  $(X_1, Y_1)$  (PIRES, 2010). 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 (CAMARGO, 1998).

Figura 7 – Amostragem em duas dimensões de uma variável regionalizada, mostrando dois pontos separados pelo vetor  $H$ .



Fonte: Adaptado de Camargo (1998).

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:

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

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

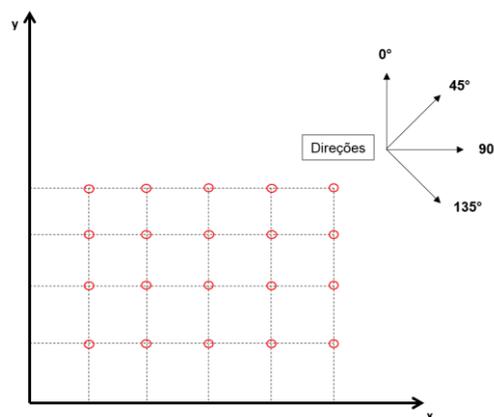
- $Z_{(T_i)}$  e  $Z_{(T_i+H)}$  – são valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $T_i$  e  $T_i+H$  ( $i = 1, \dots, n$ ), separados pelo vetor  $h$ .

O semivariograma deve ser elaborado a partir de direções distintas no espaço, objetivando estudar como se deforma a função ao mudar a direção de  $H$ , colocando em evidência a anisotropia do fenômeno. Esta refere-se à uma direção privilegiada a partir da qual os valores da variável regionalizada não sofrem uma variação de forma significativa. Nos casos em que não há dependência da direção, diz-se que o fenômeno regionalizado é isotrópico (ORTIZ, 2002).

Para o cálculo do semivariograma, Camargo (1998) cita que o mesmo pode ser feito a partir de amostras regularmente espaçadas (Figura 8) ou a partir de amostras irregularmente espaçadas (Figura 9):

- Cálculo a partir de amostras regularmente espaçadas: para determinar o semivariograma na direção de  $45^\circ$ , por exemplo, o cálculo da semivariância é repetido para todos os intervalos entre os pontos ( $H$ ). Supondo que a distância entre estes pontos seja de 50 metros, logo, qualquer par de observações, na direção  $45^\circ$ , cuja distância é igual a 50 m será incluído no cálculo de  $\gamma(45^\circ, 50m)$ . O processo é repetido até que algum ponto de interesse seja alcançado.

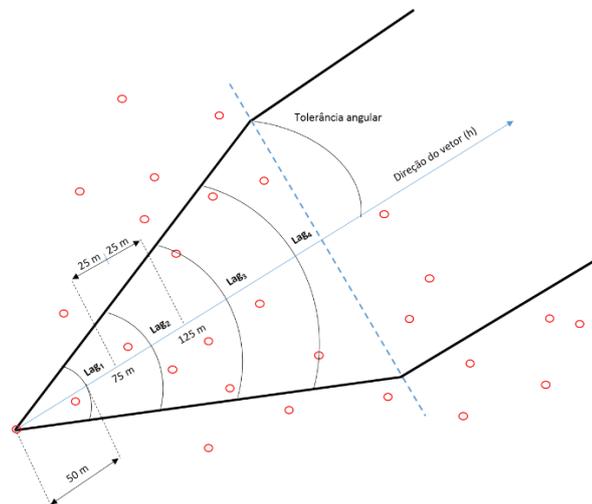
Figura 8 – Exemplo de amostras regularmente espaçadas.



Fonte: Adaptado de Camargo (1998).

- Cálculo a partir de amostras irregularmente espaçadas: neste caso específico, é necessário inserir limites de tolerância para direção e distância. Seguindo a imagem abaixo (Figura 9), usaremos como referência o  $Lag_2$ . Entende-se por Lag como uma distância pré-estabelecida que será utilizada no cálculo do semivariograma. Quanto maior for esse Lag, maior será a quantidade de amostras que entrará na análise, logo, maior será a interação entre elas, deixando o resultado mais dinâmico. Utilizaremos como exemplo um incremento de Lag igual a 50 metros com tolerância de 25 metros. A direção de medida é igual a  $45^\circ$  com tolerância de  $20^\circ$ . Assim, todo par de observação que esteja compreendido entre 75 m e 125 m e  $25^\circ$  e  $65^\circ$ , será incluído no cálculo do semivariograma do  $Lag_2$ .

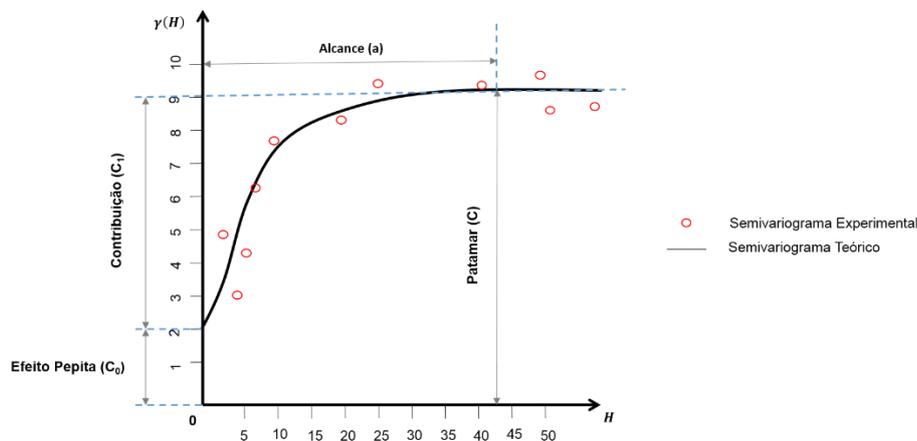
Figura 9 – Exemplo de amostras irregularmente espaçadas.



Fonte: Adaptado de Camargo (1998).

Segundo Reis (2013), ao obter o semivariograma experimental, é necessário ajustá-lo de modo a definir os seguintes parâmetros (Figura 10): alcance ( $a$ ), patamar ( $C$ ) e efeito pepita ( $C_0$ ). O processo de análise e ajuste de um modelo teórico a um semivariograma experimental é chamado de análise estrutural.

Figura 10 – Ajuste do semivariograma, contendo os parâmetros Alcance (a), Patamar (C), Efeito Pepita ( $C_0$ ) e Contribuição ( $C_1$ ).



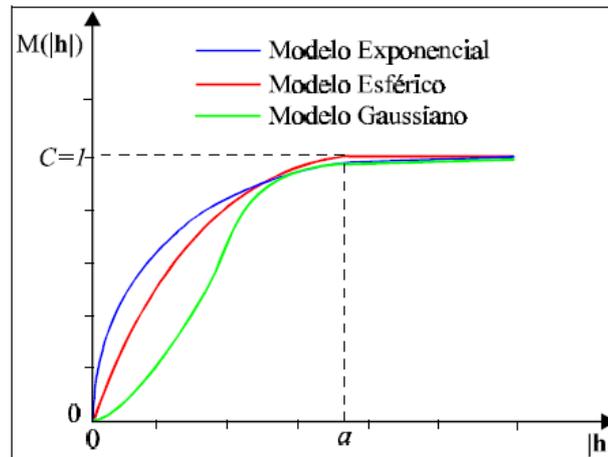
Fonte: Adaptado de Camargo (1998).

Camargo (1998) 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 considerá-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. Isto ocorre pelo fato da variância da diferença entre os pares amostrais tornarem-se invariante com a distância. Logo, este valor corresponde à distância onde toda a semivariância da amostra é devido somente a influência aleatória;
- Efeito Pepita ( $C_0$ ): Corresponde a cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo “y”, ou seja, quando a distância é 0 (zero). Quando a distância tende para zero,  $\gamma(H)$  se aproxima de um valor positivo chamado efeito pepita; e
- Contribuição ( $C_1$ ): Que é representado simplesmente pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita ( $C_0$ ).

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 (Figura 11) serão apenas os primeiros, onde os mais utilizados, segundo Camargo (1998), são: modelo esférico, exponencial e gaussiano.

Figura 11 – Modelos teóricos que atingem o patamar.



Fonte: Camargo (1998).

Modelo Esférico (Equação 2): Tem um comportamento linear e apresenta um crescimento rápido na origem. Comumente é o mais utilizado nas variáveis em geociências (ANDRIOTTI, 2003);

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

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

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

Modelo Gaussiano (Equação 4): o modelo apresenta uma grande continuidade da variável estudada – devido ao seu crescimento suave – e tem comportamento parabólico nas vizinhanças da origem (TEIXEIRA, 2013).

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

O semivariograma é, portanto, utilizado para determinar qual o melhor método a ser utilizado: estatística clássica ou geoestatística. O mesmo é capaz de expressar a dependência espacial das amostras. Havendo tal dependência, pode-se estimar valores da variável em estudo para os locais não amostrados dentro da área estudada, com variância mínima e sem tendenciosidade, pelo método denominado *krigagem* (CARVALHO e VIEIRA, 2001).

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.

Dentre as formas mais utilizadas de *krigagem* temos: a simples, disjuntiva, ordinária e a universal. Dessas, destacam-se a *krigagem* simples e a ordinária. A primeira é utilizada quando a média assumida é constante para toda a área. Já o segundo método – o qual será utilizado no seguinte trabalho – não requer o conhecimento inicial da média, onde, para obter-se as predições, é preciso que a soma dos pesos atribuídos aos valores observados em cada predição seja igual a 1 (REIS, 2013; SANTOS, 2015).

Segundo Bagnara, Prietto e Timbola (2012), no processo de interpolação utilizando a *krigagem* 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:

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

A melhor estimativa é alcançada quando são atendidas as seguintes condições: não tendenciosidade e variância mínima. Tais condições são satisfeitas conforme as Equações 6 e 7:

$$E(v^* - v) = 0 \quad (6)$$

$$Var(v^* - v) = \text{mínimo} \quad (7)$$

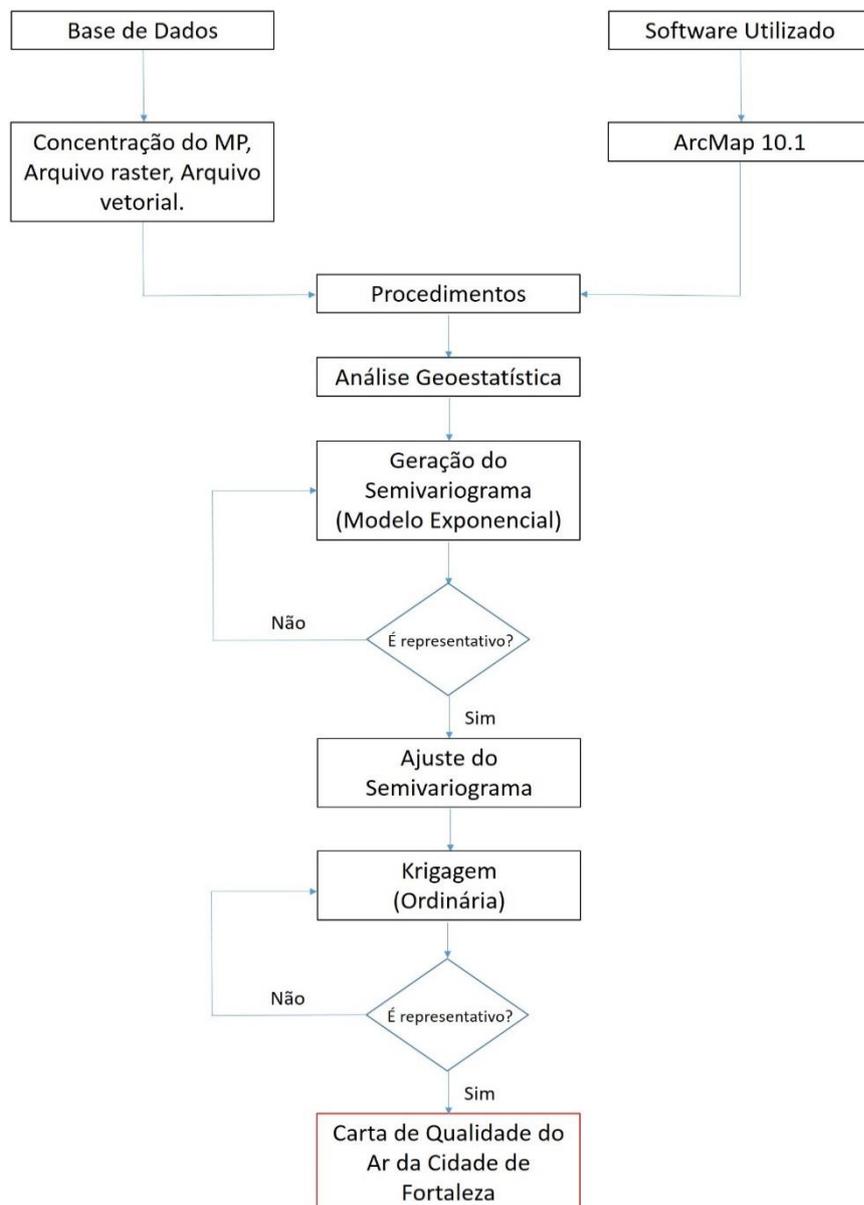
Sendo  $r = v^* - v$  o resíduo da estimativa, ou seja, a diferença entre o valor estimado e o verdadeiro valor.

Para se checar o plano de *krigagem* antes da sua utilização na confecção de mapas, têm-se utilizados alguns métodos estatísticos, como por exemplo a validação cruzada. Este método consiste em retirar um único ponto amostrado do conjunto original de dados e estimá-lo a partir do restante. O mesmo processo é repetido para todos os outros pontos amostrais. O resultado é que cada ponto possuirá o seu erro de estimação e, padronizando-o pelo desvio padrão da estimativa, espera-se que os erros deduzidos da *krigagem* tenham média próxima de 0 e variância próxima de 1 (JOHNSTON *et al.*, 2004; REIS, 2013).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para facilitar o entendimento dos procedimentos utilizados, foi elaborado o seguinte fluxograma (Figura 12). O mesmo também trata dos modelos geoestatísticos escolhidos para a elaboração do produto final: uma carta de qualidade do ar do setor norte da cidade de Fortaleza. Como as concentrações de MPR foram coletadas em um período de 12 horas, os padrões deste poluente, definidos pela OMS e USEPA (considerando um período de 24 horas), foram divididos por dois, apresentando os respectivos limites:  $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A área de estudo apresenta  $21,35 \text{ km}^2$ , representando 6,8% do território total da cidade.

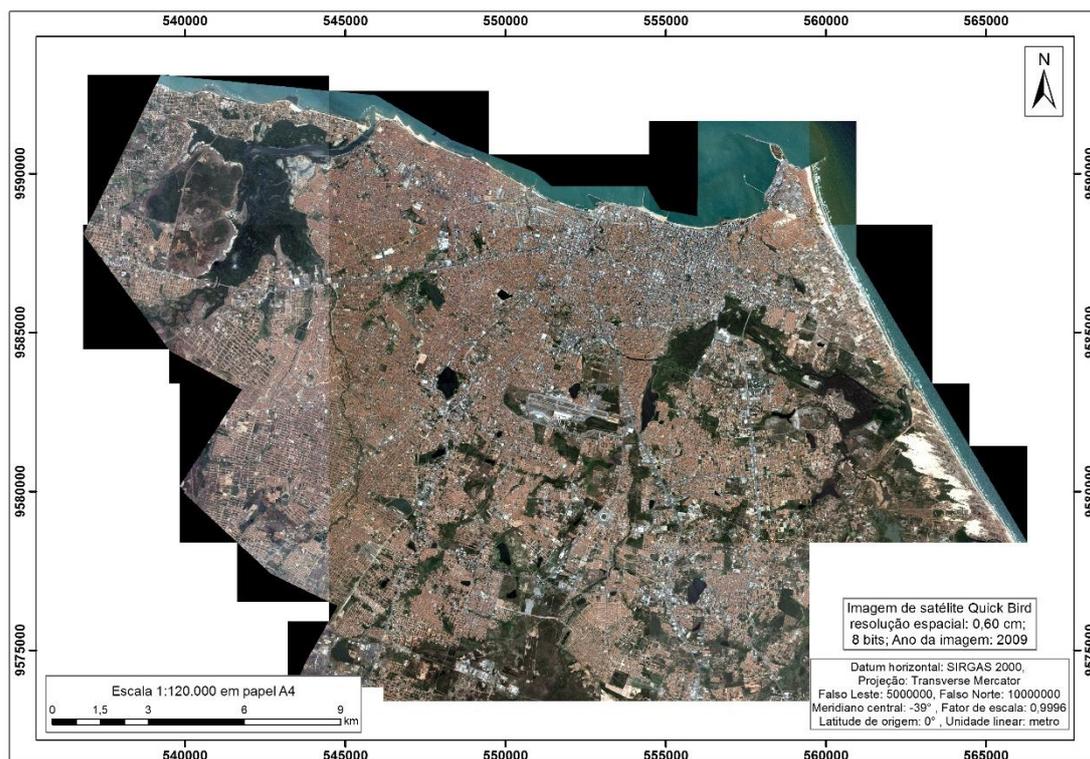
Figura 12 – Fluxograma dos procedimentos técnicos e operacionais.



#### 4.1. Dados raster

Foram adquiridos recortes de imagens georreferenciadas do satélite *QuickBird*, compondo uma cena correspondente à área urbana da cidade de Fortaleza (Figura 13), onde foram representados os nove pontos monitorados. 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). O satélite possui resolução espacial de 61 centímetros no modo pancromático e 2,4 metros no modo multiespectral. A resolução radiométrica é de 11 bits e sua resolução temporal pode variar de 1 a 3,5 dias (Tabela 2). Por fim, a resolução espectral do *QuickBird* compreende o espectro do visível e do infravermelho próximo, tornando possível a identificação visual de feições urbanas.

Figura 13 – Mosaico de imagens do satélite *QuickBird*, projetadas e georreferenciadas, correspondente a cidade de Fortaleza.



Fonte: Autor.

As imagens do satélite *QuickBird* apresentam características (Tabela 2) muito importantes para a realização do estudo. Sua resolução espacial e radiométrica permitem a realização de trabalhos em grande escala e auxiliam em uma melhor identificação das chaves de interpretação.

Tabela 2 – Parâmetros das imagens do satélite *QuickBird*.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica
Pancromático	Pancromática	455 – 900 nm	0,61 – 0,72 cm	1 – 3,5 dias	11 bits
Multiespectral	Azul	450 – 520 nm	2,4 – 2,8 m		
	Verde	520 – 600 nm			
	Vermelho	630 – 690 nm			
	Infravermelho Próximo	760 – 900 nm			

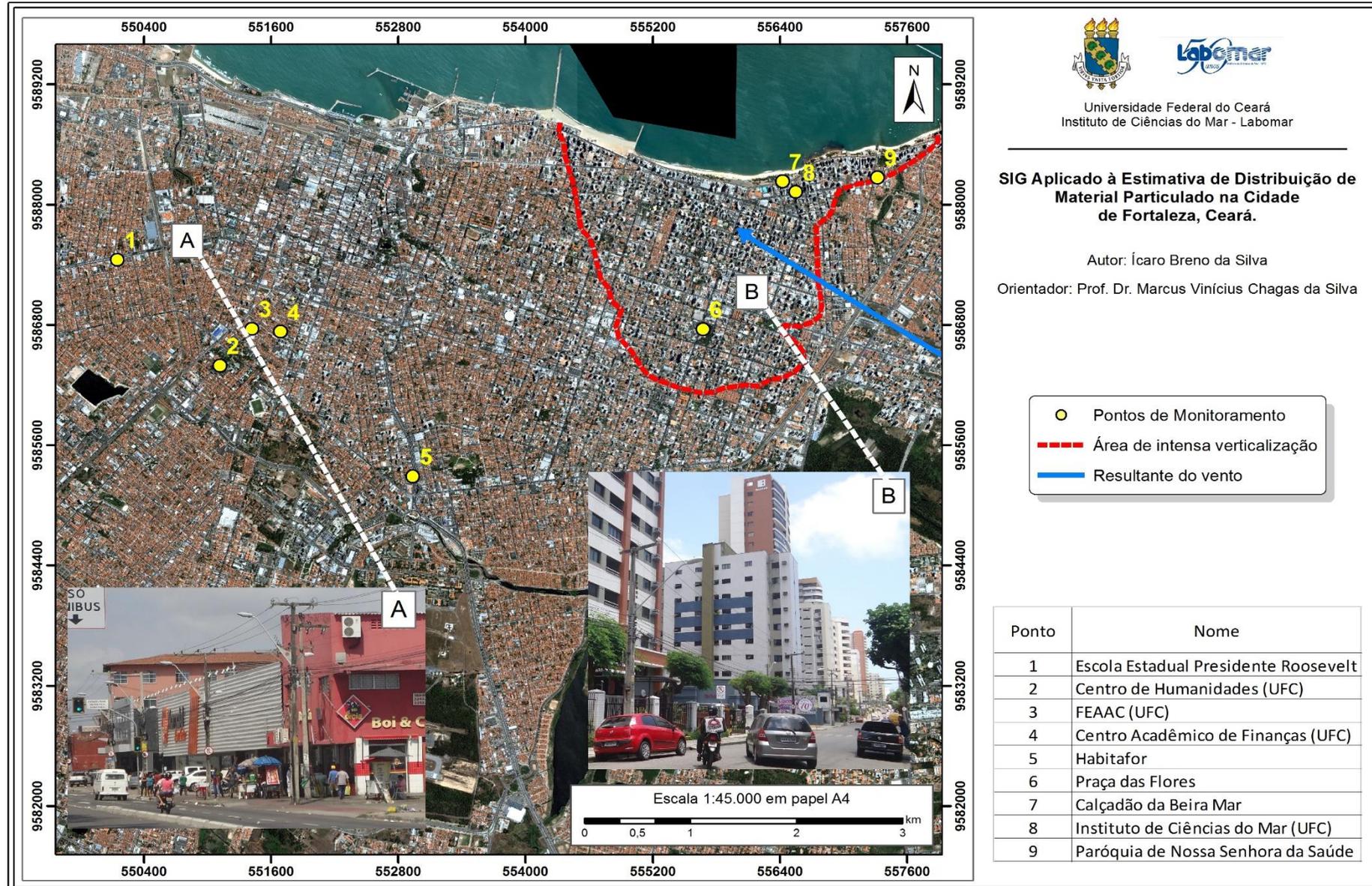
Fonte: Disponível em <[http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao\\_quickbird.php](http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/missao_quickbird.php)> . Acesso em 5 de set. de 2014.

## 4.2. Vetorização

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 14). A vetorização da área verticalizada foi realizada a partir da interpretação visual dos diferentes padrões de edificação, tendo como justificativa a quantidade de pavimentos (Tabelas 3 e 4). Já a resultante do vento foi inserida segundo a rosa dos ventos de Leite (2010) (Figura 15). 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.

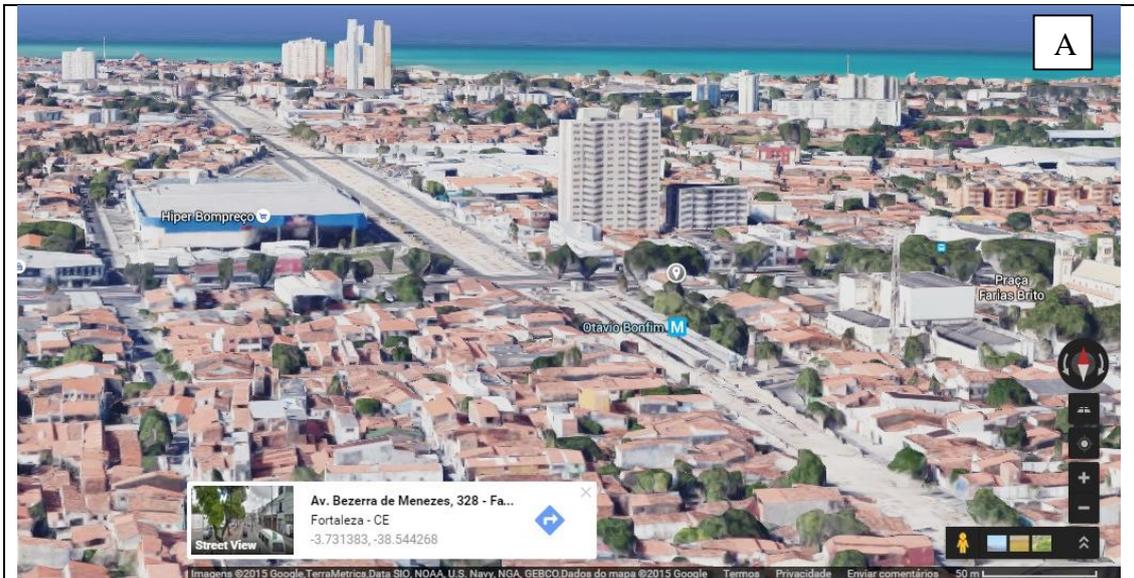
Para melhor representar as variações do terreno, também foi realizado, a altimetria da região em estudo (Figura 16). Para isso, utilizou-se como base o arquivo de curvas de nível de Fortaleza com intervalo de 5 metros (Souza *et al.*, 2009).

Figura 14 – Representação da principal área verticalizada da cidade e da resultante do vento. (a) Av. Bezerra de Menezes; (b) Rua Leonardo Mota.



Fonte: Autor.

Tabela 3 – Padrão das edificações na Av. Bezerra de Menezes e sua influência na concentração do MPR.

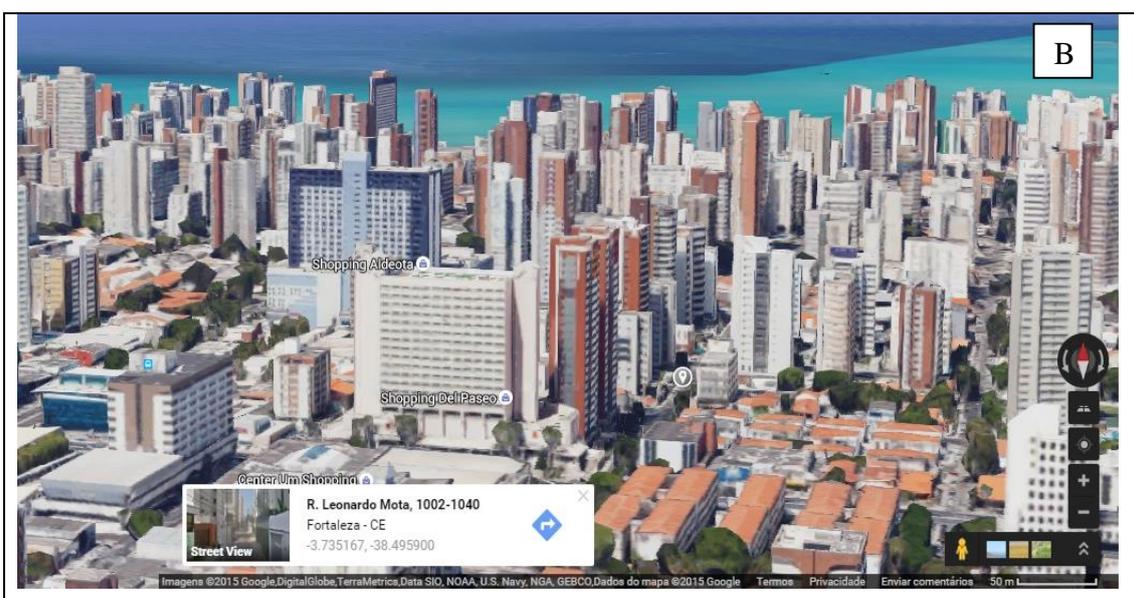


**Padrão:** Predomínio de edificações de pequeno porte, com o predomínio de casas planas e dúplex.

**Influência na concentração do MPR:** Tais condições favorecem uma maior circulação do vento, dando a região um maior potencial de dispersar o material particulado respirável.

Fonte: Google (2015).

Tabela 4 – Padrão das edificações na Rua Leonardo Mota e sua influência na concentração do MPR.

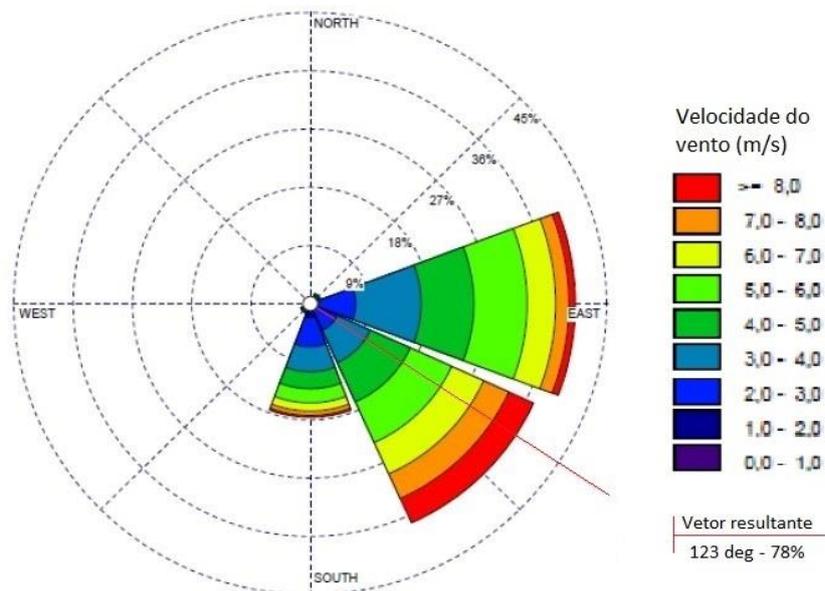


**Padrão:** Adensamento de edificações de grande porte, variando entre 57 m e 81 m de altura.

**Influência na concentração do MPR:** Em áreas com essas características, ocorre, devido a presença das grandes edificações, a formação de corredores de vento. Tal situação muda a velocidade, intensidade e direção do vento, favorecendo a ocorrência de áreas menos ventiladas, portanto, que acumulam poluentes como o material particulado respirável.

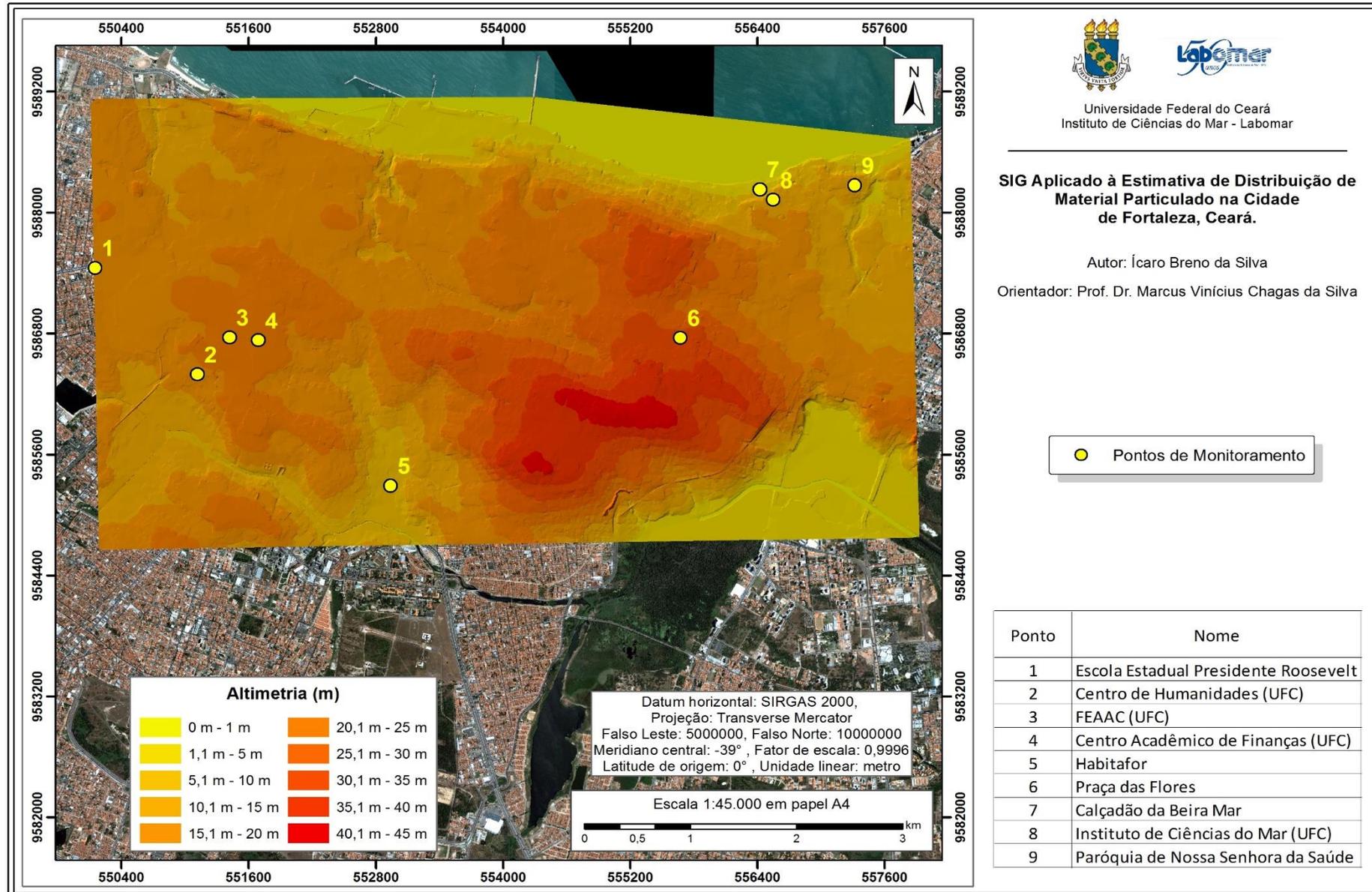
Fonte: Google (2015).

Figura 15 – Rosa dos ventos para a cidade de Fortaleza.



Fonte: Adaptado de Leite (2010).

Figura 16 – Topografia urbana da região estudada.



Fonte: Autor.

### 4.3. Levantamento dos níveis de MPR na cidade de Fortaleza

Os níveis deste poluente foram obtidos a partir das pesquisas de Rocha (2014) e Silva (2016). Os dados apresentados nas tabelas 5 e 6 representam, respectivamente, os níveis de MPR em período chuvoso e seco na cidade de Fortaleza.

No primeiro período, nota-se que cinco locais ultrapassaram os limites máximos estabelecidos pela OMS ( $12,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e USEPA ( $17,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), considerando as 12 horas de amostragem, que são: FEAAC (UFC), Habitafor, Praça das Flores, Instituto de Ciências do Mar (UFC) e Paróquia Nossa Senhora da Saúde. Assim, as respectivas concentrações do poluente nesses pontos podem prejudicar a saúde das pessoas que habitam ou frequentam estes locais. Em especial a Praça das Flores, local bastante utilizado para a prática de exercícios físicos e lazer.

Outros três pontos amostrados ultrapassaram o limite permitido pela OMS, ficando abaixo daquilo permitido pela USEPA. São eles: Escola Estadual Presidente Roosevelt, Centro de Humanidades (UFC) e o calçadão da Beira Mar. Este último é um local muito frequentado por turistas e utilizado, também, para atividades esportivas e de lazer. Neste período, apenas o Centro Acadêmico de Finanças da UFC apresentou níveis de MPR abaixo dos padrões internacionais.

Tabela 5 – Concentração de MPR amostrados em período chuvoso.

Ponto	Nome	MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1	Escola Estadual Presidente Roosevelt	16,65
2	Centro de Humanidades (UFC)	16,03
3	FEAAC (UFC)	22,55
4	Centro Acadêmico de Finanças (UFC)	4,38
5	Habitafor	76,12
6	Praça das Flores	65,36
7	Calçadão da Beira Mar	12,56
8	Instituto de Ciências do Mar (UFC)	22,8
9	Paróquia de Nossa Senhora da Saúde	29,9

Fonte: Rocha (2014) e Silva (2016).

Os valores para o MPR, em período seco, são apresentados na Tabela 6. Neste período, cinco pontos ultrapassaram os níveis permitidos pela OMS e USEPA, a saber: Escola Estadual Presidente Roosevelt, Centro de Humanidades (UFC), Habitafor, calçadão da Beira Mar e Praça das Flores, tendo, esta última, apresentado a maior concentração desse período com  $99,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

As demais localidades – FEAAC (UFC), Centro Acadêmico de Finanças (UFC), Instituto de Ciências do Mar (UFC) e Paróquia Nossa Senhora da Saúde – apresentaram níveis de MPR abaixo dos padrões internacionais. Mais uma vez, o Centro Acadêmico de Finanças (UFC) apresentou a menor concentração dentre os outros pontos monitorados.

Tabela 6 – Concentração de MPR amostrados em período seco.

Ponto	Nome	MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1	Escola Estadual Presidente Roosevelt	22,71
2	Centro de Humanidades (UFC)	30,7
3	FEAAC (UFC)	10,35
4	Centro Acadêmico de Finanças (UFC)	4,4
5	Habitafor	30,87
6	Praça das Flores	99,45
7	Calçadão da Beira Mar	24,42
8	Instituto de Ciências do Mar (UFC)	8,1
9	Paróquia de Nossa Senhora da Saúde	10,09

Fonte: Rocha (2014) e Silva (2016).

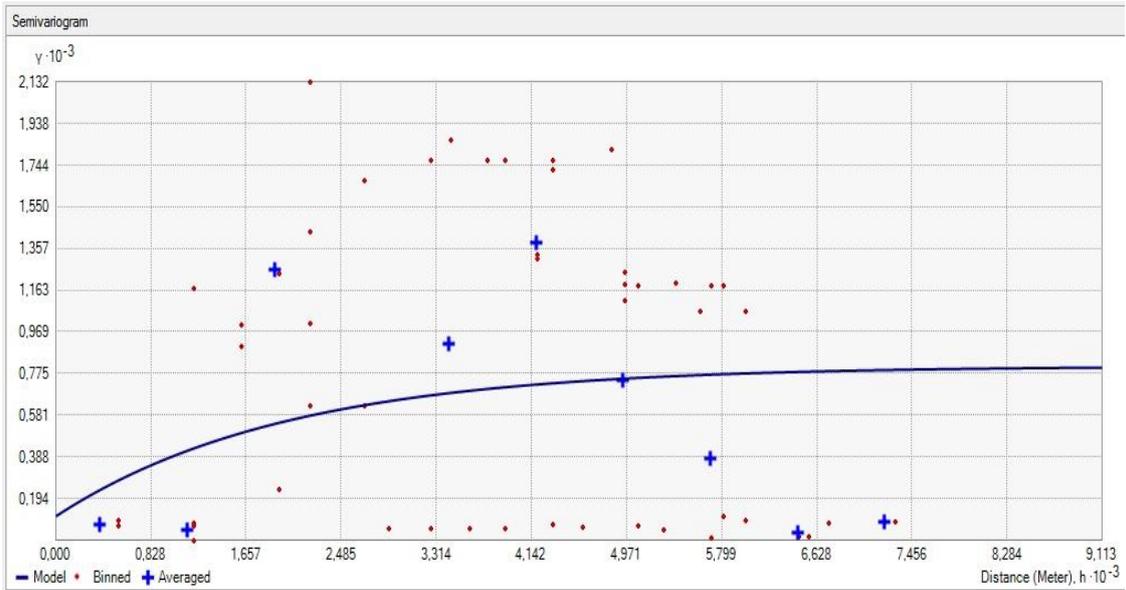
#### 4.4. Geoestatística

Os dados geoestatísticos foram obtidos a partir da interpolação dos níveis de concentração do MPR. O cálculo foi realizado no programa ArcMap 10.1 e o método utilizado foi a *krigagem* ordinária. O modelo exponencial foi escolhido para a confecção dos semivariogramas (período chuvoso e seco). Os mesmos apresentaram os seguintes parâmetros: a) Semivariograma para o período chuvoso: efeito pepita igual a 111,31; patamar de 698,55 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°, não apresentando anisotropia, ou seja, não varia com a direção. Tais valores são definidos com o objetivo de incluir no cálculo do semivariograma o maior número possível de pares de observações; b) Semivariograma para o período seco: apresentou efeito pepita igual a 0, um patamar de 1.230,42 e um número de lags igual a 12. Para este semivariograma, o lag apresentou um valor de 751,22 metros. O mesmo foi medido na direção 0° com ângulo de tolerância igual 45° e largura de banda de 3°. Este semivariograma também não apresentou anisotropia.

As Figuras 17 e 18 representam o valor da semivariância (período chuvoso e seco, respectivamente) estimada, de cada amostra, em diferentes distâncias. Já as Figuras 19 e 20

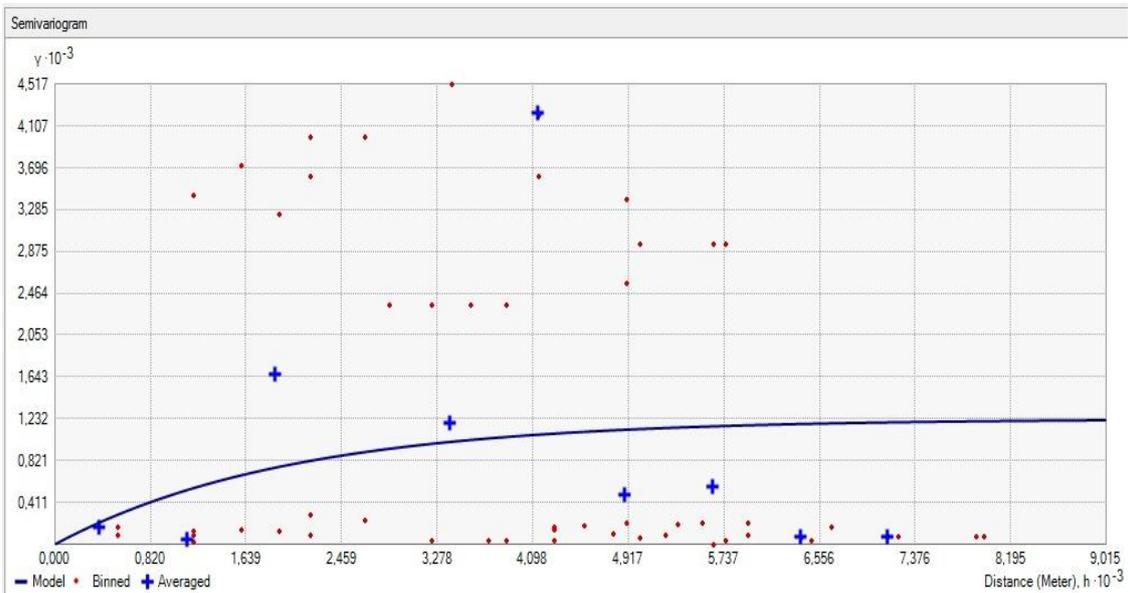
representam os parâmetros escolhidos para cada semivariograma. O valor de cada ponto está diretamente relacionado com os valores situados a certa distância  $H$ , sendo que quanto maior a distância entre os pontos menor será a relação entre eles. Isto pode ser melhor observado ao analisar as nuvens dos semivariogramas (Figuras 17 e 18), 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, nas duas situações, em 5.998,12 m, onde há um achatamento da nuvem do semivariograma e a sua curva torna-se constante.

Figura 17 – Semivariograma ajustado correspondente aos dados do período chuvoso.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Semivariograma ajustado correspondente aos dados do período seco.



Fonte: Autor.

Figura 19 – Parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma correspondente ao período chuvoso.

The image shows a 'Method Report' dialog box with the following parameters:

<b>Method</b>	<b>Kriging</b>
Type	Ordinary
Output type	Prediction
<b>Dataset #</b>	1
Trend type	None
<b>Searching neighborhood</b>	Standard
Neighbors to include	5
Include at least	2
Sector type	Four and 45 degree
Major semiaxis	5,998.12550834921
Minor semiaxis	5,998.12550834921
Angle	0
<b>Variogram</b>	Semivariogram
Number of lags	12
Lag size	759.405530109304
Nugget	111.314401534602
Measurement error %	100
<b>Model type</b>	Exponential
Range	5,998.12550834921
Anisotropy	No
Partial sill	698.55988613645

Buttons: Save..., OK, Cancel

Fonte: Autor.

Figura 20 – Parâmetros utilizados na elaboração do semivariograma correspondente ao período seco.

The image shows a 'Method Report' dialog box with the following parameters:

<b>Method</b>	<b>Kriging</b>
Type	Ordinary
Output type	Prediction
<b>Dataset #</b>	1
Trend type	None
<b>Searching neighborhood</b>	Standard
Neighbors to include	5
Include at least	2
Sector type	Four and 45 degree
Major semiaxis	5,998.12550834922
Minor semiaxis	5,998.12550834922
Angle	0
<b>Variogram</b>	Semivariogram
Number of lags	12
Lag size	751.225223758544
Nugget	0
Measurement error %	100
<b>Model type</b>	Exponential
Range	5,998.12550834922
Anisotropy	No
Partial sill	1,230.423189371821

Buttons at the bottom: Save..., OK, Cancel.

Fonte: Autor.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

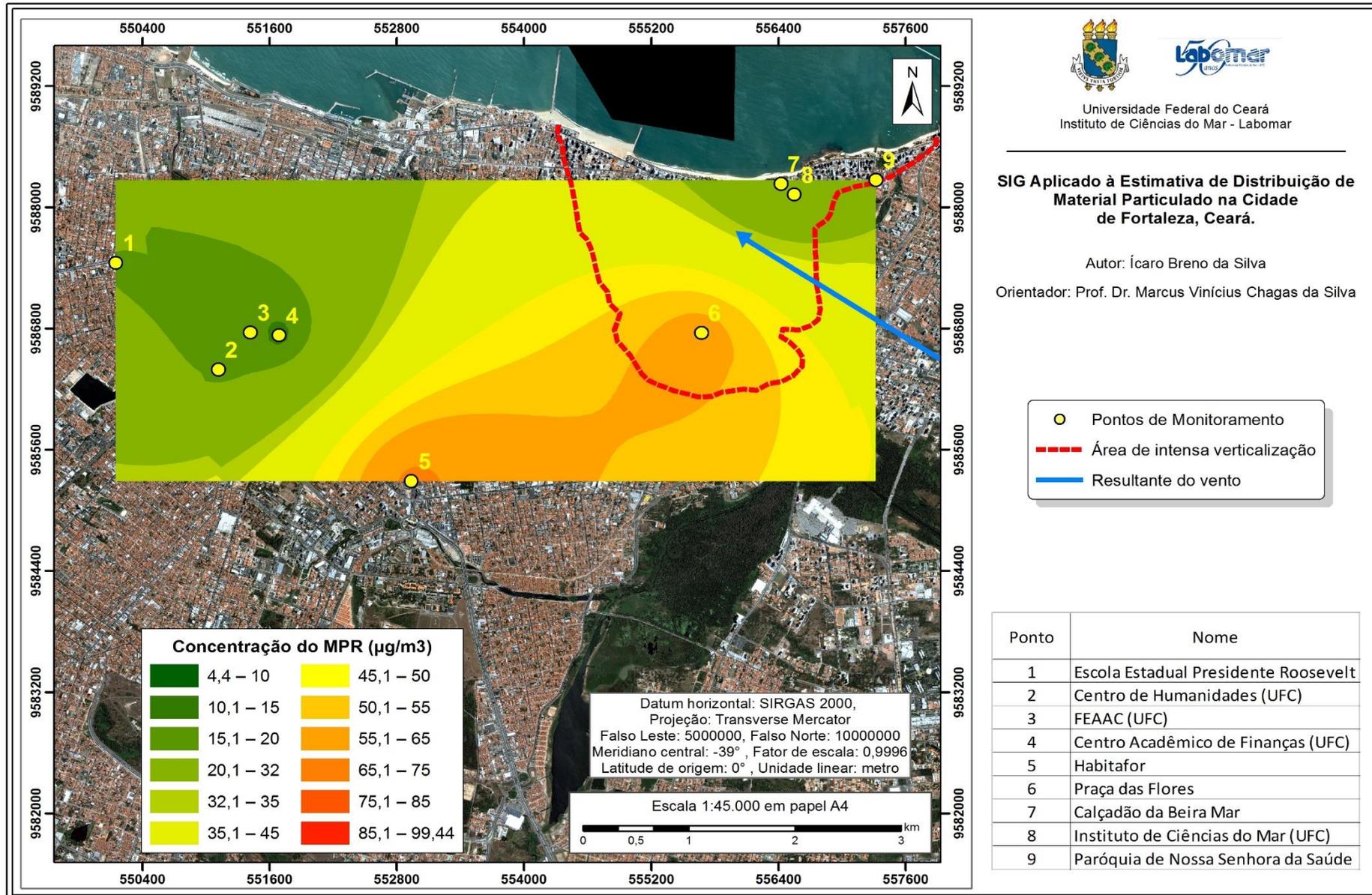
### 5.1. Concentração do Material Particulado Respirável em período chuvoso

O resultado da *krigagem* para as amostras deste período podem ser visualizados na Figura 21. Percebe-se nessa imagem a nítida influência dos ventos na concentração dos poluentes, onde o calçadão da Beira Mar – região litorânea e, portanto, de ventos de maior intensidade – apresenta uma pequena concentração de MPR em relação aos outros pontos, ficando acima apenas do Centro Acadêmico de Finanças da UFC. Ao afastar-se da orla, passando pelos pontos 8 e 9, a influência da topografia urbana (delimitado pela linha tracejada), como demonstrado na Figura 21, modifica a velocidade, direção e intensidade dos ventos, criando áreas menos ventiladas, o que dificulta a dispersão dos poluentes. Tal fenômeno é verificado pelo gradiente de cor entre as plumas de concentração dos pontos 6 e 7, que apresenta um acréscimo na concentração do poluente a medida que aproxima-se do interior da cidade.

Ao sair da área onde a influência topográfica é maior, espera-se uma diminuição da concentração do MPR em relação ao ponto 6. Porém isso não é observado, já que o ponto 5 (Habitafor), foi o que apresentou a maior concentração de MPR em relação aos demais. Tal fato faz com que a interpolação entre os valores seja superestimada nessa região, devido a uma maior proximidade entre os dois pontos de maior concentração: Praça das Flores e Habitafor.

Na parte oeste da cidade encontramos os pontos de 1 a 4. Tal região é caracterizada pelo predomínio de edificações de pequeno porte, como demonstrado na Tabela 3. Além disso, os locais onde foram realizadas as amostras encontram-se, de uma maneira geral, em avenidas mais largas. Todos esses fatores favorecem uma maior circulação do vento, dando a região um maior potencial em dispersar o MPR. Isso é notado pela semelhança na concentração do poluente entre essa localidade e a região litorânea.

Figura 21 – Mapa de concentração do MPR em período chuvoso elaborado a partir das técnicas de *krigagem*.

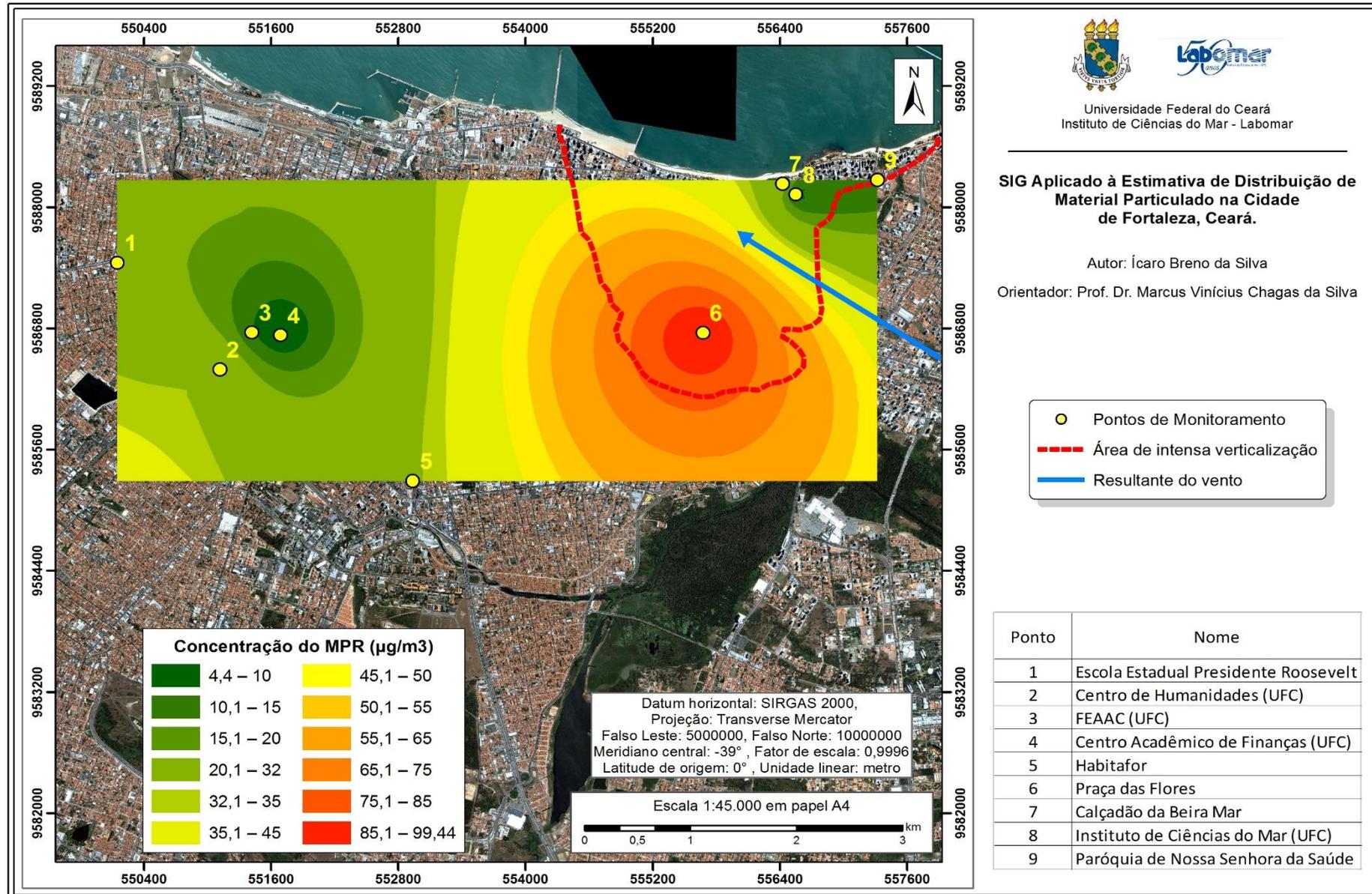


Fonte: Autor.

## 5.2. Concentração do Material Particulado Respirável em período seco

O resultado da *krigagem* para as amostras do período seco podem ser observadas na Figura 22. A imagem reforça a influência dos ventos na concentração do poluente em estudo, onde duas das quatro menores concentrações desse período encontram-se no litoral (pontos 8 e 9). As edificações mostram-se como um fator determinante na dispersão do poluente, onde, na medida em que aumenta-se a concentração do MPR incrementa-se a concentração das edificações e o inverso é válido.

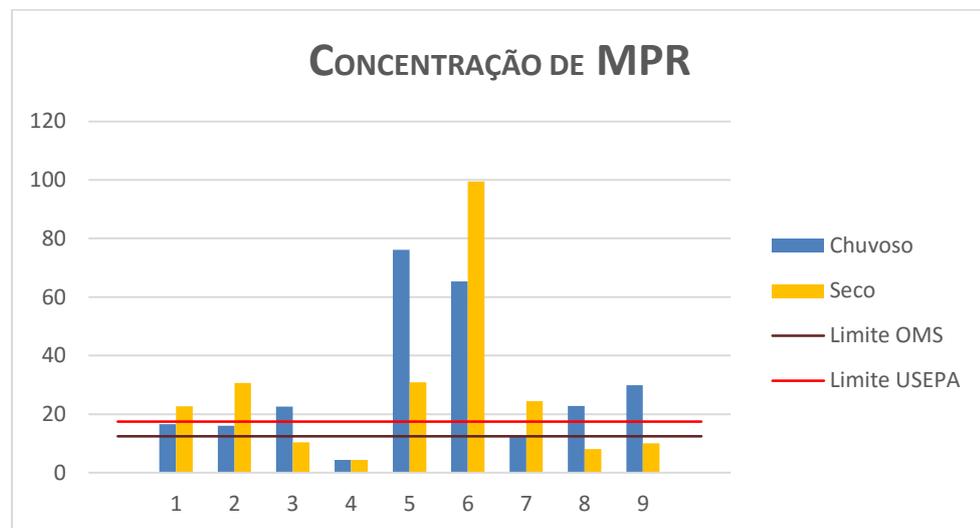
Figura 22 – Mapa de concentração do MPR em período seco elaborado a partir das técnicas de *krigagem*.



Fonte: Autor.

Em comparação ao período chuvoso, percebeu-se um aumento na concentração do MPR na maioria dos pontos analisados (Gráfico 2), a saber: pontos 1, 2, 4, 6 e 7. A explicação para isto está no fato de que, no período chuvoso, a precipitação favorece a sedimentação do material particulado suspenso, lavando a atmosfera (BRUNO, 2005). A influência da sazonalidade climática na concentração do MPR também foi comprovada por Magalhães (2005), onde o mesmo autor comparou as concentrações do mesmo poluente em período chuvoso e em período seco na cidade de Ouro Preto – MG.

Gráfico 2 – Comparação da concentração de MPR em período chuvoso e seco.



Fonte: Rocha (2014) e Silva (2016).

Os demais pontos de amostragem: 3, 5, 8 e 9, apresentaram concentrações menores em comparação ao período anterior. Tal acontecimento pode ser explicado a partir da correlação entre a concentração do MPR e outros parâmetros meteorológicos, como observado por Trivedi, Ali e Beig (2014). Entre as principais variáveis, podemos citar: camada limite atmosférica, temperatura, velocidade vertical do vento e umidade do solo.

Um solo com elevada umidade apresenta, devido as propriedades da água, um elevado poder de coesão entre as moléculas. Essa característica permite que as partículas de MPR fiquem aderidas ao solo, evitando a sua ressuspensão. Porém, em período seco, devido à baixa umidade do solo, os ventos verticais acabam por vencer esse poder de coesão, disponibilizando novamente o MPR na atmosfera. No caso destas variáveis, quanto menor a umidade do solo e maior a velocidade dos ventos verticais, maior será a concentração do poluente na atmosfera.

Outra variável importante é a camada limite atmosférica. Esta camada apresenta uma variação sazonal na sua altura, alterando o volume avaliável para a dispersão dos poluentes. As variações máximas ocorrem no verão, onde as altas temperaturas aquecem rapidamente a superfície terrestre, gerando uma transferência de calor para a atmosfera por meio de ventos ascendentes (convecção). Assim, quanto maior a temperatura, mais alta será a camada limite atmosférica, que por sua vez, apresentará um volume maior para a dispersão dos poluentes. O que explica os dados encontrados nos pontos 3, 5, 8 e 9.

### 5.3. Modelos Geoestatísticos e Validação Cruzada

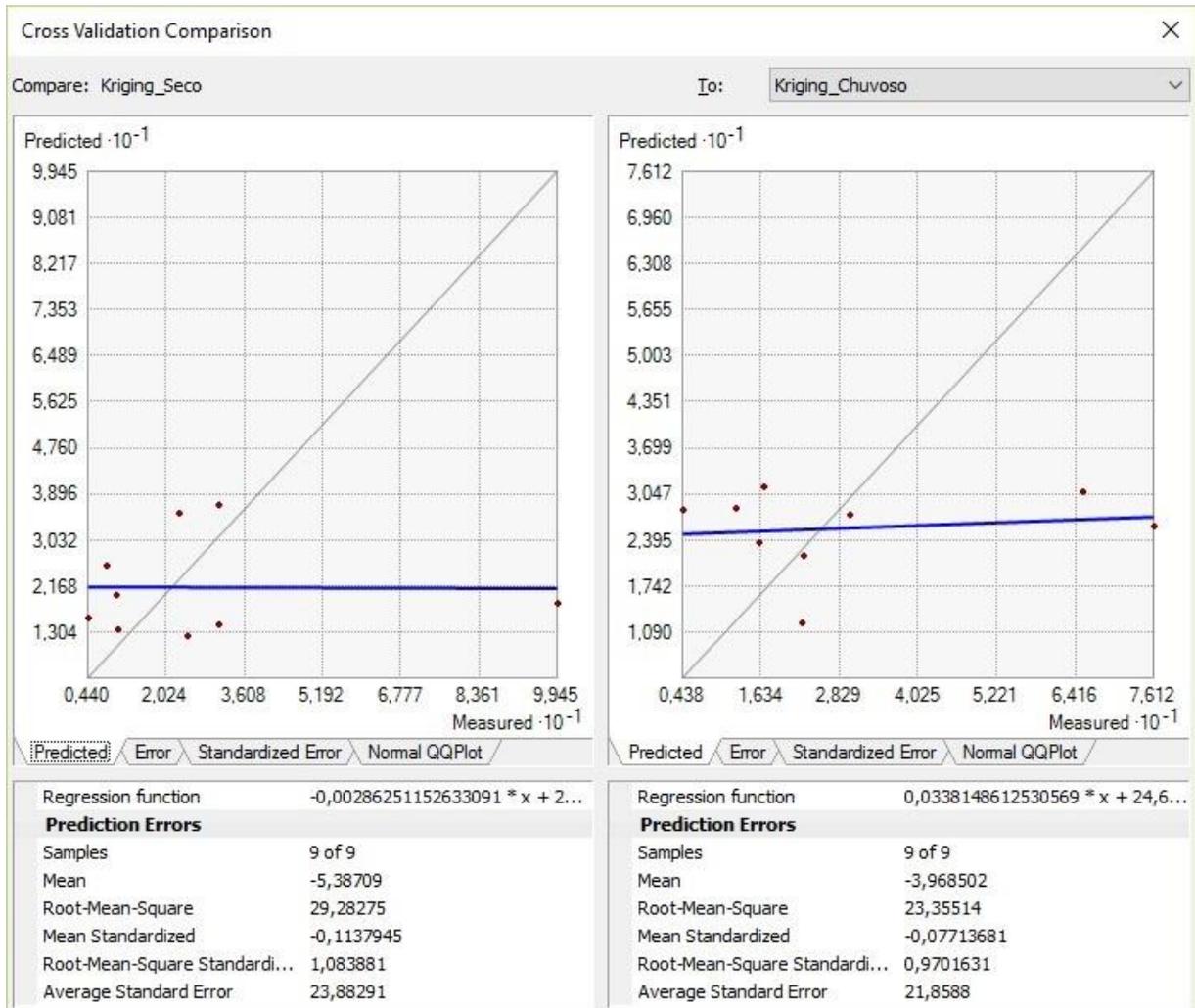
Os modelos geoestatísticos utilizados espelharam bem a relação do MPR com a dinâmica urbana da cidade de Fortaleza. Porém, a fim de verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais, foi realizada a validação cruzada dos modelos em período seco e chuvoso com o objetivo de constatar a acurácia dos mesmos. Para Andriotti (2003), tal procedimento não prova que o modelo do semivariograma esteja correto, apenas demonstra que o mesmo não é grosseiramente incorreto. A validação cruzada dos dois modelos está representada na Figura 23.

Como esperado, os dois períodos apresentaram uma média padronizada (*Mean Standardized*) igual a 0 e uma raiz quadrada média padronizada (*Root-Mean-Square Standardized*) igual a 1 (em período seco) e próximo de 1 (em período chuvoso). Esses dados demonstram que a estimativa foi satisfatória, pois atendeu os seguintes critérios: não tendenciosidade e variância mínima entre o valor estimado e o valor verdadeiro.

A média do desvio padrão proveniente da *krigagem* (*Average Standard Error*) é mais satisfatória quanto mais próximo de 0 for o seu valor. Porém, os dois períodos apresentaram valores maiores que 20. Isto é explicado pelo número de amostras utilizada. O número de amostras desta pesquisa é considerado relativamente baixo se comparado com os diversos trabalhos existentes: Santos, Gontijo e Nicole (2012), que usaram 126 pontos e Oliveira Junior *et al.* (2011), que usaram 135 pontos.

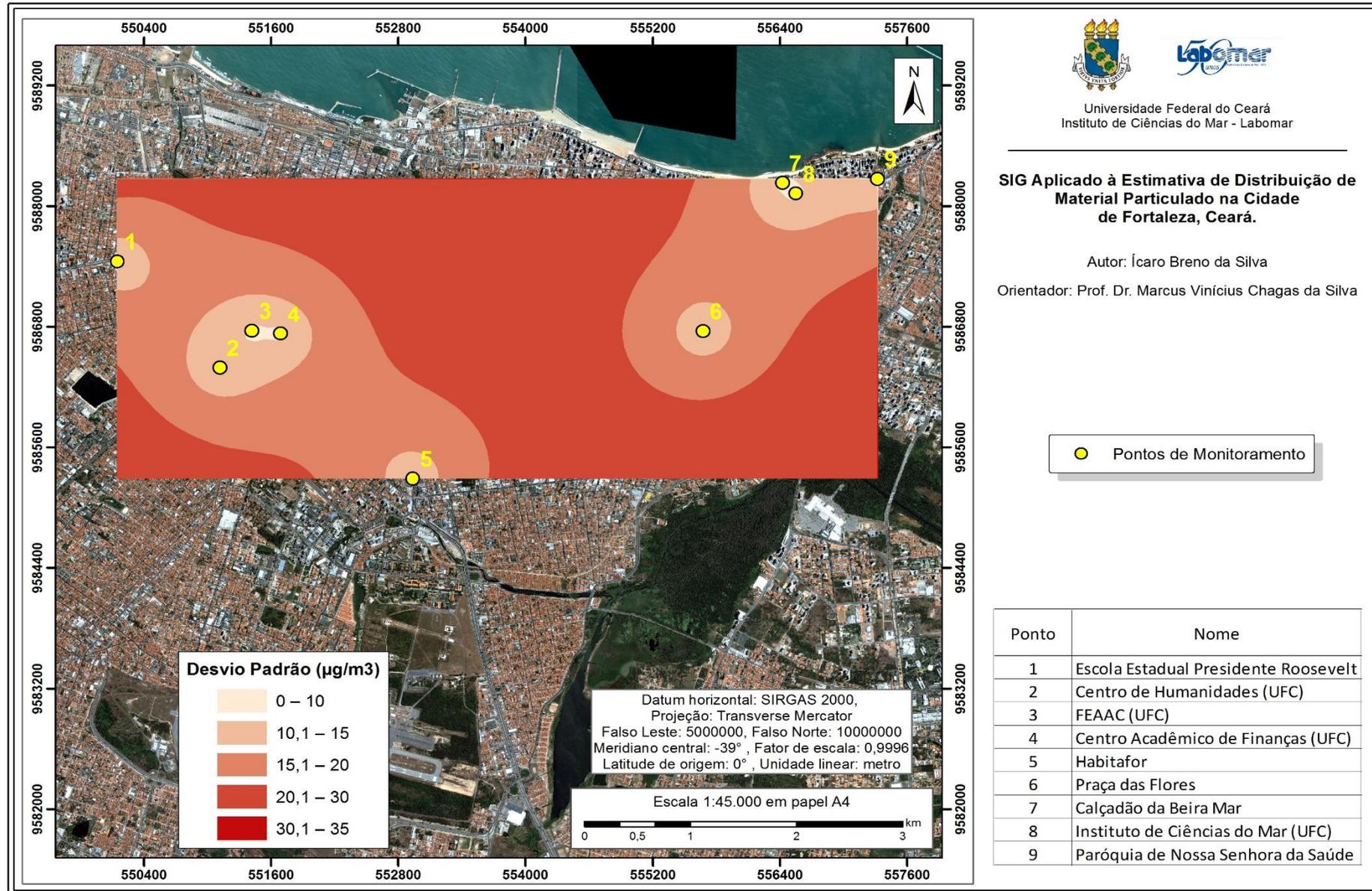
Nos mapas de desvio padrão para os períodos analisados (Figuras 24 e 25), observa-se que quanto mais próximo das amostras, menor é a variação (desvio padrão) com relação a verdade de campo, ou seja, ao valor não amostrado. Logo, quanto maior o número de amostras de campo, mais confiável será o valor predito pela *krigagem*, diminuindo a possibilidade de valores superestimados ou subestimados.

Figura 23 – Comparação da validação cruzada entre os períodos seco e chuvoso.



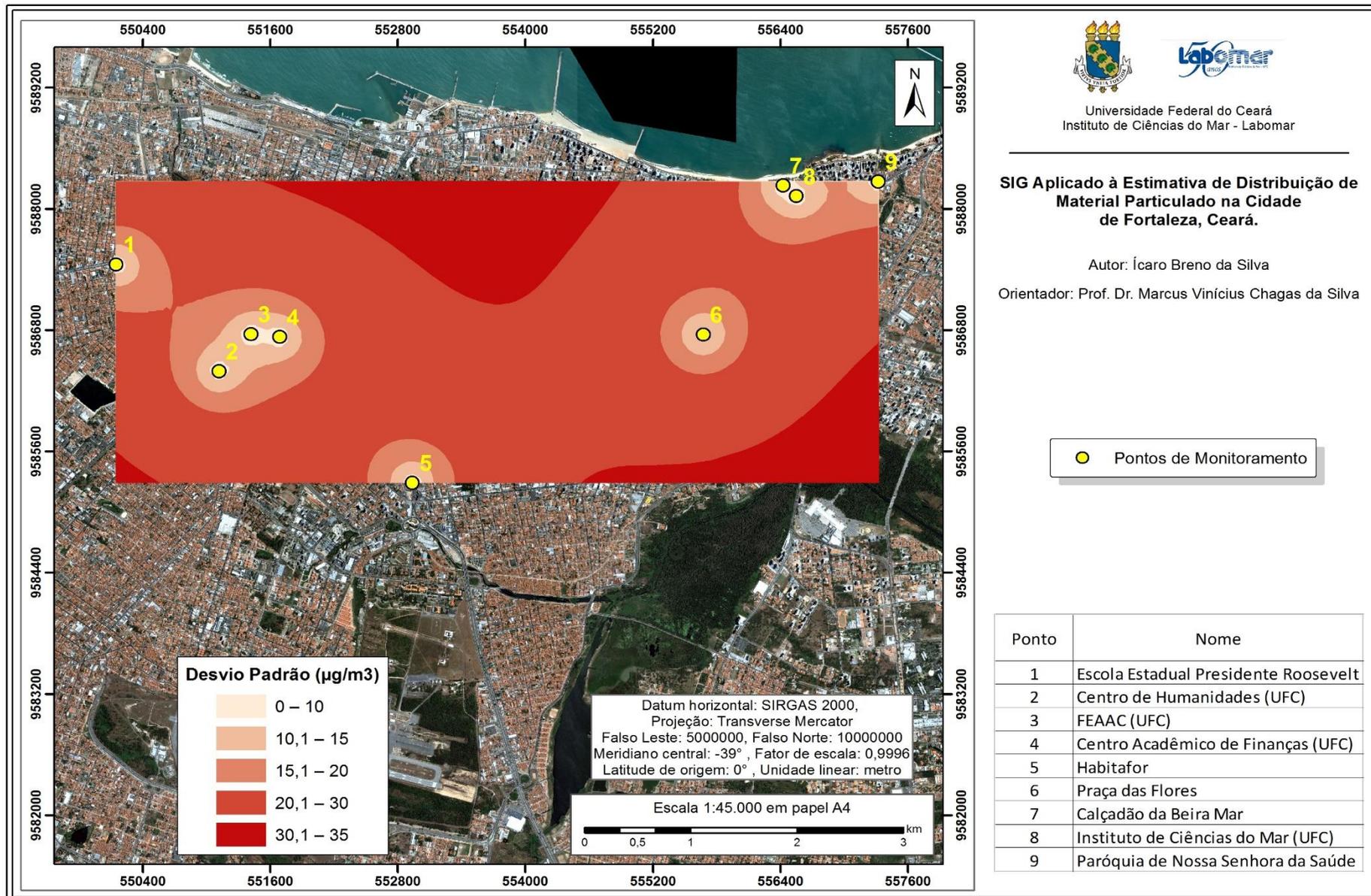
Fonte: Autor.

Figura 24 – Mapa de desvio padrão da predição geostatística em período chuvoso.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Mapa de desvio padrão da predição geostatística em período seco.



Fonte: Autor.

## 6. CONCLUSÃO

O SIG mostrou-se como uma ferramenta satisfatória de suporte à decisão para gestores, aliando dados de poluição, topografia urbana e condições meteorológicas em um banco de dados geográficos. 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. Porém, sua representatividade é bastante dependente da malha amostral e da qualidade dos dados disponíveis. No caso deste estudo, necessita-se de uma malha amostral maior ao longo dos dois períodos (chuvoso x seco), com o intuito de reduzir os altos valores apresentados pelo desvio padrão.

Em relação aos parâmetros climáticos, a precipitação mostrou-se como um fenômeno responsável por limpar a atmosfera e diminuir a concentração dos poluentes em alguns locais analisados, pois a mesma favorece a sedimentação do MPR suspenso. Já em relação ao vento, deve-se realizar um monitoramento contínuo desse parâmetro ao longo dos períodos seco e chuvoso, já que o mesmo tem a capacidade de disponibilizar o MPR para a atmosfera a partir de ventos ascendentes. Percebe-se também 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. Outro parâmetro que se faz necessário o monitoramento é a altura da camada limite atmosférica, já que a mesma tem relação direta com o volume avaliável para a dispersão do poluente.

Os mapas produzidos fazem uma projeção para a qualidade do ar no setor norte da cidade de Fortaleza. Tal projeção alerta para a qualidade do ar em alguns locais da cidade, que podem ser amenizados a partir de um planejamento do uso do solo, como a implantação de áreas verdes.

Os métodos geoestatísticos utilizados no presente trabalho foram de grande importância para a geração do mapa de concentração de MPR, servindo também como subsídio à gestão urbana. Desta forma, o conhecimento prévio das áreas com altos índices de poluição auxilia em planos de direcionamento do crescimento urbano, como o PDDU ou em planos de mobilidade urbana. Além disso, a modelagem prévia da qualidade do ar local favorece a tomada de decisões, como a implantação ou não de uma determinada atividade industrial. Outra

vantagem é que, em trabalhos futuros, pode-se disponibilizar os dados coletados em uma plataforma online, facilitando o acesso a informação.

## REFERÊNCIAS

- AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 13. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. 332 p.
- BAGNARA, D.; PRIETTO, P. D. M; TIMBOLA, R. S. Aplicação da krigagem ordinária na modelagem do pH e da dureza da água subterrânea na área central de Passo Fundo – RS. **Rev. Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 12, n. 20, p.15-22, nov. 2012.
- BETTINI, C. Conceitos básicos de geoestatística. *In*: MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: modelos e aplicações ambientais**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2007. Cap. 4. p. 191-234.
- BRANCO, K. G. C.; ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L. O clima em áreas verdes intra-urbanas de Fortaleza. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, n. 5, p.443-454, nov. 2012.
- BRASIL. Constituição (1990). Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. Seção 1, p. 15.937-15.939.
- BRUNO, Ricardo Luiz. **Material particulado atmosférico na cidade de São Carlos-SP: quantificação e identificação de fontes**. 2005. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- BUENO, Flavia Faria. **Qualidade do ar e internações por doenças respiratórias em crianças, no município de Divinópolis, MG, Brasil**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado Curso de Educação, Cultura e Organizações Sociais) – Fundação Educacional de Divinópolis, Universidade Estadual de Minas Gerais, Divinópolis, 2008.
- CÂMARA, Gilberto. *et al.* **Banco de Dados Geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005. 490 p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros/bdados/index.html>>. Acesso em ago. de 2014.

CÂMARA, Gilberto. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 252 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1995.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001. 345 p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em ago. de 2014.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Mapas e suas representações computacionais. *In*: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 1998. Cap. 2. p. 13-29.

CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, José Simeão. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1998. 195 p. Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/)>. Acesso em jan. de 2015.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. *In*: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 1998. Cap. 5. p. 126-161.

CANÇADO, J. E. D. *et al.* Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **J. Bras. Pneumol.**, São Paulo, v. 32, supl. 2, p. 5-11, mai. 2006.

CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. **Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas – uma proposta**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 24 p. (Documentos, 3).

CASTRO, A. H.; SILVA, G. M.; ARAÚJO, R. S. Qualidade do ar - parâmetros de controle e efeitos na saúde humana: uma breve revisão. **Rev. Holos**, Natal, v. 5, p.107-121, nov. 2013.

COWEN, D. J. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?. **Photogramm. Eng. Remote. Sens.**, Mariland, v. 54, n. 11, p.1551-1555, nov. 1998.

DAMILANO, Daniela Cristina Rezende. **Estudo da influência da poluição atmosférica e das condições meteorológicas na saúde em São José dos Campos**. 2006. 44 p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN). **Frota de Veículos**. 2015. Disponível em: < <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em 23 de fev. de 2016.

EASTMAN, Ronald. **IDRISI for Windows: introdução e exercícios tutoriais**. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 245 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Embrapa Monitoramento por Satélite**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/monitoramento-por-satelite/>>. Acesso em 5 de set. de 2014.

FARACO, M. A. *et al.* Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p.463-476, mar. 2008.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. 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**, Presidente Prudente, v. 1, n. 1, p.15-28, dez. 2005.

FERREIRA, B. A. *et al.* Estudo ecológico da qualidade do ar do município de Divinópolis, Minas Gerais, Brasil. **BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports**, Londrina, v. 2, n. 2, p. 140-142, jun. 2013.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FORTALEZA. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano**. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 1992. 185 p.

GOMES, J. P.; VELHO, L. Abstraction Paradigms for Computer Graphics. **The Visual Computer**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 5, p. 227-239, mai. 1995.

GONÇALVES JÚNIOR, Sérgio José. **Avaliação da participação de material particulado e seus impactos à saúde humana em escolas próximas a vias de tráfego veicular e refinaria de petróleo**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GRANADOS-MUÑOZ, M. J. *et al.* Automatic determination of the planetary boundary layer height using lidar: one-year analysis over southeastern Spain. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 117, n. D18, p. 1-10, sep. 2012.

GUMPERTZ, M. **Applied Spatial Statistics**. Carolina do Norte: NCSU, 2001.  
Disponível em: <<http://www.stat.ncsu.edu/people/gumpertz/courses/st733/oldindex.html>>.  
Acesso em: 24 jul. 2015.

HOEKSEMA, R. J.; KITANIDIS, P. K. An application of geostatistical approach to the inverse problem in two-dimensional groundwater modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 7, p. 1003-1020, jul. 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativa da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de julho de 2015**. 2015. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2015/estimativa\\_dou\\_2015\\_20150915.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.pdf)>. Acesso: 23 fev. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil Básico Municipal**. 2014. Disponível em: <[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.

- JOHNSTON, Kevin. *et al.* **Using ArcGis Geostatistical Analyst**. Redlands: ESRI, 2004. 300 p.
- KAUR, S.; NIEUWENHUIJSEN, M. J.; COLVILE, R. N. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 41, p.4781-4810, fev, 2007.
- KRIGE, D. G. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, [S.l.], v. 52, n. 6, p. 119-139, dez. 1951.
- KURIMORI, Kauê Obara. **Bancos de dados geográficos e sistemas de informações geográficas para cadastramento imobiliário: Requisitos, modelos e aplicações**. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- LEITE, Renan Cid Varela. **Fortaleza: terra do vento: a influência na mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido**. 2010. 296 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- LIU, W. T. S. Classificação de imagem digital. *In*: LIU, W. T. S. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 14. p. 724-757.
- LONGLEY, Paul. *et al.* **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 540 p.
- LOURENCO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p.150-160, fev, 2005.
- MAGALHÃES, Lucas Carlúcio. **Estudo do material particulado atmosférico e metais associados às partículas totais em suspensão na cidade de Ouro Preto, MG**. 2005. 65

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MEDEIROS, C. B.; PIRES, F. Banco de dados e sistemas de informações geográficas. *In*: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 1998. Cap. 3. p. 31-45.

MINAKI, C.; AMORIM, M. C. C. T. Análise da qualidade ambiental urbana. **Mercator.**, Fortaleza, v. 11, n. 24, p.229-251, jan, 2012.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo; MENDONÇA, Francisco de Assis. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.

MONTGOMERY, Edward Gerrard. **Experiments in wheat breeding**: experimental error in the nursery and variation in nitrogen and yield. Washington: Government Printing Office, 1913. 61 p.

MOREIRA, Gregori de Arruda. **Métodos para obtenção da altura da camada limite planetária a partir de dados de lidar**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MOURA, Marcelo de Oliveira. **O clima urbano de Fortaleza sob o nível do campo térmico**. 2008. 281 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

NICOLUSSI, F. H. *et al.* Poluição do ar e doenças respiratórias alérgicas em escolares. **Rev. Saúde Pública**, São Paulo, v. 48, n. 2, p.326-330, abr. 2014.

OKE, Timothy Richard. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. New York: Routledge & Kegan Paul, 1987. 435 p.

OLIVEIRA JUNIOR, J. C. *et al.* Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de solos da formação Guabirota, Curitiba (PR). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p.1481-1490, out. 2011.

ORTIZ, Glaucy da Conceição. **Aplicação de métodos geoestatísticos para identificar a magnitude e a estrutura da variabilidade espacial de variáveis físicas do solo**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Ciências Exatas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

PINTO, J. P. *et al.* Caracterização de MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> em ar ambiente de estacionamento fechado de estabelecimento comercial em Londrina-Paraná. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, Londrina, v. 6, n. 2, p. 1-7, jun. 2014.

PRENZEL, B. Remote sensing-based quantification of land-cover and land-use change for planning. **Progress in Planning**, New York, v. 61, n. 4, p.281-299, mai, 2004.

RADICCHI, A. L. A. A poluição na bacia aérea da região metropolitana de Belo Horizonte e sua repercussão na saúde da população. **Rev. Bras. Estud. Popul.**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 1, p.195-198, jun. 2012.

REIS, Cássio Pinho. **Simulação de fatores que afetam as predições obtidas por krigagem ordinária**. 2013. 45 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Aplicada e Biometria) – Departamento de Estatística, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

RIOS, J. L.; BOECHAT, J. L. Poluição intra e extradomiciliar. **Rev. Bras. Alerg. Imunopatol.**, São Paulo, v. 34, n. 2, p.42-48, jun. 2011.

ROCHA, Camille Arraes. **Pressão sonora, sensação térmica, poluição do ar e seus riscos associados como indicadores da qualidade ambiental em áreas usadas para esporte e lazer – Fortaleza, CE**. 2014. 76 f. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ROCHA, S. C.; SANTOS, R. G.; FROTA, S. Perfil audiométrico e de emissões otoacústicas evocadas por produto de distorção em gestores de trânsito expostos a monóxido de carbono e ruído. **Rev. Cefac**, São Paulo, v. 15, n. 2, p.287-296, abr. 2013.

ROSSI, R. E.; DUNGAN, J. L.; BECK, L. R. Kriging in the shadows: Geostatistical interpolation for remote sensing. **Remote Sens. Environ.**, New York, v. 49, n. 1, p.32-40, jul, 1994.

SANTOS, Alexandre Silva. **Krigagem de teores de ouro da mina de Caimar-Goiás**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SANTOS, E. O. J.; GONTIJO, I.; NICOLE, L. R. Variabilidade espacial de cálcio, magnésio, fósforo, potássio no solo e produtividade da pimenta-do-reino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p.1062-1068, out. 2012.

SCHMIDT, E.; NUCCI, J. C. Avaliação da qualidade ambiental urbana do bairro de Santa Felicidade, Curitiba/PR. **Rev. Geografia: Ensino e Pesquisa**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p.51-61, abr. 2010.

SEIDEL, D. J.; AO, C. O.; LI, K. Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: comparison of methods and uncertainty analysis. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 115, n. D16, p. 1-15, aug. 2010.

SILVA, L. T.; MENDES, J. F. G. Determinação do índice de qualidade do ar numa cidade de média dimensão. *In*: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 2., 2006, Braga. **Anais...** Braga: Pluris, 2006. p. 5-16.

SILVA, Tanara Lima. **Partículas respiráveis na cidade de Fortaleza-CE: exposição diária, distribuição sazonal e sua relação com fluxo veicular**. 2016. Monografia

(Graduação em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. No prelo.

SOUSA, N. V. *et al.* Determinação da altura da camada limite planetária em Fortaleza-CE utilizando radiossondagens do Projeto Chuva. **Revista Ciência e Natura**, Santa Maria, v. Esp., p.344-346, dez. 2013.

SOUZA, Marcos José Nogueira. *et al.* **Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza: Subsídios ao Macrozoneamento Ambiental e à Revisão o Plano Diretor Participativo - PDPFor**. Fortaleza: Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2009. 169 p.

TEIXEIRA, Marcília Bruna dos Reis. **Comparação entre estimadores de semivariância**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

TRIVEDI, D. K.; ALI, K.; BEIG, G. Impact of meteorological parameters on the development of fine and coarse particles over Delhi. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 478, p.175-183, abr. 2014.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. 2010. Disponível em:  
<<http://www3.epa.gov/ttn/naaqs/criteria.html>>. Acesso em 8 de jan. de 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air Quality Guidelines: Global Update**. 2006. Disponível em:  
<[http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf?ua=1)>. Acesso em 8 de jan. de 2016.

## ANEXO A – CARTA DE ACEITE PARA PUBLICAÇÃO DE ARTIGO

### Correspondência entre Editor/Autor

Editor  
2016-01-06 04:47

Assunto: Uso da Geoestatística na Avaliação da Distribuição de [EXCLUIR](#)  
Material Particula

---

Prezado autor,

Seu artigo foi aceite para publicação na RBGF. Informamos que após o aceite seu artigo passa para a fase de editoração. O serviço de editoração passou a ser terceirizado pela RBGF devido ao grande número de artigo submetido a RBGF. Assim, caso tenha interesse que seu artigo seja publicado favor pagar a taxa de 150,00 (cento e cinquenta reais).

Dados bancários

Banco do Brasil

Agencia: 3613-7

CC: 58759-1

Favor enviar comprovante de pagamento através deste e-mail

JDG

Editor

Josiclêda Domiciano Galvício

Editora Chefe da Revista Brasileira de Geografia Física

<http://www.revista.ufpe.br/rbgfe>

**Fechar**