



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS RELEVANTES NA REGIÃO DO PORTO - PORTUGAL

Bárbara Pavani Biju

Trabalho final apresentado à disciplina
análise espacial de dados geográficos

Professores: Dr. Antônio Miguel Vieira
Monteiro e Dr. Eduardo Camargo

INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS RELEVANTES NA REGIÃO DO PORTO - PORTUGAL

Barbara Pavani Biju¹

¹ Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto

RESUMO

A poluição atmosférica é a causa da morte precoce de milhares de pessoas na Europa e manutenção da qualidade do ar e o monitoramento da concentração dos poluentes se faz necessária. Principalmente os poluentes que causam prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente. Estimar a concentração de poluentes como O_3 nos principais centros urbanos é feita a partir da rede de monitoramento de qualidade do ar. Apesar de ser um método eficiente, a cobertura geográfica desta rede muitas vezes não é suficiente para estimar a exposição da população a este poluente. Assim, diferentes técnicas e metodologias são empregadas para avaliar a concentração como a geoestatística. Os métodos geoestatísticos podem ser empregados onde é necessário inferir os valores obtidos a partir das estações de monitoramento a fim de reduzir a descontinuidade dos dados. Muitas vezes, alguns dados podem estar em falta para determinado poluente e outras variáveis podem ser necessárias para uma melhor predição. Com isso técnicas específicas para como a cokrigagem pode auxiliar em uma melhor estimativa, já que o método utiliza outros dados para efetuar a estimativa. Por fim, este trabalho tem o objetivo de estimar a concentração de O_3 para o grande Porto, a partir dos dados obtidos das estações de qualidade do ar, com o auxílio de outras variáveis como o NO_2 e MP_{10} . Apesar das limitações relacionadas ao número de dados obtidos para este poluente, o método demonstrou ser de grande valia para estimar a concentração em locais onde há falta de dados e pode ser uma ferramenta importante para estimar outros poluentes onde as estações não façam a sua medição, mas fazem de poluentes relevantes que estão ligados ao poluente objeto de estudo, como no caso deste trabalho, o O_3 .

Palavras-chave: material particulado; poluição do ar, cokrigagem, qualidade do ar, ozônio, dióxido de nitrogênio.

Abstract

Air pollution is the cause of early death for thousands of people in Europe and maintenance of air quality and monitoring the concentration of pollutants is necessary. Principally the pollutants that harm human health and the environment. Estimating the concentration of pollutants such as O_3 in the main urban centers is made through the air quality monitoring network. Despite being an efficient method, the geographic coverage of the network is often not sufficient to estimate the population's exposure to air pollutants. Thus, different techniques and methodologies are used to assess their concentration, such as geostatistics. Geostatistical methods can be used where it is necessary to infer values obtained from monitoring stations in order to reduce data discontinuity. Often, some data may be missing for a particular pollutant and other variables may be needed for a better prediction. Thus, specific techniques such as cokriging can help to better estimate pollutant concentration, as the method uses other data to make the estimate. Finally, this work aims to estimate the concentration of O_3 for the Greater Porto, from data obtained from air quality stations, with the help of other variables such as NO_2 and PM_{10} . Despite the limitations related to the number of data obtained for this pollutant, the method proved to be of great value to estimate the concentration in places where there was a lack of data and can be an important tool to estimate other pollutants where stations do not measure them but measures relevant pollutants that are linked to the object of study, as in the case of this work, the O_3 .

Keywords: particulate material; air pollution, cokriging, air quality, ozone, nitrogen dioxide.

1. INTRODUÇÃO

Todos os anos a exposição a poluição atmosférica causa milhões de mortes e impacta a saúde da população pelo mundo. Segundo as diretrizes mais atuais da Organização Mundial da Saúde sobre qualidade do ar, a exposição a esses poluentes foi reconhecida pela “*World Health Assembly*” como fator de risco para doenças não comunicáveis como asma, câncer, derrame, isquemia cardíaca entre outras (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). Os poluentes podem ser divididos entre primários, aqueles emitidos diretamente na atmosfera e os secundários, formados a partir dos poluentes primários através de reações químicas e processos microfísicos. Na Europa as principais fontes de poluentes são os setores de transporte (emissão veicular), energia, indústria, agricultura e resíduos sólidos (EEA, 2018). Os poluentes também são categorizados de acordo com os danos causados a saúde humana, dentre eles destacam-se o Material Particulado, Ozônio, Dióxido de Nitrogênio e Dióxido de Enxofre (EPA, 2021).

O NO_2 é emitido na atmosfera através da queima de combustíveis, que tem como principal fonte de emissão os veículos em geral, usinas elétricas e é utilizado como indicador de outros óxidos de nitrogênio (. A curta exposição ao NO_2 pode causar doenças respiratórias ou agravá-las e a exposição prolongada pode contribuir para o desenvolvimento de asma e aumentar a suscetibilidade de infecções respiratórias. NO_2 e outros NO_x , reagem com outros poluentes na atmosfera e formam MP e O_3 , além de reagir com outros poluentes e formar chuva ácida que é prejudicial ao meio ambiente (EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2020).

O Material Particulado, também chamado de partículas de poluição é uma mistura de partículas sólidas com gotículas líquidas encontradas no ar. Algumas podem ser vistas a olho nu, como poeira, fumaça e fuligem. Mas outras são tão pequenas que é necessário um microscópio eletrônico para visualizá-las, essas são chamadas de partículas inaláveis, que são partículas menores que 10 micrômetros (EPA, 2021). Partículas com menos de 2.5 micrômetros, são chamadas de material particulado fino. Uma parte do MP é originado de obras de construção civil, estradas não pavimentadas, incêndios e etc. A maior parte do MP formado na atmosfera é resultado de reações complexas de produtos químicos como o NO_2 e SO_2 ((EEA, 2018).

O Ozônio (O_3) quando localizado na estratosfera é bom para saúde, pois nos protege dos raios Ultravioletas. Mas na troposfera é um poluente prejudicial a saúde e ao meio

ambiente e é um dos principais ingredientes do “smog”(WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021). O O₃ não é emitido diretamente na troposfera, mas é criado pelas reações químicas entre os NO₂ e os Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). A produção de O₃ ocorre quando os poluentes emitidos por veículos, usina elétrica, refinarias, indústria química e outras fontes reagem quimicamente com a luz do sol. Este poluente é de grande preocupação, pois como dito, além de afetar a saúde humana, afeta os ecossistemas e impacta a economia (EPA, 2021).

Alguns estudos experimentais demonstraram que em locais com alta concentração de O₃ o MP pode intensificar o impacto negativo deste poluente, ou seja, a interação entre O₃ e o MP, está associada com a piora na condição respiratória e saúde da população (TZORTZIOU et al., 2015). Aliás a formação de ambos na atmosfera é atribuída aos mesmos poluentes, o NO₂ e os COVs. Desta forma, a concentração de MP e NO₂ podem servir de indicadores para estimar a concentração de ozônio e identificar áreas onde há uma maior exposição da população a este poluente, além das áreas que são cobertas pela rede de medição de qualidade do ar.

Apesar dos dados de estações de qualidade do ar serem fiáveis há certas limitações, como a descontinuidade dos dados que pode ocorrer, por exemplo, devido a distância entre elas e/ou a topografia. Logo, diferentes métodos começaram a ser empregues para superar estas limitações e estimar a concentração dos poluentes atmosféricos com o intuito de monitorar a qualidade do ar. Atualmente diferentes técnicas são empregues como, a análise espacial de dados geográficos e a geoestatística(TYAGI; SINGH, 2013). A geoestatística é uma área da estatística que utiliza o conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial, estimando o valor de uma dada propriedade para um local onde não foi medida e para estimá-lo geralmente é utilizado o método de interpolação conhecido como krigagem (REGINA GREGO; PEREIRA DE OLIVEIRA; ROSA VIEIRA, 2014)

Em vista disso, este estudo tem como objetivo estimar a concentração ozônio para a área de estudo com o apoio de outras variáveis. O método que permite este tipo de estimativa é conhecido como cokrigagem, que consiste em utilizar informações de diferentes variáveis para melhor estimar a variável de interesse (PEREIRA et al., 2015). A variável de interesse neste caso o O₃ (Z1), será estimado com o auxílio do NO₂ e PM₁₀. Com a cokrigagem será possível estimar melhor o O₃ para a área de estudo e verificar a autocorrelação para a Z1 e a relação cruzada entre ela as outras duas variáveis.

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

A região selecionada para este trabalho, é onde está situada a rede norte de monitoramento de qualidade do ar e a maior parte das estações de monitoramento encontram-se na região metropolitana da cidade do Porto, situada no norte de Portugal. O Porto é uma cidade costeira, de grande importância para a economia de Portugal e é considerada património cultural da humanidade. Além da importância apresentada, a região foi escolhida devido ao número de estações da rede de medição contidas na região e que monitoram a qualidade do ar, densidade urbana, em especial o MP10 (Figura 01). Os dados espaciais, como por exemplo, limite administrativo, para a região de estudo foram obtidos no site Registro Nacional de Dados Geográficos (SNIG) de Portugal (DGT, 2018).

Localização Estações de controle da qualidade do ar - Porto Litoral

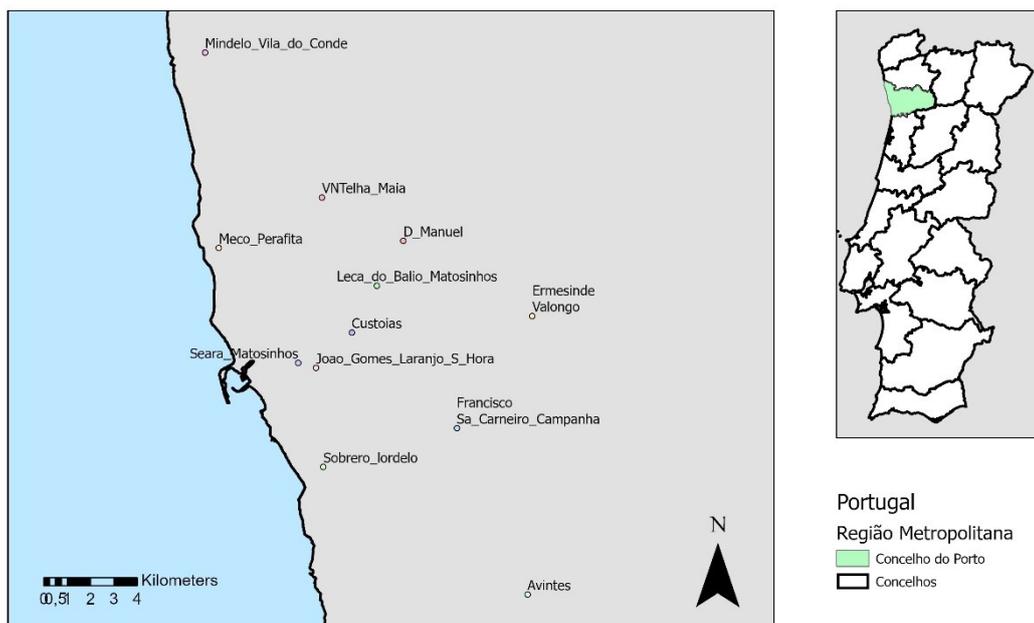


Figura 01 – Localização Area de Estudo e Estações
Elaboração: Autora, 2021

As normas vigentes sobre concentração e exposição aos poluentes atmosféricos na União Europeia são regulamentadas pela Agência Ambiental Europeia, que segue as diretrizes definidas pela OMS. Em Portugal, o órgão responsável pela gestão e avaliação da qualidade do ar e a rede de medição é a Agência Ambiental Portuguesa (APA). Através

do Decreto-lei nº 102/2010 que transpõe a diretiva Diretiva 2008/50/CE do parlamento europeu - relativa aos objetivos fixados para qualidade do ar ambiente, levando em consideração as normas e orientações da Organização Mundial da Saúde. Fixa os valores limite (VL) para monitorização dos poluentes, isto é, um nível é fixado com o intuito de reduzir os efeitos nocivos na saúde e no ambiente. Há dois VL nacionais, a média anual e a média horária. Para PM₁₀, o VL anual é de 40µg/m³ e a média diária 50 µg/m³, não podendo exceder mais de 35 vezes por ano. Para NO₂ a VL de alerta é de 400 µg/m³ (medido em três horas consecutivas) e anual 40 µg/m³, para O₃ é 120 µg/m³ a não exceder mais de 25 dias, em média, por ano civil, num período de três anos para proteção a saúde humana (MINISTÉRIO DO AMBIENTE E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO, 2010)

A rede de medição do Norte é constituída por 22 estações. Dentre elas, 12 estações que constam na figura acima, estão situadas na zona denominada Porto Litoral. A medição da concentração do NO₂, O₃ e PM₁₀, nestas estações é feita de hora em hora. Posteriormente os dados são tratados estatisticamente e disponibilizados na plataforma de informações de qualidade do ar – QualAr, onde pode-se obter a concentração média horária e a concentração média diária anual. Os dados estão disponíveis desde o ano de 2001 até 2019. O ano selecionados para este trabalho foram os anos de 2019, pois a qualidade dos dados fora verificada pela equipe responsável da agência ambiental.

2.2. Análise Descritiva

Os dados obtidos para os poluentes das 12 estações na plataforma QualAr, são disponibilizados em ficheiros no formato *comma-separated values* (csv) e estão desconsolidados. Portanto, é necessário o seu tratamento prévio para que se possa descrever os aspectos e características importantes deste conjunto de dados. Todo o tratamento estatístico foi feito no software R, devido ao grande volume de dados diários. Para cada estação obteu-se um arquivo com 8760 observações, para cada poluente. Para cada uma das 12 estações foi feita a estatística descritiva de cada poluente. Também foi verificada a normalidade dos dados através de histogramas e do teste de Shapiro-Wilk. Esta etapa também se faz necessária para o uso posterior dos dados para interpolação como também no software de Sistema de Informação Geográfica escolhido para este trabalho.

2.3. Cokrigagem

Com os resultados obtidos da análise estatística e exploratória dos dados, foram elaboradas duas tabelas com as coordenadas geográficas e os atributos para cada uma das 12 estações deste trabalho, para os anos de 2019. Com estes dados foi possível efetuar a técnica de interpolação mais adequada, a cokrigagem(SINGH et al., 2011). A técnica é constituída por várias etapas, sendo elas: estatística descritiva (feita previamente), análise do semivariograma, validação e por fim, a cokrigagem(GOOVAERTS, 1998).

Primeiramente foram feitos os cálculos, ajustes e seleção do semivariograma, para obter-se a variabilidade espacial da concentração para todos os poluentes para a área de estudo, definindo também o modelo do semivariograma. Esta etapa, como as posteriores foram efetuadas no software de SIG. Diferentes modelos foram testados para verificar o que melhor se adequava a distribuição amostral para a área de estudo. No caso da cokrigagem, há um semivariograma para cada variável de interesse, ou seja, entre a variável de interesse e entre as variáveis auxiliares(PEREIRA et al., 2015; STEIN; CORSTEN, 1991; WACKERNAGEL, 2017).

Em seguida foi efetuada a validação cruzada para verificar qual modelo provém a melhor predição, também indica se o modelo e se os parâmetros associados a ele são razoáveis, esta validação foi feita para todos os modelos do semivariograma testados. Primeiramente remove-se um ou mais dados locais e prevê-se o seu valor, utilizando os restantes dos dados dos outros locais. Assim, pode-se olhar os valores e comparar os valores estimados com o observado para aquele local, obtendo informações uteis sobre a qualidade do modelo de kringagem (ESRI, 2015)

Com o modelo definido, com a validação cruzada efetuada em sequência foi feita a estimação da cokringagem, obtendo-se um mapa de valores estimados e outro de variância, no caso o mapa de incerteza. Esta variância (incerteza) da interpolação, considera além da localização dos pontos de dados, mas também sua dispersão local (YIN et al., 2021), ou seja, identifica locais ou regiões onde a amostragem pode ser melhorada. Tendo como dado de saída um mapa de estimativa e variância para O₃ no ano de 2019.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a fase de análise exploratória dos dados, fora verificado que há uma descontinuidade da medição em certas estações para o O₃, como constatado em (ROUX

et al., 2020). Isto pode ter ocorrido por diferentes fatores externos, como por exemplo, manutenção da estação. Mas na maioria dos casos, a medição foi feita de forma contínua, permitindo que as análises necessárias fossem efetuadas. Na tabela (tabela 01) abaixo são apresentados os resultados da estatística básica para os dados das 12 estações para 2019.

| Parâmetros | NO2 | O3 | MP10 |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| Quantidade Estações | 12 | 12 | 12 |
| Média | 25.67 | 43.17 | 19.08 |
| Mediana | 24 | 42.50 | 19 |
| Mínimo | 16 | 29 | 14 |
| Máximo | 45 | 56 | 24 |
| Quartil inferior | 18.75 | 39.75 | 17.75 |
| Quartil superior | 28.75 | 47.50 | 21 |
| p-valor (Shapiro- Wilk) | | | |

Tabela 01 – Estatística descritiva
Elaboração: Autora, 2021

A média e a mediana possuem valores próximos, o que indica que a distribuição das variáveis é aproximadamente assimétrica NO₂ (figura 03), O₃ (figura 04) e MP₁₀ (figura 05). Estas análises são de extrema importância, pois pode haver erros que devem ser corrigidos ou eliminados. Também foi feito o teste Shapiro-Wilk de normalidade para todos os poluentes os anos, onde constatou-se que a distribuição dos dados tem distribuição normal ($p > 0.05$).

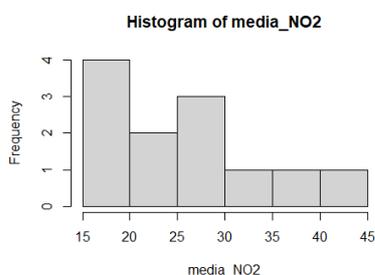


Figura 03 – Histograma dados NO2
Elaboração: Autora, 2021

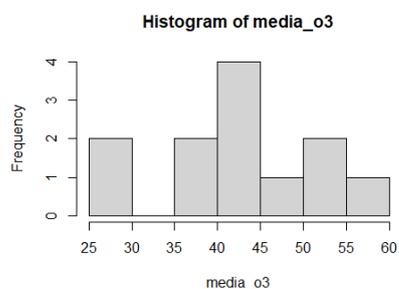


Figura 04 – Histograma dados O3
Elaboração: Autora, 2021

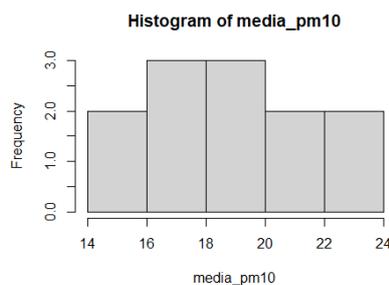


Figura 05 – Histograma dados MP10
Elaboração: Autora, 2021

Após a análise exploratória, foram testados diferentes modelos de semivariograma para as variáveis. A análise estrutural dos dados é necessária para verificar a autocorrelação e da dissimilaridade entre os pares observados através do semivariograma (CAMARGO; DRUCK; CÂMARA, 2004), para a concentração de O₃ para o ano de 2019. Foram feitos os ajustes necessários para modelar o semivariograma a fim de entender o comportamento estrutural das variáveis que são objetos de estudo deste trabalho. Para os dados de O₃ obteve-se o seguinte semivariograma omnidirecional e seu modelo de ajuste. O modelo mostrado na figura 06 tem os seguintes parâmetros: Estrutura tipo esférica; Efeito Pepita (Co) = 0,88 e Alcance = 5300.

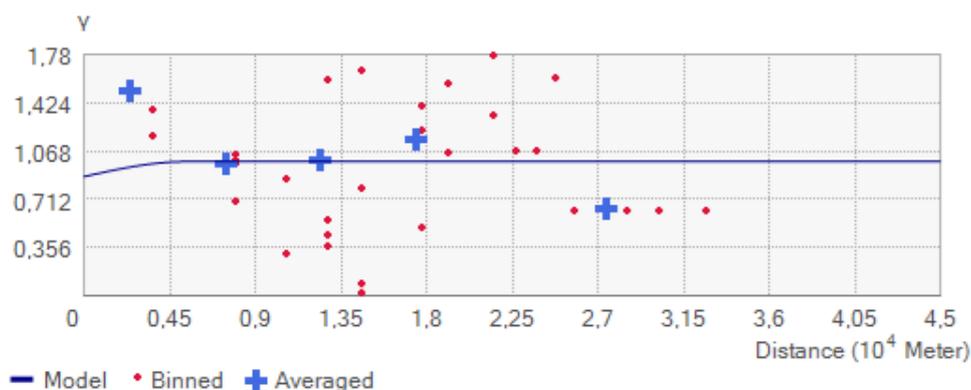


Figura 06: Semivariograma – O₃
Elaboração: Autora, 2021

Para o MP₁₀, o semivariograma omnidirecional mais adequado e seu modelo de ajuste exibidos na figura 07 possui os seguintes parâmetros: Estrutura tipo esférica; Efeito Pepita (Co) = 0,25; e Alcance = 5300.

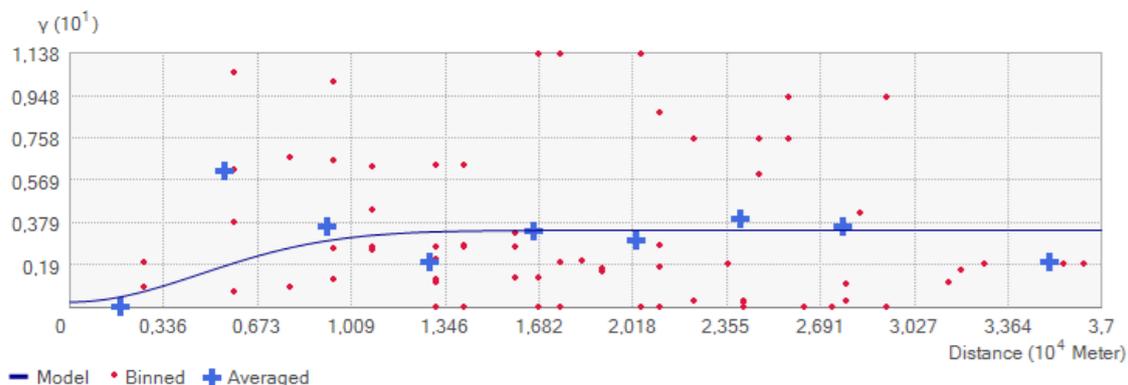


Figura 07: Semivariograma – MP₁₀
Elaboração: Autora, 2021

Para o NO₂, o semivariograma omnidirecional mais adequado e seu modelo de ajuste exibidos na figura 06 possui os seguintes parâmetros: Estrutura tipo esférica; Efeito Pepita (Co) = 0,19; e Alcance = 5300.

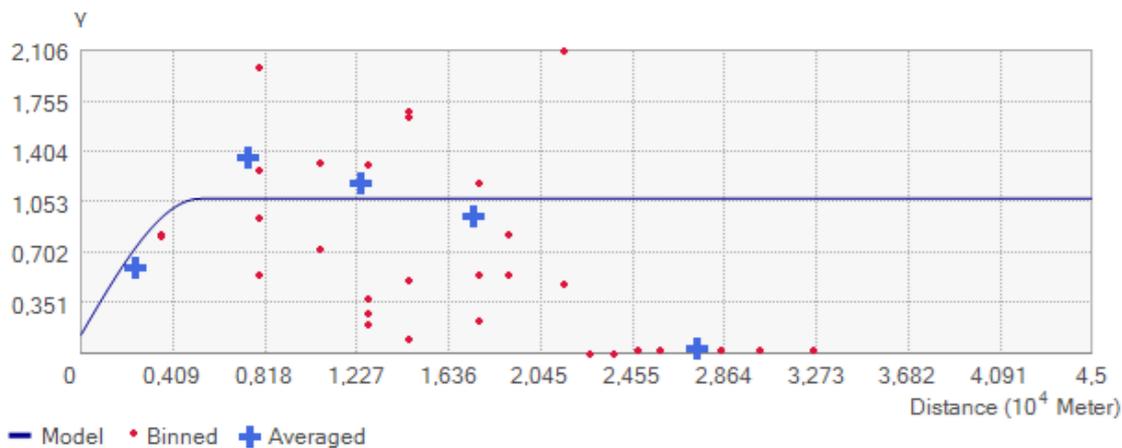


Figura 06: Semivariograma – NO₂
Elaboração: Autora, 2021

O modelo escolhido para representar a estrutura de correlação espacial para ser utilizada na inferência de cokrigagem, foi o modelo com o menor erro padrão da estimativa, no caso o método geoestatístico definido foi cokrigagem ordinária. Como citado anteriormente, o uso deste método se deve a sua simplicidade, pois ele utiliza o modelo fornecido pelo variograma e por fornecer a incerteza associada a estimativa, por meio da variância.

Ao mesmo tempo, foi efetuada a validação cruzada a partir do método “*leave one out*”, ou verificação cruzada, para verificar a adaptação do modelo aos dados utilizados na interpolação. O método consiste em remover um único ponto do conjunto de dados e utiliza os pontos restante para prever para o valor para o local onde o ponto foi removido, em seguida este valor depois é comparado com valor medido e as análises estatísticas necessárias são geradas para determinar a acurácia da predição (ESRI, 2015). Os resultados obtidos estão descritos abaixo (tabela 02).

| Parâmetros | 2019 |
|------------------------------------|-------|
| Número de amostras utilizadas | 12 |
| Média | 0,044 |
| Raiz Quadrada da Média | 8,51 |
| Média Padronizada (erro) | 0,005 |
| Raiz Quadrada da Média Padronizada | 1,01 |
| Erro Padrão Médio | 8,41 |

Tabela 02 – Dados obtidos validação cruzada.
Elaboração: Autora, 2021

Esta escolha se deu, pois, o método foi que melhor se ajustou e que resultou em um menor erro de predição. No caso, a raiz quadrada da média padronizada deve estar próxima a zero, assim a predição dos erros padronizada é válida. Se for maior que um, a variabilidade das predições está subestimada, menor que um, a variabilidade das predições está superestimada. Também deve levar em consideração outros dados, como por exemplo, o valor do erro padrão médio. Se este valor está próximo ao valor da raiz quadrada média, a avaliação da variabilidade da predição está feita de forma correta, se o erro padrão médio é maior, há uma superestimação dos dados na predição. Mas se for menor que a raiz quadrada média, há uma subestimação da estimativa da variabilidade (ESRI, 2015)

Neste caso, a predição dos erros padronizados está subestimada - acima de 1, mas o valor está muito próximo a zero. Também foi constatada uma subestimação da variabilidade da predição, pois está abaixo do valor da raiz quadrada média. Outra medida que indica a escolha deste método é a média padronizada, qual deve estar próxima a zero. Nos outros métodos, estes valores ficaram distantes de zero, demonstrando que a predição possivelmente estava enviesada. A partir destes dados, foram gerados os produtos da estimativa e da variância da cokrigagem (incerteza) para o ano de 2019. Na imagem abaixo (figura 07), podemos ver os produtos matriciais gerados para o ano de 2019. A primeira imagem corresponde a estimativa dos valores de O_3 , a segunda a variância da estimativa.

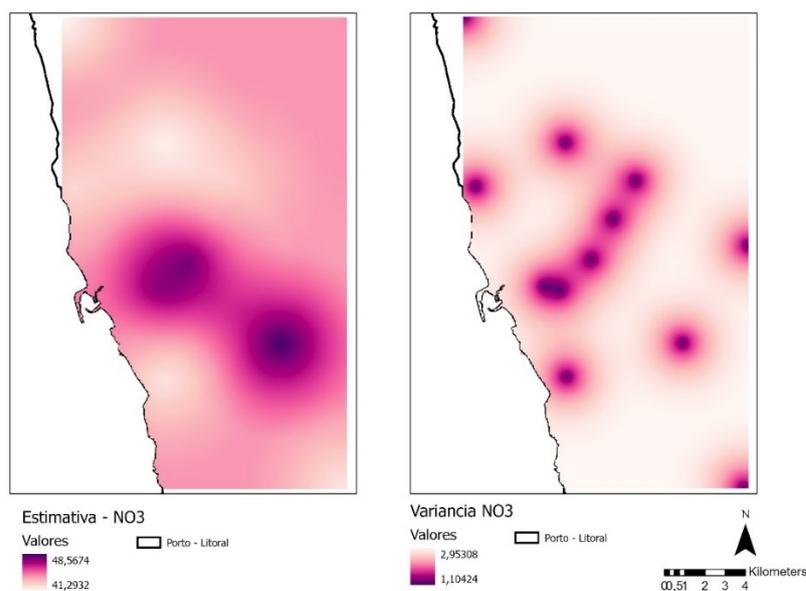


Figura 07: Mapa O_3 – 2019
Elaboração: Autora, 2021

Podemos perceber que o maior grau de variância, a incerteza da estimativa ocorre onde não há estações próximas. Este é um comportamento esperado, já que reflete a baixa variância sobre os pontos e alta entre os pontos de dados estimados. Mas o valor desta incerteza é baixo, comparado aos valores estimados. Os valores onde há menor variância são valores medidos diretamente pelas estações da região de estudo. Estes dados foram validados pela APA, portanto podemos considerar que são fiáveis, lembrando que há incertezas para certas regiões da área de estudo, há uma variância entre os valores estimados e medidos e há a falta de alguns dados de medição para o poluente objeto de estudo.

As áreas com maior concentração de O_3 , é a região onde há uma concentração maior de tráfego, é o centro da cidade. Local com maior densidade urbana, comércio e, portanto, espera-se uma maior concentração de O_3 . O O_3 é um poluente secundário, formado a partir da emissão de NO_x , em particular o NO_2 , como também a partir dos Compostos Orgânicos Voláteis mais calor e luz solar (EPA, 2021). A emissão destes poluentes se dá principalmente pela emissão veicular e a mancha escura na estimativa é onde temos as principais ruas e estradas que cortam a cidade do Porto e que ligam a cidade, aos municípios vizinhos. Mas ao olhar para os valores de NO_2 e PM_{10} em algumas estações na área de estudos percebe-se que há locais onde a concentração destes poluentes é menor que o O_3 .

Esta constatação leva a considerar que há uma emissão maior de COVs na região que está contribuindo para o aumento da concentração de O_3 , além do NO_2 , deve-se levar em consideração não há monitoramento para COVs em todas as estações. Pois, a variação da concentração de MP_{10} acompanha a de NO_2 , mas o O_3 não. Outro detalhe que deve ser levado em conta é que na estimativa, os valores mantiveram-se entre 41 e 48 $\mu g/m^3$, enquanto os valores medidos diretamente pelas estações estão entre 29 e 56 $\mu g/m^3$. Este valor mais baixo tem como origem as estações mais distantes e que houve descontinuidade na medição ao longo do ano, o que contribuiu para um valor mais baixo para o poluente em questão, mas os valores estimados não são discrepantes, quando comparado a média e mediana dos valores encontrados na estatística descritiva.

Por fim, os valores constatados tanto na estatística descritiva, quanto na estimativa demonstram que a concentração de O_3 para a região não ultrapassam os Valores Limites definidos pela legislação nacional e europeia. Apesar da estimativa não demonstrar essa

ultrapassagem e apesar de serem considerados normais, estão acima dos valores para regiões mais afastadas do centro do Porto, o que pode indicar que durante as medições horárias pode haver a ultrapassagem dos VL estipulados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método escolhido para estimar a concentração de O₃ para a região de estudo, demonstrou ser uma ferramenta com grande potencial para identificar locais onde a concentração deste ou outros poluentes é preocupante e há poucas medições. Neste trabalho em questão, a utilização da técnica obteve resultados esperados para a região onde há uma maior concentração de emissão veicular.

Com esta técnica outras variáveis podem ser utilizadas para melhorar a estimativa da concentração para este poluente. Como constatado houve estações onde a concentração de O₃ estava muito acima de NO₂ e PM₁₀ para o ano de 2019 e tudo indica que há a emissão de COVs, poluentes que contribuem para a formação de O₃. Com isso, seria interessante agregar outros dados espaciais de estradas, rodovias, tráfego, direção dos ventos e topografia, para uma melhor estimativa.

Para validar este método seria interessante comparar com outros dados já consolidados, como os dados do CAMS e para diferentes poluentes (fonte). A partir desta comparação, pode ser validado os resultados obtidos na estimativa deste trabalho. A comparação com outros métodos de kringagem a fim de averiguar qual método tem uma melhor predição para o poluente em questão, pode ser uma alternativa para verificar se o método pode ser utilizado em áreas onde a amostragem é baixa.

Outra questão a se considerar é que o modelo isotrópico foi o utilizado nesta área de estudo e esta escolha foi feita pois simplifica a modelagem e deve ser considerada como uma limitação a este estudo. Por isso, utilizar outras variáveis e até um período menor, como o verão, onde a concentração de O₃ é maior, seria também outra forma para estimar da melhor maneira possível a concentração deste poluente ou outros, principalmente onde os dados são escassos. O que pode ajudar a reduzir as incertezas e variância relacionada a estimativa para os dados da região de estudo.

Apesar da fiabilidade dos dados das estações de monitoramento, nem toda a rede tem medição para os poluentes O₃, NO₂ e VOCs. Portanto, outros métodos como a geoestatística espacial aliada a dados de sensoriamento remoto de qualidade ar, podem

ser técnicas que ajudem no monitoramento dos poluentes considerados preocupantes devido aos impactos que tem na saúde e meio ambiente, já que apesar de não haver medição de todos os poluentes em todas as estações, há relação entre a concentração de certos poluentes como NO₂, com outros também de grande preocupação, como o MP e O₃.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise de Superfícies por Geoestatística Linear. In: DRUCK, S. et al. (Eds.). . **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

DGT. **Registo Nacional de Dados Geográficos - Direção-Geral do Território**. Disponível em: <<https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/metadata/6cfbb716-17bc-46aa-ae06-22e72a42a25a>>. Acesso em: 14 set. 2021.

EEA. **Europe's urban air quality — re-assessing implementation challenges in cities**. [s.l: s.n.].

EPA. **Criteria Air Pollutants | US EPA**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>>. Acesso em: 31 dez. 2021.

ESRI. **ArcGIS Pro Resources | Tutorials, Documentation, Videos & More**. Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/resources>>. Acesso em: 11 maio. 2021.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **Air quality in Europe - 2020 report**. Copenhagen: [s.n.]. Disponível em: <<http://europa.eu>>.

GOOVAERTS, P. **Ordinary Cokriging Revisited 1Mathematical Geology**. [s.l: s.n.].

MINISTÉRIO DO AMBIENTE E DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO. **Decreto-Lei n.º 102/2010** . Disponível em: <<https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/102-2010-342123>>. Acesso em: 31 dez. 2021.

PEREIRA, R. et al. **GEOESTATÍSTICA APLICADA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO UTILIZANDO O VESPER**. [s.l: s.n.].

REGINA GREGO, C.; PEREIRA DE OLIVEIRA, R.; ROSA VIEIRA, S. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: Campinas: [s.n.]. p. 74–83.

ROUX, E. et al. Toward an early warning system for health issues related to particulate matter exposure in brazil: The feasibility of using global pm2.5 concentration forecast products. **Remote Sensing**, v. 12, n. 24, p. 1–45, 2 dez. 2020.

SINGH, V. et al. A cokriging based approach to reconstruct air pollution maps, processing measurement station concentrations and deterministic model simulations. **Environmental Modelling and Software**, v. 26, n. 6, p. 778–786, jun. 2011.

STEIN, A.; CORSTEN, L. C. A. **Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure**. [s.l: s.n.].

TYAGI, A.; SINGH, P. Applying Kriging Approach on Pollution Data Using Gis Software. **International Journal of Environmental Engineering and Management**, n. November 2013, 2013.

TZORTZIOU, M. et al. Spatial and temporal variability of ozone and nitrogen dioxide over a major urban estuarine ecosystem. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 72, n. 3–4, p. 287–309, 2015.

WACKERNAGEL, H. Multivariate Kriging. In: **Wiley StatsRef: Statistics Reference Online**. [s.l.] Wiley, 2017. p. 1–5.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. Genebra: [s.n.]. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

YIN, S. et al. Spatiotemporal variation and distribution characteristics of crop residue burning in China from 2001 to 2018. **Environmental Pollution**, v. 268, 2021.