

C&S SIG

FORMAÇÃO DO OZONO TROPOSFÉRICO: SIMULAÇÃO E MODELAÇÃO POR AGENTES

Identificação de áreas críticas nos municípios de Porto e Matosinhos

Ana Paula Fagulha de Almeida

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas
de Informação Geográfica

**FORMAÇÃO DO OZONO TROPOSFÉRICO: SIMULAÇÃO E
MODELAÇÃO POR AGENTES**

Identificação de áreas críticas nos municípios de Porto e Matosinhos

Dissertação orientada
por Professor Doutor
André Oliveira

Fevereiro de 2018

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas está devidamente assinalada e é efetuada referência a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição.

Lisboa, 27 de fevereiro de 2018

DECLARATION OF ORIGINALITY

I declare that the work described in this document is my own and not from someone else. All the assistance I have received from other people is duly acknowledge and all the sources (published and not published) are referenced.

This work has not been previously evaluated or submitted to NOVA Information Management School or elsewhere.

Lisbon, February 27, 2018

AGRADECIMENTOS

Ao Tiago, à Catarina e ao Vasco e, obviamente, ao meu orientador, Professor Doutor André Oliveira que, com otimismo, me acompanhou até aos últimos minutos deste trabalho.

FORMAÇÃO DO OZONO TROPOSFÉRICO: SIMULAÇÃO E MODELAÇÃO POR AGENTES

Identificação de áreas críticas nos municípios de Porto e Matosinhos

RESUMO

Este trabalho pretende fornecer um método complementar de determinação das zonas mais afetadas pelo poluente ozono dentro da área do município do Porto e de Matosinhos, tendo em vista ser um elemento de apoio à decisão com utilidade na aplicação de medidas de adaptação às alterações climáticas. Para tal são efetuadas análises de distribuição espacial de poluentes a partir das medições existentes validadas oficialmente pela Agência Portuguesa do Ambiente, para determinar quais as áreas onde estes atingem concentrações mais elevadas. A análise espacial foi efetuada primeiro numa fase exploratória dos dados e representada num sistema de informação geográfica. Nesta fase foram efetuadas interpolações espaciais que permitiram concluir os níveis de exposição da população dentro da área de estudo. Seguidamente foi programada uma modelação por agentes, uma vez que a formação do ozono se trata de um sistema complexo (formado por reação fotoquímica a partir de poluentes primários e as condições ambientais adequadas), onde interagem diversos agentes. Os resultados permitiram um estudo mais detalhado ao nível da seção estatística, identificando aquelas onde o aparecimento do ozono pode ser mais problemático, sendo um complemento aos mapas de previsão existentes para este tipo de poluente, atualmente existentes apenas para a escala regional.

TROPOSPHERIC OZONE FORMATION: AGENT-BASED MODULATION AND SIMULATION

Identification of critical areas in the municipalities of Porto and
Matosinhos

ABSTRACT

This work intends to provide a complementary method to determine the zones most affected by the pollutant ozone within the area of the city of Porto and Matosinhos, in order to be a useful decision support element in the application of climate change adaptation measures. For this purpose, analyses of the spatial distribution of pollutants are carried out, from existing measurements officially validated by the Portuguese Environment Agency, to determine the areas where this pollutant reaches higher concentrations. Spatial analysis was performed, first in an exploratory phase of the data and represented in the ArcGIS geographic information system. In this phase, spatial interpolations were carried out to conclude the exposure levels of the population within the study area.

Ozone formation is a complex system (it is a secondary pollutant formed by photochemical reaction from primary pollutants) with multiple agents interacting with each other over time. An agent based model was coded to simulate this phenomenon. The results allowed a more detailed study at a level of the statistical block group, being a complement to the existing forecast maps for this type of pollutant, currently available only at the regional scale.

PALAVRAS-CHAVE

ozono

modelação por agentes

sistema complexo

poluente primário

poluente secundário

KEYWORDS

ozone

agent modeling

complex system

primary pollutant

secondary pollutant

ACRÓNIMOS

7th EAP - *Seventh Environment Action Programme*

ADMS - Urban Air Quality Management System

APDL- Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo

AEA- Agência Europeia do Ambiente

AERMODE - AMS/EPA Regulatory Model

AMS - American Meteorological Society

APA- Agência Portuguesa do Ambiente

AMP- Associação de Municípios de Portugal

BGRI- Base Geográfica de Referenciação de Informação

CAFE- *Clean Air For Europe*

CALGRID – California Grid Model

CALPUFF - California Puff Model

CAMx - Comprehensive Air Quality Model

CCDRN- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte

CERC - Cambridge Environmental Research Consultants

ClimAdaPT - Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas

COV- Compostos Orgânicos Voláteis

EPA - Environmental Protection Agency

EU- European Union

FDR- False Discovery Rate

FLEXPART - Flexible Particle

HYSPLIT - Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model

INE- Instituto Nacional de Estatística

ISEP- Instituto Superior de Engenharia do Porto

IDW - Inverse Distance Weighting

NAME - Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

NO - Monóxido de Azoto

NO₂ - Dióxido de Azoto

NO_x - Óxidos de Azoto

O₃ - Ozono

OMS- Organização Mundial de Saúde

OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ODD- Overview, Design concepts and Details

PM - *Particulate Matter*

Qualar- Rede de Monitorização da Qualidade do Ar

RAT- Reorganização Administrativa do Território das Freguesias

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

UAM - Urban Airshed Model

UE – União Europeia

VOC – Volatile Organic Compounds

WHO- World Health Organization

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: índices de qualidade do ar conforme às normas da EEA e disponibilizada pela APA para consulta pública através da Qualar (Qualar, 2017)	17
Tabela 2: Limiares de alerta. (a) as excedências ao limiar de alerta do ozono devem ser medidas ou estimadas durante três horas consecutivas (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010), (b) valor alvo a não exceder mais de 25 dias, em média, por ano civil, num período de 3 anos.....	17
Tabela 3: Ozono medido nas estações da rede Qualar ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	29
Tabela 4: Parâmetros utilizados na ferramenta IDW.....	33
Tabela 5: Categorias e seções do protocolo ODD.....	53
Tabela 6: Variáveis globais do modelo.....	54
Tabela 7: Classes de agentes.....	55
Tabela 8: Variáveis dos agentes.....	55
Tabela 9: Variáveis dos patches.....	56
Tabela 10: Valores por defeito do modelo	58
Tabela 11: Valores por defeito dos inputs de controlo associados às estradas	60
Tabela 12: Valores por defeito dos inputs de controlo associados às zonas industriais	61
Tabela 13: Shapefiles de entrada.....	67
Tabela 14: Resultados da diferença entre o Weighted Overlay com base nas medições e com base na simulação	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de operações	9
Figura 2: Área de estudo	22
Figura 3 Distribuição da população em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita) entre 0 e 4 anos.....	23
Figura 4: Distribuição da população em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita) entre 5 e 9 anos.....	24

Figura 5: População com mais de 65 anos em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita).....	24
Figura 6: Áreas industriais.....	25
Figura 7: Distribuição das concentrações de ozono para 2012	30
Figura 8: Distribuição das concentrações de ozono para 2013	30
Figura 9: Distribuição das concentrações de ozono para 2014	31
Figura 10: Distribuição das concentrações de ozono para 2015	32
Figura 11: Distribuição das concentrações de ozono em 2016	32
Figura 12: Índices medidos de radiação solar (em w/m ²) na área de estudo.....	34
Figura 13: Médias de temperatura na área de estudo	35
Figura 14: Medições médias dos poluentes em 2016 em cada uma das estações da área de estudo	36
Figura 15: Distribuição dos NO _x em 2016.....	37
Figura 16: Distribuição dos COV em 2015 (esquerda) e 2016 (direita)	38
Figura 17: Fluxo de trabalho para a ferramenta Weighted Overlay	39
Figura 18: Resultado das classificações obtidas com o Weighted Overlay a partir das concentrações de ozono medidas	42
Figura 19: Gráfico correspondente à contagem de pixels conforme verificado no mapa resultante da sobreposição ponderada com os valores das medições de ozono (fig. 18)	43
Figura 20: Resultados para o município do Porto a partir do ozono medido.....	44
Figura 21: Gráfico de resultados da análise para o município do Porto.....	44
Figura 22: Exemplo de inputs de controle dos poluentes.....	58
Figura 23 Exemplo de um momento de execução do modelo	63
Figura 24: Modelo após setup.....	66
Figura 25: Exemplo de mapa exportado para ArcGIS, com as rodoviárias principais utilizadas na modelação e áreas de indústria.....	70
Figura 26: Mapa de zonas com maiores concentrações de formação de ozono, resultante da simulação	72
Figura 27: Mapa resultante da análise Weighted Overlay com os resultados da simulação .	73
Figura 28: Gráfico relativo à contagem de pixels para cada classe, resultante da sobreposição ponderada com os valores produzidos pelo modelo em Netlogo	73
Figura 29: Mapa da análise para a área do Porto	74
Figura 30: Gráfico do Weighted Overlay com os resultados da simulação para a área do Porto.....	75
Figura 31: Pormenor para a zona do Meco.....	76

Figura 32: Pormenor para a zona de Custoias	77
Figura 33: Pormenor para a zona de Sobreiras.....	78
Figura 34: Mapa resultante do cálculo de diferença entre os resultados da análise para as medições e para o modelo.....	79
Figura 35: Mapa resultante do Fuzzy Overlay.....	81

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE	v
AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
PALAVRAS-CHAVE	xiii
KEYWORDS	xiii
ACRÓNIMOS	xiv
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
I PARTE	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1- Visão Geral	1
1.2- Objetivos	4
1.3- Metodologia e Dados	7
1.4- Estrutura da dissertação	9
II PARTE	13
1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA	13
1.1- Poluição em contexto urbano	13
1.5- Saúde Pública e Poluentes	15
2. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO E DADOS	21
3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	27
3.1- Ozono	27
3.2- Distribuição de Poluentes em 2016	35
3.3- Exposição da população a poluentes	39
3.4- Resultados e Análise	41
III PARTE	47
1. SISTEMAS COMPLEXOS E EMERGÊNCIA	47
2. MODELO EM NETLOGO	51
2.1- Overview	53
2.2- Design	62
2.3- Details	64
3. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO	71

IV PARTE	83
1. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	83
1.1- Conclusões	83
1.2- Desenvolvimentos Futuros	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
ANEXO 1	97
ANEXO 2	105
ANEXO 3	107
ANEXO 4	109
ANEXO 5	111
ANEXO 6	113
ANEXO 7	115
ANEXO 8	117
ANEXO 9	119
ANEXO 10	121
ANEXO 11	123
ANEXO 12	125

I PARTE

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo, e I Parte desta dissertação, descreve o tema do trabalho, as linhas orientadoras, motivações e objetivos, bem como a fundamentação da sua estrutura e apresentação da mesma, articulando a visão geral do problema da poluição atmosférica em ambientes urbanos com a perspectiva delimitada à área de estudo.

1.1- Visão Geral

O rápido crescimento das cidades, com a sua elevada aglomeração de pessoas, indústrias e veículos, implica um aumento de poluição atmosférica que atualmente se pretende não apenas evitar, mas também estudar e compreender os mecanismos de emissão e dispersão de poluentes, uma vez que estes têm implicações consideráveis na saúde pública (APA, 2010). Deste modo, a modelação da poluição atmosférica é uma área de interesse global e vários métodos de simulação têm vindo a ser desenvolvidos ao longo dos anos, com o seu início ainda na primeira metade do século XX (Daly & Zannetti, 2007).

Os diversos modelos desenvolvidos têm assumido um papel importante na compreensão das dinâmicas da poluição (Dunea, Iordache, *et al.*, 2017), dada a sua capacidade de quantificar a relação entre emissão e deposição e as concentrações dos poluentes. Os níveis de poluição atmosférica presentes numa dada área são determinados por inúmeras variáveis, incluídas nos modelos de transporte, dispersão, transformação química e fotoquímica e processos de deposição dos poluentes. Dependendo do fenómeno, existem modelos de dispersão como Pluma Gaussiana (*Gaussian Plume Model*), para pontos de emissão fixos ou os modelos

lagrangiano e euleriano¹ para emissões de trajetória (como é o caso de automóveis, aviões, navios, etc.) (Otte *et al.*, 2005) (Daly & Zannetti, 2007). Os modelos lagrangiano e euleriano foram desenvolvidos para lidar com o fenómeno de transporte dos poluentes a longas distâncias (Province, 2006) e, por isso, assumem que uma dada parcela de ar analisado mantém a sua “identidade”, ou seja, são modelos de trajetória e não modelam a deposição. De entre os mais conhecidos podem referir-se como exemplos o HYSPLIT da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Estados Unidos), o CALPUFF, adotado pela EPA (Environmental Protection Agency, Estados Unidos), o NAME (Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment, Reino Unido), ou o FLEXPART (Flexible Particle, Áustria). Embora se tratem de modelos de trajetória alguns evoluíram desde a sua criação, passando a incluir também a modelação de deposição dos poluentes, como é o caso do modelo lagrangiano FLEXPART (Stohl *et al.*, 2016). A sua aplicação ultrapassa o âmbito da poluição atmosférica e são muitas vezes utilizados na modelação de incidentes e catástrofes naturais e ainda na dispersão de doenças; veja-se, por exemplo a sua utilização (Mikkelsen *et al.*, 2003) num surto de febre aftosa (doença altamente contagiosa e que afeta o gado de casco bipartido) que em 2001 afetou várias regiões no Reino Unido.

Os modelos acima mencionados são utilizados para os poluentes primários (emitidos diretamente para a atmosfera), como é o caso dos óxidos de azoto, dióxido de carbono ou compostos orgânicos voláteis, apenas para referir alguns exemplos. Para os poluentes secundários², como é o caso do ozono troposférico que emerge a partir de poluentes primários e por reação fotoquímica, são utilizados os modelos fotoquímicos, de que são exemplo os CAMx - Comprehensive Air quality Model (um modelo euleriano) e UAM - Urban Airshed Model, também um modelo euleriano e que simula os mecanismos fotoquímicos da atmosfera em ambientes urbanos (Guarieiro, *et al.*, 2017) (Daly & Zannetti, 2007). Estes são utilizados para modelar a qualidade atmosférica e simular alterações de concentração de poluentes não

¹ Assim denominados por referência ao trabalho dos matemáticos Joseph-Louis Lagrange (Itália séc.XVIII) e Leonhard Euler (Suíça séc. XVIII), respetivamente.

² Designa-se como poluente secundário todo aquele que não é emitido diretamente para a atmosfera, mas que emerge a partir dos poluentes presentes (designados como primários) emitidos (Lindskog, 2008) (Sicard, Anav, De Marco, & Paoletti, 2017).

estáveis, podendo ser aplicados a escalas variadas, que vão desde a regional até à global (Guariero *et al.*, 2017). Muitos destes modelos fotoquímicos incluem a modelação de trajetória (Ran *et al.*, 2009) uma vez que se pretende por vezes compreender, não apenas a formação deste tipo de poluentes, como também a sua movimentação nas áreas urbanas, bem como os efeitos dos aerossóis em determinadas áreas e as condições específicas em que o ozono (o poluente secundário escolhido para este estudo) é formado.

Os chamados modelos de partículas – de entre os quais se pode referir o CALGRID, um modelo euleriano de transporte e dispersão fotoquímica, integrado no CALPUFF – baseiam-se no método lagrangiano (Aceituno, 1988) e simulam a difusão destas na atmosfera, em plumas de poluentes representadas por centenas, ou milhares de pontos com movimento mais ou menos aleatório, dependendo dos parâmetros.

Obviamente, a lista é bastante mais vasta do que aqui descrito, mas podem ainda referir-se como exemplo alguns modelos mistos como é o caso dos *Plume Rise Models* (em português designados como pluma de chaminé), que computam o comportamento inicial de uma emissão vertical num fluxo de vento horizontal; refira-se aqui o AERMODE (AMS/EPA Regulatory Model), com aplicação em ambientes urbanos (EPA, 2015), e que incluem modelação da dispersão. Na sua maioria, todos os modelos anteriormente mencionados aplicam-se a áreas urbanas que abrangem, de um modo geral, toda a cidade ou área urbana, embora existam já modelações para ruas e bairros, podendo referir-se como exemplo o ADMS-Urban (Urban Air Quality Management System) desenvolvido pela CERC-Cambridge Environmental Research Consultants para modelar cenários de dispersão e transporte de poluentes à escala de rua (*street scale*) e que inclui também modelação de poluentes que reagem com outros compostos presentes na atmosfera (CERC, 2017).

O modelo de simulação e formação do ozono troposférico programado no âmbito deste trabalho pode inserir-se dentro da categoria dos modelos de partículas (em

que estas representam a emergência³ do poluente ozono), numa simulação que pretende identificar as zonas de maior probabilidade de ocorrência do fenómeno. Não se pretendeu, aqui, simular o transporte ou dispersão de poluentes, como os anteriormente descritos, mas sim a propriedade emergente do ozono; trata-se de um modelo que utiliza *software open source*, é de fácil utilização mesmo para utilizadores com noções básicas de programação e está direcionado para obter resultados a uma escala do arruamento urbano. Ao programar-se este modelo para a emergência do poluente ozono, estão a identificar-se as áreas de maior probabilidade da sua formação, independentemente da dispersão.

Esta escolha deve-se ao facto de se pretender disponibilizar uma ferramenta que permite prever os limites a partir dos quais se encontram presentes as condições de formação do ozono ao nível do solo e em que áreas de uma cidade estas condições têm mais probabilidades de acontecer. Ao mesmo tempo, deve permitir simular situações de introdução de novas infraestruturas (estradas ou indústrias emissoras e poluentes precursores do ozono) proporcionando uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão do planeamento urbano, uma vez que simula o aparecimento do ozono para áreas específicas, sempre que novos dados são introduzidos.

1.2- Objetivos

A estrutura do trabalho foi desenhada com o objetivo principal de determinar os locais prioritários de intervenção da Câmara Municipal do Porto, no que diz respeito à poluição atmosférica, no âmbito da implementação de medidas previstas no documento da Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas (ClimAdaPT, 2016). Relativamente à monitorização da qualidade atmosférica, o número reduzido de estações de monitorização ou a sua desativação resulta por vezes na insuficiência de dados. As consequências desta falta levam a que os

³ O termo “emergência” será sempre usado, ao longo do texto, no sentido estrito da palavra, *i.e.*, aparecimento de padrões complexos, ou novas propriedades, a partir de outros mais simples. O termo insere-se no âmbito das teorias da complexidade (Holland, 1997)

decisores se vejam constrangidos a aplicar medidas baseadas em dados ou previsões pensadas para escalas mais alargadas, ao nível regional.

No caso do presente estudo, e numa área que engloba os municípios de Matosinhos e Porto, a rede de estações de monitorização devidamente calibradas e validadas (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010) pela Agência Portuguesa do Ambiente – através da Qualar (Rede de Monitorização da Qualidade do Ar) – é atualmente insuficiente para fazer face aos desafios ambientais atmosféricos, de modo a que se possam tomar as medidas necessárias para garantir a saúde pública nos termos exigidos tanto pela legislação nacional como pela europeia (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010). A implementação de medidas eficazes só é possível quando os decisores dispõem de informação atual e esta só é possível quando existem dados suficientes e em tempo útil. Assim, e sem prejuízo do valor dos modelos para cenários mais abrangentes, os dados existentes revelam-se muitas vezes insuficientes quando se trata de tomar decisões que implicam um conhecimento das áreas de maior desagregação geográfica, como é o caso de bairros ou quarteirões.

Decidir em que pontos estratégicos devem ser aplicados primeiro os esforços financeiros de recuperação ou manutenção de edifícios ou parques para implementação de algumas das medidas de adaptação, é uma prioridade para as edilidades. Ter a informação que fundamenta este tipo de decisões permite decidir com maior eficácia financeira e mais eficiência nas intervenções e esforços. Na aplicação das medidas de adaptação às alterações climáticas, a Câmara do Porto tem previstas várias intervenções que se prendem com a saúde e bem-estar da população face a eventos climáticos extremos (ClimAdaPT, 2016); estas medidas passam pela execução de várias ações que incluem, tanto a manutenção do edificado camarário (uma regulamentação mais adequada nas licenças para novas construções e preferência de materiais adequados aos níveis de poluição atmosférica⁴), como o cuidado com a escolha e manutenção de espécies vegetais para os parques e zonas verdes municipais. Algumas destas ações passam pela aquisição de espécies vegetais

⁴ Alguns poluentes atmosféricos, nomeadamente o ozono, são corrosivos para vários materiais empregues na construção (Ashmore, 2005)

mais resistentes à poluição atmosférica, de modo a reduzir custos de manutenção e manter a vegetação urbana em condições saudáveis, enquanto outras, como é o caso do parque habitacional camarário, preveem, sempre que possível, a criação de uma percentagem de telhados verdes, fachadas com materiais mais resistentes ao desgaste ambiental e área verde em redor dos edifícios.

Ainda relativamente às ações previstas para o parque habitacional, as medidas a implementar (ClimAdaPT, 2016) têm também como objetivo adaptar os edifícios de modo a que os materiais utilizados possam minimizar o efeito das chamadas “ilhas de calor urbano”, o que poderá ter um impacto nos níveis de ozono, uma vez que a formação deste está correlacionada com a temperatura (Perera & Sanford, 2011). Como é óbvio, a aplicação destas medidas implica custos que importa saber gerir e, por isso, é do interesse da Câmara conhecer as zonas com mais residentes dos grupos de risco, do ponto de vista da exposição a poluentes atmosféricos, e em que parques urbanos investir com espécies vegetais mais resistentes à poluição.

Levando em conta estas preocupações, foi escolhido aqui avaliar e modelar a formação do ozono por várias razões: trata-se de um poluente com elevado nível oxidativo, cuja ação tem implicações na saúde humana - o ozono reduz as funções pulmonares, com consequências que podem variar entre irritação nos olhos e dificuldade respiratória até reações pulmonares inflamatórias que obrigam à hospitalização; os efeitos da sua presença fazem sentir-se também na vegetação afetando o crescimento e chegando mesmo a destruir as espécies mais sensíveis; e, por último, é responsável pela degradação rápida de materiais como borrachas, plásticos e alguns metais, como é o caso de alumínio, zinco ou ferro (Ashmore, 2005). Deste modo, seria importante determinar quais os locais onde a instalação destes dispositivos seria uma mais valia, caso a Câmara opte por este tipo de solução e, paralelamente, determinar quais as áreas mais propícias à sua formação.

Tendo em conta o anteriormente referido, o presente estudo propôs-se a atingir os seguintes objetivos:

- Determinar quais as zonas urbanas com maior número de indivíduos com idades compreendidas entre os 0 e os 4 anos de idade, entre os 5 e os 9 anos de idade, e aqueles com idade igual ou superior a 65 anos
- apontar as áreas onde a população dos grupos de risco (referidos no ponto anterior) está mais exposta ao poluente ozono
- identificar quais as áreas com maior probabilidade de formação de ozono e onde reside o maior número de indivíduos de risco, sujeitos a exposição prolongada ao poluente ozono

1.3- Metodologia e Dados

Na execução deste trabalho foi utilizado o *software* de sistemas de informação geográfica ArcGIS 10.5, da ESRI – Environmental Systems Research Institute, e o *software* de modelação por agentes NetLogo, desenhado por Uri Wilensky, da Northwestern University (Estados Unidos), e que permite trabalhar com dados geográficos possibilitando tanto a importação como exportação de ficheiros com os resultados da modelação.

Tendo em vista os objetivos propostos, é feita inicialmente uma análise do impacto de poluentes em áreas menores dentro ambiente urbano, nas áreas onde se encontra um maior número de indivíduos pertencentes aos grupos etários considerados de risco relativamente à exposição ao ozono troposférico (O₃) e óxidos de azoto (NO_x). A análise exploratória dos dados efetuada na Parte II identifica zonas com maior presença de população de risco, os métodos determinísticos apontam para padrões de distribuição espacial dos poluentes e, no seu conjunto, a análise efetuada identifica as áreas ao nível da seção estatística onde a intervenção será prioritária.

Nesta segunda parte é efetuada a análise da distribuição dos poluentes a partir das medições existentes com o objetivo de determinar quais as zonas com maior desagregação territorial – bairros e quarteirões - dentro da área urbana, e para as quais não existem medições. Ainda nesta segunda parte do trabalho, a análise dos dados é conjugada com os dados censitários, para que seja possível determinar onde

existe maior risco da exposição da população de risco ao poluente ozono. São considerados os grupos etários que incluem os indivíduos com idades de maior risco em situações de exposição a poluentes atmosféricos (WHO Europe, 2004) e avaliadas quais as zonas urbanas onde o risco de exposição é maior.

Na terceira parte do trabalho é abordada a modelação por agentes dos sistemas complexos, uma vez que a formação do ozono ao nível troposférico se trata de um sistema complexo (Guardani, *et al*, 1999), com especificidades próprias. As análises são suportadas pela simulação da formação do ozono, através da modelação por agentes, com o *software* Netlogo. Nesta fase o modelo representa a interação entre os agentes primários necessários para a formação de O₃ e utiliza os dados atmosféricos referentes a radiação solar e poluentes primários (Srivastava & Rao, 2011). O modelo programado em contexto Netlogo foi concebido de modo a simular o comportamento das reações fotoquímicas que dão origem ao ozono (poluentes primários e radiação solar), dentro da área de estudo. Os resultados são representados em forma de mapa, o que permite uma visualização geográfica das condições de presença deste poluente (Khalesian, Pahlavani, & Delavar, 2008), ao longo do período de representação escolhido.

Para a realização das análises com o *Weighted Overlay* e para a modelação foram utilizados os dados censitários do Instituto Nacional de Estatística (INE) relativos a 2011 (“Instituto Nacional de Estatística, Censos 2011,” n.d.), as medições dos poluentes da rede de estações da Qualar, da Agência Portuguesa do Ambiente - APA (“Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do Ar <http://www.qualar.org/index.php?page=4&subpage=3&estacao=3094>,” 2008), o mapa BGRI – Base Geográfica de Referência de Informação, do INE (“INE - Censos 2011 Resultados Definitivos,” n.d.), rede viária dos municípios de Matosinhos e Porto, obtida a partir do projeto Open Street Maps, MapZen Data (“Metro Extracts,” n.d.) e medições da radiação solar do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) (“Meteorologia no Instituto Superior de Engenharia do Porto,” n.d.).

1.4- Estrutura da dissertação

Nas suas linhas gerais, o fluxo do trabalho segue as seguintes orientações (ver figura 1), partindo de uma delimitação do problema e solução possível, e dividindo-se depois numa apresentação do fenómeno de emergência do ozono enquanto sistema complexo e, ainda, na programação do modelo que permite simular este fenómeno. Foram utilizados os softwares ArcGIS e Netlogo. Por último, os resultados obtidos através das medições de ozono e da simulação são integrados numa análise comum.



Figura 1: Fluxograma de operações

A dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos distribuídos por quatro partes. Na primeira parte, o presente capítulo faz uma apresentação da estrutura da dissertação, a sua organização e apresentação dos capítulos, bem como a articulação entre si, os objetivos e um fluxograma de operações. O objetivo é proporcionar uma visão geral dos componentes levados em consideração na abordagem do tema e a importância de cada um deles no conjunto do trabalho.

Na segunda parte, é introduzida a visão integrada do problema da formação do ozono troposférico nos meios urbanos – e dos poluentes atmosféricos no geral -, fazendo uma apresentação dos reais problemas levantados pela atual expansão urbana e as preocupações e objetivos ambientais da União Europeia. É feita referência ao tema da saúde pública em meios urbanos relativamente à qualidade atmosférica e apresentados os prejuízos em termos de saúde e bem-estar das populações expostas a poluição. É também dada a conhecer a área de estudo, apresentando detalhadamente a sua caracterização geográfica, ambiental, administrativa e populacional, mostrando o enquadramento da situação estudada no contexto real. É também aqui representada a distribuição espacial dos grupos etários de risco por áreas de residência, em termos de valores absolutos e de densidade populacional.

A segunda parte da dissertação encerra com a análise exploratória dos dados, com a utilização de ferramentas estatísticas que permitem uma melhor compreensão da distribuição espacial, tanto da população como dos poluentes aqui levados em conta. É feita uma análise mostrando a situação real medida nas zonas urbanas com maiores números de residentes dos grupos etários de risco. No final da análise dos dados é perspectivada a situação da área de estudo, ponderando a distribuição espacial, tanto dos poluentes como dos grupos de risco, de modo a determinar quais as áreas com maior necessidade de atenção no que diz respeito à intervenção nas infraestruturas presentes e que possam contribuir para diminuir concentrações de poluentes.

Na terceira parte desta dissertação, é feita uma introdução aos sistemas complexos, focando-se no fenómeno da emergência, uma vez que a formação do ozono troposférico se insere neste âmbito. Neste contexto é também apresentada a modelação por agentes através do *software* Netlogo, justificando a sua escolha relativamente a outros softwares para este tipo de modelação.

O código fonte do modelo criado é apresentado detalhadamente, mostrando as suas funcionalidades, possibilidades de adaptação a novos dados e potenciais âmbitos de aplicação. São aqui apresentados os resultados obtidos com a modelação, que inclui alguns dados auxiliares como localização geográfica de vias rodoviárias dentro do perímetro urbano, reações químicas de formação do ozono e radiação solar.

Por fim, é apresentada uma visão geral dos resultados obtidos à luz do objetivo inicial e integrando-os de modo analítico. São também apontadas possibilidades de trabalho futuro baseadas nas capacidades do modelo criado e apontando potencialidades deste.

II PARTE

1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA URBANA

É feito, neste capítulo, um enquadramento do tema poluição atmosférica dentro de um contexto de expansão urbana e aumento das populações citadinas, focando-se nos problemas de saúde e ambientais, de uma exposição aos poluentes e, neste caso em particular, ao ozono troposférico. É explicada a sua formação e os conceitos de poluentes primários e secundários.

1.1- Poluição em contexto urbano

Atualmente cerca de 75 por cento da população urbana da Europa vive em áreas urbanas (EEA, 2006), calculando-se que este número alcance os 80 por cento em 2020. Face a esta realidade, para a União Europeia, uma das maiores preocupações relativas à questão ambiental atmosférica prende-se não apenas com a sustentabilidade mas também com as condições e qualidade de vida das populações, uma vez que o acesso a uma atmosfera não poluída é essencial para uma boa qualidade de vida dos cidadãos (Amann *et al.*, 2005).

A crescente importância da monitorização e controle de emissões de poluentes adquire, assim, peso significativo em ambientes urbanos, tanto pelas suas características específicas quanto pelo seu crescimento intenso, uma vez que um número cada vez mais alargado de indivíduos é afetado pela poluição atmosférica. Ainda dentro de um contexto urbano, os níveis de poluição estão fortemente dependentes do tráfego rodoviário, estimando-se que, em média, cerca de cinco por cento da população das cidades vive a menos de 100 metros de estradas principais e, portanto, em condições de maior exposição a concentrações (Sigman, 2012). Os restantes 95 por cento estarão incluídos em áreas urbanas ou suburbanas com o tipo

de concentrações consideradas de fundo⁵. Assim, a monitorização e controle da qualidade do ar está regulamentada pela UE, seguindo um conjunto de regras devidamente legisladas (UE, 2008) com a finalidade de determinar de modo preciso os índices de controlo de qualidade. Na Europa, os poluentes mais problemáticos em termos de danos para a saúde humana são as partículas (PM₁₀⁶ e PM_{2.5}), ozono (O₃) troposférico e dióxido de azoto (NO₂), embora poluentes como amoníaco (NH₃), dióxido de enxofre (SO₂) e compostos voláteis orgânicos (COV's) contribuam também para a mortalidade prematura causada por doenças respiratórias e cardiovasculares (APA, 2010). O 7º Programa de Ação para o Ambiente da União Europeia (Seventh Environment Action Programme - 7th EAP) (European Union, 2013) tem o objetivo de garantir uma melhoria significativa na qualidade do ar respirado na União Europeia até 2020, tendo em vista uma aproximação das recomendações da Organização Mundial de Saúde - OMS (World Health Organization-WHO) - relativamente à saúde humana no âmbito da qualidade atmosférica.

Contudo, e segundo as avaliações levadas a cabo pela Agência Europeia do Ambiente (AEA) algumas metas previamente estabelecidas para a data limite 2020 poderão não ser totalmente atingidas (EEA, 2017) pois, apesar de se registar uma redução significativa nas concentrações de PM₁₀ e de NO₂ nas áreas urbanas nos últimos anos, as concentrações de PM_{2.5} e de O₃ não registaram alterações significativas, dada a alta dispersão e elevada concentração global destes poluentes.

A avaliação da qualidade atmosférica em Portugal segue uma abordagem comum regida por critérios de avaliação devidamente regulamentados (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010) e controlados pelas CCDR (Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional) que garantem o cumprimento dos requisitos de medições e avaliação atmosféricas. Estas avaliações levam em conta a dimensão das populações e dos ecossistemas expostos à poluição, refletindo as densidades populacionais, e servem de base aos cálculos de exposição dos residentes (UE, 2008)

⁵ Concentrações medidas longe das fontes emissoras de poluentes

⁶ Acrónimo para *Particulate Matter*; representa uma mistura complexa de substâncias orgânicas e inorgânicas em suspensão e é classificada em dois grupos consoante o tamanho de 10µm e 2.5µm para partículas grossas e finas, respetivamente (World Health Organisation Europe, 2004)

1.5- Saúde Pública e Poluentes

Atualmente a poluição atmosférica é responsável por mais de 400 mil mortes prematuras por ano na Europa (EEA, 2017) e, segundo a OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico), “a poluição atmosférica urbana deverá tornar-se a primeira causa ambiental de mortalidade em todo o mundo até 2050, à frente da poluição da água e da falta de saneamento”(Comissão Europeia, 2013) . Refira-se que, embora sendo a poluição atmosférica um tema transfronteiriço, para efeitos do presente trabalho é referido apenas o caso do ozono troposférico em contexto urbano, sem detrimento da importância do tema quanto a outros poluentes e noutros contextos.

Quanto aos efeitos da poluição atmosférica, estes podem ser abordados a partir de duas perspetivas; os efeitos na saúde a longo prazo, e a curto prazo, sendo estas consequências variáveis consoante o tempo de exposição e as concentrações dos poluentes (Karakatsani *et al.*, 2017) (World Health Organization, 2013).

De entre algumas das consequências mais conhecidas derivadas da exposição ao ozono podem destacar-se as seguintes (APA, 2010), dependendo das concentrações e da sensibilidade ao poluente:

- irritação das mucosas das vias respiratórias podendo causar tosse, irritação na garganta e sensação de opressão no peito
- redução da função pulmonar, causando dificuldade respiratória. A respiração pode tornar-se mais rápida e superficial e os esforços físicos podem ficar limitados.
- agravamento de condições de asma, verificando-se um aumento de episódios de asma com o aumento das concentrações de ozono
- aumento de sensibilidade a infeções respiratórias

- danos nos alvéolos pulmonares em situações de exposição prolongada ou repetida ao longo da vida, acabando por causar danos permanentes e consequente perda de capacidade pulmonar e qualidade de vida

No que diz respeito aos efeitos a longo prazo, são várias as medidas tomadas pelos organismos oficiais, tanto nacionais (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010) como internacionais, sendo a redução das emissões nas fontes um dos principais objetivos (UE, 2008).

Relativamente aos efeitos a curto prazo, e apesar de o impacto da exposição aos poluentes se tornar mais facilmente detetável, é necessária a existência de mecanismos de previsão de episódios “pico” que possibilitem a atuação atempada de resposta a emergências, bem como os avisos à população.

Assim, e tendo em vista uma informação útil em termos de saúde pública os limiares de informação e de alerta encontram-se estipulados por lei em Diário da República (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010), onde é estabelecido como limiar de alerta “um nível acima do qual uma exposição de curta duração apresenta riscos para a saúde humana da população em geral e a partir do qual devem ser adotadas medidas imediatas”.

Como limiar de informação (ou seja, valores a partir dos quais o público deverá ser informado das concentrações de poluentes atmosféricos) é estabelecido “um nível acima do qual uma exposição de SO₂, NO_x ou O₃ de curta duração apresenta riscos para a saúde humana de grupos particularmente sensíveis da população, a partir do qual é necessária a divulgação imediata de informações adequadas” (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010).

No que se refere ao valor alvo para proteção da saúde humana (concentração máxima diária das médias octo-horárias) este está fixado em 120 µg/m³, a não exceder em mais de 25 dias num ano. Os índices de qualidade do ar são definidos (em microgramas por metro cúbico - µg/m³), conforme se pode verificar na tabela 1.

Poluente em causa / Classificação	CO		NO ₂		O ₃		PM ₁₀		SO ₂	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Mau	10000	-----	400	-----	240	-----	120	-----	500	-----
Fraco	8500	9999	200	399	180	239	50	119	350	499
Médio	7000	8499	140	199	120	179	35	49	210	349
Bom	5000	6999	100	139	60	119	20	34	140	209
Muito Bom	0	4999	0	99	0	59	0	19	0	139

Tabela 1: índices de qualidade do ar conforme às normas da EEA e disponibilizada pela APA para consulta pública através da Qualar (Qualar, 2017)

De modo a estabelecer os valores limite aceitáveis (ver tabela 2), conforme aparece em documento publicado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2010) indica os valores estabelecidos pelo Decreto-Lei 102/2010, de 20 Dezembro, aplicáveis ao O₃ para proteção da saúde humana e da vegetação.

Descritivo	Valor Normativo	Média Horária	Máximo diário da média de 8h
Limiar	Limiar de informação	180µg/m ³	---
	Limiar de alerta	240 µg/m ³ (a)	---
Valor alvo para proteção da saúde humana	Objetivo a longo prazo para proteção da saúde humana	---	120 µg/m ³ (b)
	Valor alvo para proteção da vegetação	---	---
Objetivos a longo prazo	Objetivo a longo prazo para proteção da saúde humana	---	120 µg/m ³
	Objetivo a longo prazo para proteção da vegetação	---	---

Tabela 2: Limiares de alerta. (a) as excedências ao limiar de alerta do ozono devem ser medidas ou estimadas durante três horas consecutivas (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010), (b) valor alvo a não exceder mais de 25 dias, em média, por ano civil, num período de 3 anos

Contudo, é necessário também levar em conta os fatores de risco em situações de exposição a níveis elevados de ozono ao nível do solo, como é o caso de práticas de esforços físicos, durante os quais o esforço adicional aumenta a taxa de ventilação e,

consequentemente, aumenta os efeitos de exposição ao poluente por inalação (WHO, 2003), bem como os considerados grupos de risco. Neste caso, são levados em conta crianças até à adolescência, idosos, grávidas e indivíduos com doenças respiratórias e cardiovasculares. A avaliação e gestão da qualidade atmosférica é regulada por decreto-lei (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010) onde é atribuída particular importância às medidas que permitam uma redução das emissões de poluentes a nível local e nacional, tendo em vista a proteção da saúde humana.

Estudos científicos realizados ao nível da Comissão Europeia, no âmbito do Programa Clean Air For Europe (CAFE), revelam efeitos nocivos na saúde devido aos níveis de poluição do ar na Europa e, apesar dos esforços feitos no sentido de melhorar a qualidade do ar, as partículas finas (PM_{2.5}) e o ozono troposférico continuam a ser os fatores de maior risco para a saúde humana e para o ambiente (Amann *et al.*, 2005). Ao mesmo tempo, existem planos de ação orientadores de medidas que podem ser tomadas a nível municipal, como é o caso das Medidas de Adaptação às Alterações Climáticas onde se prevê a implementação de várias medidas de intervenção para uma estratégia de qualidade do ar (Egional, 2015).

Relativamente ao modelo programado para este trabalho, a sua utilização enquadra-se no âmbito da aplicação das medidas de adaptação previstas pela Câmara Municipal do Porto, conformes à Estratégia Municipal de Alterações Climáticas. Assim, e fazendo referência à Caracterização das Opções de Adaptação Identificadas para o Município do Porto⁷ (ClimAdaPT, 2016), a utilização do modelo poderá vir a ser uma possibilidade no âmbito das opções de adaptação com os objetivos de aumentar autonomia e fiabilidade de previsões de fenómenos extremos, diminuir recurso a hospitais por parte da população vulnerável e diminuir risco de surtos de doenças devidas a alterações climáticas.

Neste âmbito são de salientar, sobretudo, as medidas 36 e 37 da referida tabela, que preveem uma hierarquização do parque edificado mais vulnerável e um mapeamento dos edifícios que deverão ser alvo de intervenção prioritária, à escala da subseção

⁷ Tabela 14, Anexo VII, p.41 do ClimAdapt 2016

estatística. Em ambos os casos, a utilização do modelo pode ser uma mais valia na identificação das áreas mais suscetíveis à emergência do ozono, possibilitando a elaboração de mapas de identificação das zonas mais sujeitas a este tipo de poluição e onde existe maior número de indivíduos dos grupos de risco.

2. ENQUADRAMENTO DA ÁREA DE ESTUDO E DADOS

O presente capítulo apresenta uma caracterização da área de estudo relativamente às suas especificidades administrativas, geográficas, populacionais e ambientais. Deste modo, verificou-se também a necessidade de incluir na área de estudo o município de Matosinhos – embora o objetivo final seja o de identificar as prioridades de áreas de intervenção do município do Porto – uma vez que em termos ambientais este município contém duas áreas industriais, a não desconsiderar numa modelação ambiental.

A área de estudo engloba dois dos 17 municípios da Área Metropolitana do Porto (Matosinhos e Porto), localizada no litoral Norte de Portugal, com uma área aproximada de 2.000 Km² e cerca de 400.000 habitantes (INE Instituto Nacional de Estatística, 2011).

O município de Matosinhos engloba as áreas administrativas das cidades de Matosinhos, São Mamede de Infesta e Senhora da Hora e as vilas de Custóias, Lavra, Leça do Bailio, Leça da Palmeira e Perafita.

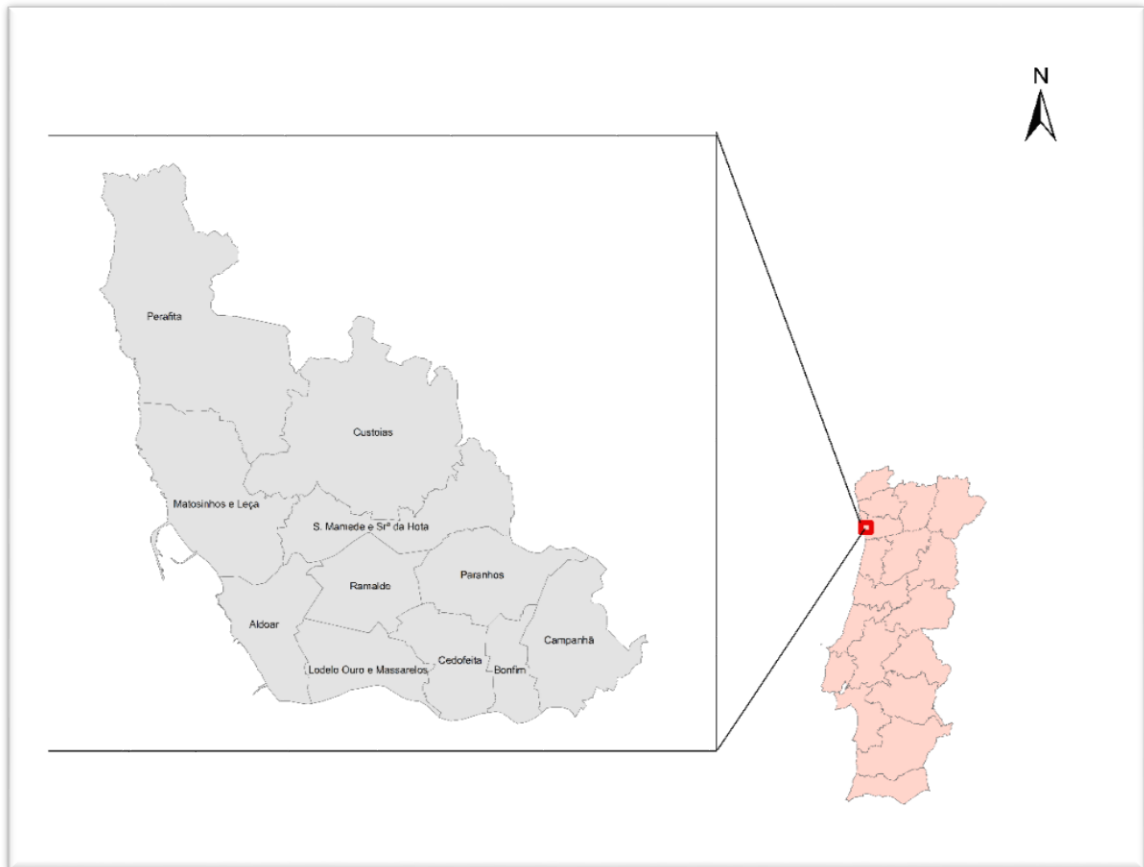


Figura 2: Área de estudo

Após a Reorganização Administrativa do Território das Freguesias – RATF (Cruz & Seca, 2013) o município de Matosinhos passou a subdividir-se em quatro freguesias (Assembleia da República, 2013) e conta com uma população total de cerca de 175 mil habitantes, segundo os dados censitários de 2011 (ver Anexo 2). Quanto ao Porto, sede de distrito, é a segunda maior cidade do país e o quarto município mais populoso de Portugal, com uma população de 237 591 habitantes (INE, 2011). Atualmente subdivide-se em sete freguesias (Cruz & Seca, 2013): União das Freguesias de Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde; União das Freguesias de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, São Nicolau e Vitória; União das Freguesias de Lordelo do Ouro e Massarelos; Bonfim, Campanhã, Paranhos; e Ramalde.

Geograficamente, o município de Matosinhos é limitado a norte pelo município de Vila do Conde, a nordeste pela Maia, a sul pelo Porto e a oeste pela costa no oceano Atlântico. O município localiza-se, geograficamente, a 41° 10' 59" Norte, 8° 40' 47" Oeste, com uma área de 62,20 Km² e uma altitude máxima de 30m. O

município do Porto situa-se no noroeste de Portugal e é limitado a norte pelo município de Matosinhos, a nordeste pelo município da Maia, a este e sudeste pelo município de Gondomar, a sul pelo município de Vila Nova de Gaia, a Oeste pela costa do oceano Atlântico, incluindo ainda, a sul (fazendo fronteira com o município de Vila Nova de Gaia) a margem do rio Douro e a sudoeste a foz do rio Douro. Geograficamente, o município localiza-se a 41° 9' 0" Norte, 8° 36' 37" Oeste, com uma área de 41,30 Km² e uma altitude máxima de 83m.

Relativamente aos dados populacionais, no presente estudo são levados em conta, para efeitos de produção de mapas para a caracterização demográfica, os grupos etários considerados de risco em termos de exposição prolongada a poluentes atmosféricos. Assim, para o efeito foram considerados os dois grupos etários (considerados pelo INE para efeitos estatísticos) mais jovens, entre os 0 e os 4 anos (figura 3) e entre os 5 e 9 anos de idade (figura 4), e o grupo mais idoso, com idade igual ou superior a 65 anos (figura 5).

A representação da distribuição espacial dos grupos etários foi efetuada com uma distribuição a partir da classificação Natural Breaks (Jenks), uma vez que esta é a classificação que agrupa valores semelhantes e maximiza a diferença entre classes (Smith, Goodchild, 2015).

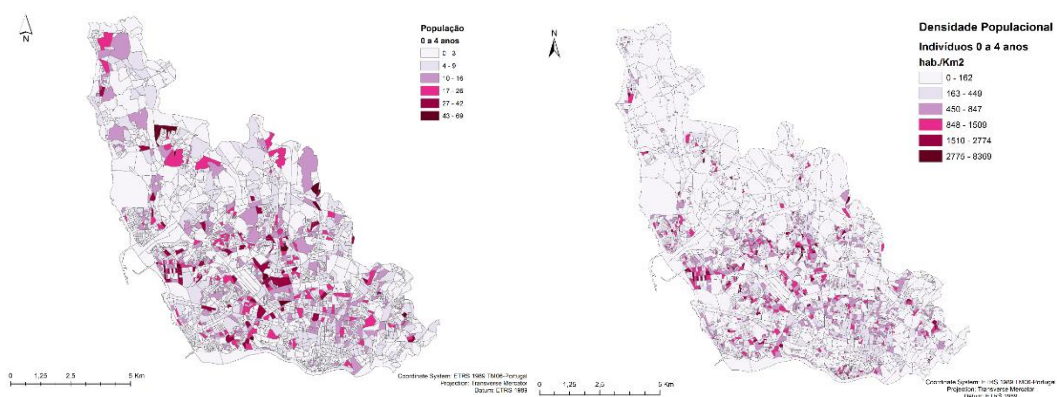


Figura 3 Distribuição da população em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita) entre 0 e 4 anos

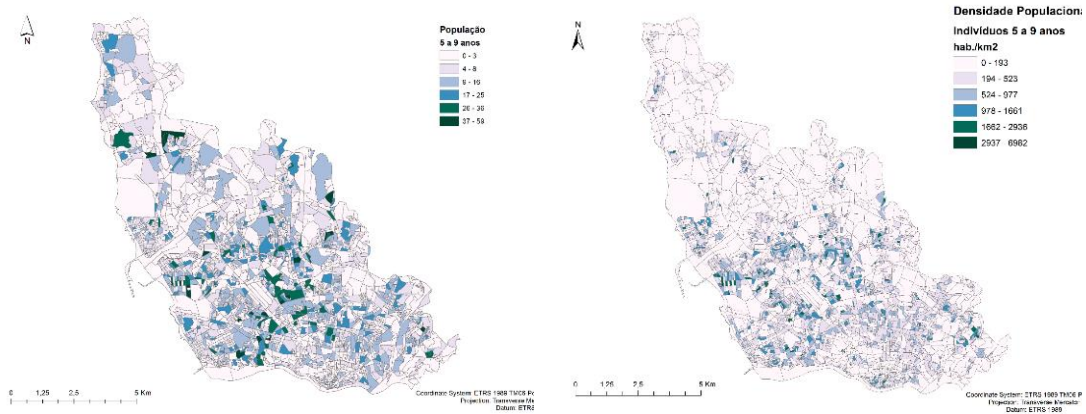


Figura 4: Distribuição da população em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita) entre 5 e 9 anos

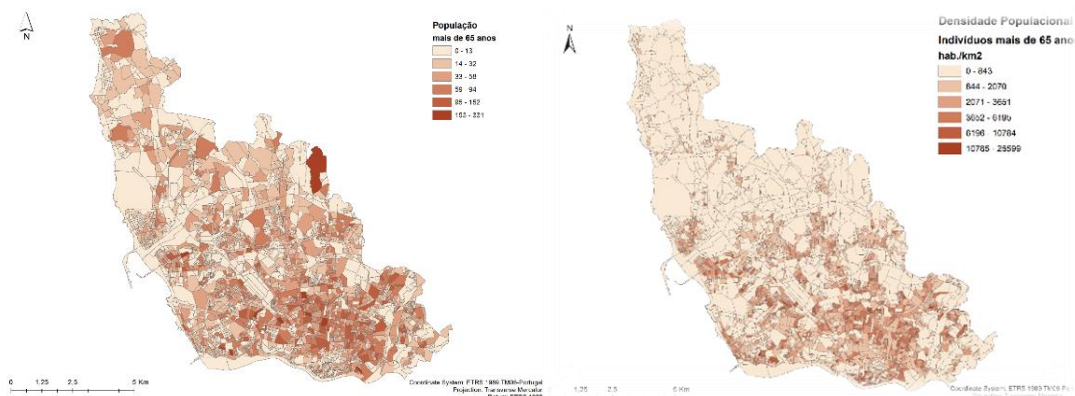


Figura 5: População com mais de 65 anos em valores absolutos (esquerda) e densidade populacional (direita)

Relativamente à caracterização ambiental da área de estudo, esta trata-se de uma zona urbana com a presença de características rurais (AMP, 2014) e inclui duas zonas industriais dentro do perímetro urbano (figura 6); o porto de Leixões e a refinaria petroquímica da Petrogal, ambas no município de Matosinhos; ambas lidam com transporte e manuseio de produtos petroquímicos (APDL, 2015) (Galp energia, 2013). O porto de Leixões, com uma área de 66 hectares, possui um terminal para petroleiros e está ligado à refinaria de Matosinhos por cerca de 20 oleodutos e gasodutos, com um terminal equipado para lidar com ramas de petróleo, produtos refinados diversos, gases liquefeitos e produtos aromáticos (APDL, 2013).

A refinaria da Petrogal, também em Matosinhos, tem uma área de 290 hectares (Petrogal, 2013) com uma capacidade de destilação aproximada de 110 kbpd (milhares de barris por dia)⁸ e inclui uma fábrica de aromáticos, uma fábrica de óleos base e uma fábrica de lubrificantes (Galp energia, 2013).

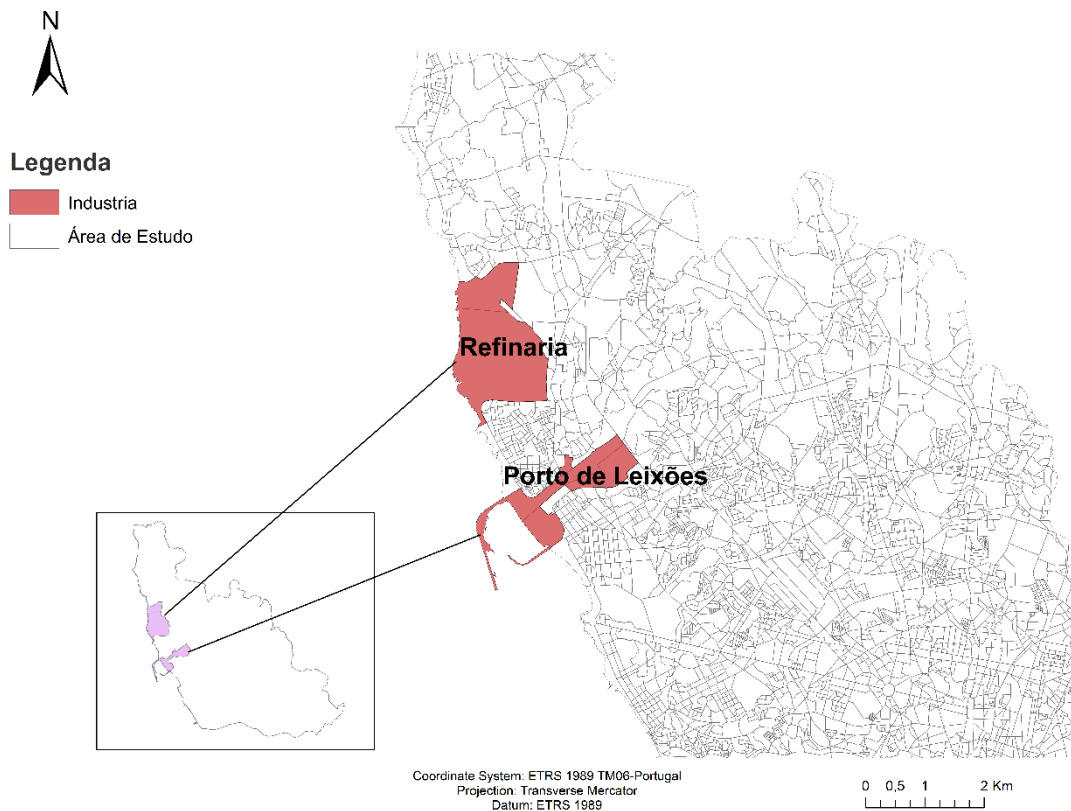


Figura 6: Áreas industriais

Ambos os complexos industriais, pela sua localização, representam um peso ambiental a considerar, tanto pela inclusão na área urbana, como pelo tipo de compostos com que lidam. Os produtos petroquímicos representam uma parte considerável dos compostos orgânicos voláteis (Pereira *et al.*, 2017).

As características apresentadas mostram uma área de estudo junto à costa marítima atlântica, habitualmente sujeita aos ventos predominantes de Norte Noroeste durante a maior parte do ano. Dada a localização das duas áreas industriais englobadas na área urbana, e situadas a noroeste das áreas mais urbanizadas, pode

⁸ Do acrónimo, em inglês, KBPD – Thousand (K) Barrels Per Day

depreender-se que a predominância de vento da direção indicada pode ter uma influência considerável nas condições ambientais atmosféricas da área de estudo. Através da caracterização populacional (figuras 3 a 5) é também perceptível a tendência espacial da distribuição de cada um dos grupos etários de risco, de modo a determinar áreas de maior possibilidade de exposição da população a concentrações mais elevadas do poluente ozono, cuja distribuição espacial interpolada é mostrada nos capítulos seguintes.

3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

O presente capítulo inicia a análise exploratória dos dados, enquadrando-os no âmbito do estudo deste trabalho. As análises efetuadas, bem como as ferramentas ESRI ArcGis escolhidas e a determinação dos parâmetros, levaram em conta o tipo de resultados que se pretendia obter, de modo a que estes pudessem representar as variáveis mais significativas para os decisores que pretendem implementar as medidas referidas nos parágrafos anteriores. As definições e funcionamento das ferramentas utilizadas são baseadas, salvo referência em contrário, no manual da Esri ArcGIS Pro Tool Reference (Esri, 2016).

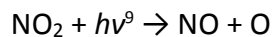
3.1- Ozono

O ozono é uma forma elementar do oxigénio que, na sua forma mais estável, é conhecido como O_2 (molécula diatómica), sendo que uma molécula de oxigénio que contenha três átomos tem o nome de ozono (O_3), bastante mais instável do que a molécula diatómica do oxigénio. Ozono e oxigénio são nomes diferentes para o mesmo elemento, de acordo com a sua formação molecular. Dada a sua instabilidade, o ozono é um gás bastante reativo e mesmo em baixas concentrações é tóxico e irritante. Ocorre naturalmente na estratosfera, onde exerce o efeito de barreira a uma grande parte da radiação solar ultravioleta, e também em pequenas quantidades na troposfera. Estas ocorrências naturais de ozono na troposfera devem-se a causas naturais, sendo algumas das mais conhecidas erupções vulcânicas ou descargas elétricas durante tempestades. Contudo, os atuais níveis de concentração de ozono na troposfera devem-se a causas antropogénicas e forma-se sobretudo a partir da mistura de oxigénio diatómico (naturalmente presente na atmosfera) e dióxido de azoto, na presença de radiação solar.

Em suma, o ozono troposférico trata-se de um poluente secundário, ou seja, não é um poluente emitido mas sim formado a partir de outros poluentes (primários) na presença das condições necessárias. Para que este se forme é necessária a presença

de óxidos de azoto (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV's) que, em conjunto com o oxigénio presente na atmosfera, reagem em presença de radiação solar.

Apresentando, de modo sucinto, um esquema da formação do ozono troposférico:



onde $h\nu$ representa a radiação solar e M representa N₂, O₂ ou outras moléculas passíveis de absorver o excesso de energia, o que permite a estabilização do O₃. Uma vez formado, o ozono reage novamente com NO, formando NO₂ (Sousa, 2009):



Na ausência de outros compostos (como, por exemplo os COV's) estabelece-se um equilíbrio entre NO, NO₂ e O₃ (Sousa, 2009). A formação do ozono troposférico dá-se por reação fotoquímica, na presença dos poluentes primários e radiação solar, pelo que a sua presença se regista com maior intensidade, com um nítido aumento de concentrações, na presença de valores mais elevados de radiação solar.

Nos gráficos seguintes pode observar-se a distribuição do ozono medido (valores apresentados em µg/m³) na área de estudo (municípios de Matosinhos e Porto) num período de tempo compreendido entre 2012 e 2016, em cada uma das estações com monitorização deste poluente.

⁹ Símbolo utilizado para representar a luz nas reações fotoquímicas. Neste caso representa a luz ultravioleta.

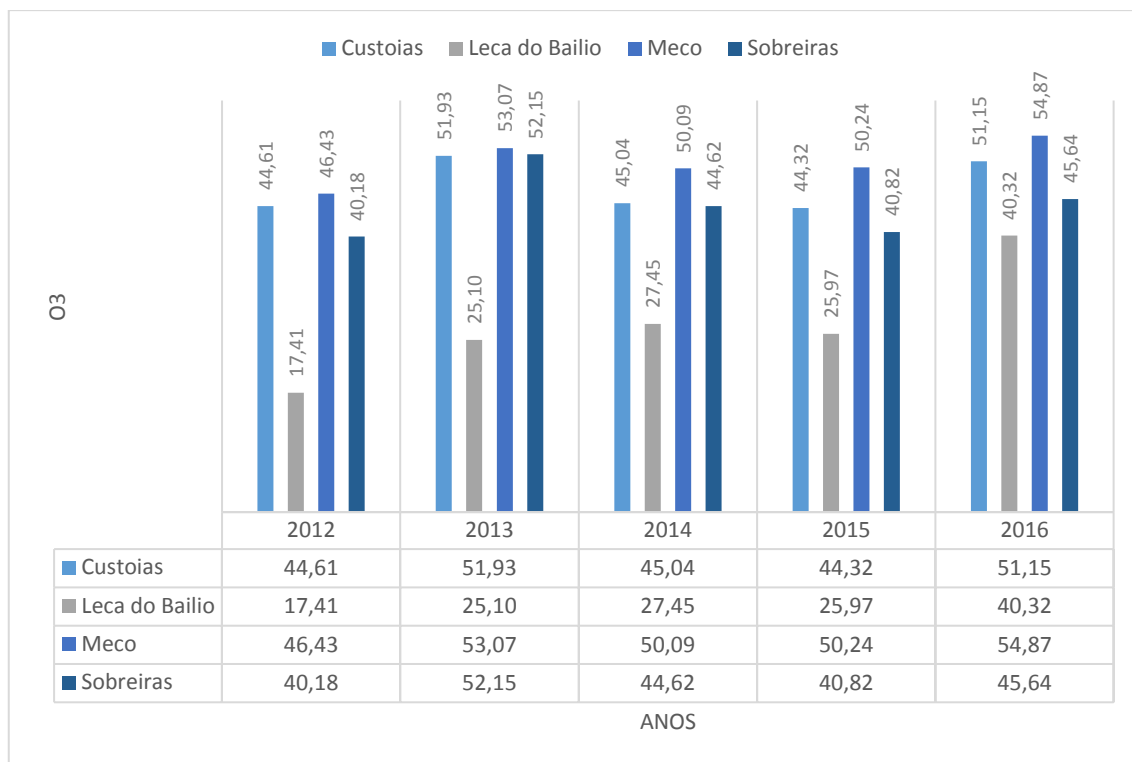


Tabela 3: Ozono medido nas estações da rede Qualar ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

Pode verificar-se, pela leitura do gráfico da tabela 3, que se registou um aumento das concentrações gerais de ozono em 2016, relativamente aos anos anteriores. Note-se o valor elevado também nas concentrações em 2013 ficando, contudo, abaixo dos valores de 2016 nas estações de Leca do Bailio e do Meco, conforme é também visível nos mapas das figuras 7, 8, 9, 10 e 11.

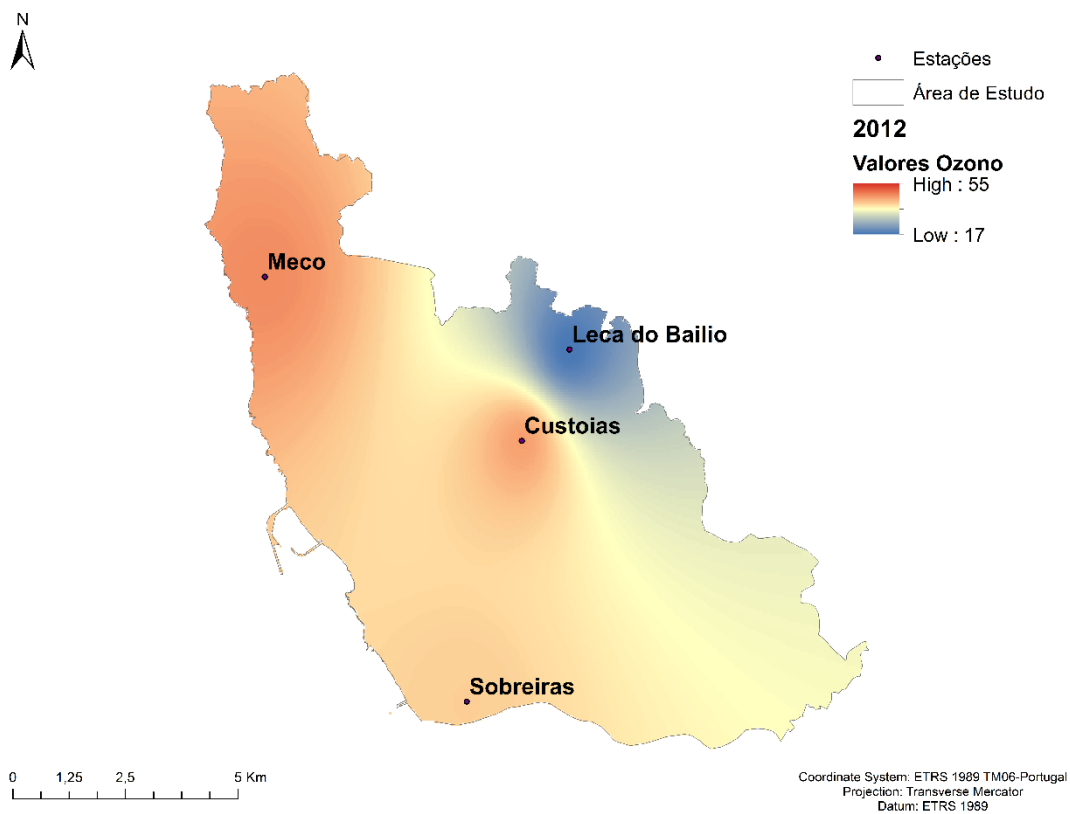


Figura 7: Distribuição das concentrações de ozono para 2012

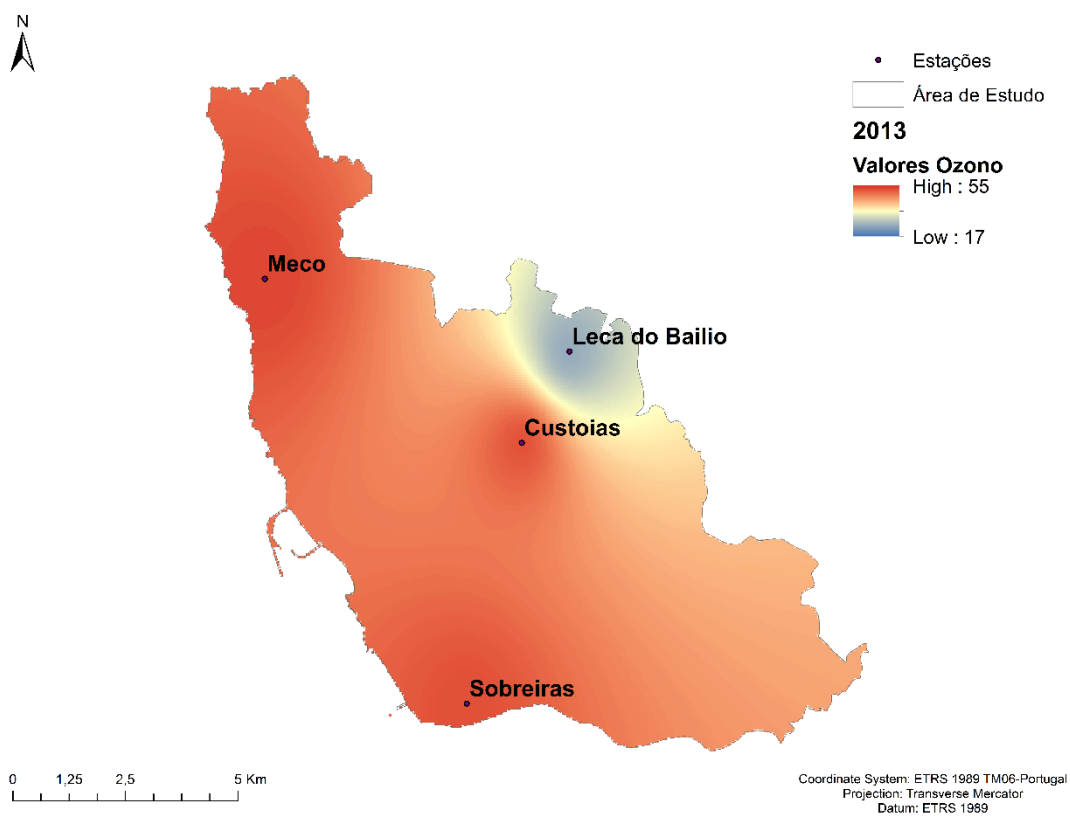


Figura 8: Distribuição das concentrações de ozono para 2013

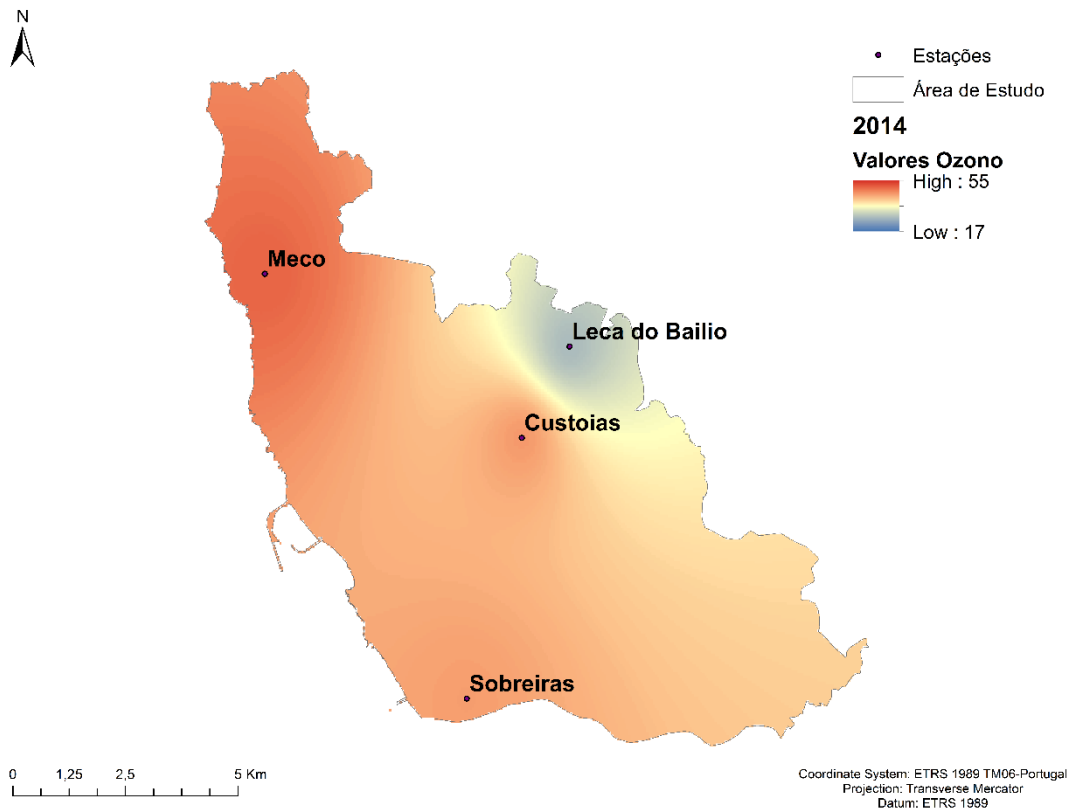


Figura 9: Distribuição das concentrações de ozono para 2014

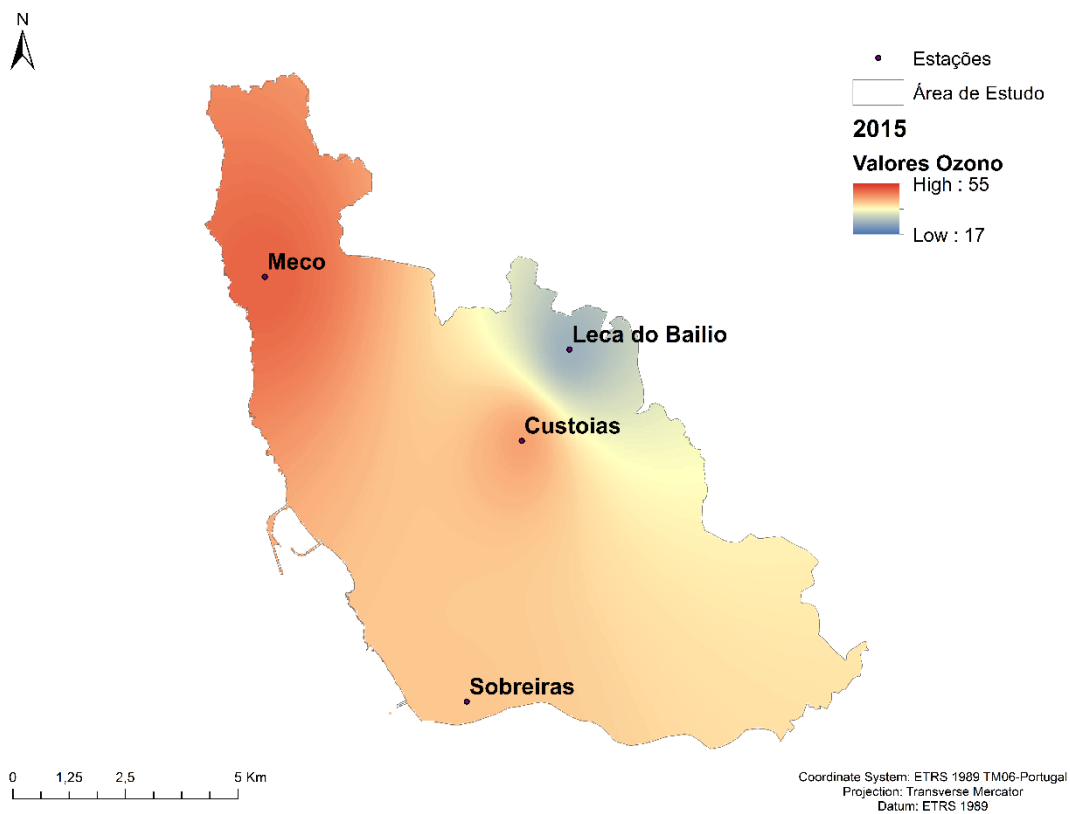


Figura 10: Distribuição das concentrações de ozono para 2015

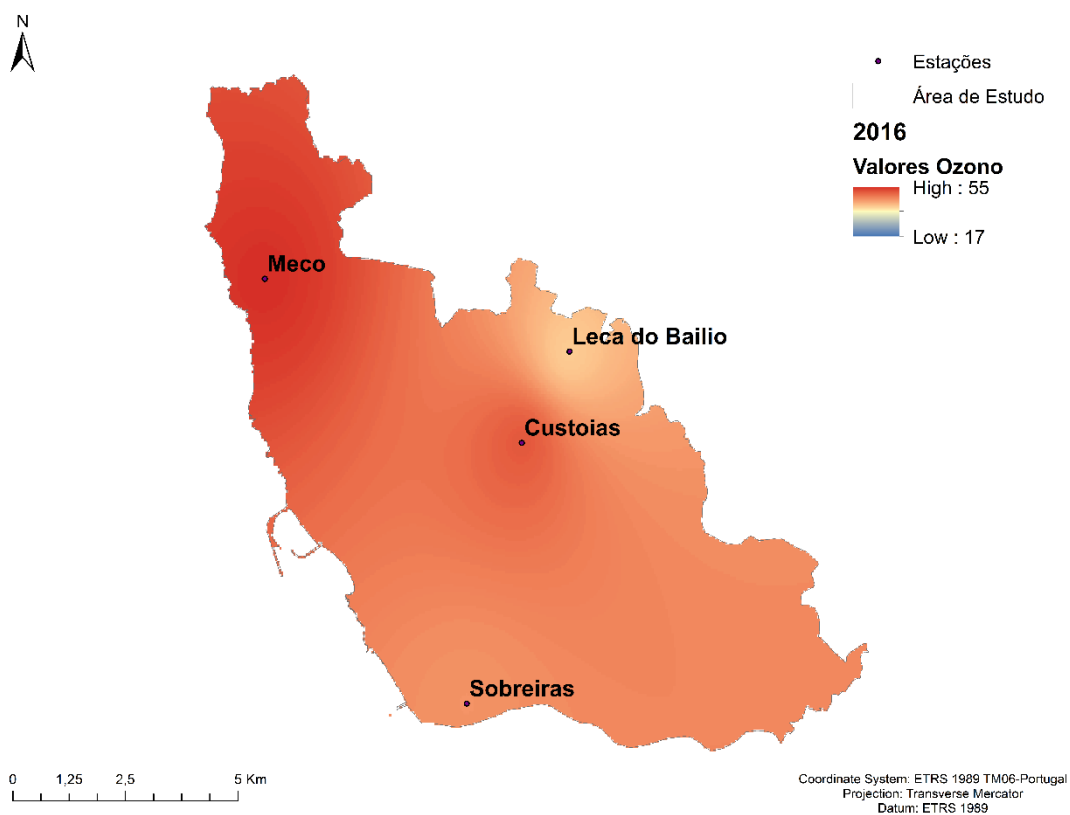


Figura 11: Distribuição das concentrações de ozono em 2016

Para estes mapas de distribuição espacial do ozono foi efetuada uma interpolação por *Inverse Distance Weighted*. Esta ferramenta faz o cálculo por interpolação dos valores desconhecidos para as áreas vizinhas dos pontos de medição (ESRI, 2016). O IDW consiste numa ferramenta de interpolação, determinística, que utiliza a primeira lei de Tobler, assumindo que uma área apresenta valores mais semelhantes nas áreas mais próximas do que nas áreas mais distantes. Foram utilizados os parâmetros representados na Tabela 4.

Parâmetro	Descrição
<i>Input Point Features</i>	Medições Ozono
<i>Z value field</i>	2016
<i>Output cell size (optional)</i>	- (default)
<i>Power (optional)</i>	2
<i>Search radius</i>	Variable
<i>Number of points</i>	12
<i>Maximum distance</i>	Não especificado
<i>Input barrier polyline features</i>	Não especificado

Tabela 4: Parâmetros utilizados na ferramenta IDW

No parâmetro *Output cell size* foi escolhido o valor por defeito da ferramenta, ou seja, o valor das células de saída é o mesmo do das células de entrada; em *Power* (opcional) - expoente da distância maior do que 0, e em que valor maior significa menor influência de pontos mais distantes - foi escolhido o valor por defeito (2), uma vez que este é o valor mediano do intervalo ótimo da ferramenta (ESRI, 2016); para o raio de pesquisa (opcional) - onde é definido qual dos pontos de entrada será usado para interpolar o valor de cada célula no *raster* de saída - foi escolhido um raio de busca variável para encontrar um número especificado de pontos de amostra de entrada para a interpolação; na distância máxima não foi estabelecido um limite máximo, tendo em conta as características do fenómeno estudado.

Relativamente à radiação solar (fator determinante na formação do ozono (Lindskog, 2008)), e numa primeira leitura baseada na observação do gráfico da **figura 12**, pode

verificar-se também valores mais elevados de radiação solar em 2016, sobretudo nos meses de verão, comparativamente aos outros anos. De igual modo, regista-se também uma incidência de valores de radiação solar mais elevados também para 2013, ano em que os valores de ozono aparecem mais elevados comparativamente a 2012, 2014 e 2015.

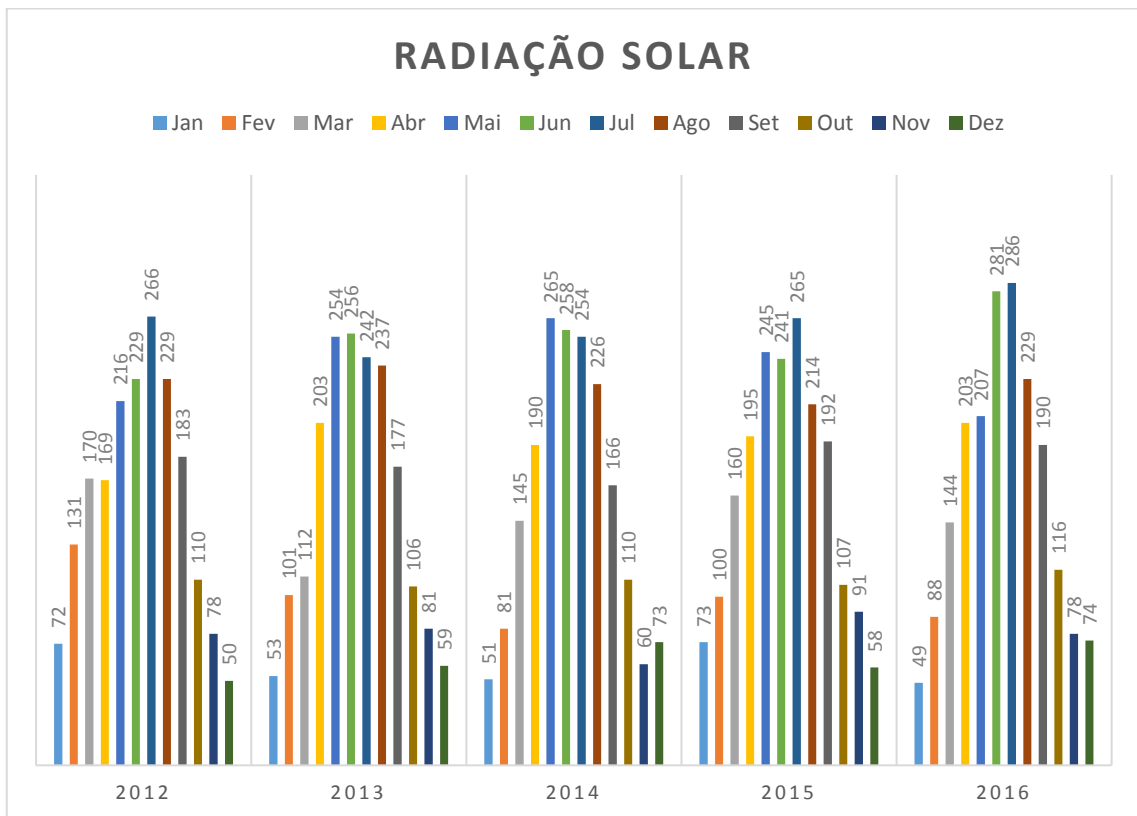


Figura 12: Índices medidos de radiação solar (em w/m²)¹⁰ na área de estudo

Quanto às temperaturas, como se pode verificar na figura 13, e embora não esteja estabelecida uma relação direta entre estas e a formação do ozono, pode notar-se uma correspondência entre os valores mais elevados, a radiação solar e as concentrações de ozono

¹⁰ Conforme medido pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto

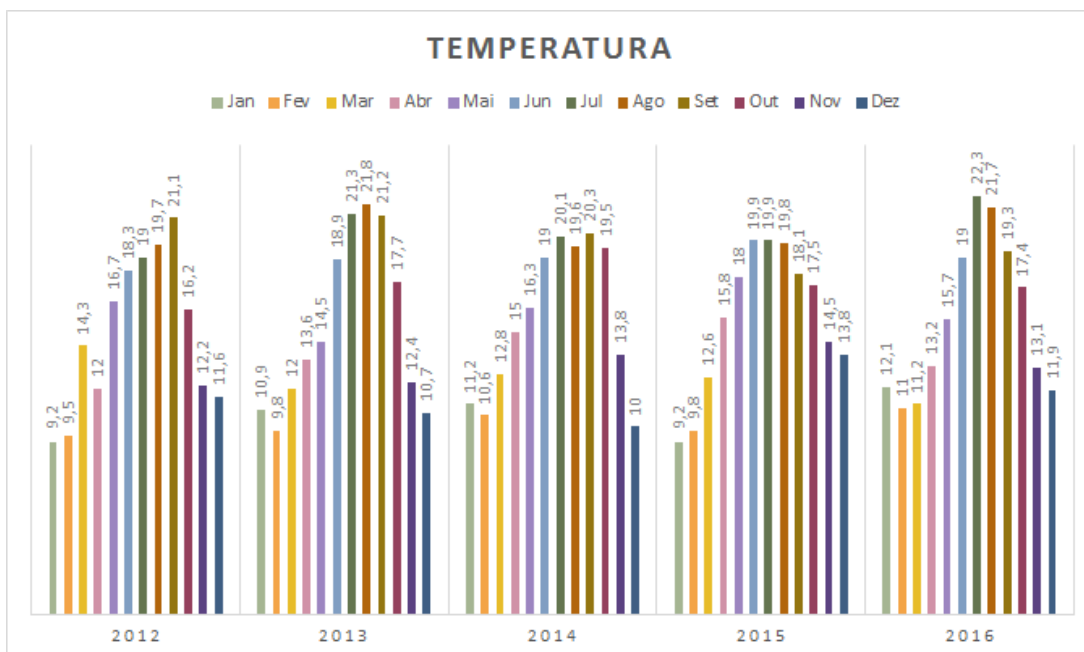


Figura 13: Médias de temperatura na área de estudo

3.2- Distribuição de Poluentes em 2016

Relativamente à análise da presença de poluentes atmosféricos foram levados em conta tanto os poluentes primários que estão na origem a formação do ozono, como o poluente alvo deste estudo, o ozono. Como poluentes primários foram considerados aqueles cuja medição se encontra ativa nas estações da Rede de Qualidade do Ar do Norte (Qualar Norte), da responsabilidade da Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDRN) (Anexo 2).

No que diz respeito à distribuição dos poluentes, a figura 12 mostra as variações ao longo do tempo, no período compreendido entre 2012 e 2016, não tendo sido incluídos os dados relativos a 2017, uma vez que (à data da conclusão deste estudo) estes não se encontram validados pela Qualar; o período de validação dos dados medidos pelas estações de monitorização é de nove meses, relativamente à última medição efetuada no ano imediatamente anterior (31 de dezembro) e de 21 meses relativamente à primeira medição efetuada (1 de janeiro). Pode verificar-se (figura 14) que o ozono se encontra medido em apenas quatro das estações dentro da área de estudo (Sobreiras, Meco, Leça do Bailio e Custóias), sendo que em apenas duas

delas (Sobreiras e Custóias) se encontra a medição simultânea de um dos poluentes primários que lhe dão origem, neste caso os NOx.

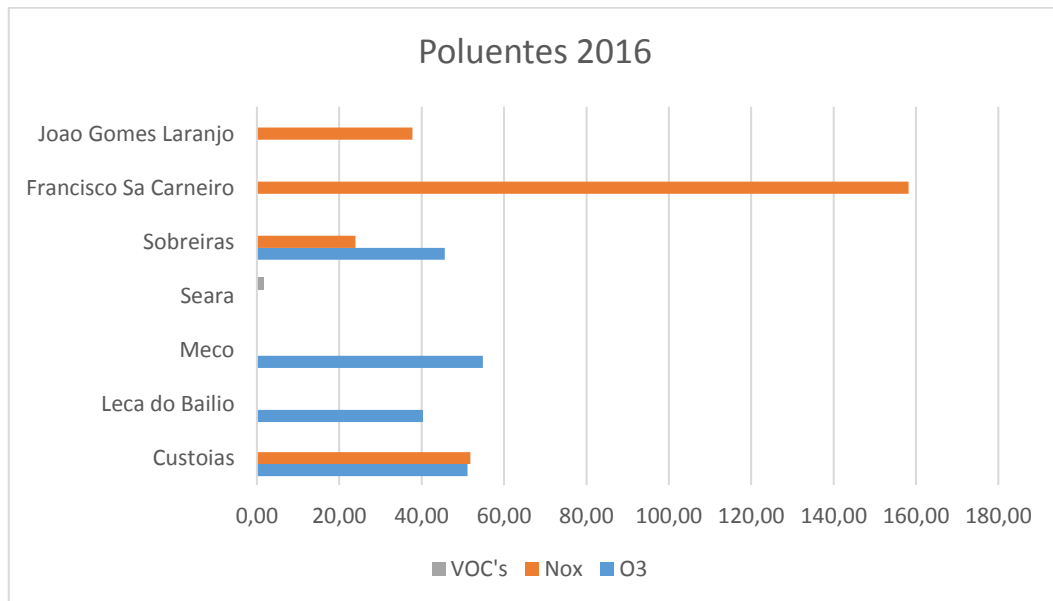


Figura 14: Medições médias dos poluentes em 2016 em cada uma das estações da área de estudo

Note-se que apenas a estação de Seara apresenta medições para os COV's, poluentes também na origem da formação do ozono, enquanto os NOx se encontram medidos nas estações de João Gomes Laranjo, Francisco Sá Carneiro, Sobreiras e Custoias. De entre as estações ativas com medições para o ozono apenas duas, Sobreiras e Custoias, medem também pelo menos um dos poluentes que dão origem à formação do ozono. As estações do Meco e Custóias (com $54,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $51,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respetivamente) apresentam as maiores concentrações de ozono para o ano de 2016, sendo que a estação do Meco não tem medições para nenhum dos poluentes precursores do ozono (NOx e COV's).

A distribuição espacial dos valores dos poluentes na área de estudo para a data mais recente para a qual existem dados validados (2016) foi calculada utilizando o método de *Inverse Distance Weighting* (IDW).

Como resultados, temos as distribuições espaciais calculadas, observadas nos mapas das figuras 15 e 16.

Óxidos de Azoto (NOx)

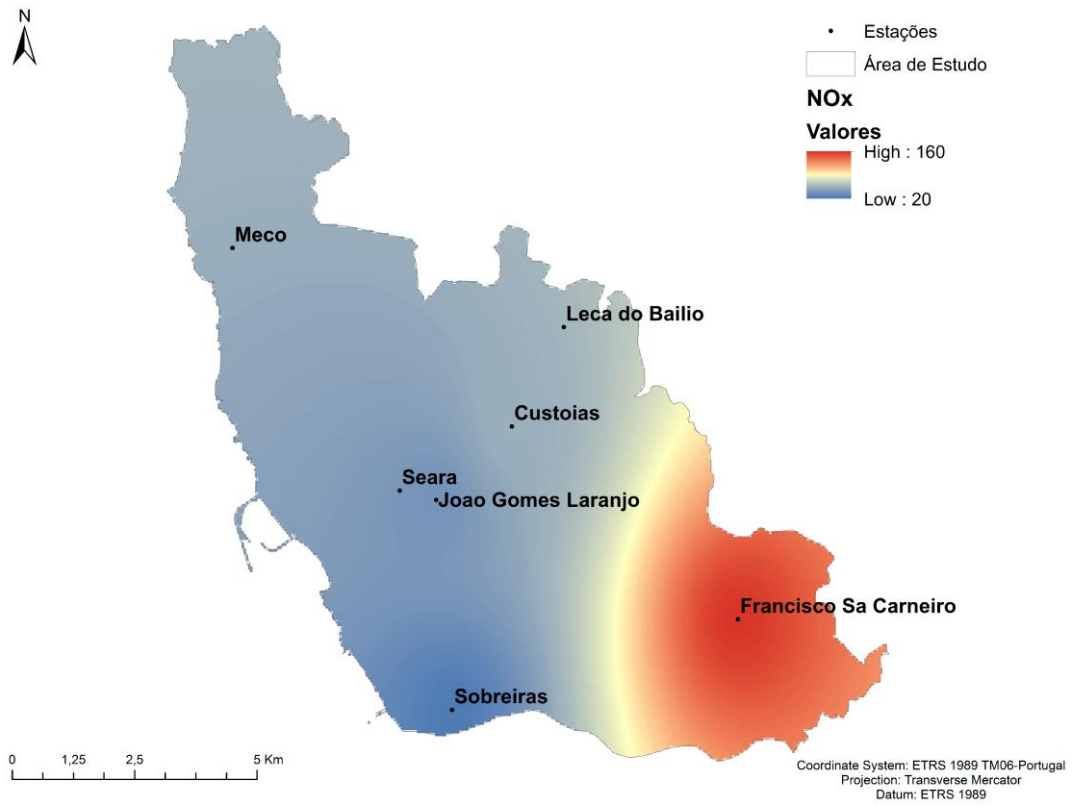


Figura 15: Distribuição dos NOx em 2016

Compostos Orgânicos Voláteis

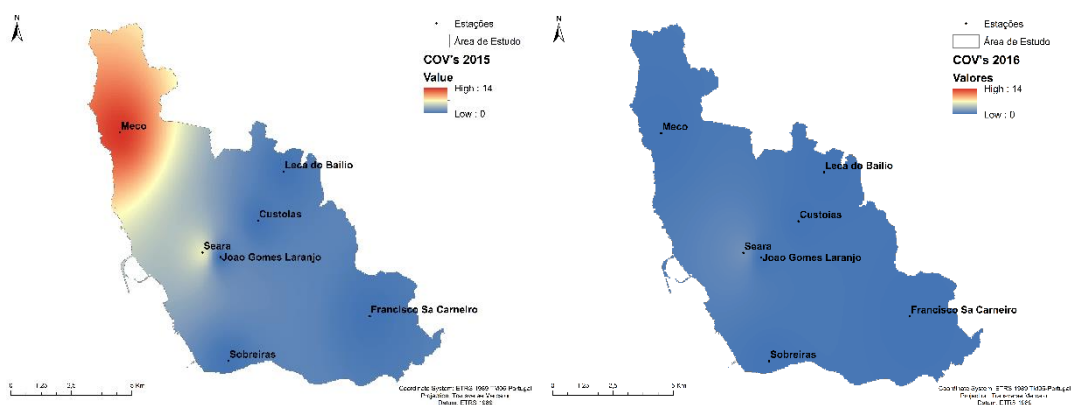


Figura 16: Distribuição dos COV em 2015 (esquerda) e 2016 (direita)

Numa primeira leitura dos mapas (figuras 11, 15 e 16) resultantes da aplicação da interpolação, destaca-se que:

- as maiores concentrações de ozono para o ano de 2016 (figura 11) verificaram-se na área do Meço (com uma média de $54,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$) logo seguido por Custóias (com uma média de $51,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- a estação do Meço apresenta os resultados mais elevados de ozono para este ano, embora não haja medições para nenhum dos poluentes precursores do ozono (NO_x e COV's).
- a estação de Custóias – com o segundo resultado mais elevado para o mesmo ano - não apresenta medições de compostos orgânicos voláteis para 2016, embora tenha medições de NO_x , cujos valores acompanham os do ozono
- das restantes áreas com medições de ozono (Sobreiras e Leça do Bailio), apenas a estação de Sobreiras apresenta medições para um dos poluentes precursores do ozono (os NO_x), sendo que nenhuma estação apresenta medições simultâneas de ozono e ambos os poluentes precursores.
- a presença de valores elevados de NO_x nas estações de Francisco Sá Carneiro e João Gomes Laranjo pode indicar a probabilidade de valores igualmente elevados de ozono, como se poderá verificar, mais à frente, com a simulação.

3.3- Exposição da população a poluentes

Para determinar quais as áreas com necessidade de uma intervenção mais célere dentro da área de estudo, foi elaborada uma análise espacial através do método *Weighted Overlay*, que permite calcular a soma ponderada dos seus *inputs* (ESRI, 2016). Esta ferramenta foi utilizada para determinar quais as áreas que conjugam maior número de indivíduos dos grupos etários de risco, com concentrações mais elevadas de poluição por ozono.

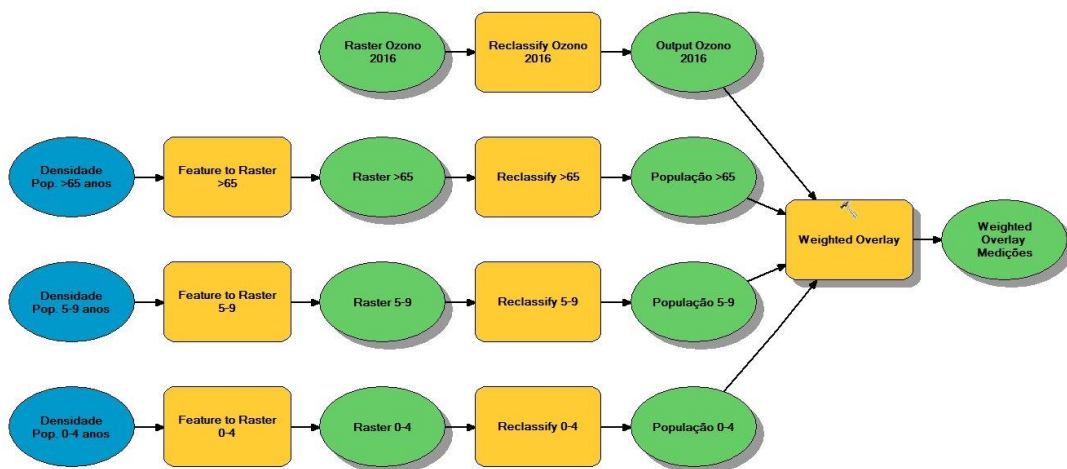


Figura 17: Fluxo de trabalho para a ferramenta *Weighted Overlay*

Foram utilizados *shapefiles* (dados vetoriais) referentes à distribuição espacial de cada um dos grupos etários¹¹ e a média do poluente ozono para o ano de 2016, sendo que este é o último ano para o qual existem dados validados pelo serviço Qualar, da Agência Portuguesa do Ambiente. A ferramenta reclassifica cada célula de acordo com o peso atribuído a cada camada. A reclassificação utiliza uma escala de preferência de 1 a 10, sendo o valor 10 o atribuído às áreas identificadas como mais favoráveis para a resposta ao problema colocado, e o valor 1 o menos favorável. No caso aqui estudado o valor mais elevado indica as áreas com mais necessidade de aplicação das medidas camarárias e o valor mais baixo, as áreas com menor necessidade de intervenção. Assim, os valores classificados referem-se às áreas com

¹¹ A população encontra-se cartografada em polígonos da BGRI, do INE.

maior incidência média do poluente ozono para o ano de 2016 e com maior número de indivíduos dentro das faixas etárias escolhidas.

Preparação dos Dados

Para a utilização do *Weighted Overlay* é necessária a preparação prévia dos dados; os formatos vetoriais necessitam de uma conversão para *raster*, uma vez que a ferramenta trabalha apenas com dados neste formato (ESRI, 2016). Assim, foram convertidos para o formato *raster* todas as camadas a utilizar nesta ferramenta: as *features* de cada um dos grupos etários integrados no estudo, (primeiro passo indicado no fluxograma da figura 17, *Feature*→*Raster*). Para este passo foi utilizada a ferramenta *Feature to Raster* para os mapas de distribuição espacial da população referente a cada um dos grupos etários incluídos no estudo.

O passo *Reclassify* atribui uma escala de avaliação comum aos *inputs* dos *raster* produzidos, ou seja, atribui uma nova classificação aos valores anteriores, de modo a que exista uma normalização na classificação utilizada em todos os *rasters*. Como se pode verificar nos parâmetros (ver Anexo 5a) a ferramenta atribui uma classificação para cada intervalo de valores (neste exemplo, um valor para intervalo de número de indivíduos maiores de 65 anos). Neste caso foi usado o *Natural Breaks* para a classificação (Anexo 5b). Foi utilizada a classificação *Natural Breaks (Jenks)* do ArcGis, uma vez que esta se baseia no agrupamento natural inerente aos dados e permitir maximizar as diferenças entre classes (Smith, Goodchild, 2015). Deste modo, garante-se que a representação se baseia em classes cujos limites são definidos de acordo com a existência de diferenças maiores entre os valores dos dados. Embora a *Natural Breaks* não seja a classificação mais útil para comparar mapas com informações diferentes (“Data classification methods—ArcGIS Pro | ArcGIS Desktop,” n.d.), optou-se por esta classificação, uma vez que o objetivo não é o de comparar as diferenças entre o número de indivíduos de cada faixa etária por áreas de residência mas antes, classificar a distribuição espacial dos indivíduos de cada grupo dentro da área de estudo.

O passo seguinte integra os dados preparados previamente, modelando o seu comportamento dentro do funcionamento da ferramenta, dado que a utilização desta ferramenta de sobreposição, torna possível definir o peso que cada submodelo terá no modelo final.

3.4- Resultados e Análise

O *Weighted Overlay* combina os diferentes critérios de *input* numa única análise, sendo que os valores de preferência mantêm o mesmo peso entre as várias camadas. Cada um dos critérios de sobreposição de *rasters* pode ter qualquer valor, desde que a sua soma iguale o total. Neste caso foi escolhido um peso de 50% para o ozono, de 20% para o grupo etário de idade igual ou superior a 65 anos e 15% para cada um dos grupos etários 0 a 4 anos e 5 a 9 anos, com os resultados distribuídos em oito classes.

A razão da escolha destes pesos para os grupos de população prende-se com o facto de - comparativamente aos grupos de 0 a 4 anos e de 5 a 9 anos - o grupo de idade igual ou superior a 65 anos ser aquele com maior número de indivíduos e cuja análise de distribuição espacial indicou que os indivíduos pertencentes a este grupo se encontram mais densamente aglomerados e em mais áreas da zona de estudo, conforme mostram os mapas de densidade da população (figuras 3, 4 e 5).

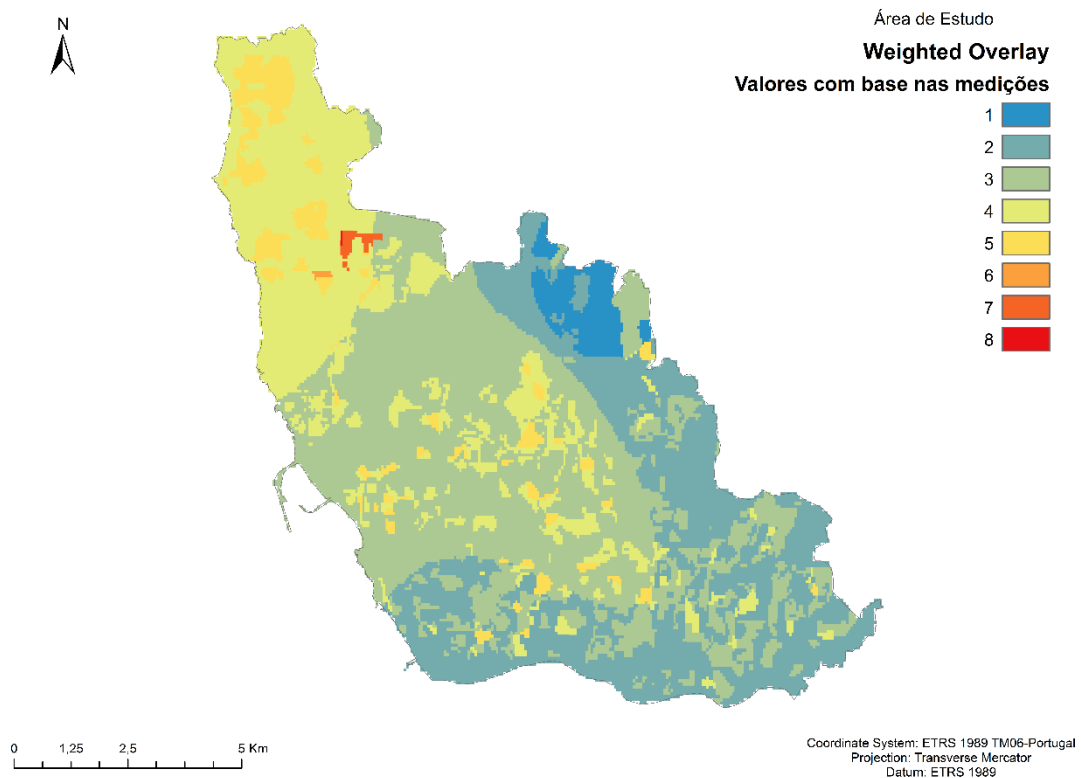


Figura 18: Resultado das classificações obtidas com o Weighted Overlay a partir das concentrações de ozono medidas

Conforme se pode verificar por observação do mapa da figura 18, este mostra, por ordem de prioridade, as zonas mais indicadas para uma intervenção mais rápida e aquelas que poderão apresentar menos necessidade de intervenção ou cuja atuação não é prioritária

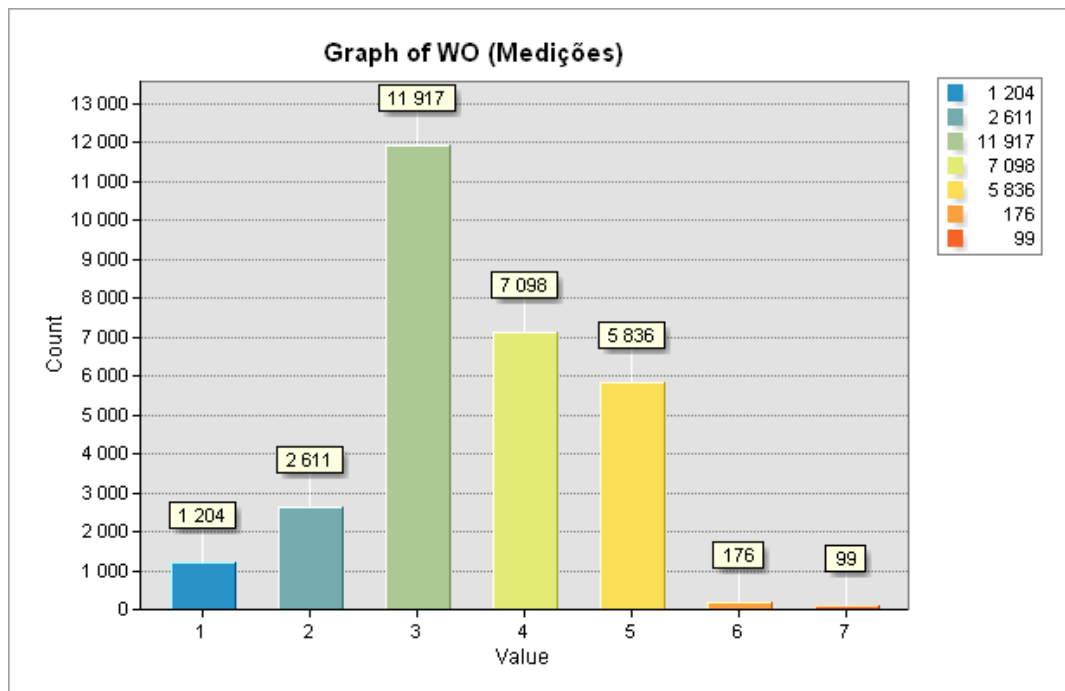


Figura 19: Gráfico correspondente à contagem de pixels conforme verificado no mapa resultante da sobreposição ponderada com os valores das medições de ozono (fig. 18)

A ferramenta atribui um valor a cada área, classificando-a segundo a percentagem de peso atribuída nos parâmetros definidos durante a sua execução e assinalando, assim, como áreas de maior valor, aquelas onde a intervenção terá de ser mais célere.

A atribuição de valores no mapa da análise não corresponde a concentrações de ozono ou a densidade populacional dos grupos de risco, mas antes à sobreposição percentualmente ponderada dos valores para ambos os casos, ou seja, o valor de cada célula é multiplicado pelo seu valor percentual. Por exemplo, uma área classificada com o valor 7 ou 8 no mapa, equivale a uma área onde concentrações mais elevadas de ozono são registadas em zonas com maior densidade de população incluída nos grupos de risco. Assim, e conforme se pode ver no gráfico da figura 19, a classe 8 não se encontra representada nos resultados (o que equivale a uma contagem de pixels igual a zero) e existe um maior peso da classe 3 (neste caso com uma contagem de 11.917 pixels).

Do mesmo modo, uma área assinalada com o valor 1 no mapa refere-se a zonas com menor concentração de ozono e menor número de indivíduos dos grupos de risco. Contudo, e uma vez que o objetivo deste trabalho é também proporcionar uma hierarquia de prioridades relativamente ao município do Porto, o mapa da figura 20

mostra o resultado para essa área, onde se pode verificar quais as zonas com valores mais altos atribuídos, mantendo-se os mesmos cálculos.

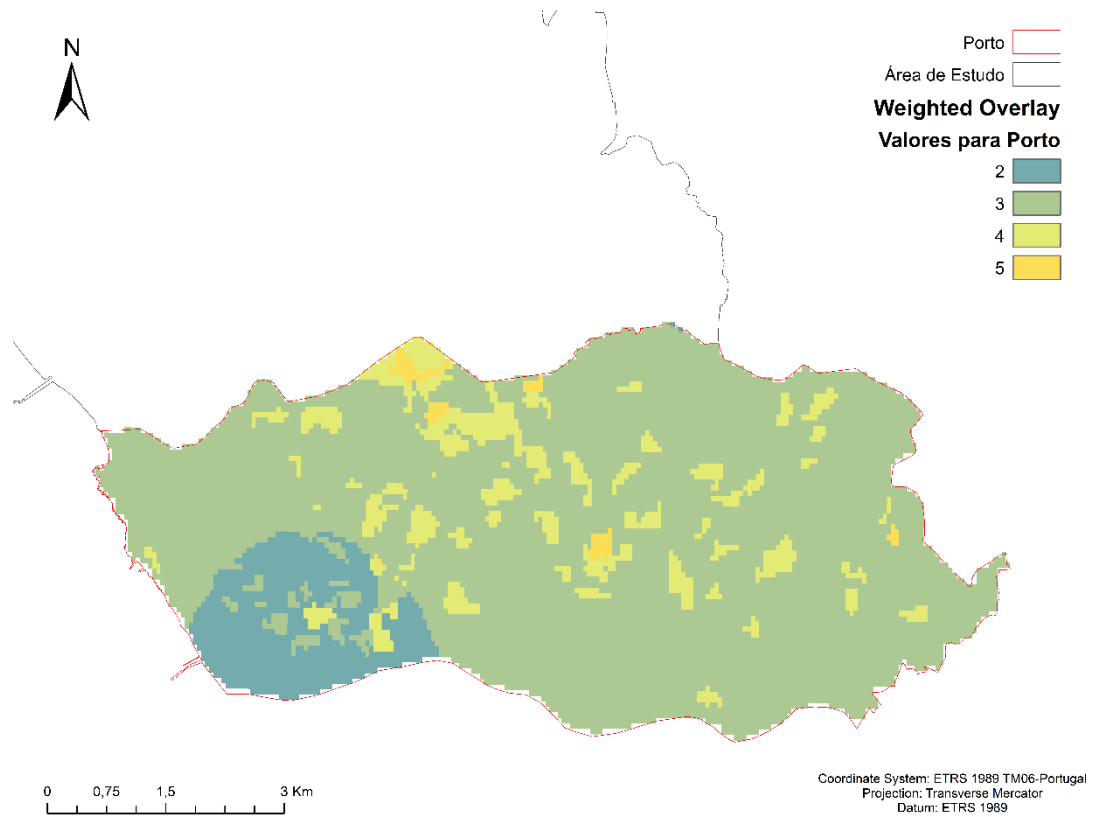


Figura 20: Resultados para o município do Porto a partir do ozono medido

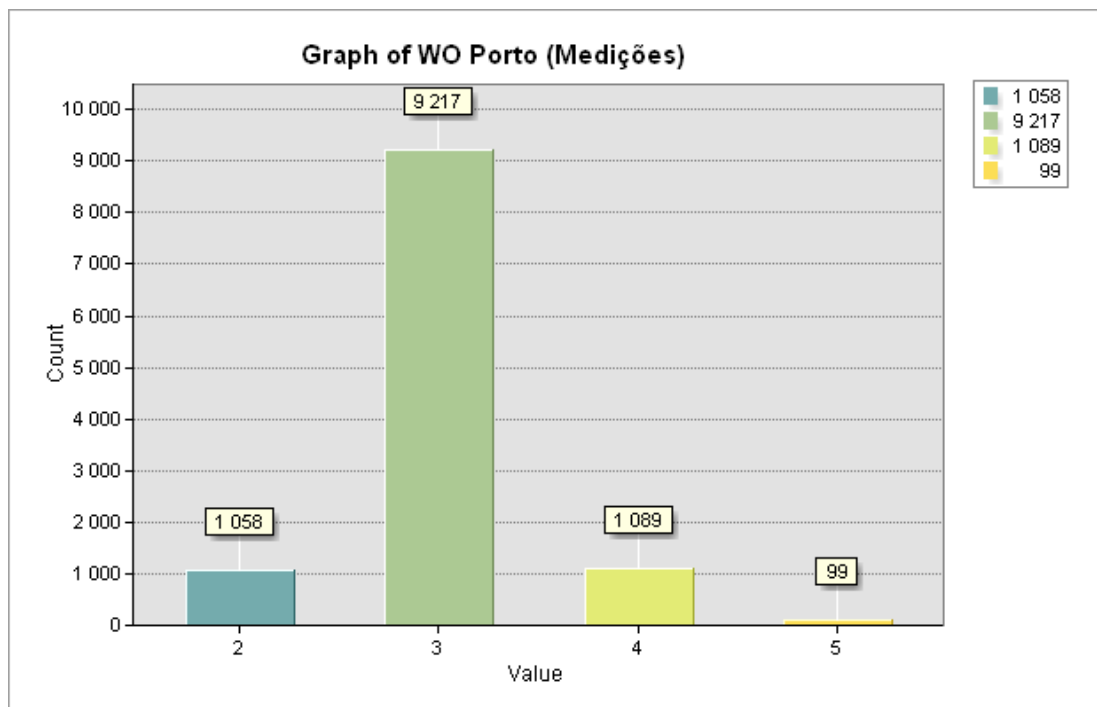


Figura 21: Gráfico de resultados da análise para o município do Porto

A leitura do gráfico da figura 21 permite confirmar o que é visível no mapa: é possível verificar a inexistência de áreas com os valores mais elevados (entre 6 e 7) de prioridade de atuação, ou seja, onde existem as condições de mais população de risco/mais concentração de ozono; o valor intermédio de prioridade (2 a 3) é atribuído à maior contagem de áreas, registando-se, depois, um número decrescente de zonas com os valores 4 e 5, sendo que não há contagem para áreas sem a presença de população de risco e sem contagem de ozono (valor 1). Note-se que existem zonas assinaladas pelo *Weighted Overlay* como sendo de baixa prioridade, sendo esta classificação coincidente com aquelas onde existe a falta de medições de ozono.

Como se pode verificar pelos mapas referentes às densidades de população (figuras 3, 4 e 5), seria de esperar a existência de zonas prioritárias dentro da área do município do Porto. Ao mesmo tempo, e também como se pode observar tanto pelo mapa de distribuição de concentração de ozono (figura 11), como pelo mapa que indica a distribuição de NOx (figura 15), um poluente precursor do ozono, seria expectável a existência de zonas prioritárias dentro do município do Porto. Contudo, tal não acontece, uma vez que o *Weighted Overlay* apenas assinala áreas prioritárias perto da zona do Meco (já no município de Matosinhos) onde, de facto, existem medições. Assim, o resultado produzido com esta análise demonstra a necessidade de existência de um meio que possibilite à Câmara do Porto determinar quais serão as áreas com uma intervenção prioritária.

A ausência de medições leva a que se coloque a hipótese de estarem a ser assinaladas como de baixa prioridade zonas onde se encontram grupos de risco quando, observando o mapa resultante da análise (figura 18) se pode verificar que estas são assinaladas em zonas onde existe uma concentração significativa de população dentro das faixas etárias de risco. Assim, a partir deste ponto, efetuou-se uma modelação do aparecimento do ozono, de modo a que se possa ter uma estimativa das áreas onde existe uma maior necessidade de intervenção.

Embora o modelo programado não inclua dados reais nem a dispersão, ele assinala as zonas de formação do poluente a partir de situações concretas - como é o caso das

principais vias rodoviárias e das áreas industriais - e é com base na modelação efetuada a partir destes parâmetros que é realizada uma nova análise que (como se verá mais à frente neste trabalho) identifica prioridades concordantes com os restantes dados (população, estradas, zonas industriais).

Na terceira parte apresenta-se a implementação deste modelo e a análise dos resultados obtidos.

III PARTE

1. SISTEMAS COMPLEXOS E EMERGÊNCIA

A terceira parte deste trabalho inicia-se com uma introdução ao tema da complexidade e o que são sistemas complexos e propriedades emergentes, uma vez que a criação do modelo se baseia precisamente na dinâmica deste tipo de sistemas. Assim, são apresentadas algumas definições e mostrado o tipo de reações químicas que ocorrem na formação e decomposição do ozono, para mostrar de que modo estas se podem definir como sistema complexo e, também, para que se tenha uma melhor compreensão das propriedades e ação dos agentes do modelo. Finalmente, é feita uma breve introdução do *software* Netlogo (Rand, 2015), das suas possibilidades de utilização e da razão da sua escolha para esta modelação.

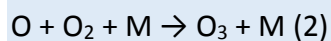
O conceito de sistemas complexos enquanto área de conhecimento científico e abordagem multidisciplinar começou a desenvolver-se na década de 90 do século passado (Eisler, 2017), e atualmente é utilizado em várias áreas de estudo, desde sociologia, a economia e sistemas biológicos. Embora não exista uma definição formal do que é um sistema complexo (Holland, 1992), de um modo geral pode dizer-se que se trata de um conjunto de unidades (também podendo ser designados por componentes, indivíduos ou agentes) que interagem entre si e que exibem determinadas propriedades, entre elas a da emergência. Ou seja, a emergência é uma característica comum em sistemas complexos onde o comportamento do conjunto total é mais complexo do que o comportamento das suas partes (Holland, 1997)

No mundo real, as estruturas observadas em sistemas económicos, sociais ou biológicos (apenas para referir algumas das áreas) são formadas por sistemas emergentes decorrentes das interações entre múltiplos sub-sistemas menores (Muaz A. Niazi, Hussain, 2012). É esta interação do “micro”, composta eventualmente por componentes mais simples, que se encontra na origem de estruturas e comportamentos bastante mais complexos, quando observados de um ponto de vista “macro”(Fromm, 2005)(Holland, 1997). Assim, e levando em conta que a

formação do poluente ozono a nível troposférico se pode inserir dentro das definições descritas, o modelo criado em Netlogo pretende simular o fenómeno da emergência deste poluente dentro da área específica de estudo. Ao serem transformados os poluentes envolvidos na produção e decomposição do ozono troposférico – através das reações entre poluentes primários - pode ver-se o aparecimento do ozono como um sistema complexo.

Um poluente primário é aquele que é introduzido na atmosfera diretamente a partir de uma fonte emissora, enquanto um poluente secundário é resultante de reações químicas entre aqueles poluentes primários. Uma vez que o ozono se trata de um poluente secundário, este não é resultante de uma fonte emissora, mas sim o resultado de reações entre outros poluentes - maioritariamente dióxidos de azoto (NOx) e compostos orgânicos voláteis (COV's) - e na presença de luz solar.

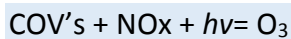
Na estratosfera o ozono é produzido num ciclo conhecido como ciclo Chapman (Jacob, 1999). O ozono é formado através da fotólise de moléculas de oxigénio para átomos de oxigénio, seguida pela reação de um átomo de oxigénio com uma molécula de oxigénio:



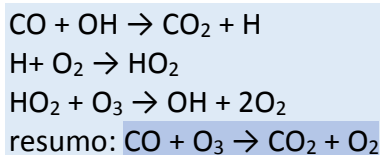
Note-se que o ciclo Chapman de formação de ozono ocorre na estratosfera. Este processo impede as ondas mais curtas da radiação ultravioleta de alcançarem a superfície terrestre e, uma vez que o comprimento de onda mais curto dos UV é o que contém mais energia, os processos fotoquímicos mais eficientes ocorrem na estratosfera. Perto da superfície terrestre, na troposfera, a radiação solar não tem intensidade suficiente para produzir ozono sem a presença de outros compostos, ou seja, o ozono troposférico não é produzido pelo ciclo Chapman, embora seja também necessária luz solar para que a reação com os outros poluentes se processe.

A formação de ozono troposférico é, assim, um sistema complexo, baseado em vários processos dinâmicos mais simples que, no seu conjunto, concorrem para a

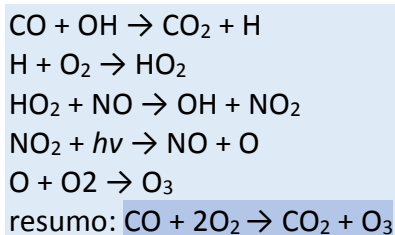
propriedade emergente deste poluente. Fazendo uma breve apresentação deste processo:



Na troposfera ocorre um processo de formação de ozono diferente; aqui, a fonte de oxigénio necessária à formação de ozono provém da fotodissociação do dióxido de azoto: $\text{NO}_2 + h\nu$ ($300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$) $\rightarrow \text{NO} + \text{O}$. Esta equação mostra a relação entre os óxidos de azoto e o ozono na troposfera. De facto, os NO_x atuam como uma alavanca tanto no processo de formação do ozono como no da sua decomposição. Quando existem uma baixa concentração de NO dá-se o seguinte processo:



Contudo, quando as concentrações de óxidos de azoto se tornam elevadas, acontece o seguinte:



Ou seja, quando existem baixas concentrações de NO_x , o ozono é destruído, quando existem altas concentrações, forma-se ozono. As reações acima descritas dão-se rapidamente e concorrem para uma concentração estável dos níveis de ozono, levando a que estas não sejam, por si só, suficientes para justificar os níveis de ozono encontrados em ambientes urbanos. Para que tal aconteça é necessário que o NO se converta em NO_2 , sem que haja consumo de ozono, fazendo assim com que este se acumule. Este tipo de reação ocorre, por exemplo, na presença de hidrocarbonetos, ou compostos orgânicos voláteis simples (Finlayson-Pitts, 1997).

Relativamente aos COV's , estes são compostos químicos que contêm carbono (C) e que em contacto com a atmosfera se volatilizam rapidamente. Além disso, a sua presença impede que o ozono presente na atmosfera seja rapidamente consumido

pelo NO para formar NO₂ (Lindskog, 2008). Os COV's podem ser libertados diretamente na atmosfera ou por combustão incompleta de gasolina (CCDRN, n.d.), como ocorre nos motores de combustão interna dos automóveis ou por indústrias. O papel na formação do ozono é bastante complexo e a sua representação no âmbito deste trabalho seria desajustada, salientando-se, no entanto, a sua forma simplificada, uma vez que a presença dos compostos orgânicos voláteis na atmosfera (quer a sua origem seja natural ou antropogénica) causa uma alteração no sentido de concentrações mais elevadas de ozono (Lindskog, 2008).

Relativamente às fontes antropogénicas emissoras dos poluentes primários, estas podem ser enquadradas em quatro categorias segundo o modo: ponto, área, rodoviário e não rodoviário. Na primeira categoria, (ponto), podem incluir-se indústria, gasodutos e oleodutos; na segunda categoria (área), pecuária, revestimentos de edifícios; na terceira (rodoviário), carros e camiões; e na quarta (não rodoviário), aviação, navios, maquinaria de construção.

No modelo criado, a simulação inclui as categorias área e rodoviário, com as duas zonas industriais de Matosinhos e o traçado das vias principais dentro da área de estudo, respetivamente. De salientar que, embora as indústrias se incluam como emissores “ponto”, para o presente trabalho foram consideradas como “área”, uma vez que os dados se referem a concentrações de poluentes em áreas determinadas, e não de valores de emissões.

2. MODELO EM NETLOGO

O Netlogo trata-se de um *software* de modelação por agentes (Rand, 2015) desenvolvido por Uri Wilensky (Northwestern University, EUA), baseado na linguagem de programação Logo. Utiliza um ambiente de simulação discreto, no qual os agentes executam ações discretas em sequência temporal (“ticks”). De um modo geral, na construção de um modelo por agentes são seguidas algumas fases comuns a todos, e que passam pela identificação dos agentes e dos seus atributos, do ambiente em que estes agentes existem e como interagem e as regras segundo as quais estas interações acontecem, tarefas que são de fácil compreensão e execução em Netlogo. A existência de um dicionário auxiliar da criação do código é uma vantagem da sua utilização por não programadores, bem como uma extensa biblioteca de modelos, o que facilita a compreensão do tipo de modelo mais adequado para a tarefa escolhida.

Outra das vantagens da utilização deste *software* prende-se com a facilidade de aprendizagem da sua programação, uma vez que este utiliza uma linguagem de alto nível, agilizando a tarefa de criação do modelo por parte de profissionais não programadores. Note-se, também, que a existência do curso online de introdução à modelação por agentes com base neste software (disponibilizado pelo *Complexity Explorer*, do Santa Fé Institute,) facilita e agiliza a utilização desta ferramenta de modelação (“Complexity Explorer,” n.d.). Além das características acima descritas, trata-se de uma ferramenta código-fonte aberto e que pode ser utilizada nos sistemas operativos Windows, Mac e Linux. É possível, contudo, utilizar o Netlogo online, através do Netlogo Web¹², o que torna possível a visualização dos modelos sem a necessidade de instalação do *software*.

Para a descrição do modelo, este capítulo segue o protocolo ODD (*Overview, Design concepts and Details*) (Grimm, et al., 2006), e optou-se por manter como títulos e subtítulos os termos em inglês, conforme referidos originalmente no protocolo. É feita uma descrição dos objetivos, dos agentes e extensão do modelo, das regras dos

¹² <http://www.netlogoweb.org/>

agentes e das condições iniciais. São ainda descritos os procedimentos que conduzem à emergência do ozono e os sub-sistemas envolvidos no processo. O protocolo ODD trata-se de uma documentação normalizada da modelação por agentes, proposta por Volker Grimm em 2006, de modo a que a documentação dos modelos desenvolvidos seja facilmente compreensível entre as várias áreas científicas que utilizam este tipo de modelação.

O protocolo tem em vista manter uma estrutura base de descrição dos modelos (Polhill, Parker, Brown, & Grimm, 2008) de modo a que a informação contida na documentação seja facilmente encontrada e identificada por qualquer utilizador que pretenda compreender/utilizar um determinado modelo. Embora existam várias formas eficazes de documentação de um modelo por agentes (Polhill et al., 2008) seguidas em publicações científicas, a sua utilização permite uma compreensão mais rápida dos modelos e respetivos procedimentos utilizados (V. Grimm, 2006).

A estrutura geral inclui sete elementos englobados em três categorias principais requeridas para a descrição dos modelos; (a categoria *Overview* divide-se em três secções (*Purpose*, *State Variables and Scales* e *Process Overview*). O objetivo desta categoria é o de fornecer ao leitor os detalhes suficientes para que se tenha uma visão de conjunto do modelo, dos seus objetivos e do que este inclui.

Na seção *Purpose* são explicados os objetivos do modelo e o que este pretende simular. A seção *State Variables and Scales* descreve a estrutura do modelo, especificando os tipos de entidades (agentes) ou outros elementos que se encontram no modelo. Esta seção inclui ainda as escalas espaciais e temporais do modelo e os motivos da sua utilização.

O *Process Overview* lista todos os processos que ocorrem no modelo e como estes decorrem: quais os agentes envolvidos, quando e por qual ordem, bem como as atualizações das variáveis. De um modo geral, a categoria *Overview* permite uma compreensão da estrutura do modelo (Volker Grimm et al., 2010).

Overview	<i>Purpose</i>
	<i>State variables and Scales</i>
	<i>Process Overview</i>
Design	<i>Design Concepts</i>
Details	<i>Initialization</i>
	<i>Input</i>
	<i>Submodels</i>

Tabela 5: Categorias e seções do protocolo ODD

A categoria *Design* inclui apenas uma seção, *Design Concepts*, cujo objetivo não é o de descrever o modelo em si mas antes o de apresentar ao leitor os conceitos gerais nos quais se baseia a estrutura do modelo e que se baseiam nas características e propriedades das entidades.

A categoria *Details*, acrescenta informação pormenorizada à estrutura anteriormente apresentada. A seção *Initialization* mostra as condições iniciais do modelo no momento $t=0$, indicando os valores das variáveis. A seção *Input* descreve quais os dados acrescentados ao modelo e, finalmente, a seção *Submodels* descreve os parâmetros presentes, explicando detalhadamente os processos referidos na categoria *Overview*.

2.1- Overview

Purpose

O modelo foi criado com o objetivo de simular a formação do ozono troposférico num ambiente urbano, formado por reação fotoquímica a partir da presença dos poluentes primários óxidos de azoto e compostos orgânicos voláteis na presença de radiação solar (Kleinman *et al.*, 2001). Tendo presente que o conjunto de condições que está na origem da emergência do ozono troposférico se trata de um sistema

complexo com inúmeras variáveis, o modelo simula as condições da sua formação a partir da presença dos poluentes primários e inclui a radiação solar. Saliente-se que este modelo foi programado com o objetivo de permitir ao utilizador adaptar os parâmetros que regem o comportamento dos agentes e dos fatores que os influenciam, de modo a poder ser utilizado de acordo com cada caso específico.

State Variables and Scales

O modelo foca-se principalmente na formação do ozono a partir dos poluentes primários, pelo que determina a produção dos mesmos em quantidades determinadas pelo utilizador. Estes poluentes são produzidos ao longo das estradas, para o caso do monóxido de azoto e dióxido de azoto, e nas áreas de indústria para o caso dos compostos orgânicos voláteis. A localização das estradas e indústria é incluída no modelo através de duas camadas *shapefile* integrada através da extensão SIG do Netlogo.

O modelo contém as variáveis globais apresentadas no excerto de código seguinte:

```
globals [
  hours
  days
  daytime
  p-rate
  NO2-rate
]
```

Nome da variável	Descrição
<i>hours</i>	Mantém uma representação do tempo em horas
<i>days</i>	Mantém uma representação do tempo em dias
<i>daytime</i>	Faz a distinção entre dia e noite
<i>p-rate</i>	Determina se os poluentes são produzidos ou não em dado momento
<i>NO2-rate</i>	Limiar de reação fotoquímica

Tabela 6: Variáveis globais do modelo

São definidos como agentes principais os poluentes:

```
breed [VOC VOCs]
```

```
breed [NO2 NO2s]
breed [NO NOs]
breed [O1 O1s]
breed [O3 O3s]
```

Nome do Agente	Descrição	Cor
VOC	<i>Volatile organic compounds</i>	Amarelo
NO2	<i>Nitrogen dioxide</i>	Castanho
NO	<i>Nitrogen monoxid</i>	Azul
O1	<i>Oxygen radicals</i>	Verde
O3	<i>Ozone</i>	Vermelho

Tabela 7: Classes de agentes

Para os agentes foram definidas as seguintes variáveis:

```
turtles-own [
  speed
  origin
  wind-speed
]
```

Nome da variável	Descrição
<i>speed</i>	distância a percorrer no próximo tick (momento)
<i>origin</i>	“roads” ou “industry”, consoante tenha sido produzido a partir de uma estrada ou numa zona industrial
<i>wind-speed</i>	caso o utilizador tenha ativado o <i>switch</i> “wind”, esta variável guarda a distância a percorrer no próximo <i>tick</i> , derivada da força do vento

Tabela 8: Variáveis dos agentes

As variáveis das *patches*¹³ são definidas pelo input dos *shapefiles* importados. Sempre que um *patch* é sobreposto por alguma geometria (*feature*) proveniente de um *shapefile*, é armazenado o valor de alguns atributos, pré-definidos, (do *shapefile*) na

¹³ cada *patch* é uma célula da grelha bidimensional do *Netlogo*

respetiva variável do *patch*. Segue-se o excerto de código onde são declaradas as variáveis dos *patches* que armazenarão os valores dos atributos provenientes das geometrias dos *shapefiles*.

```
patches-own [
  residents
  d0-4
  d5-9
  d65
  road-class
  industry-class
]
```

<i>residents</i>	Densidade populacional.
d0-4	Densidade populacional de indivíduos entre os 0 e os 4 anos de idade
d5-9	Densidade populacional de indivíduos entre os 5 e os 9 anos de idade
d65	Densidade populacional de indivíduos com 65 anos de idade, ou mais
<i>road-type</i>	Caso um <i>patch</i> seja percorrido por uma estrada, esta variável armazenará o tipo dessa estrada.
<i>road-class</i>	Caso um <i>patch</i> seja percorrido por uma estrada, esta variável armazenará a classe dessa estrada.
<i>industry-class</i>	Caso um <i>patch</i> seja sobreposto por uma zona industrial, esta variável armazenará a classe dessa zona industrial.

Tabela 9: Variáveis dos patches

Process overview

Para determinar os ciclos de funcionamento do modelo – importantes para a formação do ozono, por este depender da presença de radiação solar – as variáveis globais foram determinadas do seguinte modo para o estado inicial:

```
set daytime false
  set hours 0
  set days 0
  ifelse pollutants-daylight-cycle = true [set p-rate 0][set p-
rate 1]
  if number-of-ticks-per-hour = 0 [set number-of-ticks-per-
hour 5]
```

Nome da variável	Valor inicial	Descrição
<i>daytime</i>	<i>false</i>	noite
<i>hours</i>	0	meia-noite
<i>days</i>	0	0 dias decorridos
<i>p-rate</i>	0 ou 1	Se o utilizador tiver ativado o <i>switch</i> “ <i>pollutants-dayLight-cycle</i> ”, visto que o momento inicial do modelo é noite, o <i>p-rate</i> (variável que controla a produção de poluentes) é inicializado a 0. Caso contrário, o <i>p-rate</i> é inicializado a 1, pois o utilizador selecionou que os poluentes devem ser produzidos durante 24horas, e não apenas durante o dia

<i>number-of-ticks-per-hour</i>	5	número de <i>ticks</i> a que corresponde uma hora
---------------------------------	---	---

Tabela 10: Valores por defeito do modelo

De seguida é determinado o comportamento dos poluentes nas áreas ocupadas por estradas, a velocidade a que estes são produzidos, cujos valores podem ser inseridos pelo utilizador (figura 22):

Figura 22: Exemplo de inputs de controle dos poluentes

Os valores não preenchidos pelo utilizador são inicializados com valores por defeito. Segue-se o trecho de código onde são atribuídos estes valores por defeito para as variáveis relativas às estradas:

```

if road-polutants-initial-speed = 0 [set road-polutants-
initial-speed 0.5]
if road-polutants-delta-speed = 0 [set road-polutants-delta-
speed 0.9]
if road-polutants-minimum-speed < 0 [set road-polutants-
minimum-speed 0]

```

```

if road-polutants-production-frequency = 0 [set road-
polutants-production-frequency 5]
if roads-NO-production = 0 [set roads-NO-production 1]
if roads-NO2-production = 0 [set roads-NO2-production 1]

```

Nome das variáveis	Valor por defeito	Descrição
<i>road-polutants-initial-speed</i>	0.5	a velocidade inicial atribuída a poluentes produzidos em <i>patches</i> onde passam estradas
<i>road-polutant-delta-speed</i>	0.9	fator de atualização da velocidade dos poluentes produzidos em <i>patches</i> onde passam estradas em cada <i>tick</i> . 0 fará com que os poluentes parem após o primeiro <i>tick</i> de vida, valores entre] 0; 1 [farão com que a velocidade dos poluentes diminua a cada <i>tick</i> , 1 fará com que a velocidade dos poluentes se mantenha inalterada durante os seus ciclos de vida,] 1; +∞ [farão com que a velocidade dos poluentes aumente a cada <i>tick</i>
<i>road-polutants-minimum-speed</i>	0	velocidade mínima, a partir da qual não é possível diminuir a velocidade dos poluentes
<i>road-polutants-production-frequency</i>	5	o número de <i>ticks</i> que deve passar entre momentos de produção de poluentes provenientes de estradas
<i>roads-NO-production</i>	1	número de agentes do tipo NO que devem ser produzidos a cada

		momento de produção dos mesmos em <i>patches</i> percorridos por estradas
<i>roads-NO2-production</i>	1	número de agentes do tipo NO2 que devem ser produzidos a cada momento de produção dos mesmos em <i>patches</i> percorridos por estradas

Tabela 11: Valores por defeito dos inputs de controlo associados às estradas

Relativamente às duas áreas industriais:

```

if industry-polutants-initial-speed = 0 [set industry-
polutants-initial-speed 0.8]
  if industry-polutants-delta-speed = 0 [set industry-
polutants-delta-speed 0.9]
    if industry-polutants-minimum-speed < 0 [set industry-
polutants-minimum-speed 0]
      if industry-polutants-production-frequency = 0 [set
industry-polutants-production-frequency 1]
        if industry-VOC-production = 0 [set industry-VOC-production
5]

```

Nome das variáveis	Valor por defeito	Descrição
<i>industry-polutants-initial-speed</i>	0.8	a velocidade inicial atribuída a poluentes produzidos em <i>patches</i> onde passam estradas
<i>industry-polutant-delta-speed</i>	0.9	fator de atualização da velocidade dos poluentes produzidos em <i>patches</i> onde passam estradas em cada <i>tick</i> . 0 fará com que os poluentes parem após o primeiro <i>tick</i> de vida, valores entre] 0; 1 [farão com que a velocidade dos poluentes

		diminua a cada tick, 1 fará com que a velocidade dos poluentes se mantenha inalterada durante os seus ciclos de vida,] 1; $+\infty$ [farão com que a velocidade dos poluentes aumente a cada <i>tick</i>
<i>industry-pollutants-minimum-speed</i>	0	velocidade mínima, a partir da qual não se tornará possível diminuir a velocidade dos poluentes
<i>industry-pollutants-production-frequency</i>	1	o número de <i>ticks</i> que deve passar entre momentos de produção de poluentes provenientes de estradas
<i>industry-VOC-production</i>	5	número de agentes do tipo VOC que devem ser produzidos a cada momento de produção dos mesmos em <i>patches</i> percorridos por estradas

Tabela 12:Valores por defeito dos inputs de controlo associados às zonas industriais

2.2- Design

Design Concepts

Este ponto passa a explicar o que é feito no modelo, apresentando as principais decisões tomadas:

Por se tratar de sistema complexo e que depende de um número considerável de variáveis, optou-se por permitir ao utilizador configurar o máximo número de variáveis possível. Em caso de dúvida sobre que valores inserir, ao executar o modelo os *widgets* para input do utilizador são preenchidos com valores por defeito.

Após inicializar todas as variáveis com os valores acima apresentados, são carregados os dados espaciais da População, Estradas e Zonas industriais. O modelo apenas suporta *shapefiles* do tipo polígono porque deste modo é possível usar o procedimento [gis:apply-coverage](#) a fim de guardar atributos das geometrias dos *shapefiles* às variáveis dos *patches*.

Após ter sido concluída a inicialização do modelo, ativada pelo utilizador através do botão Setup, pode dar-se início à execução do modelo, clicando-se no botão Go:



A execução do modelo é dada em várias iterações, denominadas por “*ticks*”. Segue-se a lista simplificada das ações efetuadas a cada iteração:

1. São atualizadas as horas, os dias e, ainda se é dia ou noite. Isto foi feito de modo a permitir ao utilizador controlar se durante a execução do modelo devem ser produzidos poluentes 24h por dia ou se durante a noite a produção dos mesmos deve ser suspensa.
2. Caso o utilizador tenha ativado o *switch* daily-export, no final de cada dia os poluentes são exportados para a pasta “*exported_shapefiles*” com o formato *shapefile* e com nome igual ao número do dia correspondente.
3. São produzidos poluentes, a partir dos *patches* sobre os quais se encontram polígonos relativos a estradas ou zonas industriais. No entanto, o utilizador

consegue controlar a frequência com que os diversos poluentes são produzidos, apresentando o número de *ticks* pretendido (tanto em estradas como em zonas industriais) nos inputs *roads-pollutants-production-frequency* e *industry-pollutants-production-frequency*.

4. São executados os movimentos dos diversos agentes (poluentes) sendo que estes se movimentam segundo parâmetros distintos, consoante tenham sido produzidos em zonas industriais ou estradas. Por este motivo, os agentes têm uma variável *origin*. Todos os poluentes têm um movimento implícito, controlado pelas velocidades introduzidas pelo utilizador. Caso o utilizador tenha ativado a opção *wind* os poluentes serão movidos em função da variável interna *wind-speed*.
5. Executam-se as reações, sendo que durante o período noturno não será produzido O3 nem ocorre a transformação de NO2, pois tratam-se de reações que dependem da radiação solar.
6. No final de cada iteração, são atualizados os gráficos *O3-plot*, *VOC-plot*, *NO2-plot* e *NO-plot* com o número de agentes de cada um destes elementos presentes nesse momento temporal (medido em horas).

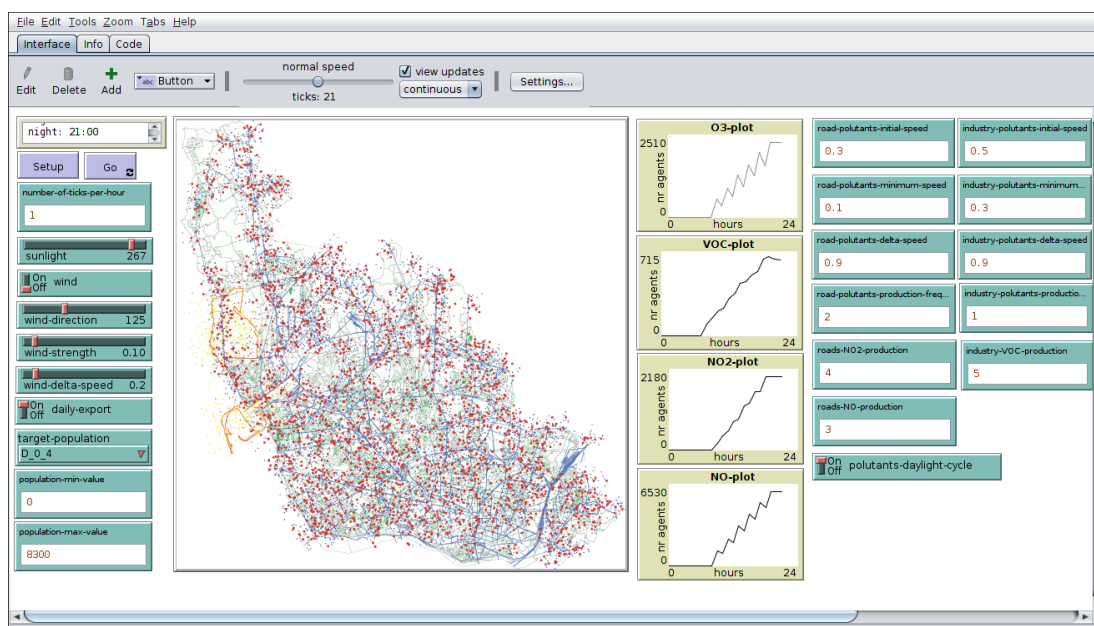


Figura 23 Exemplo de um momento de execução do modelo

2.3- Details

Segue-se uma explicação mais detalhada do processo de inicialização do modelo, dos inputs recebidos a partir de ficheiros externos e dos submodelos presentes.

Initialization

Nesta secção é descrito o processo de inicialização do modelo, contido no procedimento **Setup**, e iniciado assim que o utilizador clique no botão Setup.

```
ifelse pollutants-daylight-cycle = true [set p-rate 0][set p-
rate 1]
  if number-of-ticks-per-hour = 0 [set number-of-ticks-per-
hour 5]
    if road-pollutants-initial-speed = 0 [set road-pollutants-
initial-speed 0.5]
      if road-pollutants-delta-speed = 0 [set road-pollutants-delta-
speed 0.9]
        if road-pollutants-minimum-speed < 0 [set road-pollutants-
minimum-speed 0]
          if road-pollutants-production-frequency = 0 [set road-
pollutants-production-frequency 5]
            if roads-NO-production = 0 [set roads-NO-production 1]
              if roads-NO2-production = 0 [set roads-NO2-production 1]
                if industry-pollutants-initial-speed = 0 [set industry-
pollutants-initial-speed 0.8]
                  if industry-pollutants-delta-speed = 0 [set industry-
pollutants-delta-speed 0.9]
                    if industry-pollutants-minimum-speed < 0 [set industry-
pollutants-minimum-speed 0]
                      if industry-pollutants-production-frequency = 0 [set
industry-pollutants-production-frequency 1]
                        if industry-VOC-production = 0 [set industry-VOC-production
5]
```

Os parâmetros são inicializados, por defeito, de modo a refletir o facto de os poluentes produzidos nas estradas, devido à sua constituição, massa e serem produzidos ao nível do solo, tendencialmente se moverem perto do local de emissão. No entanto, este é um fenómeno complexo e, portanto, depende de várias circunstâncias, e.g. a localização da estrada, pelo que o utilizador poderá sempre ajustar estes parâmetros de modo a refletir da forma mais ajustada possível o caso

particular que tiver entre mãos. Uma vez inicializadas as variáveis globais e de atribuir valores por defeito aos inputs inutilizados pelo utilizador, são carregadas as *shapefiles* da densidade populacional, estradas e zonas industriais.

```
gis:load-coordinate-system (word "shp_pop/population.prj")
  let population-dataset gis:load-dataset
"shp_pop/population.shp"
  let roads-dataset gis:load-dataset "shp_roads/roads.shp"
  let industry-dataset gis:load-dataset
"shp_industry/industry.shp"
  gis:set-world-envelope (gis:envelope-union-of (gis:envelope-
of      population-dataset) (gis:envelope-of industry-
dataset) (gis:envelope-of roads-dataset))
```

Uma vez que todos os *shapefiles* se encontram projetados para o mesmo sistema de coordenadas (requisito obrigatório), apenas é carregado o ficheiro .prj de um dos *shapefiles*, neste caso “population.prj”. São carregados os dados dos *shapefiles* para as respetivas variáveis: *population-dataset*, *roads-dataset* e *industry-dataset*. São ajustadas as coordenadas do *display* do *NetLogo* às coordenadas dos *shapefiles* com o procedimento *gis:set-world-envelope* usando a união das extensões espaciais dos *shapefiles*, de modo a que todas as geometrias dos mesmos apareçam no *display*.

Seguidamente, com o procedimento *gis:apply-coverage*, são guardados nas variáveis dos *patches* sobre os quais são *renderizados* os polígonos os valores dos atributos desses polígonos (este método apenas se aplica a polígonos e, por isso, a *shapefile* das estradas foi convertida de linhas para polígonos).

```
gis:apply-coverage population-dataset "D_0_4" d0-4
gis:apply-coverage population-dataset "D_5_9" d5-9
gis:apply-coverage population-dataset "D_65" d65
gis:apply-coverage roads-dataset "CLASS" road-class
gis:apply-coverage industry-dataset "CLASS" industry-class
```

Finalmente, são *renderizados* os polígonos relativos a cada *shapefile*, pela ordem pretendida. Faz-se uso do ciclo *foreach* de modo a percorrer cada *feature* (geometria) de uma camada e usa-se essa geometria como parâmetro (ou um dos parâmetros) da função responsável por *renderizar* essa geometria com o estilo pretendido, cor de preenchimento, cor de limite, espessura dos limites, etc.

```

foreach gis:feature-list-of population-dataset
[
  feature -> scale-paint-polygon feature lime target-
population population-min-value population-max-value
]
foreach gis:feature-list-of industry-dataset
[
  feature -> paint-industries feature (orange + 1) ; lighter
orange
]
foreach gis:feature-list-of roads-dataset
[
  feature -> paint-roads feature (blue + 1) ; lighter blue
]

```

No caso dos polígonos provenientes da camada com dados relativos à densidade populacional, estes são preenchidos com cor de intensidade em função dos limites apresentados pelo utilizador através dos *inputs* population-min-value e population-max-value. Neste caso, foi usada uma *shapefile* com três atributos, D_0_4, D_5_9 e D_65, com os valores da densidade populacional de indivíduos com idades entre os 0 e os 4 anos, entre os 5 e os 9 e maiores de 65, respetivamente. O utilizador pode selecionar qual destes valores pretende utilizar para apresentar, através do *input* target-population.

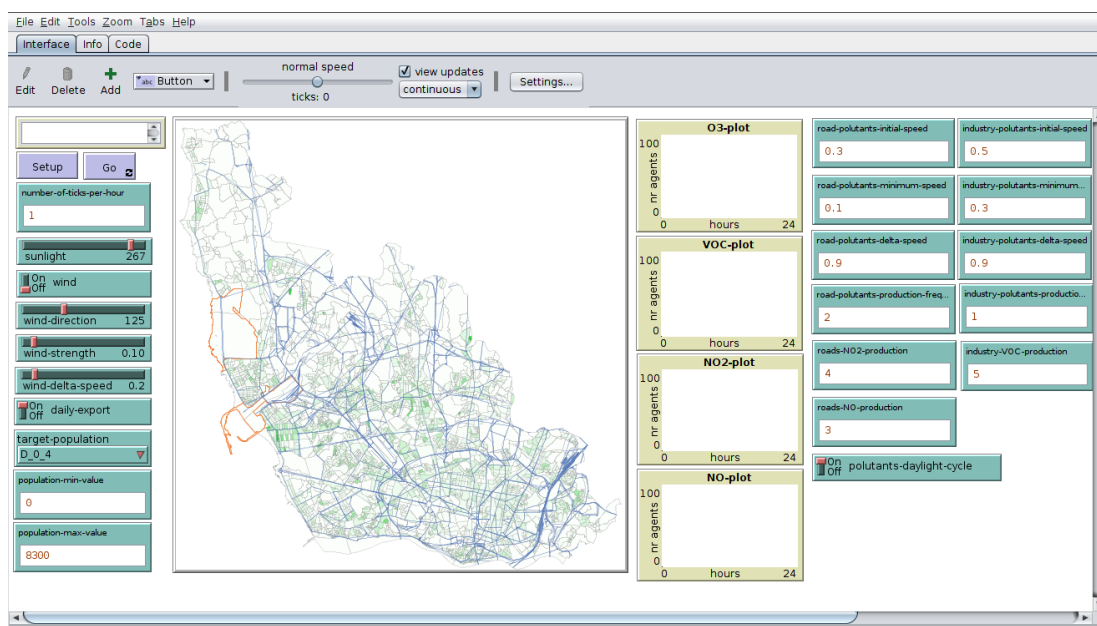


Figura 24: Modelo após setup

Input

Como *input*, o modelo utiliza três *shapefiles* (acima referidos) tendo os seguintes atributos obrigatórios:

Nome do Shapefile	Atributos Obrigatórios	Descrição dos Atributos
<i>shp_pop/population.shp</i>	D_0_4	Densidade populacional de indivíduos com idade compreendida entre os 0 e os 4 anos.
	D_5_9	Densidade populacional de indivíduos com idade compreendida entre os 5 e os 9 anos.
<i>shp_roads/roads.shp</i>	D_65	Densidade populacional de indivíduos com idade superior a 65 anos.
	CLASS	Classe de estrada. Para efeitos deste modelo, apenas estradas com CLASS igual a “highway” são consideradas
<i>shp_industry/industry.shp</i>	CLASS	Classe de zona. Para efeitos deste modelo, apenas zonas com CLASS igual a “industry” serão consideradas.

Tabela 13: Shapefiles de entrada

Submodels

Este modelo usa como submodelos as reações químicas dos poluentes produzidos durante a sua execução. Estas reações encontram-se contidas no procedimento *run-reactions*. Seguem-se as reações e respetiva descrição:

```
set NO2-rate sunlight
ask NO2
[
  if daytime = true and random-float 350 < NO2-rate
  [
    set breed 01
    set size 0.2
    set color green
    hatch-NO 1
    [
      set color blue
      set size 0.2
      set heading random-float 360
      set wind-speed wind-strength
    ]
  ]
]
```

A reação apresentada no excerto de código acima, consiste na separação de NO_2 em O_1^{14} e NO . Trata-se de uma reação fotoquímica, pelo que apenas se verifica durante o período diurno. Para representar o facto de a mesma não depender apenas da radiação solar, mas que a probabilidade de acontecerem é diretamente proporcional ao aumento dos valores da intensidade da radiação solar, optou-se por gerar um número aleatório entre 0 e 350, sendo que a reação apenas é ativada caso o número gerado seja inferior ao da radiação solar (controlada pelo utilizador com o *slider* de nome *sunlight*).

```
ask NO
[
  if daytime = true and any? O3-here and random 5 < 2
  [
    set breed NO2
    set size 0.2
    set color brown
    set heading random-float 360
    let reactant one-of O3-here
    if reactant != nobody
```

¹⁴ Átomo isolado de oxigénio

```

    [
      ask reactant [die]
    ]
  ]
]
ask O1
[
  set breed O3
  set size 0.4
  set color red
  set heading random-float 360
]
ask VOC
[
  ;; see if any NO are in the patch
  if any? NO-here
  [
    ;; if there are, convert VOC turtle to Ox
    set breed O1
    set size 0.2
    set color violet
    set heading random-float 360
  ]
  let reactant one-of NO-here
  if reactant != nobody
  [
    ask reactant [die]
  ]
]
]

```

As reações apresentadas no excerto de código, acima apresentado, consistem na produção de NO₂ a partir de O₃, produção de O₃ a partir de O₁ e O₂ e na produção de oxidantes (O₁) a partir de COV e NO. Note-se que, no caso da produção de O₃ a partir de O₁ e O₂, apenas as moléculas O₁ são representadas no modelo, uma vez que O₂ se encontra presente de forma implícita, pois faz parte da constituição da atmosfera (cerca de 20%).

Como se poderá verificar no início do funcionamento do modelo, este inicia-se de imediato sem a necessidade de importação manual dos dados (neste caso os *shapefiles* da população, estradas e áreas de indústria).

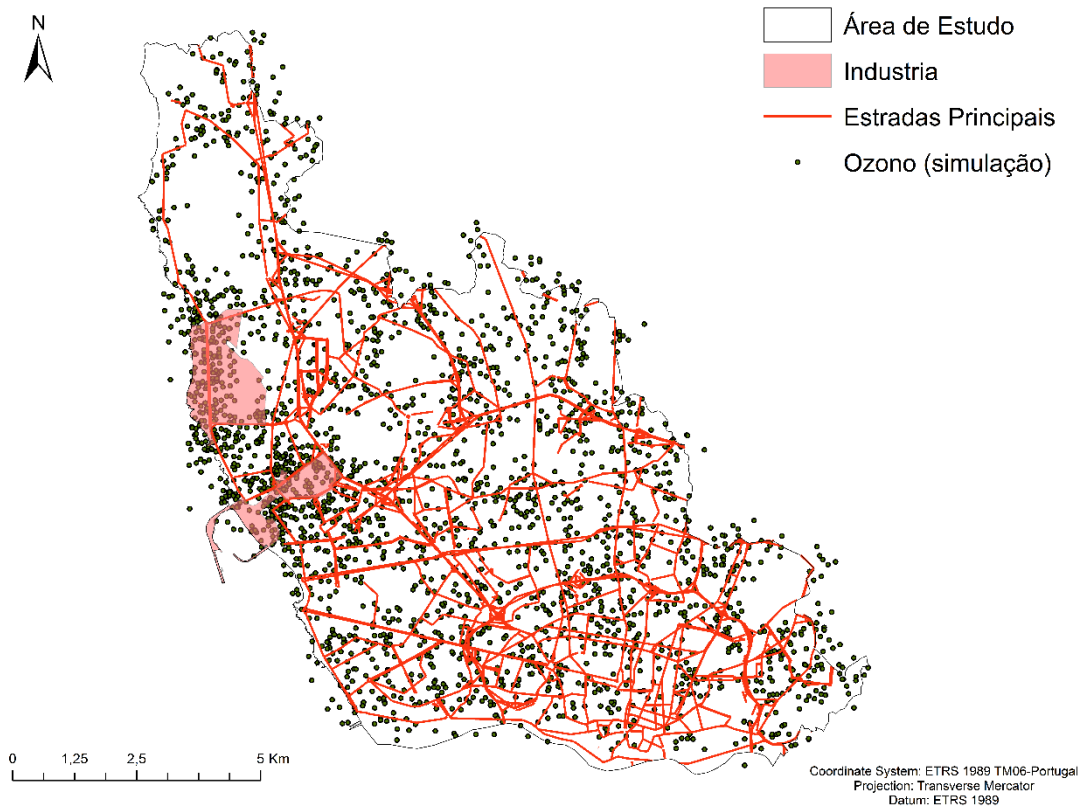


Figura 25: Exemplo de mapa exportado para ArcGIS, com as rodoviárias principais utilizadas na modelação e áreas de indústria

O modelo e respetivos *inputs* estão contidos numa pasta comum de modo a que, fazendo o *download* da pasta, o utilizador apenas necessita abrir o ficheiro do modelo Netlogo e executar *Setup* e *Go* de modo a experimentar a modelação com os seus parâmetros pré-definidos. As reações químicas do modelo relativas à produção de ozono foram inspiradas no modelo *Smog*, presente na biblioteca Netlogo.

Relativamente à emergência do ozono, pode verificar-se que as áreas de maior concentração coincidem com as áreas onde se encontram as principais vias rodoviárias (figura 25), o que também coincide com os mapas de interpolação para os poluentes precursores do ozono (COV's e NOx) mostrados na primeira parte deste trabalho – ver figuras 15 e 16.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MODELO

Após a utilização do modelo, conforme descrito na seção anterior (III Parte), é possível efetuar nova análise. Os dados obtidos por simulação em Netlogo são utilizados nas novas análises, de modo a que se possam obter resultados para as áreas onde não existem medições das concentrações de ozono. Como se pode verificar pelos mapas seguintes, são apontadas as áreas com maior necessidade de intervenção, quer pelas condições que favorecem a emergência do ozono, quer pela presença de indivíduos dos grupos etários mais vulneráveis a este poluente.

No caso mostrado seguidamente levou em conta a simulação para um período de 24 horas, tendo sido optado por não utilizar o parâmetro “*wind*”, de modo a poderem ser detetadas as zonas de maior potencial de formação de ozono, mas sem qualquer dispersão. Foram consideradas as principais vias rodoviárias dentro da área de estudo, tendo sido escolhidos para os poluentes os parâmetros por defeito no modelo. Quanto aos parâmetros relativos às condições ambientais atmosféricas foram também mantidos os valores por defeito, o seja, intensidade do vento OFF e radiação solar com um valor de 230 *hv* para o início da simulação, uma vez que este é um valor médio aproximado de radiação ultravioleta dentro dos limites necessários à formação do ozono (Guarieiro *et al.*, 2017).

Assim, o mapa resultante aponta para as zonas de maior possibilidade de emergência do ozono, conforme se pode verificar na figura 26. O mapa foi obtido através da aplicação da ferramenta *Point Density* do ArcGIS 10.5, a partir dos pontos produzidos pelo modelo, de modo a identificar as áreas de maior incidência de possibilidade de formação do O₃. Neste ponto optou-se por esta ferramenta uma vez que o pretendido identificar visualmente as áreas de maior possibilidade de formação do ozono, e não a distribuição espacial da concentração do poluente.

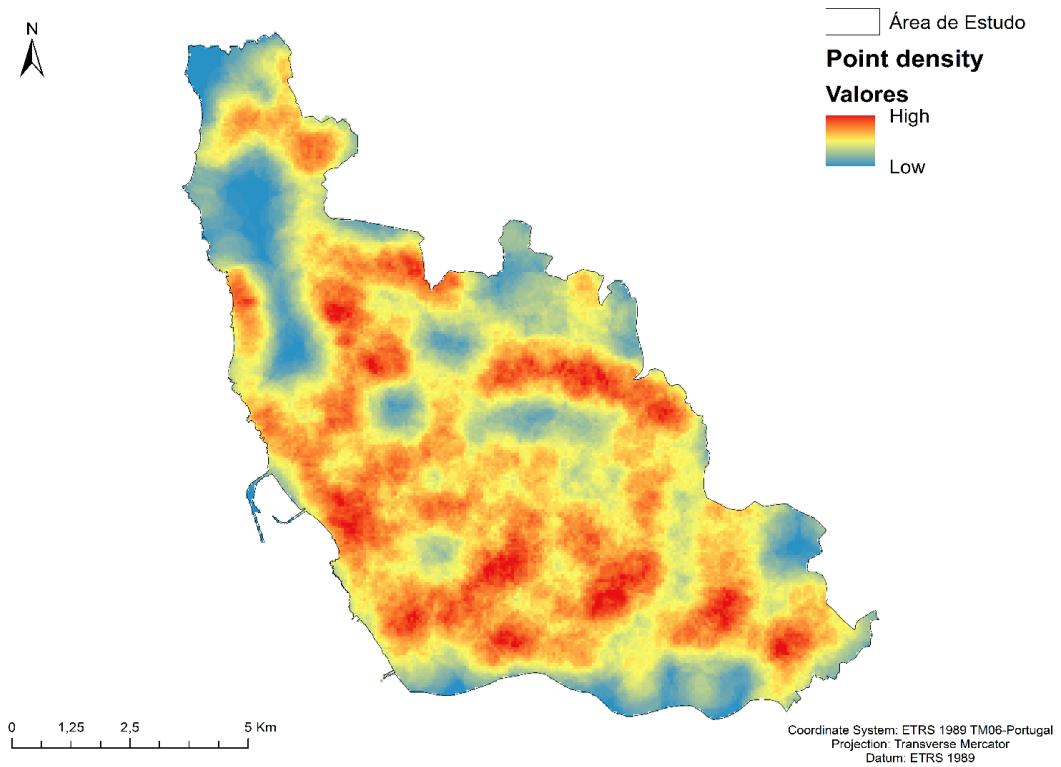


Figura 26: Mapa de zonas com maiores concentrações de formação de ozono, resultante da simulação

Efetuada novamente o *Weighted Overlay*, desta vez com os resultados obtidos por simulação - e utilizando os mesmos parâmetros de classificação utilizados para os dados das medições, conforme podem ser vistos na II Parte - obteve-se o seguinte mapa:

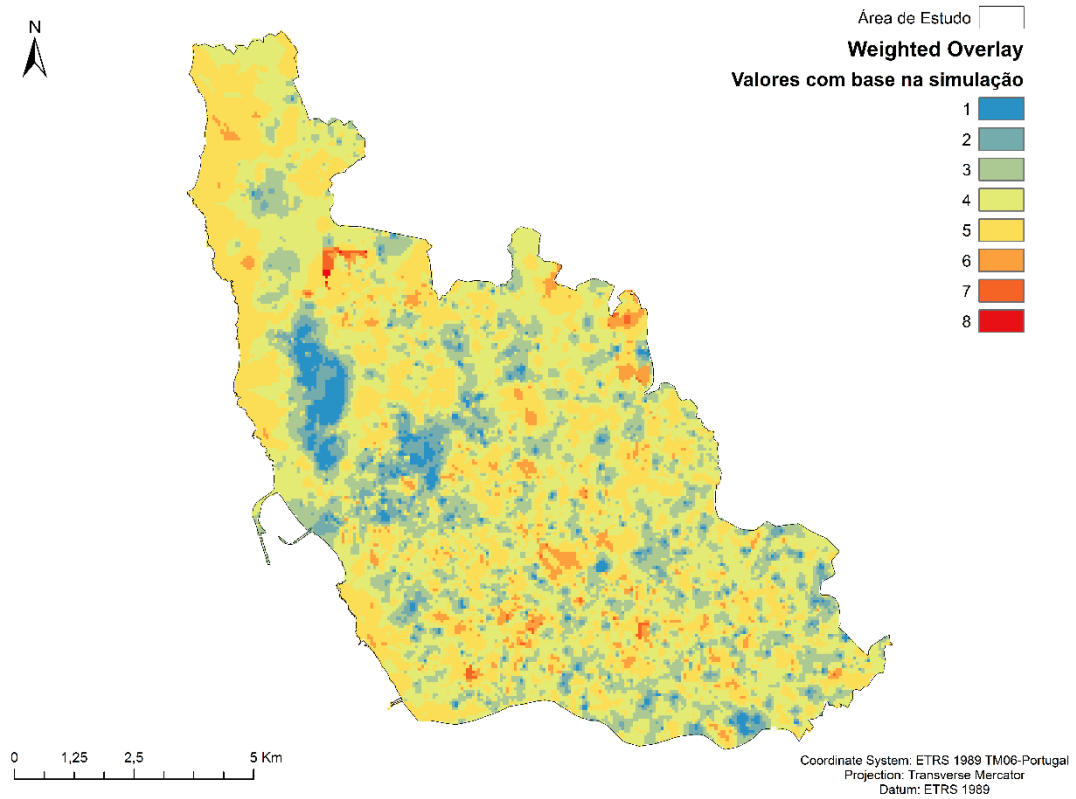


Figura 27: Mapa resultante da análise Weighted Overlay com os resultados da simulação

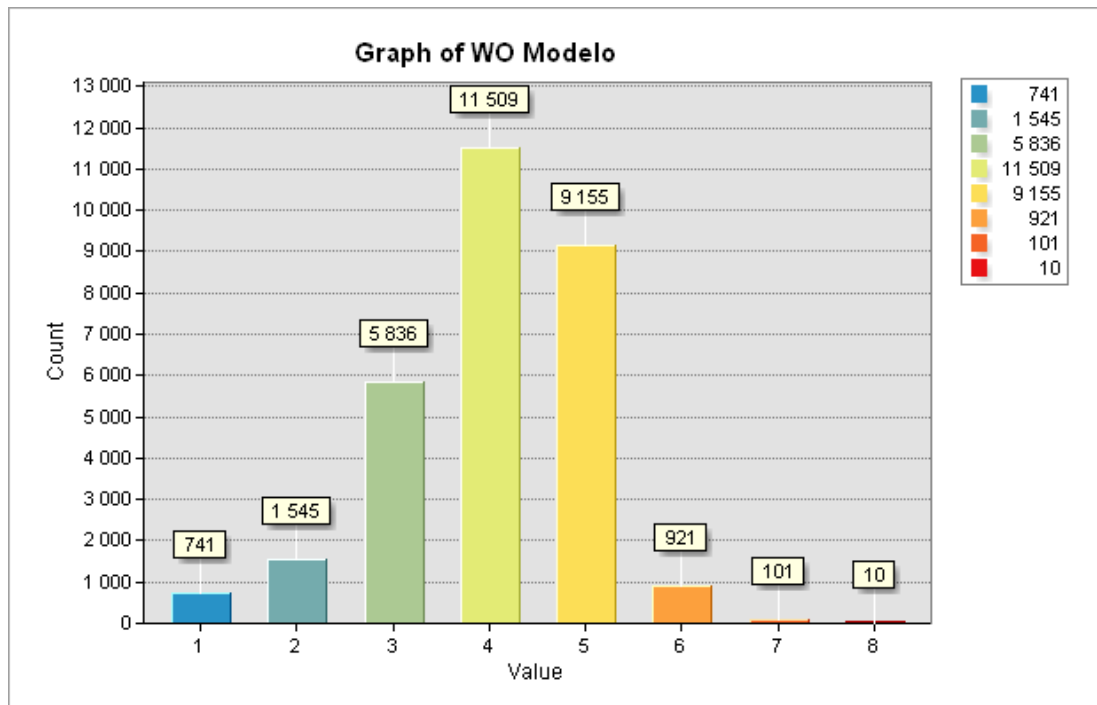


Figura 28: Gráfico relativo à contagem de pixéis para cada classe, resultante da sobreposição ponderada com os valores produzidos pelo modelo em Netlogo

De notar que o resultado final aponta para a existência de pixéis classificados dentro da classe 8, o que não acontecia com a análise efetuada apenas com as medições (mapa da fig. 18).

Observando apenas a área do município do Porto pode verificar-se as áreas assinaladas pela análise como as que reúnem as condições requeridas de grupos etários de risco e potencial de formação do ozono:

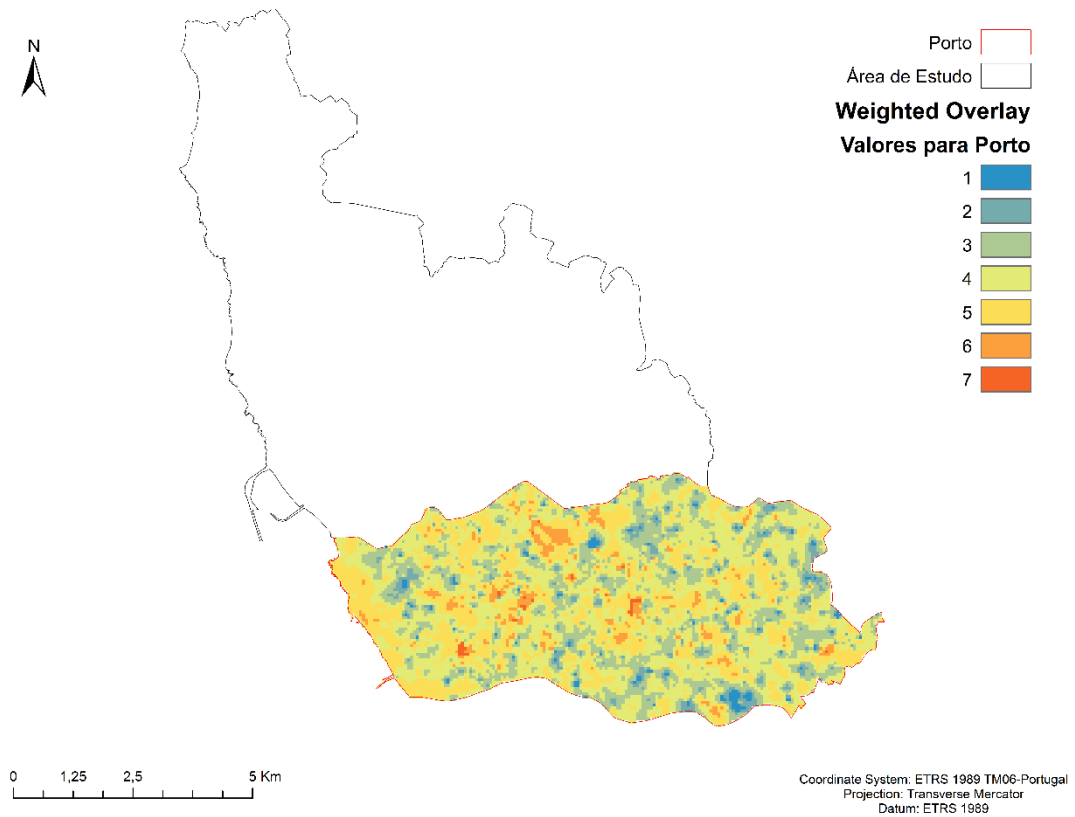


Figura 29: Mapa da análise para a área do Porto

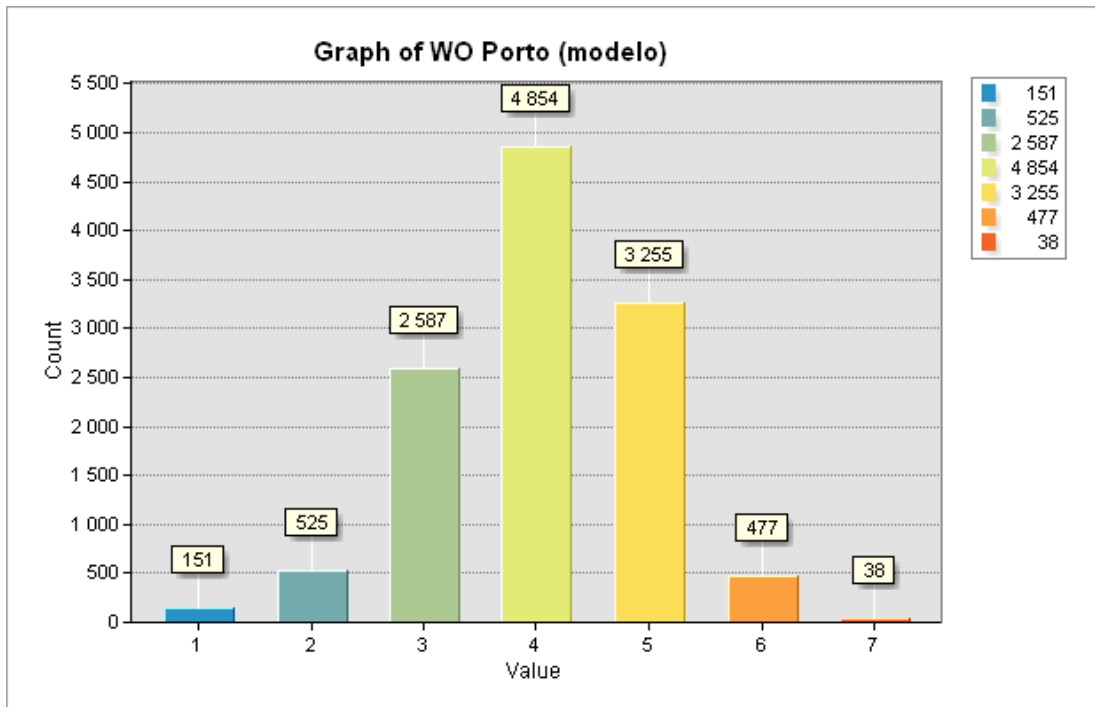


Figura 30: Gráfico do *Weighted Overlay* com os resultados da simulação para a área do Porto

Os resultados obtidos com a análise dos resultados do modelo – para a zona do Porto – revelam uma possibilidade de correspondência com as medições assinaladas para os óxidos de azoto (como poluentes precursores da emergência do ozono) na área da estação da praça Francisco Sá Carneiro, conforme se pode ver no mapa da figura 15. Paralelamente, os resultados mostrados no mapa da figura 27 apontam para concordância de resultados com a análise (*Weighted Overlay*) efetuada com base nos dados das medições na zona onde existem mais medições de ozono. Conforme se pode verificar na matriz de confusão (Anexo 9) gerada a partir de ambos os mapas de análise (figuras 18 e 27, para as medições e para os dados gerados pela simulação, respetivamente) mostra uma concordância de 22%. No presente contexto, este valor indica que as medições existentes não fornecem os dados suficientes para que sejam devidamente identificadas as áreas de atuação prioritárias. Como se verá mais à frente, ao serem analisadas áreas onde existem mais medições, os níveis de concordância apontados nas matrizes de confusão (Anexos 19, 11 e 12) são tanto mais elevados quanto mais dados existirem e mais consistentes, uma vez que algumas das estações ativas não efetuam medições contínuas.

Assim, e de modo a poder fazer uma validação dos resultados, foram comparadas as duas áreas onde existem medições – neste caso Meco e Custóias, uma vez que estas

são as estações onde foram registados os valores mais elevados para o ozono. Para a comparação de resultados foi efetuado um *buffer* de dois quilómetros a partir destas duas estações, bem como para a estação com menores medições (Sobreiras), de modo a quantificar, para as mesmas áreas, as classificações concordantes entre análise a partir das medições e a análise a partir dos dados da simulação. Seguidamente são apresentadas para cada uma das áreas referidas, os mapas e as matrizes de confusão (Anexos 10, 11 e 12).

Como se pode ver pela figura 31, na zona da estação do Meco, verifica-se que as áreas assinaladas a partir da análise com os dados gerados pelo modelo (canto superior esquerdo) coincidem com as assinaladas a partir dos dados das medições (canto inferior esquerdo).

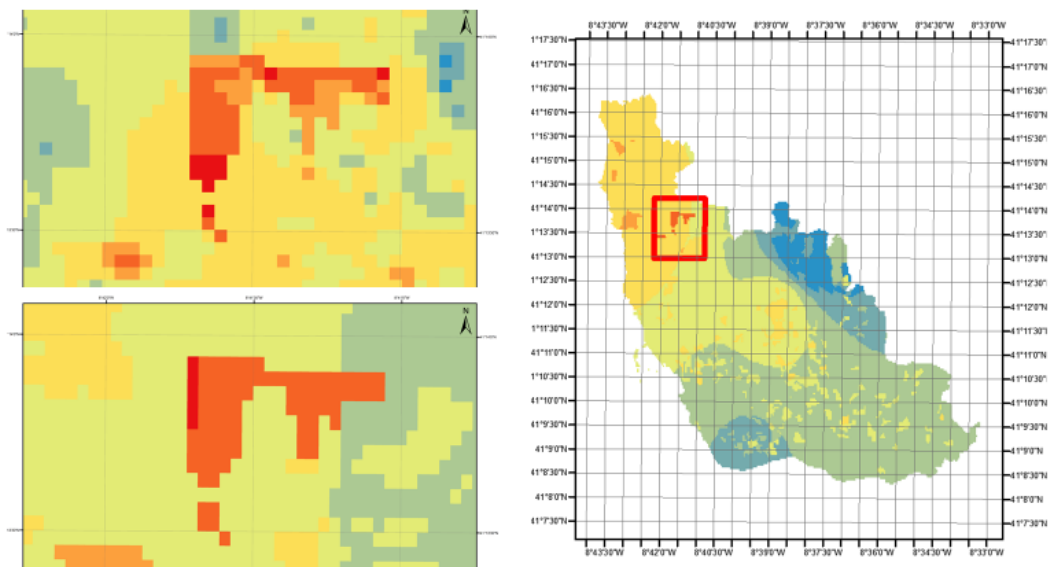


Figura 31: Pormenor para a zona do Meco

A tabela da matriz de confusão para esta área (Anexo 10), a percentagem de concordância é de 40% para o total das oito classes, mas é de salientar que na classe 4 as análises a partir das medições e a partir da simulação obtêm uma concordância de 81%, e na classe 7 uma concordância de 78%.

Para a Zona da estação de Custóias (figura 32), a segunda com medições mais elevadas, pode também verificar-se a concordância das classificações da análise

aplicada aos dados do modelo (à esquerda em cima) e os dados das medições (à esquerda em baixo).

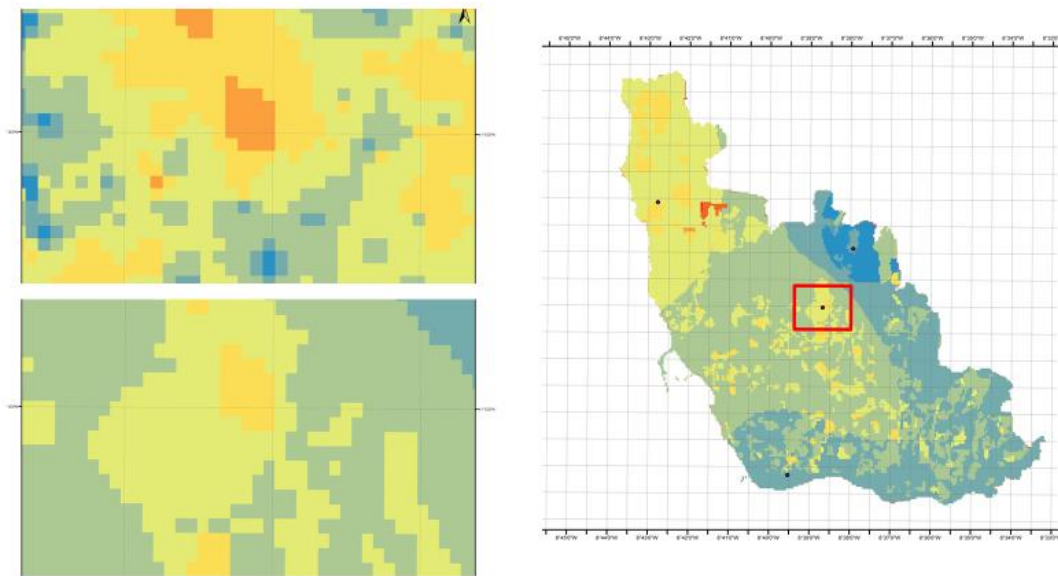


Figura 32: Pormenor para a zona de Custoias

Pode verificar-se pela matriz de confusão (Anexo 11) que a taxa de concordância diminui para a estação de Custoias o que se pode dever ao menor número de medições efetuadas nesta estação (com 2341 medições horárias), relativamente à estação do Meco (com 6073 medições horárias). A classe 3 é a que obtém um nível de concordância mais elevado, com 66%.

Para a comparação dos resultados foi ainda escolhida a estação de Sobreiras (figura 33), com valores mais baixos e dentro da área do município do Porto sendo, assim, notória uma menor concordância de resultados entre a análise das medições e do modelo, conforme se pode verificar pela matriz de confusão (Anexo 12).

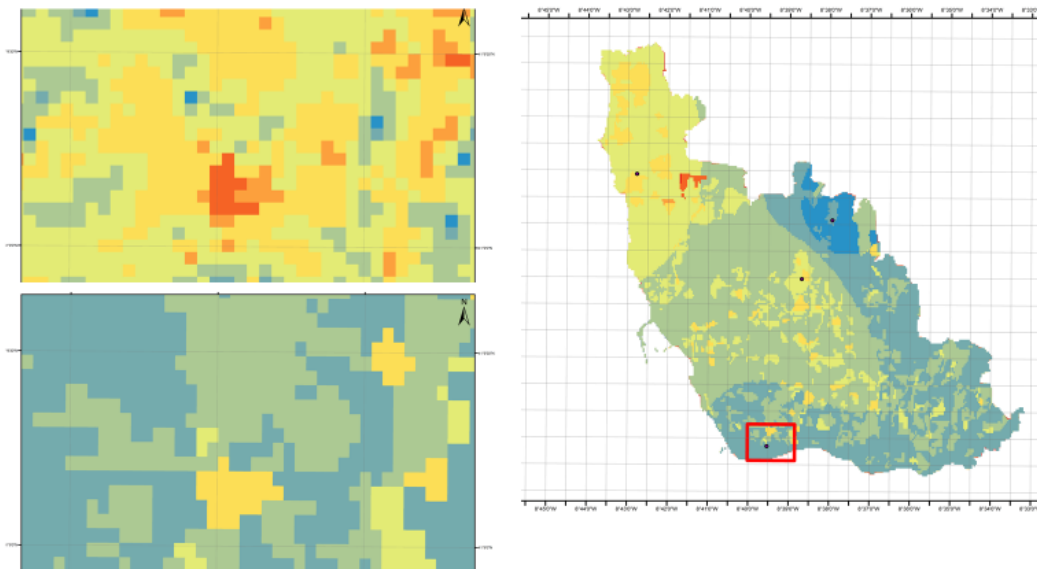


Figura 33: Pormenor para a zona de Sobreiras

Neste ponto, de modo tornar possível uma melhor avaliação dos resultados e para verificar qual a diferença entre estes, foi utilizada a álgebra de mapas para calcular a diferença entre o resultado de ambas as análises - ou seja, a diferença entre os resultados obtidos com o *Weighted Overlay* com base nas medições de ozono (figura 18) e os resultados obtidos com o *Weighted Overlay* com base nos resultados da simulação (figura 27), *i.e.* “Medições” - “Modelo”. Assim, e conforme se observa no mapa da figura 34, pode verificar-se uma maior concordância na atribuição das classes perto das áreas com mais medições. A classe 0 indica que a classificação atribuída no caso do modelo é igual à atribuída na análise das medições; as classes com valor positivo (X) indicam que o valor de um pixel no *raster* relativo às medições é X classes superior ao valor do mesmo pixel no *raster* relativo ao modelo. O inverso acontece para os valores negativos (-X) onde o valor de dado pixel no *raster* medições é X classes inferior ao valor do *raster* modelo para o mesmo pixel.

Na figura 34 pode verificar-se o mapa de diferenças entre os resultados:

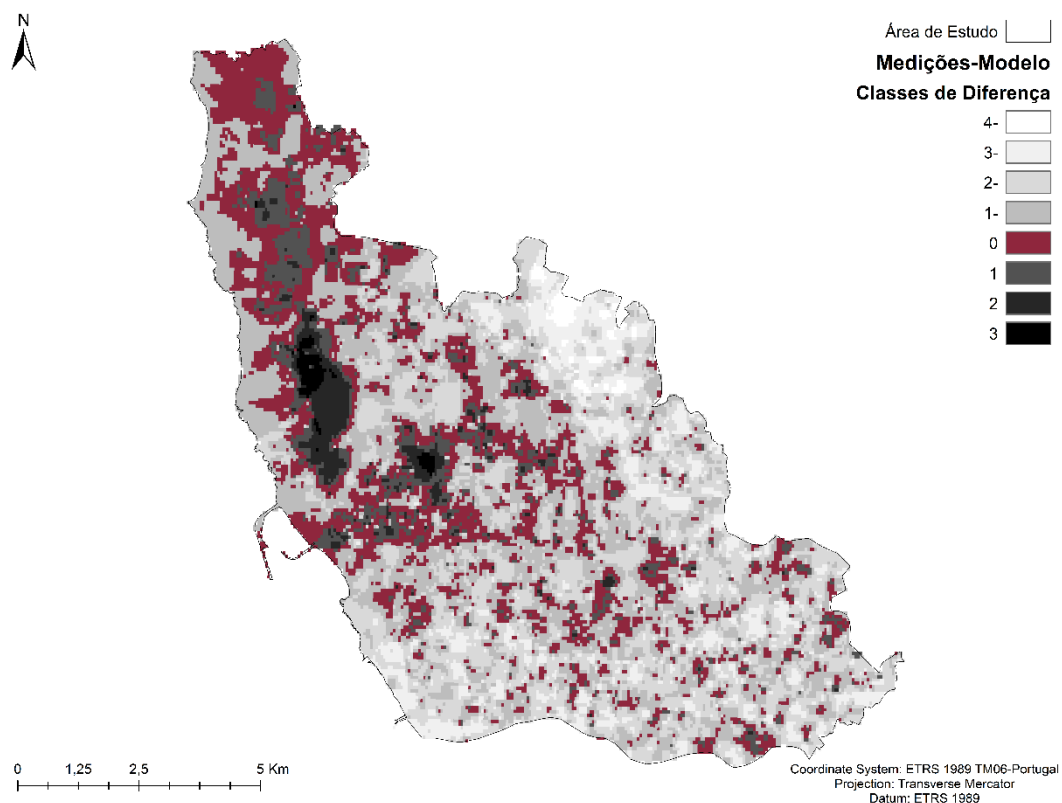


Figura 34: Mapa resultante do cálculo de diferença entre os resultados da análise para as medições e para o modelo

Na tabela seguinte pode verificar-se a contagem de pixels com a mesma classificação, tanto no modelo como nas medições, bem como a diferença. Note-se que as áreas com a mesma classificação em ambas as análises ocorrem nas zonas onde existem mais medições para o ozono, ou seja, Custoias e Meco.

Ao mesmo tempo, pode também observar-se a predominância de apenas uma classe de diferença para a classificação atribuída pelas medições (uma classe abaixo, relativamente ao modelo, na tabela com o valor -1), o que pode significar valores de concentração de ozono por falta de medições.

Value	Count
-4	229
-3	2600
-2	7367
-1	9612
0	6286
1	2051
2	830
3	171

Tabela 14: Resultados da diferença entre o *Weighted Overlay* com base nas medições e com base na simulação

A tabela 14 mostra o número de *píxeis* (*Count*) para cada diferença entre classes: assim, por exemplo, existem 6286 píxeis com a mesma classe atribuída (valor 0) na análise (*Weighted Overlay*) com base nas medições e na análise (*Weighted Overlay*) com base na simulação; 9612 píxeis atribuídos a uma classe abaixo (valor -1), entre ambas as análises; 2051 píxeis atribuídos a uma classe acima (valor 1), entre ambas as análises; e assim sucessivamente.

Face a estes resultados optou-se por aplicar a ferramenta *Fuzzy Overlay*, também em ArcGIS, uma vez que se verifica uma quantidade considerável de classificações apenas com uma classe de diferença (um total de 11663 píxeis). Esta ferramenta aplica a lógica difusa, que - por oposição a uma correspondência perfeita - faz uma correspondência entre valores semelhantes; é utilizada em situações em que os limites entre classes não são claros, ou em que um pixel pode pertencer a mais de uma classe (ESRI, 2016). Neste caso, e uma vez que se está a lidar com poluição atmosférica, onde os valores se apresentam contínuos no espaço, os limites entre duas classes, conforme aparecem nas análises efetuadas, levam a que haja uma incidência considerável de classificações na classe imediatamente acima ou abaixo na comparação entre os *rasters* das duas análises. O mapa da figura 35 apresenta os resultados da aplicação desta ferramenta e onde, ao contrário do que acontece com a correspondência direta, é estabelecido o grau de semelhança de classificações.

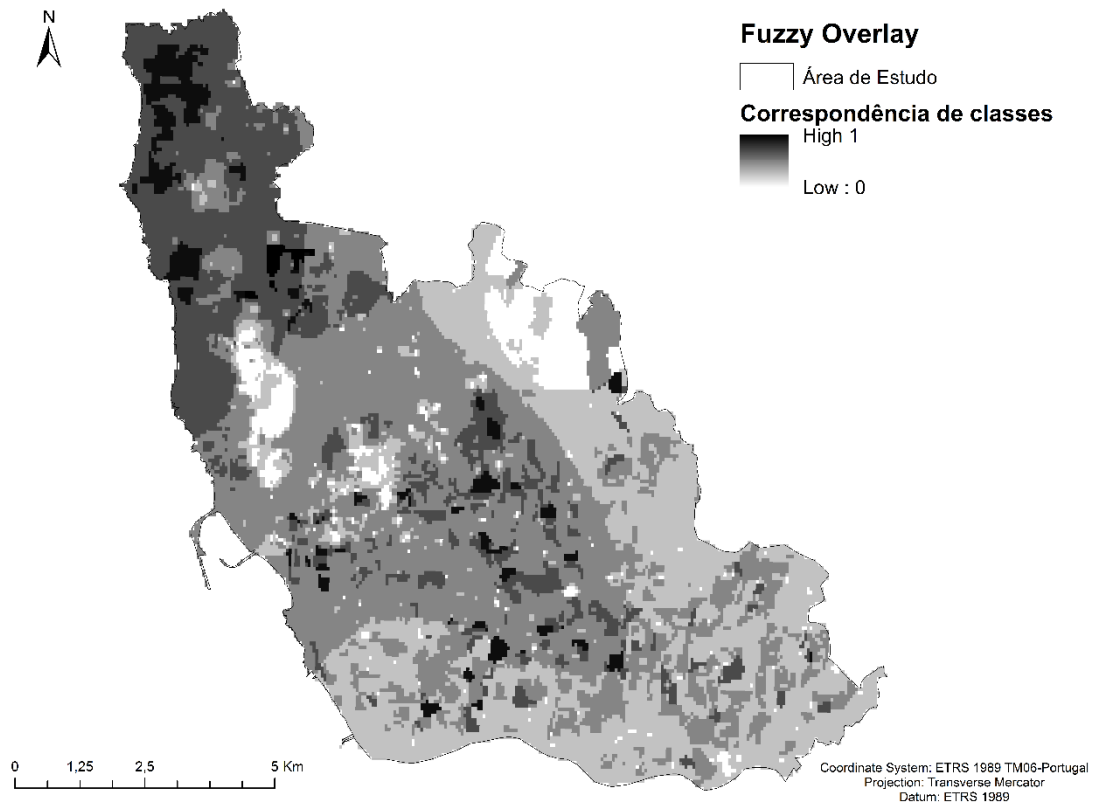


Figura 35: Mapa resultante do Fuzzy Overlay

Os valores que no mapa da figura 34 apareciam com uma diferença menor (de apenas uma classe), são aqui classificados (figura 35) perto do valor máximo de semelhança (valor 1, no mapa a cor preta). Mais uma vez, pode aqui confirmar-se o que os mapas anteriores apontaram, ou seja, os valores de classificação baseados nos dados produzidos por simulação, são tanto mais semelhantes aos das medições, quanto maior for a quantidade dos dados existentes. Ao mesmo tempo, o *Fuzzy Overlay* permitiu aqui verificar também que o resultado obtido a partir da simulação mostra classificações mais distantes das obtidas a partir das medições, nas zonas onde estas não existem.

IV PARTE

1. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

1.1- Conclusões

A falta de medições de poluentes levanta vários problemas no que diz respeito tanto ao controle de concentrações - de modo a que se possam tomar as medidas necessárias para evitar ou minimizar as consequências da poluição atmosférica – quanto ao real conhecimento de situações com a capacidade para afetar profundamente a saúde pública e com o impacto real nas condições ambientais. Por um lado, várias estações não efetuam medições do poluente ozono ou dos seus precursores - no município do Porto apenas existem duas estações de medição, Sobreiras e Francisco Sá Carneiro e, destas, apenas a estação de Sobreiras faz medição do ozono.

Mais, as estações ativas nem sempre apresentam medições para todos os dias; refira-se, por exemplo, que na estação de Custóias não existem medições para o ozono durante os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro de 2016, sendo esta a época do ano com radiação solar mais elevada (e, portanto, propícia à formação de ozono), conforme se pode verificar pela tabela 4. Ou seja, algumas concentrações médias em vários locais devem-se, provavelmente, a uma reduzida medição de ozono e não a uma baixa concentração do mesmo. A isto acresce ainda o facto de os dados validados apenas estarem disponíveis em dez meses após a última medição do ano, por exemplo, os dados validados de 2017 apenas se encontrarão disponíveis em outubro de 2018. A falta desta informação é uma preocupação para a Câmara do Porto e, de entre as possíveis soluções pode contar-se a instalação de estações de medição camarárias, com os custos inerentes. Por este motivo, saber em que locais colocar estes dispositivos é também uma das preocupações das entidades camarárias.

O modelo que foi programado em ambiente Netlogo, no âmbito deste projeto, vem ao encontro destas preocupações. A simulação – de que aqui foi mostrado um exemplo – aponta para resultados que revelam as zonas de maior potencial de emergência de ozono, mais promissores do que as interpolações efetuadas com os valores obtidos a partir das medições.

Como se pôde verificar através dos resultados das análises efetuadas, torna-se evidente a utilidade da utilização do modelo, programado de modo a que possa aceitar dados introduzidos pelo utilizador, adaptados à situação que tenha entre mãos. Na Parte II deste trabalho – e após feita a caracterização da área de estudo – é notória a inexistência de áreas consideradas prioritárias dentro do município do Porto, onde seria expectável a sua existência, dadas as características demográficas. Com a utilização dos dados fornecidos pelo modelo os resultados apontam exatamente para classificações que os decisores camarários podem seguramente tomar em consideração, uma vez que estas coincidem com as atribuídas às áreas onde existem mais medições. Ao longo deste trabalho foi apresentada a utilização de várias ferramentas com o objetivo de encontrar resposta para uma situação com que os decisores camarários do município do Porto (e, possivelmente de outros municípios no país) se deparam em termos de controlo de qualidade atmosférica: a falta de mais dados, e mais concretos.

O número atual de estações de medição dentro da área de estudo, com leituras ativas (“Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do Ar,” n.d.) para todos os poluentes recomendados pelas normas europeias (Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2010) não é suficiente para que a Câmara do Porto tenha um conhecimento mais aprofundado dos níveis de poluição nas várias zonas da cidade. Algumas estações encontram-se desativadas para a medição de vários dos poluentes desde 2011, coincidindo esta desativação com a entrada em vigor dos valores limite impostos pela EU e com as diretivas que regulamentam a monitorização da qualidade atmosférica. Encontrar uma forma de colmatar a falta de valores medidos para algumas das zonas do município é a solução e, por isso, tomou-se a iniciativa de programar uma modelação por agentes. Os resultados assim obtidos permitem

estimar (de forma mais realista do que uma interpolação) os valores da poluição em zonas sem medições.

A partir dos dados disponíveis, e com os resultados obtidos na segunda parte deste trabalho, através da caracterização da área de estudo, da análise exploratória dos dados e do mapa de sobreposição ponderada, é possível identificar algumas especificidades do problema abordado; quais as áreas com maior população pertencente aos grupos de risco, quais as zonas com maior influência de tráfego rodoviário, a distribuição espacial dos poluentes e a evolução das suas concentrações.

O período de tempo escolhido (2012 a 2016), com as respetivas representações de poluentes, radiação solar e zonas de medição, permite uma perspetiva da variação de concentrações dos poluentes ao longo do tempo e relacioná-las com a radiação solar. Interpretando os gráficos das tabelas 7 e 8 (na I Parte) podemos observar que o ano de maior concentração de ozono correspondeu ao ano de maior radiação solar média.

Seguidamente, com a leitura do gráficos e mapas resultantes das análises efetuadas nas partes II e III deste trabalho, pode verificar-se a existência de um menor número de áreas com os valores mais elevados (entre 6 e 8) de prioridade de atuação, ou seja, onde existem as condições de mais população de risco/mais concentração de ozono; o valor intermédio de prioridade (3 a 4) é atribuído à maior contagem de áreas, registando-se, depois, um número decrescente de áreas com menor prioridade (para os valores entre 2 e 3), sendo que não há contagem para áreas sem a presença de população de risco e sem contagem de ozono (valor 1).

1.2- Desenvolvimentos Futuros

Uma possibilidade futura de aplicação desta ferramenta seria introduzir nos parâmetros de avaliação o número de residentes com problemas respiratórios e de atendimentos hospitalares devido a doenças respiratórias, de modo a determinar dentro das áreas de maior prioridade aquelas com intervenções de carácter mais

urgente. De igual modo, é possível utilizar a ferramenta para ponderar novas áreas prioritárias, à luz de um conjunto mais alargado de dados.

Quanto ao modelo da dinâmica de formação do ozono (na terceira parte do trabalho) programado em Netlogo, as possibilidades de trabalho futuras são várias, uma vez que o código foi escrito a pensar nas possibilidades de adaptação do modelo perante novos dados. Por exemplo, a radiação solar pode ser carregada a partir de ficheiros externos reais, bem como a direção e intensidade do vento, ou outro tipo dados que se queiram incluir no modelo.

De salientar também a possibilidade de se atribuir um valor a cada agente dos poluentes (neste caso representadas por um círculo), de modo a que a quantidade de pontos visíveis em cada *patch* do modelo correspondesse a um valor atribuído com base em concentrações reais. Deste modo os mapas exportados poderiam representar uma simulação com carácter de previsão sobretudo quando incluídos alguns modelos de dispersão.

Uma outra possibilidade seria a de incluir todas as estradas (recorde-se que neste trabalho apenas foram incluídas as estradas principais), uma vez que estas, dadas as características da área estudo, podem também representar pontos significativos de emissão de alguns dos poluentes. Por exemplo, embora tendencialmente se pense que uma estrada principal pode representar maior fonte de emissões, dentro de uma cidade com as características do Porto, pequenas estradas e ruas, secundárias ou mesmo terciárias, registam diariamente um fluxo considerável de movimento rodoviário, onde por vezes há emissão intensa de poluentes devido ao congestionamento de tráfego. Neste tipo de situações, poderia ser interessante para os responsáveis camarários determinar em quais ruas com estas características poderiam ser instaladas estações móveis de medição, que lhes permitissem obter dados reais.

Ao cruzar-se a informação sobre as zonas prioritárias obtidas no mapa resultante do *Weighted Overlay* (a primeira análise, efetuada na Parte II, apenas com os dados das medições), com os *shapefiles* exportados pelo modelo, pôde obter-se informação mais detalhada relativamente a áreas específicas da cidade. Uma possibilidade de

aprofundar ainda mais estes resultados, seria a de utilizar como parâmetros do modelo, valores reais e fazendo corresponder, por exemplo a quantidade de agentes (no modelo) por *patch* a concentrações de poluentes. Deste modo, os dados exportados pelo modelo podem ser usados em situações específicas e produzir resultados que possibilitariam aprofundar ainda mais os resultados finais.

Finalmente, resta acrescentar que as possibilidades de utilização não se esgotam nas que aqui foram apresentadas e, embora tenham sido utilizados os dados referentes à população, o mesmo pode ser executado com dados dos parques urbanos e zonas verdes ou para determinar quais as zonas mais vulneráveis, em termos ambientais, a novas construções de estradas ou de indústrias.

Para concluir, a utilização do modelo está disponível na plataforma github.com pelo que pode ser transferido, alterado e estendido por outros utilizadores. Através do seguinte link:

<https://github.com/apfa00/polutants>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, P. (1988). CALPUFF Modeling System Version 6 User Instructions Table of Contents. *Monthly Weather Review*, 116(3), 505–524.
- Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do Ar. (n.d.). Retrieved November 29, 2017, from <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=4&subpage=3&estacao=1021>
- Agência Portuguesa do Ambiente - Qualidade do Ar <http://www.qualar.org/index.php?page=4&subpage=3&estacao=3094>. (2008). Retrieved November 29, 2017, from <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=6&subpage=>
- Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Gyarmas, F., Heyes, C., Klimont, Z., ... Winiwarter, W. (2005). Baseline Scenarios for the Clean Air for Europe (CAFE) Programme. *Institute for Applied Systems Analysis*, (1), 79.
- AMP. (2014). Estratégias Área Metropolitana Do Porto. AMP- Área Metropolitana do Porto.
- APA. (2010a). *Procedimentos regionais de informação e alerta no âmbito da qualidade do Ar*.
- APA. (2010b). Procedimentos regionais de informação e alerta no âmbito da qualidade do Ar. Retrieved from https://www.mendeley.com/research-papers/procedimentos-regionais-informação-e-alerta-âmbito-da-qualidade-ar/?utm_source=desktop&utm_medium=1.17.11&utm_campaign=open_catalog&userDocumentId=%7Bd8f74a0b-32ed-41bf-a5e5-33998126ec44%7D
- APA. (2010c). Procedimentos Regionais de Informação e alerta no âmbito da qualidade do ar.
- APDL. (2015). Gestão do Risco Empresarial, incluindo os Riscos de Corrupção e Infrações Conexas. Retrieved from

- http://www.apvc.pt/documents/10180/46025/ManualGestaoRiscos_v02_Apro vCA_16Jul2015_2.pdf/16fb5e46-b1ec-48c4-961e-06bec37f30f5
- APDL -ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DO DOURO E LEIXÕES, S. (2013). Relatório de Sustentabilidade - Porto de leixões. Porto: APDL. Retrieved from http://www.apdl.pt/relatoriosustentabilidade/pdf/APDL_RS2013.pdf
- Ashmore, M. R. (2005). Assessing the future global impacts of ozone on vegetation. *Plant, Cell and Environment*, 28(8), 949–964. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01341.x>
- Assembleia da República. (2013). Lei n.º 11-A/2013 de 28 de janeiro. *Diário Da República, 1.ª Série — N.º 19 — 28 de Janeiro de 2013*, (2), 552–(2) a 552–(147). Retrieved from http://www.anafre.pt/noticias/Lei no 11-A-2013_28jan.pdf
- CCDRN. (n.d.). Principais Fontes de Emissão de Poluentes. *Comissão de Coordenação E Desenvolvimento Regional Do Norte*, 1–3.
- Censos 2011 - Mudanças Demográficas. (2014). Retrieved from http://www.cm-porto.pt/assets/misc/img/PDM/Revisao_PDM/Estudos_base/Censos2011_Mudancas_demograficas_2014.pdf
- CERC. (2017). ADMS-Urban Urban Air Quality Management System Version 4.1 User Guide CERC, 390. Retrieved from http://www.cerc.co.uk/environmental-software/assets/data/doc_userguides/CERC_ADMS-Urban4.1_User_Guide.pdf
- ClimAdaPT. (2016). Estratégia municipal de adaptação às alterações climáticas.
- Comissão Europeia. (2013). Pt Pt (Vol. 50, pp. 1–9). <https://doi.org/10.1097/JTO.0000000000000436>
- Complexity Explorer. (n.d.). Retrieved November 29, 2017, from <https://www.complexityexplorer.org/courses>
- Cruz, S., & Seca, V. (2013). Reorganização Administrativa do Território das Freguesias - (RATF) Reorganização Administrativa do Território das Freguesias - (RATF), 1–19.

- Daly, A., & Zannetti, P. (2007). Air Pollution Modeling – An Overview. *Ambient Air Pollution*, 1(2003), 15–28.
- Data classification methods—ArcGIS Pro | ArcGIS Desktop. (n.d.). Retrieved November 30, 2017, from <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/mapping/symbols-and-styles/data-classification-methods.htm>
- Dunea, D., Iordache, S., Bohler, T., Huber, F., & Leitner, P. (2017). Evaluating the Air Pollution Impact Using Environmental Monitoring , Dispersion Modeling and Volunteered Geographic ... Evaluating the Air Pollution Impact Using Environmental Monitoring , Dispersion Modeling and Volunteered Geographic Information Systems, (May).
- EEA. (2017). *Air quality in Europe — 2017 report*. <https://doi.org/10.2800/850018>
- Egional, D. E. R. (2015). *Elaboração de Plano de Qualidade do Ar de Ozono da Região Norte*.
- Eisler, C. (2017). Implications of the Complex Adaptive Systems Paradigm. *Drdc*.
- Esri. (2016). ArcGIS Pro tool reference. Retrieved June 26, 2017, from <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>
- ESRI. (2016). ArcGIS tool reference.
- European Environment Agency. (2006). *Urban sprawl in Europe - The ignored challenge*. *EEA report* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1080/02697451003740312>
- European Union. (2013). Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 “Living well, within the limits of our planet.” *Official Journal of the European Union*, (1600), 171–200. <https://doi.org/10.2779/57220>
- Finlayson-Pitts, B. J. (1997). Tropospheric Air Pollution: Ozone, Airborne Toxics, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Particles. *Science*, 276(5315), 1045–1051. <https://doi.org/10.1126/science.276.5315.1045>

- Fromm, J. (2005). Types and forms of emergence. *Electrical Engineering*, 23.
<https://doi.org/citeulike-article-id:262942>
- Galp energia. (2013). Refinaria de Matosinhos - Data Book de Segurança, Saúde e Ambiente. Retrieved from www.galpenenergia.com
- Grimm, V. (2006). The ODD protocol : a standard format for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198, 115–126.
- Grimm, V., Berger, U., Deangelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol : A review and first update Author' s personal copy. *Ecological Modelling*, 221, 2760–2768.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019>
- Guardani, R., Nascimento, C. a. O., Guardani, M. L. G., Martins, M. H. R. B., & Romano, J. (1999). Study of Atmospheric Ozone Formation by Means of a Neural Network-Based Model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 49(3), 316–323.
<https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463806>
- Guarieiro, L. L. N., Amparo, K. K. S., Figueirêdo, I. S., & De Andrade, J. B. (2017). Use and application of photochemical modeling to predict the formation of tropospheric ozone. *Revista Virtual de Quimica*, 9(5), 2082–2099.
<https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170124>
- Holland, J. H. (1992). Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1), 17–30.
<https://doi.org/10.2307/20025416>
- Holland, J. H. (1997). Emergence. *Philosophica*, 59, 11–40.
- INE - Censos 2011 Resultados Definitivos. (n.d.). Retrieved November 29, 2017, from <http://mapas.ine.pt/map.phtml>
- INE Instituto Nacional de Estatística. (2011). *Censos 2011 Norte* (Vol. 60).
- Instituto Nacional de Estatística, Censos 2011. (n.d.). Retrieved November 29, 2017, from http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos2011_apresentacao&xpid=CE

NSOS

- Jacob, D. J. (1999). Chapter 10. stratospheric ozone. In *Introduction to Atmospheric Chemistry* (pp. 162–189). Retrieved from <http://acmg.seas.harvard.edu/publications/jacobbook/bookchap10.pdf>
- Karakatsani, A., Samoli, E., Rodopoulou, S., Dimakopoulou, K., Papakosta, D., Spyrtatos, D., ... Katsouyanni, K. (2017). Weekly Personal Ozone Exposure and Respiratory Health in a Panel of Greek Schoolchildren. *Environmental Health Perspectives, 125*(7), 1–7. <https://doi.org/10.1289/EHP635>
- Khalesian, M., Pahlavani, P., & Delavar, M. R. (2008). Gis-Based Multi-Agent Traffic Micro Simulation for Modelling the Local Air Pollution. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVII*, 491–496.
- Kleinman, L. I., Daum, P. H., Lee, Y. N., Nunnermacker, L. J., Springston, S. R., Weinstein-Lloyd, J., & Rudolph, J. (2001). Sensitivity of ozone production rate to ozone precursors. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2000GL012597>
- Lindskog, A. (2008). Ozone and Other Photochemical Oxidants. *The Global Environment: Science, Technology and Management, 369–385*. <https://doi.org/10.1002/9783527619658.ch21>
- Meteorologia no Instituto Superior de Engenharia do Porto. (n.d.). Retrieved November 29, 2017, from <http://meteo.isep.ipp.pt/>
- Mikkelsen, T., Alexandersen, S., Astrup, P., Champion, H. J., Donaldson, a. I., Dunkerley, F. N., ... Thykier-Nielsen, S. (2003). Investigation of airborne foot-and-mouth disease virus transmission during low-wind conditions in the early phase of the UK 2001 epidemic. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 3*, 677–703. <https://doi.org/10.5194/acpd-3-677-2003>
- Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2010). Decreto-Lei n.º 102/2012. *Diário Da República, 4177–4205*.

- Muaz A. Niazi, Hussain, A. (2012). *Cognitive Agent-based Computing-I* (pp. 1–65). Springer.
- Mapzen. (n.d.). Retrieved from https://mapzen.com/data/metro-extracts/metro/porto_portugal/
- Otte, T. L., Pouliot, G., Pleim, J. E., Young, J. O., Schere, K. L., Wong, D. C., ... Seaman, N. L. (2005). Linking the Eta Model with the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System to Build a National Air Quality Forecasting System. *Weather and Forecasting*, *20*(3), 367–384. <https://doi.org/10.1175/WAF855.1>
- Pereira, T. C., Silva, R., Amaro, A., Seabra, T., Pina, A., Borges, M., & Canaveira, P. (2017). Emissões de Poluentes Atmosféricos por Concelho, 42.
- Perera, E. M., & Sanford, T. (2011). Climate Change and Your Health: Rising Temperatures, Worsening Ozone Pollution - Technical Appedix, *3*(2), 20. Retrieved from http://www.ucsus.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/global_warming/climate-and-ozone-pollution-tech-appendix.pdf
- Polhill, J. G., Parker, D., Brown, D., & Grimm, V. (2008). Using the ODD Protocol for Describing Three Agent - Based Social Simulation Models of Land - Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, *11*(2008), 1–31.
- Province, H. (2006). Analysis on Influencing Factors of Indoor Air Quality and Measures of Improvement, (4), 5–8.
- Ran, L., Zhao, C., Geng, F., Tie, X., Tang, X., Peng, L., ... Guenther, A. (2009). Ozone photochemical production in urban Shanghai, China: Analysis based on ground level observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *114*(15), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2008JD010752>
- Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling*.
- Sicard, P., Anav, A., De Marco, A., & Paoletti, E. (2017). Projected global tropospheric ozone impacts on vegetation under different emission and climate scenarios. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, (March), 1–

34. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-74>
- Sigman, R. et al. (2012). Health and Environment. In *OECD Environmental Outlook to 2050* (p. 277). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Smith, Goodchild, L. (2015). Classification and clustering. Retrieved from http://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html?classification_and_clustering.htm
- Sousa, S. (2009). Impact of Ozone on the Prevalence of Childhood Asthma, (July).
- Srivastava, A., & Rao, B. P. S. (2011). Urban Air Pollution Modeling. *Air Quality-Models and Applications*, 364. <https://doi.org/10.5772/16776>
- Stohl, A., Sodemann, H., Eckhardt, S., Frank, A., Seibert, P., Wotawa, G., ... Harustak, M. (2016). The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 9.3. *FLEXPART Document*, (12345). <https://doi.org/10.5194/acp-5-2461-2005>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). Aermid implementation guide. *Environmental Protection*, 24.
- UE. (2008). Diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Maio, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. *European Journal of Operational Research*, L 152.
- WHO. (2003). Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. *Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13–15 January 2003*, (January), 98. <https://doi.org/10.2105/AJPH.48.7.913>
- World Health Organisation Europe. (2004). Health Aspects of Air Pollution Results from the WHO Project “Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe.” *World Health*, 30.
- World Health Organization. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. *World Health Organization*, 309. Retrieved from <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>

Qualar, 2017 - <http://qualar.apambiente.pt/index.php?page=1&subpage=7>

Mapzen - https://mapzen.com/data/metro-extracts/metro/porto_portugal/

(retrieved: 22/08/2017)

ANEXO 1

Modelo – Código fonte

```
;; Load gis extension to use shapefiles
extensions [ gis ]

;; Define global variables
globals [
  hours          ;; current time in hours
  days           ;; number of days passed
  daytime        ;; true -> day; false -> night
  p-rate         ;; switch to enable/disable producing pollutants (0-1)
  NO2-rate       ;; rate of NO2-splitting reaction
]

;; Define patches' variables
patches-own [
  residents
  d0-4
  d5-9
  d65
  road-class
  industry-class
]

;; Define Agents' variables
turtles-own [
  speed
  origin
  wind-speed
]

;; Define different Agents
breed [VOC VOCs] ;; volatile organic chemicals - YELLOW
breed [NO2 NO2s] ;; nitrogen dioxide - BROWN
breed [NO NOs]   ;; nitrogen oxide - BLUE
breed [O1 O1s]   ;; oxygen radicals - GREEN
breed [O3 O3s]   ;; ozone - RED

to setup
  clear-all
  ask patches
  [
    set pcolor white
  ]
  ;; Set default shapes for all turtle breeds
  set-default-shape VOC "dot"
```

```

set-default-shape N02 "dot"
set-default-shape O3 "dot"
set-default-shape NO "dot"
set-default-shape O1 "dot"

;; Define global variables' initial state
set daytime false
set hours 0
set days 0
;; If <pollutants-daylight-cycle> is off, produce pollutants at all
hours
ifelse pollutants-daylight-cycle = true [set p-rate 0][set p-rate 1]
;; Define default values for user inputs
if number-of-ticks-per-hour = 0 [set number-of-ticks-per-hour 5]

;; Roads related inputs
if road-pollutants-initial-speed = 0 [set road-pollutants-initial-speed
0.5]
if road-pollutants-delta-speed = 0 [set road-pollutants-delta-speed
0.9]
if road-pollutants-minimum-speed < 0 [set road-pollutants-minimum-speed
0]
if road-pollutants-production-frequency = 0 [set road-pollutants-
production-frequency 5]
if roads-NO-production = 0 [set roads-NO-production 1]
if roads-NO2-production = 0 [set roads-NO2-production 1]

;; Industry related inputs
if industry-pollutants-initial-speed = 0 [set industry-pollutants-
initial-speed 0.8]
if industry-pollutants-delta-speed = 0 [set industry-pollutants-delta-
speed 0.9]
if industry-pollutants-minimum-speed < 0 [set industry-pollutants-
minimum-speed 0]
if industry-pollutants-production-frequency = 0 [set industry-
pollutants-production-frequency 1]
if industry-VOC-production = 0 [set industry-VOC-production 5]

;; Load all shapefiles
;; - they must be of type polygon

;; Load population shapefile
gis:load-coordinate-system (word "shp_pop/population.prj")
let population-dataset gis:load-dataset "shp_pop/population.shp"
;; Load roads shapefile
;; - only polygons with attribute CLASS = "highway" will be
considered
let roads-dataset gis:load-dataset "shp_roads/roads.shp"
;; Load industry shapefile

```

```

;; - only polygons with attribute CLASS = "industry" will be
considered
let industry-dataset gis:load-dataset "shp_industry/industry.shp"

;; Set map projection for the union of loaded shapefiles' extent
gis:set-world-envelope (gis:envelope-union-of (gis:envelope-of
population-dataset)
industry-dataset)
(gis:envelope-of
roads-dataset))

;; Load data from shapefiles to patches variables
gis:apply-coverage population-dataset "D_0_4" d0-4
gis:apply-coverage population-dataset "D_5_9" d5-9
gis:apply-coverage population-dataset "D_65" d65
gis:apply-coverage roads-dataset "CLASS" road-class
gis:apply-coverage industry-dataset "CLASS" industry-class

;; Render each polygon from population shapefile in a color scale
;; Shapefile field used for this is defined by user with <target-
population> input
foreach gis:feature-list-of population-dataset
[
feature -> scale-paint-polygon feature lime target-population
population-min-value population-max-value
]

;; Render each industry from industries shapefile
foreach gis:feature-list-of industry-dataset
[
feature -> paint-industries feature (orange + 1) ; lighter orange
]

;; Render each road from roads shapefile
foreach gis:feature-list-of roads-dataset
[
feature -> paint-roads feature (blue + 1) ; lighter blue
]
reset-ticks
end

to scale-paint-polygon [feature fill-color field-name field-min field-
max]
gis:set-drawing-color scale-color fill-color (gis:property-value
feature field-name) field-max field-min
gis:fill feature 2.0
gis:set-drawing-color gray
gis:draw feature 0.03

```

```

end

to paint-industries [feature selected-color]
  gis:set-drawing-color selected-color
  gis:draw feature 1
end

to paint-roads [feature selected-color]
  gis:set-drawing-color selected-color
  gis:draw feature 0.06
end

;; Function that will be called at each tick
to Go
  ;; Calculate days and hours
  if ticks mod number-of-ticks-per-hour = 0
  [
    ifelse hours = 23
    [
      if daily-export = true [export-shapefile days]
      set hours 0
      set days days + 1
    ]
    [set hours hours + 1]

    ;; Calculate day and night time
    ;; Display daytime and hours in Output screen
    ifelse hours < 8 or hours > 19
    [
      output-type "night: " output-print word hours ":00"
      set daytime false
      ifelse polutants-daylight-cycle = true [set p-rate 0][set p-rate
1]
    ]
    [
      output-type "day: " output-print word hours ":00"
      set daytime true
      if polutants-daylight-cycle = true [set p-rate 1]
    ]
  ]

  produce-polutants
  move-polutants
  run-reactions

  ;; Start iteration
  tick

```

```

end

to produce-polutants

  if ticks mod road-polutants-production-frequency = 0 ;; frequency
with which road polutants are produced
  [
    ;; Produce Road-Polutants' Agents
    ask patches with [road-class = "highway"]
    [
      sprout-NO2 round (roads-NO2-production * random-float 1 * p-rate)
      [
        set color brown
        set size 0.2
        set heading random 360
        set speed road-polutants-initial-speed
        set wind-speed wind-strength
        set origin "road"
      ]
      sprout-NO round (roads-NO2-production * random-float 1 * p-rate)
      [
        set color blue
        set size 0.2
        set heading random 360
        set speed road-polutants-initial-speed
        set wind-speed wind-strength
        set origin "road"
      ]
    ]
  ]
  if ticks mod industry-polutants-production-frequency = 0 ;; frequency
with which industry polutants are produced
  [
    ;; Produce Industry-Polutants' Agents
    ask patches with [industry-class = "industry"]
    [
      sprout-VOC round (industry-VOC-production * random-float 1 * p-
rate)
      [
        set size 0.2
        set color yellow
        set heading random 360
        set speed industry-polutants-initial-speed
        set wind-speed wind-strength
        set origin "industry"
      ]
    ]
  ]
end

```

```

to move-polutants
  ;; Move Road-Polutants' Agents
  ask turtles with [origin = "road"]
  [
    ;; Kill Agents that touch the screen limits
    if not can-move? speed [ die ]
    ;; Make them move
    fd speed
    ;; Set new random direction
    set heading random 360
    ;; If not at minimum speed, update speed by delta parameter.
    ;; <road-polutants-delta-speed> and <road-polutants-minimum-speed>
are
    ;; defined by user
    if speed > road-polutants-minimum-speed
    [
      set speed (speed * road-polutants-delta-speed)
    ]
  ]

  ;; Move Industry-Polutants' Agents
  ask turtles with [origin = "industry"]
  [
    ;; Kill Agents that touch the screen limits
    if not can-move? speed [ die ]
    ;; Make them move
    fd speed
    ;; Set new random direction
    set heading random 360
    ;; If not at minimum speed, update speed by delta parameter.
    ;; <industry-polutants-delta-speed> and <industry-polutants-
minimum-speed> are
    ;; defined by user
    if speed > industry-polutants-minimum-speed
    [
      set speed (speed * industry-polutants-delta-speed)
    ]
  ]
  if wind
  [
    ask turtles
    [
      set heading wind-direction
      if not can-move? wind-speed [ die ]
      fd wind-speed
      ifelse wind-speed <= 0.1
      [
        set wind-speed 0
      ]
    ]
  ]

```

```

    ]
    [
      set wind-speed (wind-speed * wind-delta-speed)
    ]
  ]
end

;; Chemical reactions without O2
to run-reactions
  ;; set reaction rate for splitting NO2
  set NO2-rate sunlight

  ;; Split NO2
  ask NO2
  [
    ;; generate random number to see if there's enough energy for
reaction
    if daytime = true and random-float 350 < NO2-rate
    [
      ;; if there is, convert the NO2 turtle to O1
      set breed O1
      set size 0.2
      set color green
      ;; and create a new turtle that is NO
      hatch-NO 1
      [
        set color blue
        set size 0.2
        set heading random-float 360
        set wind-speed wind-strength
      ]
    ]
  ]

  ;; Destroy Ozone
  ask NO
  [
    ;; see if there are any O3 in the patch
    if daytime = true and any? O3-here and random 5 < 2
    [
      ;; if there are, convert NO turtle to NO2
      set breed NO2
      set size 0.2
      set color brown
      set heading random-float 360
      ;; destroy used up O3 turtle
      let reactant one-of O3-here

```

```

    if reactant != nobody
    [
        ask reactant [die]
    ]
]

;; Create Ozone
ask O1
[
    set breed O3
    set size 0.4
    set color red
    set heading random-float 360
]

;; Create Oxidants
ask VOC
[
    ;; see if any NO are in the patch
    if any? NO-here
    [
        ;; if there are, convert VOC turtle to Ox
        set breed O1
        set size 0.2
        set color violet
        set heading random-float 360
    ]
    ;; destroy used up NO turtle
    let reactant one-of NO-here
    if reactant != nobody
    [
        ask reactant [die]
    ]
]
end

to export-shapefile [day]
    gis:store-dataset (gis:turtle-dataset VOC) word
    "exported_shapefiles/VOC/" day
    gis:store-dataset (gis:turtle-dataset NO2) word
    "exported_shapefiles/NO2/" day
    gis:store-dataset (gis:turtle-dataset NO) word
    "exported_shapefiles/NO/" day
    gis:store-dataset (gis:turtle-dataset O3) word
    "exported_shapefiles/O3/" day
end

```

ANEXO 2

Estações e respetivos poluentes para o ano de 2016 utilizados neste estudo

Estação /Código	Tipo	Poluentes	Símbolo	Município	Coordenadas WGS84
Custóias /1021	Suburbana/Fundo	Ozono Óxidos de azoto	O3 NOx	Matosinhos	41°11'59" -8°38'41"
Leça do Bailio /1034	Suburbana/Fundo	Ozono	O3	Matosinhos	41°13'05" -8°37'56"
Meco /1025	Urbana/Industrial	Ozono Benzeno Tolueno mp-Xileno o-Xileno Etilbenzeno	O3 C6H6 Toluene m p-xylene o-Xylene Ethylbenzene	Matosinhos	41°13'56" -8°42'47"
Seara /1055	Urbana/Industrial	Benzeno Tolueno mp-Xileno o-Xileno Etilbenzeno	C6H6 Toluene m p-xylene o-Xylene Ethylbenzene	Matosinhos	41°11'16" -8°40'19"
Sobreiras /1050	Urbana/Fundo	Ozono Óxidos de Azoto	O3 NOx	Porto	41°08'51" -8°39'32"

Francisco Sá Carneiro /1028	Urbana/Tráfego	Óxidos de Azoto	NOx	Porto	41°09'52" -8°35'22"
João Gomes Laranjo /1030	Urbana/Tráfego	Óxidos de Azoto	NOx	Matosinhos	41°11'10" -8°39'47"

ANEXO 3

Designação das freguesias de Matosinhos antes e depois da reestruturação de 2013

Matosinhos			
Agregação*	Freguesias* (anterior a 2013)	Área	Pop. Residente**
União Freguesias de Custóias, Leça do Balio, Guifões	Custóias Leça do Balio	18,84 Km2	45.716
União Freguesias de Matosinhos, Leça da Palmeira	Matosinhos Leça da Palmeira	12,16 Km2	49.486
União Freguesias de Perafita, Lavra, Stª Cruz do Bispo	Perafita Lavra	22,65 Km2	29.407
União Freguesias de S. Mamede Infesta, Sª da Hora	São Mamede Infesta Senhora da Hora	8,78 Km2	50.869

*RATF ** segundo dados censitários de 2011

ANEXO 4

Designação das freguesias do Porto antes e depois da reestruturação de 2013

Porto			
Agregação*	Freguesias* (anterior a 2013)	Área	Pop. residente**
União Freguesias de Aldoar, Foz do Douro e Nevogilde	Aldoar Foz do Douro Nevogilde	6,26 Km2	28.858
Bonfim (sem alteração)	Bonfim	3,09 Km2	24.265
Campanhã (sem alteração)	Campanhã	8,04 Km2	32.659
União Freguesias de Cedofeita, Santo Ildefonso, Sé, Miragaia, S. Nicolau e Vitória	Cedofeita Santo Ildefonso Sé Miragaia São Nicolau Vitória	5,43 Km2	40.440
União Freguesias de Lordelo do Ouro e Massarelos	Lordelo do Ouro Massarelos	5,58 Km2	29.059
Paranhos (sem alteração)	Paranhos	7,16 Km2	44.298
Ramalde (sem alteração)	Ramalde	5,82 Km2	38.012

* RATF ** segundo ("Censos 2011 - Mudanças Demográficas," 2014)

ANEXO 5

Parâmetros utilizados na ferramenta *Reclassify* a) Atribuição dos novos valores

Reclassification

Old values	New values
4 - 459,111111	1
459,111111 - 914,222222	2
914,222222 - 1369,333333	3
1369,333333 - 1824,444444	4
1824,444444 - 2279,555555	5
2279,555556 - 2734,666666	6
2734,666667 - 3189,777777	7
3189,777778 - 3644,888888	8

Buttons: Classify..., Unique, Add Entry, Delete Entries, Load..., Save..., Reverse New Values, Precision...

b) Método de classificação

Classification

Classification Method: Natural Breaks (Jenks)

Classes: 9

Data Exclusion: Exclusion..., Sampling...

Columns: 100 Show Std. Dev. Show Mean

Classification Statistics:

Count:	29818
Minimum:	0
Maximum:	331
Sum:	908166
Mean:	30,456972
Standard Deviation:	41,749139

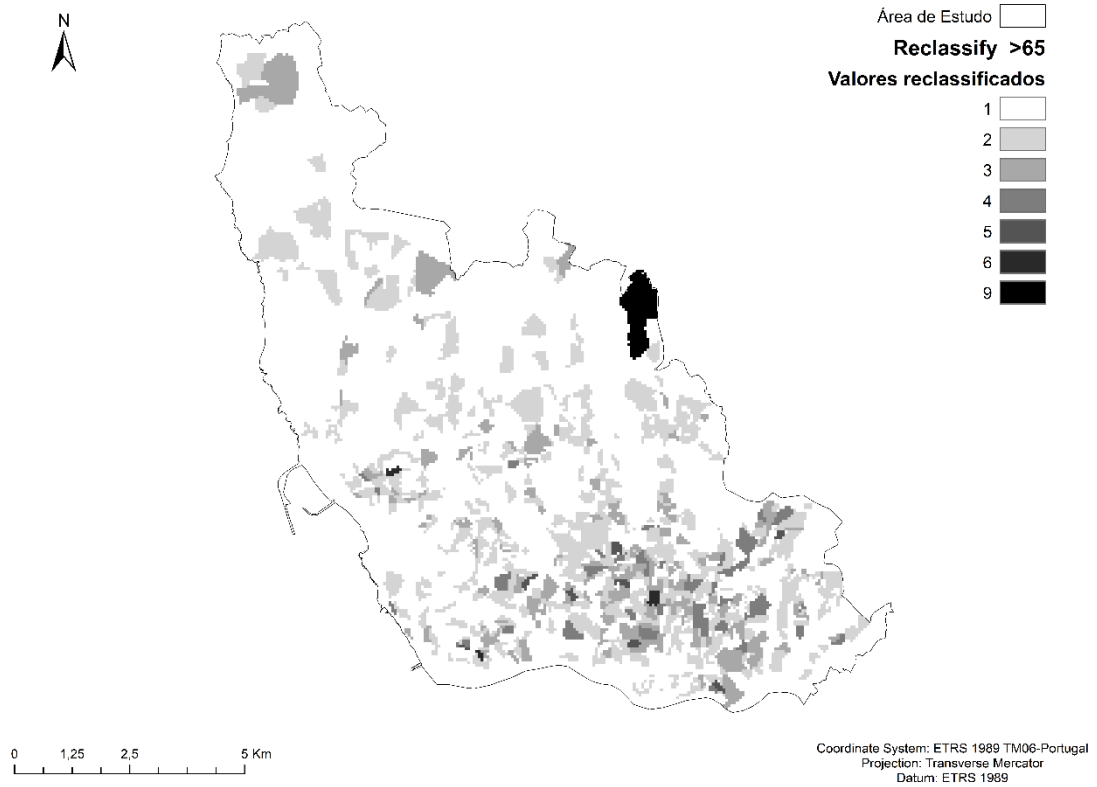
Break Values: 9, 23, 39, 56, 76, 104, 148, 201, 331

Snap breaks to data values

Buttons: OK, Cancel

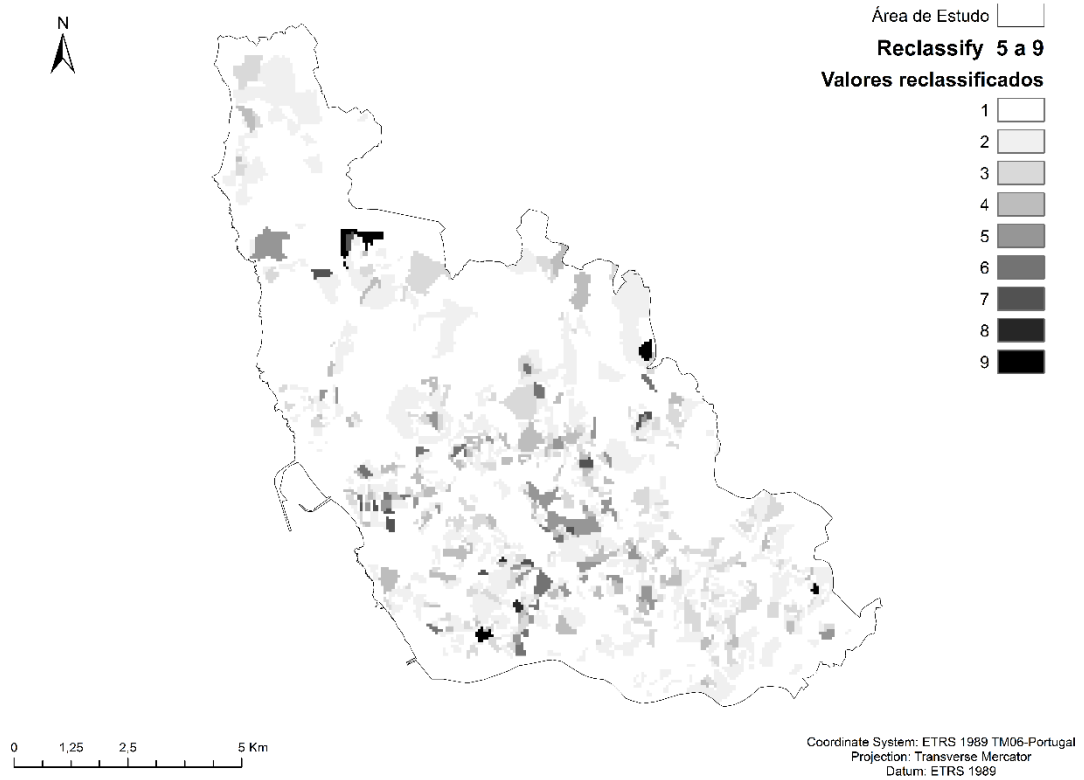
ANEXO 6

Mapa resultante da reclassificação para a população com mais de 65 anos



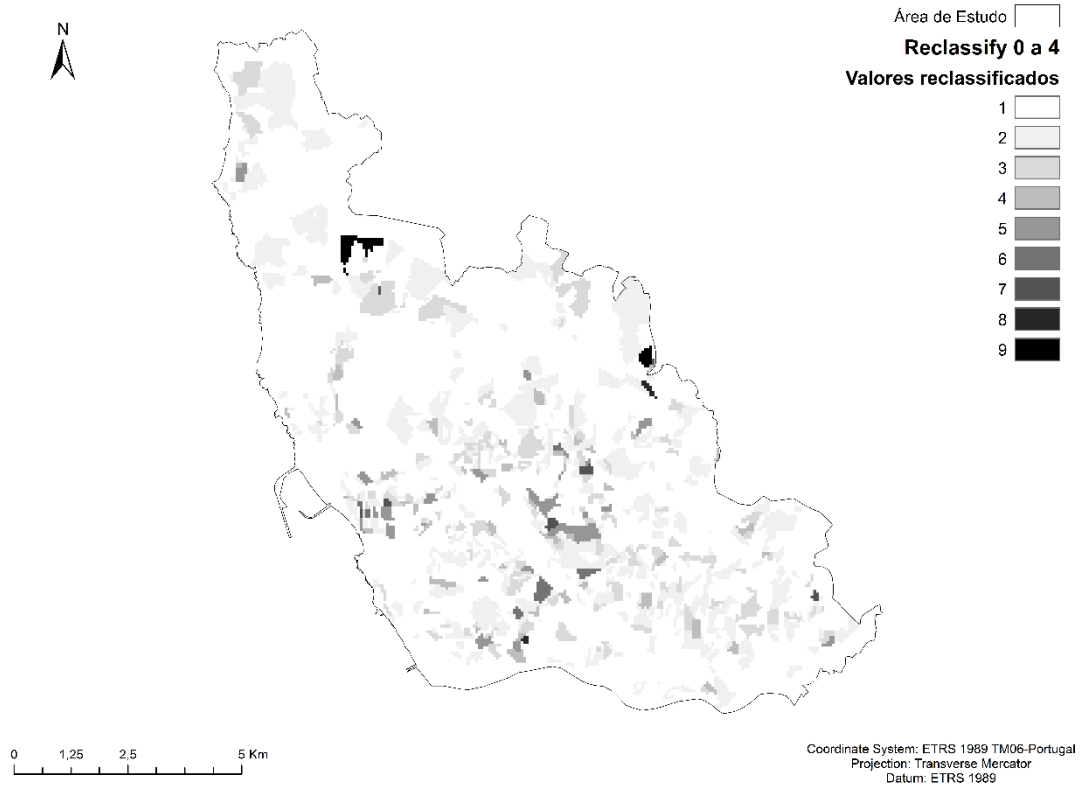
ANEXO 7

Mapa resultante da reclassificação para a população entre 5 a 9 anos



ANEXO 8

Mapa resultante da reclassificação para a população entre 0 a 4 anos



ANEXO 9

Matriz de confusão relativa aos resultados obtidos com o Weighted Overlay do modelo e das medições

Modelo \ Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	U_Accuracy
1	8	100	389	122	0	0	0	0	619	0,01
2	21	316	653	299	22	0	0	0	1311	0,24
3	136	1607	2425	704	35	0	0	0	4907	0,49
4	413	2975	3915	1985	290	0	0	0	9578	0,21
5	166	1587	2891	2391	632	10	1	0	7678	0,08
6	0	23	261	249	218	6	22	1	780	0,01
7	0	0	12	8	27	2	34	4	87	0,39
8	0	0	0	1	0	0	7	0	8	0,00
Total	744	6608	10546	5759	1224	18	64	5	24968	0,00
P_Accuracy	0,01	0,05	0,23	0,34	0,52	0,33	0,53	0,00	0,00	0,22

ANEXO 10

Matriz de confusão para a área do Mecó

Modelo \ Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	U_Accuracy
1	0	0	0	5	0	0	0	0	5	0,00
2	0	0	0	51	4	0	0	0	55	0,00
3	0	0	0	353	34	0	0	0	387	0,00
4	0	0	0	767	185	0	0	0	952	0,81
5	0	0	0	828	229	13	0	0	1070	0,21
6	0	0	0	0	17	7	9	1	34	0,21
7	0	0	0	2	0	2	28	4	36	0,78
8	0	0	0	2	0	0	7	0	9	0,00
Total	0	0	0	2008	469	22	44	5	2548	0,00
P_Accuracy	0,00	0,00	0,00	0,38	0,49	0,32	0,64	0,00	0,00	0,40

ANEXO 11

Matriz de confusão para a área de Custóias

Medições Modelo	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	U_Accuracy
1	0	6	41	1	0	0	0	0	48	0,00
2	2	22	135	39	0	0	0	0	198	0,11
3	35	120	509	103	1	0	0	0	768	0,66
4	123	251	823	230	11	0	0	0	1438	0,16
5	41	169	494	271	50	0	0	0	1025	0,05
6	0	0	1	23	68	0	0	0	92	0,00
7	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0,00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Total	201	568	2003	667	131	0	0	0	3570	0,00
P_Accuracy	0,00	0,04	0,25	0,34	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23

ANEXO 12

Matriz de confusão para área de Sobreiras

Modelo \ Medições	1	2	3	4	5	6	7	8	Total	U_Accuracy
1	0	14	0	0	0	0	0	0	14	0,00
2	0	25	2	0	0	0	0	0	27	0,93
3	0	220	40	2	0	0	0	0	262	0,15
4	0	581	189	15	2	0	0	0	787	0,02
5	0	409	230	36	13	0	0	0	688	0,02
6	0	3	53	15	17	0	0	0	88	0,00
7	0	0	1	4	13	0	0	0	18	0,00
Total	0	1252	515	72	45	0	0	0	1884	0,00
P_Accuracy	0,00	0,02	0,08	0,21	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05