

Módulo de Modelação da Qualidade do Ar na RLVT

Elaborado no âmbito do

**PLANO DE MELHORIA DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO DE
LISBOA E VALE DO TEJO PARA OS POLUENTES PARTÍCULAS
PM₁₀ E NO₂ NAS AGLOMERAÇÕES DA ÁREA METROPOLITANA
DE LISBOA NORTE E ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA SUL**



Título	Módulo de Modelação da Qualidade do Ar na RLVT - Elaborado no âmbito do PLANO DE MELHORIA DA QUALIDADE DO AR DA REGIÃO DE LISBOA E VALE DO TEJO PARA OS POLUENTES PARTÍCULAS PM ₁₀ E NO ₂ NAS AGLOMERAÇÕES DA ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA NORTE E ÁREA METROPOLITANA DE LISBOA SUL
Data	Novembro 2016
Equipa	<p>Nelson Barros (UFP – Coordenação modelação da qualidade do ar)</p> <p>Conceição Manso (UFP – Equipa técnica modelação da qualidade do ar)</p> <p>Tânia Fontes (UFP – Equipa técnica modelação da qualidade do ar)</p> <p>Francisco Ferreira (FCT/UNL – Interlocutor científico e Coordenação geral)</p> <p>Joana Monjardino (FCT/UNL – Coordenação técnica)</p> <p>Luísa Nogueira (CCDR LVT – Acompanhamento)</p> <p>Sandra Mesquita (CCDR LVT – Acompanhamento)</p>

Índice

1	Introdução	4
2	Aspetos metodológicos	4
2.1	Modelação da dispersão atmosférica	4
2.2	Domínio de estudo	5
2.3	Topografia e uso do solo	7
2.4	Fontes de emissão	7
2.5	Meteorologia - Identificação do ano meteorológico típico e desfavorável com recurso ao modelo TAPM	16
2.6	Validação do modelo	20
2.7	Aspetos gerais de apresentação dos resultados	26
3	Resultados da modelação da situação de referência	28
3.1	Partículas em Suspensão PM ₁₀	28
3.2	Dióxido de azoto	31
4	Resultados obtidos relativos à repartição de fontes de NO ₂ e PM ₁₀	37
4.1	Partículas em Suspensão (PM ₁₀)	37
4.2	Dióxido de azoto	39
5	Resultados obtidos relativos aos diferentes cenários: redução das concentrações de NO ₂ e PM ₁₀	41
5.1	Cenários de emissão	42
5.2	Partículas em Suspensão (PM ₁₀)	47
5.3	Dióxido de azoto	54
6	Apreciação global	58

1 Introdução

O presente documento diz respeito à avaliação da qualidade do ar ambiente na Região LVT com recurso à modelação determinística através de um modelo numérico – o TAPM (*The Air Pollution Model*) elaborada no âmbito do Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo para os poluentes partículas PM₁₀ e NO₂ nas aglomerações da Área metropolitana de Lisboa Norte e Área Metropolitana de Lisboa Sul de 2016. A avaliação incidirá sobre os principais poluentes, emitidos pelas fontes de emissão da região em estudo, abrangidos pela legislação vigente de qualidade do ar (Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro), e para os quais se identificaram problemas de incumprimento dos valores limite, em particular: dióxido de azoto (NO₂) e partículas em suspensão (PM₁₀).

2 Aspetos metodológicos

2.1 Modelação da dispersão atmosférica

Neste estudo, foi usado na simulação da dispersão de poluentes atmosféricos o modelo TAPM¹, – *The Air Pollution Model*, versão 4.04 (Hurley, 2008). Trata-se de um modelo desenvolvido pela CSIRO, *Atmospheric Research*, que inclui um módulo mesometeorológico e um módulo de dispersão de poluentes, incluindo a formação de poluentes secundários e produção de ozono. Este modelo possui a vantagem de ser aplicável a situações complexas de topografia e campo de ventos, bem como apresentar a possibilidade de simulações de longo termo – um ano – com a vantagem da possibilidade de comparação dos resultados com a legislação aplicável.

O modelo integra fluxos importantes para a escala local de poluição de ar, tal como brisas do mar e fluxos induzidos pelo terreno, tendo em conta a meteorologia fornecida por análises sinópticas.

O módulo meteorológico de mesoscala utiliza como dados de entrada o forçamento sinóptico fornecido pelo “Australian Bureau of Meteorology” (*LAPS or GASP analysis data*), e dados de topografia e uso do solo. A componente meteorológica do TAPM é um modelo tridimensional, não-hidrostático. O modelo resolve a equação da conservação da quantidade de movimento para as componentes horizontais do vento, a equação da continuidade de um fluido incompressível para a componente vertical e equações escalares para a temperatura potencial e humidade específica. O modelo exige a incorporação de dados meteorológicos horários de vários parâmetros relativos à superfície e estrutura vertical da atmosfera para o período de simulação considerado. Esta informação meteorológica detalhada pode ser gerada por modelação numérica pelo módulo mesometeorológico do TAPM que estima e adequa todos os parâmetros meteorológicos de entrada ao módulo de transporte e dispersão do modelo. Este módulo mesometeorológico tem a capacidade de trabalhar em modo “Data Assimilation”, isto é, pode ter em conta informação real (velocidade e direção do vento horária), que esteja

¹ TAPM – The Air Pollution Model (CSIRO Atmospheric Research, 2010)

disponível em estações meteorológicas existentes no domínio, para ajustar os valores estimados.

No módulo de dispersão e transporte de poluentes, o TAPM utiliza a formulação Euleriana tridimensional desenvolvida para a simulação dos processos físico-químicos associados à produção, transporte, dispersão e deposição de poluentes atmosféricos reativos e não reativos. O modelo pode ainda usar ainda uma aproximação lagrangeana junto às fontes pontuais (*near-source Lagrangian approach - LPM mode*).

2.2 Domínio de estudo

A área para aplicação do modelo de qualidade do ar foi definida tendo em conta os seguintes critérios:

- Posicionamento das áreas em estudo na zona central do domínio;
- Análise das zonas mais críticas em termos de emissões;
- Topografia da área de estudo e sua envolvente;
- Análise de sensibilidade baseada em corridas prévias, indicativas, do modelo usado.

Tendo em conta estes critérios foram definidos três domínios distintos:

- Domínio 1 (D1), usado para caracterizar toda a região de Lisboa e Vale do Tejo (LVT);
- Domínio 2 (D2), usado para caracterizar as zonas mais críticas em termos de emissões de poluentes, neste caso a Área Metropolitana de Lisboa (AML);
- Domínio 3 (D3), usado para a caracterização da envolvente à Av. da Liberdade e correspondente à Zona 2 da de Zona de Emissões Reduzidas (ZER).

É relevante chamar atenção que o domínio D3 é, na verdade, um subdomínio interpolado a partir do domínio D2. Esta interpolação permite passar de uma malha de 1000 m x 1000 m do domínio D2, para uma malha de 200 m x 200 m no subdomínio D3. A vantagem deste tipo de abordagem é uma melhor definição das fontes em linha e pontuais. Não é acrescentada maior definição às restantes tipologias de fontes de emissão.

A Figura 1 apresenta a localização geográfica desses domínios. Note-se que os domínios apresentados representam o domínio interno de um sistema de quatro subdomínios construídos em “nesting” por forma a melhor simular as circulações de mesoscala predominantes nesta região costeira. A dispersão das emissões foi apenas estimada para o subdomínio mais interno.

A Tabela 1 apresenta as características de cada um dos domínios em estudo, enquanto a Figura 2 apresenta as respetivas grelhas de recetores considerados para cada uma das situações.

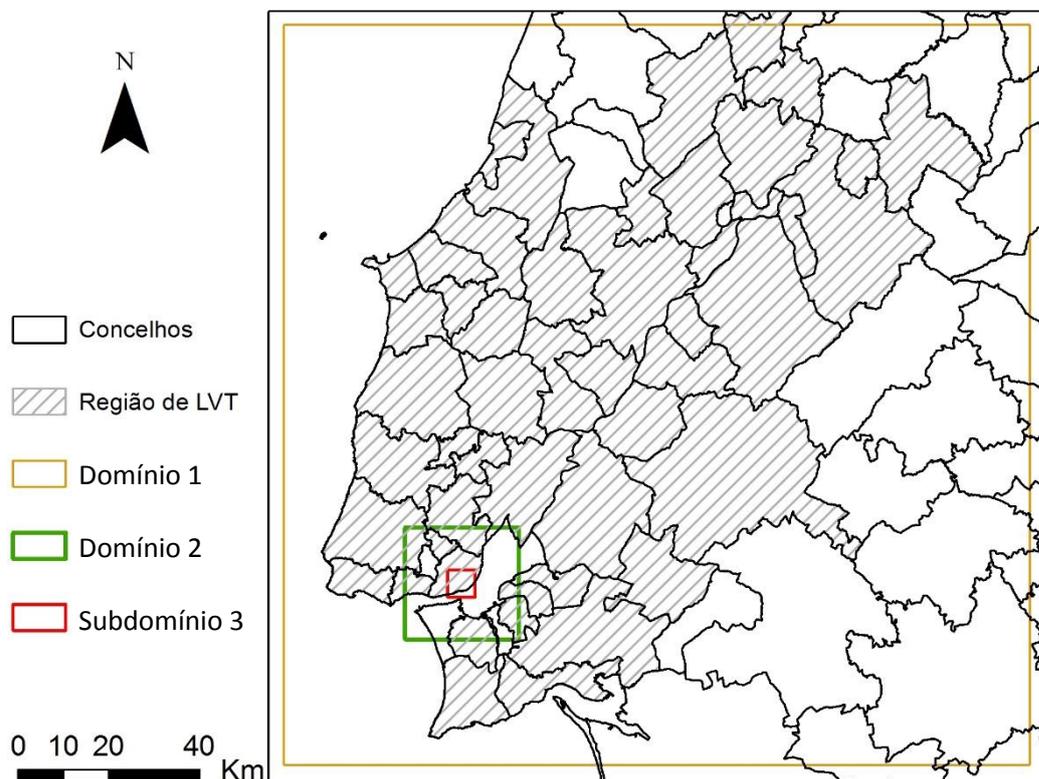


Figura 1. Localização dos domínios de estudo (D1 e D2) e subdomínio D3 usados na modelação

Tabela 1. Características dos domínios em estudo

Parâmetros		Domínio 1	Domínio 2	Subdomínio 3
Coordenada central do domínio (UTM Datum WGS84 – Fuso 29)	Este (x)	8°39'4,508"W	9°8'41,214"W	9°8'41,214"W
	Norte (y)	36°6'3,716"N	38°43'10,925"N	38°43'10,925"N
Extensão máxima do domínio a Este - Oeste (km)		165,0	25,0	6,0
Extensão máxima do domínio a Norte - Sul (km)		165,0	25,0	6,0
Área (km ²)		27225	625,0	36,0
Espaçamento da malha cartesiana (km)		5,0	1,0	0,2
Número de recetores (células)		1089	625	900

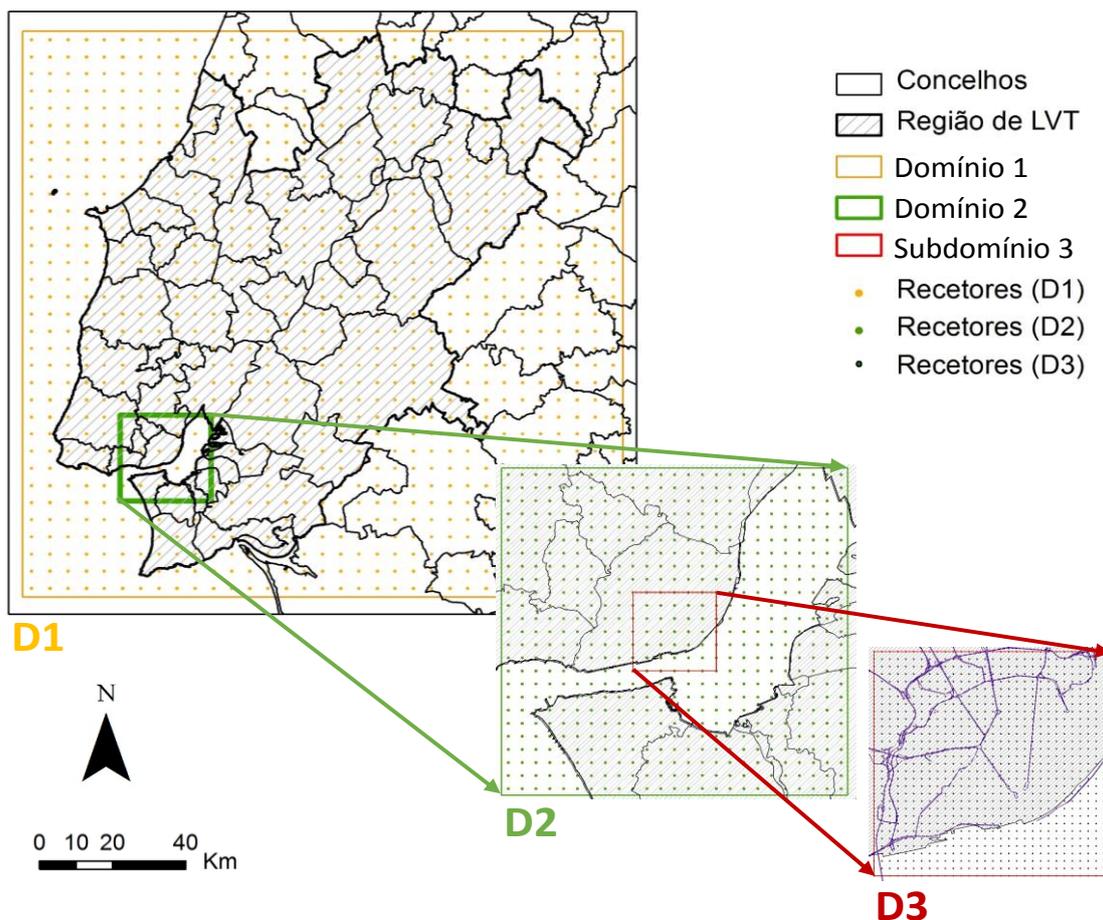


Figura 2. Grelha de recetores para o Domínio 1 - LVT, Domínio 2 – AML e Subdomínio D3 – Zona 2 ZER

2.3 Topografia e uso do solo

A topografia e uso do solo da envolvente são, juntamente com os dados meteorológicos, as emissões e as condições de emissão, fatores determinantes no que diz respeito à estimativa dos níveis de qualidade do ar estimados através de ferramentas de modelação. O ficheiro de base topográfica e uso do solo utilizado na simulação foi o incorporado no modelo de simulação usados. Mais detalhes podem ser consultados na secção 2.1.

2.4 Fontes de emissão

Na região em estudo (RLVT) foram identificadas 495 fontes pontuais industriais. Destas, consideraram-se relevantes 81 fontes pontuais no domínio D1 e 15 fontes pontuais no domínio D2. No subdomínio D3 não foi considerada nenhuma fonte pontual. As restantes fontes industriais abrangidas por estes domínios, mas não tratadas como fontes pontuais, foram injetadas no modelo de qualidade do ar como fontes em área. A Figura 3 mostra a localização das fontes industriais abrangidas pela área em estudo em cada um dos domínios em estudo.

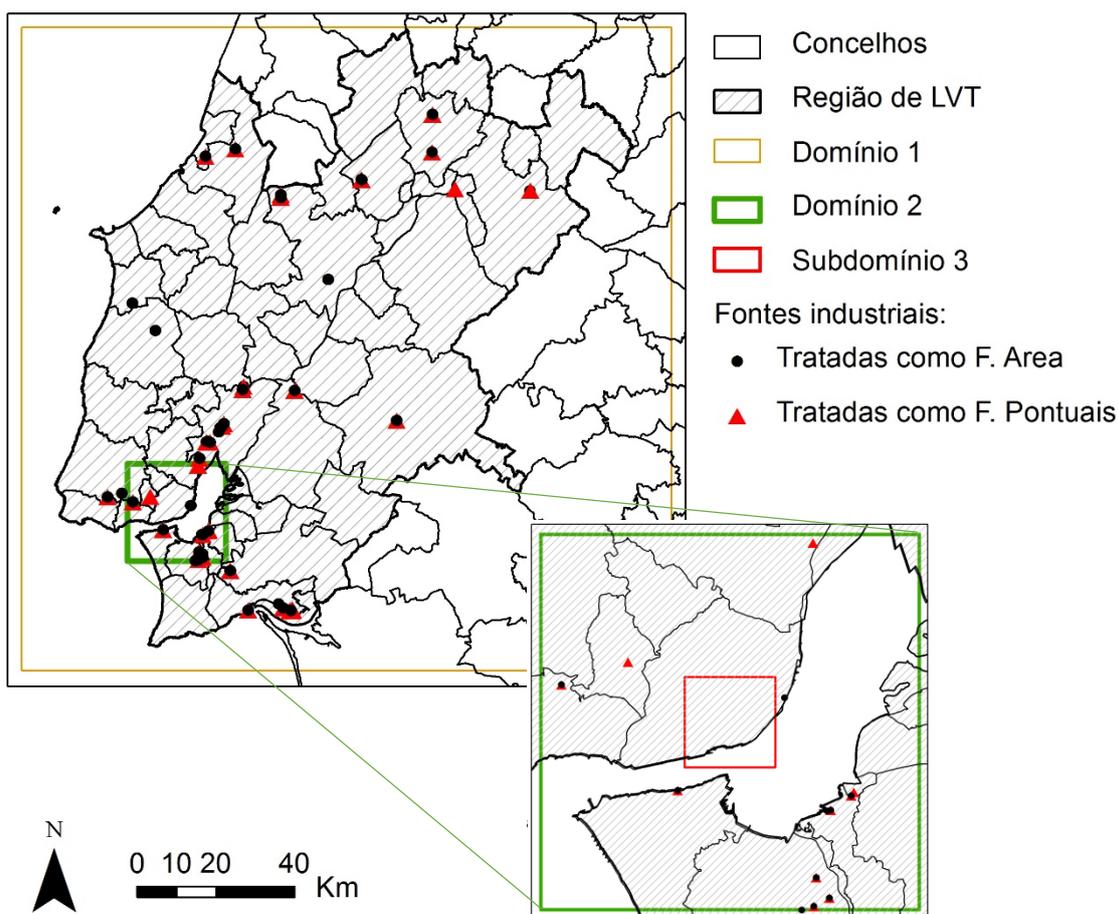


Figura 3. Localização das fontes industriais abrangidas por cada um dos domínios D1, D2 e subdomínio D3 selecionados para avaliação da dispersão das emissões em estudo

No que respeita às emissões em linha, foram consideradas para modelação da qualidade do ar as emissões que ocorrem em vias fluviais, aéreas e rodoviárias. A Figura 4 apresenta as emissões de PM_{10} e NO_x em vias fluviais e aéreas, enquanto as

Figura 5 e a Figura 6 apresentam as emissões para os mesmos poluentes emitidas em vias rodoviárias. Note-se que enquanto no domínio D1 (

Figura 5) se consideraram como fontes em linha rodoviárias todos os veículos a circular nas vias de tráfego de classe 1 (vias constituídas maioritariamente por autoestradas, incluindo também as pontes Vasco da Gama e 25 de Abril), no domínio 2 e 3 (Figura 6) o detalhe da análise incluiu também as vias de tráfego de classe 2 (vias constituídas por Estradas Principais/ Nacionais, Itinerários Principais e Itinerários Complementares).

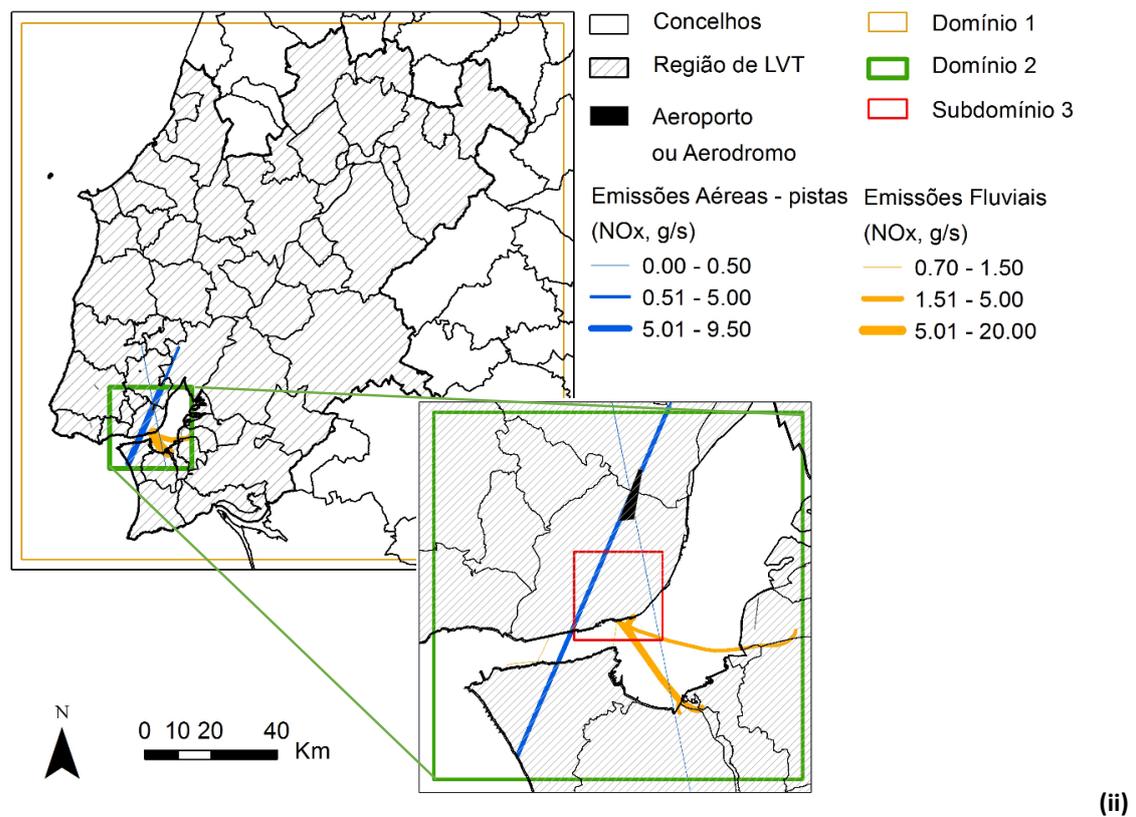
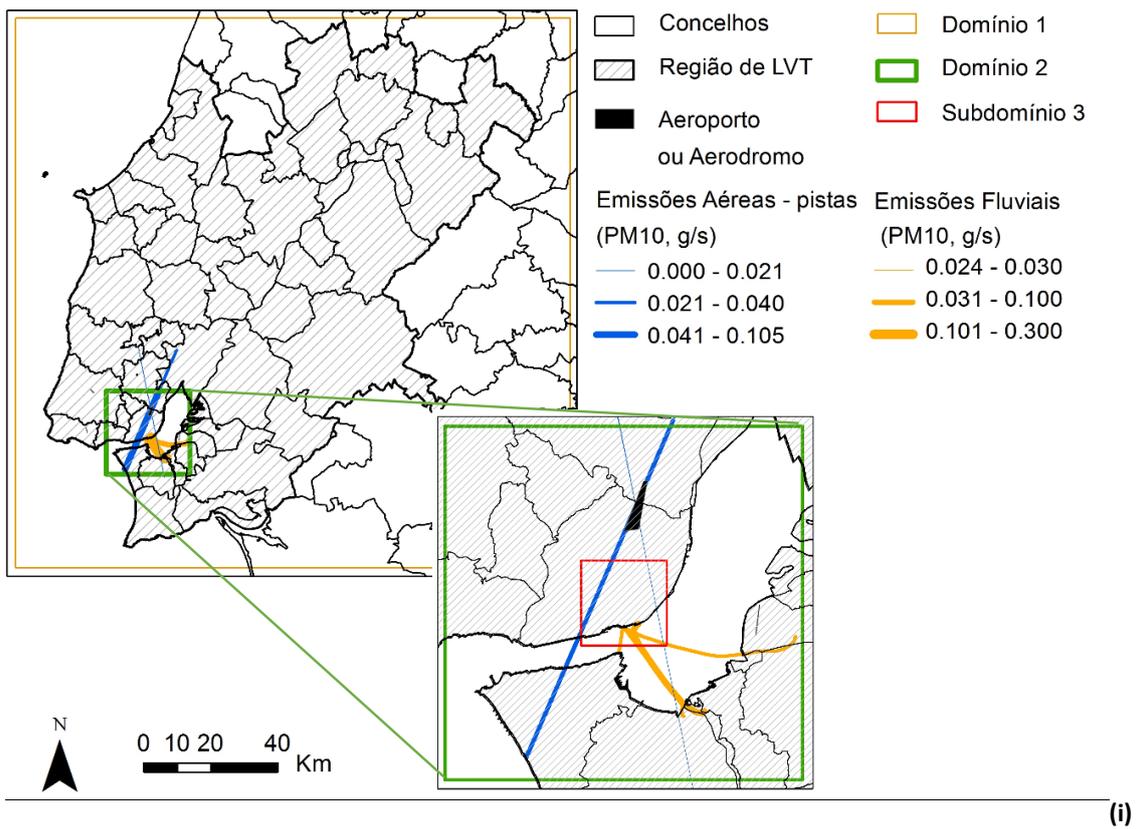


Figura 4. Emissões em linha provenientes de vias fluviais e aéreas para (i) PM_{10} e (ii) NO_x consideradas no modelo de transporte e dispersão para os domínios D1, D2 e subdomínio D3

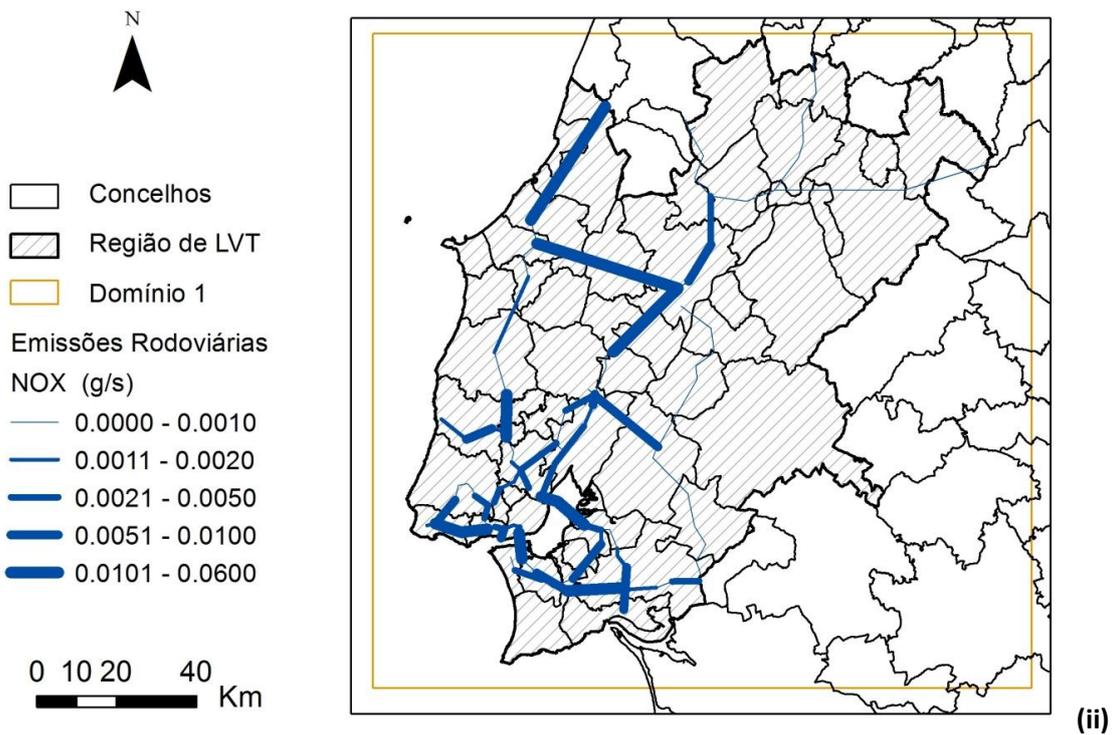
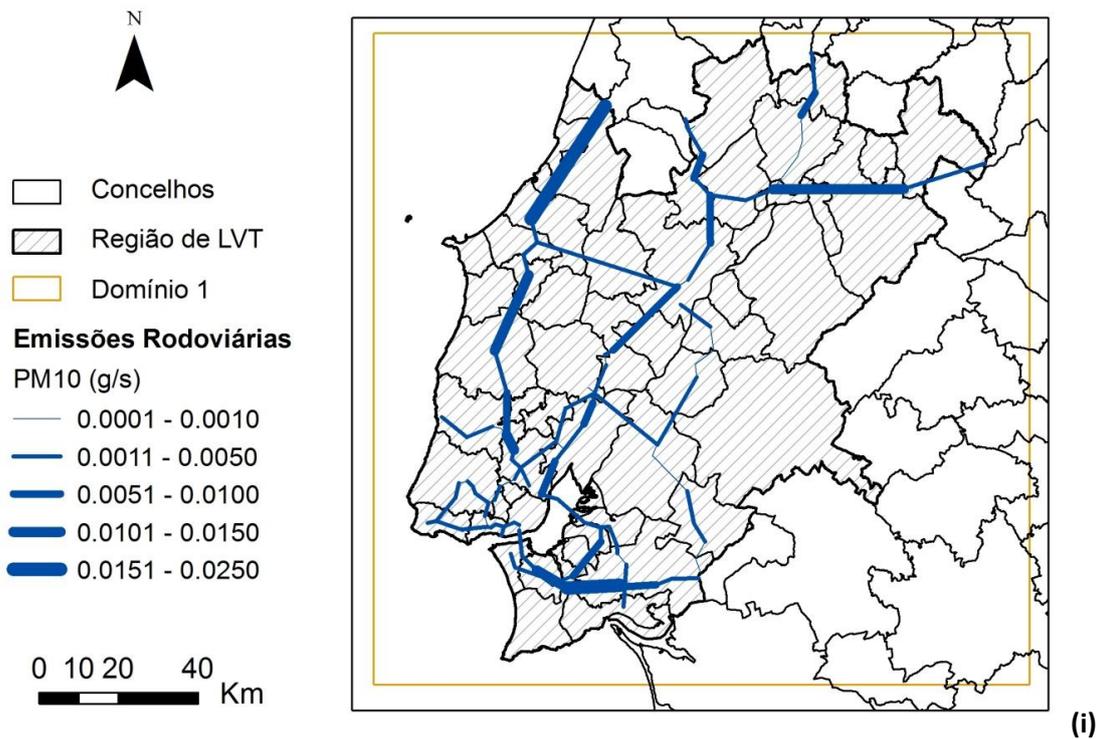
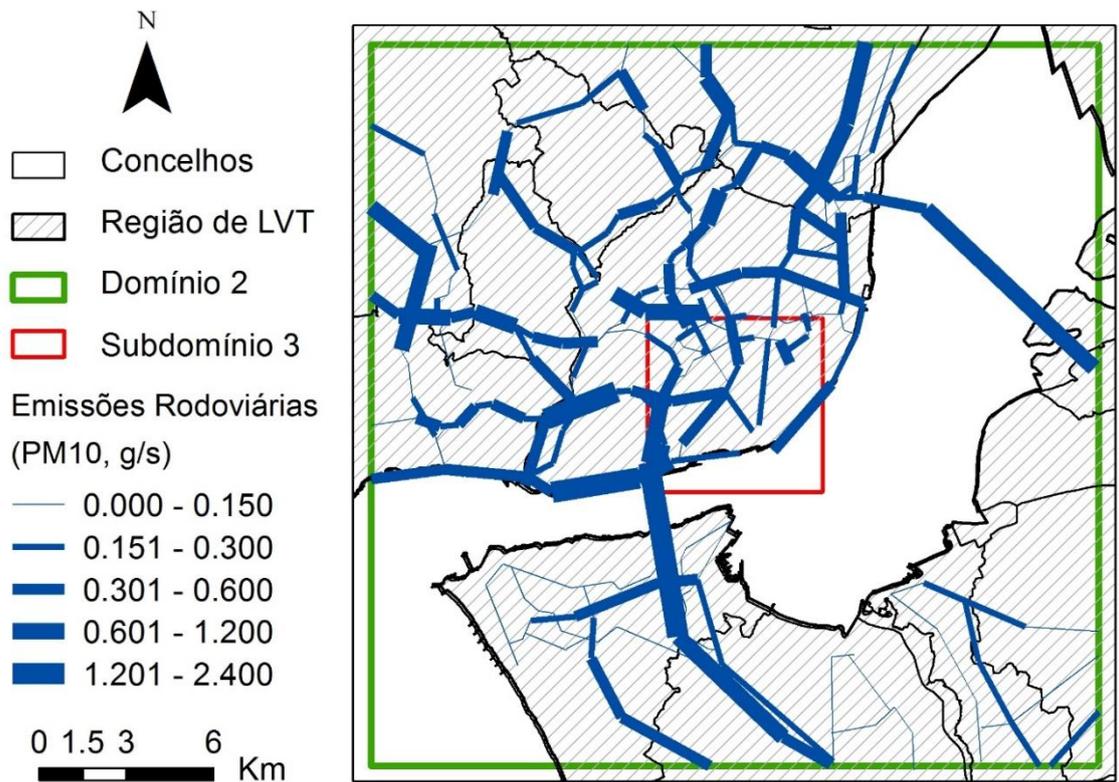
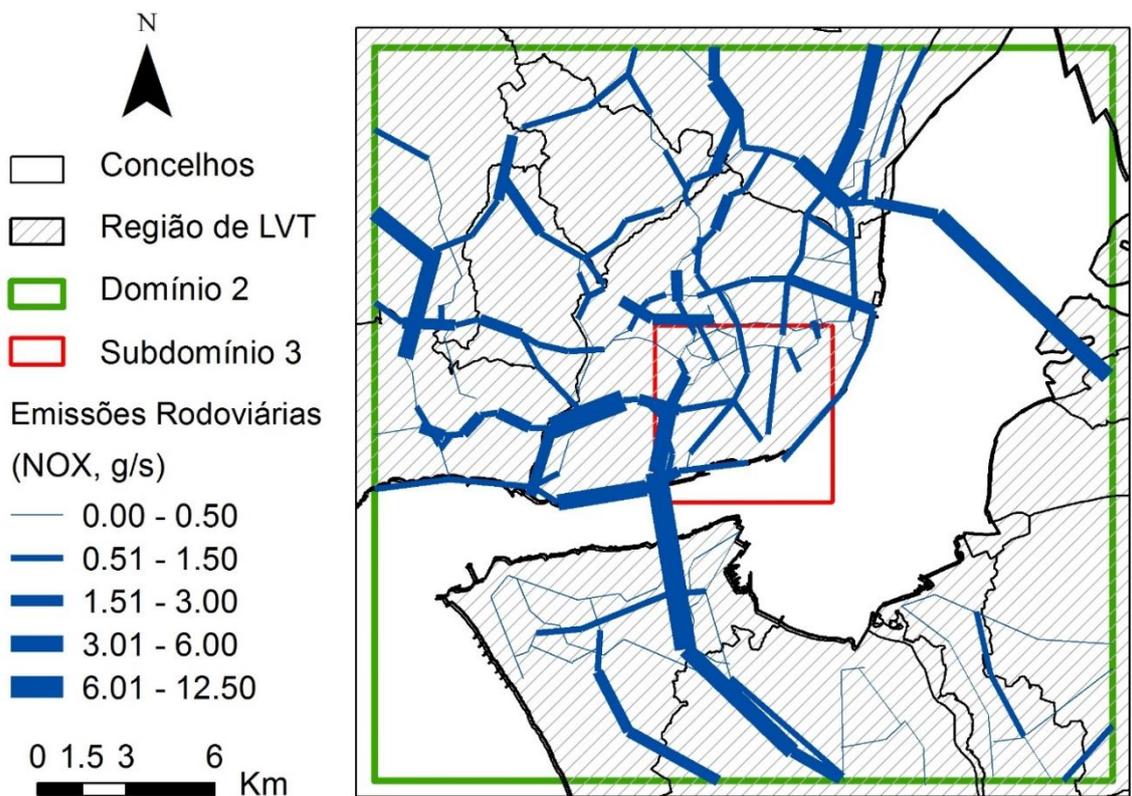


Figura 5. Emissões em linha provenientes das vias rodoviárias para (i) PM_{10} e (ii) NO_x consideradas no modelo de transporte e dispersão para o domínio D1



(i)



(ii)

Figura 6. Emissões em linha provenientes das vias rodoviárias para (i) PM₁₀ e (ii) NO_x consideradas no modelo de transporte e dispersão no domínio D2 e subdomínio D3

No que respeita às fontes em área, foram incluídas todas as restantes fontes de emissão não mencionadas anteriormente, que se incluem nos sectores do comércio, doméstico, serviços, transporte aéreo, marítimo, agricultura/ floresta/ pescas, fontes biogénicas (bem como as restantes fontes industriais e do transporte rodoviário que não entraram no modelo como fonte individualizada). De modo a aumentar o detalhe espacial da distribuição das emissões, as emissões por concelho foram desagregadas para o nível da freguesia tendo em conta a distribuição da população residente. Nesta análise tiveram especial tratamento, as fontes de emissão marítimas, as emissões do tráfego aéreo e as emissões biogénicas.

Para além das emissões registadas na região de Lisboa e Vale do Tejo, foram também estimadas as emissões dos concelhos vizinhos abrangidos pelo domínio D1. Para este caso foram consideradas as emissões publicadas pela APA (2011) para cada um destes concelhos em estudo. De modo a aumentar o detalhe espacial da distribuição das emissões nestes concelhos periféricos, as emissões por concelho foram desagregadas para o nível da freguesia. Enquanto as emissões antropogénicas foram desagregadas tendo em conta a distribuição da população residente, as emissões biogénicas foram desagregadas com base no inverso da distribuição da população residente.

O modelo necessita também da estimativa das emissões de NO_2 . Para isso foi feita uma análise de sensibilidade a partir das emissões de NO_x , de forma a estabelecer um critério tão próximo quanto possível da realidade para a estimativa destas emissões.

A Figura 7 e a Figura 8 apresentam a distribuição das emissões de NO_x e PM_{10} usadas em área no modelo de qualidade do ar para o domínio D1 e D2/D3 respetivamente.

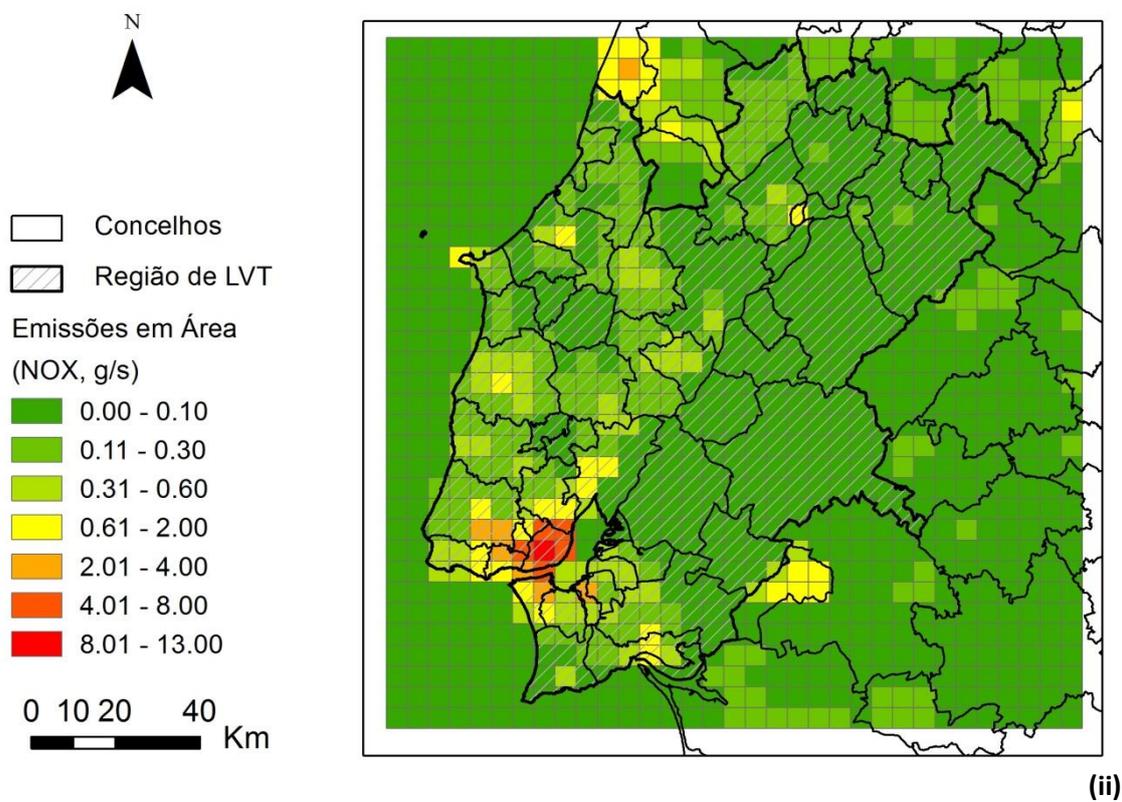
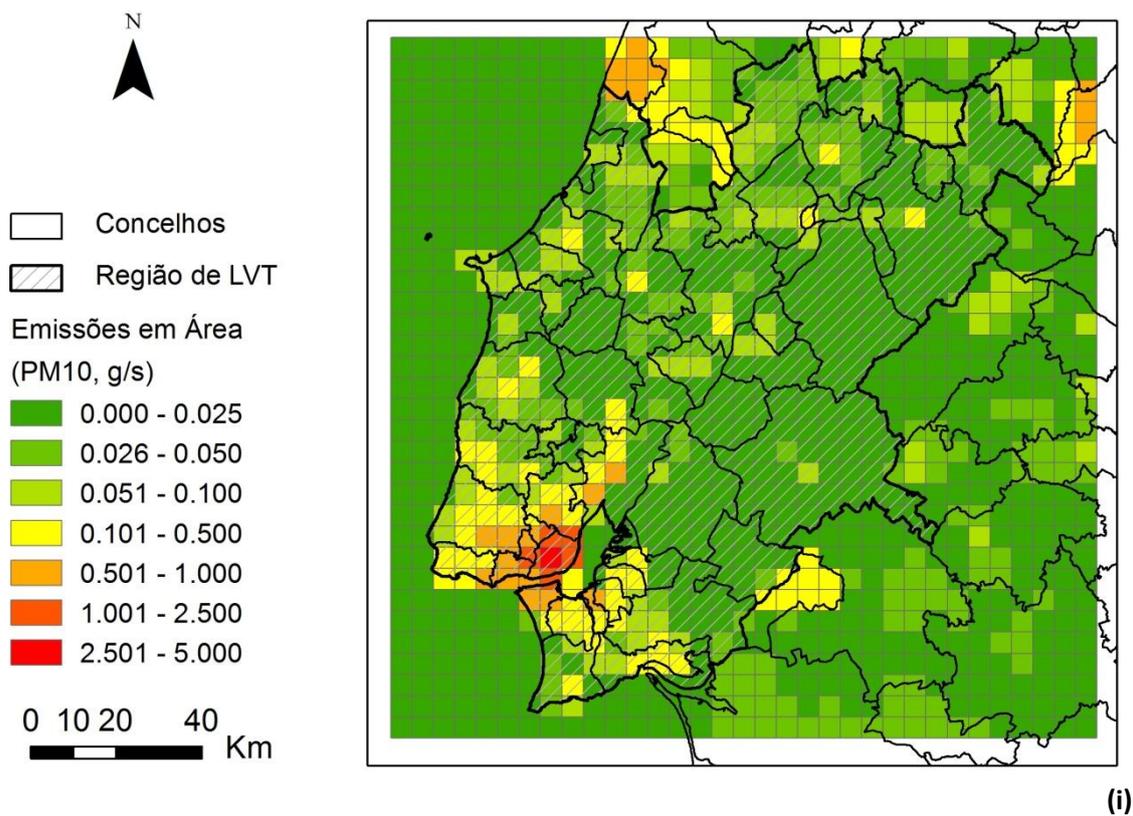
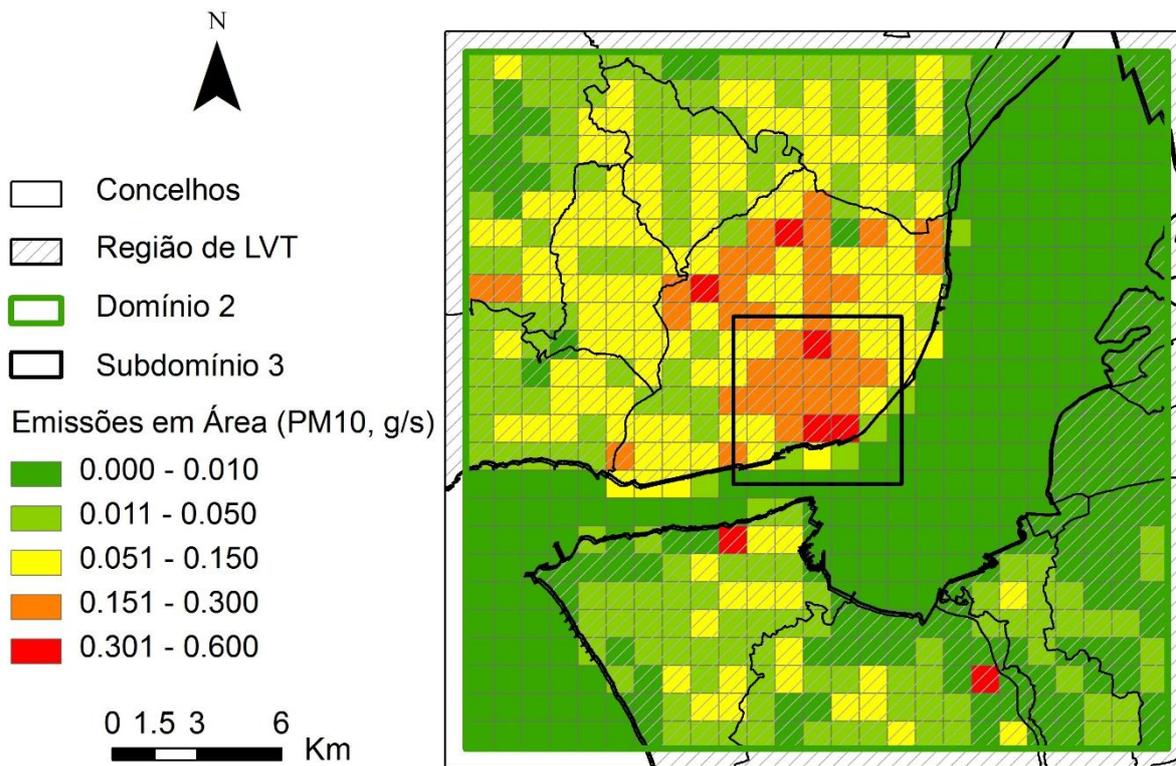
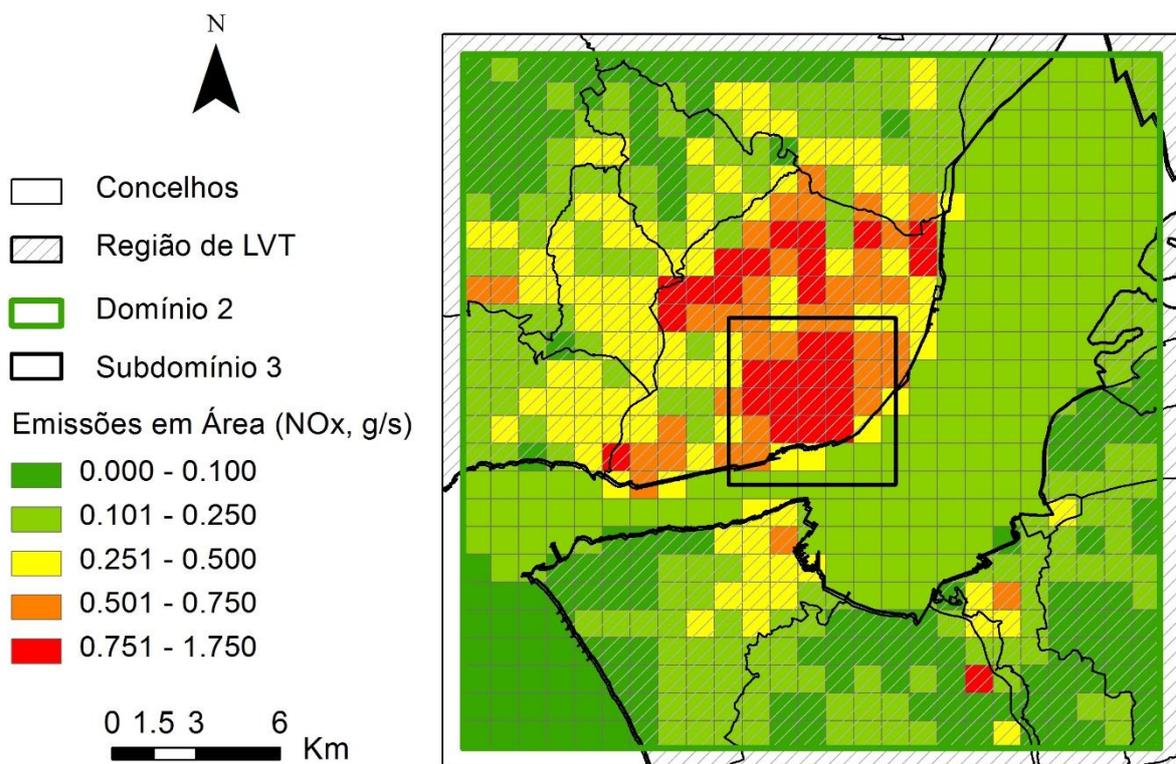


Figura 7. Emissões em área ($g \cdot s^{-1}$) de (i) PM₁₀ e (ii) NO_x consideradas no modelo de qualidade do ar em D1



(i)



(ii)

Figura 8. Emissões em área ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$) de (i) PM₁₀ e (ii) NO_x, consideradas no modelo de qualidade do ar no domínio D2 e subdomínio D3

A influência das restantes fontes emissoras provenientes dos concelhos limítrofes, externos ao domínio, foi também contemplada, tendo-se utilizado um ficheiro horário de forçamento da qualidade do ar de fundo. Os valores aqui usados foram calculados com base na média das concentrações horárias de cada um dos poluentes em estudo registadas em algumas das estações de qualidade do ar de fundo com dados disponíveis. A escolha das estações de fundo pertencente à rede de monitorização da qualidade do ar da RLVT incluiu como critério, para além da disponibilidade de dados, os resultados da análise de sensibilidade previamente executada com o modelo no domínio de estudo.

A Tabela 2 e a Figura 9 apresentam o enquadramento espacial das estações de qualidade do ar consideradas no estudo para cada um dos domínios (D1 e D2) e poluentes (NO_2 e PM_{10}) em estudo.

Tabela 2. Caracterização das estações de qualidade do ar usadas para definir os valores de fundo dos domínios em estudo (para cada domínio e poluentes em estudo são indicadas as estações usadas)

Nome da estação	Concelho	Tipologia	D1		D2	
			NO_2	PM_{10}	NO_2	PM_{10}
Chamusca	Chamusca	Rural de fundo	✓	✓	✓	✓
Fernando Pó	Palmela	Rural de fundo	✓	✓	-	-
Laranjeiro	Almada	Urbana de fundo	-	-	-	-
Lourinhã	Lourinhã	Rural de fundo	✓	✓	-	-
Olivais	Lisboa	Urbana fundo	-	-	✓	✓
Paio Pires	Seixal	Urbana fundo	-	-	-	-

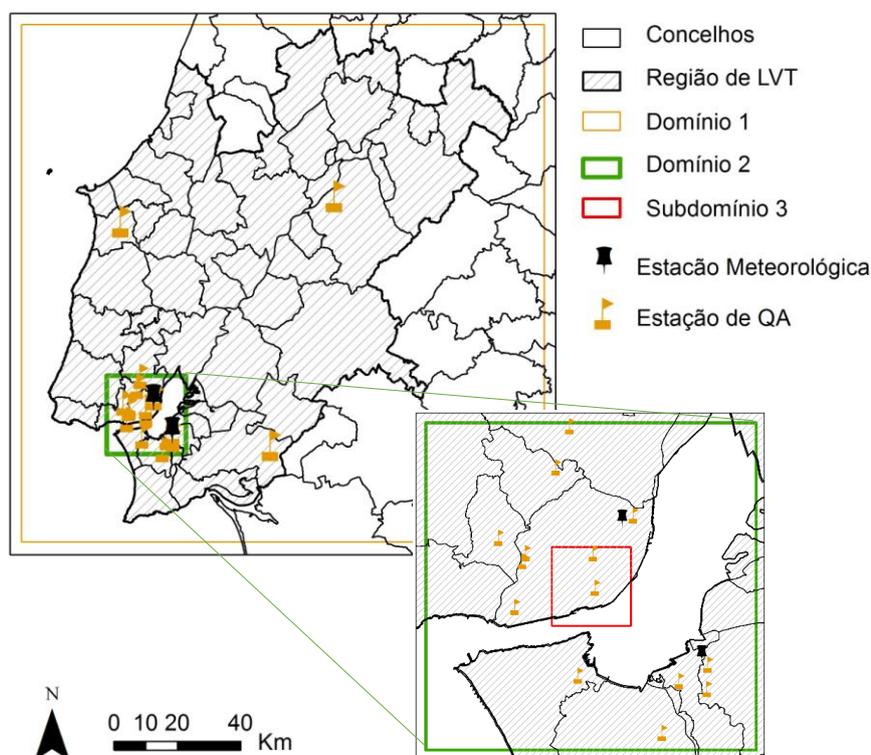


Figura 9. Localização das estações de qualidade do ar usadas no modelo de qualidade do ar nos domínios D1, D2 e subdomínio D3

2.5 Meteorologia - Identificação do ano meteorológico típico e desfavorável com recurso ao modelo TAPM

A meteorologia exerce um papel preponderante ao nível do transporte e dispersão de poluentes influenciando a qualidade do ar de uma determinada região de forma muito significativa. Por esta razão, o estudo da tendência de evolução da qualidade do ar numa determinada região não se pode apenas cingir à mera análise do histórico das concentrações registadas nas estações de qualidade do ar e a respetiva correlação com a estimativa da evolução das emissões dos poluentes em análise no domínio de estudo.

Esse papel assume maior importância quando se estão a avaliar políticas de gestão de qualidade do ar onde os cenários a implementar dependem de uma correta definição da situação referência, não só em termos de emissões, mas também em termos meteorológicos. Dada a importância da meteorologia na qualidade do ar, neste estudo desenvolveu-se uma metodologia para identificação do ano meteorológico típico e o ano meteorológico com condições de dispersão mais desfavoráveis.

Assim, foi feita uma primeira análise exploratória no que diz respeito à influência das condições meteorológicas observadas em anos passados na qualidade do ar.

Este trabalho foi efetuado através de simulações com o modelo TAPM (*The Air Pollution Model*) para uma série de 13 anos de forçamentos sinópticos, compreendidos entre 2003 e 2015, usando como entrada fontes emissoras constantes e unitárias (1 g.s^{-1}). Desta forma, pretendeu-se observar a variação da qualidade do ar resultante deste exercício onde a única variável foi o forçamento sinóptico de cada um dos anos em análise.

Para garantir a adequação da simulação mesometeorológica ao domínio de estudo, foi efetuada uma validação das corridas efetuadas de acordo com a metodologia *Fairmode* por recurso à ferramenta de validação *Delta Tools* (Thunis and Cuvelier, 2016).

Os resultados preliminares demonstram a existência de um sinal não desprezável associada à variabilidade inter-anual do forçamento sinóptico sobre as concentrações estimadas para o domínio.

Na sequência do trabalho anterior, optou-se por trabalhar o modo “*tracer* não reativo” para a identificação do ano meteorológico típico e desfavorável.

Deste modo, o tratamento de pós-processamento foi consideravelmente aprofundado, nomeadamente com vista a contornar dois aspetos principais:

- (i) A “normalidade” da distribuição das concentrações ao longo de cada ano;
- (ii) A existência de episódios mais ao menos frequentes, passíveis de tornar um ano “típico” em termos médios, absolutamente atípico em termos de frequência de ocorrência de episódios de concentrações elevadas.

Para a solução do ponto (i), pretendendo-se usar parâmetros do tipo “média da concentração no ano” e, após se verificar que nenhuma das distribuições de concentração dos treze anos seguiam distribuições normais, nem tão pouco apresentavam simetria, foram posteriormente testadas quanto à sua normalidade após aplicação de várias transformações (apresentando-se as mais promissoras nas Equação 1 à Equação 4).

$\log(\log(\textit{Concentração}))$	Equação 1
$\frac{1}{\sqrt{\textit{Concentração}}}$	Equação 2
$\frac{1}{\sqrt[3]{\textit{Concentração}}}$	Equação 3
$\frac{1}{\sqrt[4]{\textit{Concentração}}}$	Equação 4

As alterações produzidas pelas quatro transformações eliminaram valores aberrantes. No entanto, apesar de não terem produzido distribuições normais de concentração anual, verificou-se que a Equação 4 levou ao maior número de distribuições de concentração anual simétricas (5 em 13) e a um maior número de razões da estatística “coeficiente de assimetria /erro padrão” e “coeficiente de achatamento /erro padrão” mais próximo do intervalo considerado para a condição de normalidade da distribuição.

Entre todas as transformações, a Equação 1 produziu parâmetros anuais com tendência inversa à de diminuição que se observa nos dados de concentração, pelo que apesar de mostrar resultados razoáveis quanto à normalização, teve de ser eliminada.

A análise dos resultados obtidos levou à escolha da transformação da Equação 4, tendo esta sido aplicada às 13 séries de concentrações horárias (8760 h) para cada um dos anos em estudo, e os valores do parâmetro média anual de concentração que se apresentam foram obtidos pela transformação inversa aplicada aos parâmetros para distribuições transformadas. Na Figura 10 pode ser observada a evolução das concentrações normalizadas pela Equação 4 (2003 – 2015).

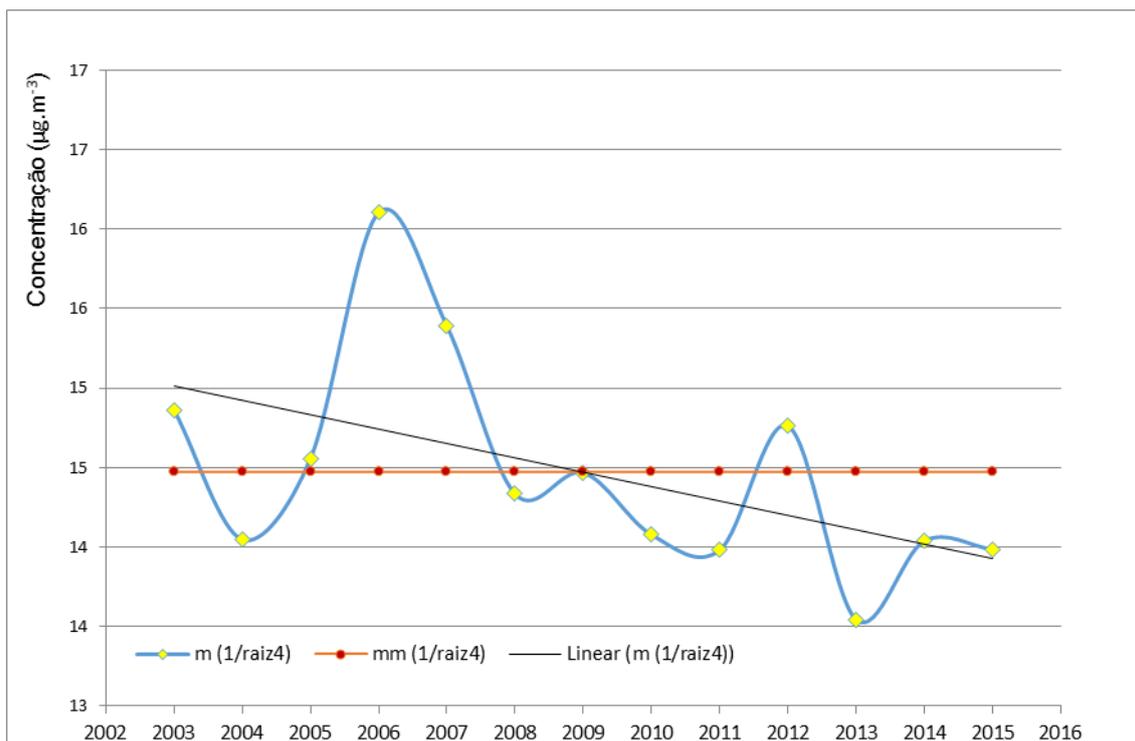


Figura 10. Evolução das concentrações normalizadas ao longo do tempo (2003 – 2015)

Da análise da Figura 10, é possível constatar que as diferenças de concentração do *tracero* variam cerca de 20% entre o ano mais favorável e o ano menos favorável, o que atesta bem a importância deste tipo de análise.

Por outro lado, é igualmente possível verificar que o ano que se aproxima mais da média (representado na figura por *mm (1/raiz4)*) é o ano 2009, sendo que o ano 2006 é, pelo contrário, o que mais se afasta desse mesmo valor médio. É notória ainda a tendência claramente decrescente dos valores médios anuais normalizados (representado na figura por “*linear (m(1/raiz4))*”), o que pode indicar que a atmosfera tem vindo a apresentar melhor capacidade dispersiva nos últimos anos.

Relativamente ao ponto (ii), foi feita uma análise de contagem do número de horas, para cada ano em análise, com concentrações superiores ou iguais à média mais dois desvios padrão, isto é, o número de concentrações horárias que ultrapassa os 97,5% das concentrações estimadas para cada ano. Esta análise visou a identificação de anos mais propícios ao desenvolvimento de episódios.

Na Figura 11, pode ser observada a evolução do número de horas com concentrações superiores ou iguais à média mais dois desvios padrão (2003 – 2015).

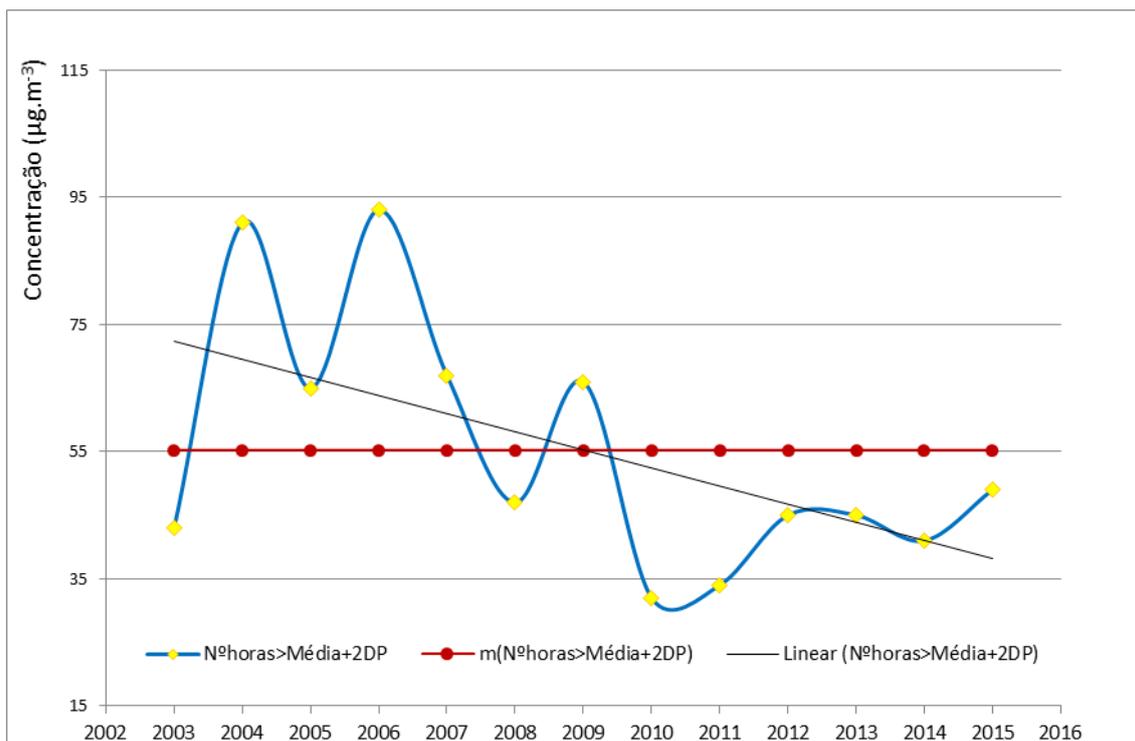


Figura 11. Evolução do número de horas com concentrações superiores ou iguais à média mais dois desvios padrão (2003 – 2015)

Os resultados demonstram haver anos muito próximos da média, mas que revelam agora uma instabilidade significativa em termos de propensão ao desenvolvimento de episódios. É o caso de 2004, outros, como 2009, que apresentam um propensão próxima da média ao desenvolvimento de episódios, e ainda outros, que já eram desfavoráveis em termos médios, e que mantêm essa tendência em termos do desenvolvimento de episódios, como é o caso de 2006.

Outro aspeto relevante, e que acompanha a série média, é a tendência clara para atenuação da propensão ao desenvolvimento de episódios ao longo de toda a série estudada.

Este tipo de análise permitiu a identificação de um ano típico, neste caso o ano 2009 (por ser o que apresenta menor diferença entre a concentração média anual e a média das médias anuais de 2003 a 2015), e o ano mais desfavorável. Para a situação de referência em D1, foi usado o ano típico, 2009. Na modelação da dispersão dos cenários de emissão (em D2), foi tomada a opção de usar apenas o forçamento meteorológico do ano desfavorável, o ano de 2006 (simultaneamente, ano com a maior diferença entre a concentração média anual de 2006 e a média das médias anuais de 2003 a 2015 e a maior diferença entre o número de horas com concentrações superiores ou iguais à média mais dois desvios padrão e a média desse valor nos anos observados).

2.6 Validação do modelo

Tal como referido anteriormente, avaliação da qualidade do ar está abrangida por diversos instrumentos legislativos específicos, sendo no presente estudo relevante o disposto no Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro. Neste diploma, no que concerne ao trabalho de modelação desenvolvido neste capítulo, são relevantes os objetivos de qualidade legalmente impostos (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo dos objetivos de qualidade para o processo de modelação para os poluentes em estudo

Referência	Parâmetro	Período	Valor de Incerteza
Decreto-Lei n.º 102/2010	NO ₂	Por hora	50%
		Médias anuais	30%
	PM ₁₀	Médias anuais	50%

Os resultados da modelação da dispersão atmosférica foram avaliados para a Situação de Referência para o ano de 2014 tendo em conta a metodologia definida no Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de setembro.

O modo de cálculo da Incerteza do modelo seguiu as indicações do guia interpretativo da Diretiva da Qualidade do Ar, transposto pelo Decreto-Lei n.º 102/2010, encontrando-se representado na Equação 5.

$$\text{Incerteza} = (O_{VL} - E_{VL}) / VL$$

Equação 5

Onde:

- VL – Valor Limite estipulado para o período de integração do poluente em estudo;
- O_{VL} – Valor observado mais próximo do Valor Limite;
- E_{VL} – Valor estimado no local de observação que corresponde à mesma posição no ranking (valores distribuídos do maior para o mais pequeno) do valor observado utilizado.

Sendo assim, o modelo foi avaliado com o forçamento sinóptico de 2014 e com as bases de dados de emissões igualmente para 2014. Os resultados foram depois comparados com algumas das estações de fundo presentes no domínio de estudo. Na Tabela 4 pode ser observado o resultado deste processo de validação para o domínio D1.

Tabela 4. Resultados do processo de validação do modelo de dispersão de poluentes para o domínio D1 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Parâmetros	PM ₁₀					NO ₂				
	LOR	FPO	CHA	OLI	LAR	LOR	FPO	CHA	OLI	LAR
Observado	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	35.6	39.3	28.0	40.0	40.0
Estimado	35.8	33.3	33.3	29.8	30.3	17.3	20.1	18.1	21.7	18.1
Anual (%)	10.4	16.7	16.7	25.5	24.2	46.0	48.1	24.9	45.6	54.8
Observado	-	-	-	-	-	41,8	42,0	28,0	166,1	163,4
Estimado	-	-	-	-	-	19.1	20.9	18.1	187.1	140.9
Horário (%)	-	-	-	-	-	11.4	10.5	5.0	-10.5	11.2

Legenda: Estações: LOR – Lourinhã; FPO – Fernão Pó; CHA – Chamusca; OLI – Olivais; LAR – Laranjeiro

Como pode ser observado, em termos genéricos, o modelo tem para D1 um comportamento dentro do que está legalmente estipulado, apresentando apenas dificuldades, em particular para a simulação dos valores médios anuais de NO₂ (incerteza <30%).

Para os restantes casos, o modelo apresenta um bom desempenho, tendo uma ligeira tendência para subestimar as concentrações observadas.

Na Tabela 5 pode ser observado o resultado deste processo de validação para o domínio D2.

Tabela 5. Resultados do processo de validação do modelo de dispersão de poluentes para o domínio D2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Parâmetros	PM ₁₀					NO ₂				
	OLI	LAR	PP	LOU	REST	OLI	LAR	PP	REST	OLI
Observado	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
Estimado	43.9	45.9	42.1	40.4	42.4	53.4	57.7	52.9	40.6	56.8
Anual (%)	-9.8	-14.9	-5.3	-1.2	-5.9	-33.6	-44.3	-32.3	-1.4	-42.0
Observado	-	-	-	-	-	166.1	163.4	111.0	112.5	112.4
Estimado	-	-	-	-	-	179.3	169.2	103.3	109.2	108.4
Horário (%)	-	-	-	-	-	-6.6	-2.9	3.8	1.6	2.0

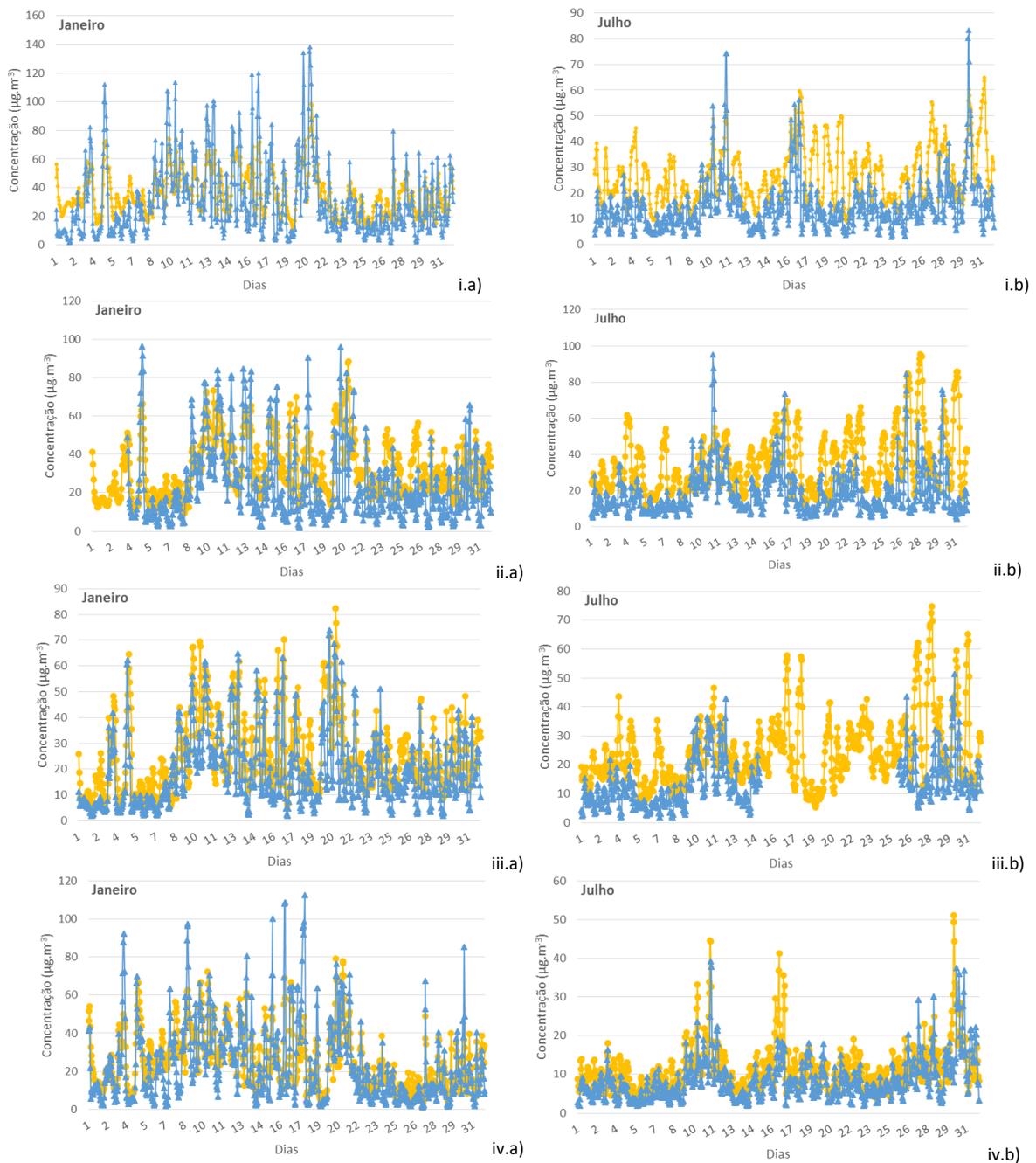
Legenda: Estações: OLI – Olivais; LAR – Laranjeiro; PP – Paio Pires; LOU – Loures; REST - Restelo

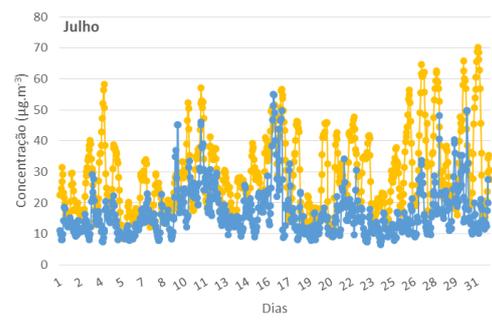
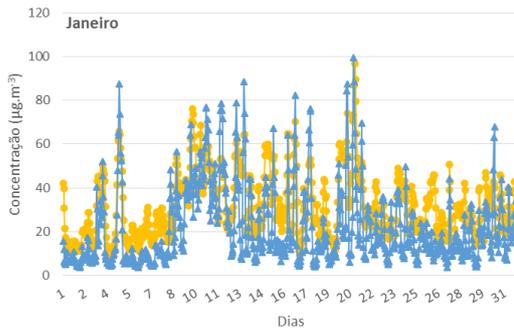
Como pode ser observado, em termos genéricos, o modelo tem um comportamento dentro do que está legalmente estipulado, quer para as partículas PM₁₀, quer para o NO₂. No entanto, ao contrário da estimativa para as partículas, o modelo apresenta algumas dificuldades na estimativa dos valores médios anuais de NO₂ (incerteza <30%). É no entanto de realçar, que o

modelo, tendencialmente, sobrestima os valores observados em base anual. Ainda relativamente a este poluente, na estimativa dos valores máximos horários, o modelo comporta-se de forma bastante assertiva, não havendo uma tendência clara para sobre ou subestimar os valores observados.

Para além desta validação face ao que está legalmente estipulado, foram feitos também alguns testes estatísticos habitualmente usados na validação deste tipo de aplicação.

Ainda antes da apresentação dos resultados quantitativos, foi feita uma representação da evolução horária dos valores simulados (Cs) e observados (Co) para uma análise qualitativa do comportamento do modelo (Figura 12 e



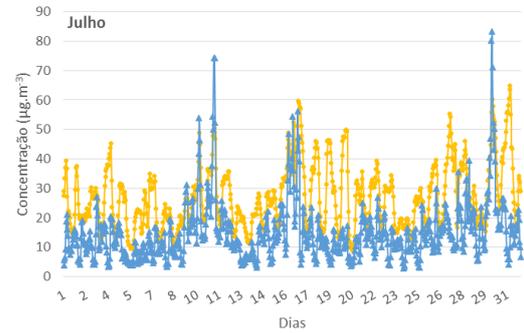
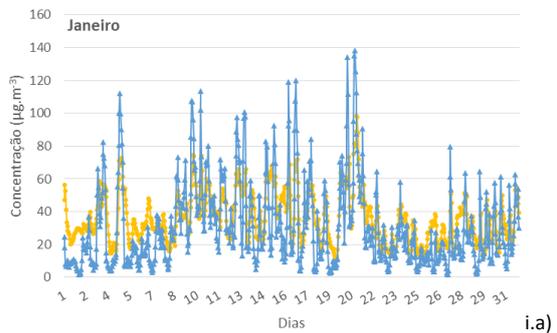


v.a)

v.b)

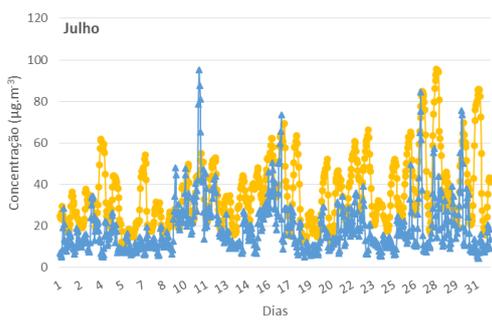
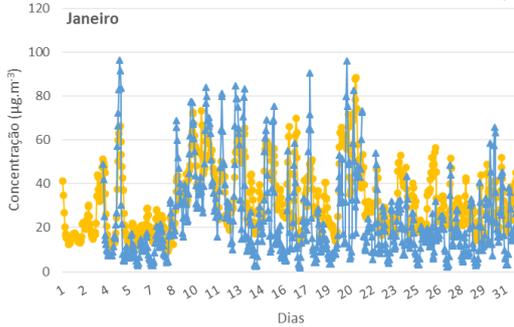
Figura 13). A apresentação é feita, a título indicativo, para cinco estações de fundo do domínio D2 e para dois meses, um de inverno (janeiro) e outro de verão (julho).

Como pode ser observado na Figura 12 e na



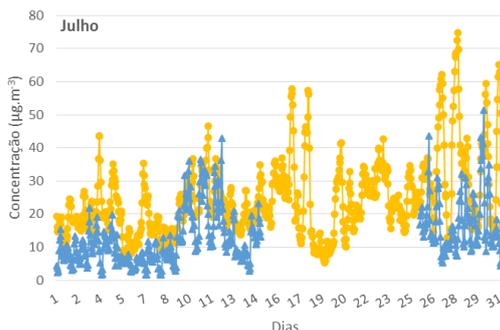
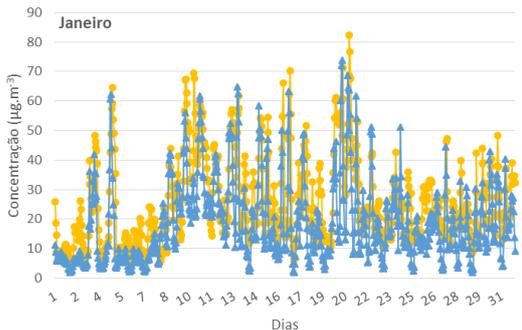
i.a)

i.b)



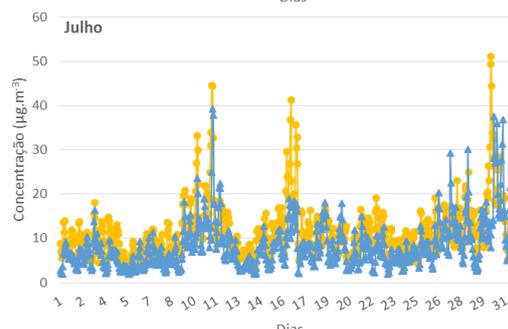
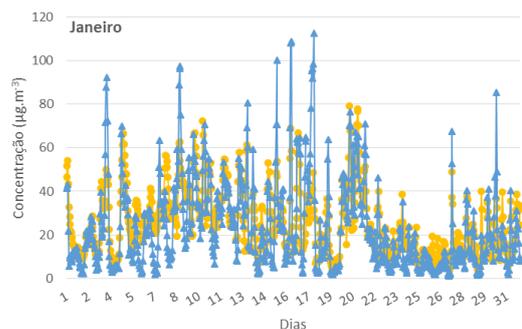
ii.a)

ii.b)



iii.a)

iii.b)



iv.a)

iv.b)

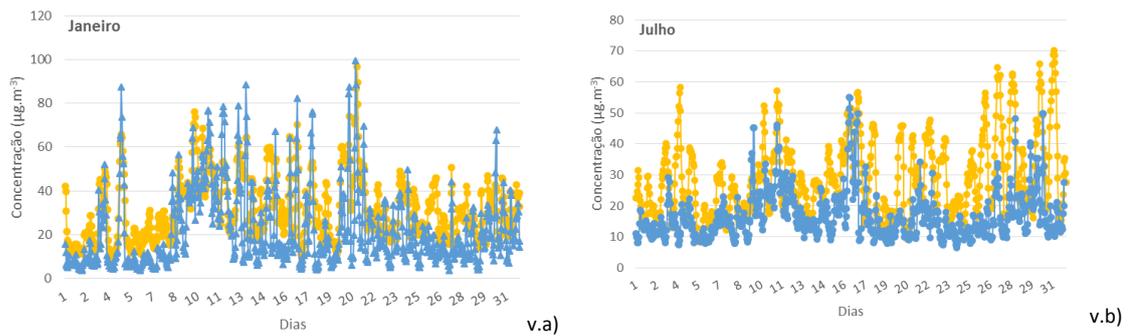


Figura 13, o modelo acompanha bastante bem o andamento dos valores observados, quer para partículas PM_{10} , quer para o NO_2 .

Na Figura 14 é possível observar uma representação por “scatter plot” dos valores medidos e estimados no domínio D2.

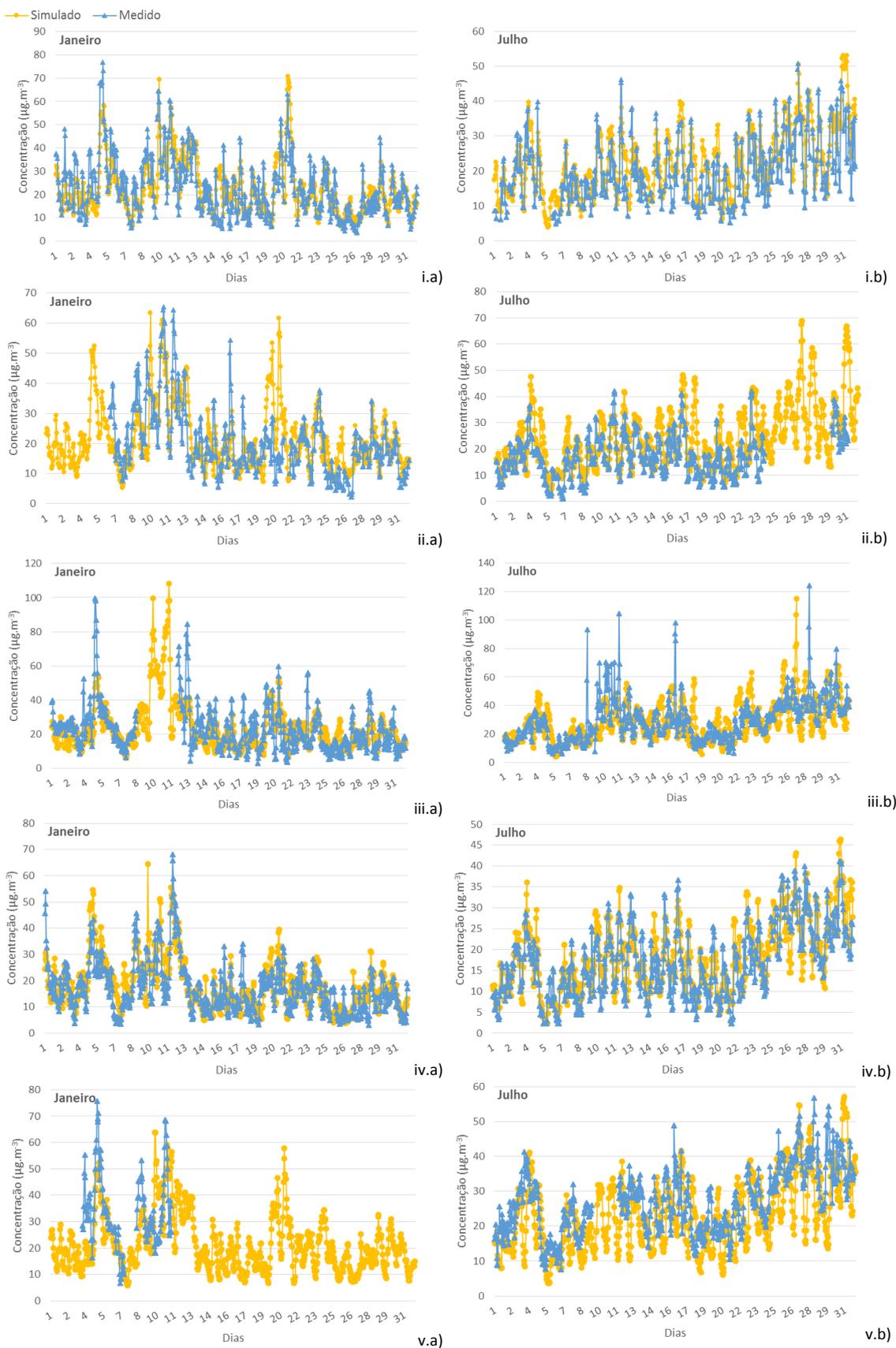


Figura 12. Comparação das concentrações médias horárias de PM₁₀, medidas e modeladas nas estações de Olivais (i), Laranjeiro (ii), Paio Pires (iii), Loures (iv) e Restelo (v). A comparação é apresentada para os meses de janeiro (a) e julho (b) de 2014

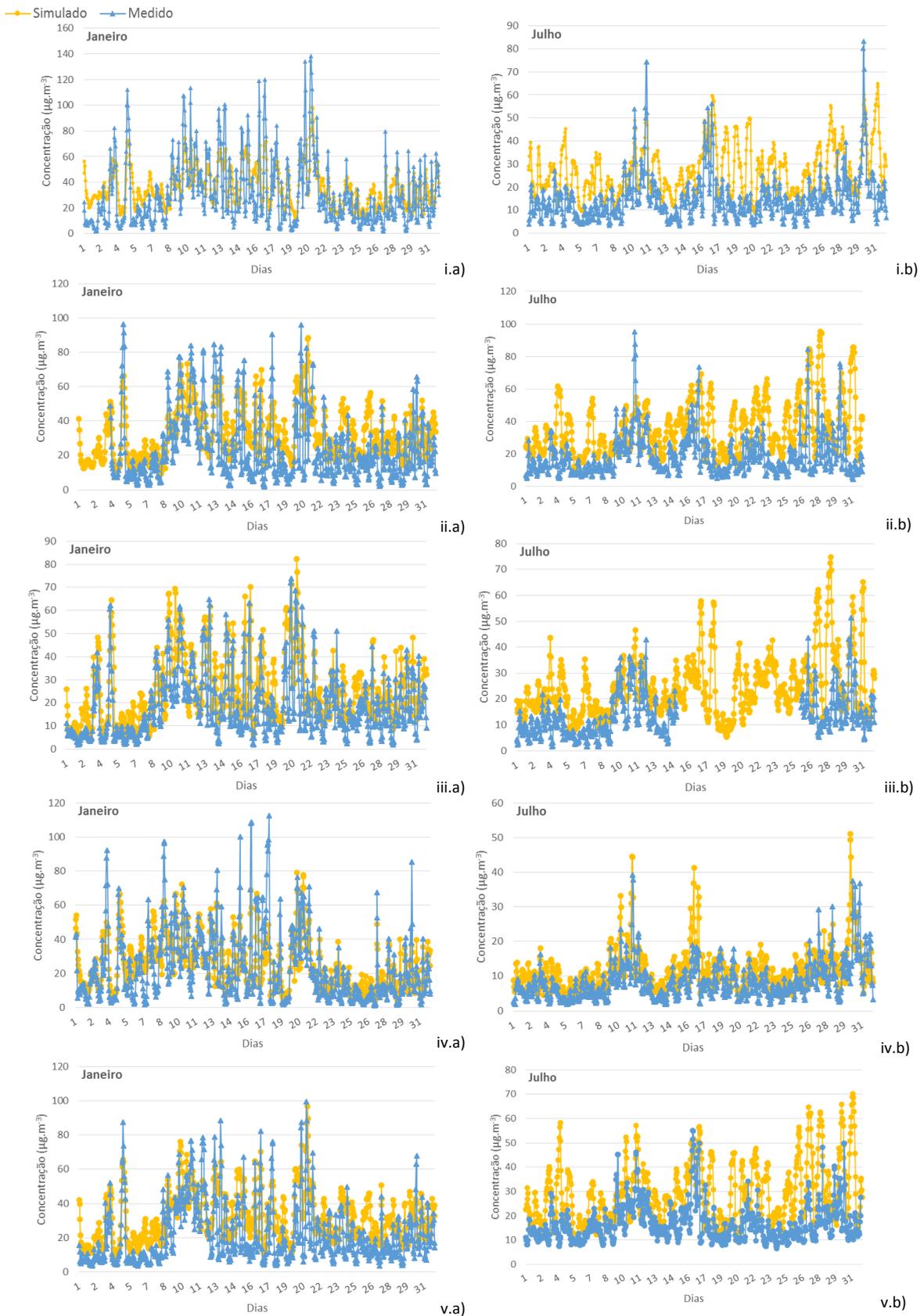


Figura 13. Comparação das concentrações médias horárias de NO₂, medidas e modeladas nas estações de Olivais (i), Laranjeiro (ii), Paio Pires (iii), Loures (iv) e Restelo (v). A comparação é apresentada para os meses de janeiro (a) e julho (b) de 2014

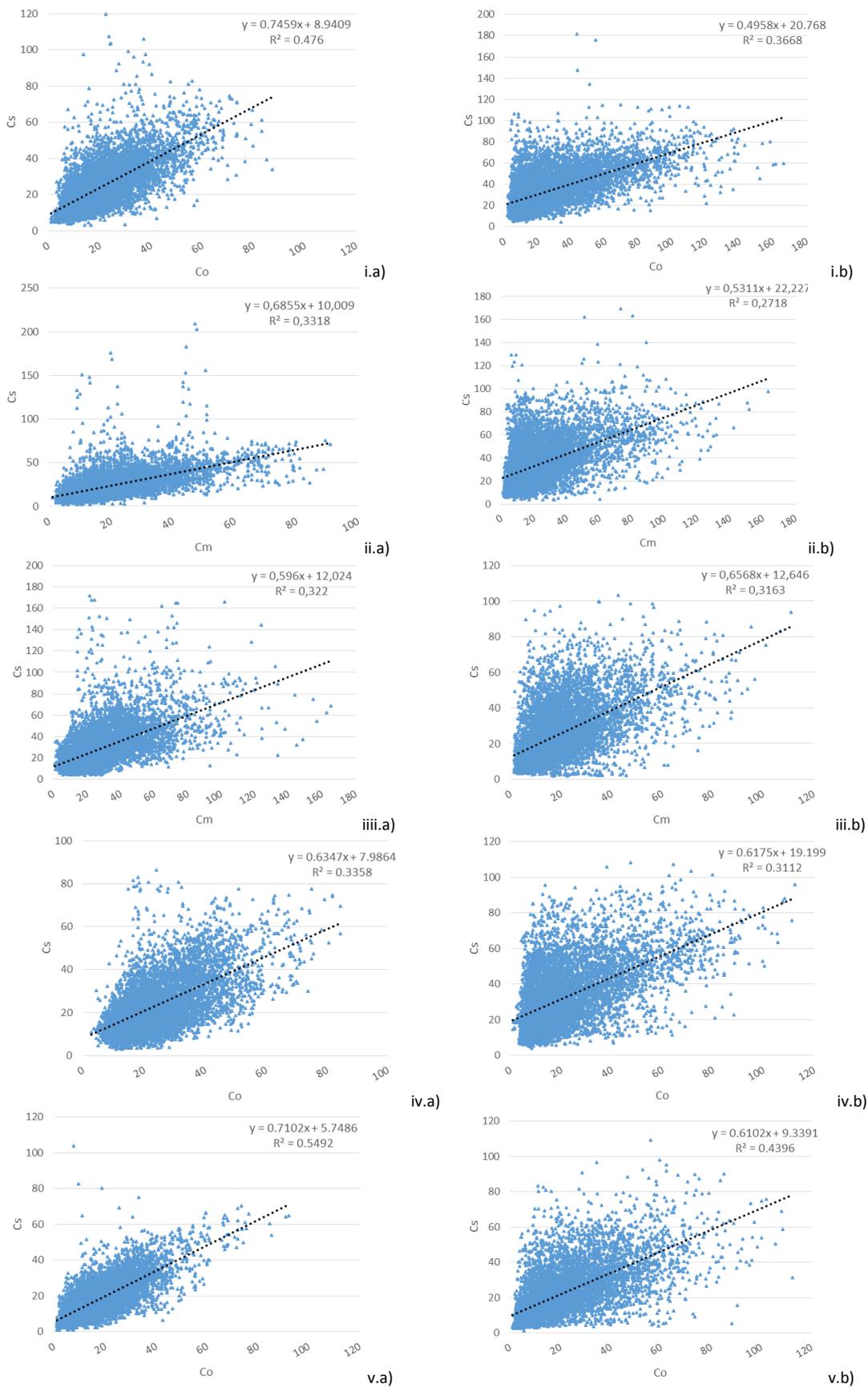


Figura 14. Razão entre as concentrações médias horárias de PM₁₀ (a) e NO₂ (b), medidas e simuladas nas estações de Olivais (i), Loures (iii) e Restelo (iii) para o ano de 2014

Como pode ser observado, o desempenho do modelo está dentro do esperado para este tipo de simulação, apresentando valores de R^2 mesmo acima do que é habitualmente encontrado neste tipo de aplicação a domínios de elevada complexidade, quer morfológica (topografia complexa, zona ribeirinha com formação de brisa e uso do solo muito heterogéneo), quer de padrão de emissões.

Na Tabela 6, apresenta-se a avaliação estatística das concentrações simuladas pelo modelo usando a ferramenta *Delta Tools* para o cálculo de diversos indicadores de desempenho: *MBIAS*, *r* e *IOA*.

Tabela 6. Avaliação estatística da qualidade do ar (PM₁₀ e NO₂) para o domínio D2 e ano 2014

Poluente/ Estação	Eficiência (%)	Concentrações médias			Desvio padrão	<i>MBIAS</i>	<i>r</i>	<i>IOA</i>	
		X _{Co}	X _{Cs}	X _(Co- Cs)	SD _{Co- SD_{Cs}}				
Valores ótimos		-	-	-	-	~0	1	>0,5	
PM₁₀	OLI	89.2%	20.4	24.2	-3.8	1.0	3.76	0.69	0.81
	LAR	94.8%	20.0	23.7	-3.7	2.3	3.71	0.58	0.73
	PP	92.4%	27.4	28.4	-1.0	0.9	0.95	0.57	0.74
	RES	75.3%	25.4	24.1	1.3	1.1	-1.29	0.58	0.75
	LOU	95.9%	17.6	18.3	-0.7	-0.4	0.64	0.74	0.86
NO₂	OLI	94.6%	26.0	33.6	-7.6	-4.0	7.67	0.61	0.74
	LAR	96.3%	22.5	34.2	-11.7	0.4	11.69	0.52	0.67
	PP	93.3%	17.9	24.4	-6.5	2.2	6.51	0.56	0.71
	RES	85.7%	21.5	32.5	-11.0	1.7	10.97	0.56	0.68
	LOU	93.8%	18.4	20.6	-2.2	-1.2	2.17	0.66	0.80

Pela análise da Tabela 6 é possível constatar que os indicadores calculados demonstram, em conformidade com os resultados anteriores, que o modelo representa bem o domínio em análise. É no entanto notória uma dificuldade acrescida para a representação do NO₂ comparativamente às partículas PM₁₀.

2.7 Aspectos gerais de apresentação dos resultados

Da aplicação do TAPM resultam ficheiros de valores de concentração dos diferentes poluentes em análise estimados, tendo em conta as emissões consideradas no estudo, o valor de fundo da qualidade do ar, as condições meteorológicas, topográficas e de uso do solo locais. As concentrações são apresentadas para a malha de recetores considerada no estudo. Por “recetores” entendem-se pontos representativos de áreas unitárias, que constituem a grelha que cobre o domínio de estudo. A partir dos valores estimados foram efetuados mapas de distribuição de valores de concentração.

Os mapas de distribuição de longo termo (média anual) referem-se aos valores médios estimados para cada área, para o ano em análise.

Os mapas de distribuição de curto termo, médias horárias ou diárias, referem-se ao valor máximo estimado no ano em estudo para o recetor (área) em análise. O mapa apresentado neste caso é representativo de uma compilação de vários períodos temporais nos quais se registaram valores elevados em determinado local. Trata-se, desta forma, de um cenário máximo criado apenas para avaliação dos máximos registados em cada área.

A distribuição dos valores nestes mapas pode ser referente a períodos temporais distintos, durante os quais, em determinadas áreas (ou recetores), e com determinadas condições meteorológicas, ocorreram os valores máximos horários. A análise efetuada tem sempre de ter este facto em consideração, não podendo esta forma de apresentação ser diretamente comparável a valores limite ou de referência. Apesar disso, sempre que possível, nas escalas gráficas dos mapas de distribuição dos valores máximos são inseridos os valores limite da legislação, de forma a integrar os valores estimados face a valores de referência.

Os mapas exprimem, para cada um dos recetores, a concentração máxima estimada pelo modelo independentemente do dia ou da hora do ano em estudo. Esta é uma perspetiva virtual onde se condensam todas as piores situações, recetor a recetor, numa imagem única, resultando numa espécie de “fotografia” dos piores casos, ponto a ponto, como se tivessem ocorrido todos em simultâneo.

No caso de poluição atmosférica, o pior cenário poderá ser a conjugação de um período (horário ou diário) ou vários períodos onde simultaneamente teriam ocorrido valores elevados de vários poluentes. Esta análise é de elevada complexidade, dada a infinidade de variáveis em análise, pelo que está convencionada a apresentação gráfica dos valores máximos, em períodos temporais distintos, tal como é efetuado neste estudo.

A comparação entre as concentrações máximas estimadas pelo modelo de simulação e os valores de referência ou legalmente aplicáveis é efetuada em forma de tabela (apresentada após os mapas de distribuição de valores). Chama-se a atenção para o facto de os valores presentes nestas tabelas corresponderem aos valores máximos estimados (VE) para cada poluente em análise, dentro do universo de todos os recetores (áreas) e para as 8760 horas simuladas (um ano completo).

Ao comparar os resultados das simulações com a legislação portuguesa em vigor ou com valores de referência internacionais é possível verificar, se em algum recetor (área), se prevê que haja ultrapassagem do limite legal para a qualidade do ar.

A caracterização da qualidade do ar é efetuada, com base nas medições de poluentes efetuadas nas estações da rede de monitorização da qualidade do ar existentes na envolvente mais próxima e com recurso à modelação da dispersão atmosférica de poluentes, aplicada ao domínio de estudo. A modelação entra em linha de conta com as emissões representativas da situação de referência. Na modelação foi usado um valor de fundo horário para cada poluente em análise. Este valor de fundo horário, como referido anteriormente, foi calculado tendo em

conta os valores observados em algumas estações de fundo existentes no domínio de estudo e que foram consideradas representativas (ver secção 2.4.).

3 Resultados da modelação da situação de referência

O estudo efetuado consistiu na simulação por modelação numérica da dispersão das emissões de NO₂ e PM₁₀ observadas na Região de Lisboa e Vale do Tejo.

A modelação da dispersão atmosférica foi efetuada para a Situação de Referência de emissões (2014). Esta avaliação foi realizada em três etapas distintas:

- Primeiro avaliou-se a dispersão dos poluentes em toda a região em estudo, Lisboa e Vale do Tejo;
- Numa segunda fase, e como consequência da primeira, estudou-se essa dispersão focando a análise na Área Metropolitana de Lisboa (AML);
- Por último, a modelação centrou-se numa área correspondente à Zona 2 da Zona de Emissões Reduzidas (ZER).

Cada uma das avaliações foi realizada para um ano meteorológico desfavorável em termos da dispersão de poluentes (2006), de acordo com uma análise prévia efetuada que permitiu identificar este ano como o representativo desta situação no domínio em análise (ver ponto 2.5).

3.1 Partículas em Suspensão PM₁₀

A Figura 15 representa os mapas de distribuição das concentrações médias anuais de PM₁₀ obtidas para a região de Lisboa e Vale do Tejo (domínio D1). Os valores foram estimados para a situação de referência ao nível de emissões (ano de 2014) e para uma situação meteorológica desfavorável (ano de 2006).

Os resultados obtidos indicam que os principais focos de concentrações deste poluente se localizam na AML, em particular, na margem Sul (Figura 15).

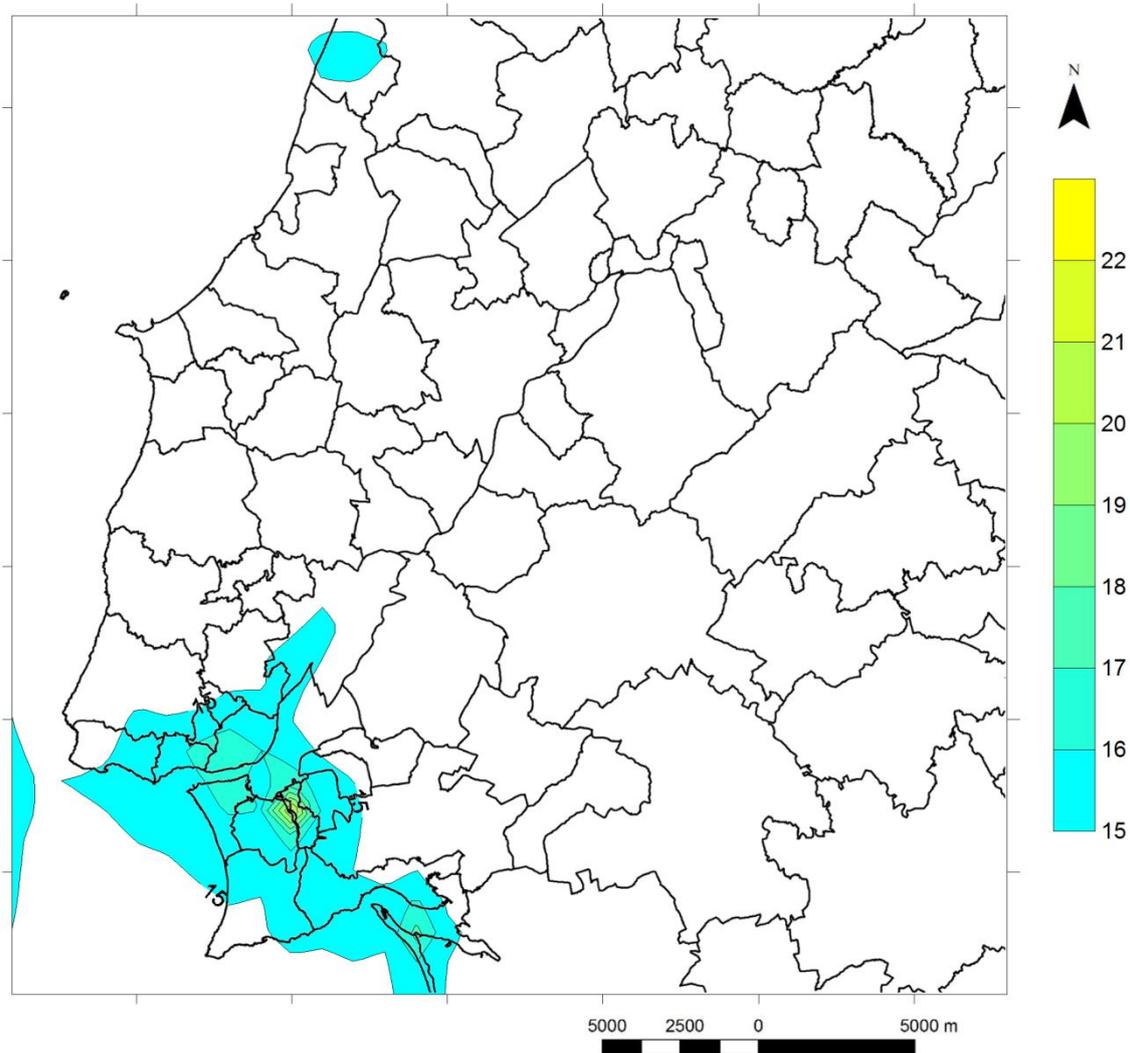


Figura 15. Concentrações médias anuais de PM₁₀ (µg.m⁻³) observadas na região de Lisboa e Vale do Tejo (domínio D1) (cálculos efetuados para a situação de referência de emissões (2014) e para um ano meteorológico desfavorável (2006))

Uma análise detalhada da Área Metropolitana de Lisboa (D2) permite identificar dois pontos críticos: um localizado no concelho de Lisboa e outro na margem sul do Tejo, associado a uma instalação industrial do subsector da indústria metalúrgica (Figura 16).

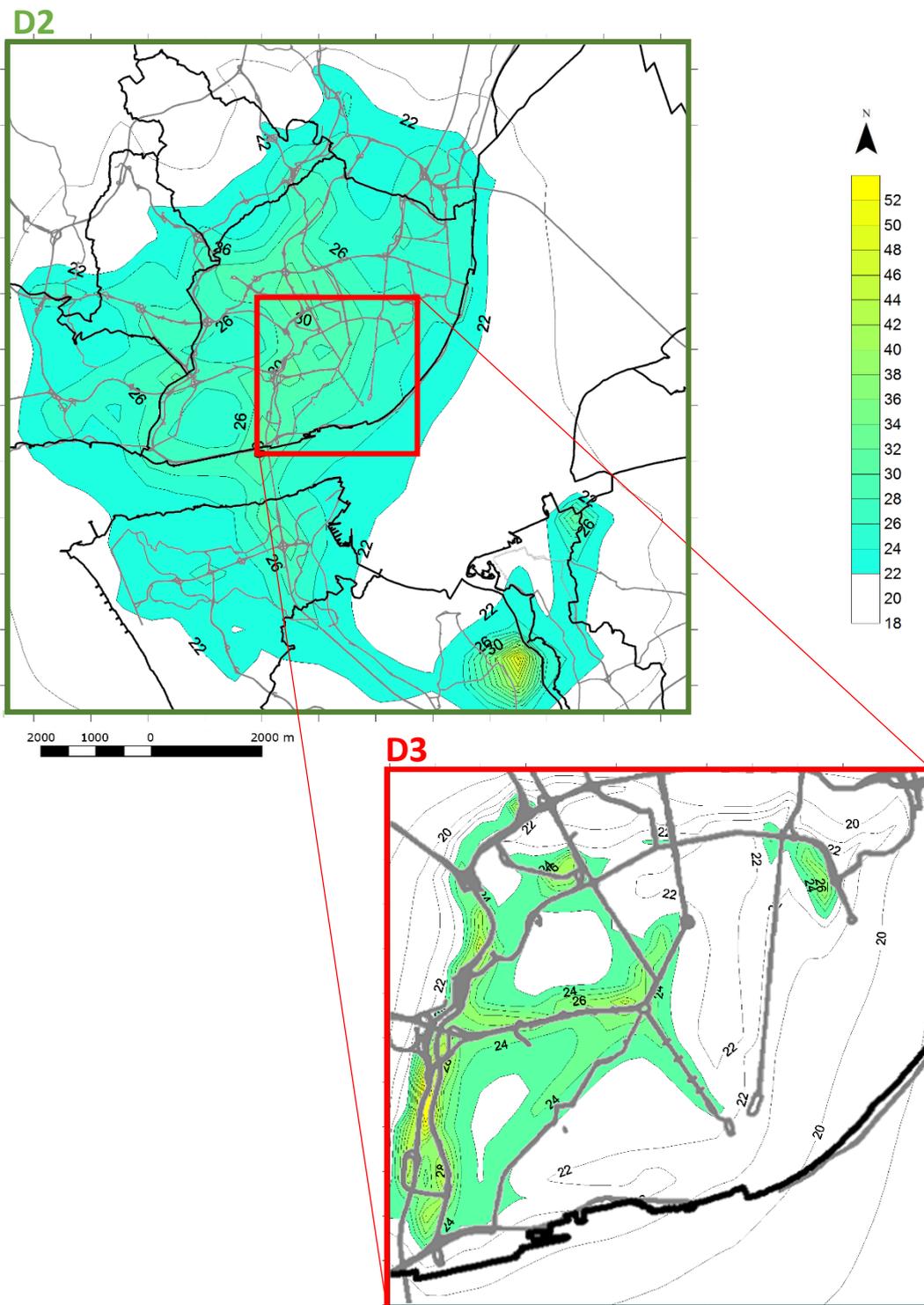


Figura 16. Concentrações médias anuais de PM₁₀ (µg.m⁻³) registadas na região de Lisboa (domínio D2 e subdomínio D3) para a situação de referência (2014) e para um ano meteorológico desfavorável (2006)

Na Tabela 7 apresentam-se os resultados da modelação de PM₁₀ para as células onde se encontram as estações de monitorização e comparação com os resultados das mesmas para os domínios D2 e D3 com os resultados das estações no ano 2014.

Tabela 7. Resultados da modelação de PM₁₀ (meteorologia e emissões de 2014) para as células onde se encontram as estações de monitorização para o domínio D2/D3 e comparação com os resultados das estações no ano 2014

Poluente/ Estação	Domínio	Eficiência (%)	Média anual			36ª máximo diário			Nº excedências ao valor limite diário	
			Medido ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Simulado ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Erro (%)	Medido ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Simulado ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Erro (%)	Medido	Simulado
Olivais	D2	92	20	23	15	32	37	16	2	5
Laranjeiro	D2	95	20	24	20	34	38	12	6	6
Paio Pires	D2	93	27	29	7	49	49	0	29	32
Restelo	D2	73	25	24	-4	37	38	3	4	4
Loures	D2	96	18	18	0	29	29	0	2	2
Avenida da Liberdade	D2	98	30	27	-10	49	41	-16	31	10
	D3			25	-17		37	-24		7
Entrecampos	D2	95	23	28	22	35	43	23	7	13
	D3			20	-13		31	-11		3

3.2 Dióxido de azoto

A Figura 17 apresenta o mapa de distribuição de valores médios anuais de concentração de NO₂ e a Figura 18 o mapa de distribuição de valores máximos horários de concentração de NO₂ para a região de Lisboa e Vale do Tejo (domínio D1). Para ambas as situações (horária e anual), é apresentada a distribuição para a situação de referência das emissões (2014) para um ano meteorológico típico.

Como pode ser observado nestas figuras (Figura 17 e Figura 18), as concentrações máximas registam-se sobre a região da Área Metropolitana de Lisboa.

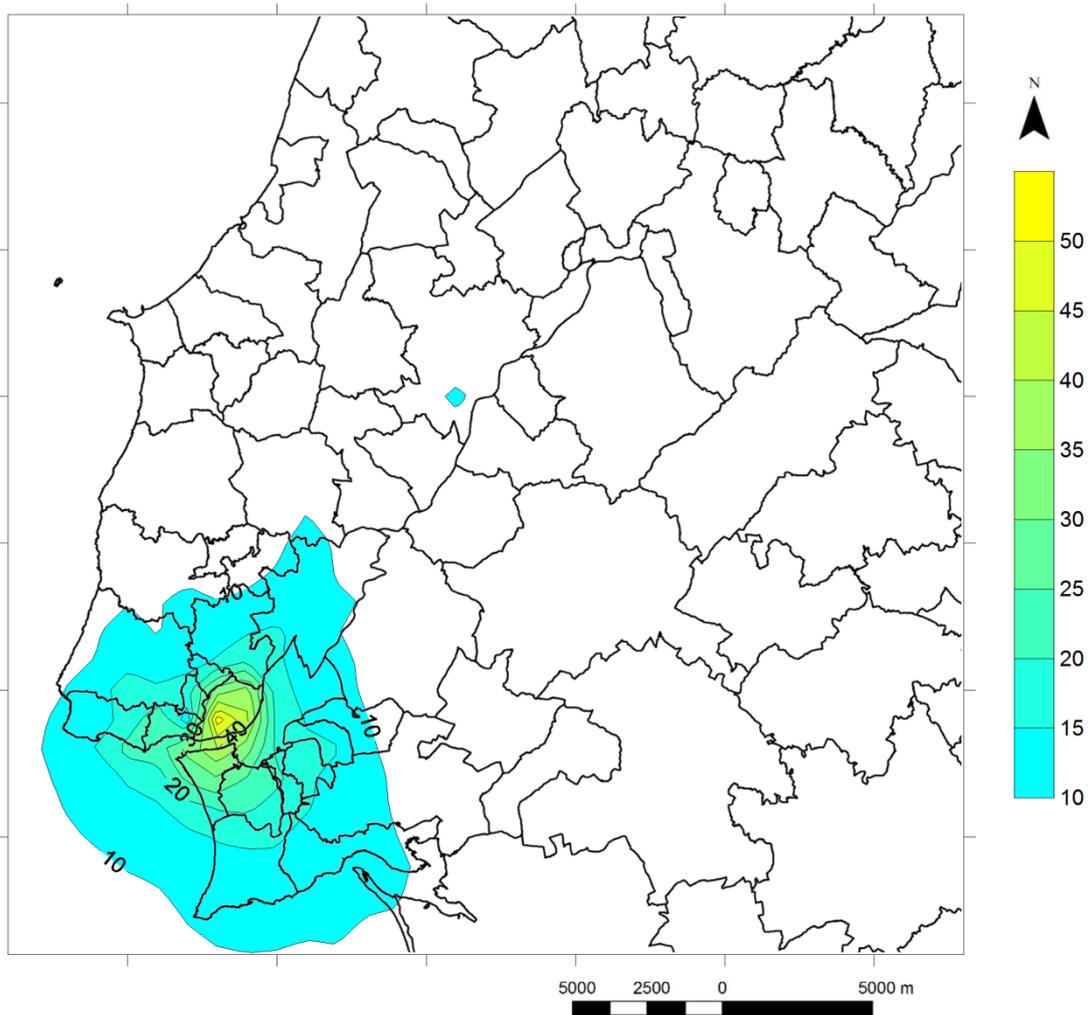


Figura 17. Concentrações médias anuais de NO₂ (µg.m⁻³) observadas na região de Lisboa e Vale do Tejo (domínio D1). Os valores foram calculados para a situação de referência de emissões (ano de 2014) e para um ano meteorológico típico (2009)

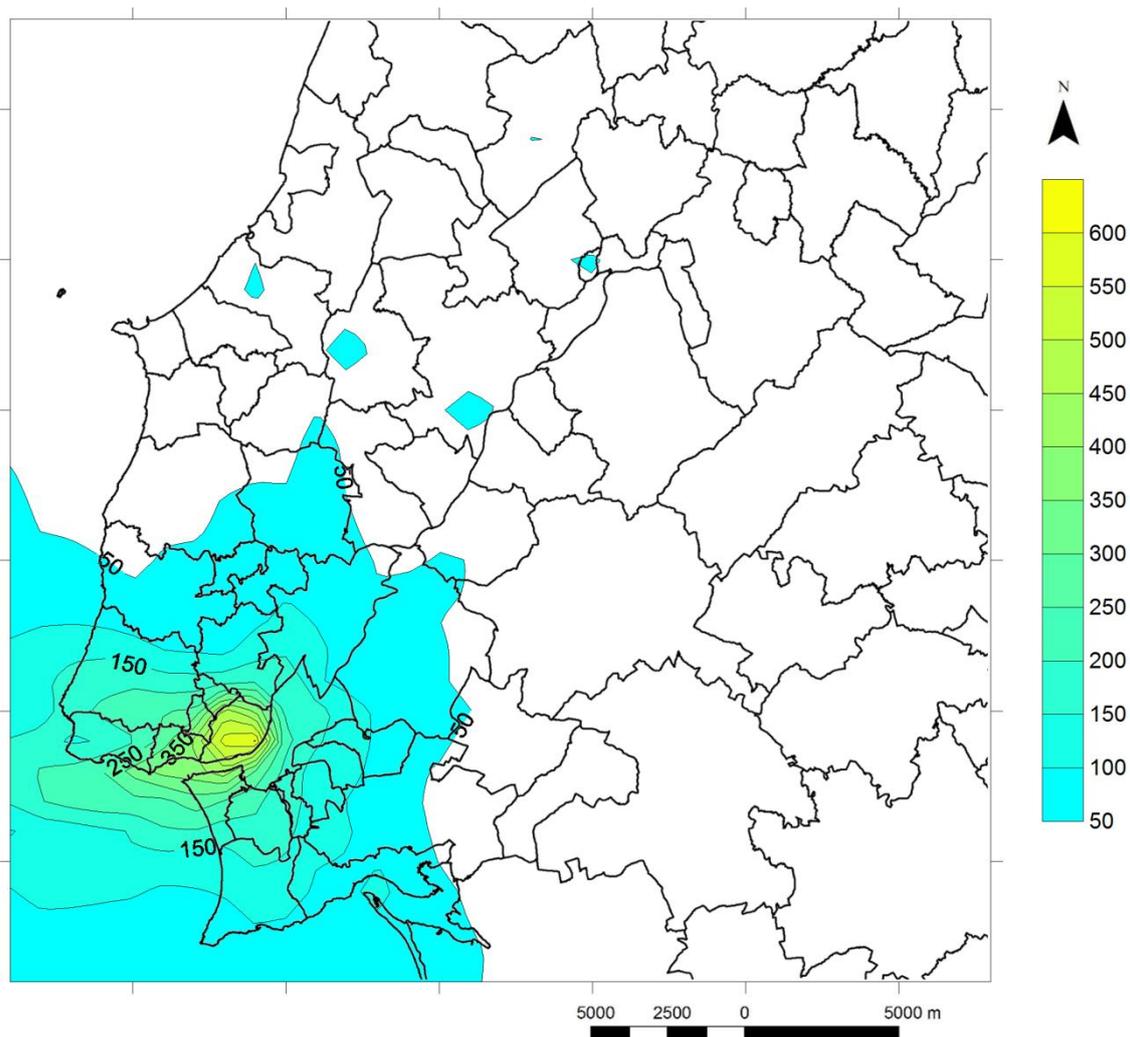


Figura 18. Concentrações máximas horárias de NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) observadas na região de Lisboa e Vale do Tejo (domínio D1). Os valores foram calculados para a situação de referência de emissões (ano de 2014) e para um ano meteorológico típico (2009)

Uma análise mais detalhada da distribuição das concentrações de NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) pode ser observada na Figura 19 e Figura 20. A primeira figura apresenta as concentrações médias anuais, enquanto a segunda as concentrações máximas horárias para a AML (domínio D2). A análise destas figuras permite identificar que os principais pontos críticos se encontram situados sobre as principais linhas de tráfego da cidade de Lisboa e na margem sul.

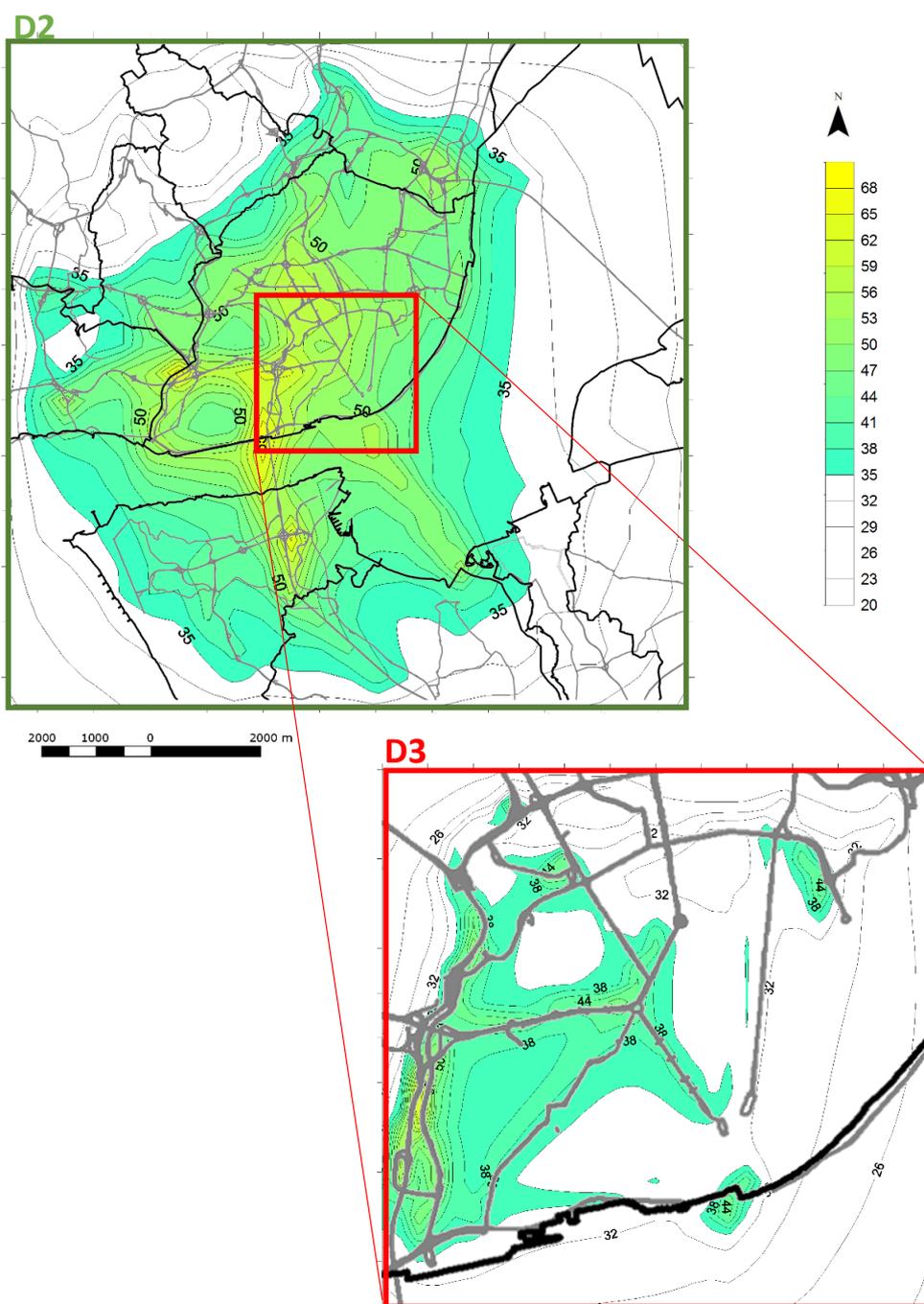


Figura 19. Concentrações médias anuais de NO₂ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) registadas na AML (domínio D2 e subdomínio D3) para a situação de referência de emissões (ano de 2014) e para um ano meteorológico desfavorável (2006)

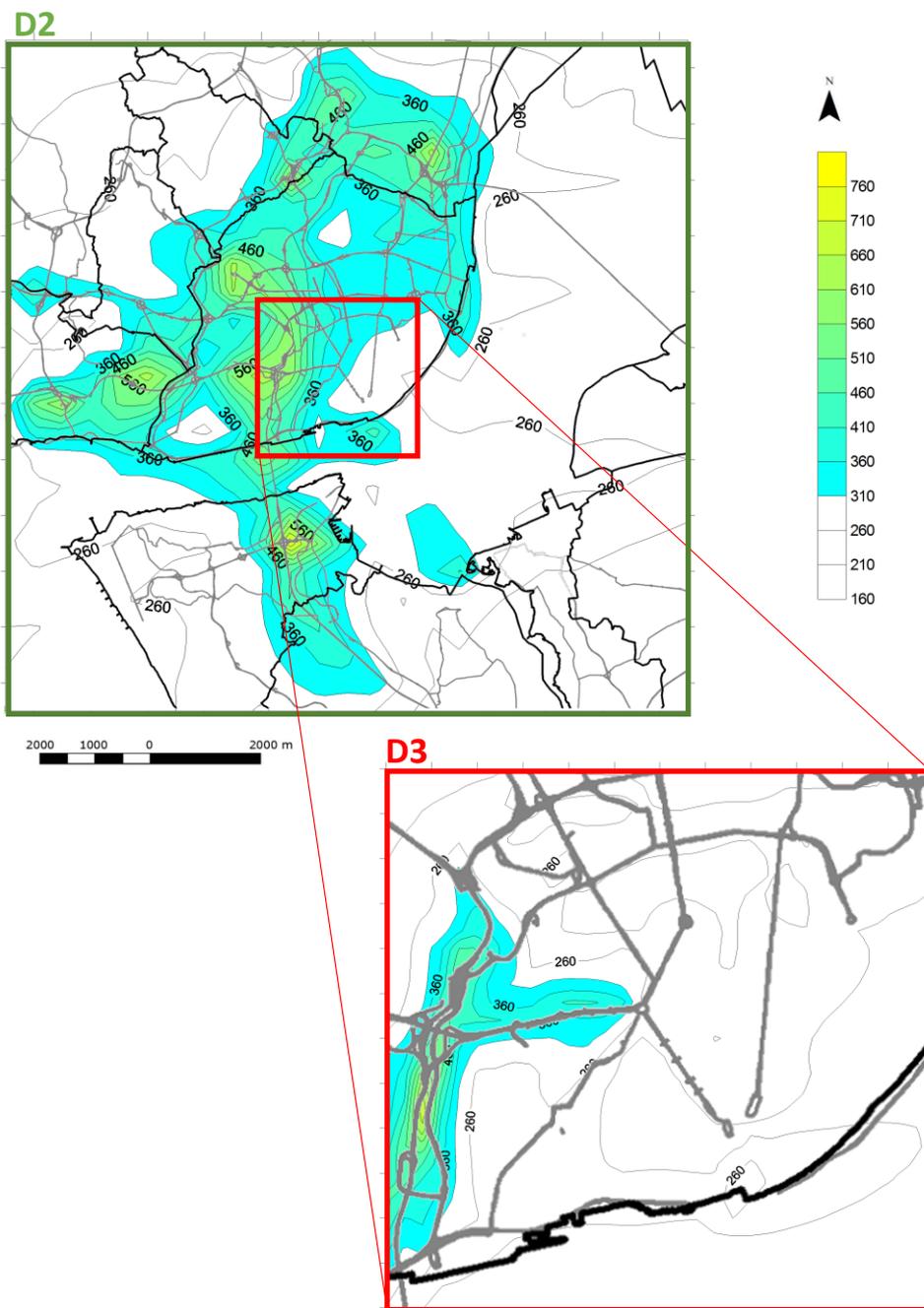


Figura 20. Concentrações máximas horárias de NO₂ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) registadas na AML (domínio D2 e subdomínio D3) para a situação de referência 2014) e para um ano meteorológico desfavorável (2006)

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados da modelação de NO₂ para as células onde se encontram as estações de monitorização e comparação com os resultados das mesmas para o domínio D2/D3 com os resultados das estações no ano 2014.

Tabela 8. Resultados da modelação de NO₂ (meteorologia e emissões de 2014) para as células onde se encontram as estações de monitorização no domínio D2/D3 e comparação com os resultados das estações no ano 2014

Poluente/ Estação	Domínio	Eficiência (%)	Média anual			19º máximo horário			Nº excedências ao valor limite horário	
			Medido (µg.m ⁻³)	Simulado (µg.m ⁻³)	Erro (%)	Medido (µg.m ⁻³)	Simulado (µg.m ⁻³)	Erro (%)	Medido	Simulado
Olivais	D2	95	26	33	27	135	104	-23	0	0
Laranjeiro	D2	96	22	34	55	119	108	-9	0	0
Paio Pires	D2	93	18	25	39	85	87	2	0	0
Restelo	D2	86	22	32	45	91	94	3	0	0
Loures	D2	94	18	20	11	91	82	-10	0	0
Beato	D2	98	20	33	65	96	102	6	0	0
	D3	98	20	27	35	96	148	54	0	0
Santa Cruz de Benfica	D2	55	34	32	-6	120	100	-17	0	0
Avenida da Liberdade	D3	97	53	40	-25	205	196	-4	20	14
	D2			36	-32	205	103	-50	20	0
Entrecampos	D2	100	37	36	-3	148	106	-28	2	0
	D3			26	-30	148	147	-1	2	0

4 Resultados obtidos relativos à repartição de fontes de NO₂ e PM₁₀

O presente capítulo diz respeito à simulação por modelação numérica da dispersão das emissões de NO₂ e PM₁₀ observadas na Região de Lisboa e Vale do Tejo. A modelação da dispersão atmosférica foi efetuada para a situação de referência, previamente definida para o ano de 2014, e no sentido de perceber a importância relativa de cada uma das principais fontes emissoras, com base nas emissões de referência, o modelo foi aplicado de forma sequencial, para cinco cenários, onde as fontes indicadas foram suprimidas:

- Sem Fontes pontuais;
- Sem Fontes aéreas (aeroportos);
- Sem Fontes fluviais;
- Sem Fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2);
- Sem Todas as restantes emissões não incluídas nas alíneas anteriormente.

4.1 Partículas em Suspensão (PM₁₀)

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**¹ é possível observar o impacto das emissões dos sectores anteriormente referidos (a) principais fontes pontuais; b) fontes aéreas (aeroportos); c) fontes fluviais; d) principais fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2); d) todas as restantes emissões não incluídas nas alíneas anteriormente), na qualidade do ar do domínio D2.

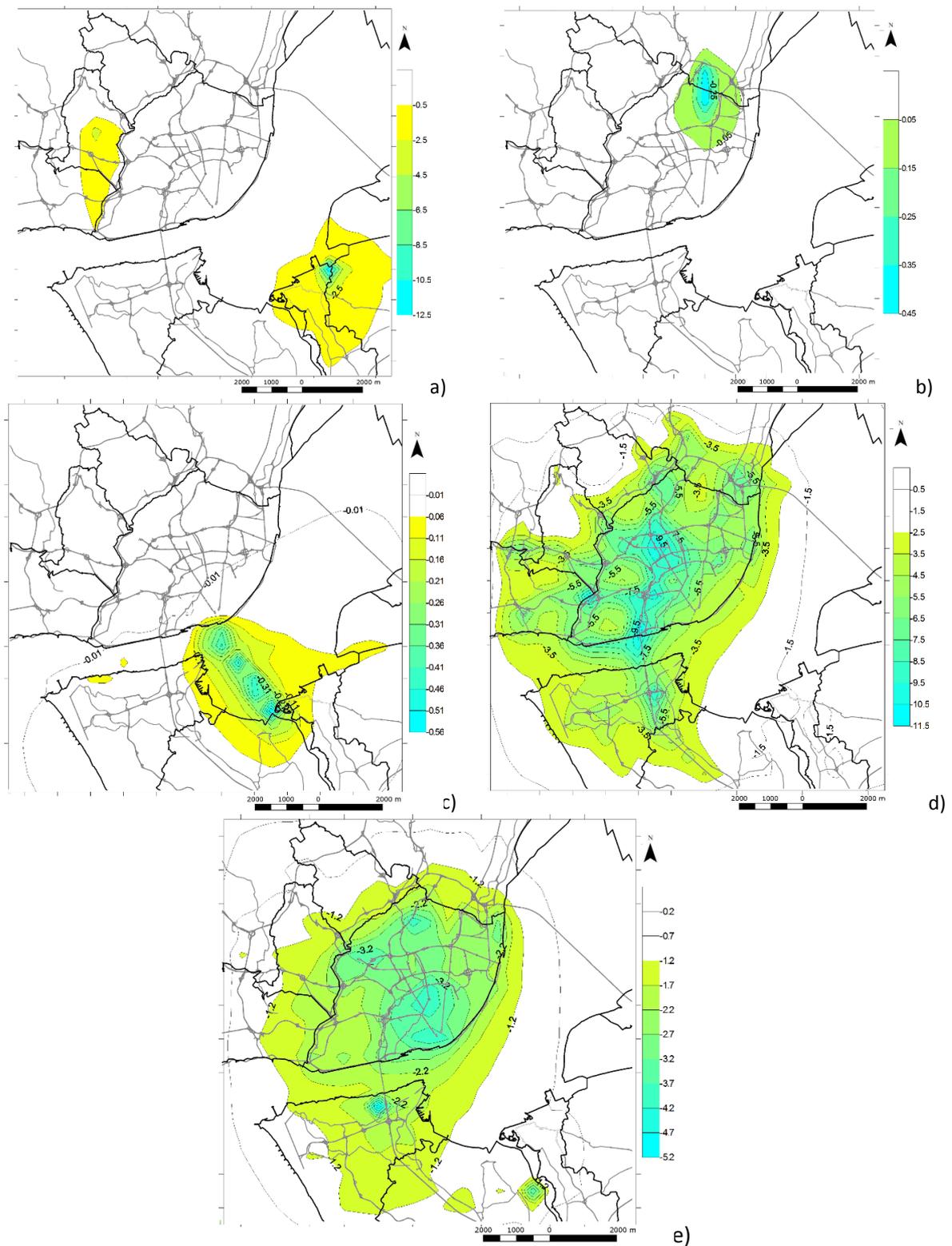


Figura 21. Diferença para as concentrações médias anuais de PM_{10} ($\mu g \cdot m^{-3}$) entre a referência e considerando a ausência das emissões de: a) principais fontes pontuais; b) fontes aéreas (aeroportos); c) fontes fluviais; d) principais fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2); e) todas as restantes emissões não incluídas nas alíneas anteriormente. Resultados apresentados para a situação meteorológica desfavorável

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.9**, encontram-se os resultados obtidos para estas simulações considerando a célula onde se localiza a estação da Avenida da Liberdade. Como pode ser observado, na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.9**, é particularmente relevante a importância das emissões do tráfego rodoviário, embora todas as outras emissões consideradas em área, onde estão incluídas as emissões comerciais e residenciais, também tem uma importância não desprezável. É de salientar ainda, a importância relativamente menor que têm as emissões do aeroporto, fluviais e pontuais. Chama-se, no entanto, atenção para o facto desta análise ser feita em termos relativos para um domínio alargado, pelo que representa as contribuições de fundo. Pontualmente, algumas destas emissões apresentam uma relativa relevância. Isso mesmo pode ser observado na representação gráfica da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 9. Resultados da aplicação do modelo, em termos de partículas PM₁₀, para os cenários de diferença entre a referência e considerando a ausência das emissões de cada fonte de emissão no local da estação da estação da avenida

Estação	Média anual		36ª máximo diário		
	Simulado (µg.m ⁻³)	Contribuição (%)	Simulado (µg.m ⁻³)	Contribuição (%)	Nº excedências simuladas
Avenida da Liberdade	27.7	-	41.7	-	9
Sem emissões tráfego aéreo	27.7	0.0	41.7	0.0	9
Sem emissões fluviais	27.7	0.0	41.7	0.0	9
Sem emissões em área	24.2	12.6	36.2	13.2	3
Sem emissões em linha	21.1	27.3	32.0	26.8	2
Sem emissões pontuais	27.6	0.5	41.3	1.3	9

4.2 Dióxido de azoto

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível observar o impacto das emissões dos setores anteriormente referidos: (a) principais fontes pontuais; b) fontes aéreas (aeroportos); c) fontes fluviais; d) principais fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2); d) todas as restantes emissões não incluídas nas alíneas anteriormente), nas médias anuais de NO₂.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.0** podem ser observados os resultados obtidos para estas simulações, para média anual e 19ª máximo horário de NO₂ na estação da Avenida da Liberdade. Como pode ser observado, na Tabela 10, é particularmente relevante a importância das emissões do tráfego rodoviário, embora todas as outras emissões consideradas em área, onde estão incluídas as emissões comerciais e residenciais, também têm uma importância não desprezável. É de salientar ainda, tal como para as PM₁₀, a importância relativamente menor que têm as emissões do aeroporto, fluviais e pontuais. Chama-se, no entanto, atenção para o facto desta análise ser feita em termos relativos para um domínio alargado, pelo que não representa as contribuições locais mas apenas as contribuições de fundo. Pontualmente, algumas destas emissões apresentam uma relativa

relevância. Isso mesmo pode ser observado na representação gráfica da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

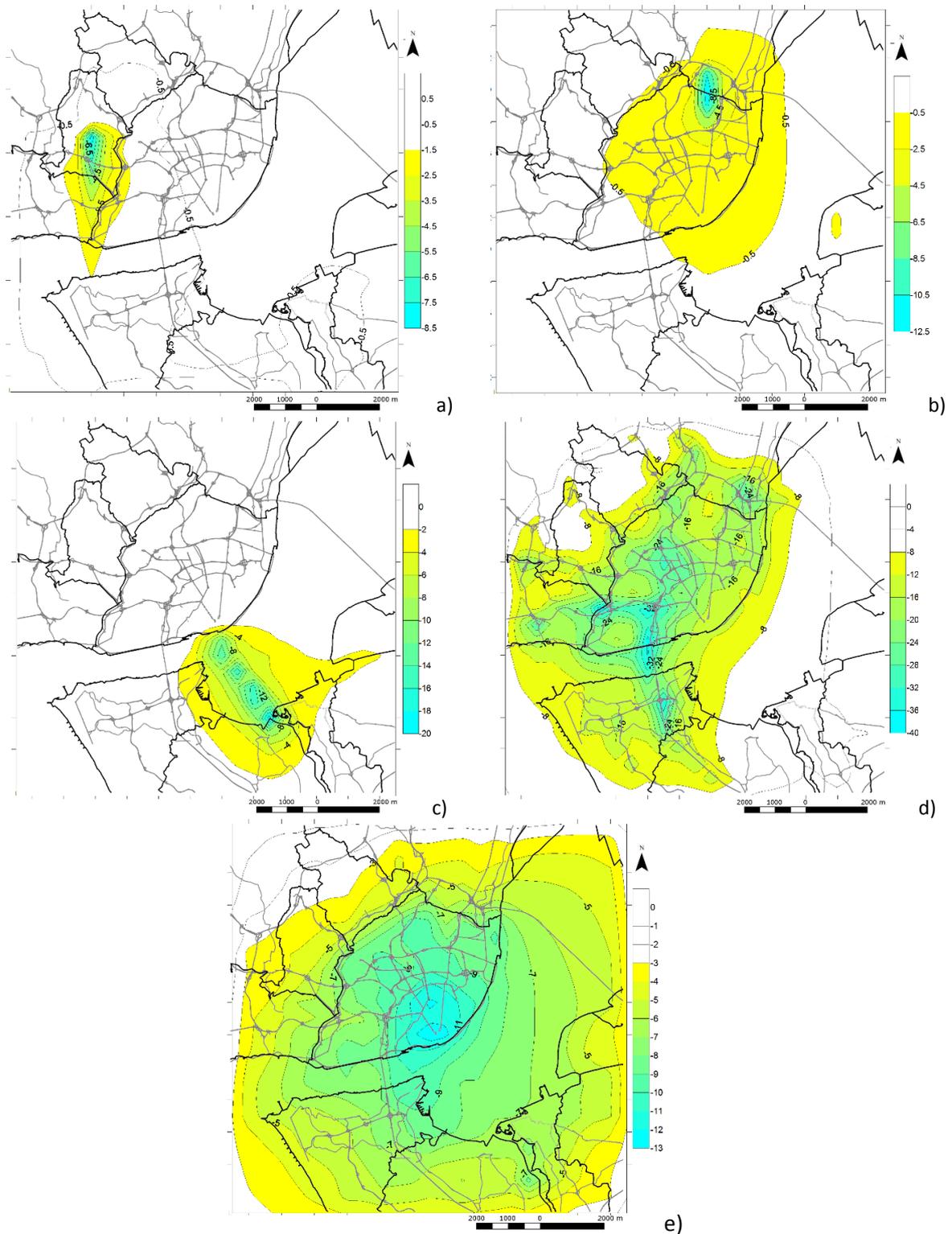


Figura 22. Diferença para as concentrações médias anuais de NO₂ (µg.m⁻³) entre a situação de referência (resultados apresentados para a situação meteorológica desfavorável) e considerando a ausência das emissões de: a) principais fontes pontuais; b) fontes aéreas (aerportos); c) fontes

fluviais; d) principais fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2); d) todas as restantes emissões não incluídas nas alíneas anteriormente

Tabela 10. Resultados da aplicação do modelo, em termos de partículas PM₁₀, para os cenários de diferença entre a referência e considerando a ausência das emissões de: a) fontes pontuais; b) fontes aéreas (aeroportos); c) fontes fluviais; d) fontes rodoviárias (em vias de classe 1 e 2); d) todas as restantes emissões não incluídas nas aléneas anteriormente para a Av. da Liberdade - Ano 2006 para o domínio2

Estação	Média anual		19 ^º Máximo horário		
	C _{simul.} (µg.m ⁻³)	Contribuição (%)	C _{simul.} (µg.m ⁻³)	Contribuição (%)	N ^º excedências simuladas
Avenida da Liberdade - REF	53.2	-	230.1	-	49
Sem emissões tráfego aéreo	52.4	1.5	226.8	1.4	44
Sem emissões fluviais	52.7	1.0	230.0	0.0	46
Sem emissões em área	41.5	22.2	197.6	14.1	16
Sem emissões em linha	32.8	49.2	132.2	49.5	0
Sem emissões pontuais	52.8	1.2	230.1	0.0	49

5 Resultados obtidos relativos aos diferentes cenários: redução das concentrações de NO₂ e PM₁₀

O presente capítulo diz respeito à modelação da qualidade do ar ambiente, associada à redução de emissões decorrente da aplicação de cenários através de um modelo numérico – o TAPM.

Neste âmbito, efetuou-se o estudo relativo à avaliação da qualidade do ar para o cenário de emissões atmosféricas obtidas, para o ano de 2014, com a elaboração do inventário de emissões atmosféricas na RLVT.

O modelo de qualidade do ar foi ainda aplicado para a simulação de cenários específicos de redução das emissões na RLVT, correspondentes à implementação de pacotes de políticas e medidas de melhoria da qualidade do ar (definidas no Plano de Melhoria da Qualidade do Ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo para os poluentes partículas PM₁₀ e NO₂ nas aglomerações da Área metropolitana de Lisboa Norte e Área Metropolitana de Lisboa Sul de 2016), permitindo determinar o impacte dos mesmos.

Para avaliação da qualidade do ar recorreu-se a um modelo numérico aplicável à situação de referência (ano de 2014) e aos cenários base e projetado, com diferentes níveis de ambição, previamente definidos. A avaliação incidiu sobre os principais poluentes emitidos pelas fontes de emissão da região em estudo abrangidas pela legislação vigente para a qualidade do ar (Decreto-Lei nº 102/2010, de 23 de setembro), em particular: dióxido de azoto (NO₂) e partículas em suspensão (PM₁₀).

O estudo efetuado consistiu na simulação por modelação numérica da dispersão das emissões de NO₂ e PM₁₀ observadas na Região de Lisboa e Vale do Tejo.

5.1 Cenários de emissão

A modelação da dispersão atmosférica foi efetuada para a situação de referência, previamente definida para o ano de 2014, e para dois cenários de emissões, que correspondem a diferentes níveis de ambição do pacote de políticas e medidas associadas ao sector do Transporte Rodoviário e de esforço de redução de emissões, designados por: (i) Cenário Base ou baixo; (ii) Cenário Projetado ou alto. Esta avaliação foi realizada em três etapas distintas:

- Primeiro avaliou-se a dispersão dos poluentes em toda a região em estudo, Lisboa e Vale do Tejo – Domínio D1;
- Decorrente da primeira avaliação, ficou evidenciada a necessidade orientar a atenção do estudo para um domínio mais detalhado. Assim, numa segunda fase, e como consequência da primeira, estudou-se essa dispersão focando a análise na Área Metropolitana de Lisboa (AML) – Domínio D2;
- Por fim, uma avaliação sobre um subdomínio criado por interpolação de D2 sobre a designada ZER Zona 2 (abrangendo parte da cidade de Lisboa) – Subdomínio D3.

A modelação para o domínio D1, foi apenas realizada com a dupla função de definir a situação de referência na RLVT e servir de “screening” para a identificação das zonas críticas em termos de poluição atmosférica. Por esta razão, os cenários Base e Projetado foram apenas avaliados para o domínio D2. No decurso desta tarefa, optou-se também por criar um subdomínio, mais detalhado, representando a Zona 2 ZER – Subdomínio D3.

Os cenários de emissões, base e projetado para D2, foram avaliados para um ano meteorológico desfavorável em termos do transporte e dispersão de poluentes (ano 2006), de acordo com os resultados de uma análise prévia efetuada (ver ponto 2.5. *Meteorologia*).

Os mapas representando a percentagem de redução das emissões por via e por quadrícula, por poluente para o cenário base e para o cenário projetado introduzidas no modelo encontram-se nas figuras seguintes (Figura 23 a Figura 26).

A Figura 25 e Figura 26 apresentam a percentagem de redução das emissões em área, face ao cenário de referência, usada para avaliação do cenário Projetado e Base respetivamente. Em ambas as figuras os resultados são apresentados para PM_{10} e NO_x para os domínios D2 e subdomínio D3.

Para além dos cenários anteriores, relativos ao sector do Transporte Rodoviário, identificou-se uma outra situação de necessidade de redução de emissões e da sua simulação, associada ao sector Industrial no concelho do Seixal (freguesia de Paio Pires), mais concretamente numa instalação do subsector da indústria metalúrgica, para o poluente PM_{10} . O cenário Base de emissões do subsector da indústria metalúrgica foi constituído por uma redução de 20% nas emissões difusas da instalação industrial em causa (neste caso não foi definido um cenário Projetado).

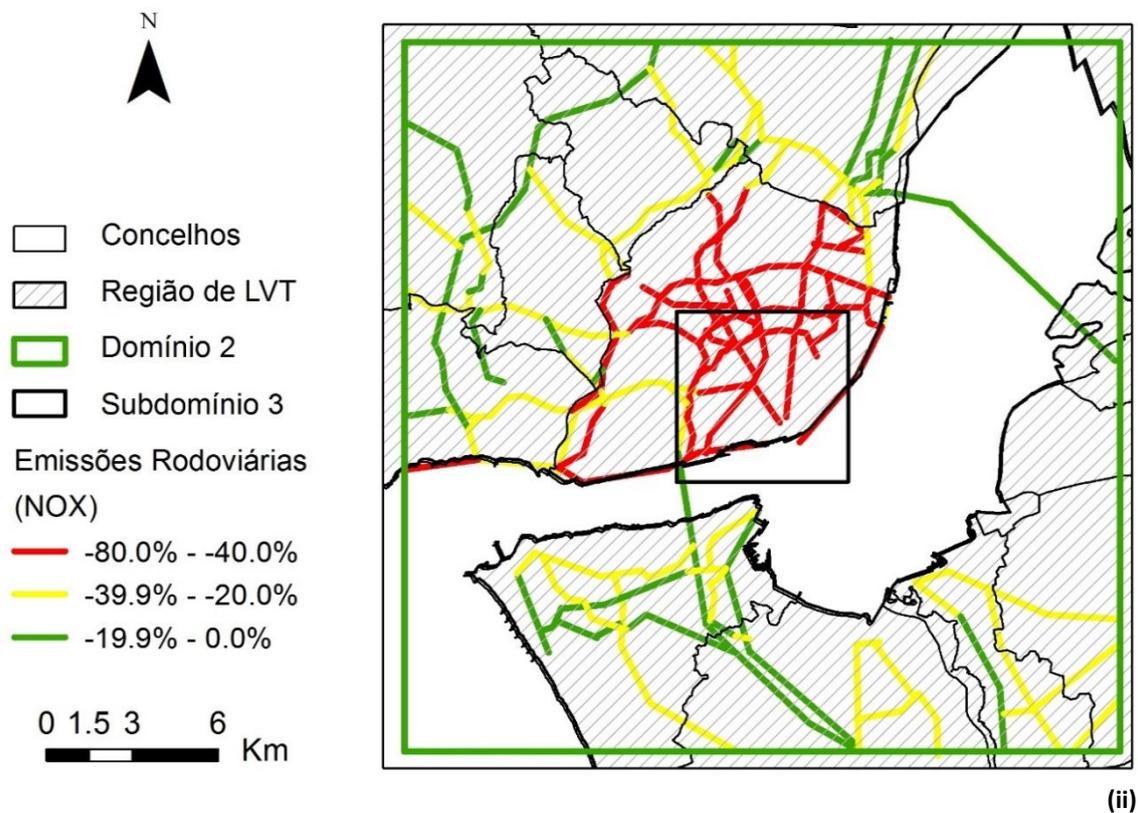
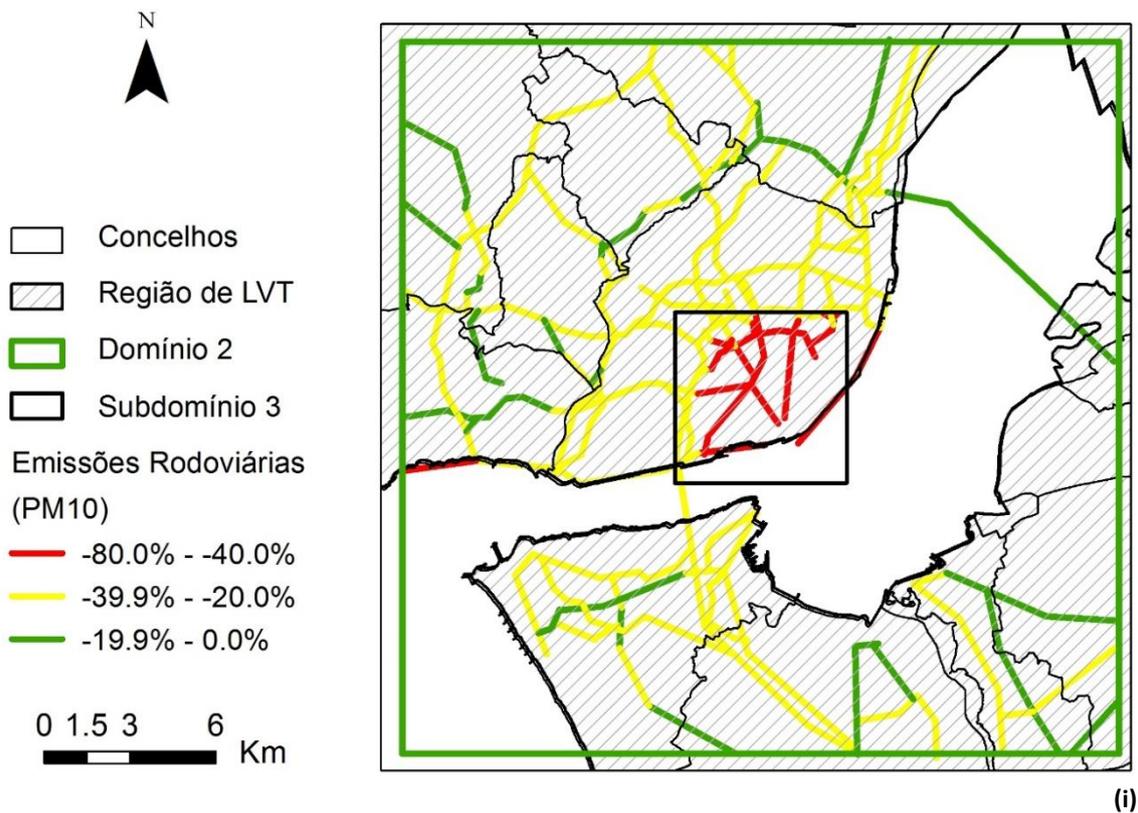


Figura 23. Percentagem de redução das emissões em linha rodoviárias, face ao cenário de referência, usada para avaliação do cenário Projetado. Os resultados são apresentados para (i) PM₁₀ e (ii) NO_x para o domínio D2 e subdomínio D3

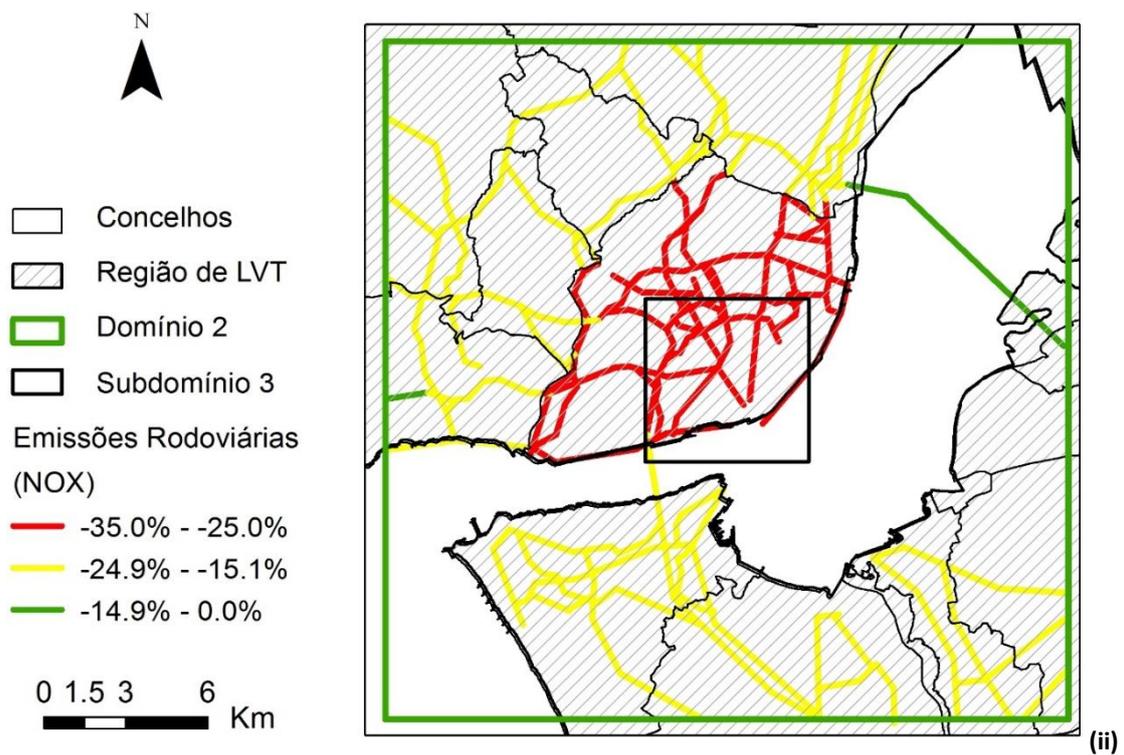
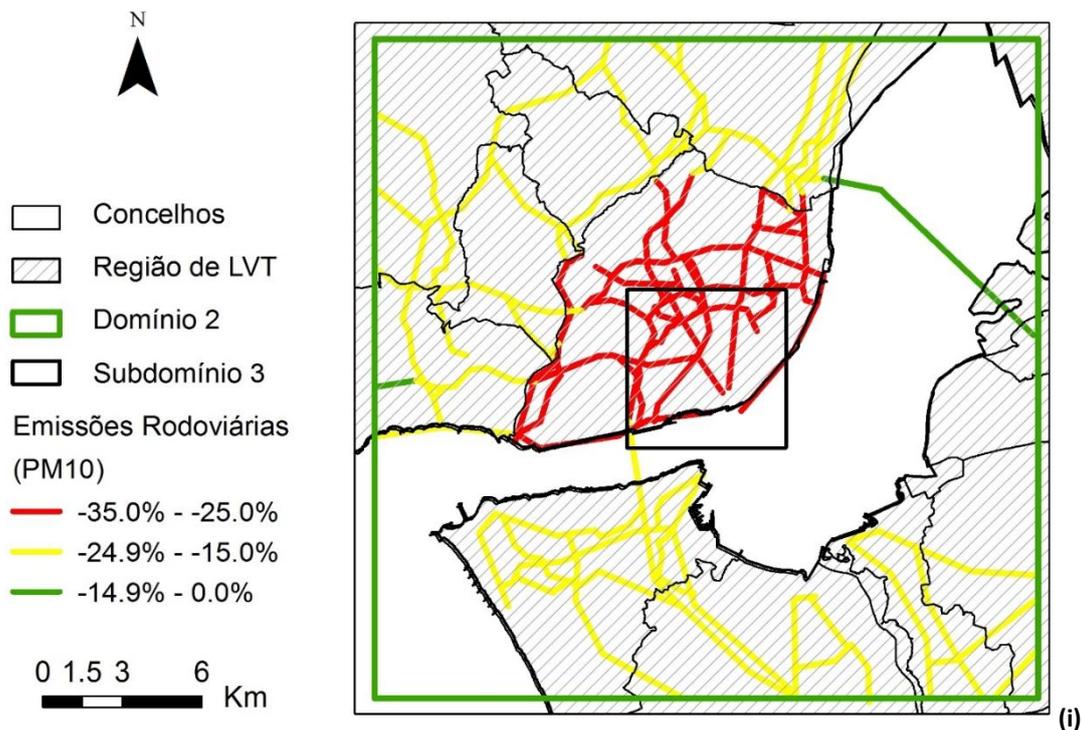


Figura 24. Percentagem de redução das emissões em linha rodoviárias, face ao cenário de referência, usada para avaliação do cenário Base. Os resultados são apresentados para (i) PM₁₀ e (ii) NO_x para o domínio D2 e subdomínio D3

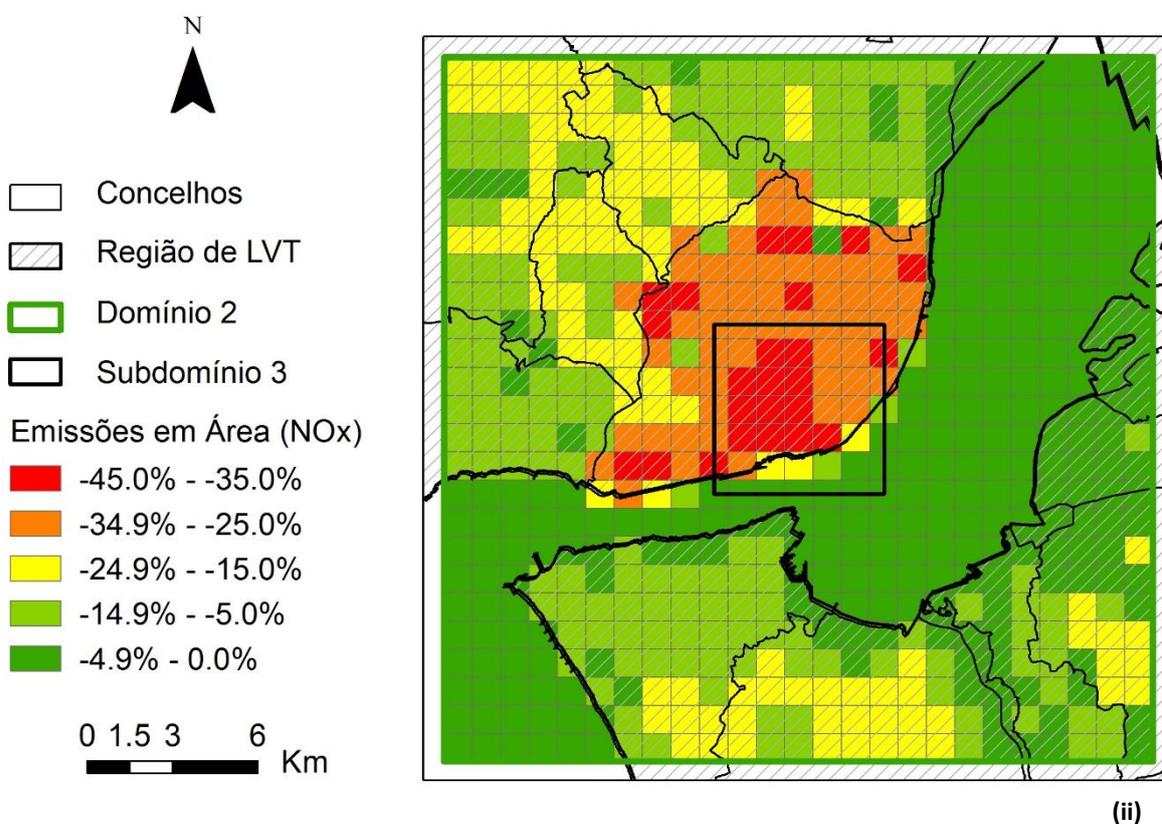
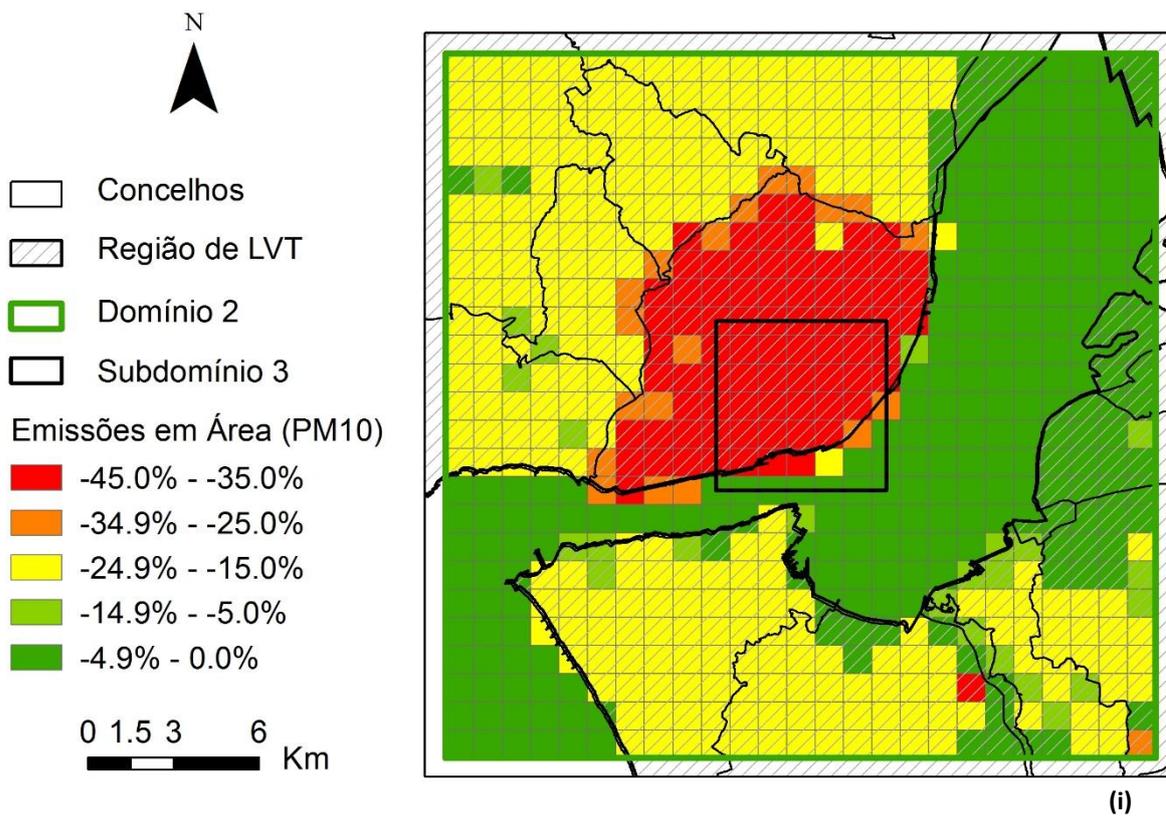


Figura 25. Percentagem de redução das emissões em área, face ao cenário de referência, usada para avaliação do cenário Projetado. Os resultados são apresentados para (i) PM₁₀ e (ii) NO_x para o domínio D2 e subdomínio D3

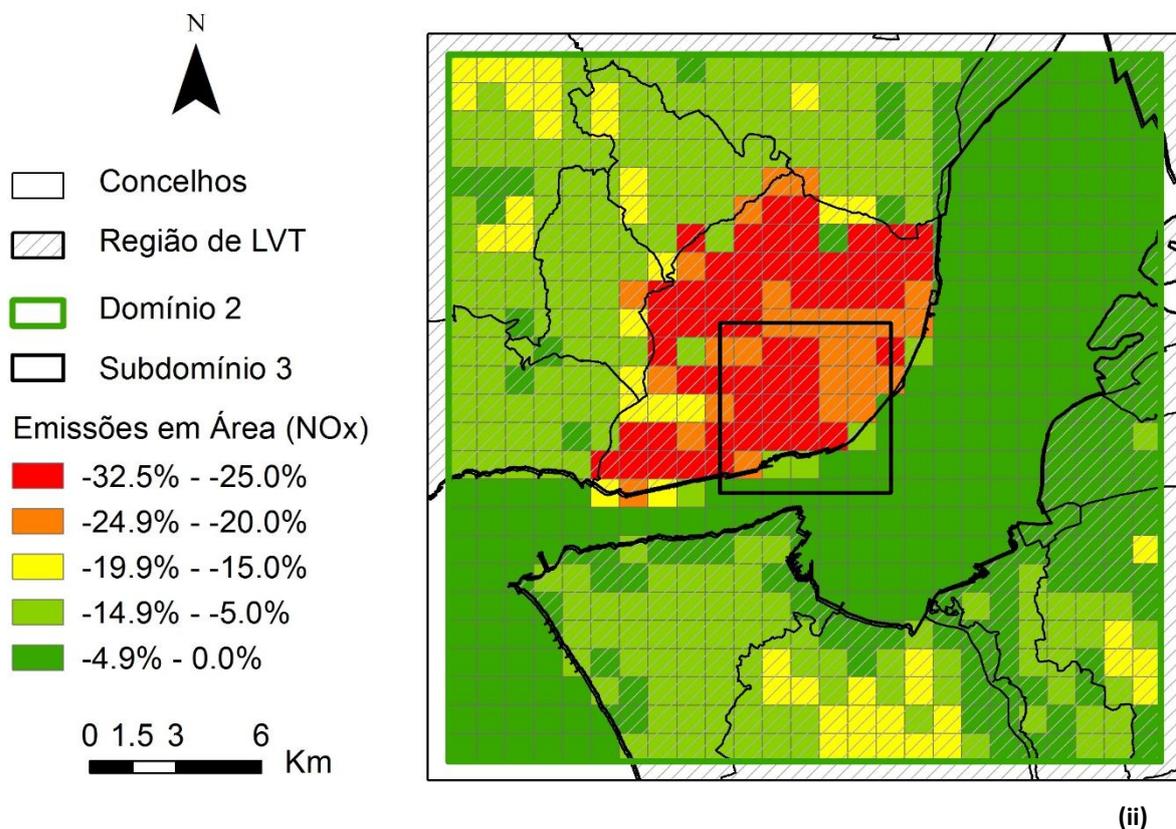
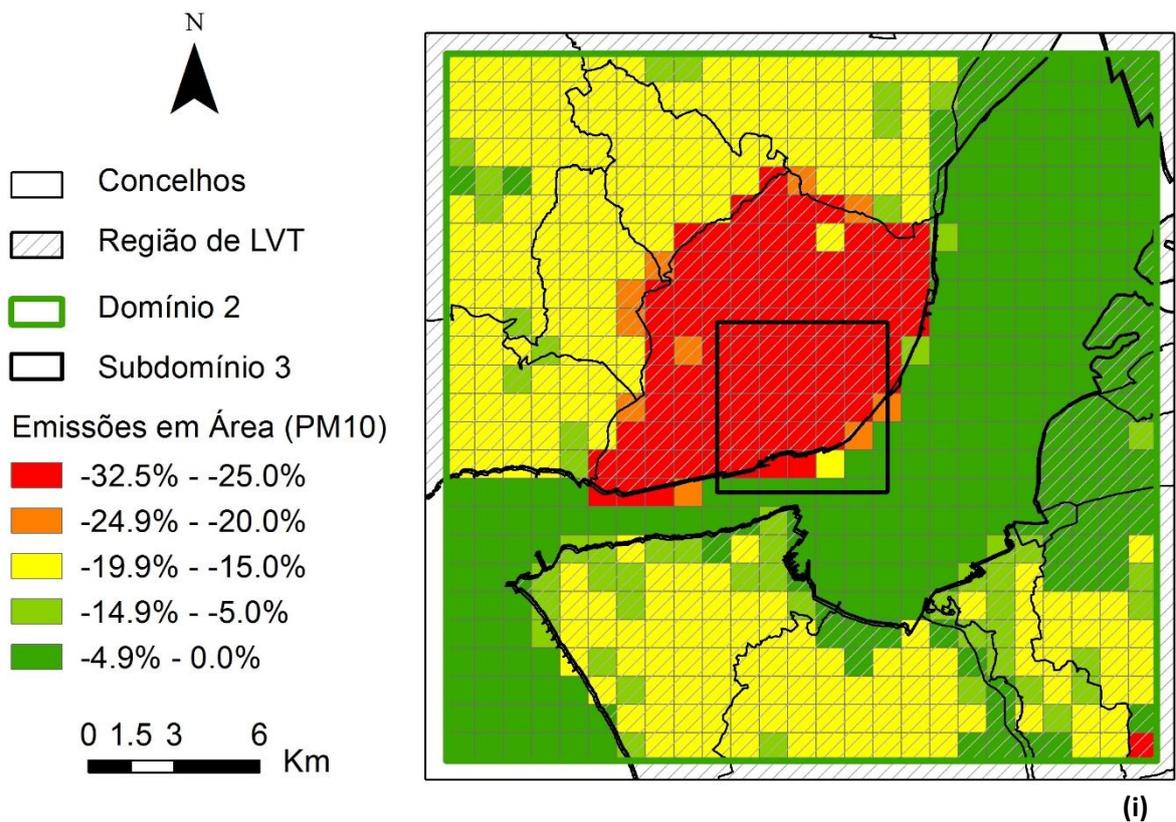


Figura 26. Percentagem de redução das emissões em área, face ao cenário de referência, usada para avaliação do cenário Base. Os resultados são apresentados para (i) PM₁₀ e (ii) NO_x para o domínio D2 e subdomínio D3

5.2 Partículas em Suspensão (PM₁₀)

A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam uma síntese estatística das concentrações de PM₁₀ obtidas para a média anual e 36º máximo diário dos resultados da aplicação do modelo para os cenários Base e Projetado, nas células de cada estação de monitorização.

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam as diferenças entre as concentrações médias anuais de PM₁₀, observadas entre a referência (2014) e cada um dos cenários, Base e Projetado, respetivamente. Ambos os resultados são apresentados para o domínio D2 e D3 tendo em conta para uma situação meteorológica desfavorável (2006).

Tal como referido anteriormente, para além dos cenários anteriores, relativos ao sector do Transporte Rodoviário, foi efetuada uma simulação associada ao subsector da indústria metalúrgica, no concelho do Seixal, para o poluente PM₁₀. O cenário Base de emissões do subsector da indústria metalúrgica foi constituído por uma redução de 20% nas emissões difusas da instalação industrial em causa. Para além deste, não foi definido um cenário adicional de redução de emissões neste subsector.

Na Figura 29, na

Figura 30 e na Figura 31, bem como, na Tabela 11 e na Tabela 12 apresenta-se a representação das diferenças entre:

- (i) o cenário de Referência e o cenário de redução de 20% nas emissões difusas do subsector metalúrgico (SM);
- (ii) o cenário de Referência e o cenário Base (com as reduções do sector do Transporte Rodoviário e de 20% nas emissões difusas do subsector metalúrgico);
- (iii) o cenário de Referência e o cenário Projetado (com as reduções do sector do Transporte Rodoviário e de 20% nas emissões difusas do subsector metalúrgico).

Tabela 11. Resultados da modelação dos cenários de medidas de controlo de emissões na célula das estações de monitorização para os domínios D2 e D3 para a média anual de PM₁₀, considerando a meteorologia mais desfavorável (2006)

Estação	Domínio	Cenário de referência	Cenário Base	Redução nas concentrações do cenário base relativamente ao cenário de referência		Cenário Projetado	Redução nas concentrações do cenário projetado relativamente ao cenário de referência	
				µg/m ³	%		µg/m ³	%
Olivais	D2	24	23	-1	-4	22	-2	-8
Laranjeiro	D2	25	23	-2	-8	23	-2	-8
Paio Pires	D2	31	29	-2	-7	28	-3	-10
Restelo	D2	25	24	-1	-4	23	-2	-8
Loures	D2	19	19	0	0	19	0	0
Beato	D2	24	22	-2	-8	22	-2	-8
	D3	20	19	-1	-5	19	-1	-5
Avenida da Liberdade	D2	28	25	-3	-11	24	-4	-14
	D3	25	23	-2	-8	22	-3	-12
Entrecampos	D2	28	25	-3	-11	25	-3	-11
	D3	21	19	-2	-10	19	-2	-10
Santa Cruz de Benfica	D2	26	24	-2	-8	24	-2	-8

*Para Paio Pires são apresentados os valores para o cenário de -20% nas emissões difusas no subsector da indústria metalúrgica, representado abreviadamente por "-20% SM"

Tabela 12. Resultados da modelação dos cenários de medidas de controlo de emissões na célula das estações de monitorização para os domínios D2 e D3 para o 36º máximo diário de PM₁₀ considerando a meteorologia mais desfavorável (2006)

Estação	Domínio	Cenário de referência	Cenário Base	Redução nas concentrações do cenário base relativamente ao cenário de referência		Cenário Projetado	Redução nas concentrações do cenário projetado relativamente ao cenário de referência	
				(µg.m ⁻³)	(%)		(µg.m ⁻³)	(%)
Olivais	D2	38	35	-3	-8	34	-4	-11
Laranjeiro	D2	37	35	-2	-5	34	-3	-8
Paio Pires	D2	49	45	-4	-8	45	-4	-8
Restelo	D2	38	35	-3	-8	34	-4	-11
Loures	D2	30	29	-1	-3	29	-1	-3
Beato	D2	37	34	-3	-8	34	-3	-8
	D3	30	29	-1	-3	29	-1	-3
Avenida da Liberdade	D2	42	38	-4	-10	36	-6	-14
	D3	36	34	-2	-6	33	-3	-8
Entrecampos	D2	43	39	-4	-9	37	-5	-14
	D3	32	30	-2	-6	30	-2	-6
Santa Cruz de Benfica	D2	41	39	-2	-5	37	-4	-10

*Para Paio Pires são apresentados os valores para o cenário de -20% nas emissões difusas no subsector da indústria metalúrgica, representado abreviadamente por "-20% SM"

Relativamente aos resultados obtidos, verifica-se que, no que diz respeito ao cenário de redução de 20% nas emissões difusas associadas ao subsector da indústria metalúrgica, este cenário apenas apresenta variações para a estação de Paio Pires. Nas restantes estações não há qualquer alteração assinalável nas médias anuais. Assim, para a estação de Paio Pires, este cenário (com redução de 20% nas emissões difusas), resulta numa variação absoluta, relativamente ao cenário base (sem redução de 20% nas emissões difusas), de $-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na média anual, ao que corresponde uma variação percentual de cerca de -7%. Relativamente aos cenários Base e Projetado, as variações relativamente à situação de referência (sem redução de emissões difusas), é de $-2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (mantém-se) ou de $-3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ao que corresponde uma variação percentual de cerca de -7% (idêntica à anterior) ou de cerca de -10%, respetivamente para o cenário Base e Projetado. Por outras palavras, no cenário Base, a variação mantém-se, mas para o cenário Projetado há um aumento na redução de cerca de 3% (passa de uma redução inicial de 7% para 10%), face ao cenário de referência (sem redução nas emissões difusas).

Relativamente ao 36º máximo diário, o cenário de redução de 20% nas emissões difusas associadas ao subsector da indústria metalúrgica apresenta alguma influência noutras estações para além de Paio Pires. No entanto, é uma influência residual. Sendo assim, tal como para a média anual, será apenas analisada a influência deste cenário na estação de Paio Pires. Desde modo, para a estação de Paio Pires, este cenário (com redução de 20% nas emissões difusas), resulta numa variação absoluta, relativamente ao cenário base (sem redução de 20% nas emissões difusas), de $-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no 36º máximo diário, ao que corresponde uma variação percentual de cerca de -8%. Relativamente aos cenários Base e Projetado, as variações relativamente à situação de referência (sem redução de emissões difusas), são, para ambos os cenários, de $-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ao que corresponde uma variação percentual de cerca de -8%.

De um modo geral, da análise dos resultados obtidos é possível concluir que pode haver ganhos não desprezáveis em termos dos valores legalmente estabelecidos com a aplicação de qualquer um dos cenários de emissão. Como pode ser observado, a adoção, em particular, das medidas projetadas, pode ter um impacte significativo na qualidade do ar na Zona 2 da ZER (D3).

Por outro lado, o cenário de redução de 20% sobre as emissões difusas do subsector da indústria metalúrgica pode conduzir à redução de até 10% nas médias anuais e até 8% no 36º valor dos máximos diários.

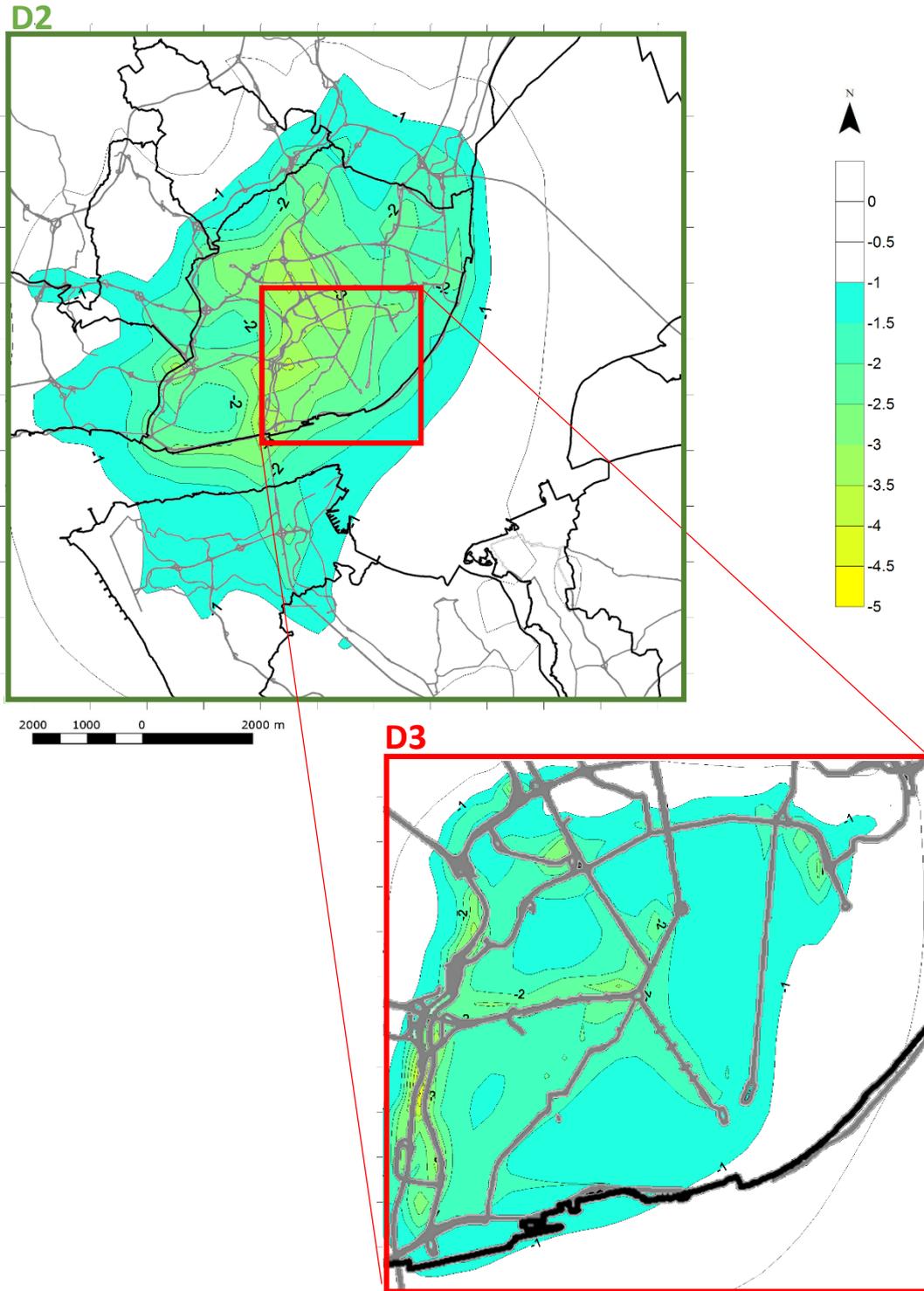


Figura 27. Diferença entre as concentrações médias anuais de PM₁₀ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Base obtidos para a AML (domínio D2 e D3). Os resultados foram simulados para uma situação meteorológica desfavorável (2006)

D2

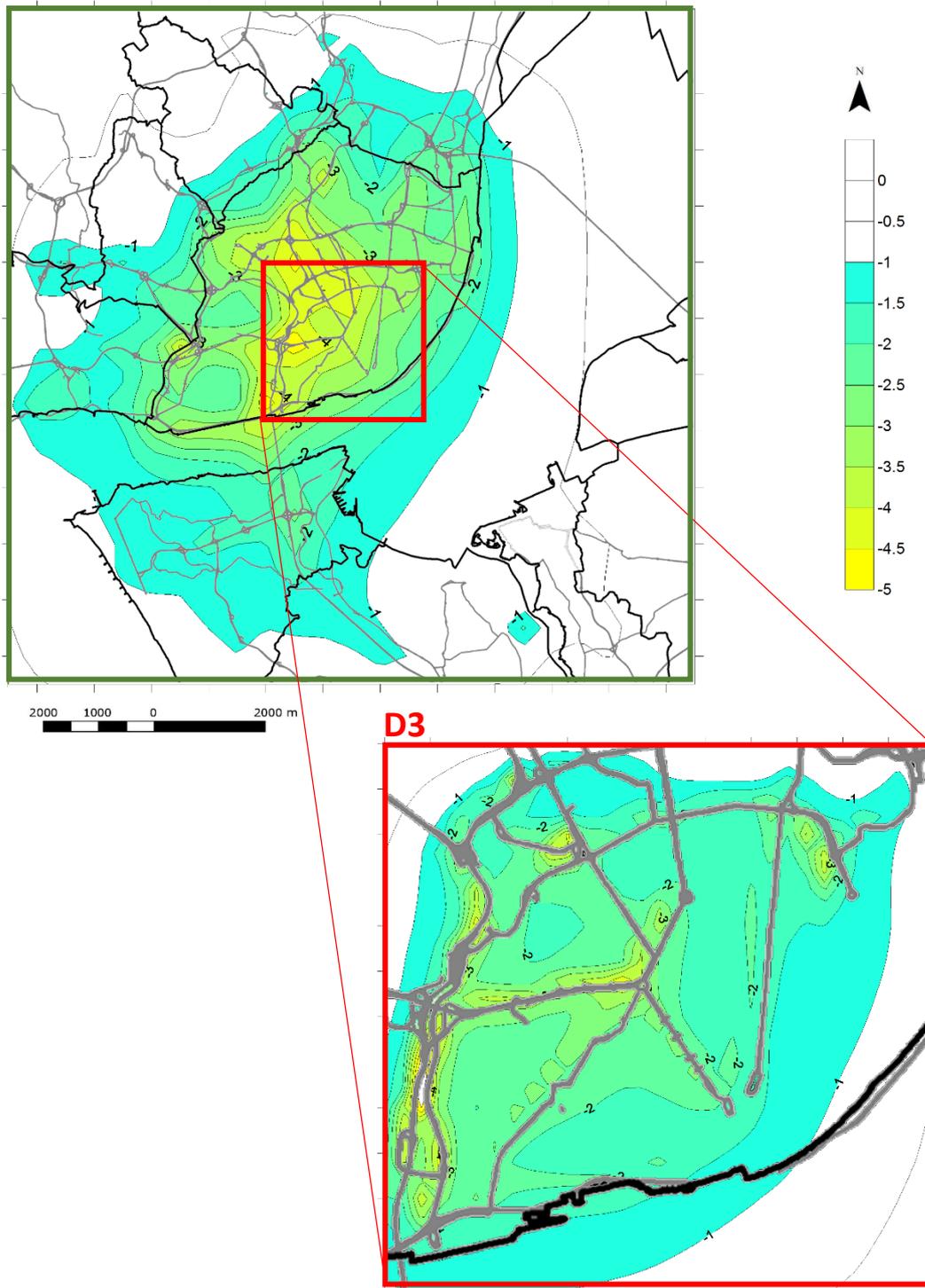


Figura 28. Diferença entre as concentrações médias anuais de PM_{10} ($\mu g \cdot m^{-3}$), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Projetado, obtidos para a AML (domínio D2 e D3). Os resultados foram simulados para uma situação meteorológica desfavorável (2006)

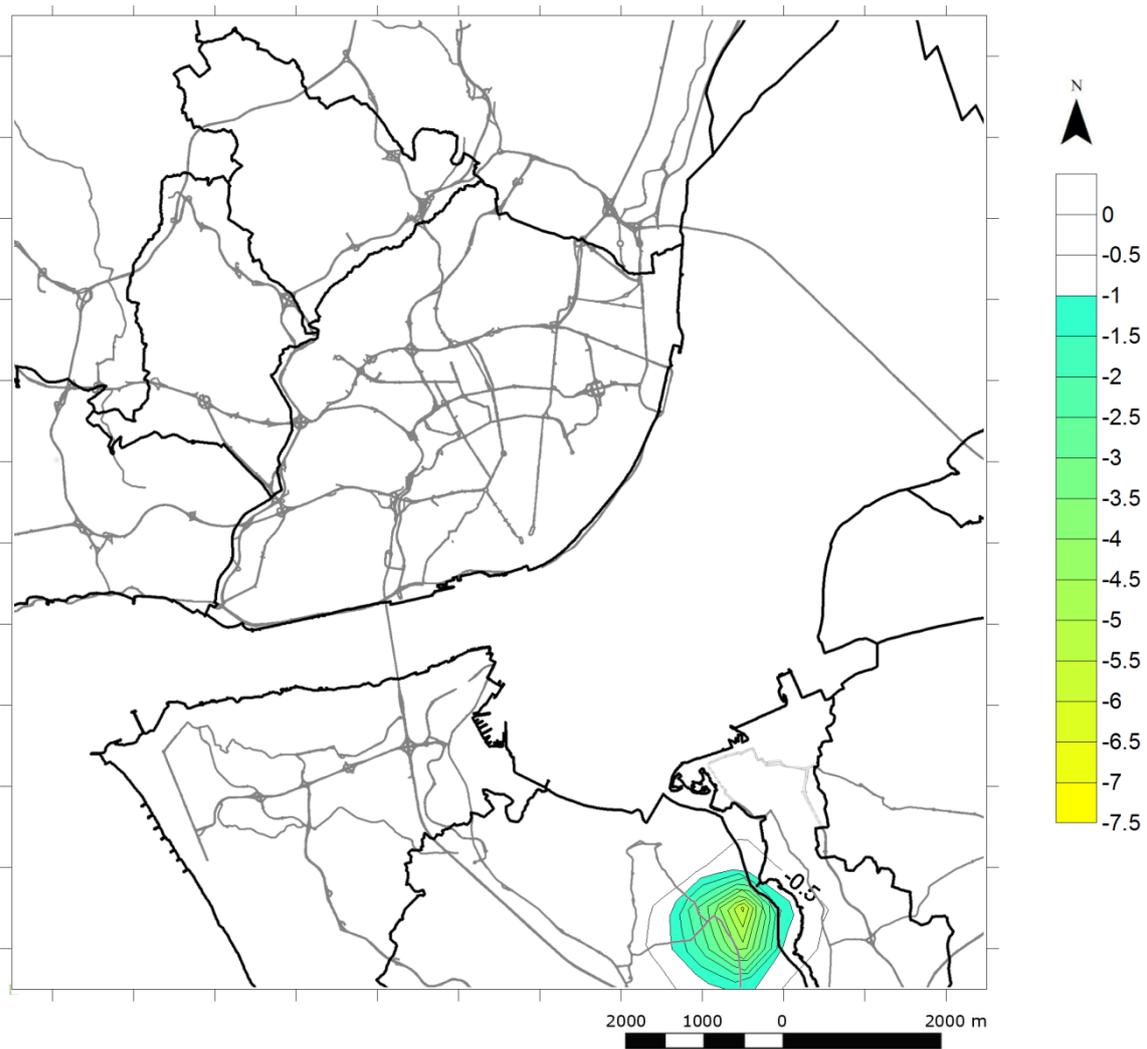


Figura 29. Diferença entre as concentrações médias anuais de PM₁₀ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), observadas entre a Referência (2014) e o cenário com uma redução de 20% nas emissões difusas do subsector da indústria metalúrgica, obtidos para a AML (domínio D2). Os resultados foram simulados para uma situação meteorológica desfavorável (2006)

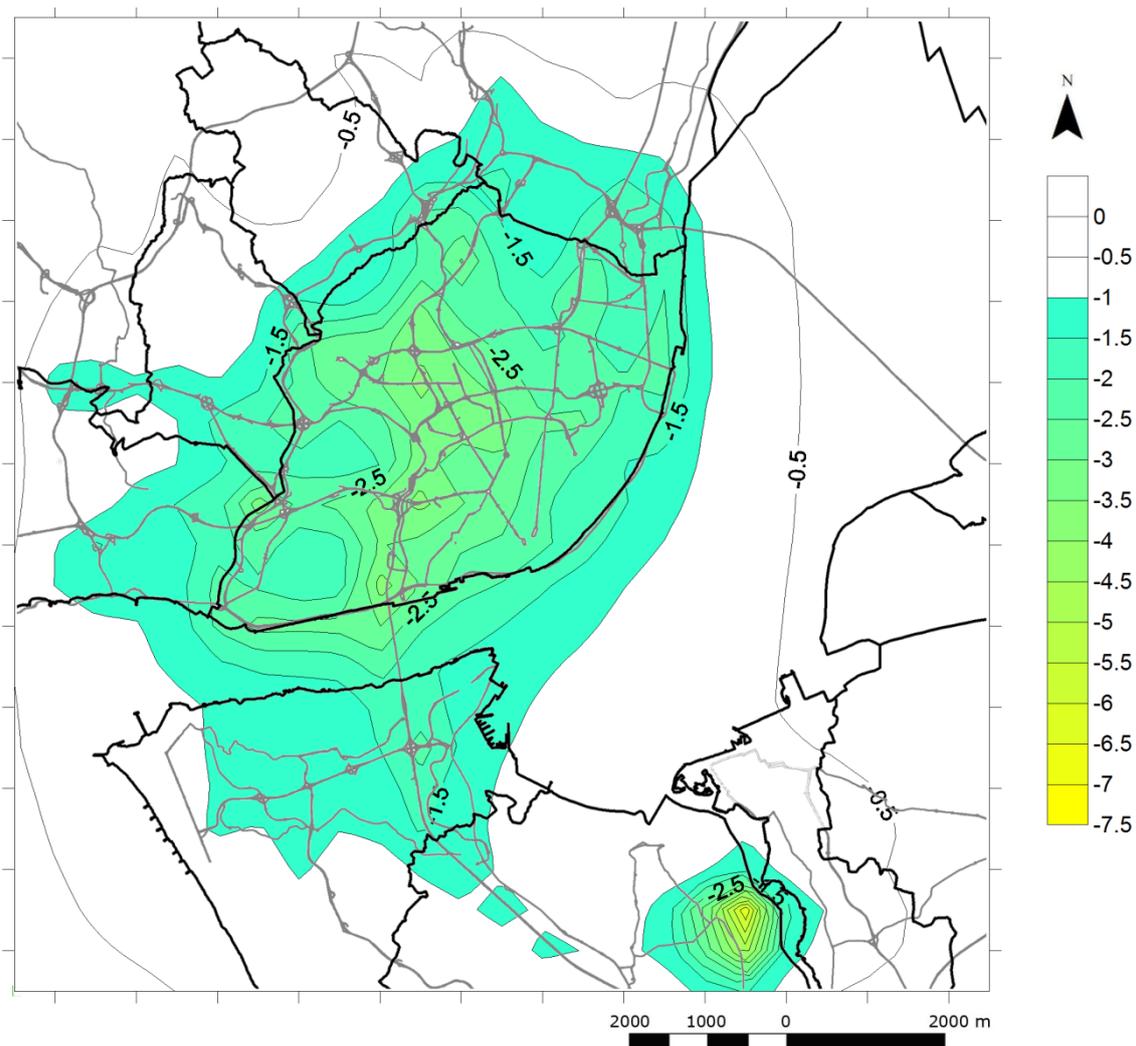


Figura 30. Diferença entre as concentrações médias anuais de PM₁₀ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Base (incluindo a redução de 20% nas emissões difusas do subsector da indústria metalúrgica), obtidas para a AML (domínio D2). Os resultados foram simulados para uma situação meteorológica desfavorável (2006)

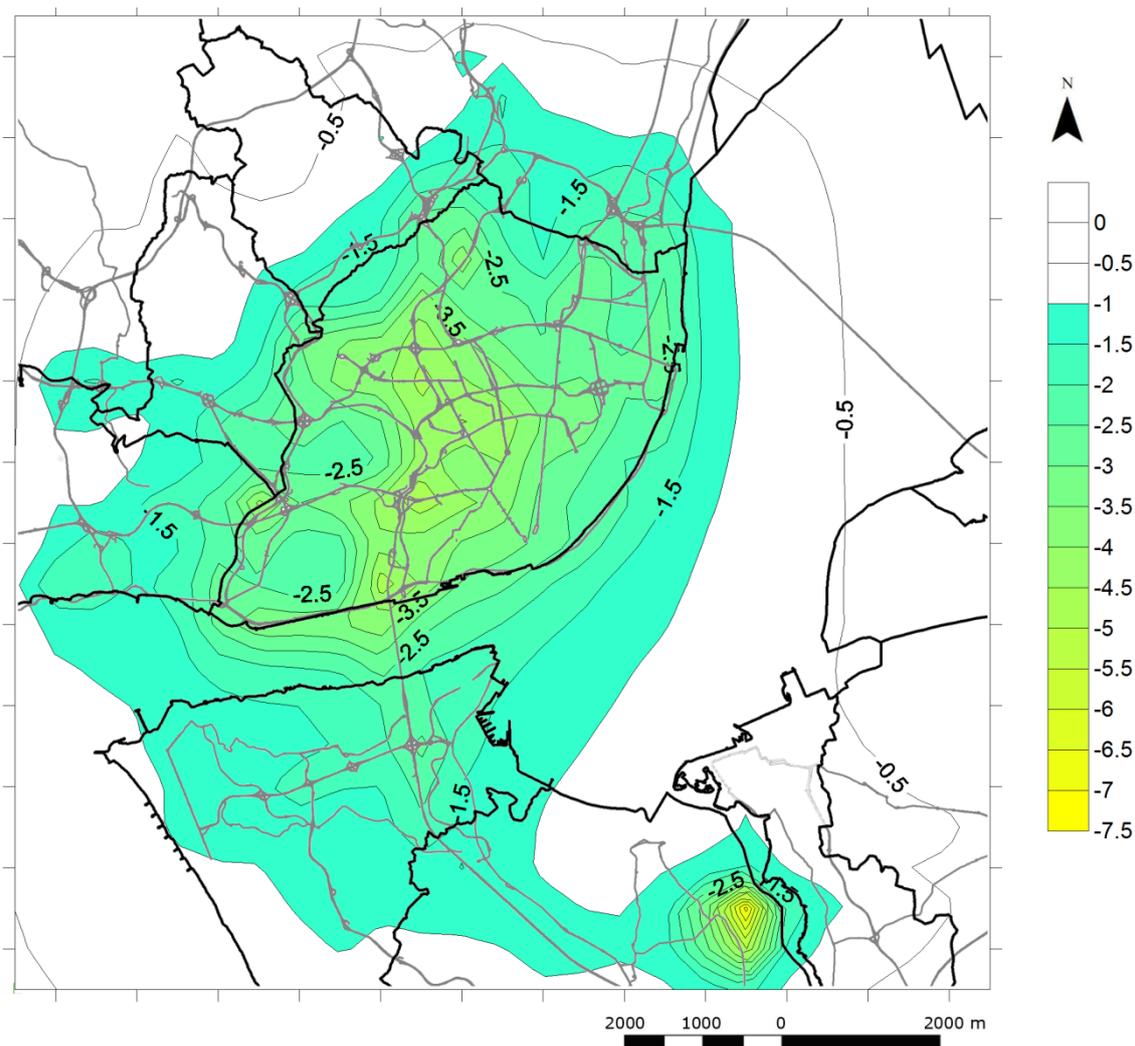


Figura 31. Diferença entre as concentrações médias anuais de PM_{10} ($\mu g \cdot m^{-3}$), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Projetado (incluindo a redução de 20% nas emissões difusas do subsector da indústria metalúrgica), obtidas para a AML (domínio D2). Os resultados foram simulados para uma situação meteorológica desfavorável (2006)

5.3 Dióxido de azoto

A Tabela 133 e a Tabela 144 apresentam uma síntese estatística das concentrações de NO_2 obtidas para a média anual e 19º máximo horário dos resultados da aplicação do modelo para os cenários Base e Projetado, nas células de cada estação de monitorização. A Figura 32 e Figura 33 apresentam as diferenças entre as concentrações de NO_2 , observadas entre a referência (2014) e cada um dos cenários, Base e Projetado, respetivamente. Todos os resultados são apresentados para o domínio D2 e D3 tendo em conta para uma situação meteorológica desfavorável (2006).

Da análise dos resultados, tal como para as PM_{10} , é possível concluir que pode haver ganhos não desprezáveis, em termos dos valores legalmente estabelecidos, com a aplicação de qualquer um dos cenários de emissão.

Como pode ser observado, a adoção, em particular, das medidas projetadas, pode ter um impacto muito significativo na qualidade do ar na Zona 2 da ZER (D3).

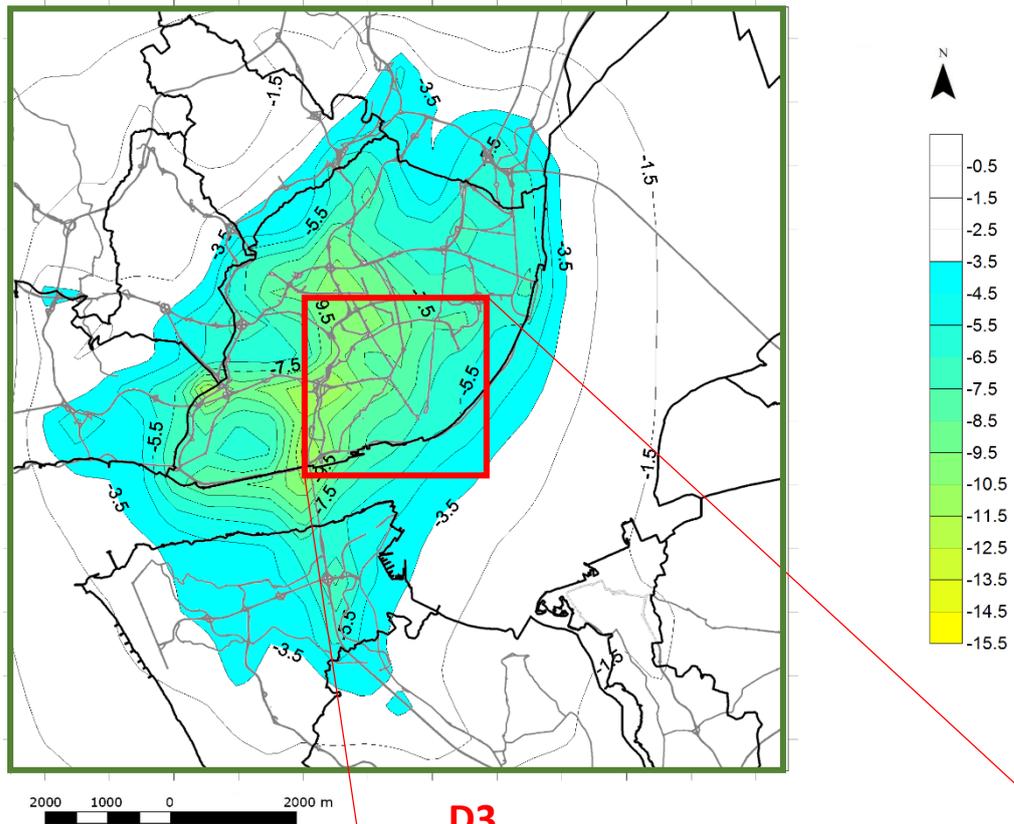
Tabela 13. Resultados da modelação dos cenários de medidas de controlo de emissões na célula das estações de monitorização para os domínios D2 e D3 para a média anual de NO₂ considerando a meteorologia mais desfavorável (2006)

Estação	Domínio	Cenário de referência ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Cenário Base ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Redução nas concentrações do cenário base relativamente ao cenário de referência		Cenário Projetado ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Redução nas concentrações do cenário projetado relativamente ao cenário de referência	
				($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	(%)		($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	(%)
Olivais	D2	46	40	-6	-13	39	-7	-15
Laranjeiro	D2	49	44	-5	-10	43	-6	-12
Paio Pires	D2	31	29	-2	-6	29	-5	-6
Restelo	D2	48	41	-7	-15	40	-8	-17
Loures	D2	23	22	-1	-4	22	-1	-4
Beato	D2	44	38	-6	-14	37	-7	-16
	D3	27	25	-2	-7	24	-3	-11
Avenida da Liberdade	D2	53	45	-8	-15	42	-11	-21
	D3	41	34	-7	-17	32	-9	-22
Entrecampos	D2	54	46	-8	-15	44	-10	-19
	D3	26	24	-2	-8	24	-2	-8
Santa Cruz de Benfica	D2	46	44	-2	-4	42	-6	-9

Tabela 14. Resultados da modelação dos cenários de medidas de controlo de emissões na célula das estações de monitorização para os domínios D2 e D3 para a 19^o máximo horário de NO₂ considerando a meteorologia mais desfavorável (2006)

Estação	Domínio	Cenário de referência ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Cenário Base ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Redução nas concentrações do cenário base relativamente ao cenário de referência		Cenário Projetado ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Redução nas concentrações do cenário projetado relativamente ao cenário de referência	
				($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	(%)		($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	(%)
Olivais	D2	249	209	-40	-16	200	-49	-20
Laranjeiro	D2	274	236	-38	-14	228	-46	-17
Paio Pires	D2	145	139	-6	-4	139	-6	-4
Restelo	D2	202	169	-33	-16	160	-42	-21
Loures	D2	142	136	-6	-4	134	-8	-6
Beato	D2	211	172	-39	-18	164	-47	-22
	D3	138	135	-3	-2	134	-4	-3
Avenida da Liberdade	D2	230	189	-41	-18	174	-56	-24
	D3	165	147	-18	-11	139	-26	-16
Entrecampos	D2	257	212	-45	-18	194	-63	-25
	D3	147	138	-9	-6	136	-11	-7
Santa Cruz de Benfica	D2	273	215	-58	-21	205	-68	-25

D2



D3

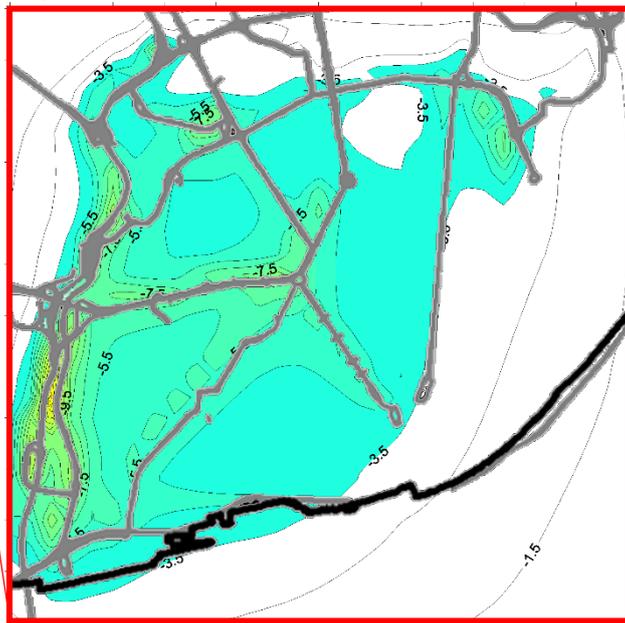


Figura 32. Diferença entre as concentrações médias anuais de NO₂ (µg.m⁻³), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Base, obtido para a AML (domínio D2 e D3). Os resultados foram simulados uma situação meteorológica desfavorável (2006)

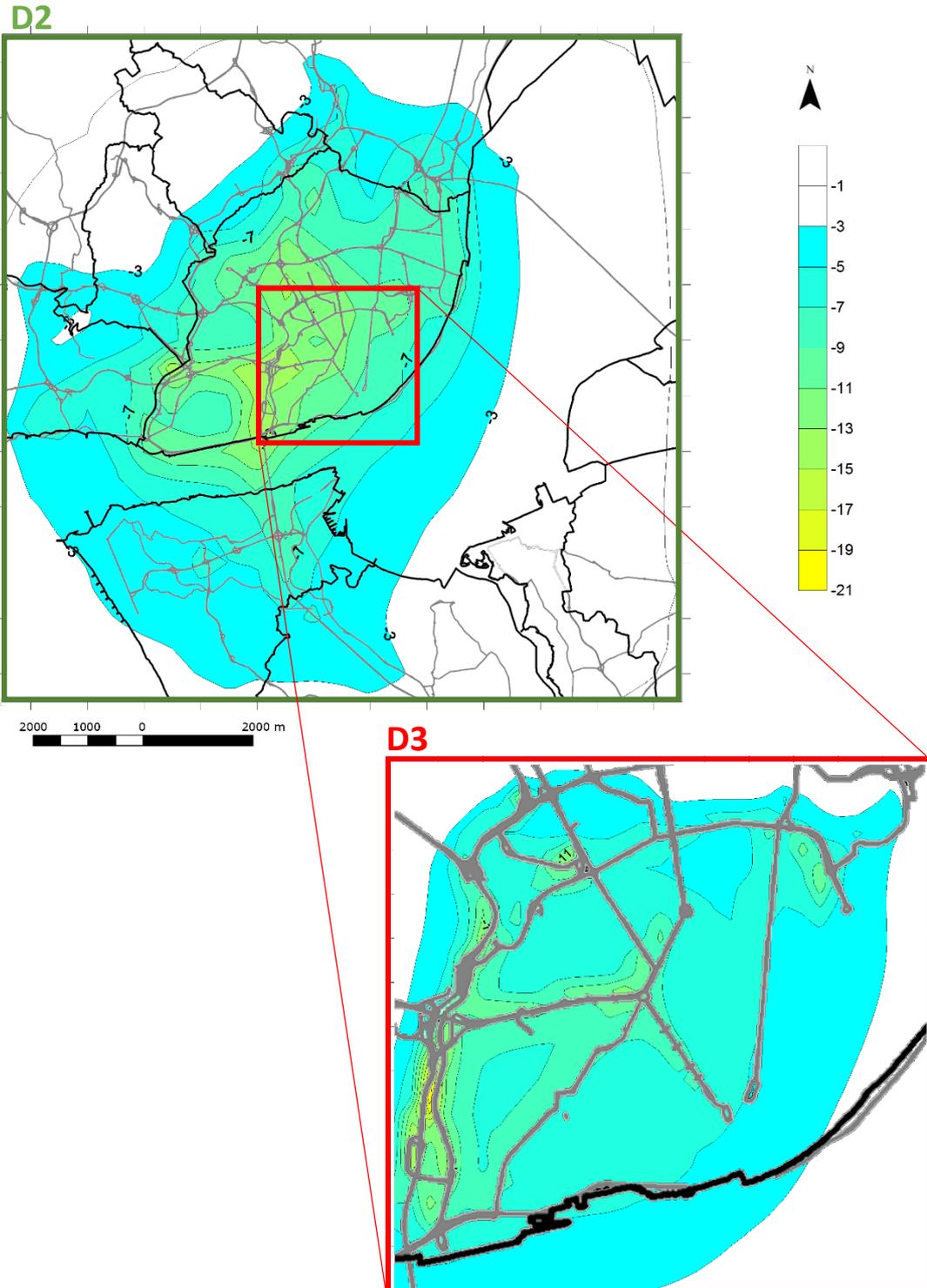


Figura 33. Diferença entre as concentrações médias anuais de NO₂ (μg.m⁻³), observadas entre a Referência (2014) e o cenário Projetado, obtido para a AML (domínio D2 e D3). Os resultados foram simulados uma situação meteorológica desfavorável (2006)

6 Apreciação global

A componente de modelação de qualidade do ar permitiu efetuar a o estudo do cenário de referência – ano de 2014 - do Plano de Melhoria da Qualidade do ar da Região de Lisboa e Vale do Tejo nos termos dos seus impactes na qualidade do ar.

Neste trabalho foi efetuada a aplicação do modelo TAPM, tendo-se assumido os seguintes elementos base:

- (i) Forçamento sinótico - Para definição do ano de forçamento sinótico a utilizar, foram corridos 13 anos (2003 a 2015) de forçamentos sinóticos considerando, de forma constante, emissões unitárias de 1 g.s^{-1} de um poluente não reativo (*tracer*). Como resultado desta abordagem foi observada a evolução da “qualidade do ar” durante estes 13 anos face à média geral e face à média e mais dois desvios padrão. A análise estatística destes resultados permitiu identificar como ano meteorológico típico da região em estudo o ano de 2009 e como ano desfavorável ao transporte e dispersão o ano de 2006. Para o teste dos cenários de emissões de Referência, Projetado e Base foi apenas usado o forçamento meteorológico mais desfavorável, 2006. A geração dos campos meteorológicos de interesse foi efetuada por recurso a um processo de “Data Assimilation” de forma a garantir um bom ajuste entre os campos simulados e observados;
- (ii) Qualidade do ar de fundo - Para a qualidade do ar de fundo dos diferentes poluentes foram usados valores horários relativos ao ano 2014 (ano de referência das emissões) para diversas estações de fundo dos dois domínios usados como base de trabalho (D1 - RLVT e D2 - AML);
- (iii) Emissões – Assumiu-se o ano de 2014 como ano de referência, tendo sido também estudados dois outros cenários de emissões – um Cenário Projetado e um Cenário Base.

Sendo assim, foram usados dois domínios (D1 - RLVT e D2 - AML) e subdomínio (D3 Zona 2 ZER). O domínio D1 visou mais uma análise de “screening” à região em estudo para identificar a(s) área(s) onde existiriam os problemas mais complexos relativamente à qualidade do ar. O domínio D2, focou sobre a AML, identificada durante o trabalho com D1 como sendo a região onde as concentrações dos poluentes em estudo seriam mais elevadas. Por outro lado, o subdomínio D3 permitiu analisar em detalhe a Zona 2 ZER.

Para ambos os domínios foram feitas validações de desempenho do modelo, usando o ano de 2014 como referência. Dessa análise foi possível concluir uma conformidade legal com os objetivos de qualidade legalmente estabelecidos e um comportamento aceitável em termos dos principais indicadores estatísticos de desempenho.

A componente de modelação de qualidade do ar permitiu efetuar a o estudo dos cenários do Plano de Melhoria da Qualidade do ar da região de Lisboa e Vale do Tejo nos termos dos seus impactes na qualidade do ar.

Feitas as corridas para os cenários de Referência, Base e Projetado, tendo como forçamento sinótico o ano desfavorável (2006) foi possível concluir o seguinte:

- Para as partículas PM₁₀:
 - Para o domínio D2, tendo em consideração a localização das estações fixas, verificou-se, com a implantação do cenário base uma redução na média anual de 0-11 % e no 36º máximo diário de 0-10 % e com o cenário projetado uma redução na média anual de 0-14 % e no 36º máximo diário de 2-14 %;
 - O máximo de redução tendo em consideração os locais das estações na média anual e no 36º máximo diário ocorreu para a célula da Avenida da Liberdade;
 - Considerando todo o domínio (mapas) estimaram-se reduções superiores junto as principais vias de tráfego;
 - Para o subdomínio D3, os resultados são da mesma ordem de grandeza aos de D2;
 - Relativamente ao cenário de corte de 20% nas emissões difusas de uma instalação do subsector da indústria metalúrgica, observam-se reduções nas médias anuais que podem atingir os 10% e de 8% no 36º máximo diário.
- Para o dióxido de azoto:
 - Para o domínio D2, tendo em consideração a localização das estações fixas, verificou-se, com a implantação do cenário base uma redução na média anual de 4-15 % e no 19º máximo horário de 4-21 % e com o cenário projetado uma redução na média anual de 4-21 % e no 19º máximo horário de 4-25 %;
 - O máximo de redução tendo em consideração os locais das estações na média anual e no 19º máximo diário ocorreram para a célula da Avenida da Liberdade e Santa Cruz de Benfica, respetivamente.
 - Na Zona 2 da ZER (Subdomínio D3), os resultados obtidos, foram da mesma ordem de grandeza aos de D2.

Como pode ser observado, a aplicação das medidas de controlo de emissões tem influência nos valores simulados, no entanto, com uma percentagem de redução inferior à percentagem de redução das emissões para os mesmos locais.