



Estudo do efeito de infraestruturas verdes na resiliência da cidade de Leiria às alterações climáticas e à poluição do ar

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Daniel Henriques Sérgio

Leiria, novembro de 2021



Estudo do efeito de infraestruturas verdes na resiliência da cidade de Leiria às alterações climáticas e à poluição do ar

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Daniel Henriques Sério

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Luis Miguel Igreja
Aires

Leiria, novembro de 2021

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, no ano letivo 2020/2021, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao meu orientador Professor Dr. Luis Miguel Igreja Aires, pela sua disponibilidade demonstrada durante todo o tempo de elaboração deste trabalho, pelo seu tempo despendido, conhecimentos transmitidos, por toda a paciência que teve comigo em ouvir as minhas ideias, por tentar compreender e ajudar a que se transformassem em algo, por todas as dicas oferecidas da sua parte, pelo seu esforço e gestão de tempo tendo-se sempre demonstrado disponível para mim, um muito obrigado!

Em termos pessoais, quero agradecer aos meus pais, os principais causadores deste triunfo, sem eles não existia, não tinha chegado até aqui, obrigado por tudo, amo-vos muito sei que estão e estarão lá sempre para mim. Quero agradecer também ao meu irmão espero que te orgulhes do mano mais velho.

Aos meus colegas de curso que nestes últimos dois anos partilhámos momentos de aprendizagem e desafios, também aos professores um muito obrigado!

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a minha educação e por todo este percurso, estou grato por tudo foi um prazer.

À colega Cláudia Batista pela amizade destes últimos dois anos e pela ajuda na revisão deste trabalho.

Quero também deixar um agradecimento especial a duas pessoas, à Ana Cláudia e Adriana Neves pela sua disponibilidade, pelas noites passadas juntos a rever este trabalho, um muito obrigado!

E por fim aos meus amigos que não vou enumerar, pois eles sabem quem são, obrigado!

Resumo

Os ambientes urbanos geralmente estão expostos a temperaturas ambientais e superficiais mais elevadas quando comparados com os seus arredores rurais e menos urbanizados. Nas últimas décadas a qualidade do ar nas cidades de Portugal e da Europa tem vindo a melhorar, no entanto as concentrações dos poluentes, nomeadamente poluentes como as partículas em suspensão, o dióxido de azoto e ozono, são ainda preocupantes. O rápido crescimento urbano com características que favorecem o stress térmico, as alterações climáticas que apresentam diversos desafios para os ambientes urbanos e a incerteza da melhoria ou redução da qualidade do ar urbano futuro, faz com que exista uma grande necessidade de investigar medidas de resiliência urbanas.

O principal objetivo deste estudo consistiu em avaliar o impacto da implementação de diferentes medidas de infraestruturas verdes/resiliência na temperatura do ar, qualidade do ar, conforto térmico ao ar livre e nas condições térmicas do edificado em condições climáticas de verão atual, verão e inverno futuro (2041-2070; RCP 8.5) e de onda de calor, numa zona de estudo da cidade de Leiria, utilizando modelações de microescala CFD (Computational Fluid Dynamics) com o modelo ENVI-met.

A estratégia passou por modelar diferentes medidas de resiliência/verdes de forma extrema na área de estudo (400mx350m), tendo-se para isso criado 4 cenários extremos (S1: telhados e paredes verdes, S2: telhados brancos, S3: aumento de árvores, S4: sem vegetação) para se analisar o seu impacto no microclima urbano e poluição do ar em condições de verão futuro. Um cenário misto (S5) foi criado através dos resultados dos quatro cenários extremos como um cenário equilibrado, mais realístico e exequível, caracterizado por telhados brancos, paredes verdes e aumento de 17% de árvores, e simulado em condições de verão e inverno futuro e onda de calor.

Os resultados dos 4 cenários extremos em condições de verão futuro revelaram que as diferentes medidas de resiliência usadas não proporcionaram diferenças assinaláveis em qualquer parâmetro analisado, exceto no cenário S4 (sem vegetação) em que se verificou um aumento representativo da velocidade média do vento (6,8%) e que por sua vez resultou numa diminuição ligeiramente superior a 2% na concentração dos poluentes analisados.

As medidas de resiliência do cenário misto (S5) não tiveram impactos apreciáveis na temperatura do ar, qualidade do ar e conforto térmico ao ar livre nas condições estudadas da pequena área de estudo. Já no que respeita ao edificado os resultados foram muito positivos, mostrando atenuações máximas de 6 °C no interior dos edifícios em condições de Onda de Calor.

Palavras-chave: Infraestruturas Verdes; Microclima urbano, Poluição do ar, modelo ENVI-met

Abstract

Urban environments are generally exposed to higher ambient and surface temperatures compared to their rural and less urbanized surroundings. In recent/last decades, air quality in the cities of Portugal and Europe has improved, however the concentrations of pollutants, namely pollutants such as particulate matters, nitrogen dioxide and ozone, are still concerning. The rapid urban growth with characteristics that favor thermal stress, climate change that present several challenges for urban environments and the uncertainty of future urban air quality improvement or reduction, makes there a great need to investigate urban resilience measures.

The main objective of this study was to evaluate the impact of implementing different measures of green infrastructure/resilience on air temperature, air quality, outdoor thermal comfort and thermal building conditions under current summer, summer and winter with future weather conditions (2041-2070; RCP 8.5) and heat wave, in a study area of the city of Leiria, using CFD (Computational Fluid Dynamics) microscale modeling with the ENVI-met model.

The strategy involved modeling different resilience/green measures in an extreme way in the study area (400mx350m), creating 4 extreme scenarios (S1- roofs and green walls, S2- white roofs, S3- “+” trees, S4- no vegetation) to analyze its impact on urban microclimate and air pollution in future summer conditions. A mixed scenario (S5) was created through the results of the four extreme scenarios as a balanced, more realistic and achievable scenario, characterized by white roofs, green walls and 17% increase of trees, and simulated in future summer and winter and Heat wave conditions.

The results of the 4 extreme scenarios under future summer conditions revealed that the different resilience measures used did not provide significant differences in any parameter analyzed, except in scenario S4 (no vegetation) in which there was a representative increase in the average wind speed (6.8%) and that resulted in a decrease of more than 2% in the concentration of analyzed pollutants.

The mixed scenario resilience measures (S5) had no appreciable impact on air temperature, air quality and outdoor thermal comfort in the studied conditions of the small study area. However, for buildings, the results were very positive, showing maximum attenuation of 6 °C inside buildings under heat wave conditions.

Keywords: Green Infrastructures; Urban microclimate, Air pollution, ENVI-met

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de tabelas	xii
Lista de siglas e acrónimos.....	xiv
1. Introdução	1
1.1. Motivação Científica	1
1.2. Objetivo do estudo.....	3
1.3. Estrutura do estudo.....	3
2. Estado da Arte	4
2.1. Soluções técnicas de infraestruturas verdes.....	4
2.1.1. Árvores	4
2.1.2. Telhados Verdes	6
2.1.3. Paredes verdes	10
2.1.4. Desempenho das infraestruturas verdes na poluição do ar.....	12
2.1.5. Desempenho das infraestruturas verdes na redução da temperatura do ar	13
2.2. Modelação do Microclima Urbano	14
3. Materiais e Métodos	23
3.1. Caracterização e descrição do caso de estudo.....	23
3.2. Recolha de dados	24
3.2.1. Condições meteorológicas ou climáticas.....	24
3.2.2. Concentrações de fundo de poluentes atmosféricos	25
3.2.3. Tráfego rodoviário e cálculo de emissões de poluentes	26
3.3. Definição dos cenários e simulações realizadas	28
3.4. Análise e tratamento de dados.....	35
4. Resultados e Discussão	39

4.1. Impacto das condições de verão futuro no microclima e poluição do ar na área de estudo - modelo Baseline	39
4.2. Impacto dos cenários verdes/extremos no microclima, poluição do ar e criação do cenário misto	41
4.3. Impactos do cenário misto no microclima, poluição do ar e condições térmicas do edificado	56
4.3.1. Em clima de verão futuro (2041-2070)	56
4.3.2. Em clima de inverno futuro (2041-2070)	62
4.3.3. Em condições de onda de calor	68
5. Conclusões	78
Referências Bibliográficas	80
Anexos.....	97
Anexo 1- Descrição do modelo ENVI-met.....	97
Anexo 2- Contagens alocadas em categorias.....	111
Anexo 3- Lista de espécies de árvores e plantas usadas na modelação da área de estudo e sua localização.....	114
Anexo 4- Inputs das emissões dos poluentes do tráfego rodoviário das ruas da área de estudo	113
Anexo 5- Código (Script) de cálculo da média espacial horária	117
Anexo 6	118
Anexo 7	120
Anexo 8	126
Anexo 9	137

Lista de Figuras

Figura 1- Telhados Verdes extensivos (Souza, 2020).	6
Figura 2- Telhados verdes intensivos (Guimapang, 2019).	6
Figura 3- Classificação de telhados verdes (Pinto, 2014).	7
Figura 4 - Telhado verde fotovoltaico (Rocha, 2016).	8
Figura 5 - Exemplos de fachadas verdes (ConstruindoDECOR, 2014; Doce Obra, 2016).	10
Figura 6 - Parede verde viva em Madrid (Iná Naga, 2011).	10
Figura 7 - Desempenho das infraestruturas verdes na qualidade do ar (Abhijith et al., 2017).	13
Figura 8 - Classificação de diferentes áreas urbanas (Toparlar et al., 2017).	18
Figura 9 - Arquitetura do modelo ENVI-met e principais processos (Bruse, 2021).	20
Figura 10- Área de estudo.	23
Figura 11- Mapa de ruas da área de estudo (1- Rua Av. Heróis de Angola; 2 - Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque; 3- Rua Dr. Américo Cortês Pinto; 4- Rua de São Francisco; 5- Rua Camilo Korrodi).	26
Figura 12 - Média semanal do perfil do tráfego rodoviário ao longo de 24h para as diferentes ruas.	27
Figura 13 - Emissões médias diárias de todas as fontes (estradas) da área de estudo ao longo do dia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).	28
Figura 14 - Área de estudo modelada em 3D -" Baseline".	29
Figura 15 - Materiais constituintes da parede e telhado dos edifícios.	29
Figura 16 - Cenário 1 (S1) (Todos os telhados e paredes verdes).	31
Figura 17 - Substratos do telhado verde.	31
Figura 18 - Cenário 2 (S2) (Todos os telhados brancos).	32
Figura 19 - Cenário 3 (S3) ("+" árvores).	33
Figura 20 - Cenário 4 (S4) (Sem vegetação).	33
Figura 21- Zonas grids escolhidas para análise detalhada.	37
Figura 22- Temperatura do ar média espacial ao longo do dia a 1,5m de altura.	39
Figura 23 - Humidade relativa média espacial ao longo do dia a 1,5m de altura.	40
Figura 24 – Índice PET médio espacial ao longo do dia ($Z=1,5\text{m}$).	40
Figura 25- Diferenças na temperatura do ar média espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura (S1 - todos os telhados e paredes verdes; S2 - todos os telhados brancos; S3 - + 31% de árvores; S4 - sem vegetação).	43

Figura 26- Diferenças no índice PET médio espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura (S1 - todos os telhados e paredes verdes; S2 - todos os telhados brancos; S3 - + 31% de árvores; S4 - sem vegetação).	43
Figura 27- Diferenças percentuais na velocidade do vento média espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura.	44
Figura 28 -Diferenças nas concentrações de NOx, O3, PM10 e PM2,5 ao longo do dia (z=1,5m).	44
Figura 29- Grids analisadas detalhadamente.	46
Figura 30- Diferenças nas médias espaciais do índice PET a 1,5m de altura – grid 25_48.	47
Figura 31- Diferenças nas médias espaciais da concentração de NO nos diferentes cenários ao longo do dia na grid 106_71.	48
Figura 32-Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura.	49
Figura 33- Rua 4 no S3 na área modelada.	50
Figura 34- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 110_92.	51
Figura 35 - Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 110_92.	51
Figura 36- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 93_104.	52
Figura 37- Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 93_104.	53
Figura 38- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 71_85.	54
Figura 39- Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 71_85.	55
Figura 40- Cenário Misto Modelado (S5).....	55
Figura 41- Diferença percentual da concentração de NO ao longo do dia na grid 25_48 a 1,5m de altura.	57
Figura 42- Boa fluidez do ar na rua 4 da área de estudo.....	58
Figura 43- Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.	58
Figura 44- Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline.....	59
Figura 45- Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline.....	59
Figura 46-Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5-verão futuro e respetivo Baseline.....	60
Figura 47-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspetiva A.	60
Figura 48 -Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspetiva B.	61

Figura 49- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspetiva C.	61
Figura 50- Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 110_92.	64
Figura 51-Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.	64
Figura 52 - Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline.	65
Figura 53-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline.	65
Figura 54-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - inverno futuro e respetivo Baseline.	66
Figura 55-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva A.	66
Figura 56-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva B.	67
Figura 57-Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva C.	67
Figura 58- Diferença percentual da concentração média espacial de NOx ao longo das 48h.	69
Figura 59- Diferença na média espacial do índice PET ao longo das 48h.	70
Figura 60- Diferença percentual da concentração horárias de NO ao longo das 48h da grid 25_48.....	70
Figura 61- Médias horárias e Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.....	71
Figura 62- Médias horárias e Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 110_92.....	72
Figura 63- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline.....	72
Figura 64- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline.....	73
Figura 65- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5- Onda de Calor e respetivo Baseline.....	73
Figura 66- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas do ar no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva A.	74
Figura 67- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva B.	74
Figura 68- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva C.	75

Lista de tabelas

Tabela 1- Dados climáticos usados nas simulações (valores médios de longo termo).....	25
Tabela 2- Concentrações de fundo dos poluentes na área de estudo	25
Tabela 3 - Valores dos diferentes parâmetros dos materiais constituintes da parede	30
Tabela 4 - Características do PVC	32
Tabela 5 - Inputs ENVI-met	34
Tabela 6- Parâmetros fisiológicos.....	35
Tabela 7 - Níveis de Percepção térmica e do grau de stress fisiológico	36
Tabela 8 -Diferenças nos parâmetros analisados das condições de verão futuro para o verão atual.....	41
Tabela 9- Médias diárias dos parâmetros estudados para as duas simulações Baseline realizadas.....	41
Tabela 10 - Diferenças percentuais das médias diárias de cada parâmetro a 1,5m de altura	42
Tabela 11- Resumo dos impactos das Infraestruturas e medidas de resiliência simuladas nos diferentes parâmetros estudados	45
Tabela 12 – Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 25_48	46
Tabela 13- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 106_71	48
Tabela 14- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 110_92	50
Tabela 15- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 93_104	52
Tabela 16- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 71_85	54
Tabela 17- Diferenças percentuais da média espacial dos diferentes parâmetros a 1,5m de altura	56
Tabela 18-Médias espaciais a 1,5m de altura dos diferentes parâmetros dos dois cenários.....	56
Tabela 19- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros nas diferentes grids analisadas	57
Tabela 20- Diferenças percentuais das médias espaciais dos diferentes parâmetros estudados.....	62
Tabela 21- Médias espaciais dos diferentes parâmetros	63
Tabela 22- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros estudados nas diferentes grids analisadas	63
Tabela 23-Diferenças percentuais das médias espaciais dos diferentes parâmetros estudados em condições de Onda de calor	68

Tabela 24- Médias espaciais dos diferentes parâmetros nas diferentes simulações em condições de Onda de Calor.....	69
Tabela 25- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros nas diferentes grids analisadas em condições de Onda de Calor	71
Tabela 26- Medidas de resiliência	77

Lista de siglas e acrónimos

1D	Uma Dimensão
3D	Três Dimensões
CLA	Camada Limite Atmosférica
CFD	Computational Fluid Dynamics
COV`s	Compostos Orgânicos Voláteis
E	Energia Cinética
EBM	Modelos de balanço de Energia
EMAAC	Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
GTA	Área de Grande Toronto
LSM	Modelo de superfície terrestre de Noah
ICU	Ilha de Calor Urbana
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IV	Infraestruturas Verdes
MMM	Modelos Meteorológicos de Mesoescala
NO	Óxidos de Azoto
NO ₂	Dióxidos de Azoto
NO _x	Óxidos de Azoto
NW	Noroeste
NWP	Modelos de Previsão Numérica
PET	Temperatura Fisiológica Equivalente
PM _{2,5}	Partículas em suspensão (com diâmetro inferior a 2,5 µm)
PM ₁₀	Partículas em Suspensão (com diâmetro inferior a 10 µm)
PMAAC	Plano Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas
PMV/PPD	Voto Médio Estimado
PVC	Cloreto de Polivinilo
RCP	Representative Concentration Pathway
S1	Cenário 1
S2	Cenário 2
S3	Cenário 3

S4	Cenário 4
S5	Cenário Misto
SET	Temperatura Efetiva Padrão
SLUM	Modelo de cobertura urbano de camada única
TKE	Modelo de Energia Cinética Turbulenta
UTCI	Índice Térmico Universal ou Índice de clima térmico universal
WRF	Modelo de Pesquisa e Previsão do Tempo

1. Introdução

1.1. Motivação Científica

Nas últimas décadas a qualidade do ar nas cidades de Portugal e da Europa tem vindo a melhorar, no entanto as concentrações dos poluentes, nomeadamente poluentes como as partículas em suspensão, o dióxido de azoto e o ozono, são ainda preocupantes, ultrapassando frequentemente os valores limites ou limiares de proteção da saúde humana (EEA, 2019). Esta preocupação torna-se mais evidente pelo facto de que 70% da população europeia vive em cidades e estima-se que esse número irá aumentar para os 80% nas próximas décadas. Em Portugal, cerca de 6 milhões de portugueses vivem em cidades (61%), e estima-se que até 2050 este número chegue a 75% da população portuguesa (Carvalho et al., 2017).

A poluição numa cidade depende não só das emissões existentes, mas também das condições climáticas que influenciam a dispersão da poluição. No panorama atual de alterações climáticas torna-se importante estudar e compreender a interação entre as alterações climáticas e a qualidade do ar (Markakis et al., 2014), pois é fundamental que as cidades se preparem e se tornem capacitadas para absorver os impactos relacionados com as alterações climáticas e a má qualidade do ar (Rafael et al., 2018).

As cidades apenas cobrem 2% da superfície terrestre, ou seja, uma pequena fração da Terra. Segundo EEA (2019) são as principais fontes de gases com efeito de estufa, contribuindo com cerca de 70%-90% para as emissões totais de carbono (EEA, 2019). Além de poderem estar a contribuir significativamente para as alterações climáticas, elas são particularmente vulneráveis aos seus efeitos. Eventos climáticos extremos podem ser especialmente perturbadores para as cidades devido ao alto nível de urbanização e crescimento demográfico (Rafael et al., 2020).

Vários estudos têm mostrado que os eventos climáticos extremos, incluindo chuvas fortes, tempestades, ciclones, secas, inundações e ondas de calor têm-se tornado mais frequentes e severos (Kharin & Zwiers, 2000; Santos & Corte-Real, 2006). Watkiss et al. (2009) referem que a taxa de mortalidade relacionada com episódios de ondas de calor extremo na Europa pode duplicar até 2040 e aumentar 10 vezes mais até ao final do século atual.

Os ambientes urbanos ou as cidades geralmente estão expostos a temperaturas ambientais e superficiais mais elevadas quando comparados com os seus arredores rurais e menos urbanizados. A maioria das superfícies urbanas construídas são compostas por materiais com baixo albedo o que significa uma baixa reflexão da radiação solar que resulta numa grande capacidade de armazenamento de calor, calor esse que é libertado durante a noite. Isto origina e contribui para a chamada ilha de calor urbana (ICU), ou seja, existe um forte

gradiente térmico entre área urbana (maior temperatura) e os arredores menos urbanizados e rurais (menor temperatura) (Carvalho et al., 2017).

As Ondas de calor e as ICU (ilhas de calor urbana) são dois fenómenos meteorológicos distintos, no entanto vários estudos mostraram que as ondas de calor e as ICU podem estar fortemente ligados, em que as ondas de calor aumentam as temperaturas ambientes, mas também intensificam os efeitos das ICU (Basara et al., 2010; Cheval et al., 2009; Founda et al., 2015). As ondas de calor no futuro próximo podem-se tornar mais duradouras, frequentes e intensas e concomitantemente com as ICU originar eventos de stress térmico extremo em ambientes urbanos (Li & Bou-Zeid, 2013). Este stress térmico poderá traduzir-se num efeito de bola de neve pois o maior consumo de energia para refrescar o interior dos edifícios poderá libertar mais calor, mais poluentes e gases de efeito de estufa para atmosfera (Carvalho et al., 2017).

Sá et al. (2016) avaliaram a qualidade do ar em Portugal continental nos cenários RCP* 8.5, prevendo uma degradação da qualidade do ar para o futuro climático próximo (2046-2065), referindo a necessidade das autoridades e decisores políticos portugueses gerarem e implementarem estratégias de gestão da qualidade do ar que tenham em conta os impactos das alterações climáticas.

O rápido crescimento urbano com características que favorecem o stress térmico citadino como já indicado, as alterações climáticas que apresentam diversos desafios para os ambientes urbanos e a incerteza da melhoria ou redução da qualidade do ar urbano futuro, faz com que exista uma grande necessidade de investigar medidas de resiliência urbanas.

A introdução ou o aumento das infraestruturas verdes e superfícies brancas (superfícies com albedo próximo de 1) têm sido apontadas como soluções e estratégias para combater e lidar com os eventos climáticos futuros, bem como melhorar a qualidade do ar e o conforto térmico da população (Carvalho et al., 2017; Rafael et al., 2017). A capacidade destas medidas reduzirem as temperaturas urbanas está relacionada com a reflexão solar, evapotranspiração, sombreamento, alteração do fluxo de calor sensível, entre outros. Estudos de implementação deste tipo de soluções baseados na natureza e superfícies brancas concluíram que podem existir benefícios e constrangimentos dependendo das medidas aplicadas, do caso de estudo e das suas características, daí a necessidade de trabalhos científicos e de modelação para a implementação de medidas e cenários verdes (Rafael et al., 2020).

Apesar de estudos de modelação da aplicação e eficácia de tais medidas de resiliência para mitigar as alterações climáticas e melhorar a qualidade do ar não serem novidade no mundo científico, desconhecemos a existência de algum estudo aplicado à área urbana da cidade de Leiria.

No futuro próximo, espera-se tanto num cenário RCP* 4.5 como num cenário RCP* 8.5 um aumento da frequência das ondas de calor e do número de dias de ondas de calor na região de Leiria (IPMA, 2021c), sendo assim é fundamental estudar através de modelação a eficácia

da implantação de tais medidas e soluções técnicas em mitigar o calor urbano extremo, a poluição do ar e melhorar o conforto térmico da população.

*RCP - Representative Concentration Pathway, ou em português, trajetória representativa de concentrações. RCP são cenários que preveem a concentração de CO₂ média no planeta terra, sendo que RCP 4.5 é um patamar de estabilização intermediário em que o forçamento radiativo está estabilizado a aproximadamente 4,5Wm⁻² e 6,0Wm⁻² após 2100 e o RCP8.5 é um patamar elevado para cada forçamento radiativo e superior a 8,5 Wm⁻² em 2100 e que continua a aumentar durante algum tempo (Stocker & Qin, 2013).

1.2. Objetivo do estudo

O principal objetivo deste estudo consiste em avaliar o impacto da implementação de diferentes medidas verdes na temperatura do ar, conforto térmico ao ar livre e qualidade do ar em condições climáticas de verão atual, verão e inverno futuro (2041-2070; RCP 8.5) e de onda de calor, numa zona de estudo da cidade de Leiria, utilizando modelações de microescala CFD (Computational Fluid Dynamics) com o modelo ENVI-met, um modelo de microclima urbano não hidrostático que simula variáveis meteorológicas em áreas urbanas com altas resoluções espaciais. Pretende-se também avaliar e analisar a variação da temperatura das fachadas dos edifícios e do interior dos edifícios com a implementação das diferentes medidas.

O conhecimento sobre os resultados da aplicação de infraestruturas verdes para melhorar a qualidade do ar, conforto térmico ao ar livre e mitigar as altas temperaturas é essencial para os planeadores urbanos e para os decisores políticos. Este estudo pretende assim, contribuir com informações pertinentes que auxiliem a definição de estratégias, metodologias, decisões de planeamento e políticas urbanas futuras.

1.3. Estrutura do estudo

No Capítulo I expõe-se a relevância do tema em estudo e os objetivos do estudo. No Capítulo II apresenta-se o estado da arte ou o enquadramento teórico sobre as infraestruturas verdes e a modelação do microclima urbano. No Capítulo III dão-se a conhecer os materiais e métodos usados, caracterizando-se a área de estudo na cidade de Leiria, o processo da recolha e dados utilizados, a escolha de diferentes cenários verdes de resiliência e por fim a explicação do processo de tratamento e análise de dados. Seguidamente, no Capítulo IV, expõem-se os resultados e a discussão dos mesmos. Por último no Capítulo V as conclusões e reflexões finais com propostas de melhoria para possíveis trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Soluções técnicas de infraestruturas verdes

Para um bom estudo de aplicação de infraestruturas verdes como soluções de resiliência às alterações climáticas e à poluição do ar, é importante compreender as características das infraestruturas verdes e entender que muitas vezes a vegetação/infraestrutura verde é dominada pela geometria do ambiente construído. Neste capítulo apresenta-se uma breve descrição, visão geral das vantagens, desvantagens e viabilidade das infraestruturas verdes urbanas.

2.1.1. Árvores

Uma árvore urbana é uma planta lenhosa perene que cresce em vilas e cidades, normalmente tendo um único caule ou tronco e geralmente uma copa distinta crescendo a uma altura considerável e tendo ramos laterais (Roy et al., 2012). As árvores fornecem uma enorme gama de serviços e benefícios para as cidades e seus residentes.

Saúde e bem-estar social são dos benefícios mais importantes para o ser humano que as florestas urbanas podem proporcionar. As árvores, especialmente as espécies maduras, plantadas nos locais certos, podem reduzir a poluição do ar como por exemplo o material particulado que é extremamente prejudicial à saúde humana. A presença de árvores, espaços verdes e ambientes mais verdes estão fortemente ligados a pensamentos negativos reduzidos, sintomas de depressão reduzidos, melhor humor relatado e maior satisfação com a vida (Turner-Skoff & Cavender, 2019).

As árvores podem promover uma educação de qualidade, podem ajudar a população no desenvolvimento cognitivo e na sua educação. Segundo Kuo et al. (2018) os alunos que aprendem na presença de árvores e da natureza melhoram o envolvimento na sala de aula (Kuo et al., 2018).

Relativamente à economia e recursos, as árvores podem fornecer muitos benefícios a uma cidade tais como a redução do uso/consumo de energia, aumento do valor das propriedades, apoio ao turismo, a sombra das mesmas pode reduzir a taxa de envelhecimento de estradas/pavimentos e também podem fornecer recursos como alimentos para a comunidade.

Um dos maiores benefícios que as árvores urbanas podem trazer às cidades é a mitigação às mudanças climáticas. O aumento da temperatura traz riscos para a saúde humana, como o aumento das mortes e doenças infecciosas relacionadas com o calor. Com um bom planeamento citadino e as árvores devidamente colocadas pode-se reduzir as temperaturas em ambientes construídos, não só através da absorção da radiação solar mas também por

meio da evapotranspiração (Turner-Skoff & Cavender, 2019). Outro benefício das árvores é o fornecimento de alimento e habitat para os pássaros, invertebrados, mamíferos e plantas.

As árvores podem ser ferramentas importantes para a gestão da água numa área urbana, ajudam a reduzir e a interceptar águas pluviais, atenuando assim as inundações provocadas pelas mesmas. Com menos contacto em superfícies impermeáveis, a água da chuva, torna-se mais fria e tem menos poluentes quando as mesmas entram nos cursos de água locais (Berland et al., 2017).

Apesar dos pontos positivos, as árvores urbanas também apresentam alguns constrangimentos como dificuldades financeiras associadas à manutenção, danos às propriedades, questões de segurança associadas à visibilidade, produção de Compostos Orgânicos Voláteis (COV`s) que podem aumentar a poluição do ar (ozono troposférico). No entanto a quantidade de ozono que uma árvore absorve pode ser maior do que qualquer ozono produzido por meio de COV`s (Calfapietra et al., 2013; Salmond et al., 2016).

A presença de árvores numa cidade pode, no entanto, influenciar os mecanismos de dispersão dos poluentes, podendo gerar concentrações de poluição mais elevadas em certos locais. Alguns estudos defendem que as árvores urbanas à beira das estradas aumentam a concentração de poluentes. Por exemplo, Vos et al. (2013) concluíram que a vegetação urbana à beira da estrada leva ao aumento das concentrações de poluentes, pois o processo de ventilação que é responsável pela diluição dos poluentes emitidos pelo tráfego rodoviário é reduzido. O planeamento urbano e a implementação de áreas verdes urbanas requerem uma boa avaliação prévia; diversos estudos referem que a implementação de árvores nas cidades poderá aumentar os níveis de poluição do ar devido à redução do fluxo do vento (Amorim et al., 2013; Vos et al., 2013).

No entanto, também tem sido constatado que o alinhamento das árvores com o vento incidente pode melhorar a ventilação/dispersão dos poluentes atmosféricos (Amorim et al., 2013; Abhijith & Gokhale, 2015). O efeito das árvores na qualidade do ar é assim dependente do espaço, do seu posicionamento, dos padrões do fluxo do vento local, do desenho urbano e das condições climáticas e meteorológicas locais (Rafael et al., 2018).

Rafael et al. (2018) chegaram à conclusão que de uma maneira geral a ausência de vegetação não beneficia a qualidade do ar urbano, tendo os seus resultados mostrado que a implantação de uma área verde urbana melhorava a qualidade do ar no seu caso de estudo. Eles avaliaram a influência de um conjunto de medidas de resiliência baseadas em soluções naturais, no fluxo do vento e na dispersão de poluentes atmosféricos (NO_x e PM10) de uma área urbana. Modelaram e simularam 4 cenários diferentes, um cenário de base sem vegetação, um cenário urbano verde (inclusão de uma área verde na área de estudo), um cenário de telhados verdes e um cenário sem árvores, sendo que o cenário urbano verde foi o que produziu melhores resultados, enquanto a aplicação de coberturas verdes mostrou os piores resultados onde a concentração dos poluentes aumentou significativamente. O cenário sem árvores mostrou uma ligeira redução na concentração dos poluentes, principalmente relacionada com a dissipação nos pontos de maior concentração promovidos pelas árvores, no entanto

também revelou um aumento da concentração de poluentes atmosféricos junto às fontes emissoras.

2.1.2. Telhados Verdes

Os telhados verdes são geralmente utilizados como meio de melhoria da eficiência energética dos edifícios, mas criam inevitavelmente outros benefícios tanto ambientais, como sociais e económicos. Estas estruturas verdes são também muitas vezes indicadas como solução para o problema da falta de espaço verde em áreas urbanizadas (Perini et al., 2011).



Figura 1- Telhados Verdes extensivos (Souza, 2020).



Figura 2- Telhados verdes intensivos (Guimapang, 2019).

Os telhados verdes são classificados normalmente como extensivos ou intensivos (Figuras 1 e 2), apesar de alguns autores incluírem também a classificação de semi-intensivos. Os telhados verdes extensivos são telhados que requerem menor profundidade do solo, menos manutenção e menos necessidades de água, enquanto os telhados verdes intensivos requerem maior profundidade do solo pois são geralmente um jardim no telhado.

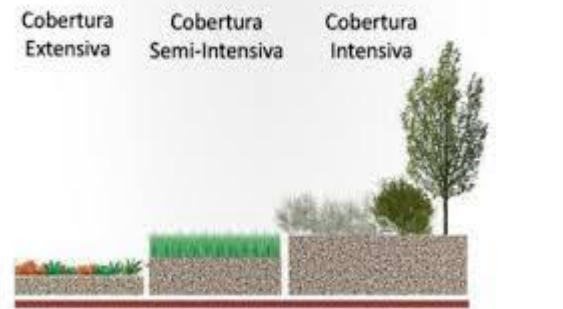


Figura 3- Classificação de telhados verdes (Pinto, 2014).

Para melhor entendimento dos benefícios, vantagens e desvantagens e sua viabilidade, apresenta-se os seus benefícios divididos em dois grupos (Manso et al., 2021): a) benefícios de escala de construção e b) benefícios de escala urbana.

Benefícios de escala de Construção

Redução do consumo de energia

Ao comparar-se os telhados verdes com os telhados convencionais, os telhados verdes apresentam maior isolamento térmico devido à espessura do substrato. Para além disso, a presença de plantas nos telhados verdes confere maior albedo à superfície. As plantas do telhado verde também contribuem para a evapotranspiração, o que reduz a temperatura superficial dos telhados.

Em edifícios não isolados, o impacto dos telhados verdes é muito superior do que nos edifícios isolados, ou seja, quanto melhor o isolamento do edifício, menor a contribuição do telhado verde.

Do ponto vista do ciclo de vida do telhado branco e do telhado verde, Manso et al. (2021) concluíram que o telhado verde pode apresentar um nível menor de consumo de energia do que o telhado branco, especialmente em edifícios não isolados.

Melhoria do desempenho fotovoltaico

Na energia fotovoltaica, o telhado verde pode melhorar a eficiência das células fotovoltaicas, ao serem expostas a temperaturas ambientes mais baixas. À medida que a superfície fica mais quente, os painéis fotovoltaicos tornam-se menos eficientes na conversão de radiação solar em eletricidade (Manso et al. 2021). Os telhados verdes podem melhorar o desempenho elétrico fotovoltaico, uma vez que a vegetação tem o potencial de diminuir a temperatura da superfície fotovoltaica.

O estudo de Lamnatou & Chemisana (2014) indica como resultados da avaliação do ciclo de vida que os telhados verdes fotovoltaicos são mais ecológicos a longo prazo do que os telhados fotovoltaicos baseados em telhados convencionais, devido ao aumento da produção de energia.



Figura 4 - Telhado verde fotovoltaico (Rocha, 2016).

Redução da transmissão do som

Com base em estudos já realizados, está provado que os telhados verdes diminuem os ruídos ao nível das ruas em áreas urbanas graças ao alto coeficiente de absorção da camada de vegetação (Connelly & Hodgson, 2013; Galbrun & Scerri, 2017). Esta vantagem/ benefício verifica-se mais em telhados verdes de edifícios baixos, pois a camada de vegetação deve ser exposta ao campo sonoro urbano direto de forma a ser uma superfície de absorção efetiva (Berardi et al., 2014).

Em cidades e zonas de habitação perto de um aeroporto, os telhados verdes podem servir como meio de redução do som; existem exemplos de projetos aplicados em edifícios no aeroporto de Schiphol em Amsterdam e no aeroporto internacional de Frankfurt (e.g. Azkorra et al., 2015; UKEssays, 2018)

Tratamento de águas cinzentas

A reutilização e reciclagem de águas cinzentas é uma alternativa para locais onde os recursos naturais de água são escassos, promovendo a sustentabilidade. Em vez de se usar água doce e tratada para a irrigação ou rega destas infraestruturas, pode-se muito bem utilizar as águas cinzentas.

Melhoria da vida útil

Os telhados verdes embora mais caros, têm uma vida útil mais longa do que os telhados convencionais, isto se receberem uma manutenção adequada. Em Berlim existem telhados verdes à mais de 90 anos sem serem substituídos (Porsche & Köhler, 2003).

Maior valor da propriedade

Com base em resultados de vários estudos as propriedades com telhados verdes têm valor mais elevado (e.g. Ichihara & Cohen, 2011).

Políticas e investimentos

Existem muitas políticas e investimentos que podem ser implementados, cada país deve selecionar as suas políticas de incentivo mais adequadas, tendo em consideração as suas

condições socioeconómicas e as forças de mercado locais (Conway et al., 2020; Dhakal & Chevalier, 2017).

Os incentivos podem ser classificados como propriedade tributária, taxa de águas pluviais, redução de outros impostos, subsídios, redução da taxa de juros, licença de construção, certificação de sustentabilidade, obrigações por lei ou processo administrativo ágil (Manso et al., 2021).

Benefícios de escala urbana

Redução do efeito de ilha de calor urbano

Este fenómeno que ocorre especialmente em áreas urbanas muito densas, e resulta de uma diferença de temperatura entre a área urbana e as áreas rurais próximas, é influenciado pela poluição do ar, velocidade do vento, temperatura das superfícies, altura dos edifícios e falta de evaporação da água (e.g. Asadi et al., 2020; Imran et al., 2018; Sanchez & Reames, 2019; Yang et al., 2018).

Uma forma de mitigar este efeito é através do arrefecimento das superfícies usando telhados verdes.

Redução do ruído Urbano

Os telhados e fachadas de edifícios dão origem a múltiplas reflexões e difrações de ondas sonoras.

Uma vez que os telhados verdes absorvem, dispersam e influenciam a reflexão do som, têm um imenso potencial em reduzir a poluição sonora urbana. Para além disso, também reduzem a transmissão do som para o interior do edifício (Galbrun & Scerri, 2017).

Melhor gestão da hidrologia urbana

Cada vez são menos as superfícies nas cidades com capacidade de retenção de água, ou seja, a maior parte das superfícies são impermeáveis, o que resulta muitas vezes nas sobrecargas dos sistemas de esgotos e em inundações, em circunstância de precipitação intensa.

Os telhados verdes têm a capacidade de reter água, o que contribui para a redução do escoamento. Também têm a capacidade de atrasar o pico de escoamento das águas pluviais.

Melhoria da qualidade do ar

Compreender os efeitos diretos de telhados verdes na qualidade do ar não é simples pois existem vários fatores que influenciam e afetam os resultados, no entanto os telhados verdes afetam o nível de poluição indiretamente com a diminuição do consumo de energia do edifício (Hashemi et al., 2015; Refahi & Talkhabi, 2015).

Outros Benefícios

Para além dos benefícios já apresentados, os telhados verdes apresentam outros benefícios como por exemplo: a melhoria dos espaços urbanos que pode ser usada como ferramenta da saúde e bem-estar dos cidadãos, o reforço da qualidade ambiental, a preservação ecológica, a conectividade urbana em espaços de convívio, o incremento do valor estético de edifícios, a produção de alimentos de forma sustentável e também a criação de espaços para uso recreativo.

2.1.3. Paredes verdes

O conceito de paredes verdes refere-se a todos os sistemas que permitem tornar uma superfície vertical mais verde (Manso & Castro-Gomes, 2015). As Paredes verdes são normalmente divididas em dois sistemas principais: as fachadas verdes e as paredes vivas.



Figura 5 - Exemplos de fachadas verdes (ConstruindoDECOR, 2014; Doce Obra, 2016).

As fachadas verdes são geralmente baseadas na aplicação de plantas trepadeiras ou penduradas ao longo da superfície vertical. Podem ser classificadas como diretas e indiretas. As fachadas verdes diretas não precisam de suporte uma vez que as trepadeiras aderem às paredes através de raízes adventícias, enquanto as fachadas verdes indiretas incluem uma estrutura de suporte para a vegetação.



Figura 6 - Parede verde viva em Madrid (Iná Nage, 2011).

Os sistemas de parede viva podem ser classificados como contínuos ou modulares, consoante o seu método de aplicação. Os sistemas de parede viva contínuos conhecidos também por jardins verticais, são baseados na aplicação de telas leves e permeáveis, em que as plantas são inseridas individualmente. Os sistemas modulares resultam na instalação de vários elementos modulares (meios de cultivo onde as plantas podem crescer).

Os sistemas de paredes vivas podem exigir irrigação e nutrientes de forma frequente, enquanto que as fachadas verdes não (Manso et al., 2021; Manso & Castro-Gomes, 2015; Medl et al., 2017).

Cobrir os edifícios com vegetação, ou tornar a envolvente dos edifícios mais verde, quando aplicado a uma escala urbana significativa, permite obter benefícios tanto ambientais, como sociais e económicos (Manso & Castro-Gomes, 2015; Sendra-Arranz et al., 2020).

Estudos realizados demonstraram potencial das paredes verdes em melhorarem a eficiência energética e conforto térmico dos edifícios, devido ao resfriamento passivo através da redução da temperatura superficial e sombreamento fornecido pelas plantas (Coma et al., 2017; Mitterboeck & Korjenic, 2017; Pérez et al., 2017). A parede verde atua como um amortecedor de temperaturas externas, proporciona temperaturas mais baixas durante o dia, e ao mesmo tempo, a camada de vegetação proporciona temperaturas mais elevadas durante a noite (Sendra-Arranz et al., 2020).

Devido ao aumento de edificações, superfícies impermeáveis e diminuição dos espaços verdes em cidades, os benefícios do sombreamento e resfriamento evaporativo causado pelas plantas tem diminuído, o que têm potenciado os efeitos da ilha de calor. O estudo de Victorero et al., (2015) confirma o alto potencial que as paredes verdes têm em mitigar os problemas decorrentes do efeito da ilha de calor, relembrando que o efeito da ilha de calor representa um risco tanto ambiental como para a saúde humana, ou seja, as paredes verdes contribuem para a melhoria do microclima nas cidades, tanto dentro como fora dos edifícios (Medl et al., 2017; Sendra-Arranz et al., 2020).

Outro benefício social e ambiental que as paredes verdes apresentam é o seu potencial em reduzir a poluição sonora em ambientes urbanos, uma vez que absorvem, dispersam e influenciam a reflexão do som, melhorando assim as características acústicas do ambiente urbano (Manso et al., 2021). Isto indica que as paredes verdes melhoram o bem-estar das pessoas, reduzindo os incómodos sonoros de longo prazo (Medl et al., 2017).

Em grandes cidades e zonas urbanas com superfícies com alto reflexo de brilho e dispersão da radiação ultravioleta, a poluição visual prejudica a visão após um longo período de exposição. A vegetação ajuda a controlar a intensidade da luz e bloqueia a luz solar, reduzindo assim o brilho, aumentando a segurança e a visibilidade (Medl et al., 2017). Um cenário urbano mais natural (com mais espaços verdes) otimiza assim a estética dos edifícios, fornece uma qualidade visual agradável e ajuda as pessoas com sintomas psicossociais relacionados com o stress, promovendo uma recuperação mais rápida (Ulrich et al., 1991).

Para além dos benefícios já apresentados, as paredes verdes também ampliam a valorização da propriedade e contribuem para o aumento da biodiversidade.

Os custos de instalação e manutenção de paredes verdes são geralmente mais elevados do que a maioria dos sistemas de revestimento convencionais (Perini & Rosasco, 2013). A própria estrutura dos sistemas verdes, sejam fachadas verdes ou paredes vivas, tem uma vida útil de 50 anos, isto com a manutenção adequada ao longo do ciclo de vida. Ottelé et al. (2011) concluem que nenhum dos sistemas verticais verdes é sustentável, exceto o sistema da fachada verde direta que pode ser economicamente sustentável.

A decisão de qual sistema de parede verde é mais apropriado para um determinado projeto deve depender não apenas da construção e das restrições climáticas, mas também do impacto ambiental de seus componentes (por exemplo, energia ou água usada e reciclabilidade de materiais) e custos associados durante todo o seu ciclo de vida (Manso & Castro-Gomes, 2015).

Prevê-se que os padrões e as normas para as paredes vivas ainda levarão alguns anos a implementar, até lá o mundo das paredes vivas manter-se-á um lugar de teste e inovações (Riley, 2017).

2.1.4. Desempenho das infraestruturas verdes na poluição do ar

As infraestruturas verdes são consideradas uma solução de planeamento urbano para melhorar a qualidade do ar. Soluções essas como árvores nas ruas, barreiras de vegetação, paredes verdes e telhados verdes, influenciam a dispersão local de poluentes e auxiliam na deposição e remoção de poluentes transportados pelo ar.

Um estudo de revisão (Abhijith et al., 2017) sobre a redução da poluição do ar através de infraestruturas verdes em ambientes de estradas abertas e do tipo *canyon*, concluiu que (Figura 7):

- Em condições de ruas do tipo *canyon*, as árvores geralmente têm um impacto negativo na qualidade do ar local. O aumento do espaçamento entre árvores e a redução da área das copas por meio de aumento das podas, poderá melhorar a qualidade do ar ao reduzir a concentração de poluentes locais. A vegetação densa e de baixo nível (barreira de vegetação ou sebes) impede a passagem de poluentes de origem rodoviária produzidos a nível do solo (nomeadamente partículas em suspensão), detendo assim uma grande quantidade dos mesmos que ali se depositam, o que mostra ter um impacto positivo.
- Em condições de estrada aberta, soluções como barreiras de vegetação e árvores têm um impacto positivo na qualidade do ar.
- Quanto às paredes verdes, embora menos estudadas, concluiu-se que a capacidade de remover poluentes é menor do que as barreiras de vegetação e as árvores. A redução da poluição através dos telhados verdes ainda é inferior à verificada nas paredes verdes.

- A combinação de vegetação e medidas de controle passivo de poluição do ar tem o potencial de maximizar a redução nas concentrações de poluentes, mais do que qualquer intervenção individual tanto em estradas do tipo *canyon* quanto em estradas abertas.



Figura 7 - Desempenho das infraestruturas verdes na qualidade do ar (Abhijith et al., 2017).

2.1.5. Desempenho das infraestruturas verdes na redução da temperatura do ar

Aumentar a quantidade de vegetação urbana ou de infraestruturas verdes em uma cidade é uma maneira de mitigar ou reduzir as temperaturas máximas e a amplitude térmica urbana. No entanto, para reduzir de forma significativa a ilha de calor urbana é necessária uma ampla implementação de infraestruturas verdes. Num estudo na cidade de Melbourne na Austrália, sugeriram um aumento de 10 % na cobertura vegetal para reduzir as temperaturas diurnas da superfície urbana em 1°C (Coutts & Harris, 2013).

Numa breve visão geral, apresenta-se alguns pontos fortes dos principais elementos de infraestruturas verdes em reduzir as temperaturas urbanas (Norton et al., 2015):

- Árvores: solução ideal para o sombreamento das superfícies e dos espaços pedestres; favorece também o arrefecimento por evapotranspiração.
- Espaços verdes urbanos: podem potencialmente fornecer “ilhas de frio” em áreas urbanas quentes. O aumento da área total de espaços verdes dentro da cidade pode reduzir significativamente as temperaturas na escala da cidade, sendo que a colocação de espaços verdes urbanos a favor do vento em áreas particularmente quentes ou com populações vulneráveis criará grandes benefícios de arrefecimento.
- Fachadas verdes: reduzem o aquecimento das paredes dos edifícios, principalmente paredes com alta exposição solar, promovem o arrefecimento por meio da evapotranspiração e são um bom elemento de implementação de infraestrutura verde quando existe obstrução de espaço.

- Telhados verdes: reduzem as temperaturas da superfície urbana, bem como as necessidades de arrefecimento do ar dentro dos edifícios.

O estudo de Norton et al. (2015) apresenta uma proposta hierárquica de 5 etapas para o planeamento e implantação de infraestruturas verdes para mitigar o excesso de calor urbano. Através destas etapas selecionam-se estrategicamente a infraestruturas verdes que melhor se adequam a um determinado local. As 5 etapas são as seguintes:

1ª Etapa - Identificar bairros urbanos prioritários;

2ª Etapa – Caracterizar as infraestruturas verdes urbanas existentes e infraestrutura cinza;

3ª Etapa - Maximizar o benefício de arrefecimento das infraestruturas verdes existentes;

4ª Etapa - Desenvolver uma hierarquia de ruas para a nova integração das infraestruturas verdes;

5ª Etapa – Selecionar as novas infraestruturas verdes com base nas características do local e potencial de arrefecimento.

O estudo supracitado ainda refere que existem duas lacunas importantes no conhecimento, que podem impedir a implementação bem-sucedida das infraestruturas verdes urbanas em climas quentes. A primeira lacuna é a falta de dados específicos da espécie sobre a ecofisiologia vegetal, termorregulação e uso de água; a segunda é a falta de uma compreensão quantitativa das necessidades de água de diferentes sistemas de infraestruturas verdes urbanas e espécies de plantas. Ainda existe pouca informação sobre a necessidade de água das árvores urbanas e sua transpiração, apesar de receberem maior atenção de pesquisa e estudo (May et al., 2013; McCarthy & Pataki, 2010; Pataki, Carreiro, et al., 2011; Pataki, McCarthy, et al., 2011).

Qualquer iniciativa de infraestruturas verdes urbanas deve determinar quais são os principais objetivos desde o início, pois essa decisão pode impactar negativamente outros benefícios dos serviços ecossistémicos fornecidos pelas infraestruturas verdes. Se uma iniciativa de infraestruturas verdes tem vários objetivos, isso irá tornar muito mais difícil as decisões pois irá compreender muito mais fatores.

2.2. Modelação do Microclima Urbano

O estudo da climatologia urbana ou microclima urbano tem uma grande relevância para os designers urbanos (arquitetos, engenheiros), decisores políticos e também para a sociedade em geral. Os decisores políticos (exemplo: estado, municípios locais) estão interessados nas consequências económicas e ambientais das adaptações/ modificações planeadas ou das consequências das não adaptações das áreas urbanas às alterações climáticas, ou seja, procuram minimizar os efeitos locais das mudanças climáticas e os impactos económicos que isso possa trazer. Já os investigadores exploram a eficácia de medidas e estratégias de mitigação em uma variedade de cenários futuros, o que contribui para o encontro de estratégias mais eficientes e económicas.

Os estudos do microclima urbano têm uma longa história, Mills (2014) apresentou 6 períodos distintos de estudos de microclima urbano:

- 1) Desde 1900: Observação das diferenças de temperatura urbano-rurais com dispositivos convencionais de medição meteorológica;
- 2) Desde a década de 1960: Medição de variáveis de processo do microclima urbano, como trocas de calor turbulentas e o uso de métodos estatísticos para documentar a intensidade da ilha de calor urbana;
- 3) Desde a década de 1970: Uso de modelos iniciais de orçamento de energia para a explicação física do efeito da ilha de calor urbana, uso inicial de técnicas de modelação por computador;
- 4) Desde a década de 1980: Adoção de abordagens experimentais, modelos físicos em escala e medições de fluxo (por exemplo, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível);
- 5) Desde a década de 1990: Estudos para compreender as relações entre as formas urbanas reais e os seus efeitos no microclima urbano, projetos de campo organizados;
- 6) Desde o início dos anos 2000: Desenvolvimento de modelos realistas de microclima urbano e emprego de novas técnicas para a análise do microclima urbano.

À medida que a disponibilidade dos recursos computacionais aumentou e se tornaram mais poderosos, a resolução e a especificidade das simulações também aumentou (Berardi et al., 2020). Simulações computacionais podem ser aplicadas para estudar o microclima urbano em diferentes escalas espaciais, de mesoescala, microescala meteorológica até à escala dos edifícios e ambiente interno (Toparlar et al., 2017).

A pesquisa numérica em mesoescala investiga eventos atmosféricos e climáticos em longas distâncias horizontais de dezenas a centenas de quilómetros, como por exemplo as tempestades, furacões, etc. A análise do clima urbano em mesoescala deu-se no início dos anos 70 do século passado, usando abordagens numéricas denominadas por Modelos de Previsão Numérica (NWP) ou Modelos Meteorológicos de Mesoescala (MMM) (Toparlar et al., 2017).

O modelo Computacional de mesoescala mais conhecido e utilizado é o modelo de Pesquisa e Previsão do Tempo (WRF), um modelo numérico de previsão do tempo que também pode ser aplicado como um modelo climático regional. Pode ser usado para operações como previsão numérica do tempo, clima regional, resposta a emergências, qualidade do ar, hidrologia regional e recursos hídricos.

Para melhorar as modelações, reduzir as lacunas e aumentar a fiabilidade das projeções destas modelações do microclima urbano começou-se a acoplar modelos de mesoescala com modelos de microescala, ou seja, criaram-se sistemas de modelação como uma ferramenta de investigação dos impactos da urbanização futura nas condições meteorológicas regionais e na qualidade do ar em cenários futuros de alterações climáticas.

As modelações de mesoescala fornecem dados às modelações de microescala e vice-versa de forma a conseguir-se elaborar uma projeção futura mais fiável.

Por exemplo, o National Center for Atmospheric Research (USA) em colaboração com outras agências e grupos de pesquisa, desenvolveu um sistema integrado de modelação urbana acoplado ao modelo de pesquisa e previsão do tempo (WRF), permitindo prever/simular condições meteorológicas desde escalas regionais até escalas de edifícios (Chen et al., 2011). Um requisito fundamental para aplicações urbanas é que o WRF ou outro modelo de mesoescala capture com precisão as influências das cidades no vento, temperatura, humidade na camada limite atmosférica e suas influências coletivas nos movimentos de mesoescala atmosférica. Ou seja, é necessário combinar o WRF ou outro modelo mesoescala com modelos de escala mais fina (modelos de microescala, ex: ENVI-met, VADIS, Austal2000, SOLWEIG, RayMan, AutoDesk CFD, etc). O objetivo dos sistemas de modelação é melhorar a previsão da qualidade do ar, estabelecer uma ferramenta de modelação para avaliar os impactos da urbanização sobre problemas ambientais, fornecer informações meteorológicas precisas para o planeamento de estratégias e medidas de mitigação e adaptação devido às alterações climáticas futuras nestes ambientes, entender os efeitos da expansão da urbanização para avaliar os seus impactos tanto ambientais como das alterações climáticas.

Estes sistemas de modelação são sistemas que têm de ser preparados e combinados segundo os objetivos e questões que se pretendem responder num determinado estudo. Por exemplo, no estudo de Rafael et al. (2018), o principal objetivo foi avaliar a influência de um conjunto de medidas de resiliência com base em soluções naturais (infraestruturas verdes), no fluxo do vento e na dispersão de poluentes atmosféricos (PM₁₀ e NO_x), numa pequena área urbana em Portugal. Para esta avaliação foram usados dois modelos, o modelo de mesoescala WRF, e o modelo de microescala CFD VADIS (dispersão de poluentes na atmosfera em condições de vento variáveis), em 4 cenários diferentes. O cenário que consistia na implantação de uma área verde urbana apresentou melhores resultados, promoveu uma redução da concentração na ordem de 16% de PM₁₀ e 19% de NO_x no domínio total, apesar de a concentração destes poluentes aumentar em alguns pontos da área de estudo devido a velocidades mais baixas do vento e à formação de áreas de recirculação adicionais. O cenário com piores resultados foi a implantação de telhados verdes em que a concentração dos poluentes chegou a aumentar na ordem de 60% em algumas horas do dia, o que promoveu a degradação da qualidade do ar na área de estudo comparando com o cenário de controlo.

No estudo de Carvalho et al. (2017) o objetivo foi avaliar a eficácia de várias estratégias de resiliência para mitigar episódios de calor urbano extremo na área urbana do Porto, e para isso foi usado um sistema de modelação um pouco mais complexo, em que o modelo WRF foi acoplado ao modelo de cobertura urbano de camada única (SLUM) através do modelo de superfície terrestre de Noah (LSM). O modelo LSM foi responsável pela modelação de fluxos de superfície e temperatura de áreas urbanas com vegetação, já o modelo SLUM tratou dos fluxos antropogénicos e de superfícies artificiais. A descrição detalhada deste sistema de modelação pode ser encontrada em Chen et al. (2011). A estratégia mais eficaz e que obteve melhores resultados ($-0,5$ °C e -1 °C) de resiliência para mitigar episódios de calor extremo na cidade do Porto foi a aplicação de coberturas frias (telhados brancos e verdes), no entanto considerando que os telhados brancos são mais fáceis e baratos de

aplicar, foi considerada a estratégia mais viável. Quanto à qualidade do ar a implantação de telhados verdes e o aumento do albedo das superfícies promoveram um aumento geral das concentrações de PM10 (entre + 0,6% e + 1,5%) e NO₂ (entre + 0,8% e 3,5%), enquanto a medida de aumento das áreas verdes urbanas promoveu uma diminuição geral de PM10 e de NO₂, em cerca de -1% e -3%; já os níveis de O₃ aumentaram com o aumento das áreas verdes. Ainda discutiram que as coberturas verdes e /ou o aumento das áreas verdes urbanas podem trazer outras vantagens como a melhoria da qualidade vida urbana, , economia de energia, redução no pico de escoamento de águas pluviais e que os efeitos das estratégias de resiliência testadas para este caso de estudo (Porto), podem ser diferentes para outras localidades.

Em outro estudo, Berardi et al. (2020) analisaram o efeito da vegetação na resiliência das Ondas de Calor numa área de estudo em Toronto usando simulações de mesoescala através do modelo WRF e modelações de microescala através do modelo ENVI-met. Simularam dois cenários de mitigação, um cenário verde moderado e outro cenário verde mais intensivo. Os resultados da simulação de mesoescala mostraram uma diminuição da Temperatura do ar de 1,6 °C a 2,3 °C, enquanto as simulações de microescala concluíram que o aumento das copas das árvores reduzia a temperatura em 0,5 °C a 1,4 °C localmente. Também concluíram que dependendo das condições do vento e da disposição dos edifícios e áreas verdes existentes, o efeito de resfriamento tem um impacto de até 250m a favor do vento nos novos locais de área verde.

Como se pode perceber existem muitos modelos de microclima urbano, cada um com as suas vantagens e desvantagens, no entanto cabe ao investigador selecionar os modelos adequados aos seus objetivos, às questões que quer ver respondidas, aos dados necessários, à fiabilidade dos modelos reportada, e também à disponibilidade financeira.

Parece importante referir ainda que um elo em falta entre muitos estudos do microclima é a consideração dos aspetos económicos, que quase nunca são considerados como um parâmetro relevante. As simulações de CFD podem ligar-se a modelos financeiros de forma a obter-se resultados sobre os aspetos económicos das medidas de adaptação e mitigação (Toparlar et al., 2017).

De acordo com Toparlar et al. (2017) os estudos em áreas urbanas (microescala) podem focar-se em diferentes ambientes urbanos:

- a) Blocos de construção: blocos de construção múltiplos, distribuídos com uma estrutura genérica;
- b) Rua do tipo *canyon*: Apenas o estudo de uma rua do tipo *canyon*;
- c) Espaço aberto: sem obstruções, possível investigação de características adicionais, como árvores, espaços de água e infraestruturas verdes no geral;
- d) Zonas com ruas do tipo *canyon*;
- e) Praça.

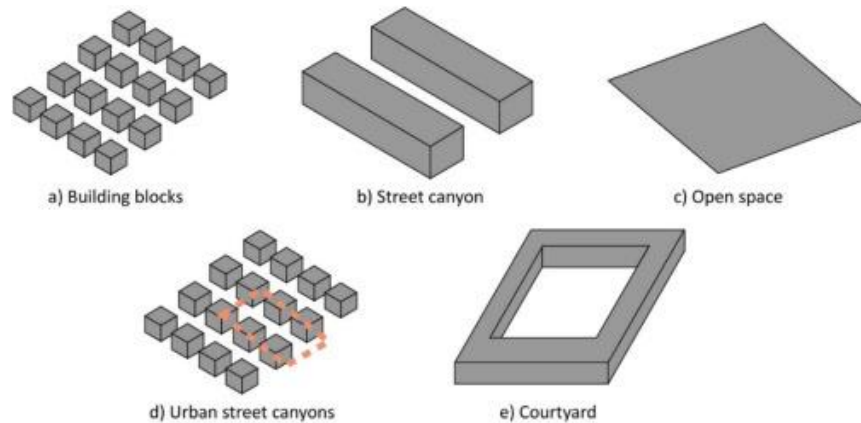


Figura 8 - Classificação de diferentes áreas urbanas (Toparlar et al., 2017).

Uma vez que o presente estudo tem por objetivo usar o software/modelo ENVI-met para avaliar o impacto de infraestruturas verdes na temperatura do ar, conforto térmico e poluição do ar numa zona da cidade de Leiria, de seguida apresenta-se uma descrição geral deste modelo. Para o modelo WRF, apesar de não ser usado neste estudo, mas devido ao facto de ser um modelo muito conhecido e usado em estudos climáticos urbanos, pode-se encontrar nos artigos de Liang et al. (2012) e Powers et al. (2017) uma descrição geral, histórica e com visões futuras do mesmo. Já para uma descrição mais técnica do modelo sugere-se a leitura do artigo de Skamarock et al., (2008).

O ENVI-met, desenvolvido por Michael Bruse na Ruhr University of Bochum, inicialmente lançado à data de 1998 é um modelo de microescala tridimensional não hidrostático que simula variáveis meteorológicas em áreas urbanas com altas resoluções espaciais (grades de 0,5-10m) e temporais (≤ 10 s) (Bruse & Fleer, 1998). Simula o estado da atmosfera combinando a influência de edifícios, vegetação, características de superfície e solos, sendo que esta simulação depende de todas estas complexas interações entre o tecido urbano e parâmetros climáticos locais. Os seus fundamentos físicos são baseados nos princípios da mecânica de fluidos e termodinâmica, calcula três campos dimensionais de vento, turbulência, temperatura, humidade do ar, fluxos radiativos e dispersão de poluentes.

A partir da versão 4.0 do ENVI-met, o modelo inclui a possibilidade de forçar variáveis meteorológicas ao longo da simulação, para consequentemente melhor representar a evolução das variáveis meteorológicas ao longo do dia. Também apresenta um novo módulo de vegetação 3D para descrever formas variadas de plantas e distribuição espacial das folhas, e o módulo de construção que tem em consideração a inércia térmica da parede e do telhado dos edifícios (Bruse, 2014; Huttner, 2012).

O cálculo do modelo ENVI-met inclui (Bruse, 2021) :

- Fluxos de radiação de pequeno e grande comprimento de onda em relação ao sombreamento, reflexão, re-radiação (radiação secundária após a reflexão) de sistemas de construção e da vegetação;

- Transpiração, evaporação e fluxo de calor sensível da vegetação para o ar, incluindo simulação completa de todos os parâmetros físicos da planta (por exemplo, taxa de fotossíntese);
- Cálculo dinâmico da temperatura da superfície e da temperatura da parede para cada elemento de fachada e telhado que suporta até 3 camadas de materiais e 7 pontos de cálculo na parede/telhado.
- Troca de água e calor dentro do sistema do solo, incluindo absorção de água pela planta;
- Representação 3D da vegetação, incluindo modelação dinâmica do balanço hídrico das espécies individuais;
- Dispersão de gases e partículas. O modelo suporta partículas (incluindo sedimentação e deposição em folhas e superfícies), gases inertes e gases reativos do ciclo de reação NO-NO₂-Ozono.
- Cálculo de índices biometeorológicos ou índices de Conforto Térmico, como temperatura média radiante, PMV / PPD (Voto Médio Estimado), PET (Temperatura Fisiológica Equivalente), UTCI (Índice Térmico Universal ou Índice de clima térmico universal) ou SET (temperatura efetiva padrão) via ferramenta BioMet do software Envi-met.

Para simular o ciclo diurno das principais variáveis climáticas que envolvem a temperatura, humidade do ar e do solo, velocidade e direção do vento, o ENVI-met tem como base as leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica, calcula três campos dimensionais de vento, turbulência, temperatura, humidade do ar, fluxos radiativos e dispersão de poluentes. Os principais parâmetros de entrada incluem dados meteorológicos como a humidade e temperatura, estruturas e propriedades das superfícies do solo, elementos de vegetação e edifícios. O ENVI-met consiste nos seguintes submodelos (Tsoka et al., 2018):

- O modelo de contorno 1D, usado para a inicialização da simulação, mas também para a definição das condições do modelo de contorno do modelo atmosférico 3D. Alcança do nível do solo ($z = 0$) até uma altura de $H = 2500\text{m}$ acima do nível do solo.
- O modelo 3D atmosférico, no qual são modelados a temperatura e humidade do ar, fluxo de vento, turbulência, fluxos de radiação de grande e pequeno comprimento de onda, bem como a dispersão e deposição de poluentes.
- O modelo de solos, no qual são simuladas as temperaturas superficiais juntamente com a distribuição da temperatura natural dos solos e o balanço hídrico.
- O modelo de vegetação, incluindo a simulação das taxas de transpiração, das temperaturas foliares das árvores e das trocas de calor e vapor entre as plantas e a atmosfera.

A Figura 9 demonstra um resumo da arquitetura do modelo ENVI-met e dos principais processos climáticos.

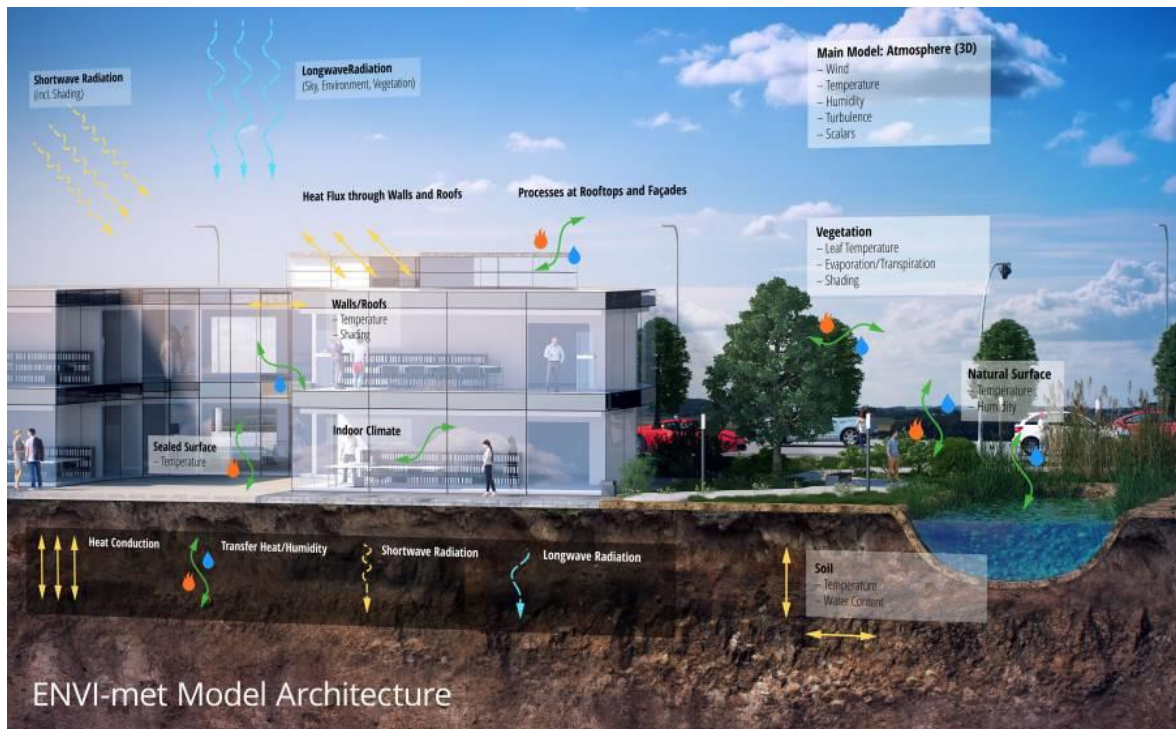


Figura 9 - Arquitetura do modelo ENVI-met e principais processos (Bruse, 2021).

As principais variáveis calculadas no ENVI-met são:

O fluxo do vento (velocidade e direção do vento) é calculado através das equações de *Reynolds Averaged Navier-Stokes* para cada grade e intervalo de tempo, sendo que os efeitos da vegetação são incluídos como resistência no campo de vento, e para simulações de física de construção detalhada o fluxo de vento próximo a cada fachada e o segmento do telhado, também são calculados.

Com base no campo de vento tridimensional a temperatura do ar e a humidade do ar são calculados através de equações de advecção-difusão combinada. O solo e as folhas da vegetação atuam como fontes ou sumidouros para a temperatura e humidade do ambiente (Huttner, 2012; Simon, 2016).

Quanto à turbulência, o ENVI-met usa o Modelo de Energia Cinética Turbulenta (TKE) de duas equações para prever a turbulência no ar (ENVI-met, 2021a), a primeira equação descreve a distribuição da energia cinética (E) no ar dependendo da produção, advecção, difusão e destruição; e a segunda equação é semelhante, mas descreve a Taxa de Dissipação de TKE (ϵ ou ϵ_{ps}) (Huttner, 2012; Simon, 2016).

A dispersão de poluentes ou de gases e partículas permite a emissão, dispersão e deposição de até seis poluentes diferentes. A reação fotoquímica entre NO, NO₂ e Ozono (O₃) é considerada, assim como a sedimentação e deposição de poluentes em superfícies e vegetação (Bruse, 2021).

O cálculo dos fluxos de radiação de grande e pequeno comprimento de onda são baseados na aproximação de duas formas empíricas de Taesler & Andersson, (1984) e GROSS (1991). No entanto, o ENVI-met usa uma aproximação muito mais simples para o cálculo dos fluxos

de radiação de grande e pequeno comprimento de onda levando apenas em consideração o vapor de água (Huttner, 2012).

Para o cálculo do conforto térmico o ENVI-met dispõe de 4 índices de conforto térmico como já referido anteriormente, e a ferramenta de pós-processamento utilizada chama-se Bio-Met.

No Anexo 1 encontra-se uma descrição mais pormenorizada do modelo atmosférico do ENVI-met com as principais equações, formulas empíricas e variáveis usadas. Em ENVI-met, (2020), Huttner (2012) e Simon (2016) são fornecidas as características detalhadas do modelo e também dos seus submodelos, juntamente com as suas equações matemáticas e as outras variáveis calculadas.

É importante realçar que o modelo ENVI-met é continuamente atualizado e novos recursos são introduzidos regularmente, no entanto não é uma simulação perfeita da realidade tendo algumas importantes limitações. As limitações encontradas a nível bibliográfico até à data, numa breve visão geral em estudos realizados com o ENVI-met, foram as seguintes (Acero & Arrizabalaga, 2018; Huttner, 2012; Simon, 2016; Tsoka et al., 2018):

- Turbulência: tende a sobrestimar a produção turbulenta em áreas com alta aceleração ou desaceleração como, por exemplo, o fluxo em torno de um edifício.
- Radiação: o cálculo geral dos fluxos de radiação pode ser pouco preciso por várias razões. Uma delas, e talvez a mais importante, tem a ver com o balanço de radiação atmosférica que é definido pelos coeficientes de absorção e emissão das diferentes camadas atmosféricas. Estes coeficientes dependem da espessura ótica da atmosfera, ou seja, o número de aerossóis e a quantidade de vapor de água, dióxido de carbono, ozono e outros gases de efeito estufa na camada da atmosfera. Para um cálculo preciso dos fluxos radiativos, seria necessário saber a distribuição exata dos aerossóis e gases de efeito estufa na atmosfera e levar em consideração os seus espectros de emissão e absorção. O ENVI-met usa uma aproximação mais simples que leva apenas em consideração o vapor de água.
- Modelo de solo: no momento não há como simular a irrigação do solo / plantas ao longo do dia ou dias, as plantas são sempre consideradas irrigadas, podendo apenas alterar-se o coeficiente de água (quantidade de água no substrato que está disponível para a planta no campo utilizável); este valor não é diminuído durante a simulação, em caso de o valor do coeficiente ser menor que o valor padrão (0,5), como por exemplo 0,1, a planta sofre stress hídrico permanentemente durante a simulação.
- O modelo não permite representar de hora a hora as características do fluxo atmosférico (velocidade e direção do vento) e o fator de ajuste da radiação solar, o que faz com que a evolução desses parâmetros ao longo do dia não seja corretamente representada pelo modelo.
- O ENVI-met é capaz de simular os efeitos das plantas no microclima com bastante precisão, mas não é capaz de avaliar os efeitos do microclima nas plantas.

- Embora o modelo químico seja capaz de simular a formação de ozono troposférico (O₃) por fotólise do dióxido de azoto e destruição do monóxido de azoto, a libertação de compostos orgânicos voláteis biogénicos e a sua contribuição adicional para a formação de ozono troposférico ainda são desconsiderados.
- Não é possível digitalizar estruturas mais complexas de parede e telhado que consistem em combinações de diferentes materiais. Isso restringe a simulação precisa da física da construção, como as temperaturas da superfície e a estimativa do clima interno.

Com base nas evidências acima mencionadas, o modelo ENVI-met pode ser considerado uma ferramenta muito útil para a análise do clima urbano, desde a adequada aquisição de dados de inicialização do modelo e o profundo conhecimento e compreensão dos limites das suas ferramentas e do modelo em geral (Tsoka et al., 2018).

3. Materiais e Métodos

3.1. Caracterização e descrição do caso de estudo

A área selecionada para modelação com vista ao cumprimento dos objetivos deste estudo é uma área representativa do centro da cidade de Leiria, com tamanho de 400mx350m, centrada na Av. Heróis de Angola e zona envolvente (Figura 10). O local consiste em áreas comerciais e residenciais e apresenta uma estação de autocarros (rodoviária do Lis). É uma área muito movimentada durante o dia devido ao comércio, serviços e à estação rodoviária. A maior parte dos edifícios não são muito altos, apresentam 4 andares, na sua maioria com telhados tradicionais inclinados de telha cerâmica, paredes convencionais de betão, tijolo e gesso e 83% das superfícies da área em estudo são impermeáveis. Uma parte do troço do rio Lis aparece na área de estudo consistindo em espaços verdes com muitas árvores em ambos os lados do rio, sendo que a maioria das árvores são de folha caduca (*Platanus x acerifolia*, *Acer platanoides*, *Acer pseudoplatanus*, *Fraxinus*, *Acer Negundo*, entre outras).

A cidade de Leiria localiza-se a uma altitude de 36m acima do nível médio do mar, apresenta um clima mediterrâneo do tipo Csb - temperado com verão seco e suave - de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger. A temperatura média anual é de 13,5°C (1971-2000) e a humidade relativa média anual é de 78% (IPMA, 2021c). O verão apresenta uma nebulosidade baixa, enquanto o inverno denota maioritariamente céu parcialmente encoberto a coberto. A temperatura média das mínimas e máximas diárias varia de 5°C a 27°C, respetivamente, e os extremos raramente são inferiores a 0°C ou superiores a 34°C (Weather Spark, 2020). O vento provém maioritariamente de NW (Noroeste)(Windfinder.com, 2020), com uma velocidade média a 10m de altura de 3,7 m/s ao longo do ano (IPMA, 2021c).

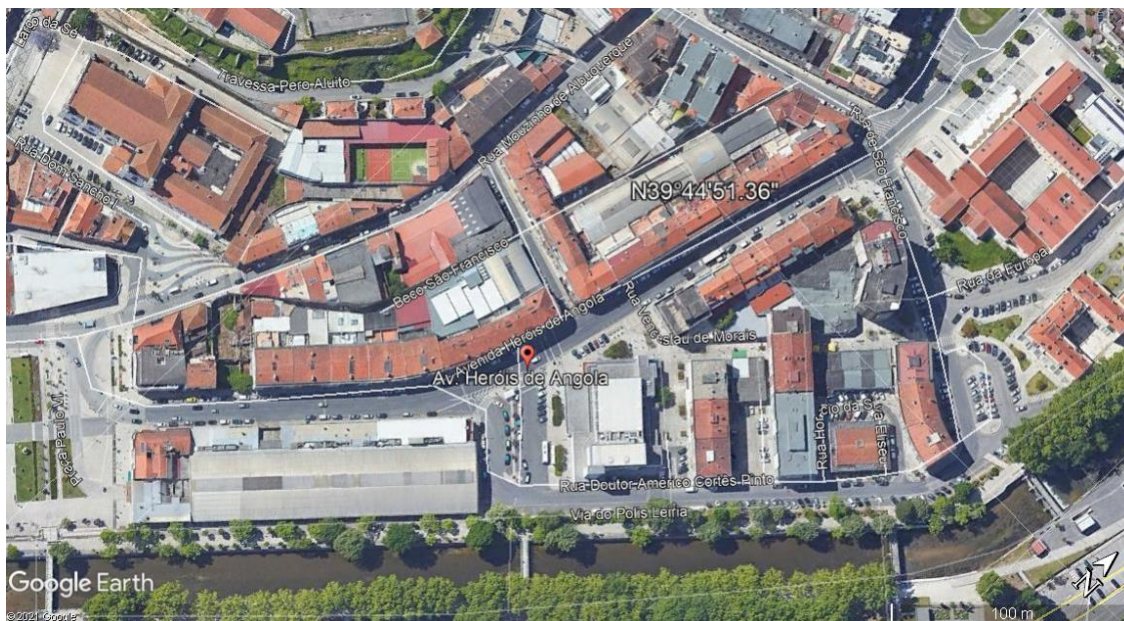


Figura 10- Área de estudo.

3.2.Recolha de dados

Os dados usados nas modelações e simulações foram maioritariamente obtidos na internet, em fontes fidedignas, ou de estudos prévios. Esta via foi preferencial por ser um ano atípico devido à pandemia de Covid-19, e à inerente dificuldade de se recolher dados de campo.

3.2.1. Condições meteorológicas ou climáticas

As projeções climáticas para a região de Leiria no período 2041-2070 - RCP 8.5 indicam um aumento da temperatura média anual de 2,4 °C e para o período 2071-2100 um aumento de 3,9°C (IPMA, 2021c;CMLeiria, 2017). Espera-se também um aumento da frequência de ondas de calor. A velocidade do vento não sofre grandes alterações sendo que média anual a 10m de altura em Leiria é de 3,7 m/s, e segundo a EMAAC (Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas do Município de Leiria) prevê-se uma diminuição média de 0,2 a 0,6 Km/h para o período 2041-2070 (CMLeiria, 2017). O mesmo se aplica à humidade relativa em que a sua média anual é 78% (IPMA, 2021c), prevendo-se apenas reduções de -1% a -3% no período referido.

Visto que a cidade de Leiria não apresenta nenhuma estação meteorológica automática da rede nacional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), a maioria dos dados meteorológicos necessários para as simulações computacionais foram retirados do Portal do clima (IPMA, 2021c). De acordo com o objetivo deste estudo, as simulações foram realizadas para condições climáticas de verão atual, de verão e inverno futuro (2041-2070) e de onda de calor. No Portal do Clima foram obtidas as médias mensais da temperatura máxima e mínima diária, humidade relativa e velocidade do vento do mês de agosto (verão) e do mês de janeiro (inverno) relativas ao clima atual (1971-2000) e ao período 2041-2070 - RCP 8.5 (Modelo Ensemble). Para a Onda de calor foram usados valores históricos das temperaturas da Onda de calor de 2003 na cidade de Leiria (Calado et al., 2004; Pires, Silva, Moita, 2004).

A direção do vento média mensal do mês de agosto e de janeiro foi retirada do site Windfinder.com (2020), assumindo-se que a direção maioritária do vento mensal se mantém a mesma para o período 2041-2070- RCP 8.5.

A nebulosidade medida em octas foi estimada através das Normais climatológicas da estação meteorológica de Monte Real (1951-1980), pois os inputs do modelo ENVI-met apresentam três níveis de altura de nebulosidade em uma escala de 0-8 octas (Tabela 1), enquanto as normais climatológicas de Monte real apenas apresentam a nebulosidade a um nível e com uma escala de 0-10 decimas de céu coberto; então foi feita uma estimativa através das normais climatológicas para se chegar aos valores apresentados na Tabela1. Para o caso da onda de calor optou-se por uma nebulosidade igual a 0. Na Tabela 1 encontra-se um resumo das condições climáticas usadas neste estudo.

Tabela 1- Dados climáticos usados nas simulações (valores médios de longo termo)

Dados Climáticos	Inputs	Verão atual (1971-2000)	Verão futuro (2041-2070)	Inverno futuro (2041-2070)	Onda de Calor
	T máxima diária (°C)	26,4	28,9	12,7	40,7
	T mínima diária (°C)	14,7	16,9	6,7	22,5
	HR máxima diária (%)	84	82	96	74
	HR mínima diária (%)	58	56	68	50
	Velocidade do vento (m/s)	3,7	3,7	3,7	3,7
	Direção do vento (graus)	315	315	315	315
	Nuvens baixas (okta)	1	1	1,4	0
	Nuvens médias (okta)	1,47	1,47	2	0
	Nuvens altas (okta)	1	1	1,4	0

3.2.2. Concentrações de fundo de poluentes atmosféricos

Os dados das concentrações de fundo (Tabela 2) dos poluentes NO, NO₂, O₃, PM10 e PM2.5, foram obtidos na plataforma QualAR da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2021). Como a cidade de Leiria não tem estações de monitorização da qualidade do ar, usou-se dados provenientes da estação da Ervedeira (rural de fundo) e preferencialmente da estação do Instituto Geofísico de Coimbra (urbana de fundo), que pertencem à zona Centro Litoral, servindo de referência para a cidade de Leiria. De facto, apenas foi retirado da estação de Ervedeira o poluente PM2,5 por não existirem dados da sua medição na estação do Instituto Geofísico de Coimbra.

As concentrações de fundo foram calculadas para um período de 5 anos (2014-2018) para o mês de agosto (verão) e janeiro (inverno), de modo a gerar dados típicos e mais robustos para essas fases do ano. Para a Onda de Calor utilizou-se dados disponíveis das duas estações de dois períodos de Onda de Calor dos anos de 2003 e de 2005.

Tabela 2- Concentrações de fundo dos poluentes na área de estudo

Concentrações de Fundo	Inputs	Verão atual	Verão futuro (2041-2070)	Inverno futuro (2041-2070)	Onda de Calor
	NO (µg /m ³)	2	2	2	4
	NO ₂ (µg/ m ³)	12	12	20	22
	O ₃ (µg/ m ³)	56	56	38	74
	PM10 (µg/ m ³)	19	19	20	47
	PM 2,5 (µg/ m ³)	7	7	10	16

3.2.3. Tráfego rodoviário e cálculo de emissões de poluentes

Para a contabilização de tráfego rodoviário na área de estudo utilizou-se dados de contagens de tráfego rodoviário realizadas no estudo de Ribeiro & Henriques, 2011. O registo do tráfego foi realizado na rua Avenida Heróis de Angola durante 5 dias da semana a várias horas durante o dia, através de contagem direta no local e de filmagens; as contagens foram alocadas em categorias e classes de veículos como se pode verificar no Anexo 2. Os dias da semana de registo do tráfego rodoviário foram a segunda-feira, a quinta-feira, a sexta-feira, o sábado e o domingo. Assumiu-se o comportamento do tráfego do dia de quinta-feira igual ao de terça-feira e quarta-feira.

Como os registos dos dados do tráfego rodoviário já têm mais de 10 anos, decidiu-se mover 10% dos veículos para a próxima categoria, ou seja, da categoria mais antiga para a mais recente, acrescentando-se a classe Euro 6 que ainda não existia aquando das realizações das contagens.



Figura 11- Mapa de ruas da área de estudo (1- Rua Av. Heróis de Angola; 2 - Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque; 3- Rua Dr. Américo Cortês Pinto; 4- Rua de São Francisco; 5- Rua Camilo Korrodi).

Como a área de estudo apresenta outras ruas com tráfego rodoviário, como se pode verificar na Figura 11, e apenas existiam dados de registo de tráfego da rua principal (rua Av. Heróis de Angola), para essas ruas decidiu-se estimar o número de veículos através de quatro

recolhas de contagens de tráfego com a duração de 10 min em cada rua a várias horas do dia; duas recolhas da parte da manhã iniciando-se às 7:30h e outras duas recolhas da parte da tarde iniciando-se às 16:00h, criando assim uma relação das diferenças de tráfego rodoviário nas diferentes ruas (Figura 12). De forma a simplificar, assumiu-se que estas ruas teriam a mesma distribuição de veículos por categorias e classes da rua Av. Heróis de Angola.

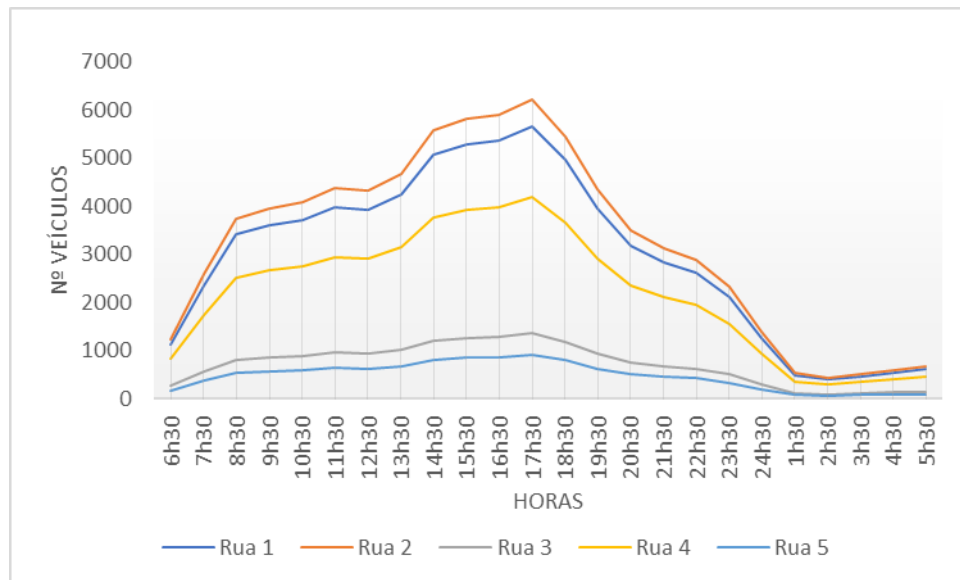


Figura 12 - Média semanal do perfil do tráfego rodoviário ao longo de 24h para as diferentes ruas.

O cálculo das emissões de NO, NO₂, PM10 e PM2,5 do tráfego rodoviário foi realizado para as 24 horas do dia, usando-se frotas médias horárias de veículos obtidas das frotas dos vários dias da semana. Após a simulação das emissões da rua Av. Heróis de Angola, usando o software Copert 5, foram calculadas para cada rua as emissões médias horárias, através da relação de tráfego entre elas, ou seja, após o cálculo das emissões para a rua Heróis de Angola, as estimativas das emissões para as outras ruas foram feitas com base nas emissões dessa rua principal, ajustadas ao total de veículos de cada rua.

Os dados das emissões dos poluentes por parte do tráfego rodoviário foram trabalhados de forma a obter-se a emissão dos poluentes NO, NO₂, PM10 e PM2,5 em $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{s}$ para cada hora do dia (Figura 13).

O software Copert usado é uma ferramenta desenvolvida pela empresa EMISIA com o financiamento e parceria da Agência Europeia do Ambiente amplamente utilizada pelos países europeus para compilar inventários nacionais de emissão (Ntziachristos et al., 2009). É uma ferramenta recomendada para o cálculo das emissões dos transportes rodoviários motorizados pelo Programa Europeu de Monitorização e Avaliação de Poluentes Atmosféricos (EMEP/EEA, 2019).

Nas simulações com o Copert 5 foram assumidas determinadas condições. O cálculo de emissões de arranque a frio foi considerado no cálculo das emissões totais, assumindo-se um Beta de 30% (30% do percurso percorrido com o motor frio ou sistemas de tratamento dos gases de escape abaixo da temperatura ideal; por analogia significa 30% dos veículos de

cada classe a circular em condição de arranque a frio). Foi também assumido que em 50% do percurso os veículos circulariam em congestionamento a uma velocidade de 10km/h, e nos restantes 50% circulariam sem congestionamento a uma velocidade de 30km/h. Quanto aos veículos pesados (autocarros), assumiu-se uma carga/ocupação (load) de 50% por defeito e declive de 0%.

Como se pode verificar nas Figura 12 e Figura 13 o comportamento das emissões segue expectavelmente o comportamento do tráfego rodoviário.

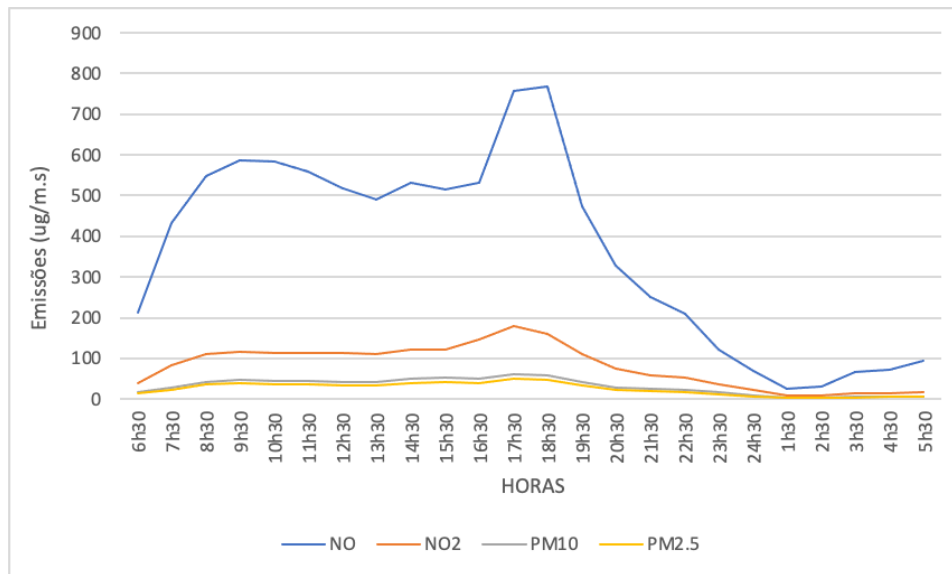


Figura 13 - Emissões médias diárias de todas as fontes (estradas) da área de estudo ao longo do dia ($\mu\text{g}/\text{m.s}$).

3.3. Definição dos cenários e simulações realizadas

A área de domínio computacional de modelação (Figura 14) denominada na modelação de “Baseline” por representar o modelo atual da cidade (sem qualquer medida de resiliência implementada), apresenta $157*134*30$ células com resolução de $3\text{m}*3\text{m}*3\text{m}$ (631140 células), já com células extra na periferia da área como é aconselhado para uma simulação bem-sucedida no ENVI-met. O topo do modelo 3-D é de 90 metros, sendo suficiente dado que a altura do edifício mais alto é de 33 metros.

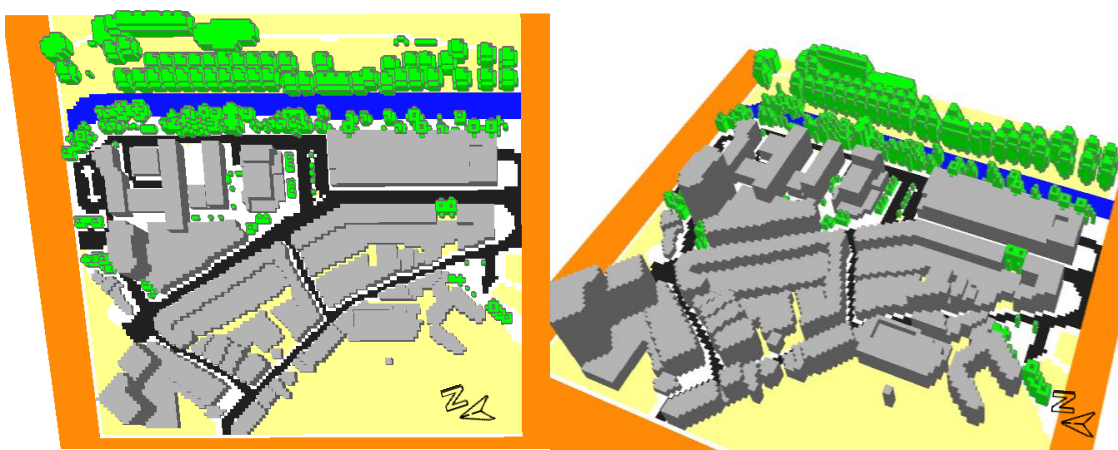


Figura 14 - Área de estudo modelada em 3D - "Baseline".

A complexidade dos edifícios foi simplificada, considerando que todos os edifícios da área modelo apresentam os mesmos materiais constituintes de telhado e parede. Assumiu-se condições típicas, paredes dos edifícios com 31cm de espessura e três materiais (betão, isolamento, gesso/estruque) como se pode observar na Figura 15. Na Tabela 3 apresentam-se as características dos diferentes materiais que constituem as paredes e telhados dos edifícios.

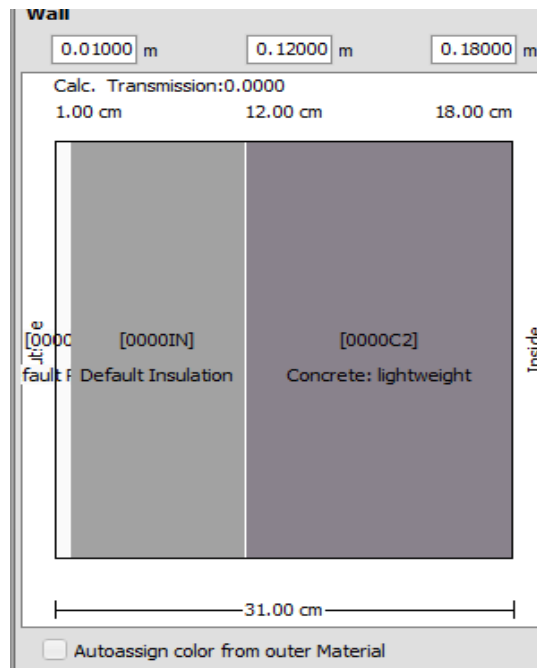


Figura 15 - Materiais constituintes da parede e telhado dos edifícios.

Tabela 3 - Valores dos diferentes parâmetros dos materiais constituintes da parede

Parâmetros	Materiais		
	Betão	Isolamento	Gesso
Absorção (frac.)	0,7	0,5	0,5
Transmissão (frac.)	0	0	0
Reflexão (frac.)	0,3	0,5	0,5
Emissividade (frac.)	0,9	0,9	0,9
Calor específico (J/(kg*K))	840	1500	850
Condutividade térmica (W/(m*K))	0,2	0,07	0,6
Densidade (kg/m ³)	620	400	1500

Também a complexidade das árvores foi simplificada, sendo que a contagem e identificação das árvores na área do local de estudo foi feita através das ferramentas Google Earth e Google Maps. A área de estudo “Baseline” modelada apresenta 181 árvores sendo que a grande maioria é de folha caduca. Todas as árvores e vegetação utilizada na modelação da área de estudo foram árvores e espécies já existentes na base de dados do ENVI-met. No Anexo 3 pode-se encontrar a lista de espécies de árvores e plantas usadas na modelação da área de estudo.

A estratégia da modelação e simulação de diferentes cenários passou por modelar diferentes medidas de resiliência/verdes de forma extrema na área de estudo. Recorda-se que este estudo tem como objetivo principal verificar o impacto das mesmas no microclima urbano da cidade de Leiria.

Após uma ampla análise e revisão da literatura e de estudos que discutem as vantagens e desvantagens de diferentes soluções que apoiam as cidades face aos efeitos das alterações climáticas, ilha de calor urbana, qualidade do ar e conforto térmico ao ar livre, criaram-se cinco cenários diferentes, quatro deles extremos e um deles um cenário misto. O cenário misto foi criado através dos resultados dos quatro cenários extremos como um cenário equilibrado, mais realístico e exequível.

Neste estudo, foram selecionadas as seguintes medidas de resiliência na criação dos cenários:

- Introdução de coberturas verdes como paredes e telhados verdes;
- A aplicação de telhados brancos com albedo de 80%;
- A introdução de mais árvores na área de estudo.

O **cenário 1 (S1)** considera que 100% dos edifícios da área de estudo têm telhado verde e parede verde. Como referido, é uma situação extrema com o objetivo de verificar o impacto destas medidas de resiliência no microclima urbano.

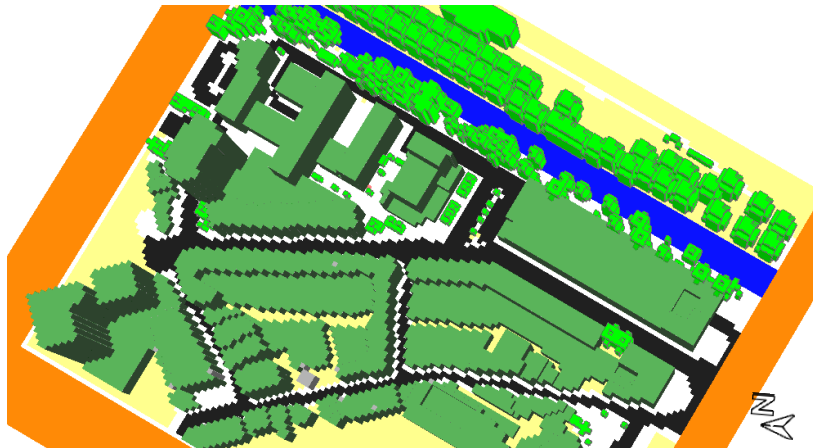


Figura 16 - Cenário 1 (S1) (Todos os telhados e paredes verdes).

O telhado verde e a parede verde são adicionados à parede ou telhado padrão dos edifícios da área de estudo.

Por questões económicas de implementação e manutenção para a parede verde da fachada dos edifícios escolheu-se uma parede verde sem espaço de ar, ou seja, uma fachada verde (direta) com plantas trepadeiras. A planta trepadeira usada foi a hera, *Ivy*, (*Herdera helix*).

O telhado verde é constituído por espaço de ar, três substratos (esferovite, argila arenosa, turfa) e a planta verde (erva densa de 20 cm) como se pode verificar na Figura 17.

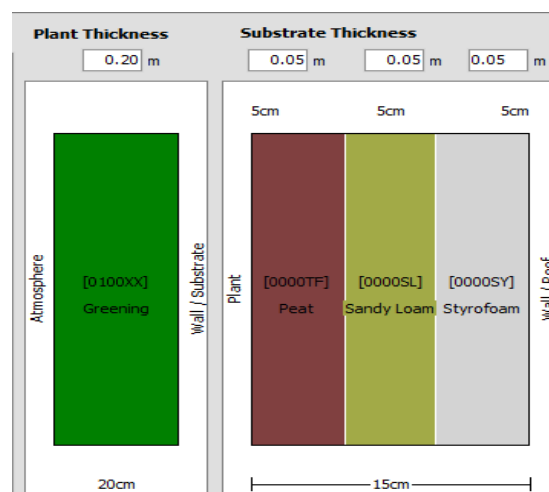


Figura 17 - Substratos do telhado verde.

O **cenário 2 (S2)** considera que todos os edifícios têm um telhado branco com albedo de 80%. Também é um cenário extremo para verificar o impacto desta medida no microclima urbano.

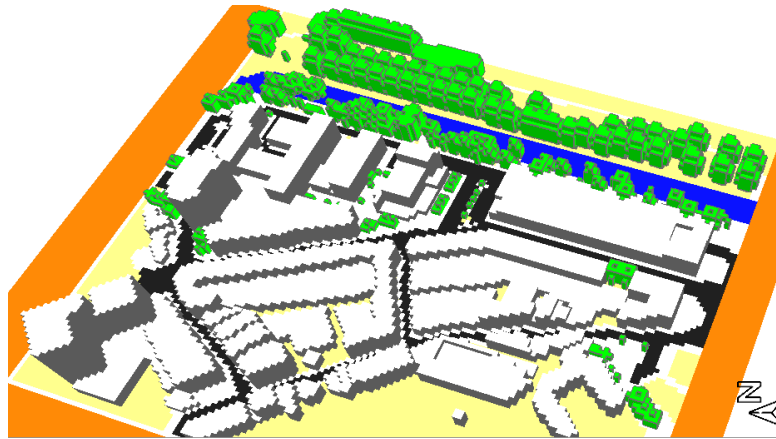


Figura 18 - Cenário 2 (S2) (Todos os telhados brancos).

Tal como os telhados e paredes verdes foram adicionados às paredes padrão da área modelo, o telhado branco também. Foi adicionado ao telhado um PVC branco (cloreto de polivinil; Tabela 4), sendo que o telhado continua a ter as características reportadas na Figura 15.

Tabela 4 - Características do PVC

Parâmetros	PVC
Absorção (frac.)	0,2
Transmissão (frac.)	0
Reflexão (frac.)	0,8
Emissividade (frac.)	0,9
Calor específico (J/(kg*K))	1470
Condutividade térmica (W/(m*K))	0,19
Densidade (kg/m ³)	1200

O **cenário 3 (S3)** considera um aumento de 31% (+81) de árvores na área de estudo. Não foi possível implementar mais árvores pois a área em estudo é bastante urbanizada e apresenta pouco espaço nas ruas para a sua colocação.

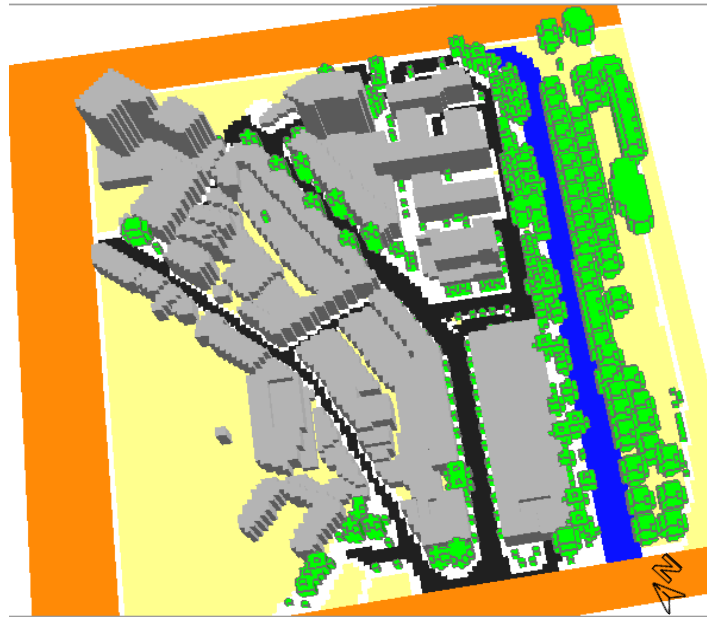


Figura 19 - Cenário 3 (S3) (“+” árvores).

O **cenário 4 (S4)** considera que não existe qualquer espaço verde, nem infraestruturas verdes na área de estudo.

Considerou-se interessante realizar este cenário porque, em primeiro lugar tem-se verificado em muitas cidades uma redução dos espaços/áreas verdes e aumento de áreas/edificações urbanas ao longo do tempo, e em segundo lugar, do ponto de vista extremo, para verificar também o comportamento do microclima local da área de estudo sem qualquer espaço verde. Com este cenário pretende-se estudar os dois extremos futuros possíveis de acontecer, um extremo com medidas de resiliência implementadas, e outro extremo sem qualquer medida de resiliência implementada e com o desaparecimento e degradação dos espaços verdes hoje existentes.

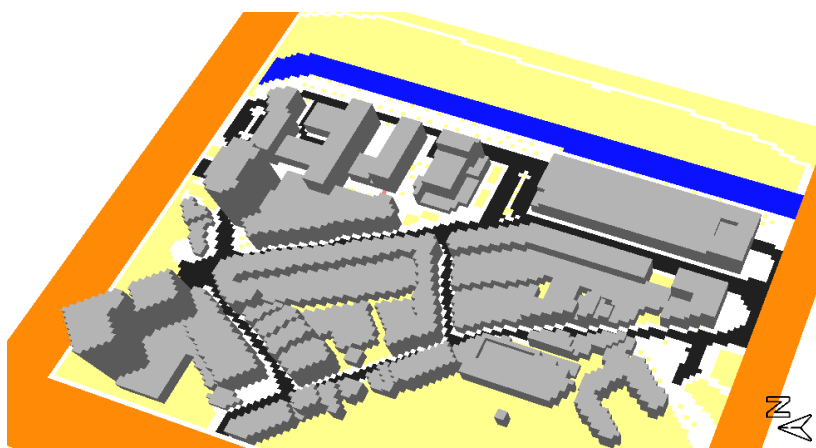


Figura 20 - Cenário 4 (S4) (Sem vegetação).

O **cenário 5 (S5)** designado por cenário Misto será apresentado após a apresentação e análise dos resultados dos 4 cenários extremos, como anteriormente discutido.

Uma vez criados os cenários, e para se dar resposta aos objetivos deste estudo, realizaram-se várias simulações para se estudar o impacto que estes teriam: na temperatura do ar, conforto térmico ao ar livre, qualidade do ar, temperatura das fachadas e interior dos edifícios da área de estudo em diferentes condições (condições climáticas atuais; condições climáticas futuras (RCP 8.5; 2041/2070) de verão e inverno e onda de calor).

Na Tabela 5 apresenta-se um resumo dos inputs inseridos no software ENVI-met para correr as simulações referidas (recorda-se que “Baseline” se refere ao modelo atual da cidade).

Tabela 5 - Inputs ENVI-met

		Simulações / Cenários										
Inputs	Baseline	Baseline	S1	S2	S3	S4	S5	Baseline	S5	Baseline	S5	
	verão atual	verão futuro	verão futuro	verão futuro	verão futuro	verão futuro	verão futuro	inverno futuro	inverno futuro	(Onda de Calor)	(Onda de calor)	
Dados Climáticos	T°C máxima	26,4	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	28,9	12,7	12,7	40,7	40,7
	T°C mínima	14,7	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	6,7	6,7	22,5	22,5
	HR (%) máxima	84	82	82	82	82	82	82	96	96	74	74
	HR (%) mínima	58	56	56	56	56	56	56	68	68	50	50
	Vel.vento (m/s)	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
	Direção do vento (deg)	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
	Nuvens baixas (okta)	1	1	1	1	1	1	1	1,4	1,4	0	0
	Nuvens médias (okta)	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	2	2	0	0
	Nuvens altas (octa)	1	1	1	1	1	1	1	1,4	1,4	0	0
	Concentrações de Fundo	NO (µg/m ³)	2	2	2	2	2	2	2	20	20	22
NO ₂ (µg/m ³)		12	12	12	12	12	12	12	2	2	4	4
O ₃ (µg/m ³)		56	56	56	56	56	56	56	38	38	74	74
PM10 (µg/m ³)		19	19	19	19	19	19	19	20	20	47	47
PM 2,5 (µg/m ³)		7	7	7	7	7	7	7	10	10	16	16

Quanto ao parâmetro da rugosidade (comprimento de rugosidade da superfície), o perfil do vento adapta-se automaticamente à área de estudo do modelo de acordo com a vegetação, superfícies e estruturas de construção presentes, por isso o valor de uso recomendado pela equipa científica do ENVI-met é o valor padrão de 0,01m.

No Anexo 4 apresentam-se os inputs com as emissões do tráfego rodoviário de hora a hora de todas as ruas na área de estudo.

As simulações foram realizadas no software ENVI-met usando um computador com processador Intel Core i3 e com 8Gb RAM. A licença de uso do Software utilizada foi a licença de estudante que está limitada ao uso de um único núcleo de processador (single-

core) em cada simulação, o que levou a um aumento muito significativo do tempo necessário para concluir cada simulação realizada.

3.4. Análise e tratamento de dados

Neste estudo foram analisados e tratados os dados dos seguintes parâmetros: Temperatura do ar exterior, velocidade do vento, humidade relativa do ar, concentração de poluentes (NO, NO₂, O₃, PM10, PM2,5) e conforto térmico através do índice PET a uma altura de 1,5m. Também se realizou a análise da temperatura das fachadas dos edifícios e da temperatura interior dos edifícios.

O ENVI-met dispõe de uma ferramenta chamada Bio-met que apresenta quatro índices para o cálculo e interpretação do conforto térmico. O Índice térmico mais recentemente criado, utilizado pelo IPMA (IPMA, 2021b) e com recomendações da Ação COST 730 (2009) é o Índice Térmico Universal (UTCI) (Jendritzky et al., 2005), no entanto o UTCI apresenta limitações no software ENVI-met, como por exemplo a velocidades do vento inferiores a 0,5m/s a uma altura de 10m pode criar áreas sem dados (ENVI-met, 2021b). Devido a estas restrições/limitações, o índice recomendado pelo ENVI-met na sua documentação para avaliar o stress humano em ambientes externos e para medir a escala de conforto térmico é o índice Physiological Equivalent Temperature (PET) (ENVI-met, 2021b; Fischereit & Schlünzen, 2018), índice esse utilizado em imensos estudos (e.g. Fabbri et al., 2020; Laureti et al., 2018; Mahmoud et al., 2021).

O índice PET avalia o balanço térmico do corpo através das variáveis climáticas do ambiente da área de estudo e das condições fisiológicas do corpo humano. As variáveis climáticas consideradas e analisadas são a temperatura do ar, a temperatura média radiante, a velocidade do vento e a humidade específica. As condições fisiológicas do corpo humano são compostas por parâmetros do corpo humano, parâmetros das roupas usadas e do metabolismo humano.

Os parâmetros fisiológicos usados para o cálculo do conforto térmico externo nas simulações computacionais apresentam-se na Tabela 6. Foram usados maioritariamente valores padrão para os parâmetros humanos de acordo com a norma ISO 7730, usando apenas o género masculino como referência. O parâmetro do isolamento estático das roupas foi adequado conforme a estação do ano que se estava a simular (verão ou inverno).

Tabela 6- Parâmetros fisiológicos

	Parâmetros humanos pessoais		
	verão	inverno	
	Masc.	Masc.	
Parâmetros do corpo	Idade (anos)	35	35
	Peso (kg)	75	75
	Altura (m)	1,75	1,75
Parâmetro de roupa	Isolamento estático de roupas (clo)	0,6	1,2

Parâmetros de Metabolismo corporal	Taxa Basal (W)	84,49	84,49
	Metabolismo de trabalho (W)	80,21	80,21
	Velocidade de caminhada (m/s)	1,21	1,21
	Soma do trabalho metabólico (W)	164,7	164,7

A Tabela 7 apresenta a categorização dos níveis de stress térmico e do grau de stress fisiológico (Goulart, 2019).

Tabela 7 - Níveis de Percepção térmica e do grau de stress fisiológico

PET (°C)	Percepção Térmica	Grau de stress fisiológico
<4	Muito Frio	Stress por frio extremo
4-8	Frio	Stress por frio muito elevado
8-13	Fresco	Stress por frio elevado
13-18	Moderadamente frio	Stress por frio moderado
18-23	Confortável	Sem Stress térmico
23-29	Moderadamente calor	Stress por calor moderado
29-35	Calor	Stress por calor elevado
35-41	Muito calor	Stress por calor muito elevado
>41	Calor extremo	Stress por calor extremo

Neste estudo a análise e o tratamento de dados das simulações computacionais incidiram em duas vertentes, a análise das médias espaciais a 1,5m de altura da área de estudo para todos os parâmetros, e a análise dos dados de diferentes zonas “grids”, escolhidas de forma

estratégica (Figura 21) com base nos focos de maior poluição da simulação Baseline atual, na movimentação pedestre e de forma a permitir comparação entre as diferentes ruas.

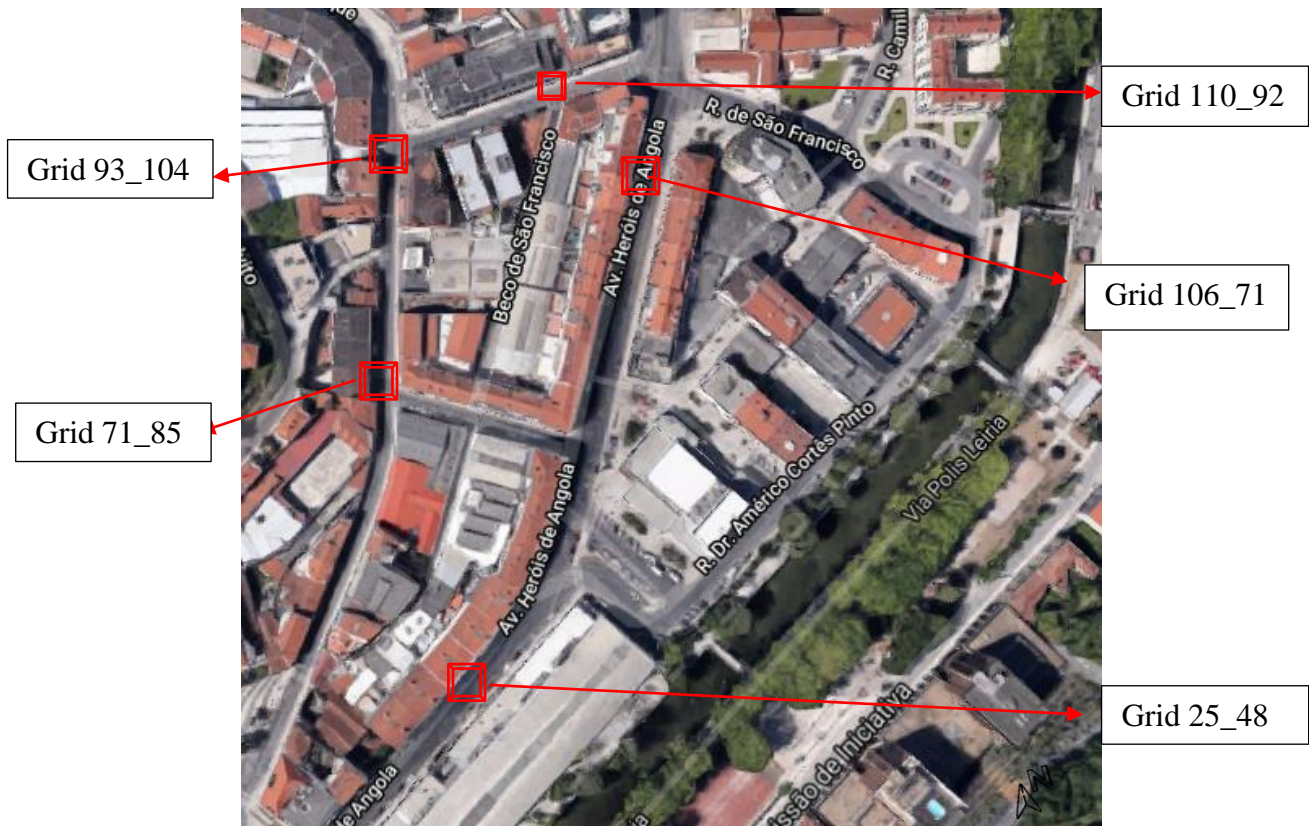


Figura 21- Zonas grids escolhidas para análise detalhada.

Para a extração das médias espaciais da área de estudo dos diferentes cenários e parâmetros foi necessário correr um script na ferramenta Mapscript do Leonardo no Software ENVI-met. O script (código) que calcula a média espacial horária para qualquer parâmetro pode encontrar-se no Anexo 5.

Enquanto os resultados dos parâmetros de cada grid (célula) podem ser extraídos diretamente para o Excel grid a grid, os resultados como a média espacial do mapa (área de estudo) de determinado parâmetro só podem ser obtidos correndo scripts como o acima mencionado.

Após os dados das simulações estarem todos organizados em Excel, foram calculadas médias diárias e diferenças diárias e horárias dos diferentes parâmetros dos cenários comparáveis, através das seguintes fórmulas:

$$\text{Média: } \bar{x} = \frac{\sum xi}{n}$$

$$\text{Diferença Percentual: } 1 - \left(\frac{x_A}{x_B}\right) \times 100$$

A criação e a escolha das medidas de resiliência do cenário misto (S5) baseou-se na análise dos resultados aos parâmetros estudados nos quatro primeiros cenários extremos (S1-S4),

em várias células (grids) ao longo da área de estudo de forma a verificar os efeitos de cada medida nessas zonas específicas (Figura 21).

Em suma, foram realizadas quatro simulações ao modelo atual da cidade (Baseline), nomeadamente em condições de: i) verão atual, ii) verão futuro (2040-2070), iii) inverno futuro (2040-2070) e iv) onda de calor.

Cada simulação ao modelo Baseline da cidade serviu como base/referência de comparação dos resultados, sendo que:

1. A simulação ao modelo Baseline em condições de verão atual serviu para verificar o impacto das condições de verão futuro (2041-2070) no microclima e poluição do ar da área de estudo, por comparação com os resultados da simulação ao modelo Baseline em condições de verão futuro;
2. A simulação ao modelo Baseline em condições de verão futuro (2041-2070) serviu como base de comparação para verificar o impacto dos diferentes cenários verdes/extremos (S1-S4) e cenário misto (S5) no microclima e poluição do ar da área de estudo em condições de verão futuro (2041-2070);
3. A simulação ao modelo Baseline em condições de verão e inverno futuro (2041-2070) e a simulação ao modelo Baseline em condições de onda de calor serviram para verificar o impacto das medidas do cenário misto (S5) no microclima, poluição do ar e condições térmicas do edificado da área de estudo nas condições climáticas referidas.

4. Resultados e Discussão

Esta secção apresenta os resultados das simulações dos cenários na área em estudo nas diferentes condições climáticas. Foram estudados os efeitos das medidas implementadas nos diferentes cenários através dos parâmetros analisados (1,5m de altura), considerando e comparando sempre com as simulações à linha de base (Baseline).

4.1. Impacto das condições de verão futuro no microclima e poluição do ar na área de estudo - modelo Baseline

Como referido anteriormente, a simulação ao modelo Baseline em condições de verão atual e em condições de verão futuro (2041-2070) serviu para verificar o impacto das condições de verão futuro no microclima e poluição do ar na área de estudo atual em dias típicos de verão, ou seja, sem qualquer tipo de medida de resiliência.

Nas Figuras 22 e 23 pode-se verificar a evolução da temperatura do ar e da humidade relativa média espacial (na área de estudo) a uma altura de 1,5m. A temperatura do ar aumenta em média 11% (o que equivale a um aumento médio de 2°C ao longo do dia) e a Humidade relativa diminui 2,7%.

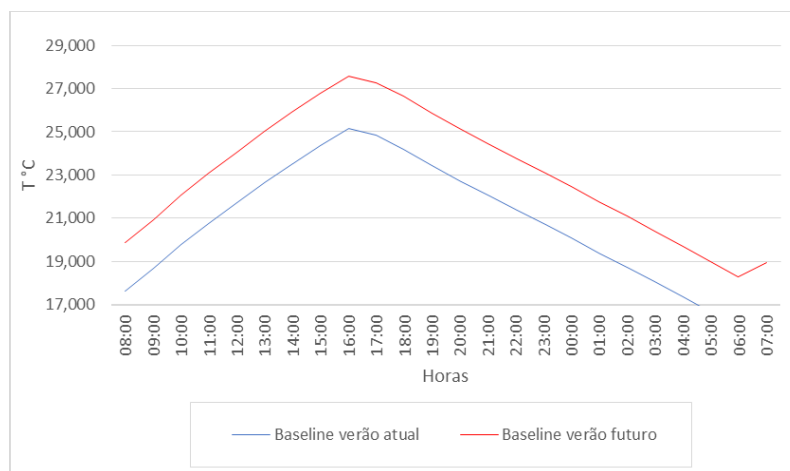


Figura 22- Temperatura do ar média espacial ao longo do dia a 1,5m de altura.

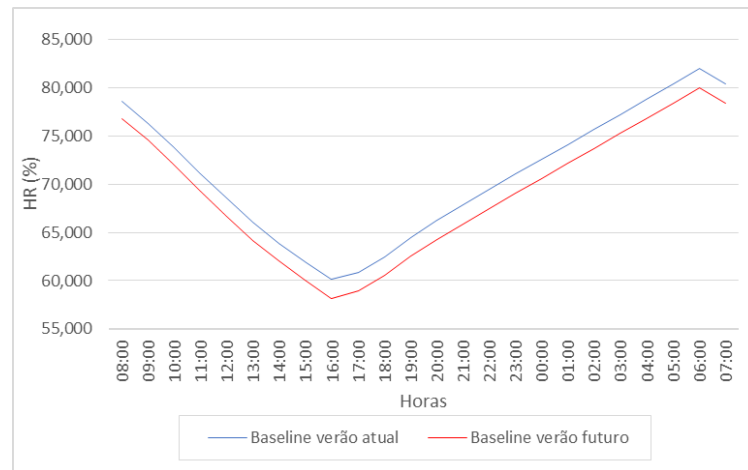


Figura 23 - Humidade relativa média espacial ao longo do dia a 1,5m de altura.

Relativamente ao conforto térmico ao ar livre, analisando-se o gráfico da Figura 24 e a Tabela de categorização do índice PET (Tabela 7) apresentada no capítulo anterior, verifica-se que ocorre uma redução do conforto térmico médio espacial a 1,5m de altura durante o dia, podendo-se durante a tarde verificar a passagem da perceção térmica do nível de Calor para o nível de Muito calor e durante a noite uma melhoria, pois existe uma ligeira diminuição do stress fisiológico ao longo de todas as horas noturnas em relação à simulação Baseline atual. Por exemplo, às 15h da tarde o índice PET no verão atual encontra-se a 34,8°C e no verão futuro nos 38,2°C. Já às 22h o índice PET no verão atual encontra-se nos 15,7°C e no verão futuro nos 18,3°C, ou seja, constata-se que às 15h existe uma redução do conforto térmico ao ar livre, mas às 22h uma melhoria.

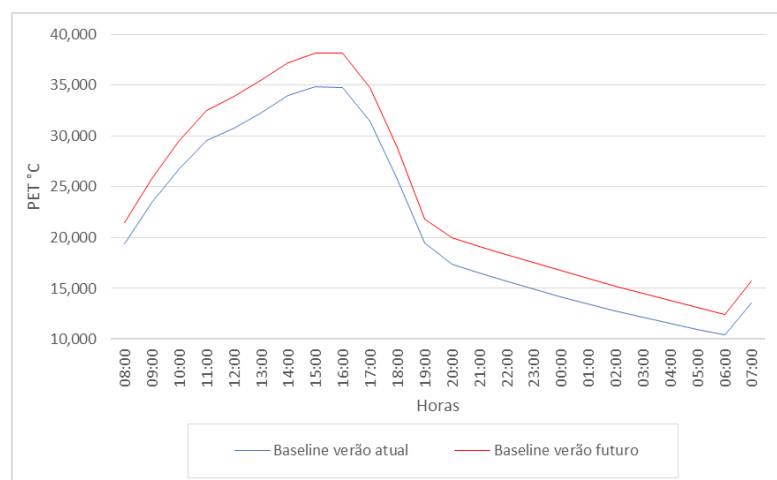


Figura 24 – Índice PET médio espacial ao longo do dia (Z=1,5m).

No Anexo 6 apresentam-se mapas com a variação espacial do índice PET e da temperatura do ar que comparam ambas as simulações.

Relativamente à concentração dos poluentes, constata-se uma redução da concentração média diária na maioria dos poluentes na simulação Baseline em condições de verão futuro, apesar de as diferenças não serem expressivas. A ligeira redução da concentração dos poluentes pode ser explicada pelo maior aquecimento da superfície, o que leva a uma maior

turbulência devido ao maior fluxo de calor o que por sua vez aumenta a dispersão de poluentes.

A Tabela 8 apresenta as diferenças e impactos das condições de verão futuro nos diferentes parâmetros analisados, para a média espacial da área de estudo a 1,5m de altura.

Tabela 8 - Diferenças nos parâmetros analisados das condições de verão futuro para o verão atual

Impactos futuros RCP 8.5 nos seguintes parâmetros		
	Baseline verão futuro	
Temperatura do ar(°C)	11%	+
Humidade relativa do ar (%)	-2,7%	-
Velocidade do vento (m/s)	0,77%	+
NO (µg/ m³)	-1,78%	-
NO₂(µg/ m³)	0,552%	+
NO_x(µg/ m³)	-0,150%	-
O₃(µg/ m³)	-0,191%	-
PM10(µg/ m³)	-0,025%	-
PM2,5(µg/ m³)	-0,053%	-
Índice PET (°C)	13%	+

Na Tabela 9 apresentam-se os resultados das médias diárias dos parâmetros estudados para as duas simulações de linha de base (Baseline) realizadas, que posteriormente servirão como termo de comparação para os parâmetros estudados nas diferentes simulações.

Tabela 9- Médias diárias dos parâmetros estudados para as duas simulações Baseline realizadas

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)										
	Temperatura do ar (°C)	Humidade e relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	NO (µg/ m ³)	NO ₂ (µg/ m ³)	NO _x (µg/ m ³)	O ₃ (µg/ m ³)	PM10 (µg/ m ³)	PM2,5 (µg/ m ³)	Índice PET (°C)
Baseline verão atual	20,686	70,972	1,661	7,069	16,444	23,513	52,009	19,586	7,479	21,095
Baseline verão futuro	23,051	69,055	1,673	6,944	16,534	23,478	51,909	19,581	7,475	23,759

4.2. Impacto dos cenários verdes/extremos no microclima, poluição do ar e criação do cenário misto

A análise e comparação dos resultados dos diferentes cenários verdes/resiliência em condições de verão futuro teve por objetivo avaliar o impacto das infraestruturas verdes/medidas de resiliência no microclima e na poluição do ar na área de estudo, tendo por base de comparação os resultados da simulação ao modelo Baseline em condições de verão futuro. Nesta fase, apenas se apresenta e se discute os resultados dos diferentes cenários da área de estudo através de médias espaciais a uma altura de 1,5m. A Tabela 10 apresenta as

diferenças percentuais das médias de cada parâmetro estudado, ou seja, as diferenças de cada cenário relativas ao modelo Baseline em condições de verão futuro.

Como se pode constatar as diferenças são relativamente pequenas, menores que 1%, exceto no cenário sem vegetação. Depreende-se que num verão futuro para dias típicos de verão, a implementação das infraestruturas verdes/resiliência modeladas nos cenários criados parece não produzir melhorias de relevo em qualquer um dos parâmetros estudados.

Tabela 10 - Diferenças percentuais das médias diárias de cada parâmetro a 1,5m de altura

Impactos dos diferentes cenários nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)				
	S1 (todos os telhados e paredes verdes)	S2 (todos os telhados brancos)	S3 (+31% de árvores)	S4 (sem vegetação)
Temperatura do ar (°C)	-0,063%	-0,003%	-0,003%	0,061%
Humidade relativa do ar (%)	0,532%	0,023%	0,025%	-0,183%
Velocidade do vento (m/s)	-0,249%	-0,401%	-0,092%	6,834%
NO (µg/ m³)	0,129%	0,193%	-1,630%	-2,632%
NO₂ (µg/ m³)	0,094%	0,095%	0,011%	-2,249%
NO_x (µg/ m³)	0,105%	0,124%	-0,475%	-2,362%
O₃ (µg/ m³)	-0,036%	-0,034%	-0,080%	0,752%
PM10(µg/ m³)	0,007%	0,009%	-0,047%	-0,132%
PM2,5(µg/ m³)	0,016%	0,019%	-0,088%	-0,353%
Índice PET (°C)	0,389%	0,153%	-0,167%	0,994%

De forma mais pormenorizada, as Figuras 25 e 26 apresentam a evolução diária das diferenças entre os cenários das medidas de resiliência/verdes em condições de verão futuro e a simulação Baseline em condições de verão futuro para os parâmetros da temperatura do ar e índice PET.

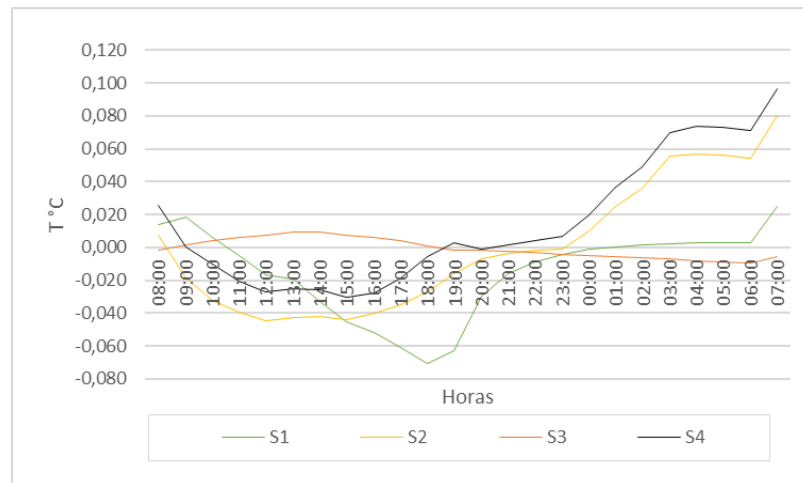


Figura 25- Diferenças na temperatura do ar média espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura (S1 - todos os telhados e paredes verdes; S2 - todos os telhados brancos; S3 - + 31% de árvores; S4 - sem vegetação).

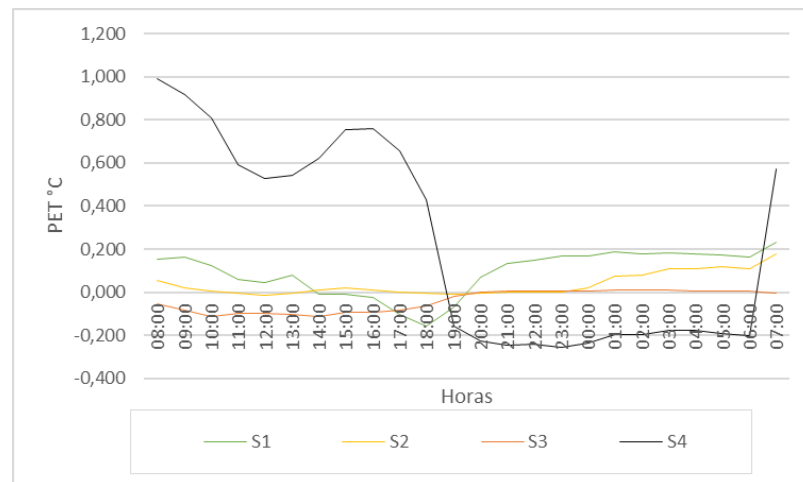


Figura 26- Diferenças no índice PET médio espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura (S1 - todos os telhados e paredes verdes; S2 - todos os telhados brancos; S3 - + 31% de árvores; S4 - sem vegetação).

Como se pode verificar as diferenças não são assinaláveis, no entanto nos cenários S1, S2 e S4 constata-se uma redução da temperatura durante o dia e um aumento durante a noite. Relativamente ao S3 (só com árvores), este não sofreu grandes alterações pois caracteriza-se por um aumento de apenas 31% das árvores sobre as que já existiam na área em estudo devido à falta de espaço de implementação, como já referido anteriormente. Quanto ao conforto térmico ao ar livre apesar de também não se verificarem diferenças significativas entre os cenários S1, S2 e S3, o cenário S4 (sem vegetação) é o cenário com piores resultados, pois nas horas de maior calor, mais desconforto e stress térmico, o índice PET aumenta, e nas horas de menor calor (durante a noite) este baixa relativamente à simulação Baseline em condições de verão futuro. Apesar do aumento do desconforto térmico neste cenário (S4) a perceção térmica e o grau de stress térmico não são alterados de nível segundo a Tabela 7. O aumento do desconforto pode, em parte, ser explicado pelo aumento da velocidade do vento (+6%) neste cenário (Figura 27).

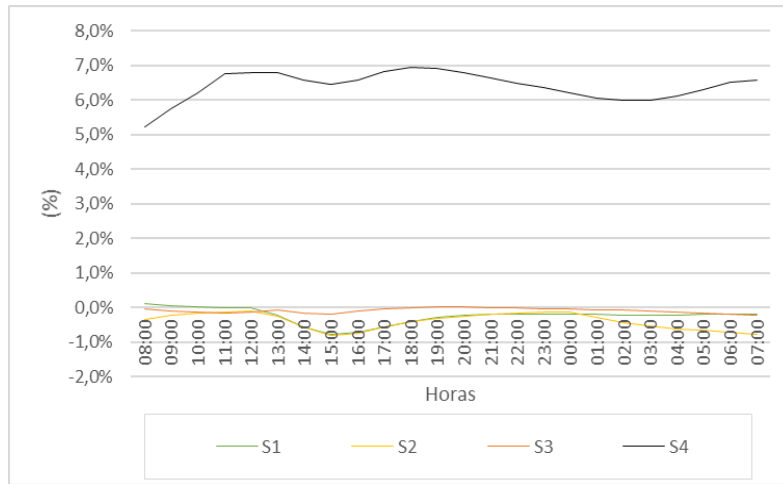


Figura 27- Diferenças percentuais na velocidade do vento média espacial ao longo do dia, a 1,5m de altura.

Na Figura 28 apresentam-se os gráficos com as diferenças ao longo do dia nos poluentes estudados para os cenários verdes/resiliência.

Comparando com os resultados do modelo Baseline em condições de verão futuro existe genericamente um aumento pouco representativo das concentrações em todos os cenários, exceto no S4 em que apenas aumentou a concentração do poluente O₃, provavelmente devido ao aumento de temperatura do ar pois é um poluente fotoquímico, enquanto a concentração média espacial dos outros poluentes diminuiu, o que seria expectável pois sem qualquer vegetação na área de estudo a dispersão dos poluentes atmosféricos aumenta com o aumento das velocidades do vento.



Figura 28 - Diferenças nas concentrações de NOx, O₃, PM10 e PM2,5 ao longo do dia (z=1,5m).

No Anexo 7 encontram-se mapas com a variação espacial da temperatura do ar, índice PET e diferentes poluentes às 9h, 15h e 21h.

Na Tabela 11 apresenta-se um resumo do impacto das infraestruturas verdes e medidas de resiliência simuladas nos diferentes parâmetros médios espaciais a 1.5 m de altura (o sinal “-” indica uma diminuição do valor e o “+” um aumento do valor do respetivo parâmetro).

Tabela 11- Resumo dos impactos das Infraestruturas e medidas de resiliência simuladas nos diferentes parâmetros estudados

Cenários/medidas	Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)									
	Temperatura do ar(°C)	Humidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	Índice PET (°C)
S1	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+
S2	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+
S3	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
S4	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+

Para a criação e escolha das medidas de resiliência do cenário misto (S5), um cenário que se propõe ser equilibrado, adequado e exequível, foram analisados os resultados dos parâmetros estudados de várias zonas (grids) ao longo do mapa da área de estudo, conforme apresentado na seção anterior dos materiais e métodos (Ponto 3.4, Figura 21). Recorda-se, na Figura 29, a localização das zonas “grids” estratégicas que mais contribuíram para definir as medidas de resiliência/verdes a usar no cenário misto (S5).

Verifica-se que existe uma ligeira diminuição de temperatura no S1 e S2, e um ligeiro aumento na concentração de poluentes.

No S3 ocorre um aumento da temperatura do ar e da concentração de poluentes. Enquanto no S4, apesar de existir um ligeiro aumento da temperatura do ar, existe uma redução relevante da concentração de poluentes, com exceção do O₃.

Em questões de conforto térmico ao ar livre o S1 é o melhor cenário, pois o índice PET diminui ligeiramente durante a tarde quando existe mais calor (mais desconforto térmico) e aumenta ligeiramente durante a noite, melhorando assim o conforto térmico durante o dia e durante a noite; já no S4, como expectável, existe um grande aumento do desconforto térmico principalmente durante o dia (Figura 30); por exemplo, às 16h da tarde a simulação Baseline de verão futuro apresenta 43,7 °C nesta mesma grid, e no caso S4 apresenta 48 °C no índice PET, o que significa que a perceção térmica encontra-se no nível de Calor extremo em ambas as simulações.

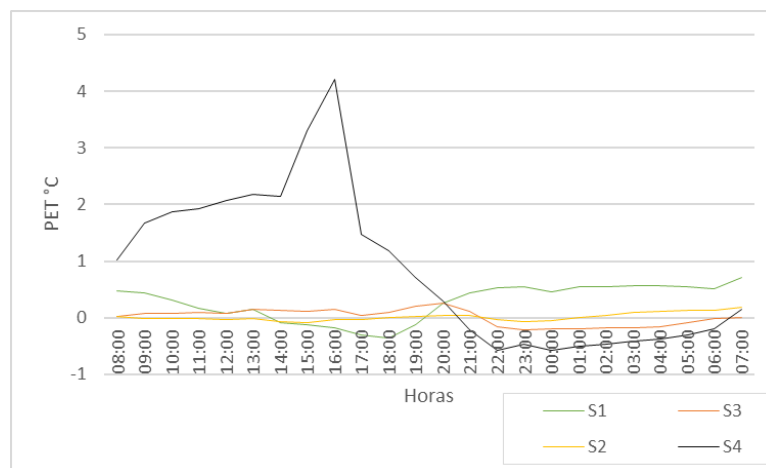


Figura 30- Diferenças nas médias espaciais do índice PET a 1,5m de altura – grid 25_48.

No Anexo 8 apresentam-se os gráficos e tabelas dos resultados dos restantes parâmetros, relativamente às suas médias diárias, diferenças e seu comportamento ao longo do dia.

Para esta zona da área de estudo e face aos resultados obtidos, foram escolhidas as seguintes medidas resilientes para a modelação do cenário misto S5:

- Telhados Brancos – por questões económicas, a sua implementação e manutenção é muito mais económica que a dos telhados verdes e ao mesmo tempo poderá contribuir para a redução da ilha de calor da cidade e para a melhoria do conforto térmico no interior dos edifícios;
- Fachadas Verdes – apesar não proporcionarem diferenças significativas na maioria dos parâmetros contribuem para uma ligeira melhoria no conforto térmico ao ar livre e espera-se que contribuam positivamente para as condições térmicas dos edifícios;
- Sem árvores na rua: ao analisar-se os resultados do cenário de árvores (S3) nesta rua verificou-se que a concentração de poluentes aumenta, apesar de existir uma ligeira melhoria no conforto térmico, optando-se mesmo assim por excluir as árvores na modelação do S5 neste local (rua).

Para a Grid 106_71, que ainda se localiza na rua Avenida Heróis de Angola, os resultados da diferença dos vários parâmetros em relação à simulação Baseline em condições de verão futuro, constam na Tabela 13.

Tabela 13- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 106_71

	Impactos dos diferentes cenários nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)			
	S1	S2	S3	S4
Temperatura do ar (°C)	-0,224%	-0,242%	-0,010%	0,054%
Humidade relativa do ar (%)	1,731%	0,330%	0,144%	-0,064%
Velocidade do vento (m/s)	-0,281%	-0,565%	4,952%	2,260%
NO (µg/ m ³)	0,239%	0,354%	10,597%	-1,559%
NO ₂ (µg/ m ³)	0,234%	0,243%	7,643%	-1,264%
NO _x (µg/ m ³)	0,236%	0,306%	9,335%	-1,432%
O ₃ (µg/ m ³)	-0,145%	-0,123%	-4,047%	0,682%
PM10 (µg/ m ³)	0,058%	0,076%	2,267%	-0,342%
PM2,5 (µg/ m ³)	0,100%	0,132%	4,072%	-0,608%
Índice PET (°C)	1,147%	0,019%	-0,673%	1,001%

Os resultados não variam muito relativamente à célula estudada anteriormente, no entanto no S3, apesar de existir um aumento significativo da velocidade do vento, a qualidade do ar local piora consideravelmente, chegando a aumentos de 10% na média diária de NO (na Figura 31 apresenta-se as diferenças percentuais das concentrações de NO ao longo do dia).

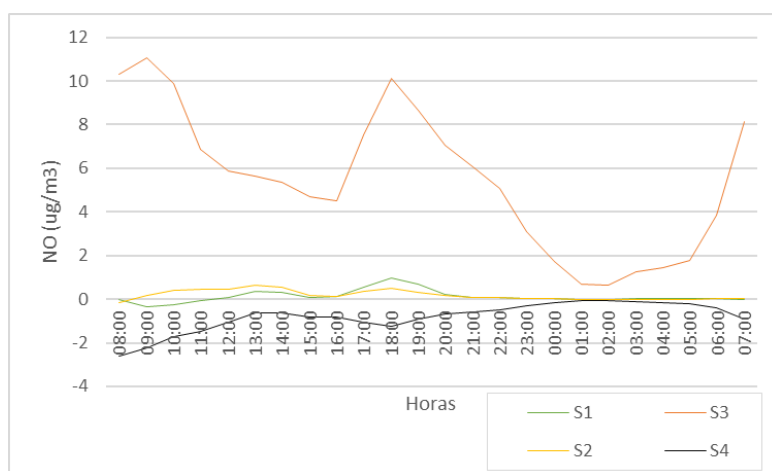


Figura 31- Diferenças nas médias espaciais da concentração de NO nos diferentes cenários ao longo do dia na grid 106_71.

No S1 e S2, existe uma ligeira redução da temperatura do ar e um aumento da concentração de poluentes, enquanto no S4 ocorre um ligeiro aumento da temperatura e melhoria da qualidade do ar.

Quanto ao conforto térmico, os cenários com melhores desempenhos são os cenários S1 e S3 que apresentam uma ligeira melhoria do conforto térmico durante o dia nas horas de maior calor e durante a noite, como se pode verificar na Figura 32.

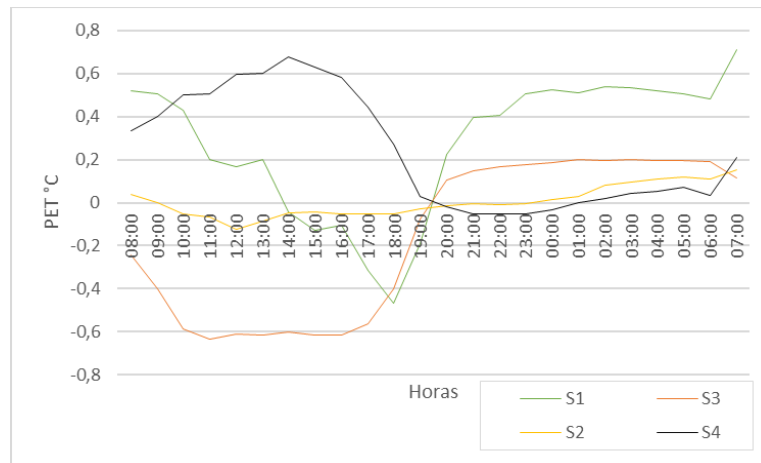


Figura 32- Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura.

No Anexo 8 apresentam-se gráficos e tabelas dos resultados dos restantes parâmetros, relativamente às suas médias diárias, diferenças e comportamento ao longo do dia em relação à simulação Baseline em condições de verão futuro.

Em função dos resultados, para esta zona da área de estudo foram escolhidas as seguintes medidas:

- Telhados Brancos – pelas mesmas razões apontadas para a zona “grid” anterior;
- Fachadas verdes nos edifícios – verifica-se uma ligeira melhoria no conforto térmico, principalmente durante a tarde e durante a noite e espera-se que contribuam positivamente para as condições térmicas dos edifícios;
- Sem árvores na rua – como já referido anteriormente, a presença de árvores neste local aumentou ligeiramente a concentração de poluentes; apesar de as árvores conferirem uma melhoria de conforto térmico ao ar livre optou-se pela sua exclusão da modelação no cenário Misto S5, nesta zona da área de estudo.

A Grid 110_92 localiza-se na rua S. Francisco, uma rua com pouco espaço para implementação de medidas como árvores urbanas. No S3, a rua S. Francisco não apresenta árvores, no entanto árvores da rua Capitão Mouzinho de Albuquerque ou da rua Av. Heróis de Angola poderão influenciar os parâmetros da rua 4.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados da diferença dos variados parâmetros estudados para esta zona, em relação à simulação Baseline em condições de verão futuro

Tabela 14- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 110_92

	Impactos dos diferentes cenários nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)			
	S1	S2	S3	S4
Temperatura do ar (°C)	-0,197%	-0,199%	-0,021%	0,073%
Humidade relativa do ar (%)	1,759%	0,270%	0,048%	-0,084%
Velocidade do vento (m/s)	-2,000%	-2,715%	-7,456%	-0,595%
NO (µg/ m ³)	0,173%	0,247%	-0,095%	-0,272%
NO ₂ (µg/ m ³)	0,211%	0,186%	0,203%	-0,248%
NO _x (µg/ m ³)	0,190%	0,223%	0,029%	-0,263%
O ₃ (µg/ m ³)	-0,148%	-0,105%	-0,252%	0,128%
PM10 (µg/ m ³)	0,048%	0,058%	-0,002%	-0,063%
PM2,5 (µg/ m ³)	0,082%	0,101%	0,008%	-0,110%
Índice PET (°C)	2,479%	0,140%	-0,129%	1,295%

Apesar de não existirem diferenças significativas, verifica-se uma redução de velocidade do vento em todos os cenários e uma redução da temperatura também em todos os cenários exceto no S4. A redução da velocidade do vento no S3 poderá estar associada à presença de duas árvores na rua 2 como demonstra a Figura 33, que estão na direção principal do vento para a rua 4.

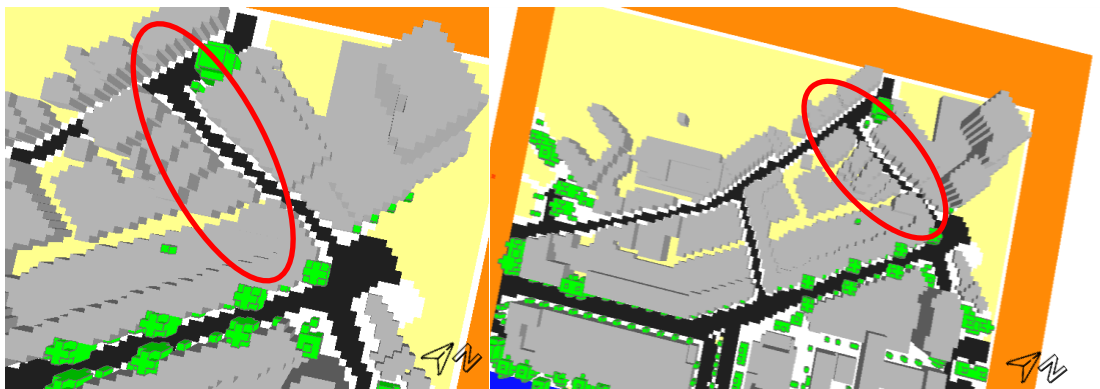


Figura 33- Rua 4 no S3 na área modelada.

As diferenças da qualidade do ar ou da concentração dos poluentes não são expressivas em qualquer cenário. A evolução diária das diferenças de temperatura do ar entre os vários cenários e o modelo Baseline é apresentada na Figura 34.

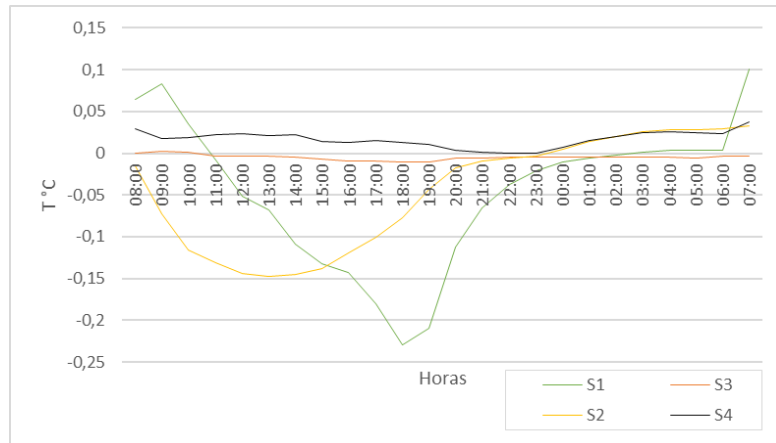


Figura 34- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 110_92.

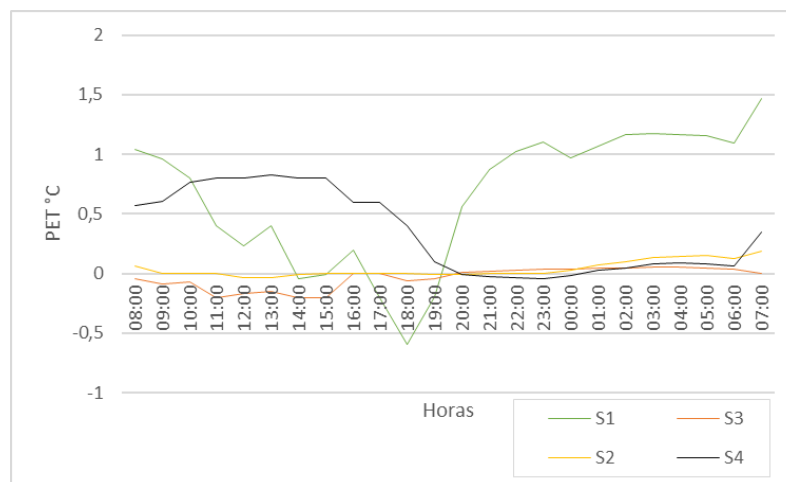


Figura 35 - Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 110_92.

No conforto térmico ao ar livre, o cenário que se destaca mais é o S1, com uma ligeira melhoria durante noite (Figura 35).

No Anexo 8 disponibilizam-se mais resultados dos diferentes parâmetros desta zona “grid”.

Em função dos resultados obtidos, para esta zona da área de estudo foram escolhidas as seguintes medidas de resiliência:

- Telhados Brancos – apesar dos resultados não apresentarem diferenças assinaláveis a 1,5m de altura esta medida continua a ser escolhida pelos mesmos motivos apresentados nas grids anteriores;
- Fachada verde – pela melhoria do conforto térmico ao ar livre e pela possibilidade de contribuírem positivamente para as condições térmicas dos edifícios;
- Sem árvores na rua – para além de não apresentar árvores na rua no S3 como já foi referido, não existe espaço viável para a sua implementação.

A Grid 93_104 encontra-se na rua Capitão Mouzinho de Albuquerque, uma rua também com pouca área para a implementação de espaços verdes. Nesta rua foram modeladas árvores apenas no início e no final da mesma.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da diferença dos vários parâmetros para esta zona, em relação à simulação Baseline em condições de verão futuro

Tabela 15- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 93_104

	Impactos dos diferentes cenários nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)			
	S1	S3	S2	S4
Temperatura do ar (°C)	-0,109%	0,006%	-0,078%	0,059%
Humidade relativa do ar(%)	0,975%	0,032%	0,118%	-0,066%
Velocidade do vento (m/s)	-0,348%	-4,293%	-0,505%	0,688%
NO (µg/ m ³)	0,118%	1,889%	0,156%	-0,316%
NO ₂ (µg/ m ³)	0,169%	1,314%	0,165%	-0,249%
NO _x (µg/ m ³)	0,138%	1,676%	0,160%	-0,289%
O ₃ (µg/ m ³)	-0,117%	-0,630%	-0,107%	0,122%
PM10 (µg/ m ³)	0,039%	0,488%	0,046%	-0,082%
PM2,5 (µg/ m ³)	0,066%	0,828%	0,077%	-0,137%
Índice PET (°C)	1,003%	0,277%	0,109%	1,103%

Nesta zona, também não se constata diferenças expressivas em qualquer um dos parâmetros nos diferentes cenários. A evolução diária das diferenças de temperatura do ar entre os vários cenários e o modelo Baseline é apresentada na Figura 36.

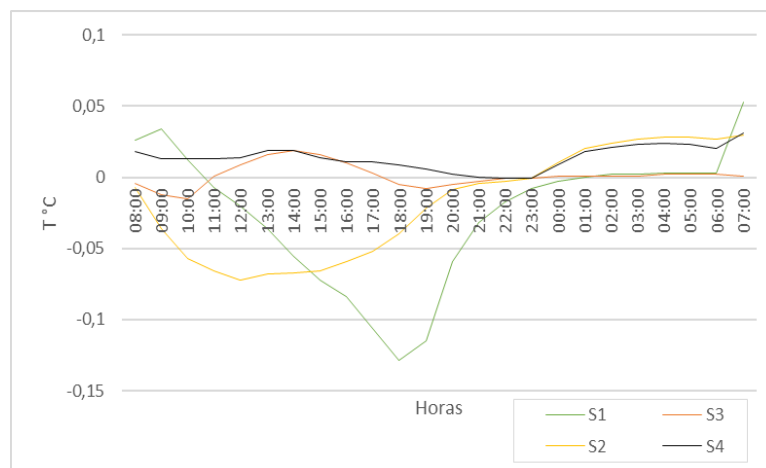


Figura 36- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 93_104.

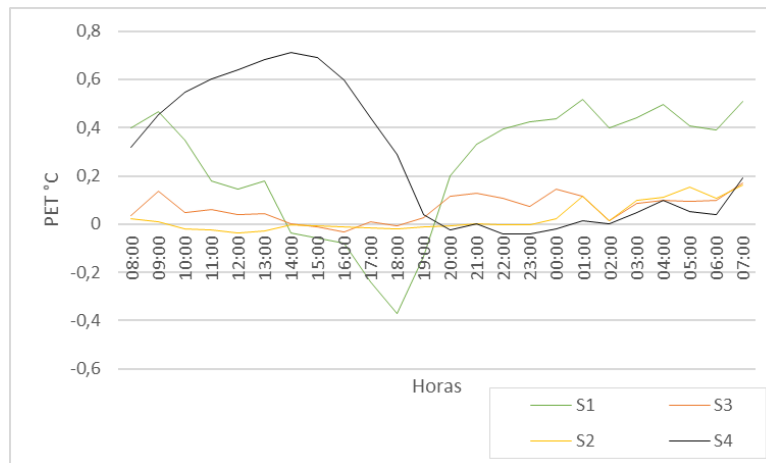


Figura 37- Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 93_104.

Quanto ao conforto térmico ao ar livre (Figura 37), o cenário que continua a destacar-se é o S1, com uma melhoria no conforto térmico em algumas horas da tarde e durante a noite. Exibe-se mais resultados dos diferentes parâmetros no Anexo 8.

Em função dos resultados, para esta zona da área de estudo foram escolhidas as seguintes medidas:

- Telhados Brancos - por todos as razões já anteriormente referidas;
- Fachadas Verdes – Pela melhoria do conforto térmico ao ar livre e pela possibilidade de poderem contribuir positivamente para as condições térmicas dos edifícios;
- Árvores – Decidiu-se manter as duas árvores ao início da rua pois essas árvores poderão estar a contribuir para a melhoria do conforto térmico na rua 4 e na rua 2;

Por último, a Grid 71_85 ainda localizada na rua 2, apresenta árvores modeladas no S3 apenas no final da rua. Na Tabela 16 são apresentados os resultados da diferença dos vários parâmetros para esta zona, em relação à simulação Baseline em condições de verão futuro

Tabela 16- Diferenças percentuais da média diária dos diferentes cenários nos parâmetros analisados a 1,5 m de altura na Grid 71_85

	Impactos dos diferentes cenários nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)			
	S1	S3	S2	S4
Temperatura do ar (°C)	-0,132%	-0,007%	-0,071%	0,086%
Humidade relativa do ar (%)	1,151%	0,009%	0,103%	-0,107%
Velocidade do vento (m/s)	-0,469%	0,080%	-0,716%	1,274%
NO (µg/ m ³)	0,119%	0,135%	0,186%	-1,074%
NO ₂ (µg/ m ³)	0,157%	0,112%	0,148%	-0,856%
NO _x (µg/ m ³)	0,132%	0,126%	0,170%	-0,989%
O ₃ (µg/ m ³)	-0,108%	-0,059%	-0,087%	0,415%
PM10 (µg/ m ³)	0,033%	0,031%	0,042%	-0,254%
PM2,5 (µg/ m ³)	0,057%	0,053%	0,073%	-0,442%
Índice PET (°C)	1,328%	-0,256%	0,149%	1,152%

Tal como na zona anteriormente apresentada os resultados desta grid continuam a não apresentar diferenças notáveis nos diferentes cenários. A evolução diária das diferenças de temperatura do ar entre os vários cenários e o modelo Baseline é apresentada na Figura 38.

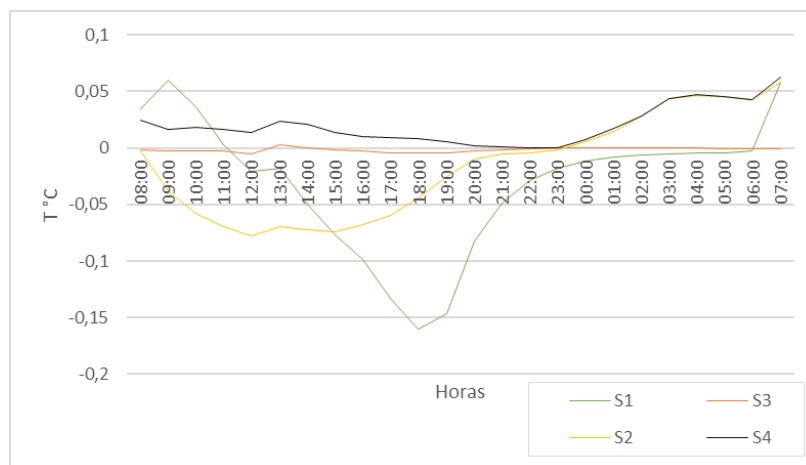


Figura 38- Diferenças nas médias espaciais da temperatura do ar nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 71_85.

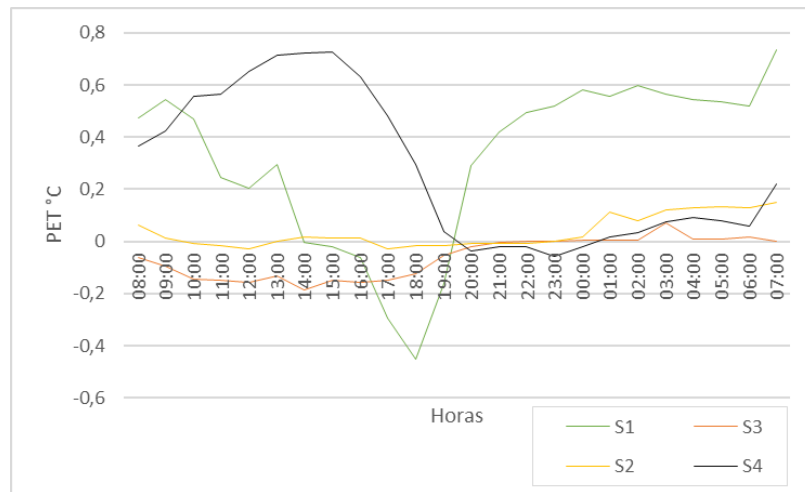


Figura 39- Diferenças nas médias espaciais do índice PET nos diferentes cenários a 1,5m de altura na Grid 71_85.

No conforto térmico ao ar livre (Figura 39) verifica-se uma vez mais que o S1 é o cenário com melhor desempenho, e o S3 também demonstra uma ligeira melhoria ao longo do dia.

No Anexo 8 apresentam-se mais resultados dos diferentes parâmetros desta zona “grid”.

Em função dos resultados para esta zona da área de estudo foram escolhidas as seguintes medidas:

- Telhado Brancos nos edifícios;
- Fachadas Verdes nos edifícios;
- Árvores – apesar de a rua ter pouco espaço, as árvores modeladas no final da rua demonstram uma ligeira melhoria no conforto térmico, por isso decidiu-se manter as mesmas.

Com base nas medidas sugeridas para cada zona da área de estudo, que na verdade coincidiu serem as mesmas, foi então criado o cenário misto (S5). Este cenário é então caracterizado por telhados brancos, paredes verdes e um aumento de 17% de árvores. Na Figura 40 são apresentados extratos tridimensionais deste cenário.

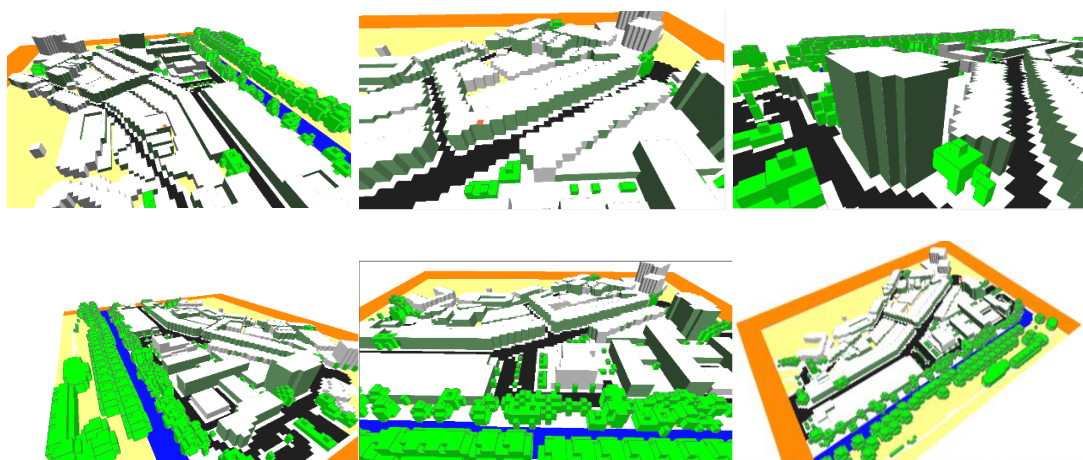


Figura 40- Cenário Misto Modelado (S5).

4.3. Impactos do cenário misto no microclima, poluição do ar e condições térmicas do edificado

4.3.1. Em clima de verão futuro (2041-2070)

O cenário misto (S5) foi modelado em condições de verão futuro, e os seus resultados comparados com os resultados da simulação ao modelo Baseline também em condições de verão futuro, para se poder analisar os potenciais impactos das medidas deste cenário no microclima, na poluição do ar e nas condições térmicas do edificado da área de estudo.

Na Tabela 17 reportam-se as diferenças percentuais da média espacial dos diferentes parâmetros estudados entre o cenário S5 e o modelo Baseline em condições de verão futuro, e na Tabela 18 as suas médias espaciais a 1,5m de altura.

Tabela 17- Diferenças percentuais da média espacial dos diferentes parâmetros a 1,5m de altura

S5 verão futuro		
Temperatura do ar (°C)	-0,007%	-
Humidade relativa do ar (%)	0,153%	+
Velocidade do vento (m/s)	-1,095%	-
NO (µg/ m³)	0,898%	+
NO₂ (µg/ m³)	0,510%	+
NO_x (µg/ m³)	0,625%	+
O₃ (µg/ m³)	-0,163%	-
PM10 (µg/ m³)	0,041%	+
PM2,5 (µg/ m³)	0,096%	+
Índice PET (°C)	0,331%	+

Tabela 18-Médias espaciais a 1,5m de altura dos diferentes parâmetros dos dois cenários

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)										
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel. vento (m/s)	NO(µg/ m ³)	NO ₂ (µg/ m ³)	NO _x (µg/ m ³)	O ₃ (µg/ m ³)	PM10(µg/ m ³)	PM2,5(µg/ m ³)	PET (°C)
Baseline verão futuro	23,05	69,06	1,67	6,94	16,53	23,48	51,91	19,58	7,48	23,76
S5 verão futuro	23,05	69,16	1,66	7,01	16,62	23,62	51,82	19,59	7,48	23,84

Para zonas (grids) estratégicas já analisadas anteriormente em cenários anteriores na área de estudo, apresenta-se na Tabela 19 um resumo com as diferenças percentuais das médias diárias dos diferentes parâmetros.

Tabela 19- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros nas diferentes grids analisadas

Impactos do S5 (verão futuro) nos seguintes parâmetros (Z=1,5m)					
Grids	S5 verão futuro				
	25_48	106_71	110_92	93_104	71_85
Temperatura do ar (°C)	-0,129%	-0,303%	-0,251%	-0,103%	-0,130%
Humidade relativa do ar (%)	0,553%	0,885%	0,973%	0,554%	0,683%
Velocidade do vento (m/s)	-0,813%	-0,256%	-9,619%	-4,948%	-0,826%
NO (µg/ m³)	2,842%	1,226%	0,112%	2,086%	0,322%
NO₂ (µg/ m³)	2,486%	1,212%	0,406%	1,546%	0,303%
NO_x (µg/ m³)	2,706%	1,220%	0,235%	1,886%	0,314%
O₃ (µg/ m³)	-1,598%	-0,769%	-0,392%	-0,788%	-0,188%
PM10 (µg/ m³)	0,741%	0,290%	0,052%	0,549%	0,077%
PM2,5 (µg/ m³)	1,269%	0,519%	0,099%	0,929%	0,134%
Índice PET (°C)	1,057%	0,593%	1,570%	1,058%	0,807%

Em termos de temperatura do ar constata-se uma ligeira redução em todas as grids, apesar de não ser expressiva. O maior aumento da concentração dos poluentes acontece na zona da grid 25_48, sendo que ao longo do dia este aumento da concentração dos poluentes, como por exemplo o NO chega a ultrapassar os 4 % nas horas de maior tráfego rodoviário (Figura 41).

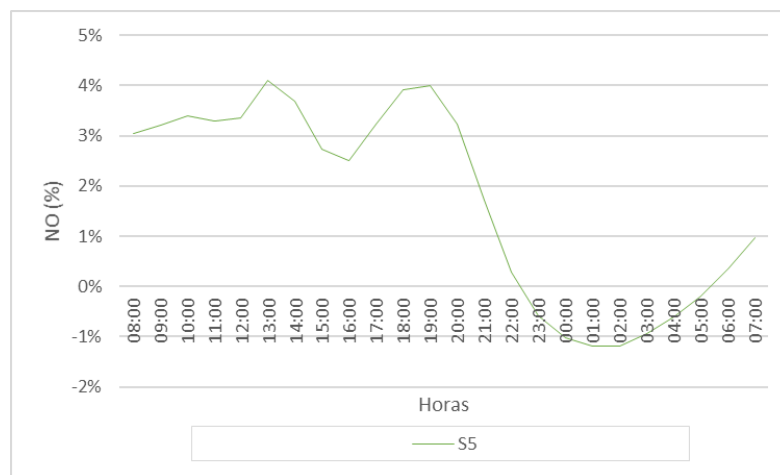


Figura 41- Diferença percentual da concentração de NO ao longo do dia na grid 25_48 a 1,5m de altura.

A concentração de ozono, como seria expectável, diminui em função da diminuição da temperatura do ar. É interessante verificar que na grid 110_92, apesar de existir uma redução de quase 10% da velocidade do vento, não se refletiu no aumento das concentrações dos poluentes como poderia ser expectável acontecer. Contudo, são vários os fatores que contribuem para a dispersão dos poluentes, entre eles também se destacam a configuração das ruas face ao vento dominante e os obstáculos presentes. A rua não tem árvores urbanas,

o que reduz a obstrução ao escoamento do ar, e encontra-se razoavelmente em linha com a direção maioritária do vento, o que permite uma fluidez razoável do ar e por sua vez uma boa dispersão horizontal dos poluentes (Figura 42).

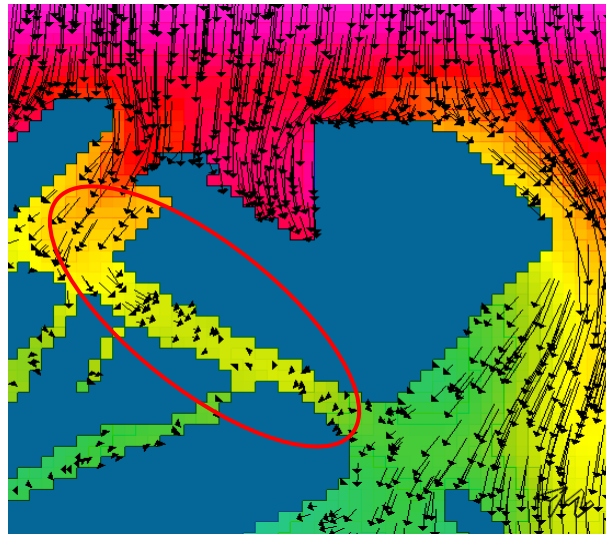


Figura 42- Boa fluidez do ar na rua 4 da área de estudo.

O conforto térmico ao ar livre em todas as zonas “grids” estudadas não apresenta melhorias, verificando-se até uma ligeira diminuição do conforto térmico durante o dia em relação ao cenário de linha de base (Baseline). No período noturno maioritariamente existe uma ligeira melhoria como se pode verificar na grid 25_48, devido ao aumento do índice PET durante as horas noturnas (Figura 43).



Figura 43- Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.

Os restantes gráficos do índice PET e dos outros parâmetros das diferentes zonas “Grids” são apresentados no Anexo 9.

No que respeita ao impacto das medidas de resiliência do S5 na temperatura das fachadas, paredes e telhados dos edifícios, ao comparar-se com os resultados da simulação Baseline em condições de verão futuro às 16:00h (hora do dia com temperaturas do ar mais elevadas), verifica-se diferenças máximas até -13°C na temperatura (Figuras 44, 45 e 46).

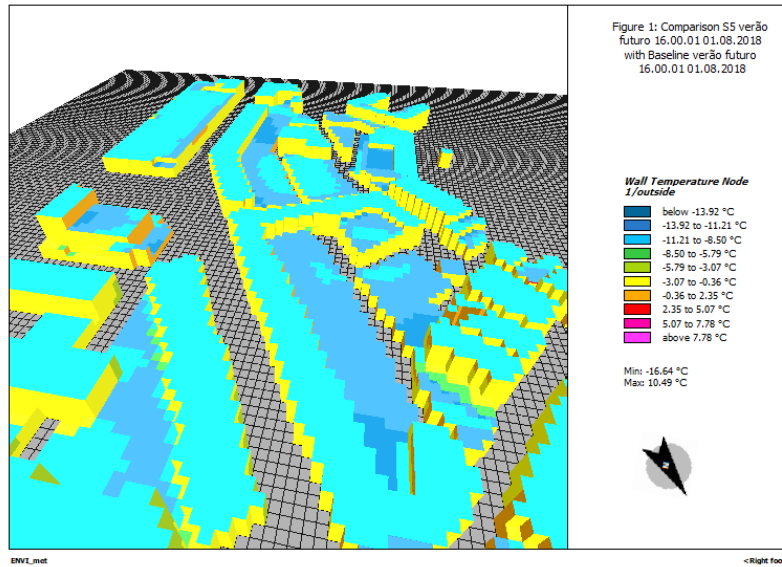


Figura 44- Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline.

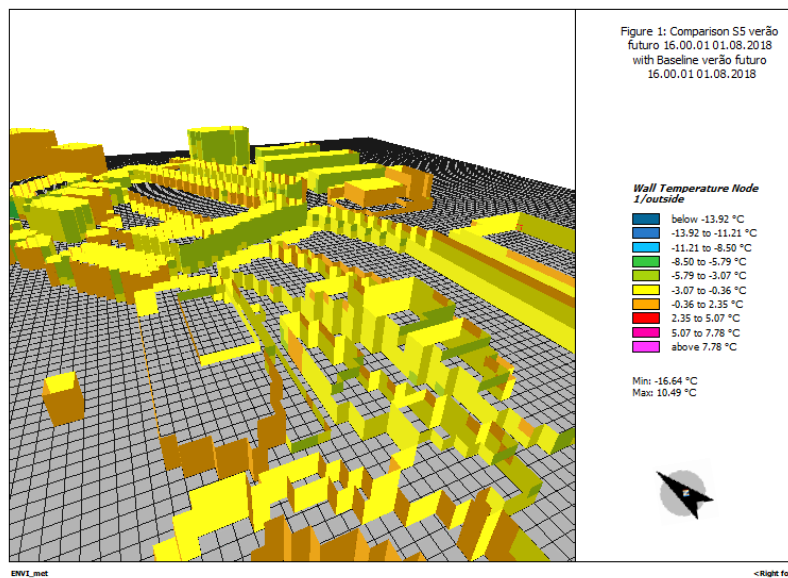


Figura 45- Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline.

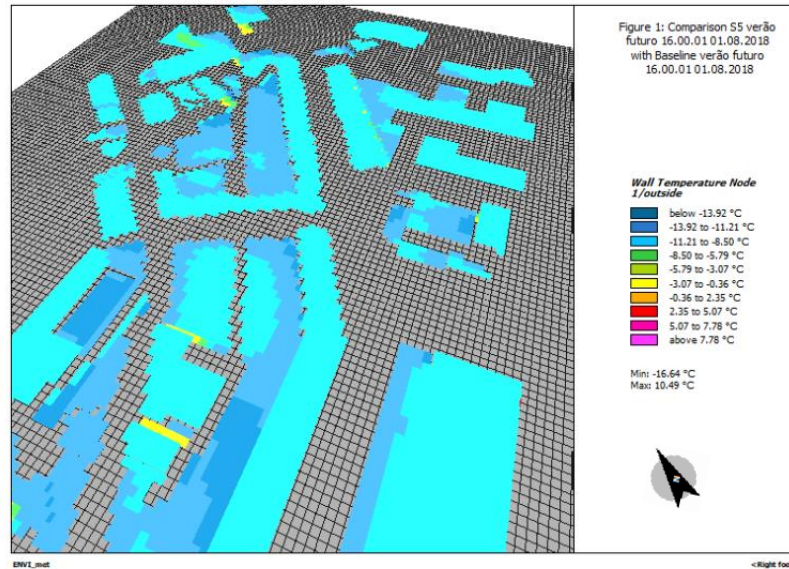


Figura 46- Ilustração gráfica 3D da comparação das temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5-verão futuro e respetivo Baseline.

Quanto às temperaturas do ar no interior dos edifícios, as medidas de resiliência do cenário S5 também tiveram um impacto positivo, proporcionando um ligeiro aumento do conforto térmico no interior dos edifícios. Por exemplo, às 16:00h constatam-se diferenças de temperatura que chegaram a $-0,3^{\circ}\text{C}$ no interior dos edifícios (Figuras 47, 48 e 49)

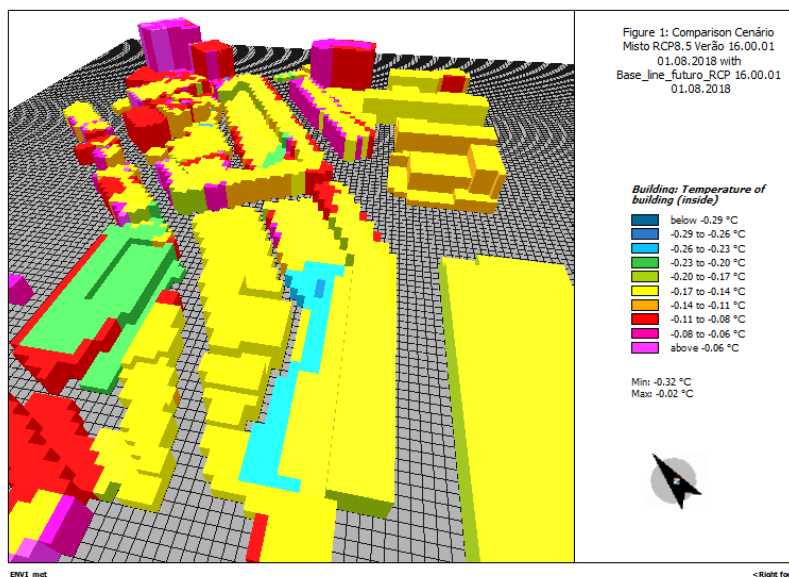


Figura 47- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspectiva A.

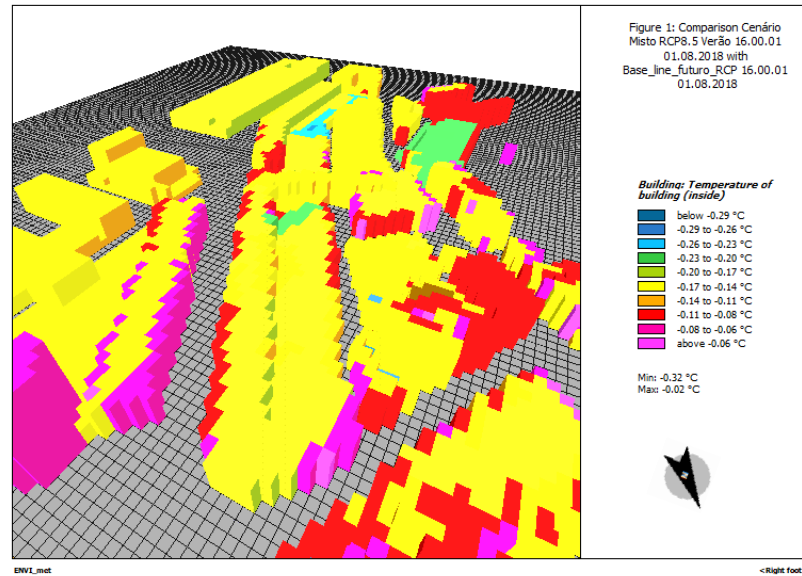


Figura 48 - Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspectiva B.

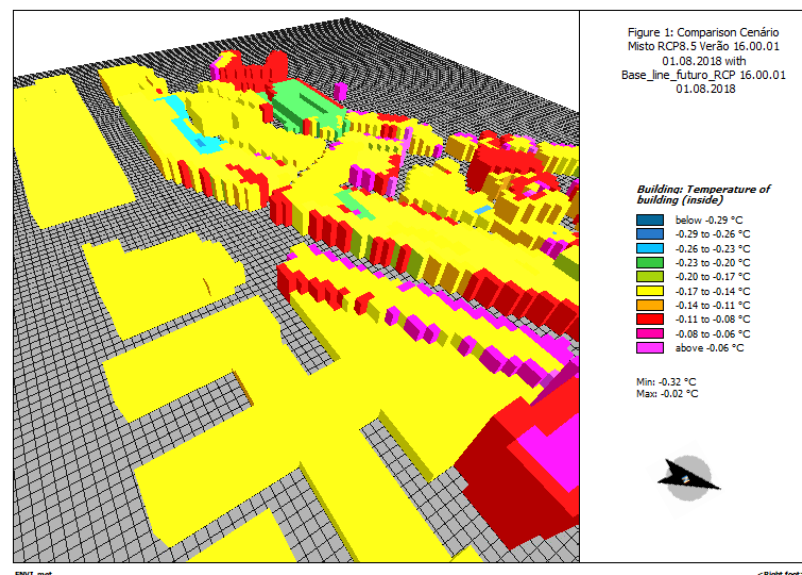


Figura 49- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - verão futuro e respetivo Baseline – perspectiva C.

Em resumo, na área em estudo o cenário S5 não produziu diferenças assinaláveis nos parâmetros estudados, à exceção da temperatura das fachadas e das paredes dos edifícios. Em alguns locais como é o caso da grid 25_48 verificou-se um aumento da concentração de poluentes, como por exemplo o NO que apresentou aumentos máximos de 4 %. Nas temperaturas das fachadas dos edificadros obteve-se atenuações que chegaram aos -13°C e no interior dos edifícios diferenças máximas de -0,32°C.

Os impactos nas condições exteriores ao nível da temperatura do ar e no conforto térmico não são expressivos, contrastando com os resultados de alguns estudos já realizados nesta temática que também usaram o modelo ENVI-met. Por exemplo, McRae et al. (2020)

simularam estratégias de mitigação da temperatura do ar numa área específica da cidade de San Diego – Califórnia de tamanho 300mx300m (aumento da vegetação, aumento do albedo dos telhados e de elementos de sombra arquitetónicos), e apesar de terem obtido impactos pouco significativos durante a noite em todas as estratégias, durante do dia a estratégia de aumento do albedo dos telhados e aumento da vegetação promoveu atenuações de - 3,3°C a -3,5°C na temperatura do ar. Com a estratégia de aumento do sombreamento solar obtiveram atenuações de -1,6°C a -1,7°C, no entanto, as simulações também mostraram imprevistos de aumento da temperatura em alguns locais com valores máximos de 0,9°C e 1°C. O aumento da vegetação consistiu em intensificar o número de árvores na área de estudo, acrescentando 18% da área ocupada pelas copas das árvores totalizando assim 27,6% da composição da área de superfície, aumentando de forma muito significativa o ensombramento, o que não aconteceu no presente estudo, pois no cenário S5 aqui simulado apenas foi possível um ligeiro incremento do número de árvores devido à limitação de espaço e para além disso também não foram implementadas medidas de sombra arquitetónica.

4.3.2. Em clima de inverno futuro (2041-2070)

As medidas de resiliências adotadas neste estudo tiveram por objetivo principal contribuir para a resiliência da cidade de Leiria às temperaturas elevadas da estação mais quente do ano. Contudo, neste estudo pareceu fundamental verificar que impactos estas medidas teriam em condições de inverno. Estudando o cenário Misto (S5) em condições de inverno futuro, em termos de média diária espacial a 1,5 m de altura da área de estudo, nenhum dos parâmetros estudados apresentou diferenças assinaláveis para o modelo Baseline , como se pode verificar nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20- Diferenças percentuais das médias espaciais dos diferentes parâmetros estudados

	S5 inverno futuro	
Temperatura do ar (°C)	-0,040%	-
Humidade relativa do ar (%)	0,058%	+
Velocidade do vento (m/s)	-0,235%	-
NO (µg/ m³)	0,183%	+
NO₂ (µg/ m³)	-0,194%	-
NO_x (µg/ m³)	0,115%	+
O₃ (µg/ m³)	-0,058%	-
PM10 (µg/ m³)	0,009%	+
PM2,5 (µg/ m³)	0,017%	+
ÍndicePET (°C)	-0,043%	-

Tabela 21- Médias espaciais dos diferentes parâmetros

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)										
	Tempe- ratura (°C)	Humid- ade relativ a (%)	Vel.ve- nto (m/s)	NO (µg/ m ³)	NO ₂ (µg/ m ³)	NO _x (µg/ m ³)	O ₃ (µg/ m ³)	PM10 (µg/ m ³)	PM2,5 (µg/ m ³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,824	82,284	1,620	8,201	23,849	32,050	35,039	20,641	10,523	7,593
S5 inverno futuro	9,821	82,332	1,616	8,216	23,803	32,087	35,018	20,643	10,525	7,590

Nas zonas “grids” selecionadas (Tabela 22), confirma-se mais uma vez que não existem melhorias ou agravamentos assinaláveis em nenhum dos parâmetros estudados com a implementação do S5.

Tabela 22- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros estudados nas diferentes grids analisadas

S5 inverno futuro					
Grids	25_48	106_71	110_92	93_104	71_85
Temperatura do ar (°C)	-0,814%	-0,280%	-0,313%	-0,131%	-0,249%
Humidade relativa do ar (%)	0,321%	0,244%	0,231%	0,131%	0,245%
Velocidade do vento (m/s)	-0,029%	-0,298%	-3,451%	-1,122%	-0,076%
NO (µg/ m³)	0,787%	0,053%	-0,507%	-0,119%	0,010%
NO₂ (µg/ m³)	0,556%	0,078%	-0,280%	-0,076%	0,028%
NO_x (µg/ m³)	0,700%	0,063%	-0,415%	-0,102%	0,017%
O₃ (µg/ m³)	-0,487%	-0,095%	0,169%	0,047%	-0,037%
PM10 (µg/ m³)	0,221%	0,015%	-0,119%	-0,034%	0,005%
PM2,5 (µg/ m³)	0,309%	0,023%	-0,166%	-0,046%	0,007%
Índice PET (°C)	1,290%	1,359%	2,644%	1,514%	1,468%

Em todas as zonas “Grids” analisadas é comum existir uma ligeira melhoria do Conforto Térmico ao ar livre, verificando-se um aumento dos °C do índice PET durante o dia e durante a noite, o que no inverno é sinónimo de melhoria. Nos gráficos do índice PET da Grid 110_92 (Figura 50) e da Grid 25_48 (Figura 51) pode-se verificar isso mesmo.

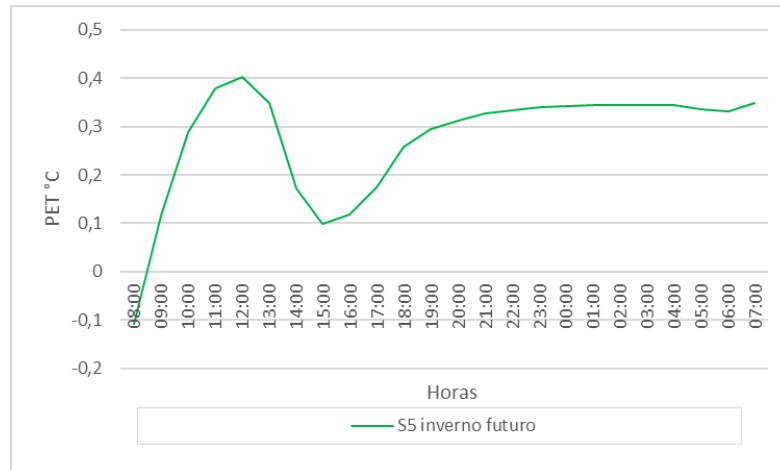


Figura 50- Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 110_92.

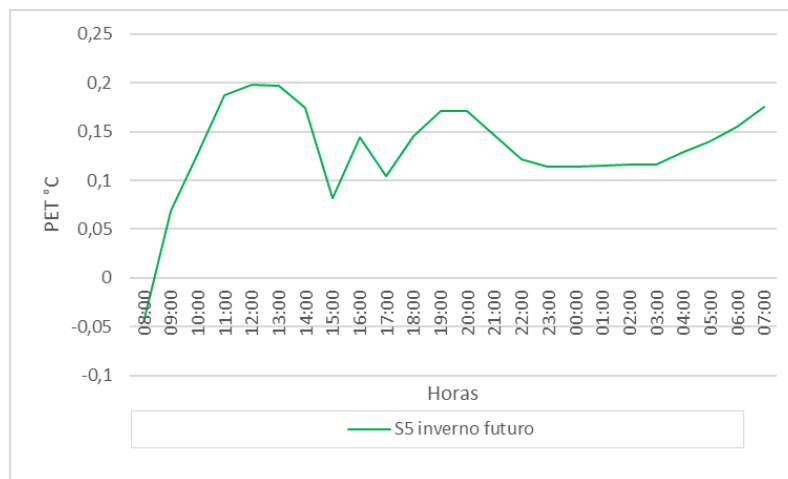


Figura 51- Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.

No Anexo 9 pode-se analisar gráficos das diferenças de comparação entre as simulações de todos os parâmetros estudados ao longo do dia de todas as grids analisadas e médias espaciais da área de estudo nestes dois cenários.

No que respeita ao impacto das medidas do S5 na temperatura das fachadas dos edifícios, verifica-se que às 16:00h existe uma ligeira redução da temperatura dos telhados na ordem dos -2°C . Quanto às paredes/fachadas dos edifícios a temperatura varia entre -1°C a 1°C ao longo dos edifícios da área de estudo (Figuras 52 – 54).

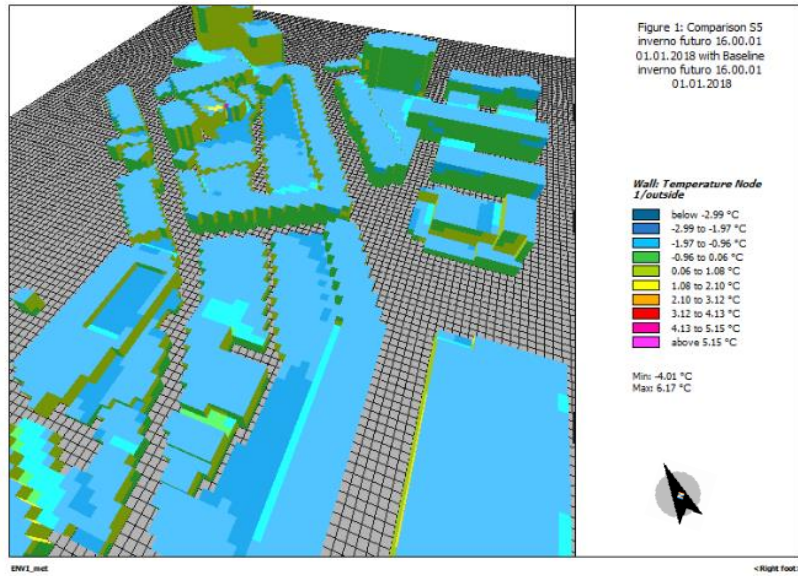


Figura 52 - Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline.

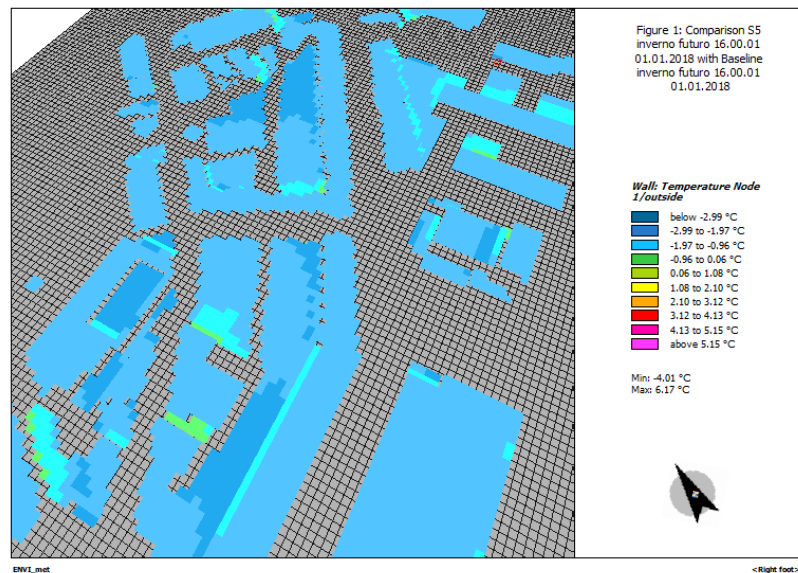


Figura 53- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline.

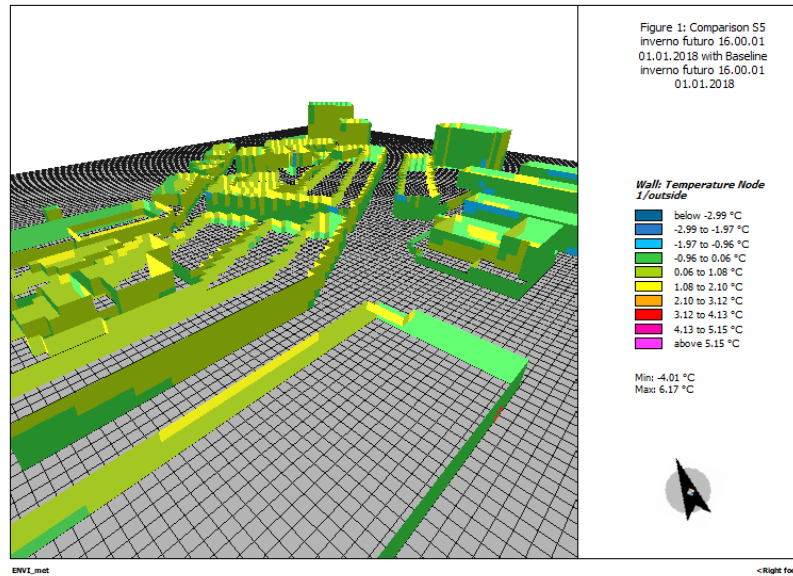


Figura 54- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - inverno futuro e respetivo Baseline.

Relativamente à temperatura no interior dos edifícios as diferenças são quase nulas ao longo do dia (Figuras 55 – 57), o que é considerado um resultado positivo pois as temperaturas no interior dos edifícios no inverno na cidade de Leiria não precisam de ser reduzidas, mas sim aumentadas para melhorar o conforto térmico. O facto do Telhado Branco e parede verde não reduzirem as temperaturas nos interiores dos edifícios no inverno considera-se um resultado favorável.

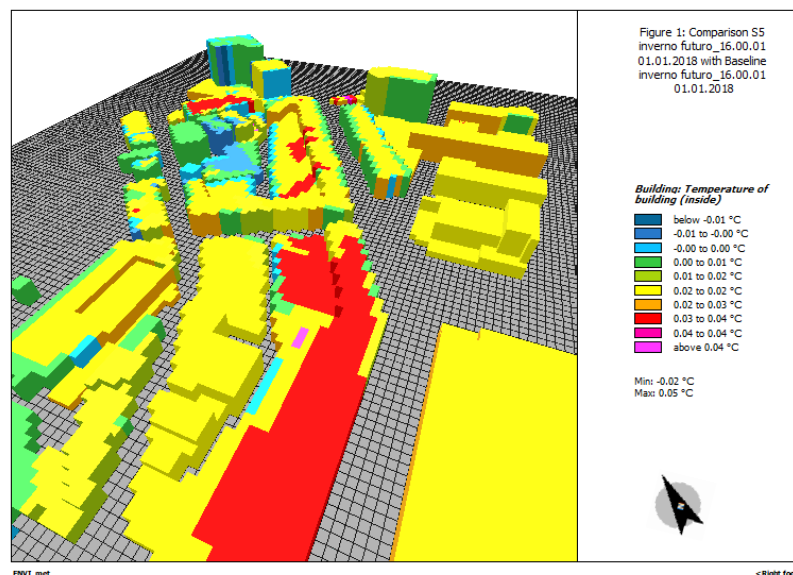


Figura 55- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva A.

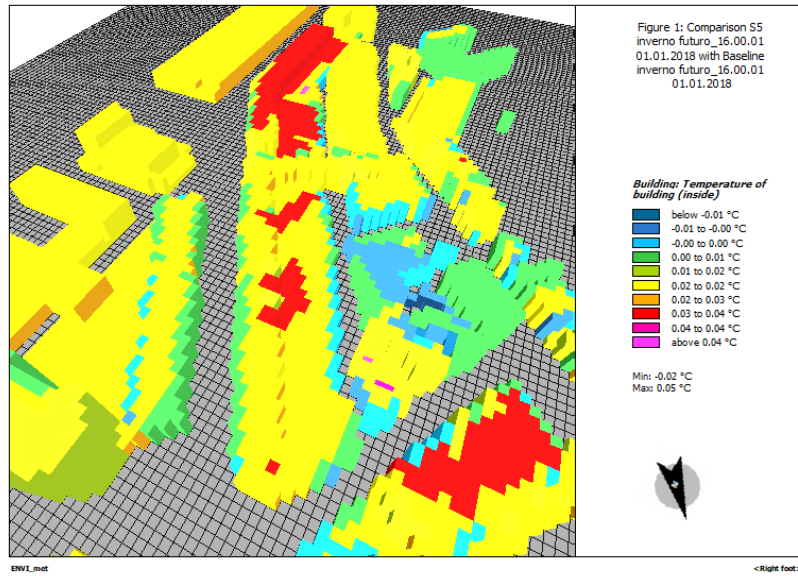


Figura 56- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva B.

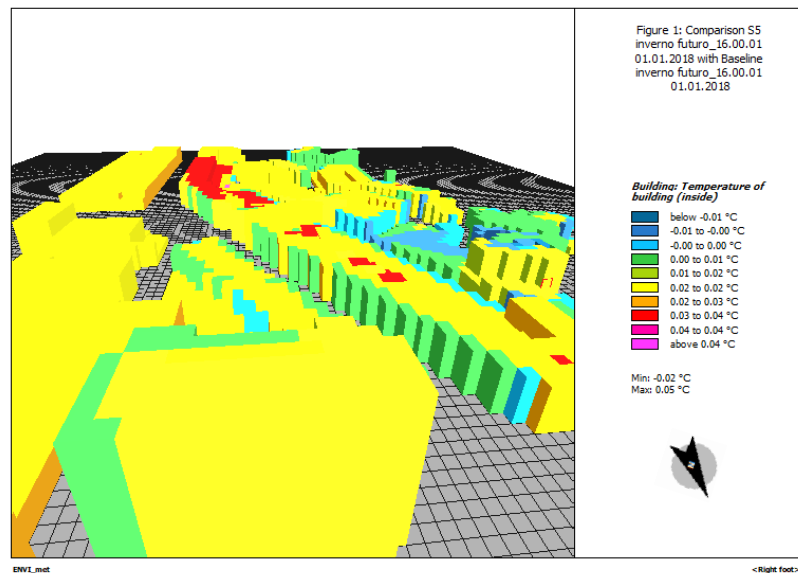


Figura 57- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5- inverno futuro e respetivo Baseline - perspetiva C.

Em resumo, as diferenças não são assinaláveis para os parâmetros estudados. Relativamente ao conforto térmico nas grids analisadas existe uma ligeira melhoria ainda que não seja expressiva, obtendo-se uma melhoria máxima de 0,4°C no índice PET na grid 110_93 relativamente às grids analisadas. Relativamente às temperaturas das fachadas e dos interiores dos edifícios não se obteve atenuações de temperatura com o S5, considerando-se um resultado favorável, dado que o foco principal das medidas de resiliência era amortizar as temperaturas elevadas.

A maioria dos estudos de microclima realizados e existentes até à data deste trabalho, avaliam o desempenho dos cenários/medidas modeladas na estação do ano mais quente. Este

trabalho diferencia-se neste aspeto, por estudar o impacto das medidas de resiliência escolhidas no outro extremo climático, o inverno, podendo-se analisar o efeito das medidas e seus impactos para as duas estações do ano mais extremas em termos de microclima urbano, qualidade do ar e temperaturas nos edifícios presentes na área de estudo.

4.3.3. Em condições de onda de calor

Nas simulações anteriores foram analisados os impactos das medidas adotadas no cenário S5 em condições típicas de verão e de inverno, usando as temperaturas médias das máximas e mínimas diárias, representativas dessas estações do ano. Parece, contudo, interessante verificar o efeito das infraestruturas verdes e das medidas de resiliência implementadas no cenário S5 em condições extremas de uma onda de calor. Para o efeito, o S5 e o modelo Baseline foram simulados em condições de onda de calor, cujas características foram previamente apresentadas na Tabela 1. Segundo o IPMA, (2021a) uma onda de calor ocorre quando num intervalo de pelo menos 6 dias consecutivos, a temperatura máxima diária é superior em 5°C ao respetivo valor do período de referência (média de longo termo). Pelo facto de o tempo simulação computacional necessário ser muito elevado, neste estudo apenas se simulou o cenário S5 em condições de onda de calor para um período de 48h consecutivas.

Comparando os resultados do S5 com os do modelo Baseline em condições de onda de calor através da média espacial a 1,5m de altura da área de estudo, verifica-se que todas as diferenças foram inferiores a 1% (Tabelas 23 e 24).

Tabela 23- Diferenças percentuais das médias espaciais dos diferentes parâmetros estudados em condições de Onda de calor

	S5 Onda de Calor	
Temperatura do ar (°C)	-0,065%	-
Humidade relativa do ar (%)	0,193%	+
Velocidade do vento (m/s)	-0,949%	-
NO (µg/ m³)	0,544%	+
NO₂ (µg/ m³)	0,315%	+
NO_x (µg/ m³)	0,363%	+
O₃ (µg/ m³)	-0,126%	-
PM10 (µg/ m³)	0,007%	+
PM2,5 (µg/ m³)	0,042%	+
Índice PET (°C)	0,163%	+

Tabela 24- Médias espaciais dos diferentes parâmetros nas diferentes simulações em condições de Onda de Calor

	Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)									
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline Onda de Calor	31,782	61,879	1,699	7,363	28,052	35,415	67,977	47,523	16,434	35,296
S5 Onda de Calor	31,761	61,998	1,683	7,403	28,141	35,544	67,892	47,527	16,441	35,354

Ao analisar-se os gráficos dos poluentes atmosféricos das diferenças percentuais dos dois dias em comparação com a simulação Baseline em onda de calor, destaca-se um aumento progressivo no período da manhã da concentração dos poluentes, e uma redução progressiva da parte da tarde ao longo dos dois dias como se pode verificar na Figura 58 para o poluente NOx e no Anexo 9 para os restantes poluentes.

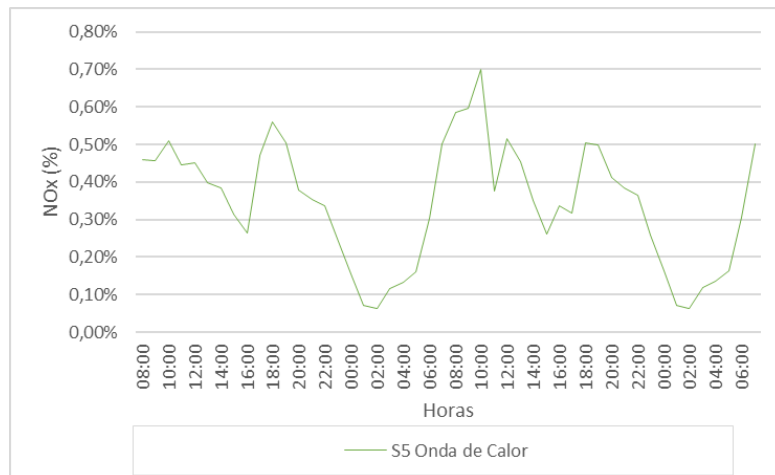


Figura 58- Diferença percentual da concentração média espacial de NOx ao longo das 48h.

A diferença do índice PET no S5 em Onda de Calor não é expressiva, ou seja, as medidas implementadas não melhoram o conforto térmico ao ar livre. Verifica-se, no entanto, uma ligeira redução máxima às 18:00h nos dois dias de -0,2°C no índice PET como se pode verificar na Figura 59.

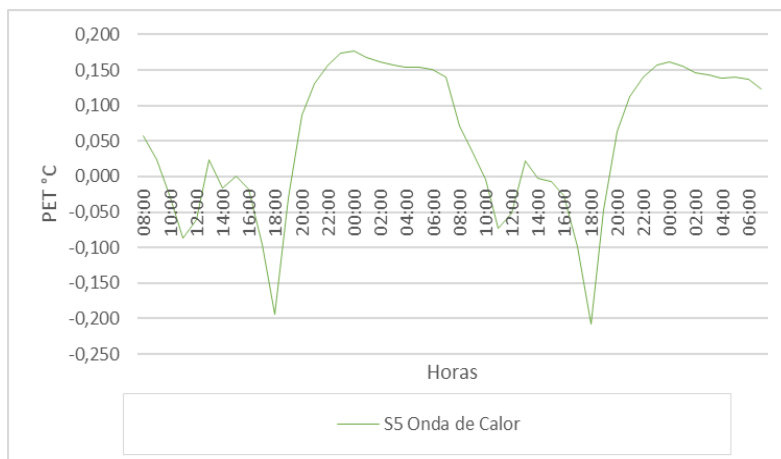


Figura 59- Diferença na média espacial do índice PET ao longo das 48h.

Analisando os resultados das zonas “grid” (Tabela 25) selecionadas apura-se que em todos os locais existe uma ligeira redução de temperatura do ar, no entanto acontece um ligeiro agravamento da concentração de poluentes, em alguns locais como por exemplo na grid 25_48 a concentração de NO chega a aumentar mais de 3% (Figura 60), em horas de maior tráfego rodoviário.

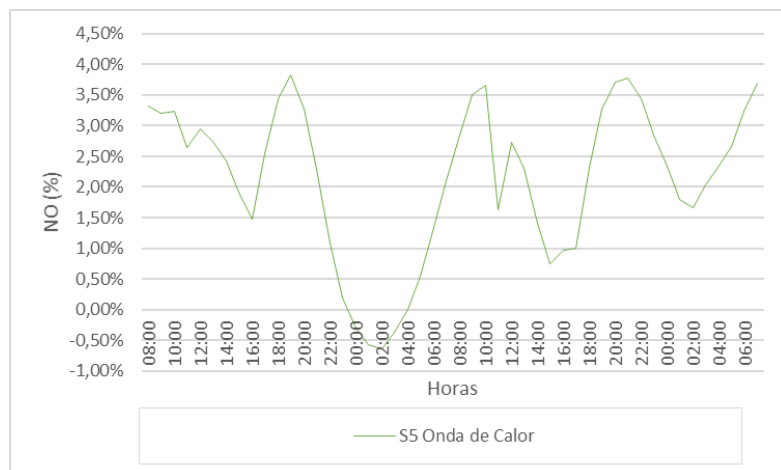


Figura 60- Diferença percentual da concentração horária de NO ao longo das 48h da grid 25_48.

O ligeiro aumento das concentrações de alguns poluentes em alguns pontos da área de estudo pode ser justificado em parte pela redução da velocidade do vento, que suprime a dispersão dos poluentes. Já a ligeira redução da concentração de O3 estará principalmente associada à redução da temperatura do ar verificada.

Tabela 25- Resumo das diferenças percentuais das médias dos diferentes parâmetros nas diferentes grids analisadas em condições de Onda de Calor

S5 Onda de Calor					
Grids	25_48	106_71	110_92	93_104	71_85
Temperatura do ar (°C)	-0,124%	-0,264%	-0,221%	-0,112%	-0,146%
Humidade relativa do ar (%)	0,433%	0,746%	0,803%	0,493%	0,597%
Velocidade do vento (m/s)	-21,338%	-0,410%	-2,598%	-5,549%	-0,387%
NO (µg/ m³)	2,605%	0,470%	-0,116%	2,804%	0,302%
NO₂ (µg/ m³)	2,215%	0,564%	0,225%	1,789%	0,225%
NO_x (µg/ m³)	2,178%	0,257%	0,096%	2,266%	0,403%
O₃ (µg/ m³)	-1,586%	-0,446%	-0,268%	-1,065%	-0,150%
PM10 (µg/ m³)	0,312%	0,057%	0,001%	0,342%	0,034%
PM2,5 (µg/ m³)	0,674%	0,132%	0,014%	0,712%	0,072%
Índice PET (°C)	1,540%	0,605%	1,197%	0,848%	0,697%

É verificável que quando existe uma redução da velocidade do vento como por exemplo nas Grids 25_48 e 93_104, existe automaticamente um aumento da concentração dos poluentes, no entanto e mais uma vez na grid 110_92 apesar de existir uma diminuição da velocidade do vento (-2,6%) não se verifica um aumento da concentração dos poluentes. Isto pode ser explicado pelo que já tinha sido adiantado anteriormente, ou seja, a orientação da rua em linha com o vento dominante parece ter um peso importante na dispersão dos poluentes.

Não existem melhorias expressivas do conforto térmico ao ar livre em média diária, no entanto em alguns locais e em algumas horas do dia até é verificável um ligeiro diminuição do conforto térmico durante o período diurno e noturno, verifica-se que maioritariamente em período noturno existir uma diminuição do conforto térmico no S5 em relação ao cenário de linha de base (Baseline) em questão devido ao seu aumento de graus PET, visto que se confirma temperaturas PET sempre acima da ordem dos 20 °C em período noturno, como por exemplo nas Grids 25_48 e 110_92, como se pode verificar pela Figura 61 e 62.

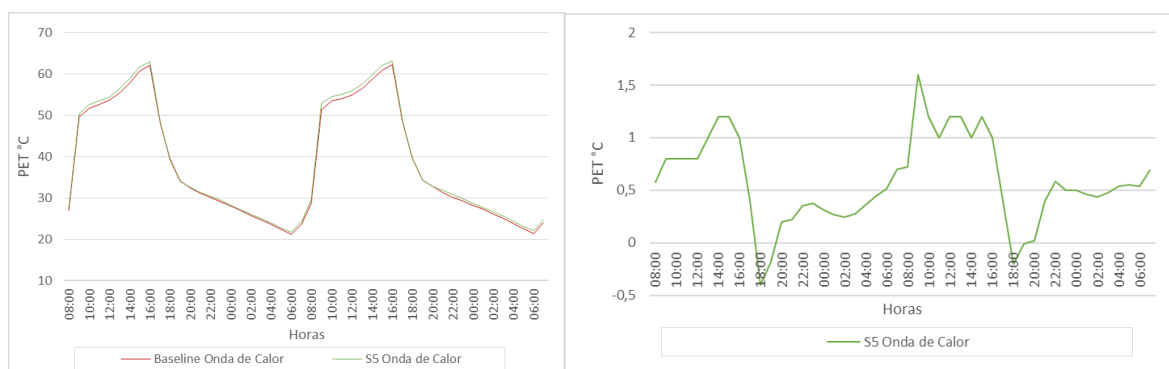


Figura 61- Médias horárias e Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 25_48.

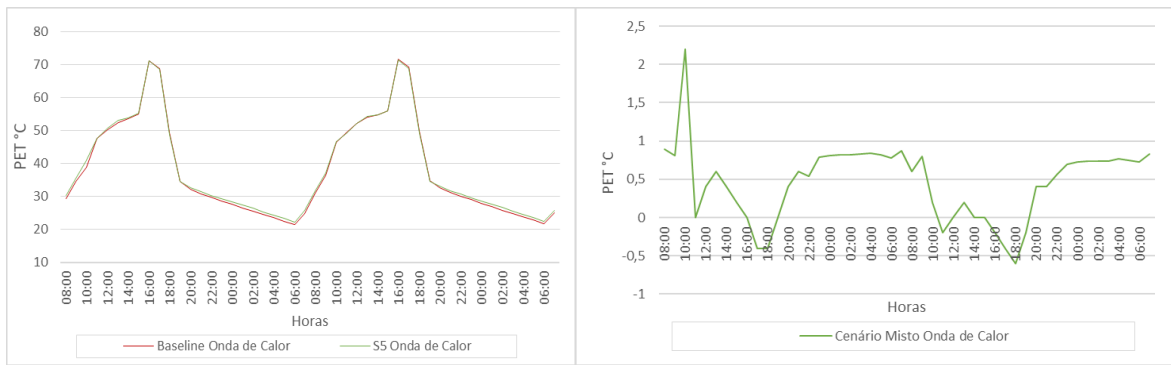


Figura 62- Médias horárias e Diferença nas médias horárias do índice PET na grid 110_92.

O impacto das medidas escolhidas no cenário S5 em condições de onda de calor nas fachadas dos edifícios é mais avultado, traduzindo-se em reduções até cerca de -20°C (Figuras 63-65).

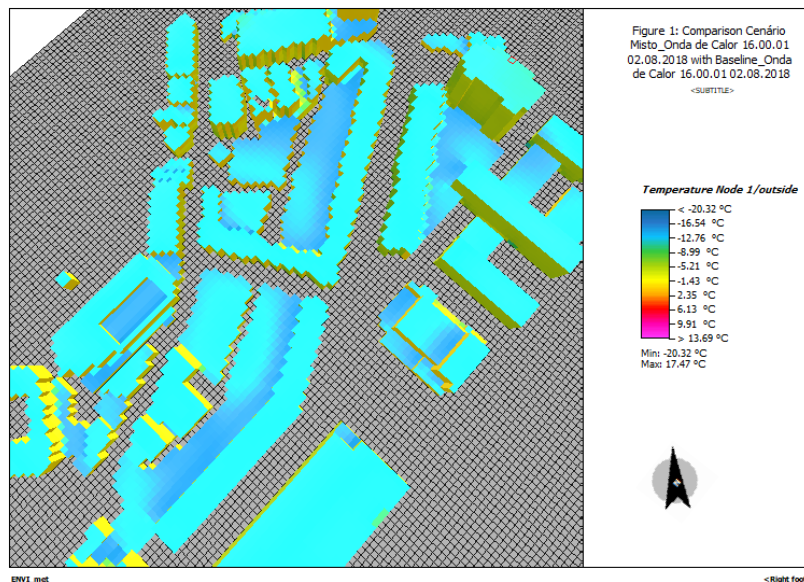


Figura 63- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das fachadas dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline.

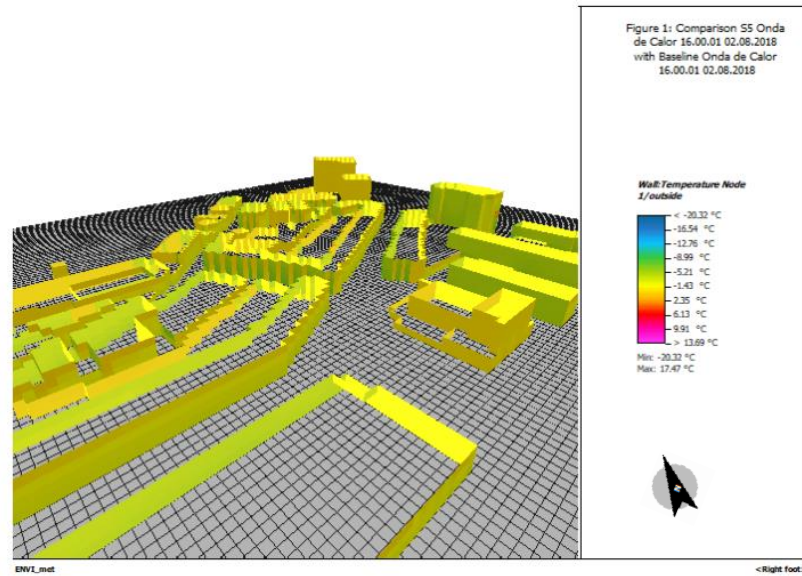


Figura 64- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas das paredes dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline.

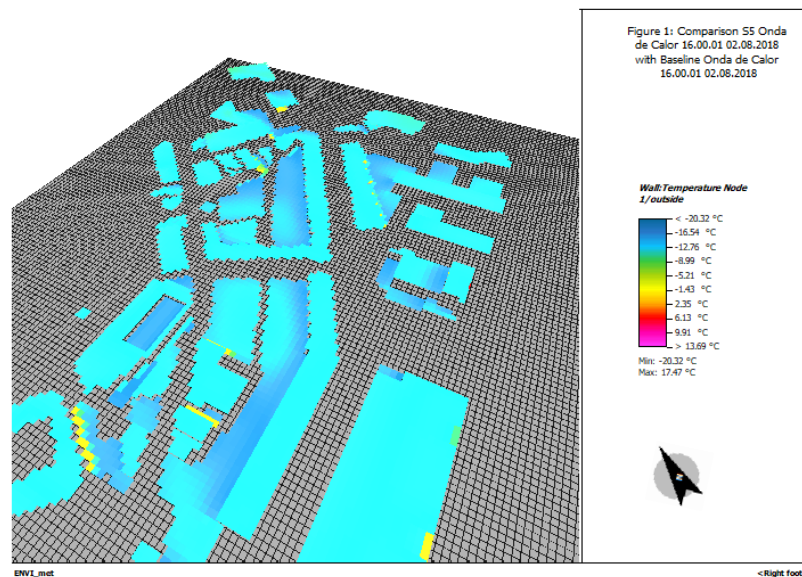


Figura 65- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas dos telhados dos edifícios entre S5- Onda de Calor e respetivo Baseline.

Quanto às temperaturas do ar no interior dos edifícios os resultados são positivos e assinaláveis (Figuras 66-68). As medidas adotadas no cenário S5 contribuem para reduções da temperatura na ordem dos -4°C a -6°C às 16:00h (hora de maior calor), melhorando assim o conforto térmico de forma considerável no interior dos edifícios, reduzindo ao mesmo tempo as necessidades de arrefecimento do ar e o consumo de energia elétrica dos edifícios que por sua vez reduz as suas pegadas carbónicas.

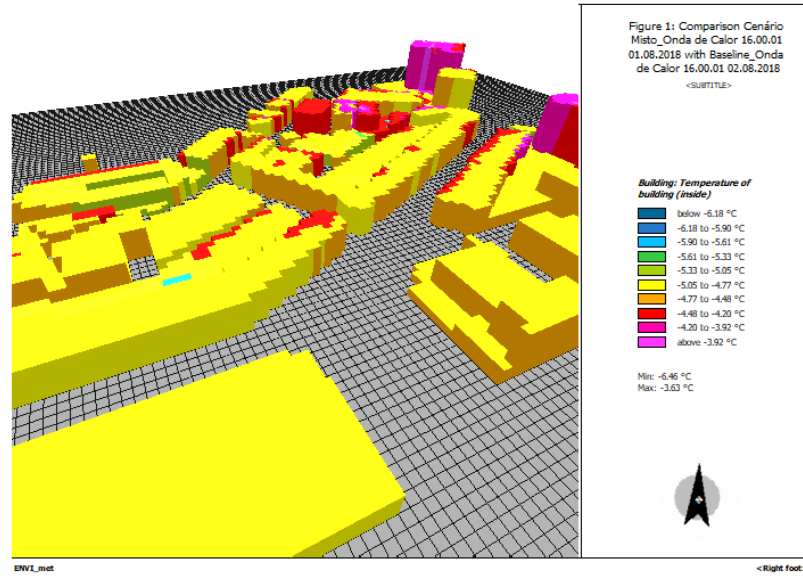


Figura 66- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas do ar no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva A.

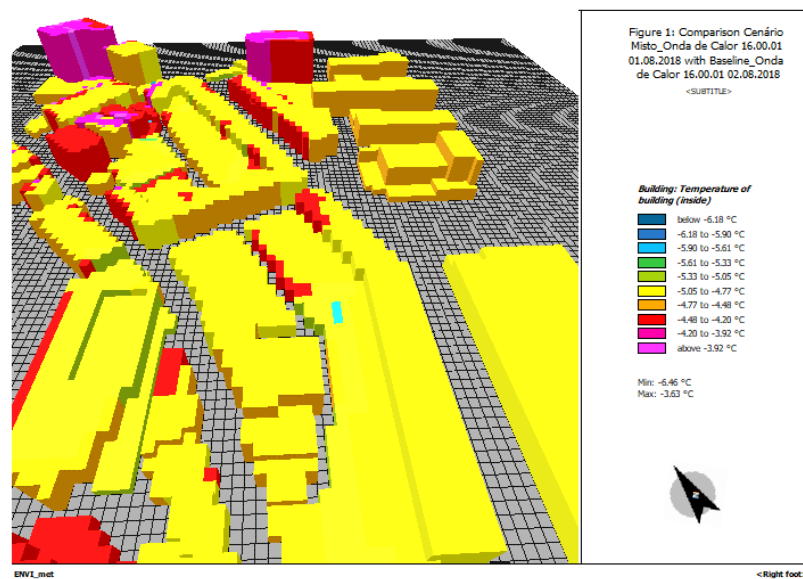


Figura 67- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva B.

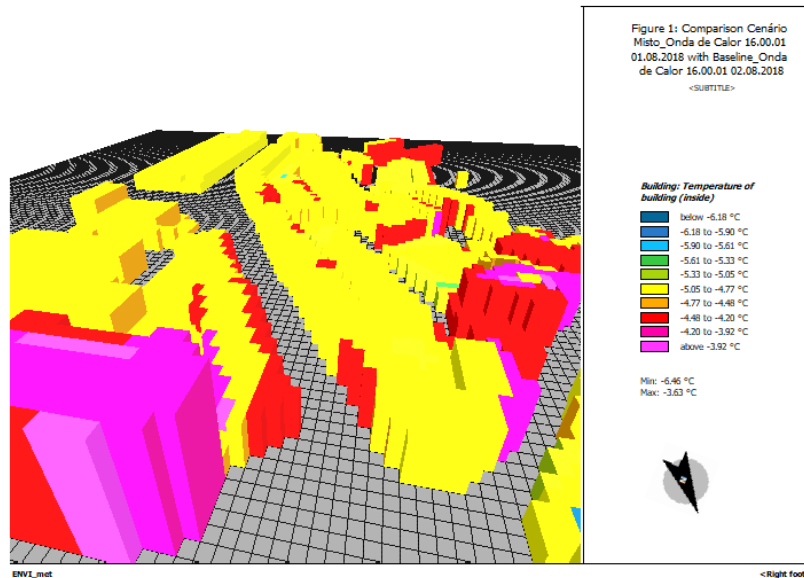


Figura 68- Ilustração gráfica 3D da Comparação das Temperaturas no interior dos edifícios entre S5 - Onda de Calor e respetivo Baseline - perspetiva C.

Em suma, o cenário S5 em condições de onda de calor apresenta diferenças nos parâmetros analisados das condições exteriores inferiores a 1%, com um ligeiro aumento da concentração de poluentes, o conforto térmico não melhora ao ar livre, degradando-se durante a noite devido ao aumento dos °C PET, e durante o dia apresenta uma atenuação máxima de $-0,2^{\circ}\text{C}$ PET às 18:00h. Relativamente às zonas (grids) da área de estudo analisadas é comum existir um ligeiro aumento da concentração de poluentes, sendo que na grid 25_48 esse aumento chega a ultrapassar os 3% do poluente de NO nas horas de maior tráfego rodoviário devido à redução drástica da velocidade do vento. O conforto térmico nas grids analisadas continua a apresentar diferenças não representativas apesar de se verificar o aumento do desconforto em algumas horas do dia e em período noturno. As temperaturas das fachadas dos edifícios apresentam atenuações máximas na ordem dos -20°C e no interior dos edifícios às 16:00h verificam-se reduções de -4°C a -6°C , demonstrando um excelente desempenho das medidas do cenário S5 neste âmbito.

Apesar de neste estudo as medidas do cenário S5 não demonstrarem ter um impacto relevante nas condições térmicas exteriores da área de estudo modelada, noutros estudos, medidas verdes e de resiliência semelhantes têm demonstrado um bom potencial de mitigação dos efeitos das ondas de calor. Berardi et al. (2020) modelaram duas áreas ($0,55\text{ km}^2$ e $0,39\text{ km}^2$) em GTA (Área da Grande Toronto) e com a simples estratégia de aumentar em 50% as copas de árvores existentes na área de estudo obtiveram reduções de temperatura do ar na ordem de $-0,5^{\circ}\text{C}$ a $-1,4^{\circ}\text{C}$. Salata et al. (2017), também em condições de Onda de Calor, modelaram um campus universitário em Roma usando várias medidas combinadas como coberturas frias, vegetação urbana e pavimentação fria, conseguindo obter atenuações médias e máximas de $-2,5^{\circ}\text{C}$ e $-3,5^{\circ}\text{C}$, respetivamente no índice PET na análise do conforto térmico ao ar livre.

Relativamente à qualidade do ar, estudos como por exemplo o de Rafael et al. (2020), que simularam a área urbana do Porto em condições também de onda de calor num cenário climático futuro RCP 8.5, obtiveram resultados comparáveis aos do presente estudo, tanto positivos como negativos com as medidas simuladas. A implantação de telhados verdes e o aumento do albedo das superfícies promoveram um aumento geral das concentrações de PM10 (entre + 0,6% e + 1,5%) e NO₂ (entre + 0,8% e 3,5%) e o aumento das áreas verdes urbanas promoveu uma diminuição geral (em média) tanto de PM10 quanto de NO₂, em cerca de -1% e -3%, respetivamente. No entanto, a área de simulação era muito superior (mesoescala) em relação à área estudada neste trabalho. Em contrapartida, outro estudo de Rafael et al. (2018) também realizado na área da cidade do Porto mas em uma área específica mais pequena (753m x 753m) com o objetivo de analisar o efeito de medidas de resiliência baseadas na natureza, nomeadamente a implantação de uma área verde urbana, revelou uma redução significativa das concentrações de poluentes atmosféricos em torno de 16% de PM10 e 19% de NO_x no domínio total. Já com a aplicação de coberturas verdes apresentou aumento das concentrações (chegando a 60% em determinados períodos de tempo).

À exceção das condições térmicas do edificado, os resultados obtidos nas 11 simulações realizadas no presente estudo nos diferentes cenários estudados não foram expressivos, então parece importante tentar entender o porquê desta ocorrência e que outras medidas, segundo estudos de referência já realizados no mundo científico, poderiam eventualmente levar a resultados mais assinaláveis na área de estudo.

Como foi referido no Capítulo 2.1.5 qualquer iniciativa de IV urbanas deve determinar quais são os principais objetivos desde início, pois uma medida pode impactar positivamente determinado objetivo e negativamente outro objetivo, por isso é necessário delinear sempre inicialmente o principal foco, objetivo de estudo e potencial melhoria cidadina que se quer atingir. O principal foco deste estudo foi estudar o efeito de diferentes medidas de IV/resiliência no microclima e na poluição do ar da cidade de Leiria em diferentes condições climáticas (verão, inverno e onda de calor), verificando-se muitas vezes que uma determinada medida potenciava a melhoria no conforto térmico (objetivo de melhoria) e uma deterioração da qualidade do ar (objetivo de melhoria), por isso é sempre muito importante delinear inicialmente as condições que se pretendem melhorar e estabelecer uma priorização dessas condições que apoie na tomada de decisão.

Relativamente à atenuação de temperaturas do ar exteriores e melhoria do conforto térmico humano ao ar livre, medidas de aumento do ensombramento da área estudada através do ensombramento arquitetónico e árvores urbanas serão as melhores medidas para esse efeito, sendo que no caso das árvores para além do ensombramento causado, também contribuem para o arrefecimento através da evapotranspiração. Outra medida que poderá também aumentar o arrefecimento citadino é a implementação de parques/espacos verdes com posicionamento estratégico a favor da direção maioritária do vento da área de estudo. Esta medida poderá reduzir o efeito da ICU (Norton et al., 2015). Neste estudo o aumento dos ensombramentos foi praticamente nulo e isso refletiu-se nos resultados das atenuações da temperatura, também não existia espaço suficiente para a implementação de uma área verde

com posicionamento estratégico a favor da direção maioritária do vento. Apesar de na área de estudo apresentar uma área verde (Parque verde) junto ao troço do rio Lis, a sua localização não favorece estrategicamente a área estudada face à direção de vento usada neste estudo.

Para a qualidade do ar, uma forma de melhorar é sem dúvida através da dispersão de poluentes, por isso medidas como árvores urbanas que aumentam a obstrução do escoamento atmosférico junto à superfície por norma contribuem para o aumento da concentração de poluentes. A implementação de uma área verde urbana também poderá contribuir para a redução da concentração dos poluentes locais (Rafael et al., 2018). Nas cidades as emissões de poluentes provêm maioritariamente da indústria, do edificado e do tráfego rodoviário e, portanto, a melhoria da qualidade do ar pode ser principalmente conseguida com medidas que minimizem as emissões nestes setores. Relativamente ao tráfego rodoviário espera-se que nas próximas décadas as suas emissões sejam reduzidas de forma significativa, devido ao aumento dos carros elétricos, uso de combustíveis mais ecológicos como o hidrogénio, otimização da rede de transportes públicos, aumento das ciclovias e outros fatores futuristas, como o aumento do teletrabalho, que reduz a circulação rodoviária nas estradas.. Quanto ao edificado citadino, este necessita de se tornar mais eficiente energeticamente e termicamente confortável e medidas como paredes verdes, telhados verdes e brancos poderão ter um contributo muito significativo para este efeito devido à redução da temperatura nas fachadas e no interior, tal com se observou no presente estudo, e assim contribuir indiretamente para a redução da poluição do ar. Tendo por base a literatura e a experiência obtida neste estudo, na Tabela 26 apresenta-se um sumário de medidas com impacto positivo no microclima, edificado e poluição do ar, podendo assim servir como linha de orientação do efeito das IV na cidade de Leiria.

Tabela 26- Medidas de resiliência

	Temperatura do ar	Conforto térmico ao ar livre	ICU	Edificado	Qualidade de ar
	Árvores urbanas	Árvores urbanas	Árvores urbanas	Telhados verdes e Brancos	S/ vegetação
Medidas de resiliência	Espaços/Parques verdes	Espaços/Parques verdes	Espaços/Parques verdes	Paredes verdes	Áreas/Parques verdes
	Ensombramento	Ensombramento	Telhados verdes/brancos		
	+ Albedo (telhados/ solo)	Paredes verdes	+ Albedo (telhados/ solo)		

5. Conclusões

O principal objetivo deste estudo consistiu em analisar o efeito de diferentes medidas de infraestruturas verdes/resiliência na temperatura do ar, qualidade do ar, conforto térmico ao ar livre e nas condições térmicas do edificado em condições climáticas de verão atual, verão e inverno futuro (2041-2070; RCP 8.5) e de onda de calor, numa zona do centro da cidade de Leiria, usando o modelo ENVI-met.

O estudo passou por definir e criar em primeiro lugar 4 cenários extremos onde se implementou medidas de uma forma extrema na área modelada de estudo (S1 – telhados e paredes verdes, S2 - telhados brancos, S3 - “+” árvores, S4 – sem vegetação), depois com os resultados obtidos das simulações dos 4 cenários extremos em condições de verão futuro, foi criado um cenário misto (S5) mais realístico e estudado em condições de verão e inverno futuro e onda de calor.

Nos 4 cenários verdes extremos simulados em condições de verão futuro, conclui-se que não existiram diferenças assinaláveis relativamente ao modelo sem qualquer medida de resiliência (Baseline), em qualquer parâmetro analisado em termos de média espacial a 1,5m de altura, exceto no cenário S4 (sem vegetação) em que se verificou um aumento considerável da velocidade média do vento (6,8%) e que por sua vez resultou numa diminuição superior a 2% na concentração dos poluentes NO, NO₂ e NO_x. O mesmo comportamento foi observado na análise dos resultados em diferentes zonas “grids” da área de estudo.

O cenário misto (S5) caracterizado por telhados brancos, paredes verdes e aumento de 17% de árvores na área modelada, analisado e simulado em condições de verão e inverno futuro e onda de calor, não revelou resultados expressivos e impactos de melhoria das condições estudadas, exceto no edificado.

Para a temperatura das fachadas dos edifícios no verão com a implementação do S5 verificou-se reduções máximas de -13°C, já no inverno as diferenças de temperatura variaram maioritariamente entre -2°C e 1°C. Em condições de Onda de calor as diferenças chegaram a atingir -20°C.

Já para a temperatura do interior dos edifícios no verão com a implementação do S5, obteve-se diferenças de -0,32°C. No inverno as diferenças na temperatura do interior dos edifícios foram quase nulas, o que se considera um resultado positivo, pois a temperatura no interior dos edifícios no inverno não precisa de ser reduzida, mas sim de ser aumentada para melhorar o conforto térmico. Em condições de Onda de Calor observou-se atenuações até -6°C nas horas de maior calor e desconforto térmico, demonstrando que as medidas de resiliência adotadas podem ter um impacto muito significativo em melhorar o conforto térmico no interior dos edifícios em dias muito quentes.

Quanto à qualidade do ar de uma forma geral na área de estudo conclui-se que:

- os telhados verdes e os telhados brancos tendem a aumentar ligeiramente a concentração de poluentes;
- a presença de árvores influencia o escoamento do ar, e junto a elas a concentração de poluentes pode aumentar substancialmente;
- a ausência de qualquer tipo de vegetação na área de estudo leva à redução das concentrações dos poluentes.

Este estudo mostrou que é muito difícil controlar e melhorar as condições climáticas exteriores, especialmente em pequenas áreas onde não é possível incrementar de forma significativa o ensombramento. Contudo, não é impossível atingir melhorias importantes, e a modelação microclimática pode dar um contributo fundamental na definição das melhores medidas/soluções para cada caso de estudo em particular. Assim, este tipo de estudos são cada vez mais necessários, de forma a que se tomem as melhores e mais inteligentes decisões para o planeamento do futuro das cidades. Nos dias de hoje, quase todos os municípios em Portugal têm uma EMAAC (Estratégia municipal de adaptação às alterações climáticas) elaborada, e, portanto, este tipo de estudos microclimáticos poderão ser importantes no âmbito dos EMAAC e PMAAC (Plano municipal de adaptação às alterações climáticas), de forma a criar cenários que ajudem a tomar as melhores decisões/soluções para o futuro dos municípios e também a tomar as melhores decisões em novos projetos urbanos.

O mundo das Infraestruturas Verdes está a atrair novos negócios para a sociedade e irá com certeza inspirar novos modelos de negócio num futuro muito próximo. O aumento do investimento nas Infraestruturas Verdes será indispensável para um crescimento inteligente e sustentável quer seja cidadão, social, económico e humanitário.

De seguida apresentam-se algumas sugestões de melhoria para trabalhos futuros:

- Obter dados de input e validar resultados da modelação através de medições locais (ex: temperaturas, concentração de poluentes);
- Levantamento do inventário dos materiais de construção dos edifícios e espécies de plantas e árvores no local de forma a obter-se dados mais precisos e mais realistas;
- Uma recolha mais atual e pormenorizada do tráfego rodoviário das diferentes ruas da área de estudo;
- Alargar o estudo a outras áreas da cidade de Leiria;
- Estudos globais cidadãos que sigam a proposta hierárquica de 5 etapas de Norton et al. (2015)
- Uso de um computador com maior poder computacional e uma licença universitária ou comercial para uma computação em multicore, de forma a tornar as simulações mais rápidas;

Referências Bibliográficas

- Abhijith, K. V., & Gokhale, S. (2015). Passive control potentials of trees and on-street parked cars in reduction of air pollution exposure in urban street canyons. *Environmental Pollution*, 204, 99–108.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.013>
- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., & Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162, 71–86.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- Ali-Toudert, F. (2005). *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate* [Freiburg Univ. (Germany). Meteorologisches Inst.; Albert-Ludwigs-Univ., Freiburg (Germany). Fakultät fuer Forst- und Umweltwissenschaften].
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20724624>. Acedido em:12/03/2021
- Amorim, J. H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, J., & Borrego, C. (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of The Total Environment*, 461–462, 541–551.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.031>
- APA. (2021). *QualAR - Qualidade do AR*. <https://qualar.apambiente.pt/downloads>.
Acedido em:25/01/2021
- Asadi, A., Arefi, H., & Fathipour, H. (2020). Simulation of green roofs and their potential mitigating effects on the urban heat island using an artificial neural network: A case study in Austin, Texas. *Advances in Space Research*, 66(8), 1846–1862.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.039>

- Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., Álvaro, J. E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
- Basara, J. B., Basara, H. G., Illston, B. G., & Crawford, K. C. (2010). *The Impact of the Urban Heat Island during an Intense Heat Wave in Oklahoma City* [Research Article]. *Advances in Meteorology*; Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2010/230365>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berardi, U., Jandaghian, Z., & Graham, J. (2020). Effects of greenery enhancements for the resilience to heat waves: A comparison of analysis performed through mesoscale (WRF) and microscale (Envi-met) modeling. *Science of The Total Environment*, 747, 141300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141300>
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167–177.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Brown, G., & Isfält, E. (1974). *Solinstrålning och solavskärmning: Solar irradiation and sun shading devices*. Statens inst. för byggnadsforskning.
<https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/46118>
- Bruse, M. (1999). *Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima: Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen* [Fakultät

- für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum]. <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/4174>
- Bruse, M. (2014). *ENVI-met. A holistic Microclimate Modelling System*. ENVI-met - Start. <https://envi-met.info/doku.php?id=root:start>. Acedido em:22/10/2020
- Bruse, M. (2021). *ENVI-met Model Architecture*. ENVI-met Model concept. <https://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>. Acedido em:15/03/2021
- Bruse, M., & Flerer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Calado, R., Nogueira, P. J., Catarino, J., Paixão, E. D. J., Botelho, J., Carreira, M., & Falcão, J. M. (2004). A onda de calor de Agosto de 2003 e os seus efeitos sobre a mortalidade da população portuguesa. *REVISTA PORTUGUESA DE SAÚDE PÚBLICA*, 22, 14. <https://run.unl.pt/handle/10362/16984>. Acedido em:14/05/2021
- Calfapietra, C., Fares, S., Manes, F., Morani, A., Sgrigna, G., & Loreto, F. (2013). Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environmental Pollution*, 183, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.012>
- Carvalho, D., Martins, H., Marta-Almeida, M., Rocha, A., & Borrego, C. (2017). Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal). *Urban Climate*, 19, 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.005>
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K. W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F. P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A. A., & Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and

- applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 31(2), 273–288. <https://doi.org/10.1002/joc.2158>
- Cheval, S., Dumitrescu, A., & Bell, A. (2009). The urban heat island of Bucharest during the extreme high temperatures of July 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, 97(3), 391–401. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0088-3>
- CMLeiria. (2017). *Estratégia Municipal às Adaptações e Alterações Climáticas do Município de Leiria*. https://www.cm-leiria.pt/cmleiria/uploads/writer_file/document/2445/r01_EMAAC_Leiria_09-02-2017_Capa_certa.pdf. Acedido em:20/11/2020
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Connelly, M., & Hodgson, M. (2013). Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 74(10), 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>
- ConstruindoDECOR. (2014). *Uso das Fachadas Verdes na Arquitetura*. ConstruindoDECOR. <https://construindodecor.com.br/fachadas-verdes-na-arquitetura/>. Acedido em: 13/07/2021
- Conway, T. M., Khan, A., & Esak, N. (2020). An analysis of green infrastructure in municipal policy: Divergent meaning and terminology in the Greater Toronto Area. *Land Use Policy*, 99, 104864. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104864>
- Coutts, A., & Harris, R. (2013). *A multi-scale assessment of urban heating in Melbourne during an extreme heat event: Policy approaches for adaptation* (p. 64).

<http://www.vcccar.org.au/sites/default/files/publications/Multiscale%20assessment%20Urban%20heating%20Technical%20Report.pdf>

Dhakal, K. P., & Chevalier, L. R. (2017). Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of Environmental Management*, 203, 171–181.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.065>

Doce Obra. (2016). *Fachadas Verdes Ecológicas: Vantagens e 30 fotos de projetos incríveis*. Doce Obra. <https://casaconstrucao.org/curiosidades/fachadas-verdes/>.

Acedido em:13/07/2021

EEA. (2019). *Air quality in Europe 2019—European Environment Agency* [Publication].

<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>. Acedido em:16/11/2020

EMEP/EEA. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019—European Environment Agency* [Publication].

<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>. Acedido em:5/01/2021

ENVI-met. (2021a). *Turbulence Model*. Turbulence Model in ENVI-met. <https://envi-met.info/doku.php?id=kb:turbulence>. Acedido em:15/03/2021

ENVI-met. (2021b). *UTCI*. biomet_utci. https://envi-met.info/doku.php?id=apps:biomet_utci. Acedido em:15/03/2021

Fabbri, K., Ugolini, A., Iacovella, A., & Bianchi, A. P. (2020). The effect of vegetation in outdoor thermal comfort in archaeological area in urban context. *Building and Environment*, 175, 106816. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106816>

- Fischereit, J., & Schlünzen, K. H. (2018). Evaluation of thermal indices for their applicability in obstacle-resolving meteorology models. *International Journal of Biometeorology*, 62(10), 1887–1900. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1591-6>
- Founda, D., Pierros, F., Petrakis, M., & Zerefos, C. (2015). Interdecadal variations and trends of the Urban Heat Island in Athens (Greece) and its response to heat waves. *Atmospheric Research*, 161–162, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.03.016>
- Galbrun, L., & Scerri, L. (2017). Sound insulation of lightweight extensive green roofs. *Building and Environment*, 116, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008>
- Goulart, A. R. (2019). *Urbanismo Verde à microescala. Proposta de intervenção urbana para o aumento do conforto térmico, no Pragal—Almada*. <https://run.unl.pt/handle/10362/93713>. Acedido em:21/12/2021
- GROSS, G. (1991). Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle dargestellt am Beispiel Darmstadt. I: Wind- und Temperaturfelder. *Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle dargestellt am Beispiel Darmstadt. I: Wind- und Temperaturfelder*, 43(4), 97–112.
- Guimapang, K. (2019). *Green roofs continue to face hurdles*. Archinect news. <https://archinect.com/news/article/150166746/green-roofs-continue-to-face-hurdles>. Acedido em:13/07/2021
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. B., & Ashraf, M. A. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>

- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Huttner, S. (2012). *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met* [Johannes Gutenberg-Universität Mainz]. <https://doi.org/10.25358/OPENSOURCE-2022>. Acedido em:22/10/2020
- Ichihara, K., & Cohen, J. P. (2011). New York City property values: What is the impact of green roofs on rental pricing? *Letters in Spatial and Resource Sciences*, 4(1), 21–30. <https://doi.org/10.1007/s12076-010-0046-4>
- Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
- Iná Nagaé. (2011). *Painel de Patrick Blanc junto ao Museu CaixaForum em Madrid*. <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/12.133/3941>. Acedido em:13/07/2021
- IPMA. (2021b). *Índice UTCI*. <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/amb.atmosfera/index.bioclima/?page=utci.xml>. Acedido em:16/03/2021
- IPMA. (2021a). *O QUE É A ONDA DE CALOR*. <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/clima/index.html?page=onda.calor.xml>. Acedido em:15/02/2021
- IPMA. (2021c). *PORTAL DO CLIMA*. Alterações Climáticas em Portugal. <http://portaldoclima.pt/pt/>. Acedido em:20/01/2021

- Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., & Batchvarova, E. (2005). COST Action 730 on the Universal Thermal Climate Index UTCI. *Proceedings 17th Int. Congress Biometeorology ICB*, 309–312.
- Kharin, V. V., & Zwiers, F. W. (2000). Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate*, 13(21), 3760–3788. Scopus. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2)
- Kuo, M., Browning, M. H. E. M., Sachdeva, S., Lee, K., & Westphal, L. (2018). Might School Performance Grow on Trees? Examining the Link Between “Greenness” and Academic Achievement in Urban, High-Poverty Schools. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01669>
- Lamnatou, Chr., & Chemisana, D. (2014). Photovoltaic-green roofs: A life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. *Journal of Cleaner Production*, 72, 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.006>
- Laureti, F., Martinelli, L., & Battisti, A. (2018). Assessment and Mitigation Strategies to Counteract Overheating in Urban Historical Areas in Rome. *Climate*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.3390/cli6010018>
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Liang, X.-Z., Xu, M., Yuan, X., Ling, T., Choi, H. I., Zhang, F., Chen, L., Liu, S., Su, S., Qiao, F., He, Y., Wang, J. X. L., Kunkel, K. E., Gao, W., Joseph, E., Morris, V., Yu, T.-W., Dudhia, J., & Michalakes, J. (2012). Regional Climate–Weather

Research and Forecasting Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(9), 1363–1387. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00180.1>

Mahmoud, H., Ghanem, H., & Sodoudi, S. (2021). Urban geometry as an adaptation strategy to improve the outdoor thermal performance in hot arid regions: Aswan University as a case study. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102965. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102965>

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>

Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>

Markakis, K., Valari, M., Colette, A., Sanchez, O., Perrussel, O., Honore, C., Vautard, R., Klimont, Z., & Rao, S. (2014). Air quality in the mid-21st century for the city of Paris under two climate scenarios; from the regional to local scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(14), 7323–7340. <https://doi.org/10.5194/acp-14-7323-2014>

May, P. B., Livesley, S. J., & Shears, I. (2013). Managing and monitoring tree health and soil water status during extreme drought in Melbourne, Victoria. *Arboriculture and Urban Forestry*, 39(3), 136–145. Scopus. <https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&sid=b26a5cd0d992856d8a93d5442bac5990&sot=b&sdt=b&sl=118&s=TITLE-ABS->

- KEY%28Managing+and+monitoring+tree+health+and+soil+water+status+during+extreme+drought+in+Melbourne%2c+Victoria%29&offset=1&origin=recordpage
- Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49.
<https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- McCarthy, H. R., & Pataki, D. E. (2010). Drivers of variability in water use of native and non-native urban trees in the greater Los Angeles area. *Urban Ecosystems*, 13(4), 393–414. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0127-6>
- McRae, I., Freedman, F., Rivera, A., Li, X., Dou, J., Cruz, I., Ren, C., Dronova, I., Fraker, H., & Bornstein, R. (2020). Integration of the WUDAPT, WRF, and ENVI-met models to simulate extreme daytime temperature mitigation strategies in San Jose, California. *Building and Environment*, 184, 107180.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107180>
- Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054>
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1974). A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1791–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851–875.
<https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>
- Mills, G. (2014). Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, 10, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>

- Mitterboeck, M., & Korjenic, A. (2017). Analysis for improving the passive cooling of building's surroundings through the creation of green spaces in the urban built-up area. *Energy and Buildings*, 148, 166–181.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.005>
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Ntziachristos, L., Gkatzoflias, D., Kouridis, C., & Samaras, Z. (2009). COPERT: A European Road Transport Emission Inventory Model. Em I. N. Athanasiadis, A. E. Rizzoli, P. A. Mitkas, & J. M. Gómez (Eds.), *Information Technologies in Environmental Engineering* (pp. 491–504). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88351-7_37
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- PALTRIDGE, G., & PLATT, C. (1976). *RADIATIVE PROCESSES IN METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*. 5, 334. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7730074104>
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., Pouyat, R. V., Whitlow, T. H., & Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: Ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 27–36.
<https://doi.org/10.1890/090220>

- Pataki, D. E., McCarthy, H. R., Litvak, E., & Pincetl, S. (2011). Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, *21*(3), 661–677. <https://doi.org/10.1890/09-1717.1>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & Cabeza, L. F. (2017). Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, *187*, 424–437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>
- Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Greening the building envelope, facade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, *01*(01), 1. <https://doi.org/10.4236/oje.2011.11001>
- Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, *70*, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.012>
- Pinto, C. (2014). *INTRODUÇÃO ÀS COBERTURAS AJARDINADAS* [Faculdade de engenharia - Universidade do Porto]. https://www.leca.pt/sites/leca.pt/files/pdf/Introducao_as_coberturas_ajardinadas_versao_final_catarina_correia_pinto%20%281%29.pdf. Acedido em:13/03/2021
- Pires, Silva, Moita, V., Álvaro, Sofia. (2004). *Caracterização Climática 2003* (p. 26). Instituto de Meteorologia. https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20081014/rXHkGiXtgvIFLDxwiFKT/cli_20030101_20031231_pcl_aa_co_pt.pdf. Acedido em:14/05/2021
- Porsche, U., & Köhler, M. (2003). *LIFE CYCLE COSTS OF GREEN ROOFS* (p. 7). http://www.rio12.com/rio3/proceedings/RIO3_461_U_Porsche.pdf. Acedido em:20/11/2020

- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., Gill, D. O., Coen, J. L., Gochis, D. J., Ahmadov, R., Peckham, S. E., Grell, G. A., Michalakes, J., Trahan, S., Benjamin, S. G., Alexander, C. R., Dimego, G. J., Wang, W., Schwartz, C. S., Romine, G. S., ... Duda, M. G. (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1717–1737.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Rafael, S., Augusto, B., Ascenso, A., Borrego, C., & Miranda, A. I. (2020). Re-Naturing Cities: Evaluating the effects on future air quality in the city of Porto. *Atmospheric Environment*, 222, 117123. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117123>
- Rafael, S., Martins, H., Marta-Almeida, M., Sá, E., Coelho, S., Rocha, A., Borrego, C., & Lopes, M. (2017). Quantification and mapping of urban fluxes under climate change: Application of WRF-SUEWS model to Greater Porto area (Portugal). *Environmental Research*, 155, 321–334.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.02.033>
- Rafael, S., Vicente, B., Rodrigues, V., Miranda, A. I., Borrego, C., & Lopes, M. (2018). Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto's urban area. *Atmospheric Environment*, 190, 317–330.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.044>
- Refahi, A. H., & Talkhabi, H. (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*, 80, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.030>
- Ribeiro, M., & Henriques, M. (2011). *Poluentes provenientes dos automóveis no centro de Leiria e limites legais—Projeto de Engenharia automóvel, ESTG, Leiria*. ESTG-IPL.

- Riley, B. (2017). The state of the art of living walls: Lessons learned. *Building and Environment*, *114*, 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.016>
- Rocha, S. (2016). Telhado verde e energia solar fotovoltaica: Juntos e 8,3% mais eletricidade. *Blog Cidade Jardim*.
<https://institutocidadejardim.wordpress.com/2016/01/11/telhado-verde-e-energia-solar-fotovoltaica-juntos-e-83-mais-eletricidade/>. Acedido em:13/07/2021
- Roy, S., Byrne, J., & Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening*, *11*(4), 351–363.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>
- Sá, E., Martins, H., Ferreira, J., Marta-Almeida, M., Rocha, A., Carvalho, A., Freitas, S., & Borrego, C. (2016). Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal. *Atmospheric Environment*, *131*, 209–224.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.040>
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., & de Lieto Vollaro, A. (2017). Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, *30*, 79–96.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>
- Salmond, J. A., Tadaki, M., Vardoulakis, S., Arbuthnott, K., Coutts, A., Demuzere, M., Dirks, K. N., Heaviside, C., Lim, S., Macintyre, H., McInnes, R. N., & Wheeler, B. W. (2016). Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. *Environmental Health*, *15*(1), S36.
<https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>

- Sanchez, L., & Reames, T. G. (2019). Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, *44*, 126331. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.04.014>
- Santos, J., & Corte-Real, J. (2006). Temperature extremes in Europe and wintertime large-scale atmospheric circulation: HadCM3 future scenarios. *Climate Research*, *31*(1), 3–18. Scopus. <https://doi.org/10.3354/cr031003>
- Sendra-Arranz, R., Oquendo, V., Olivieri, L., Olivieri, F., Bedoya, C., & Gutiérrez, A. (2020). Monitorization and statistical analysis of south and west green walls in a retrofitted building in Madrid. *Building and Environment*, *183*, 107049. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107049>
- Silveira, S. Q. (2010). *Calibração do índice de conforto térmicotemperatura fisiológica equivalente (pet) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG* [Universidade Federal de Minas Gerais]. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-8QMHSZ>
- Simon, H. (2016). *Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met* [Johannes Gutenberg-Universität Mainz]. <https://doi.org/10.25358/OPENSOURCE-4042>
- Skamarock, C., Klemp, B., Dudhia, J., Gill, O., Barker, D., Duda, G., Huang, X., Wang, W., & Powers, G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Souza, K. (2020). *Telhado verde é uma necessidade sustentável e cheia de benefícios*. CASA.COM.BR. <https://casa.abril.com.br/sustentabilidade/telhado-verde-e-uma-necessidade-sustentavel-e-cheia-de-beneficios/>. Acedido em:13/07/2021

- Stocker, T., & Qin, D. (Eds.). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis* (1^o). WMO, UNEP. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acedido em:05/08/2021
- Taesler, R., & Andersson, C. (1984). A method for solar radiation computations using routine meteorological observations. *Energy and Buildings*, 7(4), 341–352. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90080-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90080-X)
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017). A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., & Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43, 55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- Turner-Skoff, J. B., & Cavender, N. (2019). The benefits of trees for livable and sustainable communities. *PLANTS, PEOPLE, PLANET*, 1(4), 323–335. <https://doi.org/10.1002/ppp3.39>
- UKEssays. (2018). Airports Are Perfect For Green Roofs Environmental Sciences Essay. *UKEssays.Com*. <https://www.ukessays.com/essays/environmental-sciences/airports-are-perfect-for-green-roofs-environmental-sciences-essay.php>. Acedido em:02/11/2020
- Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., & Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, 11(3), 201–230. [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(05\)80184-7](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(05)80184-7)
- Victorero, F., Vera, S., Bustamante, W., Tori, F., Bonilla, C., Gironás, J., & Rojas, V. (2015). Experimental Study of the Thermal Performance of Living Walls Under

Semiarid Climatic Conditions. *Energy Procedia*, 78, 3416–3421.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.160>

Vos, P. E. J., Maiheu, B., Vankerkom, J., & Janssen, S. (2013). Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution*, 183, 113–122.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.021>

Watkiss, P., Horrocks, L., Pye, S., Searl, A., & Hunt, A. (2009). *Impacts of climate change in human health in Europe*. (p. 60). European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies.

[https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Human%20Health%20in%20Europe.%20PESETA-](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Human%20Health%20in%20Europe.%20PESETA-human%20Health%20Study&publication_year=2009&author=P.%20Watkiss&author=L.%20Horrocks&author=S.%20Pye&author=A.%20Searl&author=A.%20Hunt)

[human%20Health%20Study&publication_year=2009&author=P.%20Watkiss&author=L.%20Horrocks&author=S.%20Pye&author=A.%20Searl&author=A.%20Hunt](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Impacts%20of%20Climate%20Change%20in%20Human%20Health%20in%20Europe.%20PESETA-human%20Health%20Study&publication_year=2009&author=P.%20Watkiss&author=L.%20Horrocks&author=S.%20Pye&author=A.%20Searl&author=A.%20Hunt)

t. Acedido em:18/11/2020

Weather Spark. (2020). *Clima característico em Leiria, Portugal durante o ano*.

[https://pt.weatherspark.com/y/32241/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Leiria-](https://pt.weatherspark.com/y/32241/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Leiria-Portugal-durante-o-ano)

[Portugal-durante-o-ano](https://pt.weatherspark.com/y/32241/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Leiria-Portugal-durante-o-ano). Acedido em:15/01/2021

Windfinder.com. (2020). *Wind and weather statistic Leiria*.

<https://www.windfinder.com/windstatistics/leiria>. Acedido em:15/01/2021

Yang, J., Mohan Kumar, D. Ilamathy, Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597–609.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.006>

Anexos

Anexo 1- Descrição do modelo ENVI-met

Modelo principal (Modelo atmosférico)

No modelo atmosférico são simulados os principais processos no clima urbano, tais como, o fluxo do vento, a distribuição de temperaturas e humidades do ar, a turbulência, gases e partículas atmosféricas, radiação e processos de troca no solo e superfícies de construção.

Fluxo do vento

É calculado através da equação não hidrostática tridimensional de Navier-Stokes. No modelo é usado uma aproximação Boussinesq, em que a densidade do ar pode ser considerada constante e, portanto, ser eliminada das equações de Navier-Stokes o que resulta nas seguintes equações:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) - f(u - u_g) - S_v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

p' - perturbação da pressão local

K_m - coeficiente de troca local

$\theta(z)$ - temperatura potencial no nível z

f - parâmetro de Coriolis com componentes geográficos do vento (u_g e v_g), ou seja, descreve a rotação do vento perto do solo em comparação com as componentes u_g e v_g ;

S_u , S_v and S_w - fonte local/ Sumidouro local, responsáveis pela redução da velocidade devido à vegetação.

u_i , x_i - termos tridimensionais de advecção e difusão escritos no somatório de Einstein ($u_i = u, v, w$; $x_i = x, y, z$) (Bruse & Fleer, 1998; Huttner, 2012; Simon, 2016)

Temperatura e Humidade do ar

A distribuição da temperatura potencial θ e humidade específica q da área modelo é calculada através da equação combinada de difusão-advecção, que inclui as fontes e sumidouros internos (Q_θ e Q_q , K_θ e K_q).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_\theta \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p p} \frac{\partial Q_{lw}}{\partial z} + Q_\theta$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

Q_θ – define a troca de calor entre o ar e a vegetação

K_θ – coeficiente de troca por calor

C_p – Capacidade de calor específico a pressão constante

p – Pressão

$\frac{1}{c_p p} \frac{\partial Q_{lw}}{\partial z}$ explica a mudança da temperatura do ar devido à divergência da onda longa

Q_{lw} – radiação de grande comprimento de onda

z – Altura

Q_q – Define a troca da humidade entre ar e a vegetação

K_q – coeficiente de troca turbulenta para a humidade

(Bruse, 1999; Bruse & Fleer, 1998; Huttner, 2012; Simon, 2016)

Turbulência

O modelo da turbulência atmosférica é baseado nos trabalhos de Mellor e Yamada (Mellor & Yamada, 1974, 1982). As turbulências em ENVI-met são parametrizadas usando um modelo de fechamento de ordem E- ϵ 1.5. O modelo E- ϵ consiste em 2 equações, uma descreve a produção da energia turbulenta e a outra a dissipação de energia:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_{eu} \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x_{eu}^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_{eu} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_{eu}^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th - c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon$$

c_1 , c_2 e c_3 – são constantes empíricas, em que os valores padrão usados são retirados de Launder and Spalding, 1974 pelo ENVI-met.

Os termos Pr e Th caracterizam a produção e dissipação da energia turbulenta.

Pr – cisalhamento ou gradiente do vento

Th – estratificação térmica (produção de flutuabilidade)

Q_E – turbulência induzida pela vegetação

Q_ϵ – queda da energia de turbulência de escalas grandes para escalas menores perto da folhagem da planta segundo Huttner, 2012.

(ENVI-met, 2021a)

Dispersão de Gás e Partículas

Permite a simulação da emissão, dispersão e deposição de vários gases e partículas na área modelo. Também simula as reações químicas dos gases NO, NO₂ e O₃.

A dispersão de gases de partículas na atmosfera calcula-se através da equação difusão-advecção, com χ para a concentração local do gás ou partícula.

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} + u \frac{\partial \chi}{\partial x} + v \frac{\partial \chi}{\partial y} + w \frac{\partial \chi}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \chi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \chi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \chi}{\partial z} \right) +$$

$$Q_x(x, y, z) + S_x(x, y, z)$$

χ é o componente (poluentes, gás, partícula)

As fontes e sumidouros (Q_χ e S_χ) estão incluídas na equação, como na equação do cálculo da temperatura e humidade do ar.

As fontes de emissão e os sumidouros representam os processos de sedimentação ou conversão química localmente, o que faz com que aumente ou diminua a concentração do gás e partículas.

No ENVI-met existem 4 tipos de fontes de emissão: as fontes pontuais, as fontes de linha, as fontes de área e as fontes de volume. Quaisquer fontes de emissão têm 24 entradas para simular uma variação diurna.

Os sumidouros (S_{χ}) consistem em 3 componentes:

- Sedimentação gravitacional e deposição
- Deposição na superfície das folhas
- Transformações químicas (ex: a conc. dos componentes A e B diminui, a conc. dos componentes A e B aumenta.)

(Huttner, 2012; Simon, 2016)

Radiação

Para calcular com precisão a radiação de grande comprimento de onda de entrada no modelo é necessário saber-se a quantidade e distribuição de aerossóis e gases, juntamente com as suas características de absorção e emissão, dependentes do comprimento de onda. Geralmente esta informação não está disponível, então o ENVI-met simplifica o cálculo, apenas levando em consideração os efeitos do vapor de água. A limitação desta simplificação é que devido à ampla faixa de absorção de vapor de água, poderá haver uma sobreposição de resultantes (Ali-Toudert, 2005; Bruse, 1999; Huttner, 2012; Simon, 2016).

Em um modelo com N camadas, a radiação de grande comprimento de onda recebida pode ser calculada pela seguinte equação (PALTRIDGE & PLATT, 1976):

$$Q_{lw}^{\downarrow} = \sum_{n=1}^N \sigma T^4(n) [\epsilon_n(m + \Delta m) - \epsilon_n(m)]$$

ϵ_n – emissividade

m – quantidade de vapor de água de água entre a camada inferior n e a altura z

m + Δm - quantidade de vapor de água entre o limite superior da camada n e a altura z.

O cálculo da radiação de pequeno comprimento de onda de entrada é através da seguinte equação:

$$Q_{sw}^* = \int_{0.29}^{4.0} I_0(\lambda) \exp\{-\alpha_R(\lambda)m + \alpha_M(\lambda)m\} d\lambda$$

É integrado no cálculo a radiação do sol (I_0) para os comprimentos de onda compreendidos entre $\lambda = 0.29\mu\text{m}$ e $\lambda = 4.0\mu\text{m}$ levando em consideração a massa ótica m em função do ângulo da altura do sol. α_R é a dispersão de Rayleigh e α_M é a dispersão de Mie (Bruse, 1999; Huttner, 2012; Simon, 2016).

$$Q_{sw,dir}^0 = Q_{sw}^* - Q_{sw,abs}$$

A radiação de pequeno comprimento de onda no limite superior do modelo ($Q_{sw,dir}^0$), resulta da diferença da radiação de onda curta de entrada (Q_{sw}^*) e a absorção das radiação de ondas curtas por vapor de água ($Q_{sw,abs}$).

A entrada da radiação difusa de pequeno comprimento de onda ($Q_{sw,dif}^0$) no topo do modelo para as condições de céu limpo são calculadas através de Brown & Isfält, 1974 (Bruse, 1999; Simon, 2016).

$$Q_{sw,dif}^0 = Q_{sw,dir}^0 \sin h \left(\frac{\Upsilon(h)}{1 - \Upsilon(h)} \right)$$

Em que $Y(h) = 1/1+8(\sin h)^{0.7}$ e h é a altura do sol ($^\circ$).

Já em condições nubladas a radiação difusa de onda curta de entrada $Q_{sw,dif,cloudy}^0$ é calculada através de Taesler & Andersson, 1984:

$$Q_{sw,dir,cloudy}^0 = Q_{sw,dir}^0 \left(1 - \frac{N}{8} \right)$$

$$Q_{sw,dif,cloudy}^0 = \left(\frac{Q_{sw,dir}^0 \sin h}{1 - \Upsilon(h)} \right) \left(\frac{a_s - 1}{a_c a_s - 1} \right) - Q_{sw,dir,cloudy}^0 \sin h$$

N – é a cobertura de nuvens em 1/8 octas;

a_c -albedo médio das nuvens dependendo da sua altura;

a_s -albedo médio do solo;

Existem 5 coeficientes que reduzem a radiação devido a objetos como a vegetação, edifícios nas áreas modelos. Estes coeficientes variam de 0 (totalmente obstruído) a 1 (sem perturbação)(Ali-Toudert, 2005; Bruse, 1999; Bruse & Fleer, 1998). Os 5 coeficientes são:

- Fator de visualização do céu x σ_{svf}
- Efeitos da vegetação na radiação direta de pequeno comprimento de onda $\sigma_{sw,dir}$
- Efeitos da vegetação na radiação difusa de pequeno comprimento de onda $\sigma_{sw,dif}$
- Efeitos da vegetação da radiação de grande comprimento de onda incidente σ_{lw}^{\downarrow}
- Efeitos da vegetação da radiação de grande comprimento de onda emitida σ_{lw}^{\uparrow}

O fator de visão do céu σ_{svf} indica a quantidade do céu visível a partir de o centro de um ponto grade.

$$\sigma_{svf} = \frac{1}{360} \sum_{\pi=0}^{360} \cos \omega(\pi)$$

ω – é o ângulo de corte máximo da direção espacial π .

Já os outros coeficientes dos efeitos da vegetação na radiação dependem em grande parte do Índice de área foliar (LAI), como se pode verificar nas seguintes equações:

$$\sigma_{sw,dir} = \exp(F \cdot LAI^*(z))$$

$$\sigma_{sw,dif} = \exp(F \cdot LAI(z, z_p))$$

$$\sigma_{lw}^{\uparrow} = \exp(F \cdot LAI(0, z))$$

$$\sigma_{lw}^{\downarrow} = \exp(F \cdot LAI(z, z_p)).$$

z – nível de altura;

z_p – altura do topo da planta;

A equação do balanço da radiação de pequeno comprimento de onda $Q_{sw}(z)$ na altura z , usando os coeficientes de redução, é a seguinte (Bruse & Fleer, 1998; Simon, 2016):

$$Q_{sw}(z) = \sigma_{sw,dir}(z)Q_{sw,dir}^0 + \sigma_{sw,dif}(z)\sigma_{svf}(z)Q_{sw,dif}^0 + (1 - \sigma_{svf}(z))Q_{sw,dir}^0 \cdot a_s$$

O 1º e 3º termo explicam a radiação de ondas curtas direta e o 2º termo a radiação de ondas curtas difusa.

As reflexões da radiação de pequeno comprimento ondas curtas entre edifícios são calculadas usando albedo das superfícies (a_s).

Nota: A radiação difusa é assumida como isotrópico do modelo, a redução da radiação difusa na altura z é aproximado pela redução da visão clara do céu, utilizando o fator de visão do céu (Simon, 2016).

A radiação de grande comprimento de onda descendente $Q_{lw}^{\downarrow}(z)$ e a radiação de grande comprimento de onda ascendente $Q_{lw}^{\uparrow}(z)$, para uma célula de grade a uma dada altura de z são calculadas pelas seguintes equações (Bruse & Fleer, 1998):

$$Q_{lw}^{\downarrow}(z) = \sigma_{lw}^{\downarrow}(z, z_p) Q_{lw,0}^{\downarrow}(z) + (1 - \sigma_{lw}^{\downarrow}(0, z)) \epsilon_f \sigma_B \overline{T_{f+}^4} + (1 - \sigma_{svf}(z)) Q_{lw}^{\leftrightarrow}(z)$$

$$Q_{lw}^{\uparrow}(z) = \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z) \epsilon_s \sigma_B \overline{T_0^4} + (1 - \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z)) \epsilon_f \sigma_B \overline{T_{f-}^4}$$

$Q_{lw}^{\leftrightarrow}(z)$ – radiação de onda longa emitida por edifícios;

ϵ_f - emissividade das folhas;

ϵ_s – emissividade das superfícies;

T_{f-}^4 e T_{f+}^4 - temperatura média da folhagem da camada da vegetação sobrejacente/ subjacente;

z_p – altura do topo da planta;

T_0 – temperatura da superfície;

Superfícies de solo e construção

Este modelo representa limites físicos reais. Para o cálculo da temperatura das superfícies do solo T_0 , o balanço de energia da superfície do solo é resolvido iterativamente (Bruse, 1999).

$$0 = Q_{sw,net} + Q_{lw,net} - G_0 - H_0 - LE_0$$

$Q_{sw,net}$ – Balanço de radiação de pequeno comprimento de onda

$Q_{lw,net}$ – Balanço de radiação de grande comprimento de onda

G_0 – fluxo do calor no solo

H_0 – fluxo de calor sensível

LE_0 – fluxo de calor Latente.

$$Q_{sw,net} = (\cos \beta^* \cdot Q_{sw,dif}(z = 0) + Q_{sw,dif}(z = 0)) \cdot (1 - a_s)$$

O balanço de radiação de pequeno comprimento de onda na superfície do solo ($z=0$) é calculada através da radiação de pequeno comprimento de onda direta ($Q_{sw,dif}$), da radiação de pequeno comprimento de onda difusa ($Q_{sw,dif}$) e do albedo da superfície (a_s). β^* é o ângulo entre a altura do sol e a superfície para assim se calcular a radiação real direta de entrada. Como a radiação difusa é considerada isotrópica não é necessário levar em consideração o ângulo do sol.

Para as superfícies artificiais o albedo (a_s) é retirado do banco de dados do ENVI-met, enquanto para as superfícies naturais, o albedo é calculado dinamicamente, levando em consideração, o ângulo da altura do sol, a humidade do solo da camada superior e o teor de saturação da água.

O balanço de radiação de grande comprimento de onda é calculado através da seguinte equação (Bruse, 1999):

$$Q_{lw,net} = \sigma_{svf} Q_{lw,net}^{unobs} + (1 - \sigma_{svf}) Q_{lw,net}^{obs}$$

Considera no cálculo o balanço de radiação de grande comprimento de onda em céu desobstruído e obstruído e a radiação de grande comprimento de onda emitida por objetos à superfície como edifícios e vegetação.

Já o fluxo de calor no solo é calculado por:

$$G_0 = \lambda_s(k = -1) \frac{T_0 - T_{k=-1}}{0.5 \Delta z_{k=-1}}$$

$k = -1$ - nível de altura mais alto do modelo do solo;

λ_s – coeficiente de transferência de calor da camada do solo;

T_0 – temperatura da superfície;

$T_{k=-1}$ - temperatura da camada do solo na profundidade -1.

$\Delta z_{k=-1}$ – espessura da célula da grade superior do modelo do solo (Ali-Toudert, 2005; Huttner, 2012; Simon, 2016).

O fluxos turbulentos de calor sensível e latente (H_0 e LE_0) são implementados como funções dos coeficientes de troca turbulenta entre a superfície, o solo e a célula grade inferior da atmosfera (Ali-Toudert, 2005; Simon, 2016).

Conforto térmico

O cálculo dos diferentes parâmetros atmosféricos é relativamente simples, mas as avaliações da influência dos parâmetros na percepção humana das condições meteorológicas atuais são muito complicadas.

Para o cálculo do conforto térmico o ENVI-met utiliza 4 parâmetros meteorológicos:

- Temperatura do ar;
- Humidade do ar;
- Velocidade do vento;
- Temperatura média radiante;

A conexão destes 4 parâmetros no cálculo do conforto térmico não é linear para uma variável, nem para a interdependência das diferentes variáveis, ou seja, uma mudança em uma das variáveis nem sempre tem o mesmo efeito, pois dependendo dos valores das outras três variáveis.

A percepção humana das condições climáticas ou conforto térmico, não depende apenas das condições atmosféricas, mas também das características do indivíduo (género, tamanho, peso, idade, condicionamento físico, carga de trabalho e roupas (isolamento, albedo)). A percepção humana do conforto térmico também pode depender de fatores culturais e psicológicos.

O ENVI-met apresenta 4 índices que avaliam o conforto térmico humano calculando o balanço de energia de uma pessoa humana em condições meteorológicas específicas. Os 4 índices são: o PMV (Voto médio previsto), PET (Temperatura Fisiológica Equivalente), UTCI (Índice do clima térmico Universal) e SET (Temperatura efetiva padrão).

Não requer nenhum feedback do ENVI-met para o cálculo dos índices biometeorológicos, apenas requer os resultados de saída dos 4 parâmetros meteorológicos já referidos anteriormente. No ENVI-met o cálculo do conforto térmico é feito em um software adicional, o Bio-met que lê os arquivos de saída das simulações do ENVI-met. Esta abordagem permite a possibilidade de calcular os índices de conforto térmico humano com diferentes parâmetros humanos, ou atualizar os cálculos sem ter que executar outra simulação completa da área do modelo no ENVI-met (Huttner, 2012).

Índice PET

O índice PET (Temperatura fisiológica equivalente) é baseado no modelo MEMI (Modelo de equilíbrio e energia de Munique para indivíduos) , introduzido no mundo científico por

Mayer & Höppe, (1987). Para além de considerar as variáveis externas meteorológicas (Temperatura do ar, velocidade do vento, humidade relativa, temperatura média radiante), também considera o equilíbrio térmico humano (Silveira, 2010).

Para o cálculo do índice PET é usado o sistema de equações do modelo MEMI:

Balço termofisiológico do corpo humano

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0$$

Equação A

$$F_{CS} = v_b \times p_b \times c_b \times (T_c - T_{sk})$$

Equação B

$$F_{SC} = (T_{sk} - T_{cl}) \div I_{cl}$$

Equação C

Em que:

M = Taxa de metabolismo (W/m²)

W = Taxa de trabalho mecânico realizado (W/m²)

C + R = Perdas de calor sensível pela pele por convecção e radiação (W/m²)

R = “Excedente” devido às trocas por radiação (W/m²).

C = Fluxo de calor convectivo (W/m²).

E_D = fluxo de calor latente por transpiração

E_{Re} = soma dos fluxos de calor para aquecer e humidificar o ar inspirado

E_{Sw} = fluxo de calor pela evaporação

S = fluxo de calor armazenado para aquecer ou arrefecer o corpo

F_{CS} = fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele (W/m²)

v_b = fluxo de sangue do centro do corpo para a pele (L/s*m²)

p_b = densidade do sangue (kg/L)

c_b = calor específico do sangue (W*s/K*kg)

T_c = Temperatura do centro do corpo (°C)

T_{sk} = Temperatura da superfície da pele (°C)

F_{SC} = fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa (W/m²)

I_{cl} = Temperatura da superfície externa da roupa (°C)

Os fluxos de calor da equação de balanço termofisiológico do corpo humano é afetado diretamente pelos seguintes parâmetros meteorológicos:

- Temperatura do ar (T_a): C, E_{Re}
- Humidade do ar (HR): E_D, E_{Re}, E_{Sw}
- Velocidade do vento (v): C, E_{Sw}
- Temperatura média radiante (T_{mrt}): R

Na Equação A alguns termos dependem da temperatura média da superfície da roupa, a temperatura média da pele (ou a taxa de suor), que são afetadas por condições exteriores, tal como o Fluxo de calor por evaporação (E_{Sw}) é afetado por condições externas e a atividade do indivíduo. Portanto para resolver a Equação A terá que se resolver as Equações B e C, pois os parâmetros T_c, T_{sk} e T_{sk} terão que ser avaliados (Höppe, 1999).

O procedimento para calcular o índice PET consiste nas seguintes etapas (Silveira, 2010):

1. Cálculo das condições térmicas do corpo com o sistema de equações do modelo MEMI para uma dada combinação de parâmetros meteorológicos;
2. Introdução dos valores calculados para temperatura da superfície da pele e para temperatura do centro do corpo no modelo MEMI e resolução do sistema de equações para encontrar a respetiva temperatura do ar (T_a), com $v=0,1\text{m/s}$, VP (pressão de vapor)=12hPa e $T_{mrt}=T_a$;
3. A temperatura do ar resultante corresponde à temperatura equivalente fisiológica (PET), em °C.

Exemplo de valores PET em diferentes cenários climáticos:

Scenario	T_a (°C)	T_{mrt} (°C)	v (m/s)	VP (hPa)	PET (°C)
Typical room	21	21	0.1	12	21
Winter, sunny	-5	40	0.5	2	10
Winter, shade	-5	-5	5.0	2	-13
Summer, sunny	30	60	1.0	21	43
Summer, shade	30	30	1.0	21	29

Fonte: Höpfe, 1999

Temperatura Média Radiante

O ENVI-met calcula TMR (Temperatura média radiante) para um corpo cilíndrico:

$$T_{mrt} = \left(\frac{1}{\sigma} (Q_{lw,in} + \frac{ak}{\varepsilon} * (Q_{sw-diff,in} + Q_{sw-dir,in})) \right)^{0.25}$$

ε – coeficiente de emissão do corpo é definido com o valor 0,97;

ak – coeficiente de absorção do corpo humano para a radiação de pequeno comprimento de onda = 0,7;

σ – constante de Stefan – Boltzman

Quanto à radiação de grande comprimento de onda incidente ($Q_{lw,in}$), o modelo assume que ela provém 50% do céu, edifícios e vegetação e os outros 50% da superfície do solo:

$$Q_{lw,in} = 0.5 * (vf_{veg} \overline{\varepsilon_{veg}} \sigma \overline{T_{veg}}^4 + vf_{bldg} \overline{\varepsilon_{bldg}} \sigma \overline{T_{bldg}}^4 + vf_{sky} Q_{lw,sky} + vf_{bldg} (1 - \overline{\sigma_{bldg}}) Q_{lw,sky}) + 0.5 * (\sigma \varepsilon_{ground} T_{ground}^4)$$

O fator de visualização (vf) fornece a percentagem de visibilidade de um ponto específico de grade quanto à vegetação, edifícios e o céu.

A melhor abordagem seria calcular os fluxos de radiação de grande comprimento de onda com base na emissividade e temperatura dos elementos visíveis do ponto grade, mas esta abordagem exigiria uma quantidade considerável de tempo de CPU e RAM. Portanto, a solução do ENVI-met é usar uma emissividade média (ϵ) e a temperatura T de todas as plantas/ superfícies de construção da área modelo.

A radiação de grande comprimento de onda que chega do céu ($Q_{lw,sky}$) é calculada com base nos parâmetros de temperatura do ar, humidade do ar, e outros dados empíricos. Para a radiação de grande comprimento de onda proveniente do solo/superfície apenas a emissividade e temperatura da superfície da célula são levados em consideração.

A radiação difusa de pequeno comprimento de onda é calculada da seguinte expressão:

$$Q_{sw-dir,in} = 0.5 * (vf_{bldg} \overline{rf_{bldg}} Q_{sw-dir,sky} + vf_{sky} Q_{sw-diff,sky}) + 0.5 * (rf_{ground} Q_{sw,ground})$$

rf – refletividade

$Q_{sw,ground}$ - radiação de pequeno comprimento de onda na superfície do solo da célula grade correspondente.

A radiação direta de pequeno comprimento de onda ($Q_{sw-dir,in}$) é calculada através de:
 $Q_{sw-dir,in} = pf * Q_{sw-dir}$.

O fator de projeção (pf) depende do ângulo do sol (Φ): $pf = 0.42 * \cos\Phi + 0.043 * \sin\Phi$.

Referências do Anexo 1

Ali-Toudert, F. (2005). *Dependence of outdoor thermal comfort on street design in hot and dry climate* [Freiburg Univ. (Germany). Meteorologisches Inst.; Albert-Ludwigs- Univ., Freiburg (Germany). Fakultät fuer Forst- und Umweltwissenschaften].
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20724624>

Brown, G., & Isfält, E. (1974). *Solinstrålning och solavskärmning: Solar irradiation and sun shading devices*. Statens inst. för byggnadsforskning.
<https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/46118>

- Bruse, M. (1999). *Die Auswirkungen kleinskaliger Umweltgestaltung auf das Mikroklima: Entwicklung des prognostischen numerischen Modells ENVI-met zur Simulation der Wind-, Temperatur- und Feuchteverteilung in städtischen Strukturen* [Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum]. <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/4174>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3), 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- ENVI-met. (2021a). *Turbulence Model*. Turbulence Model in ENVI-met. <https://envi-met.info/doku.php?id=kb:turbulence>. Acedido em:15/03/2021
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Huttner, S. (2012). *Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met* [Johannes Gutenberg-Universität Mainz]. <https://doi.org/10.25358/OPENSOURCE-2022>. Acedido em:22/10/2020
- Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1974). A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(7), 1791–1806. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2)
- Mellor, G. L., & Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20(4), 851–875. <https://doi.org/10.1029/RG020i004p00851>

- PALTRIDGE, G., & PLATT, C. (1976). *RADIATIVE PROCESSES IN METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*. 5, 334. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7730074104>
- Silveira, S. Q. (2010). Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (pet) para espaços abertos do município de Belo Horizonte, MG [Universidade Federal de Minas Gerais].
<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-8QMHSZ>
- Simon, H. (2016). *Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met* [Johannes Gutenberg-Universität Mainz].
<https://doi.org/10.25358/OPENSOURCE-4042>
- Taesler, R., & Andersson, C. (1984). A method for solar radiation computations using routine meteorological observations. *Energy and Buildings*, 7(4), 341–352.
[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90080-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90080-X)

Anexo 2- Contagens alocadas em categorias

Veículos Ligeiros	Combustível	Cilindrada	Normas euro	Ano	segunda	terça	quarta	quinta	sexta	sábado	domingo	Total semanal
					feira 29/11/10	a feira	feira	feira 25/11/10	feira 26/11/10	do 4/12/10	go 5/12/10	
Gasolina	<1.4l	ECE 15 03	1981-85		8	0	0	0	0	5	4	17
	1.4-2.0l			0	10	10	10	13	0	0	41	
	>2.0l			0	0	0	0	0	0	0	0	
	<1.4l	ECE 15 04	1985-92		135	145	145	145	217	54	102	941
	1.4-2.0l			64	63	63	63	81	70	71	475	
	>2.0l			0	0	0	0	0	0	0	0	
	<1.4l	Euro1	1992	324	278	278	278	359	291	256	2063	
		Euro2	1996	492	578	578	578	703	478	409	3814	
		Euro3	2000	621	630	630	630	842	788	641	4780	
		Euro4	2005	340	506	506	506	615	430	315	3219	
		Euro5	2009	190	194	194	194	234	189	164	1359	
	1.4-2.0l	Euro1	1992	197	210	210	210	227	254	237	1544	
		Euro2	1996	638	677	677	677	797	595	438	4498	
		Euro3	2000	572	632	632	632	768	718	585	4538	
		Euro4	2005	402	481	481	481	538	453	331	3165	
		Euro5	2009	75	107	107	107	148	138	129	811	
	>2.0l	Euro1	1992	16	6	6	6	6	0	19	59	
		Euro2	1996	14	14	14	14	14	34	10	114	
		Euro3	2000	24	26	26	26	4	43	4	151	
		Euro4	2005	31	55	55	55	21	37	6	258	
Euro5		2009	0	0	0	0	0	12	0	12		
Gasóleo	<2.0l	conv	<		51	85	85	85	92	18	18	434
	>2.0l			55	52	52	52	73	11	17	310	
	<2.0l	Euro1	1992	177	647	647	647	316	216	185	2833	
		Euro2	1996	519	535	535	535	620	417	324	3485	
		Euro3	2000	970	936	936	936	1155	1274	737	6942	
		Euro4	2005	1198	1146	1146	1146	1376	1272	685	7968	
		Euro5	2009	301	339	339	339	367	369	218	2271	
	>2.0l	Euro1	1992	57	75	75	75	161	228	160	829	
		Euro2	1996	229	209	209	209	297	381	222	1753	
		Euro3	2000	411	289	289	289	402	372	268	2318	
		Euro4	2005	313	353	353	353	398	475	169	2412	
		Euro5	2009	88	91	91	91	115	121	56	653	

Veículos Ligeiros	GPL	<1.4l	Euro2	1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			Euro3	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Euro4	2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Euro5	2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		1.4-2.0l	Euro2	1994	8	8	8	8	12	25	8	76		
			Euro3	2000	0	4	4	4	10	21	11	54		
			Euro4	2005	0	4	4	4	4	31	4	51		
			Euro5	2009	0	0	0	0	0	0	0	0		
		>2.0l	Euro2	1994	0	4	4	4	0	0	0	11		
			Euro3	2000	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro4	2005	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro5	2009	0	0	0	0	0	0	0	0		
	híbridos	<1.6l	Euro4	2005	0	0	0	0	0	0	12	12		
Euro5			2009	0	0	0	0	0	0	0	0			
Veículos	Gasóleo	<3.5t	conv	<	2	0	0	0	11	0	6	19		
			Euro1	1994	29	45	45	45	51	11	28	251		
			Euro2	1998	42	82	82	82	54	58	9	407		
			Euro3	2000	110	104	104	104	87	123	17	649		
			Euro4	2005	135	151	151	151	128	95	45	854		
			Euro5	2010	21	42	42	42	32	13	6	196		
Autocarros	Gasóleo	>18t	conv	<	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro1	1992	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro2	1995	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro3	1999	40	60	60	60	13	10	33	273		
			Euro4	2005	35	57	57	57	71	19	40	336		
			Euro5	2008	34	78	78	78	71	56	70	464		
Autocarros	Gasóleo	≤ 15t	conv	<	163	73	73	73	62	2	5	451		
			Euro1	1992	210	178	178	178	187	32	11	974		
			Euro2	1995	26	132	132	132	148	42	0	612		
			Euro3	1999	8	0	0	0	0	7	5	20		
			Euro4	2005	0	0	0	0	0	11	0	11		
			Euro5	2008	136	110	110	110	96	55	5	619		
Motociclos	Gasolina	<50cm ³	conv	<	63	31	31	31	35	0	5	194		
			Euro 1	2000	34	8	8	8	19	0	0	77		
			Euro 2	2004	0	23	23	23	11	8	0	88		
		2 tempos > 50cm ³	conv	<	0	0	0	0	0	0	0	0		
			Euro 1	2000	4	11	11	11	0	0	0	36		
			Euro 2	2004	0	37	37	37	15	0	0	126		
			Euro 3	2007	0	0	0	0	0	0	0	0		

	4 tempos 50- 250cm³	conv	<	0	0	0	0	0	0	0	0	
		Euro 1	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Euro 2	2004	0	4	4	4	19	0	0	0	31
		Euro 3	2007	14	43	43	43	15	0	0	0	156
	4 tempos 250- 750cm³	conv	<	0	0	0	0	0	12	0	0	12
		Euro 1	2000	0	0	0	0	15	0	0	0	15
		Euro 2	2004	4	4	4	4	0	5	0	0	19
		Euro 3	2007	0	0	0	0	0	0	5	0	5
	4 tempos >750cm³	conv	<	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Euro 1	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Euro 2	2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Euro 3	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
											71140	

Anexo 3- Lista de espécies de árvores e plantas usadas na modelação da área de estudo e sua localização

x	y	Nome da planta	17	29	Populus Alba	108	27	Populus Alba
137	55	Citrus x Aurantium	19	31	Cercis Siliquastrum	111	27	Populus Alba
142	55	Citrus x Aurantium	24	31	Cercis Siliquastrum	119	27	Fraxinus
135	66	Acer Negundo	19	29	Ulmus x Hollandica	124	27	Fraxinus
134	68	Betula Pendula	24	29	Ulmus x Hollandica	117	30	Betula Pendula
137	65	Betula Pendula	28	28	Acer Negundo	119	30	Betula Pendula
141	66	Populus Alba	29	31	Betula Pendula	122	30	Ulmus x Hollandica
22	67	Citrus x Aurantium	33	31	Acer Campestre	124	30	Ulmus x Hollandica
27	67	Citrus x Aurantium	34	28	Ulmus x Hollandica	127	30	Acer Campestre
31	71	Betula Pendula	48	28	Acer Pseudoplatanus	130	30	Acer Campestre
29	72	Populus Alba	45	31	Acer Platanoides	127	27	Acer Pseudoplatanus
27	74	Olea Europaea	41	28	Cercis Siliquastrum	130	27	Acer Pseudoplatanus
25	76	Citrus x Aurantium	39	31	Cercis Siliquastrum	132	30	Citrus x Aurantium
17	82	Acer Negundo	50	31	Ulmus x Hollandica	135	32	Citrus x Aurantium
15	83	Acer Negundo	55	28	Acer Campestre	137	33	Cercis Siliquastrum
19	80	Cercis Siliquastrum	59	28	Acer Campestre	139	35	Acer Negundo
34	52	Cercis Siliquastrum	60	31	Cercis Siliquastrum	142	37	Acer Negundo
31	52	Cercis Siliquastrum	67	27	Acer Platanoides	137	30	Populus Alba
72	37	Tamarix Gallica	66	31	Populus Alba	141	33	Populus Alba
72	40	Tamarix Gallica	68	30	Acer Campestre	14	14	Platanus x Acerifoli
72	42	Tamarix Gallica	72	30	Acer Campestre	14	19	Platanus x Acerifoli
72	44	Tamarix Gallica	75	30	Picea Abies	20	19	Platanus x Acerifoli
72	47	Tamarix Gallica	78	30	Acer Pseudoplatanus	20	13	Platanus x Acerifoli
78	38	Citrus x Aurantium	81	30	Acer Pseudoplatanus	28	12	Platanus x Acerifoli
78	40	Citrus x Aurantium	92	30	Tilia Platyphyllos	27	19	Platanus x Acerifoli
78	45	Citrus x Aurantium	74	28	Cercis Siliquastrum	31	15	Platanus x Acerifoli
78	47	Citrus x Aurantium	77	28	Cercis Siliquastrum	37	15	Platanus x Acerifoli
86	54	Citrus x Aurantium	80	28	Robinia Pseudoacacia	35	19	Platanus x Acerifoli
88	54	Citrus x Aurantium	84	30	Robinia Pseudoacacia	40	19	Platanus x Acerifoli
91	57	Citrus x Aurantium	87	30	Robinia Pseudoacacia	41	15	Platanus x Acerifoli
96	46	Senegalia Greggii	92	27	Tilia Platyphyllos	44	19	Platanus x Acerifoli
96	51	Senegalia Greggii	102	30	Tilia Cordata	48	20	Platanus x Acerifoli
100	54	Senegalia Greggii	106	30	Tilia	47	16	Platanus x Acerifoli
103	54	Senegalia Greggii	95	30	Acer Campestre	53	19	Platanus x Acerifoli
129	34	Senegalia Greggii	99	30	Acer Negundo	56	20	Platanus x Acerifoli
123	73	Acer Negundo	98	27	Acer Negundo	60	20	Platanus x Acerifoli
124	74	Citrus x Aurantium	89	27	Acer Negundo	63	20	Platanus x Acerifoli
123	76	Citrus x Aurantium	101	27	Cercis Siliquastrum	66	20	Platanus x Acerifoli
122	75	Citrus x Aurantium	109	30	Cercis Siliquastrum	66	15	Platanus x Acerifoli
15	30	Citrus x Aurantium	105	27	Acer Platanoides	71	20	Platanus x Acerifoli
17	31	Betula Pendula	112	30	Acer Pseudoplatanus	75	20	Platanus x Acerifoli

Estudo do efeito de infraestruturas verdes na resiliência da cidade de Leiria às alterações climáticas e
poluição do ar

76	15	Platanus × Acerifoli	140	10	Pinus Pinea	103	67	Cylindric, small tru
81	15	Platanus × Acerifoli	142	11	Pinus Pinea	106	69	Cylindric, small tru
81	19	Platanus × Acerifoli	134	16	Cypress	110	71	Cylindric, medium tr
85	15	Platanus × Acerifoli	27	9	Tamarix Gallica	114	73	Cylindric, small tru
85	19	Platanus × Acerifoli	29	9	Tamarix Gallica	118	75	Cylindric, small tru
89	19	Platanus × Acerifoli	35	8	Tamarix Gallica	68	54	Cylindric, small tru
89	15	Platanus × Acerifoli	40	8	Tamarix Gallica	76	58	Heart-shaped, small
93	15	Platanus × Acerifoli	43	8	Tamarix Gallica	102	82	Heart-shaped, small
93	19	Platanus × Acerifoli	44	7	Tamarix Gallica	126	90	Heart-shaped, medium
97	19	Platanus × Acerifoli	46	8	Tamarix Gallica	128	92	Heart-shaped, medium
97	15	Platanus × Acerifoli	45	7	Tamarix Gallica	130	94	Heart-shaped, medium
101	15	Platanus × Acerifoli	36	8	Tamarix Gallica	132	96	Heart-shaped, medium
101	19	Platanus × Acerifoli	37	8	Tamarix Gallica	100	105	Heart-shaped, medium
105	19	Platanus × Acerifoli	38	8	Tamarix Gallica	103	108	Heart-shaped, small
105	15	Platanus × Acerifoli	39	8	Tamarix Gallica	17	66	Cylindric, small tru
109	15	Platanus × Acerifoli	67	37	Cylindric, small tru	17	70	Cylindric, small tru
109	19	Platanus × Acerifoli	67	41	Cylindric, small tru	25	69	Cylindric, small tru
113	15	Platanus × Acerifoli	82	36	Cylindric, small tru	25	73	Cylindric, small tru
113	19	Platanus × Acerifoli	86	36	Cylindric, small tru	13	87	Olea Europaea
117	19	Platanus × Acerifoli	90	36	Cylindric, small tru	12	84	Olea Europaea
122	19	Platanus × Acerifoli	139	41	Heart-shaped, small	16	58	Cylindric, medium tr
87	7	Pinus Pinea	138	48	Heart-shaped, small	16	54	Heart-shaped, medium
90	7	Pinus Pinea	139	55	Olea Europaea	15	44	Cylindric, small tru
93	7	Pinus Pinea	139	66	Olea Europaea	15	40	Cylindric, small tru
95	7	Pinus Pinea	136	67	Olea Europaea	15	34	Heart-shaped, small
99	8	Pinus Pinea	108	44	Citrus x Aurantium	12	34	Citrus x Aurantium
92	9	Pinus Pinea	117	54	Citrus x Aurantium	13	41	Citrus x Aurantium
95	9	Pinus Pinea	121	54	Citrus x Aurantium	13	43	Citrus x Aurantium
104	5	Platanus × Acerifoli	125	54	Citrus x Aurantium	24	51	Cylindric, small tru
107	5	Platanus × Acerifoli	129	57	Picea Abies	28	46	Cylindric, small tru
110	5	Platanus × Acerifoli	85	63	Cylindric, medium tr	20	46	Cylindric, small tru
112	5	Platanus × Acerifoli	88	64	Cylindric, medium tr	36	51	Cylindric, small tru
115	5	Platanus × Acerifoli	92	66	Cylindric, small tru	36	46	Cylindric, small tru
118	5	Platanus × Acerifoli	96	68	Cylindric, small tru	44	51	Cylindric, small tru
120	5	Platanus × Acerifoli	99	70	Cylindric, medium tr	44	46	Cylindric, small tru
120	11	Platanus × Acerifoli	103	72	Cylindric, small tru	52	51	Cylindric, small tru
124	12	Platanus × Acerifoli	107	74	Cylindric, small tru	52	46	Cylindric, small tru
123	6	Platanus × Acerifoli	111	76	Cylindric, medium tr	60	51	Cylindric, small tru
122	9	Pinus Pinea	114	78	Cylindric, small tru	60	46	Cylindric, small tru
127	6	Pinus Pinea	122	83	Cylindric, small tru	24	46	Heart-shaped, small
127	8	Pinus Pinea	118	80	Cylindric, small tru	32	46	Heart-shaped, small
132	8	Tamarix Gallica	93	61	Cylindric, small tru	40	46	Heart-shaped, small
133	8	Tamarix Gallica	96	63	Cylindric, small tru	48	46	Heart-shaped, small
138	17	Platanus × Acerifoli	100	65	Cylindric, medium tr	56	46	Heart-shaped, small

Estudo do efeito de infraestruturas verdes na resiliência da cidade de Leiria às alterações climáticas e
 poluição do ar

64	46	Heart-shaped, small	48	51	Heart-shaped, small	20	51	Heart-shaped, small
64	52	Heart-shaped, small	40	51	Heart-shaped, small	72	56	Heart-shaped, small
56	51	Heart-shaped, small	28	51	Heart-shaped, small			

Anexo 4- Inputs das emissões dos poluentes do tráfego rodoviário das ruas da área de estudo

Emissões (Input ENVI-met) ($\mu\text{g}/\text{m.s}$) da rua Av. Heróis de Angola (1)					
	NO	NO2	NOx	PM10	PM2,5
00:00	21,789	6,989	28,779	2,976	2,311
01:00	7,947	3,012	10,959	1,138	0,882
02:00	9,681	2,867	12,549	1,156	0,934
03:00	20,797	4,390	25,187	1,662	1,360
04:00	22,403	4,667	27,070	1,865	1,534
05:00	28,701	5,523	34,224	2,158	1,784
06:00	65,884	12,248	78,133	5,098	4,265
07:00	133,220	25,977	159,197	8,765	7,193
08:00	169,349	34,143	203,492	13,259	10,962
09:00	180,756	35,458	216,214	14,276	11,861
10:00	179,943	35,263	215,206	14,105	11,636
11:00	172,151	35,317	207,468	13,593	11,007
12:00	159,988	35,191	195,179	12,964	10,421
13:00	150,928	34,397	185,326	12,721	10,076
14:00	163,547	37,312	200,859	15,105	12,069
15:00	158,586	37,825	196,411	15,917	12,767
16:00	164,122	45,285	209,407	15,372	12,140
17:00	233,181	55,416	288,597	19,134	15,470
18:00	236,526	49,156	285,682	18,214	14,873
19:00	145,905	34,236	180,141	12,535	10,106
20:00	100,935	23,051	123,986	9,076	7,197
21:00	77,534	18,434	95,968	7,686	6,065
22:00	64,417	16,217	80,635	6,938	5,460
23:00	37,425	11,340	48,766	5,070	3,945

Emissões (Input ENVI-met) ($\mu\text{g}/\text{m.s}$) da rua Capitão Mouzinho de Albuquerque (2)					
	NO	NO2	NOx	PM10	PM2,5
00:00	24,018	7,704	31,722	3,280	2,547
01:00	8,760	3,320	12,080	1,254	0,972
02:00	10,671	3,161	13,832	1,275	1,029
03:00	22,924	4,839	27,763	1,832	1,499
04:00	24,694	5,144	29,838	2,056	1,691
05:00	31,636	6,087	37,724	2,379	1,966
06:00	72,621	13,501	86,122	5,620	4,701
07:00	146,843	28,633	175,475	9,662	7,929
08:00	186,667	37,634	224,300	14,615	12,083

09:00	199,239	39,084	238,324	15,736	13,073
10:00	198,344	38,869	237,213	15,547	12,826
11:00	189,755	38,928	228,683	14,983	12,133
12:00	176,348	38,790	215,137	14,290	11,486
13:00	166,362	37,914	204,276	14,022	11,106
14:00	180,271	41,127	221,398	16,649	13,303
15:00	174,803	41,692	216,495	17,544	14,073
16:00	180,905	49,916	230,821	16,944	13,382
17:00	257,026	61,083	318,109	21,090	17,052
18:00	260,712	54,182	314,895	20,077	16,394
19:00	160,825	37,737	198,561	13,817	11,140
20:00	111,256	25,408	136,665	10,004	7,933
21:00	85,463	20,319	105,782	8,472	6,685
22:00	71,004	17,876	88,880	7,647	6,018
23:00	41,252	12,500	53,753	5,588	4,349

Emissões (Input ENVI-met) (µg/ m.s) da rua Dr. Américo Cortês Pinto (3)					
	NO	NO2	NOx	PM10	PM2,5
00:00	5,145	1,650	6,795	0,703	0,546
01:00	1,876	0,711	2,588	0,269	0,208
02:00	2,286	0,677	2,963	0,273	0,220
03:00	4,910	1,037	5,947	0,392	0,321
04:00	5,290	1,102	6,392	0,440	0,362
05:00	6,777	1,304	8,081	0,510	0,421
06:00	15,556	2,892	18,448	1,204	1,007
07:00	31,455	6,133	37,588	2,070	1,698
08:00	39,985	8,061	48,047	3,131	2,588
09:00	42,678	8,372	51,051	3,371	2,800
10:00	42,487	8,326	50,813	3,330	2,747
11:00	40,647	8,339	48,986	3,210	2,599
12:00	37,775	8,309	46,084	3,061	2,460
13:00	35,636	8,122	43,757	3,004	2,379
14:00	38,615	8,810	47,425	3,566	2,850
15:00	37,444	8,931	46,375	3,758	3,015
16:00	38,751	10,692	49,443	3,630	2,866
17:00	55,057	13,084	68,141	4,518	3,653
18:00	55,846	11,606	67,453	4,301	3,512
19:00	34,450	8,083	42,533	2,960	2,386
20:00	23,832	5,443	29,275	2,143	1,699
21:00	18,307	4,352	22,659	1,815	1,432
22:00	15,210	3,829	19,039	1,638	1,289
23:00	8,837	2,678	11,514	1,197	0,932

Emissões (Input ENVI-met) ($\mu\text{g}/\text{m.s}$) da rua de São Francisco (4)					
	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
00:00	16,213	5,201	21,414	2,214	1,720
01:00	5,913	2,241	8,155	0,846	0,656
02:00	7,204	2,134	9,337	0,861	0,695
03:00	15,475	3,267	18,742	1,237	1,012
04:00	16,670	3,473	20,143	1,388	1,141
05:00	21,357	4,109	25,466	1,606	1,327
06:00	49,024	9,114	58,138	3,794	3,173
07:00	99,129	19,329	118,458	6,522	5,353
08:00	126,012	25,405	151,418	9,866	8,157
09:00	134,500	26,384	160,884	10,623	8,825
10:00	133,895	26,239	160,134	10,496	8,658
11:00	128,097	26,279	154,376	10,115	8,190
12:00	119,046	26,186	145,232	9,647	7,754
13:00	112,305	25,595	137,900	9,466	7,497
14:00	121,695	27,764	149,458	11,239	8,980
15:00	118,004	28,145	146,149	11,843	9,500
16:00	122,123	33,697	155,820	11,439	9,034
17:00	173,509	41,235	214,745	14,237	11,511
18:00	175,998	36,577	212,575	13,553	11,067
19:00	108,568	25,475	134,042	9,327	7,520
20:00	75,106	17,152	92,258	6,753	5,356
21:00	57,693	13,717	71,410	5,719	4,513
22:00	47,933	12,067	60,000	5,162	4,063
23:00	27,848	8,438	36,287	3,772	2,936

Emissões (Input ENVI-met) ($\mu\text{g}/\text{m.s}$) da rua Camilo Korrodi (5)					
	NO	NO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}
00:00	3,531	1,133	4,663	0,482	0,374
01:00	1,288	0,488	1,776	0,184	0,143
02:00	1,569	0,465	2,033	0,187	0,151
03:00	3,370	0,711	4,081	0,269	0,220
04:00	3,630	0,756	4,386	0,302	0,249
05:00	4,651	0,895	5,545	0,350	0,289
06:00	10,675	1,985	12,660	0,826	0,691
07:00	21,586	4,209	25,795	1,420	1,166
08:00	27,440	5,532	32,973	2,148	1,776
09:00	29,289	5,745	35,034	2,313	1,922
10:00	29,157	5,714	34,871	2,285	1,885
11:00	27,894	5,722	33,617	2,203	1,784
12:00	25,923	5,702	31,625	2,101	1,688
13:00	24,455	5,573	30,029	2,061	1,633
14:00	26,500	6,046	32,546	2,447	1,956

Estudo do efeito de infraestruturas verdes na resiliência da cidade de Leiria às alterações climáticas e
poluição do ar

15:00	25,696	6,129	31,825	2,579	2,069
16:00	26,593	7,338	33,931	2,491	1,967
17:00	37,783	8,979	46,762	3,100	2,507
18:00	38,325	7,965	46,290	2,951	2,410
19:00	23,641	5,547	29,189	2,031	1,638
20:00	16,355	3,735	20,090	1,471	1,166
21:00	12,563	2,987	15,550	1,245	0,983
22:00	10,438	2,628	13,065	1,124	0,885
23:00	6,064	1,838	7,902	0,821	0,639

Anexo 5- Código (Script) de cálculo da média espacial horária

```
var
sum: Double;
i,j,counter: Integer;

Begin
{Edit your code here for the main routine}
sum := 0;
counter := 0;

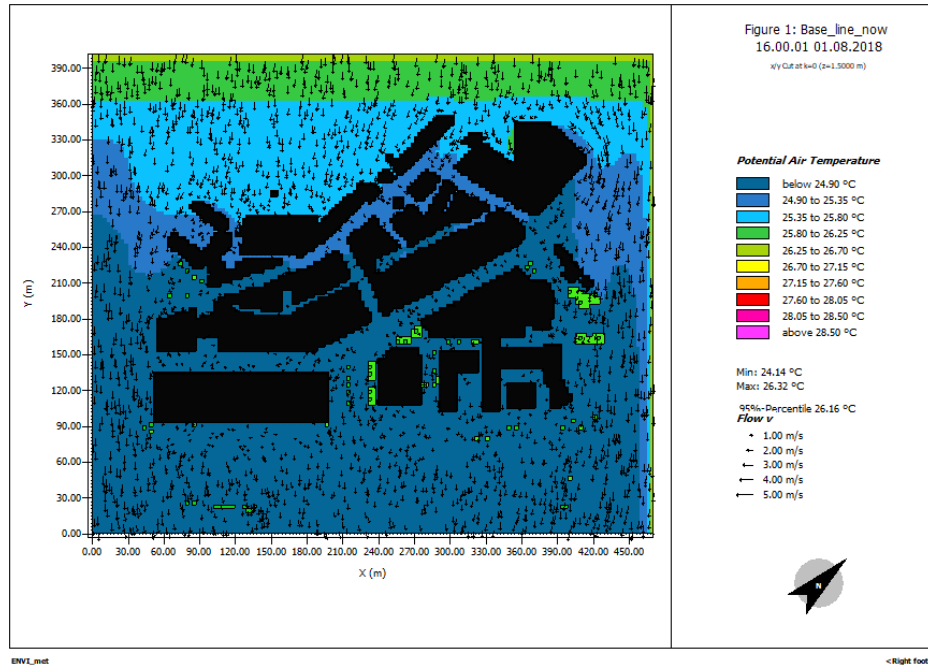
for i := 0 to map_xgrids-1 do
for j := 0 to map_ygrids-1 do
if mapdata('Special2D',i,j) = 0 then
begin
sum := sum + mapdata('Data2D',i,j);
counter := counter + 1;
end;

Writeln(sum/counter);
end;
```

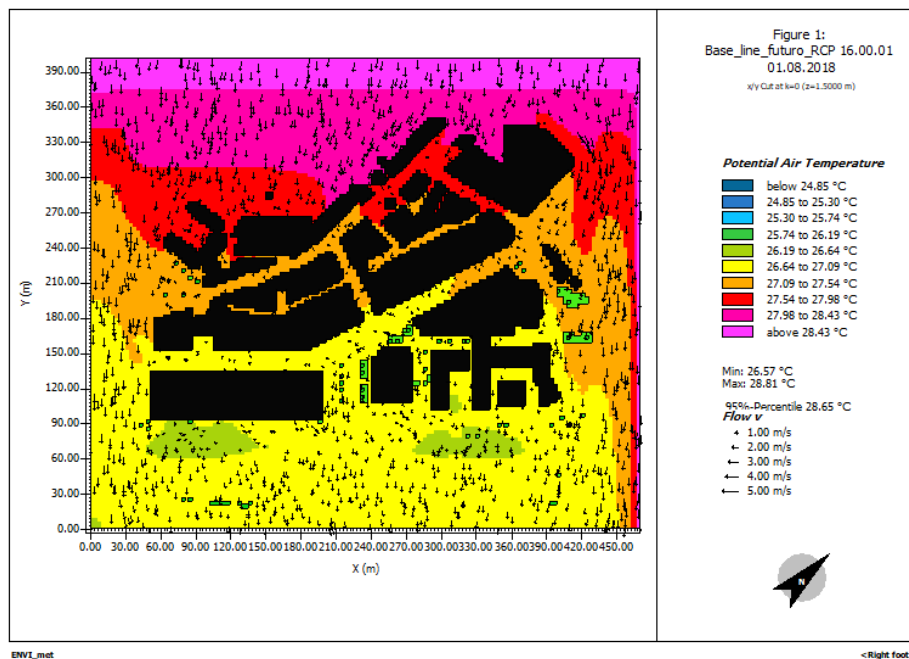
Anexo 6

Temperatura – 16h

Baseline verão atual



Baseline verão futuro

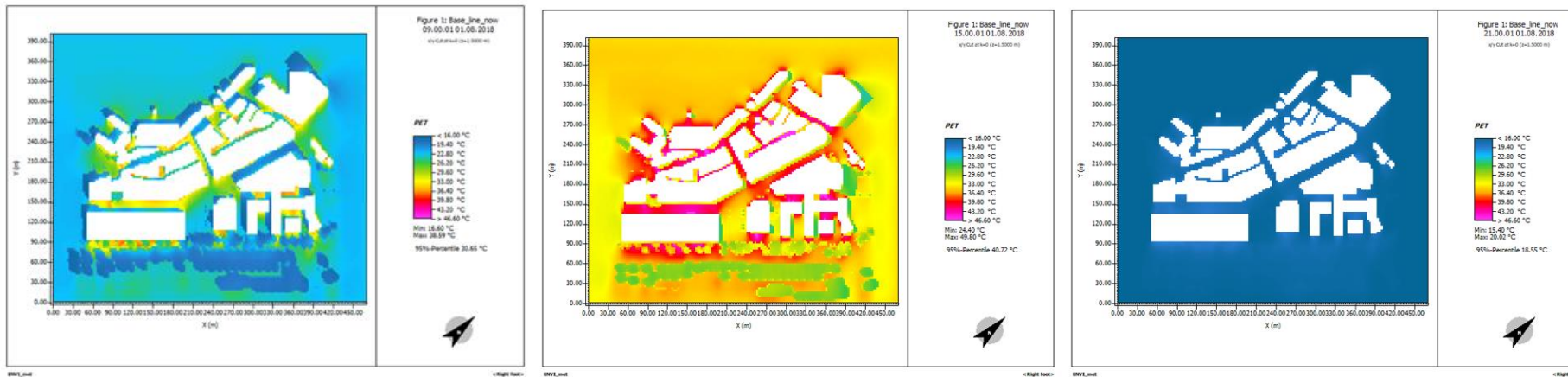


PET (°C)

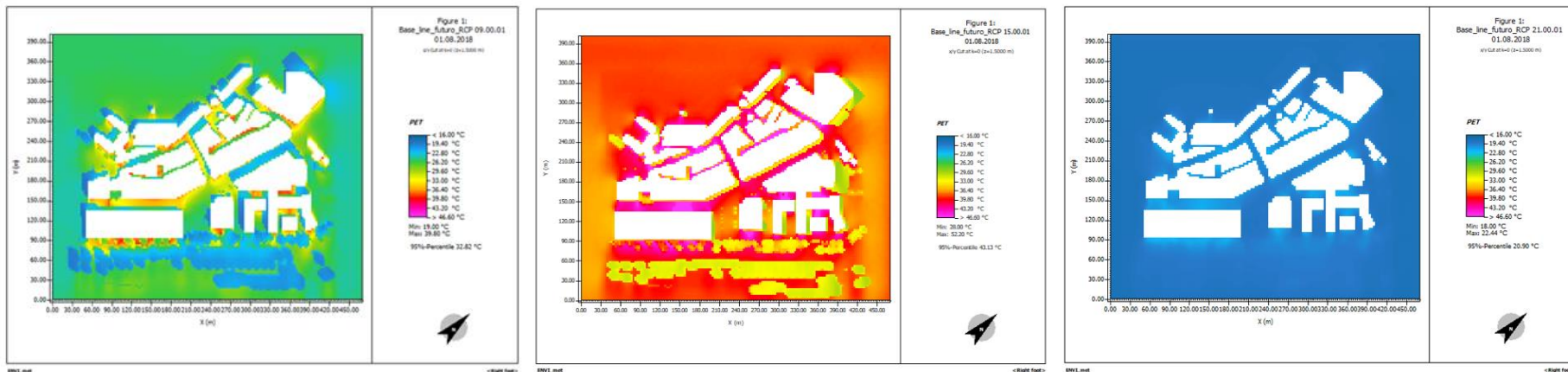
9h

15h; Baseline verão atual

21h



Baseline verão futuro



Anexo 7

Temperatura do ar a 1,5m de altura

Baseline verão futuro

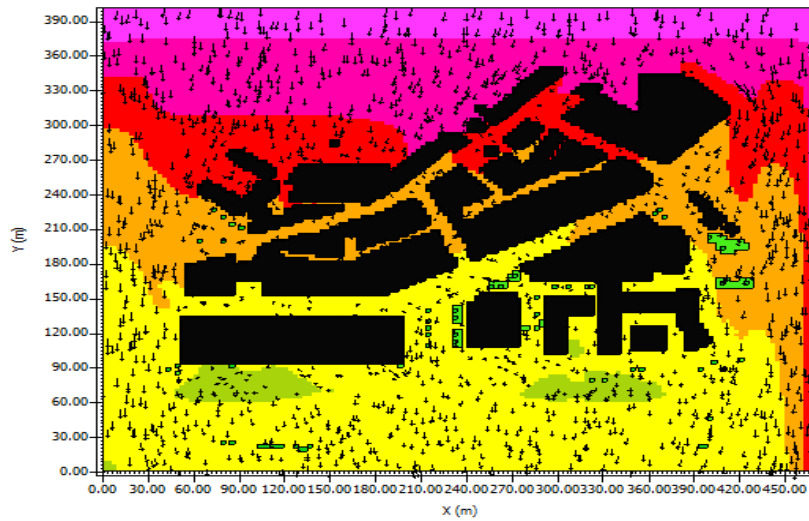
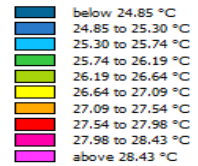


Figure 1:
Base_line_futuro_RCP 16.00.01
01.08.2018
x/y Cut at k=0 (z=1.5000 m)

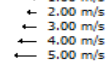
Potential Air Temperature



Min: 26.57 °C
Max: 28.81 °C

95%-Percentile 28.65 °C

Flow v



S1

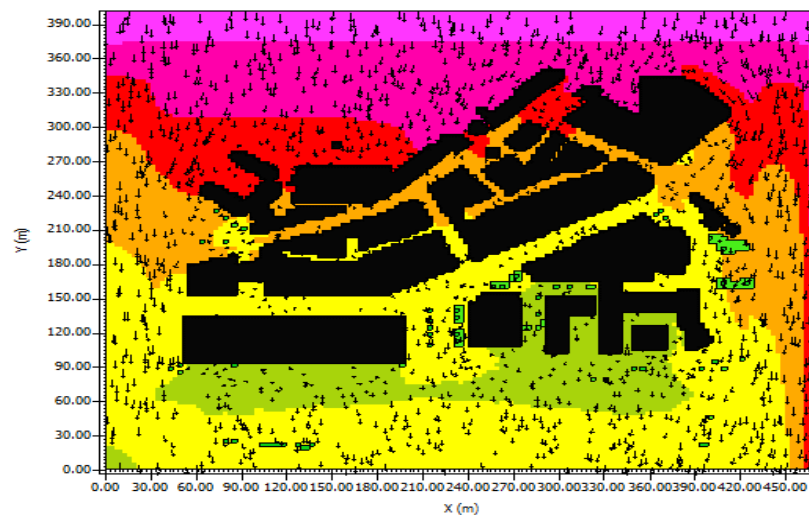
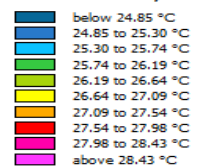


Figure 1:
Cenário_All_roof_Green_RCP_futuro
16.00.01 01.08.2018
x/y Cut at k=0 (z=1.5000 m)

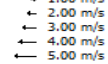
Potential Air Temperature



Min: 26.43 °C
Max: 28.81 °C

95%-Percentile 28.65 °C

Flow v



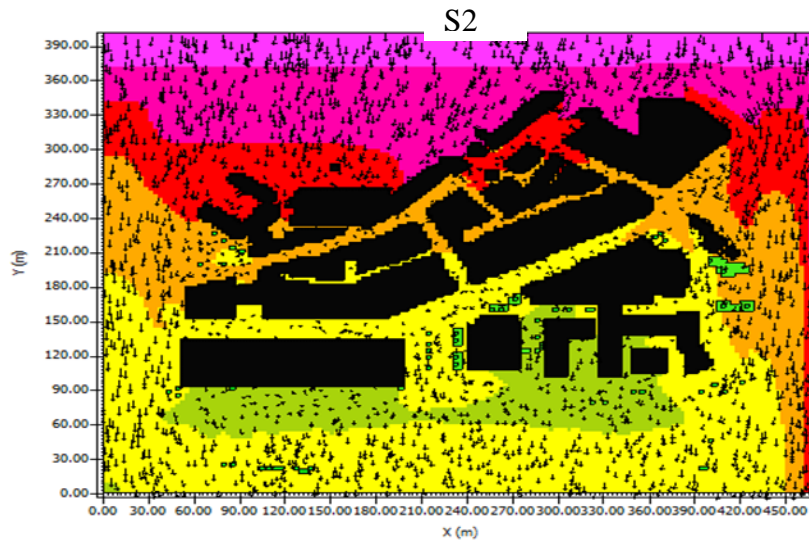


Figure 1:
Cenário_All_White_roofs_RCP_futuro
16.00.01 01.08.2018
x/y Cut at k=0 (z=1.5000 m)

Potential Air Temperature

- below 24.85 °C
- 24.85 to 25.30 °C
- 25.30 to 25.74 °C
- 25.74 to 26.19 °C
- 26.19 to 26.63 °C
- 26.63 to 27.08 °C
- 27.08 to 27.52 °C
- 27.52 to 27.97 °C
- 27.97 to 28.41 °C
- above 28.41 °C

Min: 26.46 °C
Max: 28.81 °C
95%-Percentile 28.65 °C

Flow v

- 1.00 m/s
- 2.00 m/s
- 3.00 m/s
- 4.00 m/s
- 5.00 m/s

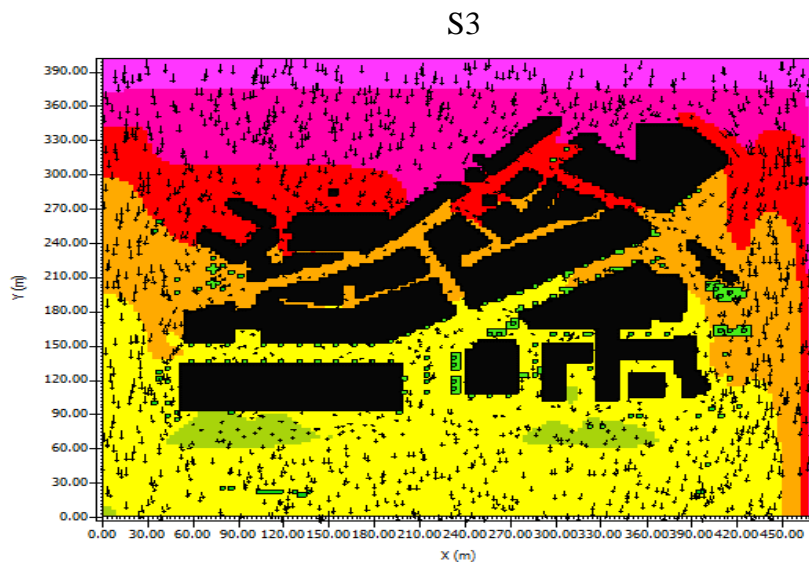


Figure 1:
Cenário_All_Tree_RCP_futuro
16.00.01 01.08.2018
x/y Cut at k=0 (z=1.5000 m)

Potential Air Temperature

- below 24.85 °C
- 24.85 to 25.30 °C
- 25.30 to 25.74 °C
- 25.74 to 26.19 °C
- 26.19 to 26.64 °C
- 26.64 to 27.09 °C
- 27.09 to 27.54 °C
- 27.54 to 27.98 °C
- 27.98 to 28.43 °C
- above 28.43 °C

Min: 26.57 °C
Max: 28.81 °C
95%-Percentile 28.65 °C

Flow v

- 1.00 m/s
- 2.00 m/s
- 3.00 m/s
- 4.00 m/s
- 5.00 m/s



Figure 1:
Cenário_No_Vegetation_RCP_futuro
16.00.01 01.08.2018
x/y Cut at k=0 (z=1.5000 m)

Potential Air Temperature

- below 24.85 °C
- 24.85 to 25.30 °C
- 25.30 to 25.74 °C
- 25.74 to 26.19 °C
- 26.19 to 26.63 °C
- 26.63 to 27.08 °C
- 27.08 to 27.52 °C
- 27.52 to 27.97 °C
- 27.97 to 28.41 °C
- above 28.41 °C

Min: 26.44 °C
Max: 28.82 °C
95%-Percentile 28.65 °C

Flow v

- 1.00 m/s
- 2.00 m/s
- 3.00 m/s
- 4.00 m/s
- 5.00 m/s

Concentração de Poluentes atmosféricos a 1,5m de altura

NO **Baseline verão futuro**

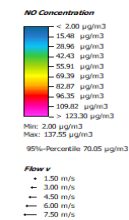
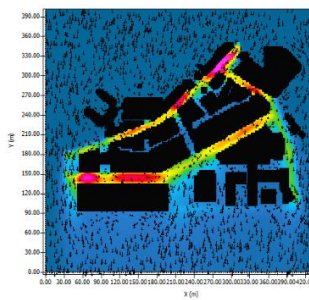
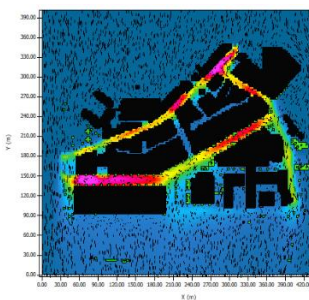
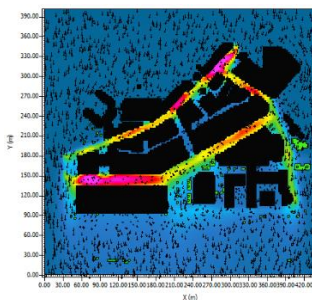
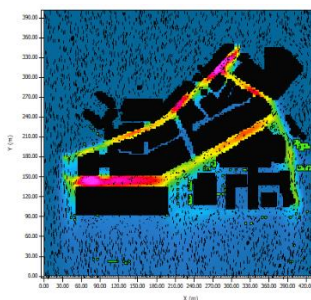
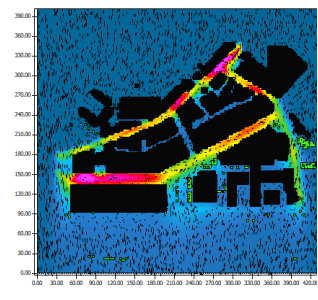
S1

S2

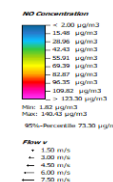
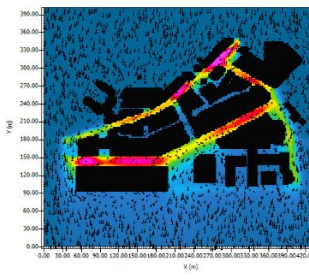
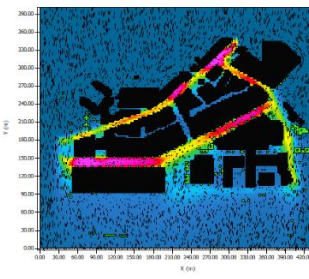
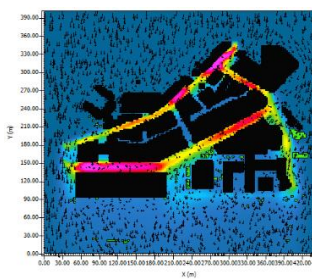
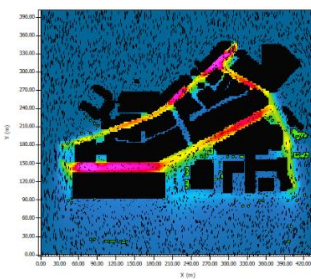
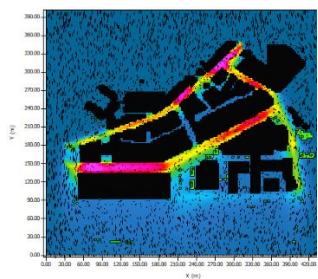
S3

S4

9h

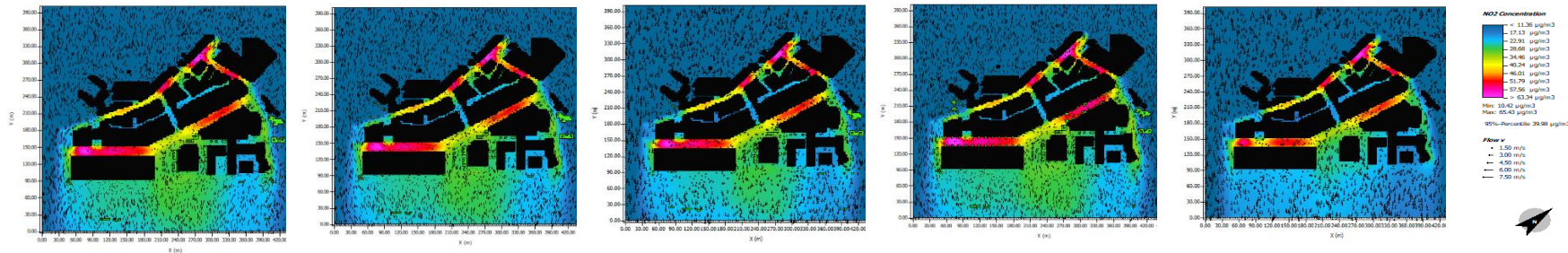


18h

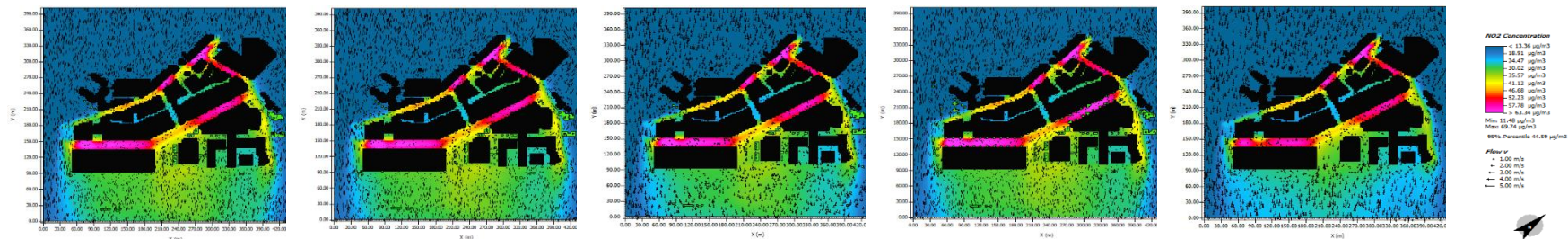


NO₂

9h

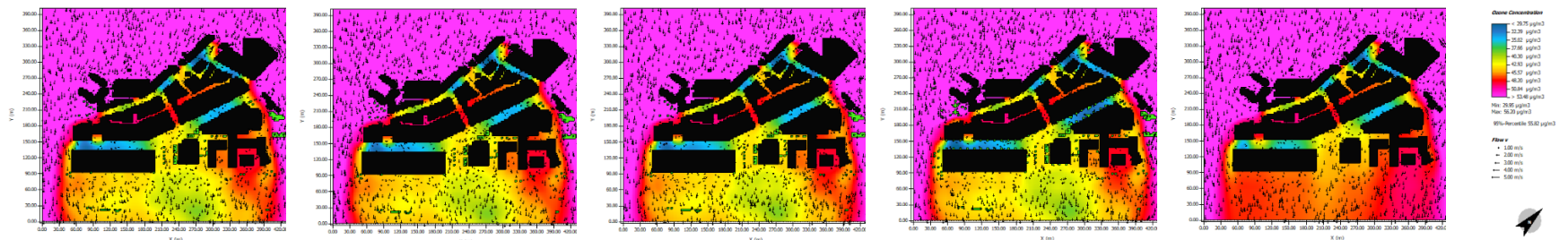


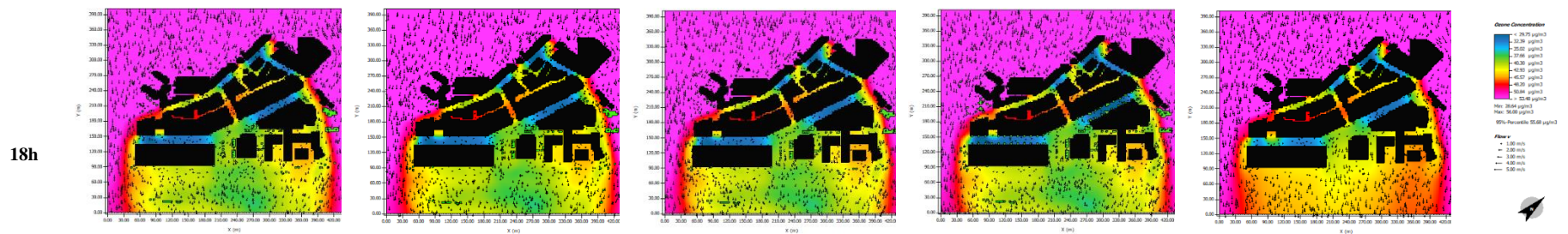
18h



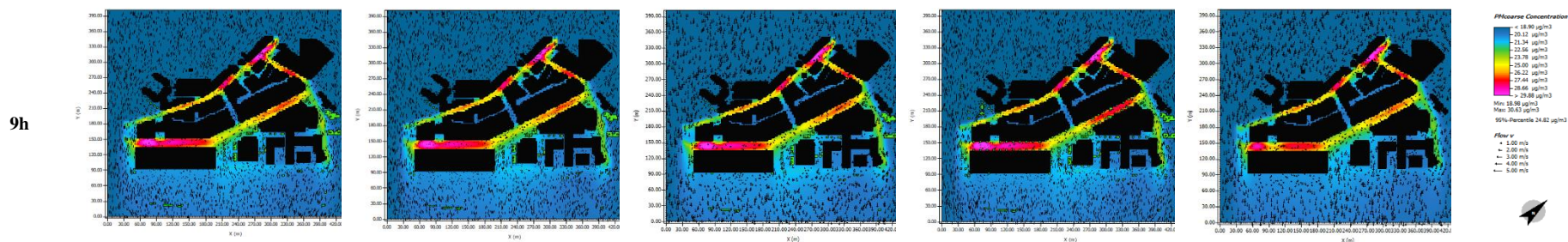
O₃

9h

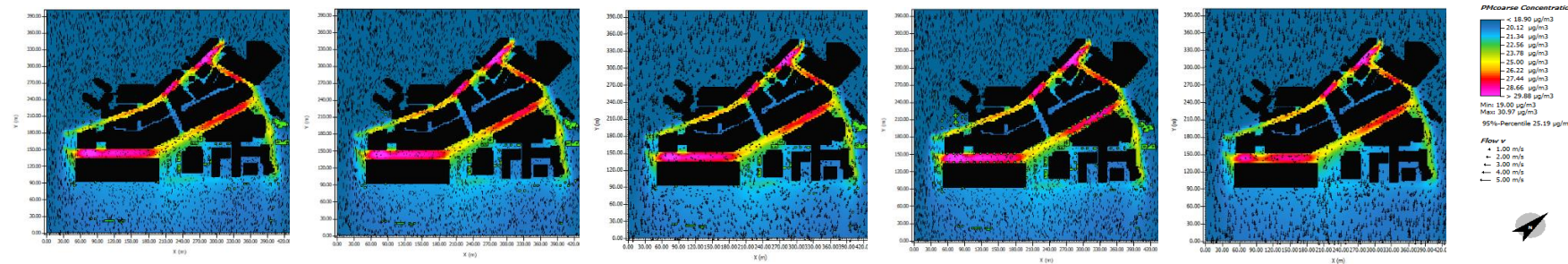




PM10

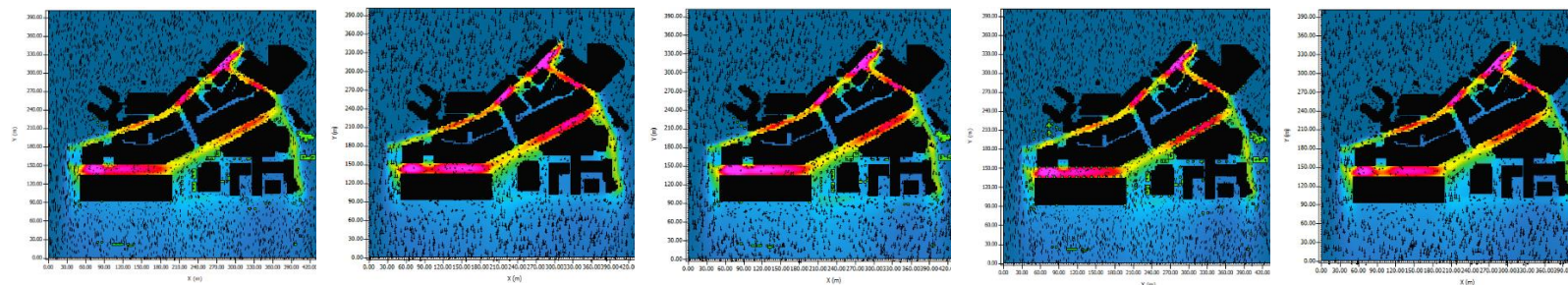


18h

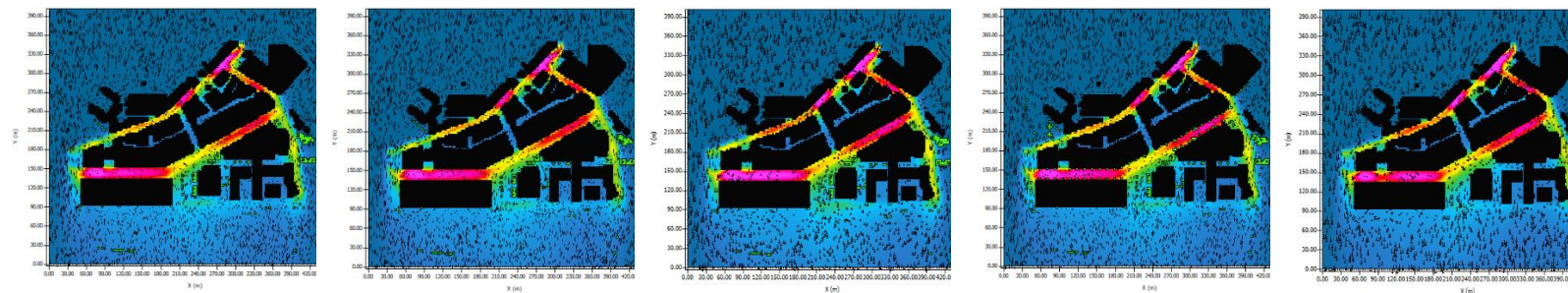


PM2.5

9h



18h



PM2.5 Concentration

- 7.00 µg/m³
- 7.89 µg/m³
- 8.79 µg/m³
- 9.68 µg/m³
- 10.57 µg/m³
- 11.47 µg/m³
- 12.36 µg/m³
- 13.25 µg/m³
- 14.14 µg/m³
- 15.04 µg/m³

Mini: 7.00 µg/m³
 Maxi: 15.04 µg/m³
 95%-Percentile: 11.83 µg/m³

Flow v

- 1.00 m/s
- 2.00 m/s
- 3.00 m/s
- 4.00 m/s
- 5.00 m/s

PM2.5 Concentration

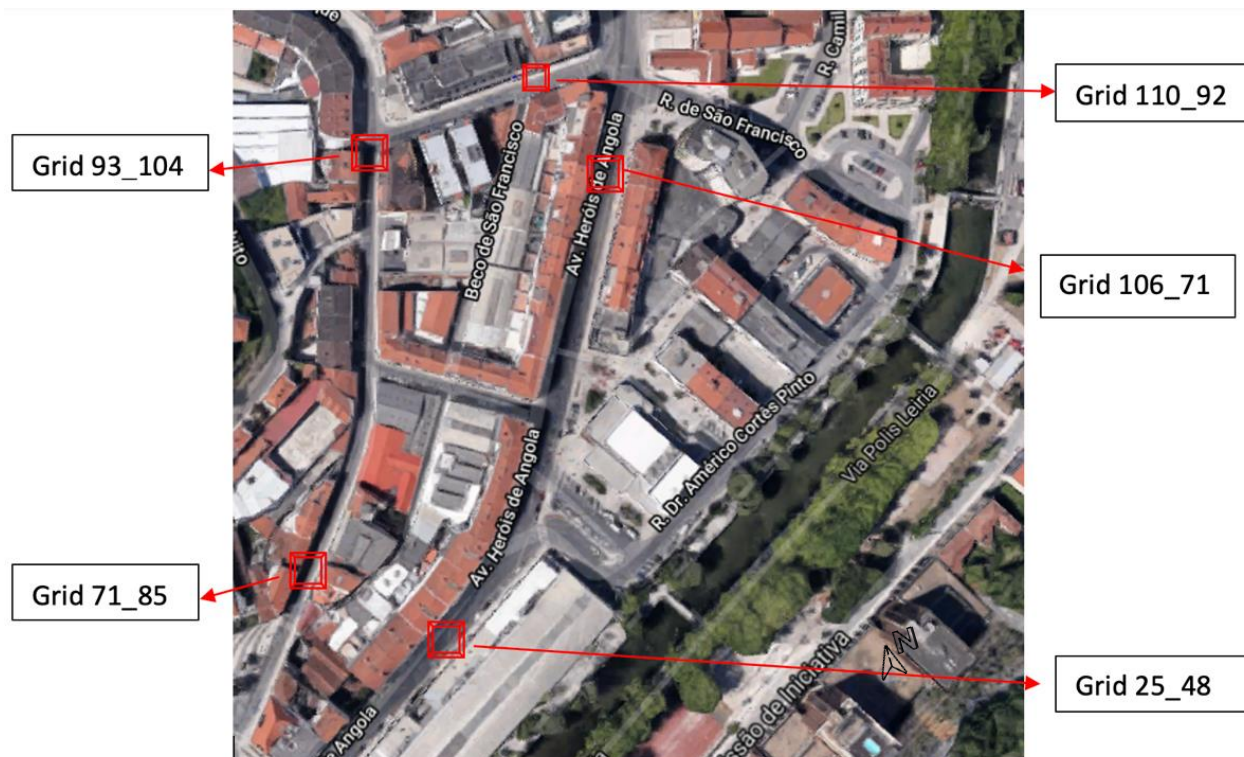
- 7.00 µg/m³
- 7.89 µg/m³
- 8.79 µg/m³
- 9.68 µg/m³
- 10.57 µg/m³
- 11.47 µg/m³
- 12.36 µg/m³
- 13.25 µg/m³
- 14.14 µg/m³
- 15.04 µg/m³

Mini: 7.00 µg/m³
 Maxi: 15.04 µg/m³
 95%-Percentile: 12.17 µg/m³

Flow v

- 1.00 m/s
- 2.00 m/s
- 3.00 m/s
- 4.00 m/s
- 5.00 m/s

Anexo 8



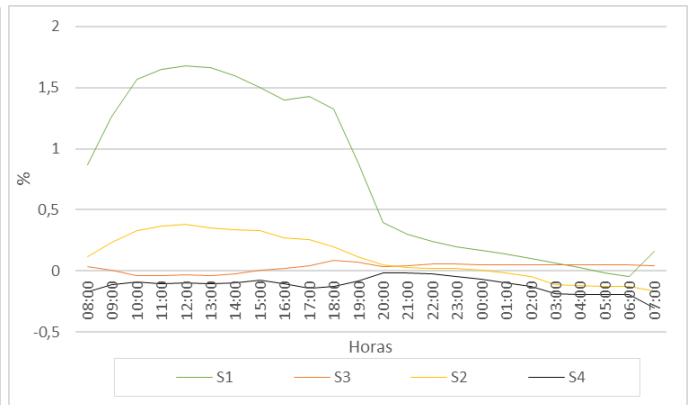
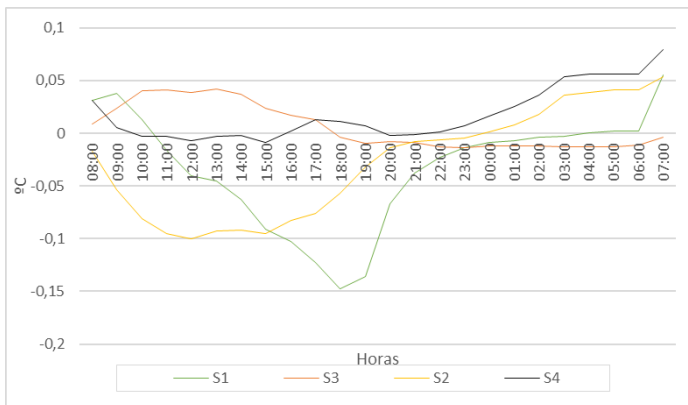
Grid 25_48- Rua Avenida Heróis de Angola

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (ug/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline verão atual	20,819	70,096	0,177	69,353	42,930	112,283	40,692	25,507	12,265	24,576
Baseline verão futuro	23,172	68,286	0,177	68,472	43,073	111,544	40,399	25,451	12,220	26,838
S1	23,139	69,060	0,176	68,545	43,129	111,673	40,350	25,459	12,226	27,116
S2	23,144	68,399	0,179	68,493	43,088	111,582	40,383	25,453	12,221	26,852
S3	23,178	68,315	0,179	71,115	44,452	115,567	39,611	25,705	12,430	26,847
S4	23,190	68,171	0,158	58,475	38,120	96,595	42,989	24,464	11,416	27,677

Diferenças entre cenários na:

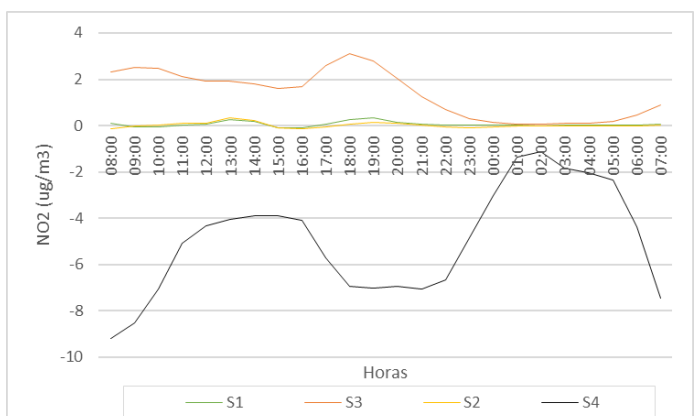
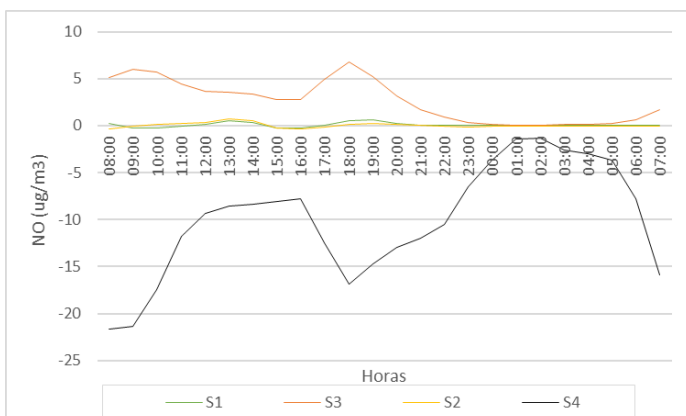
- Temperatura (°C) e Humidade relativa (%) do ar (z=1,5m)

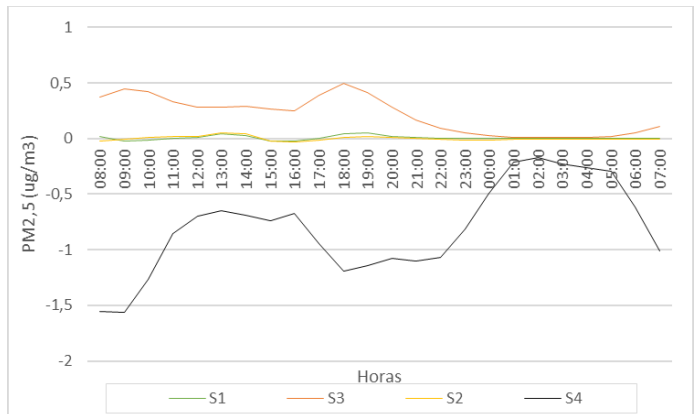
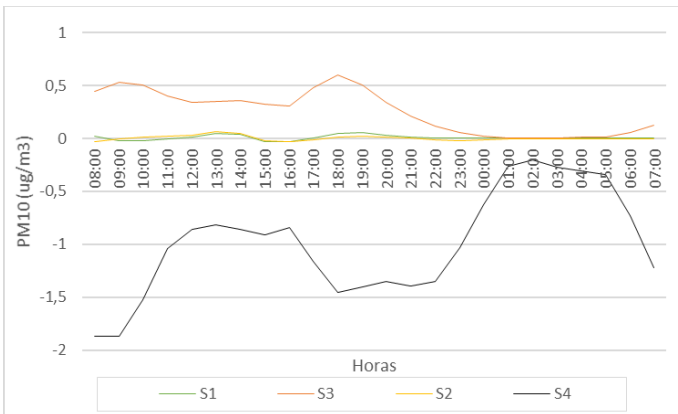
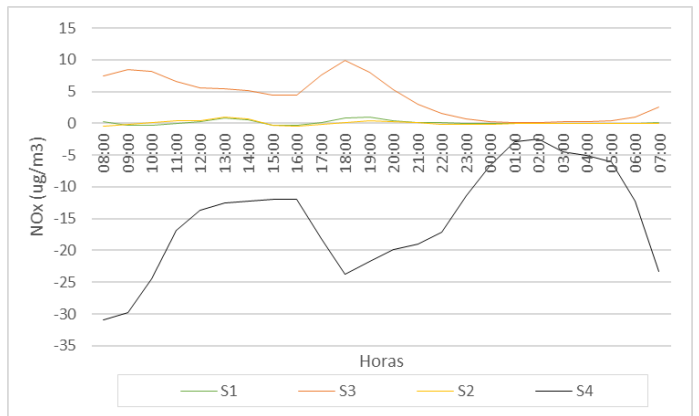
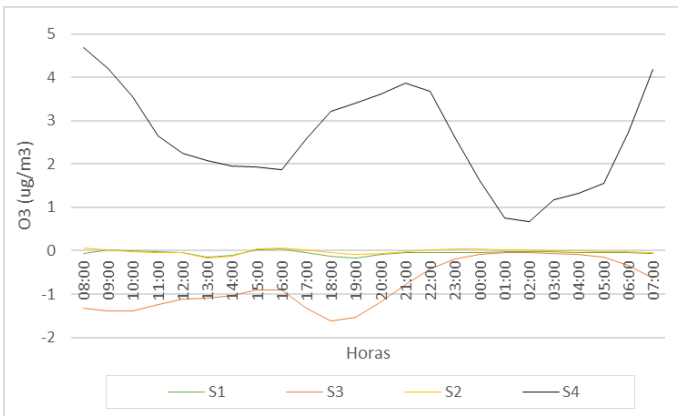


- Velocidade do Vento (z=1,5m)

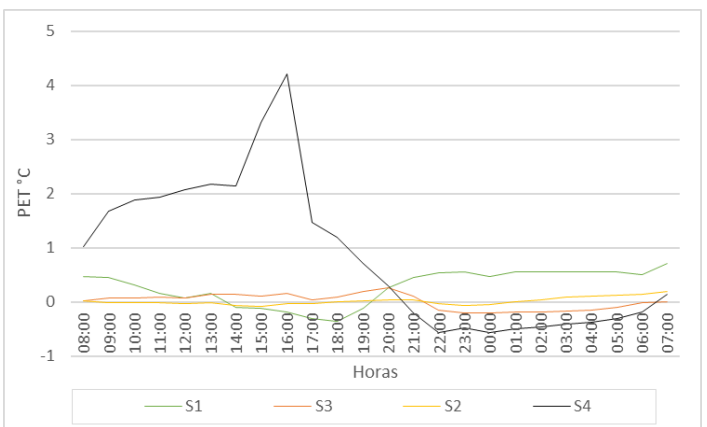
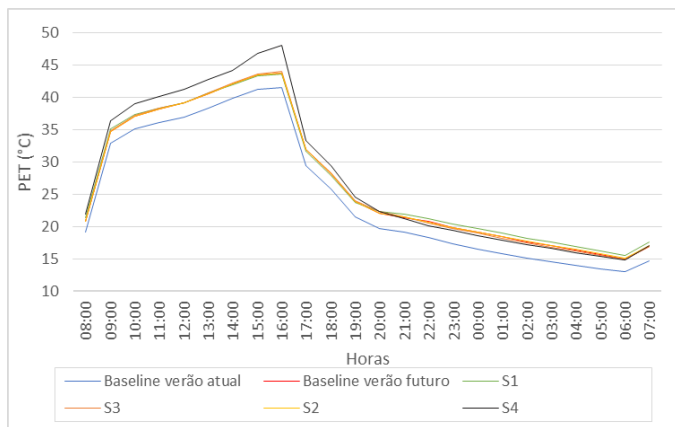


- Concentração de Poluentes (z=1,5m)





• PET (°C) (z=1,5m)



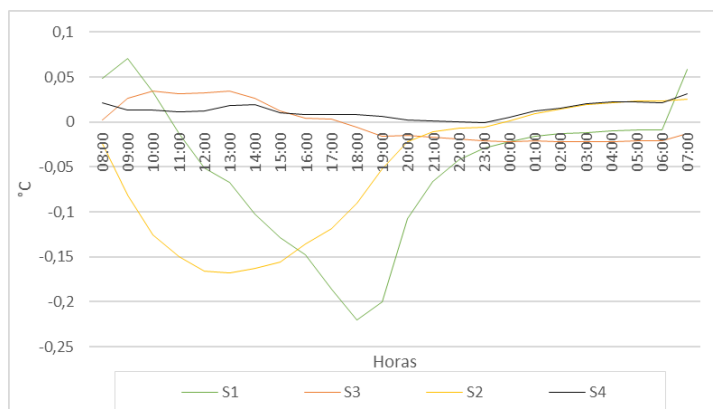
Grid 106_71 – Rua Avenida Heróis de Angola

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

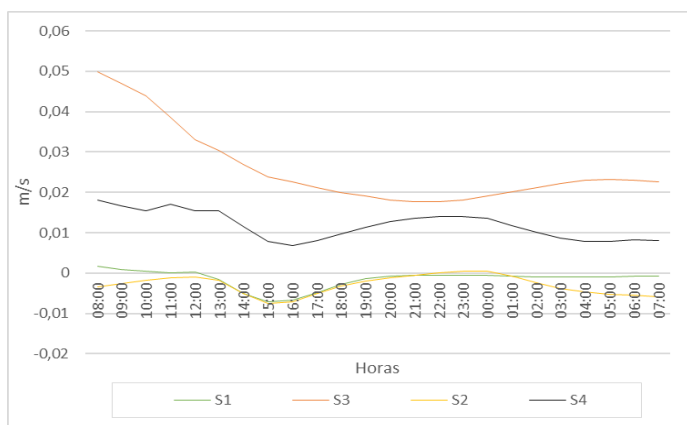
	Temperatura (°C)	Humidade de relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão atual	20,728	70,289	0,531	52,257	38,241	90,498	41,933	24,012	11,050	21,726
Baseline verão futuro	23,087	68,454	0,524	51,588	38,417	90,005	41,648	23,972	11,018	24,144
S1	23,036	69,639	0,550	51,712	38,507	90,218	41,587	23,986	11,029	24,421
S2	23,031	68,679	0,521	51,771	38,510	90,281	41,596	23,991	11,032	24,149
S3	23,085	68,552	0,521	57,055	41,353	98,407	39,962	24,516	11,466	23,982
S4	23,100	68,410	0,536	50,784	37,931	88,717	41,932	23,890	10,951	24,386

Diferenças entre cenários na:

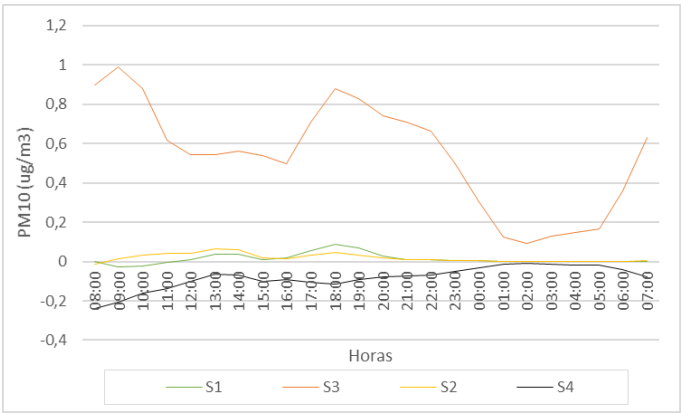
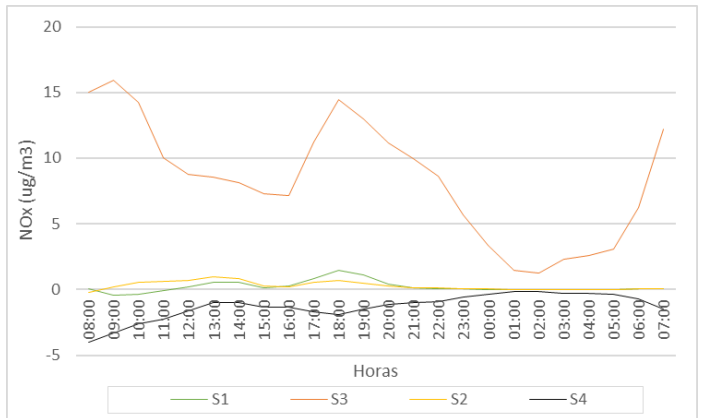
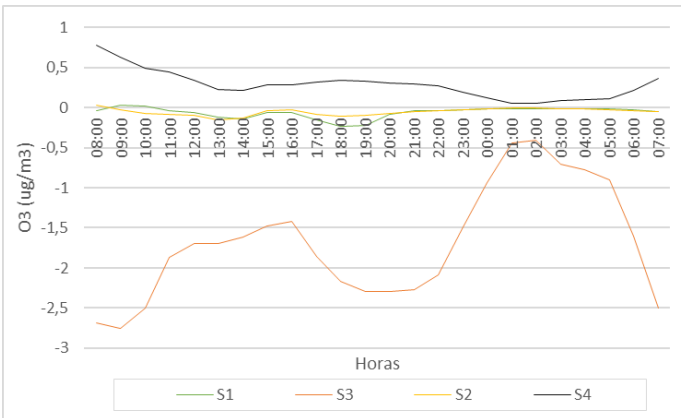
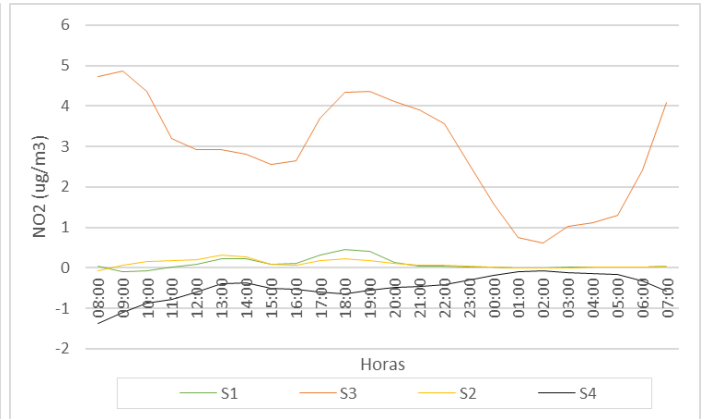
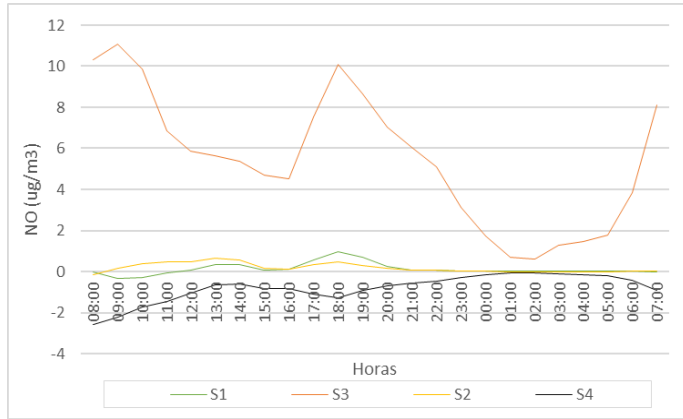
- Temperatura (°C) e Humidade relativa (%) do ar (z=1,5m)



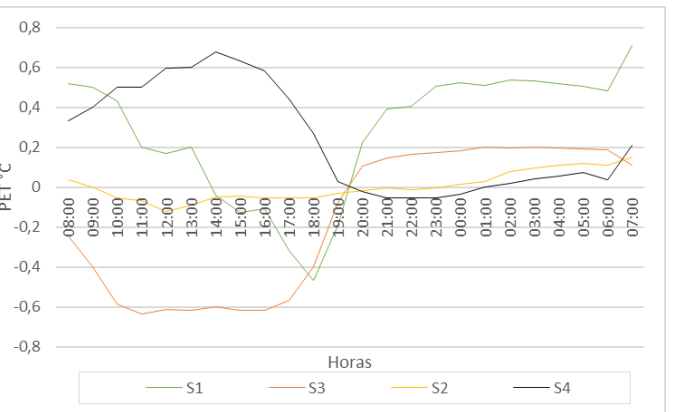
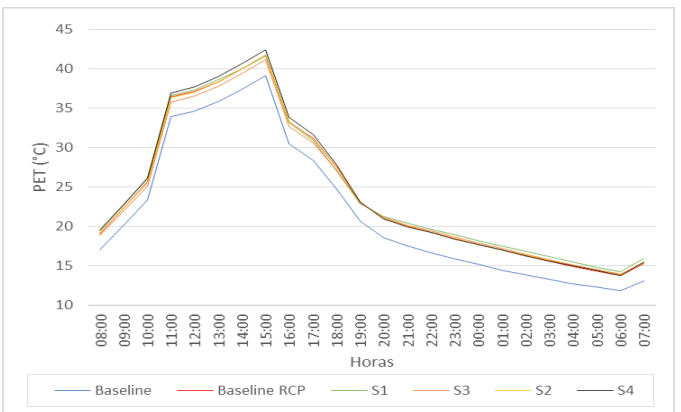
- Velocidade do vento (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



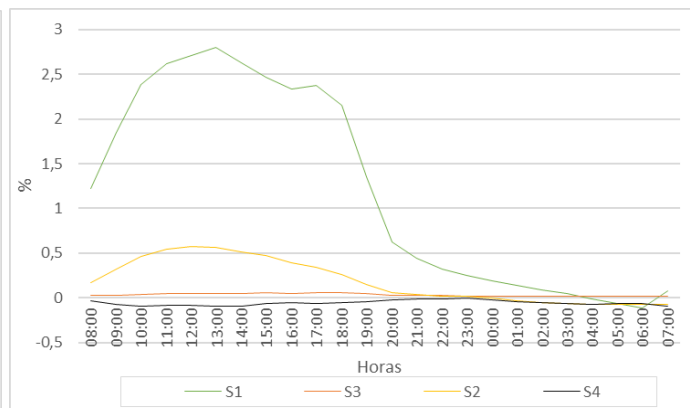
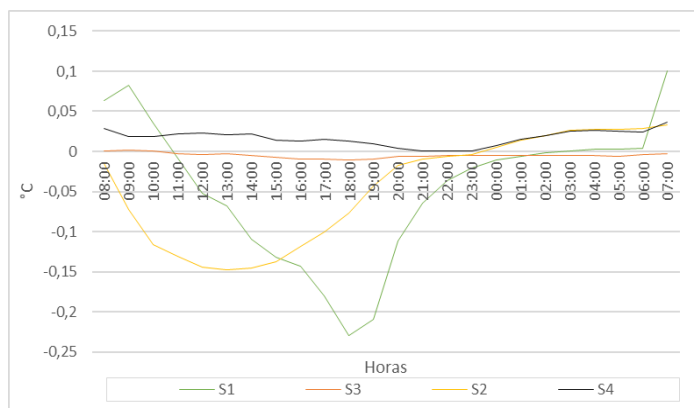
Grid 110_92- Rua de São Francisco

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

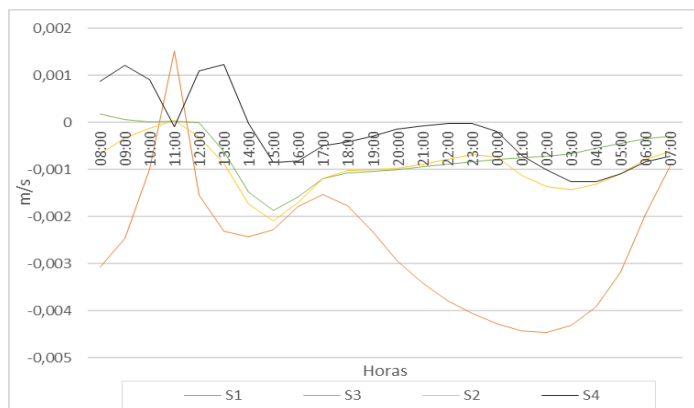
	Temperatura (°C)	Humidade de relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão atual	20,773	70,241	0,037	55,634	38,898	94,532	41,856	24,289	11,276	24,429
Baseline verão futuro	23,122	68,449	0,035	55,227	39,216	94,443	41,496	24,275	11,264	26,582
S1	23,076	69,654	0,032	55,322	39,299	94,622	41,434	24,287	11,274	27,241
S2	23,076	68,634	0,034	55,363	39,289	94,653	41,452	24,289	11,276	26,620
S3	23,117	68,482	0,034	55,174	39,296	94,470	41,391	24,275	11,265	26,548
S4	23,139	68,392	0,035	55,076	39,119	94,195	41,549	24,260	11,252	26,927

Diferenças entre cenários na:

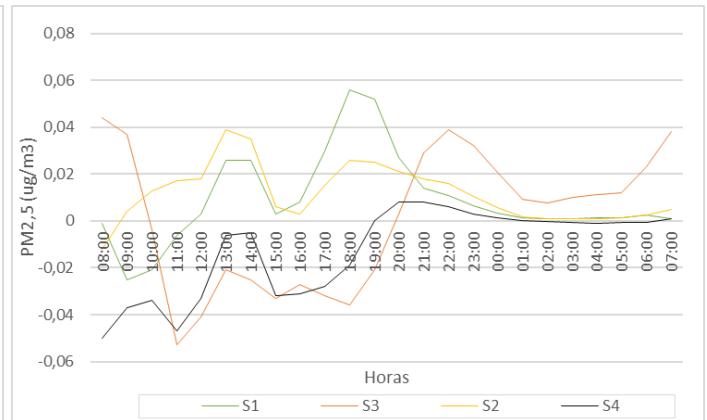
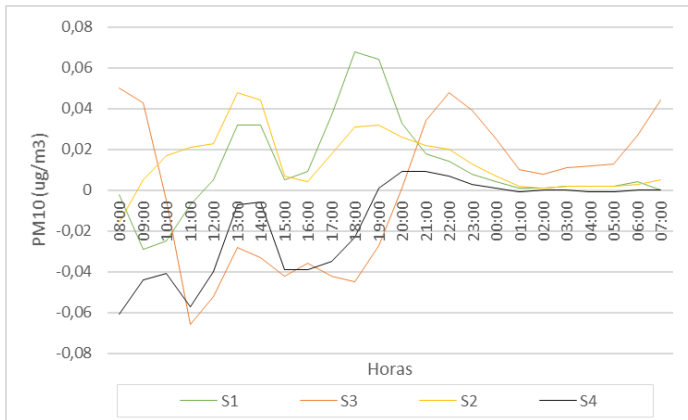
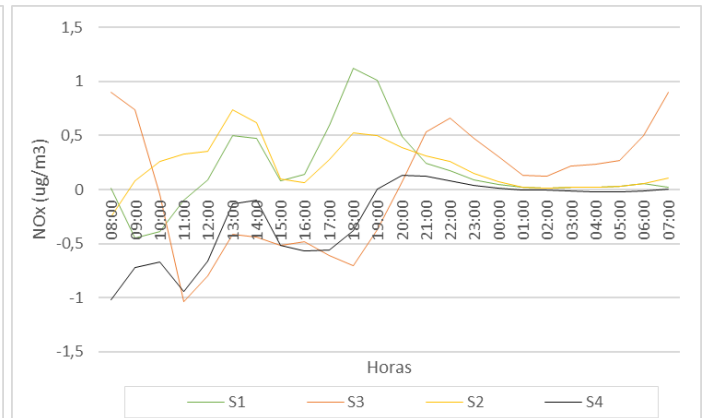
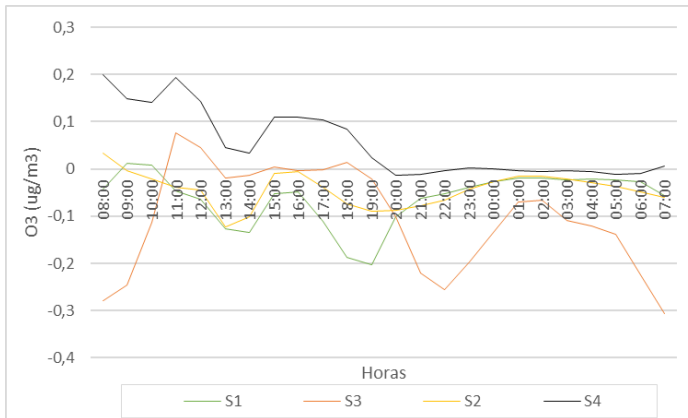
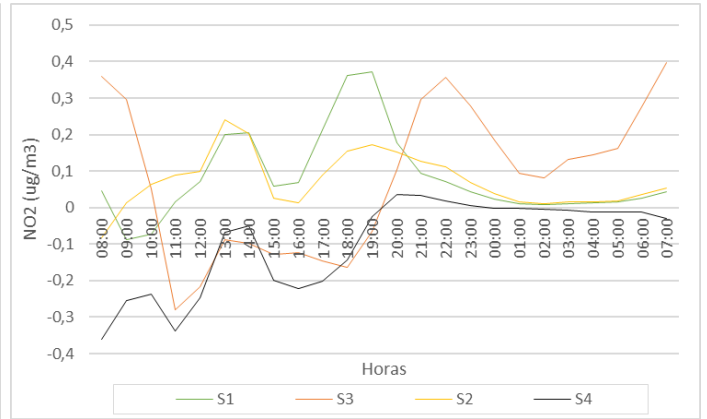
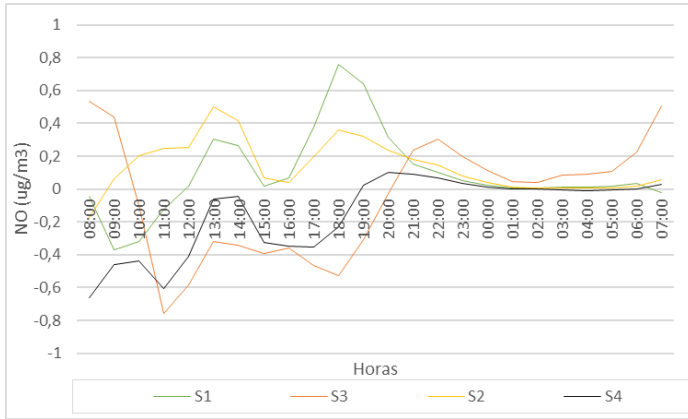
- Temperatura (°C) e Humidade relativa (%) do ar (z=1,5m)



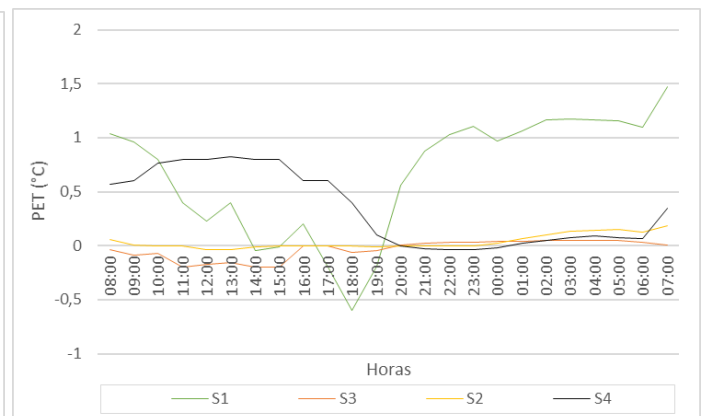
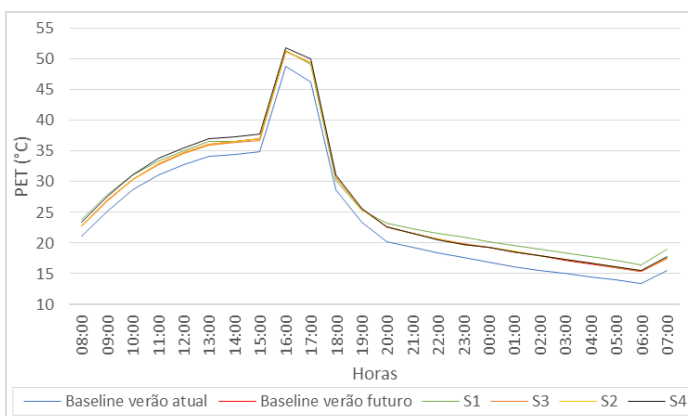
- Velocidade do vento (z=1,5)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



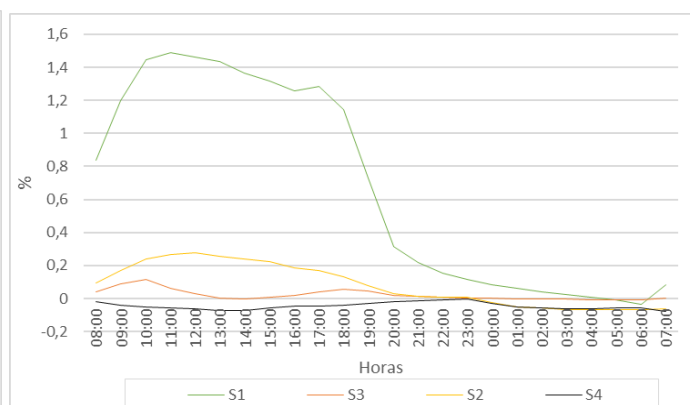
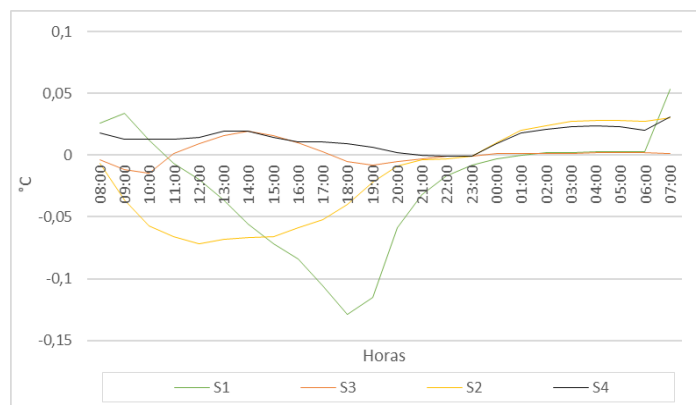
Grid 93_104 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

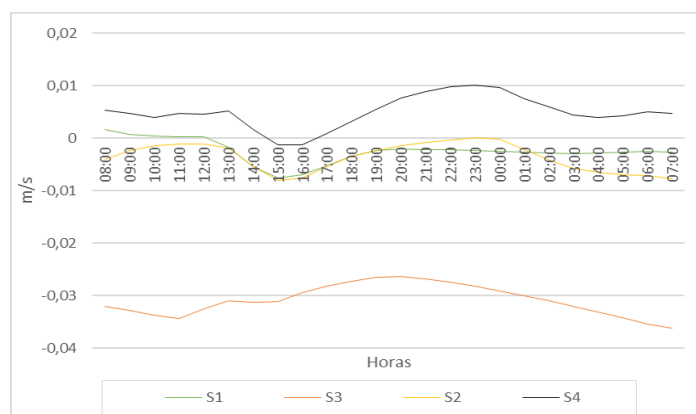
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão atual	20,771	70,280	0,718	72,254	72,254	114,856	41,795	25,693	12,272	21,452
Baseline verão futuro	23,126	68,450	0,718	71,688	42,879	114,566	41,437	25,666	12,389	23,899
S1	23,101	69,117	0,687	71,773	42,952	114,724	41,388	25,676	12,397	24,139
S2	23,108	68,530	0,714	71,800	42,950	114,750	41,392	25,678	12,399	23,925
S3	23,128	68,471	0,714	73,043	43,443	116,487	41,175	25,791	12,492	23,965
S4	23,140	68,405	0,723	71,462	42,773	114,235	41,487	25,645	12,372	24,163

Diferenças entre cenários na:

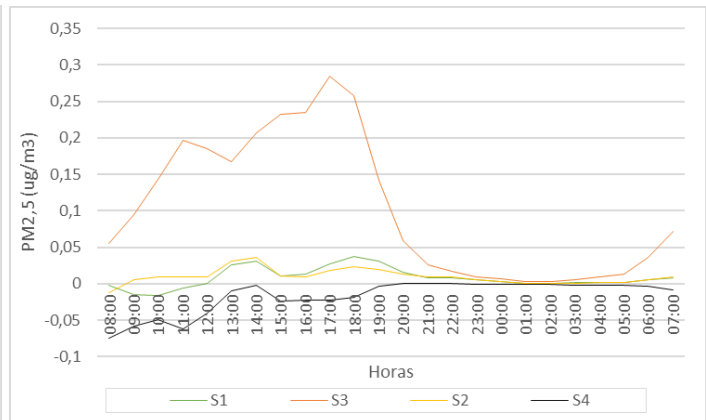
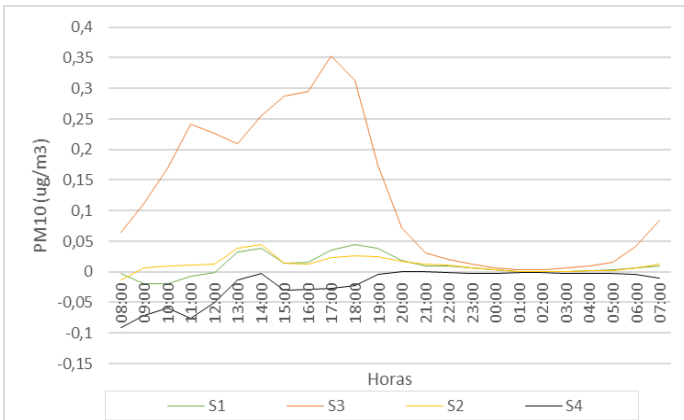
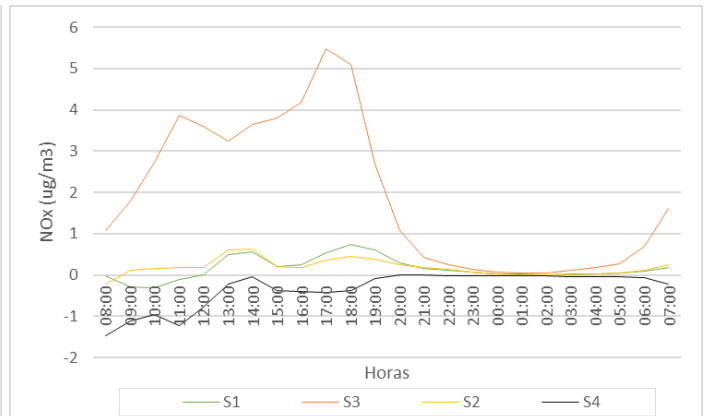
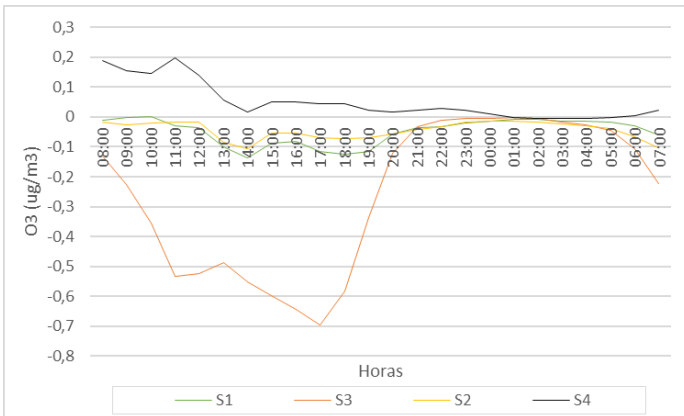
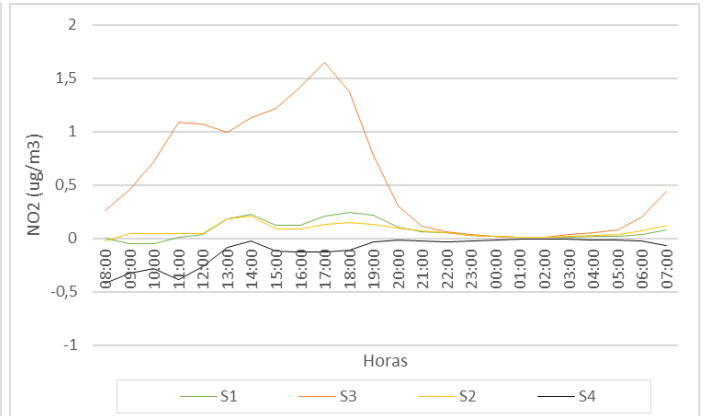
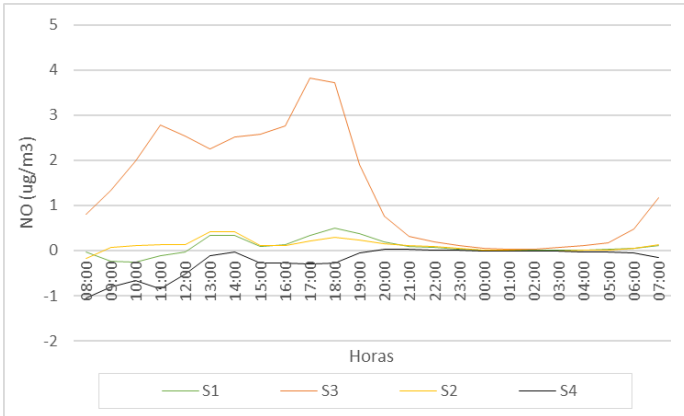
- Temperatura (°C) e Humidade relativa (%) do ar (z=1,5m)



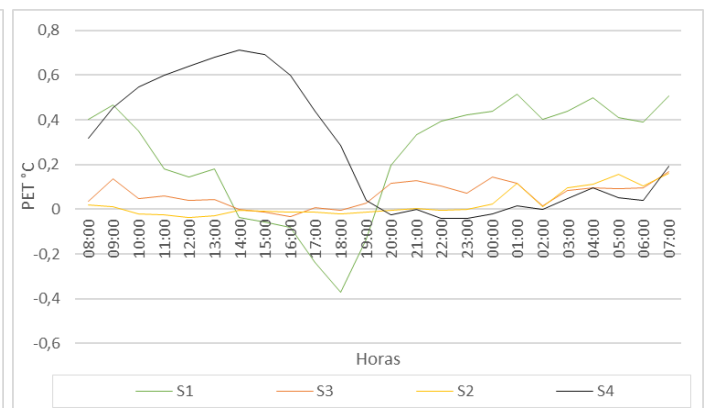
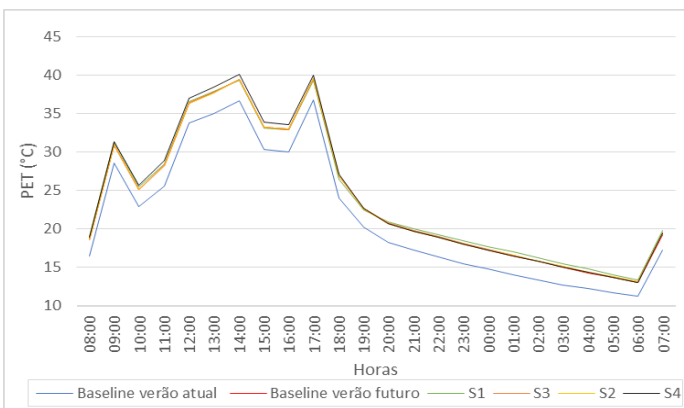
- Velocidade do Vento (z=1,5m)



• Concentração dos Poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



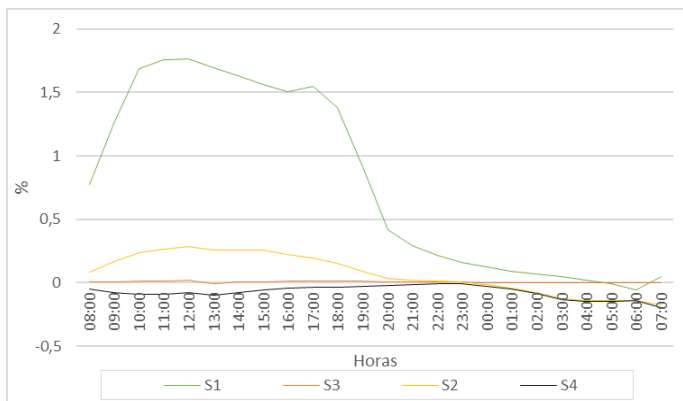
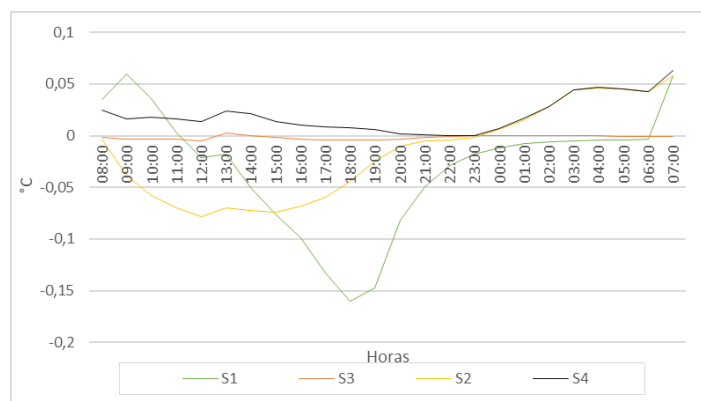
Grid 71_85- Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NOx (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline verão atual	20,768	70,337	0,578	58,861	38,250	97,110	42,835	24,481	11,431	21,394
Baseline verão futuro	23,126	68,495	0,563	58,801	38,728	97,530	42,397	24,501	11,448	23,828
S1	23,095	69,283	0,564	58,871	38,789	97,658	42,351	24,509	11,454	24,144
S2	23,110	68,566	0,559	58,911	38,786	97,696	42,360	24,512	11,456	23,863
S3	23,124	68,502	0,559	58,881	38,772	97,652	42,372	24,509	11,454	23,767
S4	23,146	68,422	0,570	58,170	38,397	96,566	42,573	24,439	11,397	24,102

Diferenças entre cenários na:

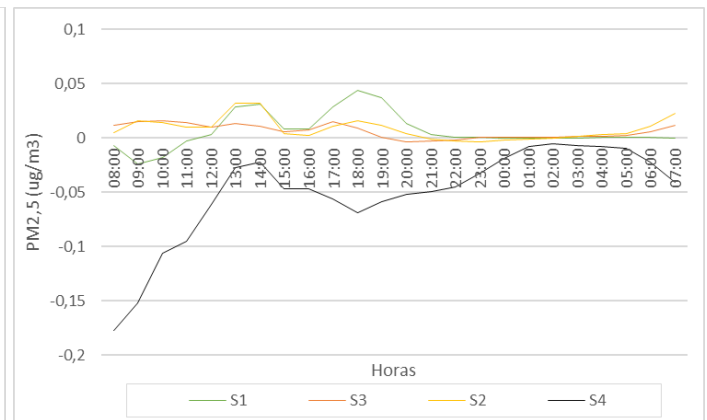
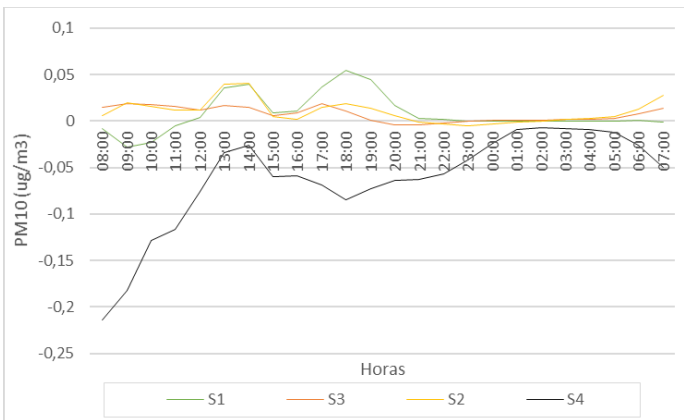
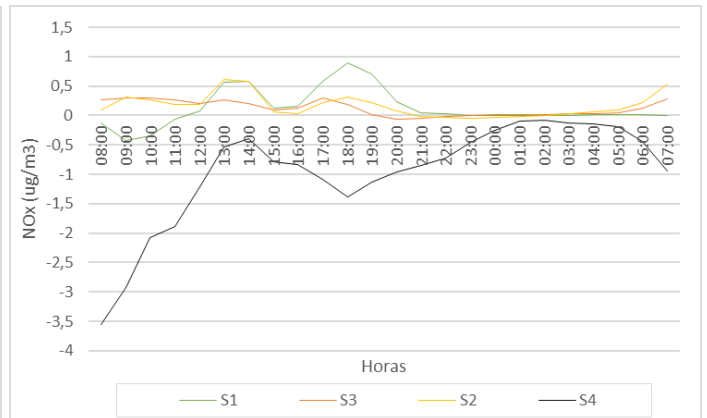
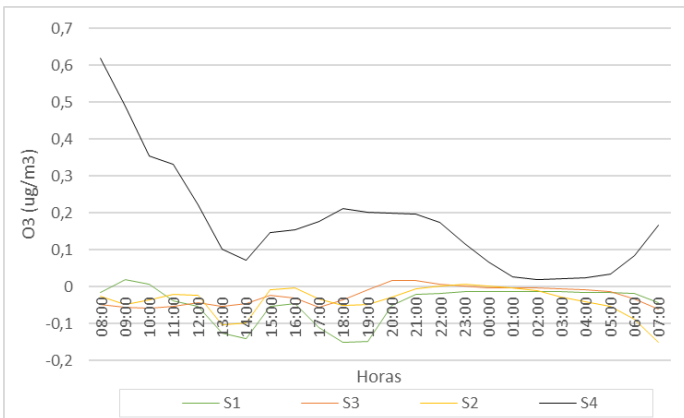
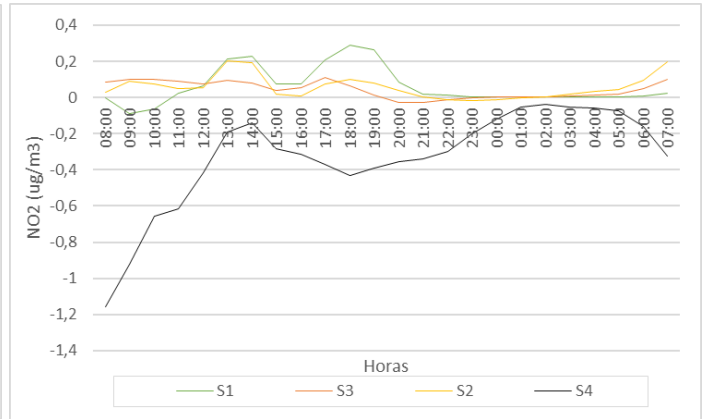
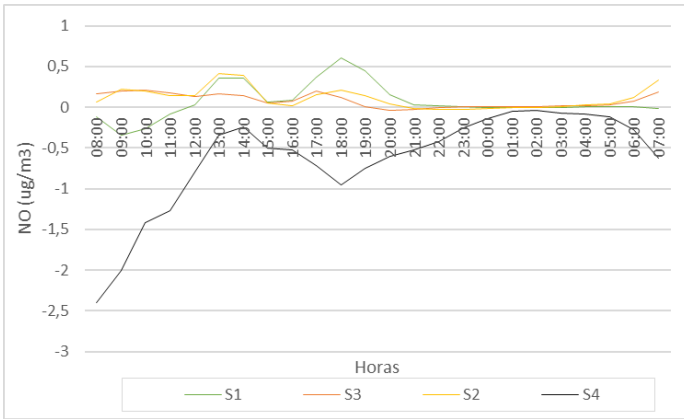
- Temperatura (°C) e Humidade relativa (%) do ar (z=1,5m)



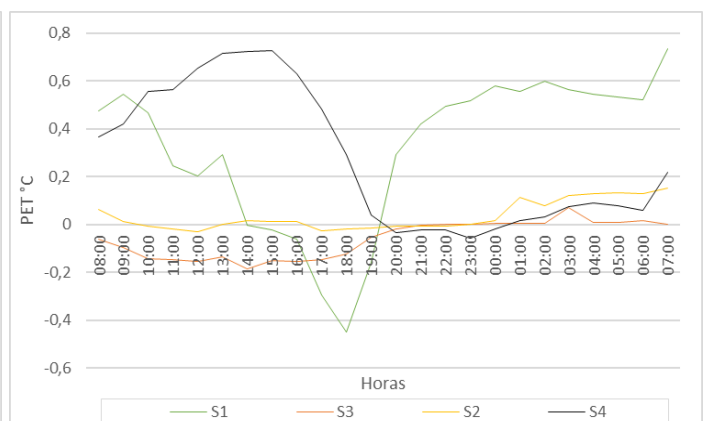
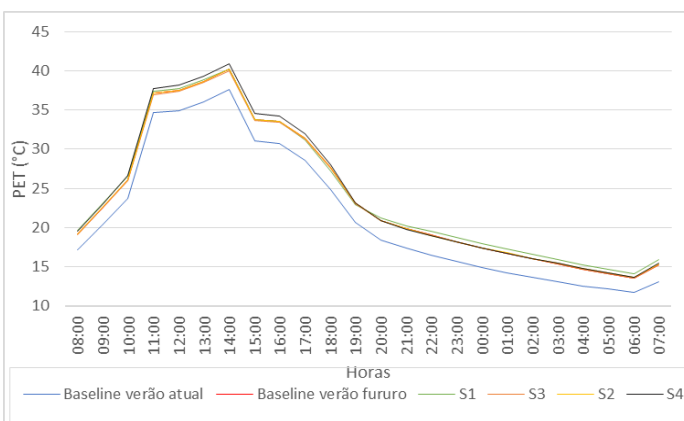
- Velocidade do vento (z=1,5m)



● Concentração de poluentes (z=1,5m)



● PET (°C) (z=1,5m)

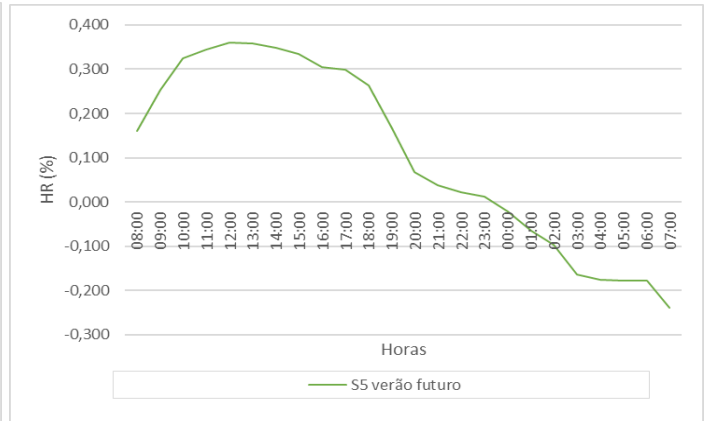
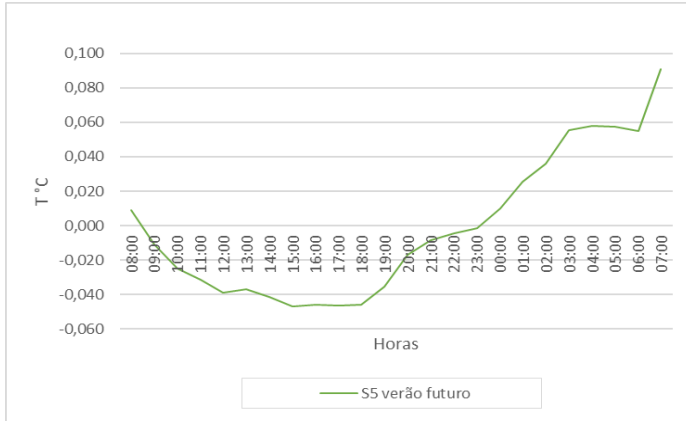


Anexo 9

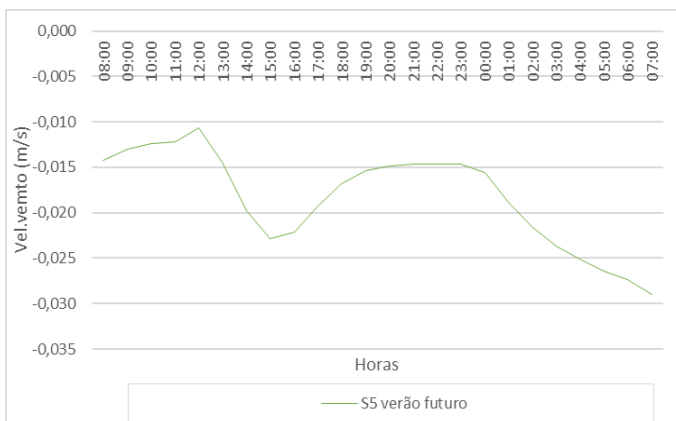
S5 (Cenário Misto) verão futuro vs Baseline verão futuro

Diferenças dos resultados das médias espaciais a 1,5m de altura na área de estudo entre cenários na:

- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)

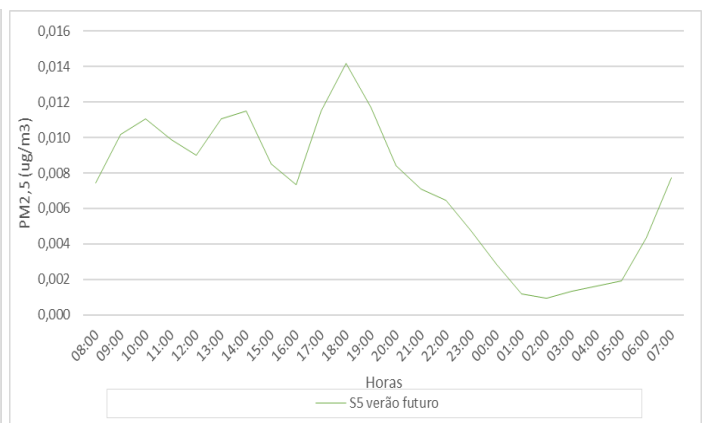
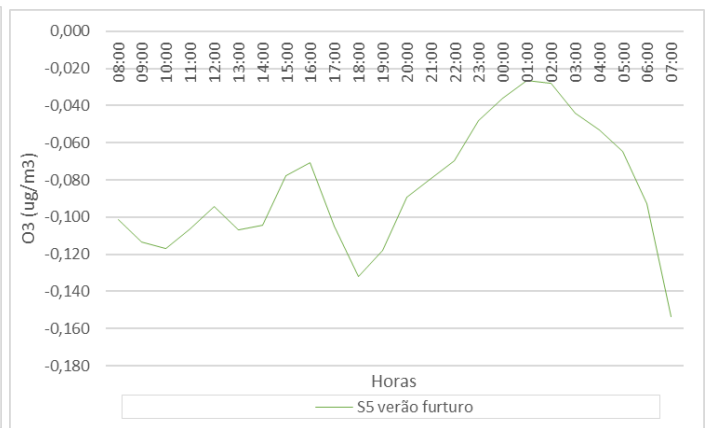
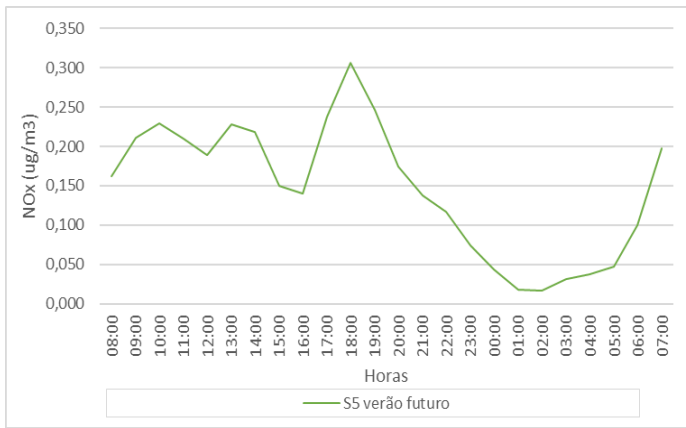


- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)

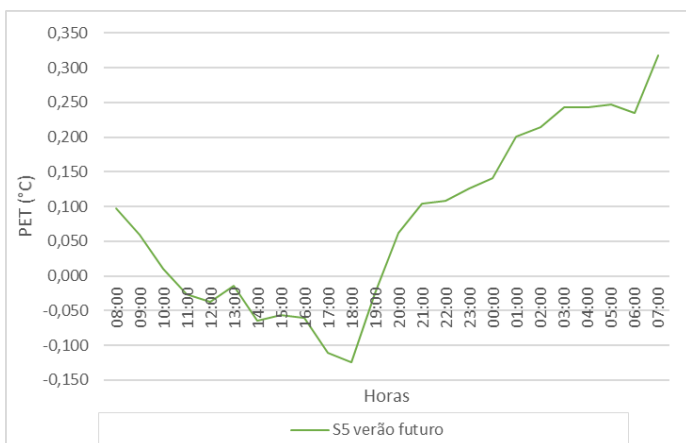


- Concentração de Poluentes (z=1,5m)





• PET (°C) (z=1,5m)



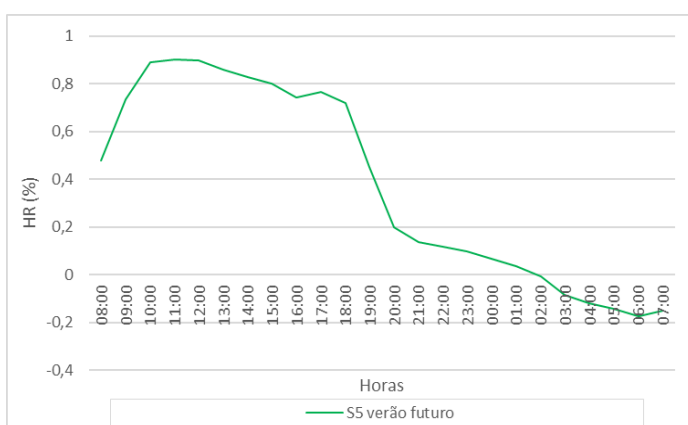
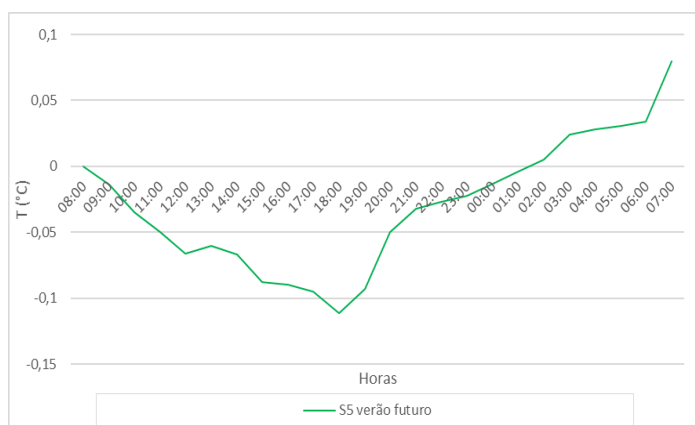
Grid - 25_48 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias da Grid 25_48 (z=1,5m)

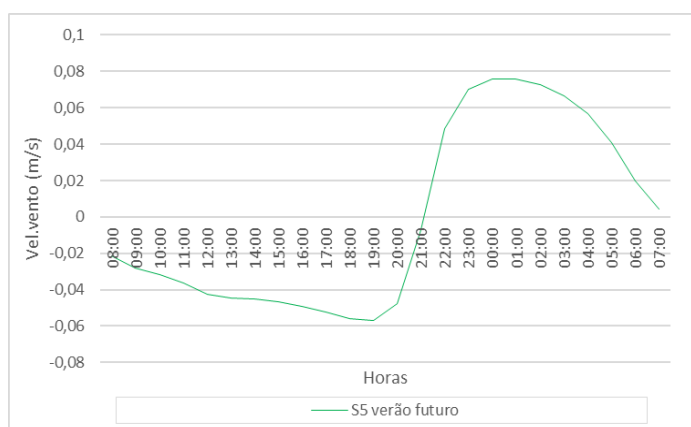
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NO _x (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET(°C)
Baseline verão futuro	23,172	68,286	0,177	68,472	43,073	111,544	40,399	25,451	12,220	26,838
S5 verão futuro	23,142	68,663	0,176	70,418	44,144	114,562	39,753	25,640	12,375	27,121

Diferenças entre cenários na:

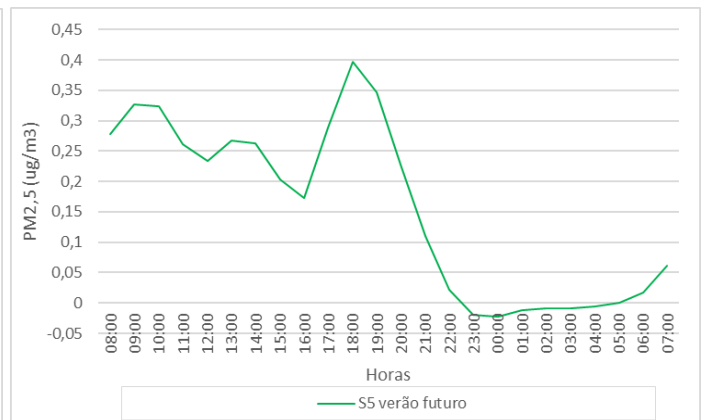
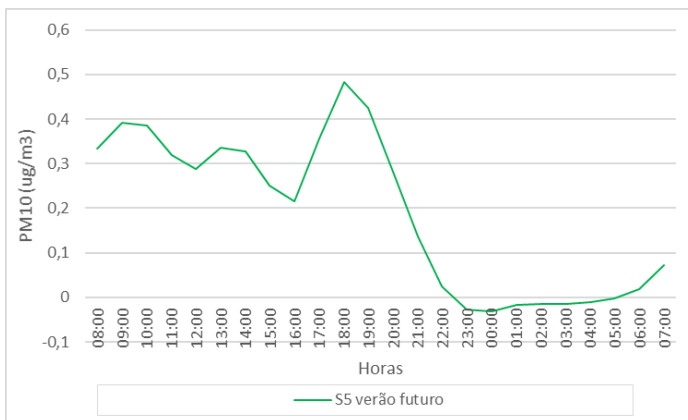
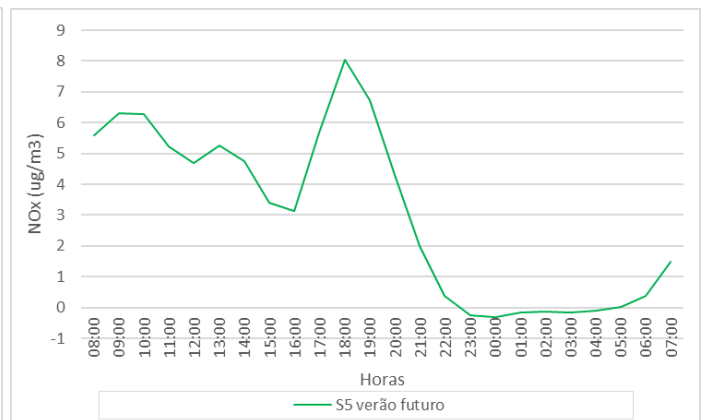
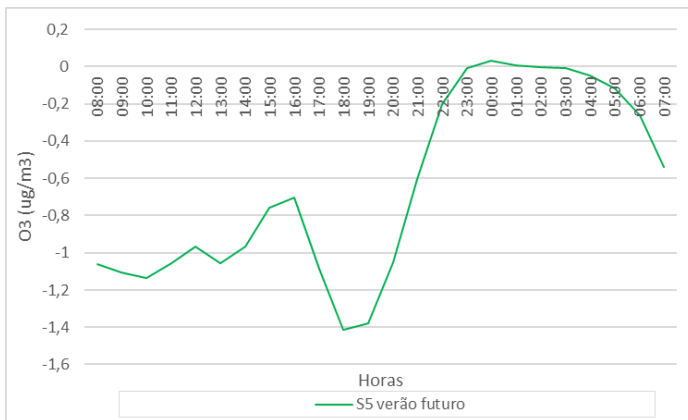
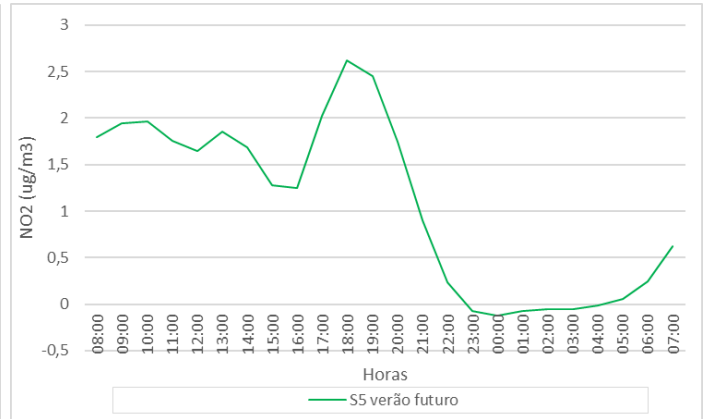
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



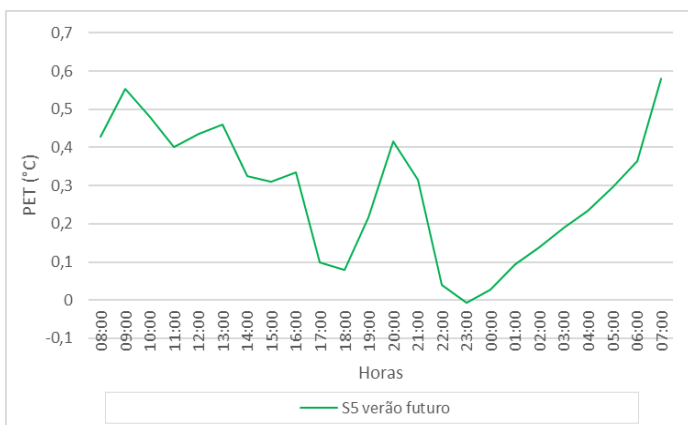
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5)



• PET (°C) (z=1,5m)



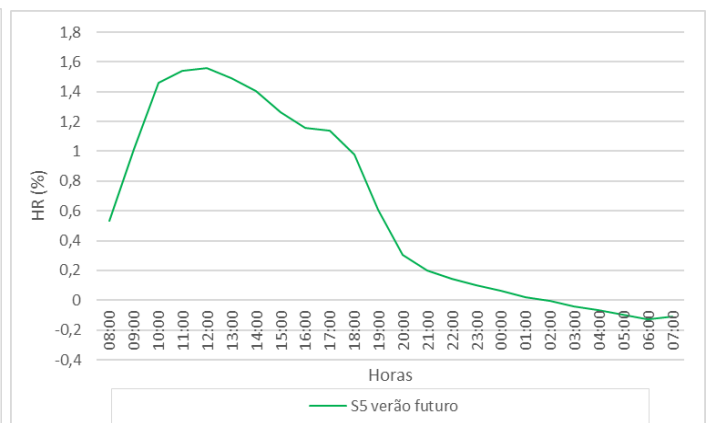
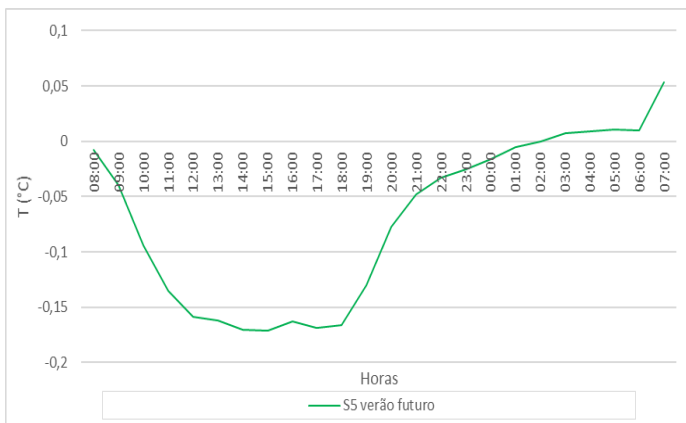
Grid - 106_71 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

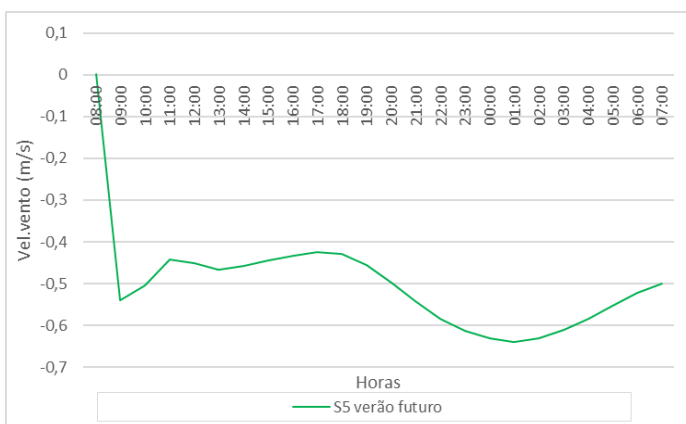
	Temperatura(°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento(m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NOx (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline verão futuro	23,087	68,454	0,524	51,588	38,417	90,005	41,648	23,972	11,018	24,144
S5 verão futuro	23,017	69,060	0,522	52,221	38,883	91,103	41,328	24,042	11,075	24,288

Diferenças entre cenários na:

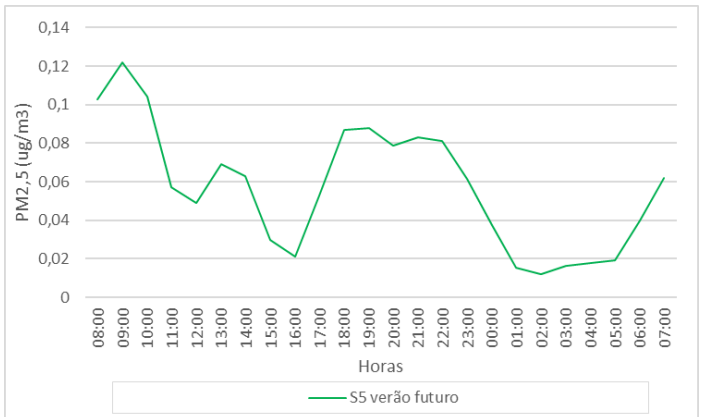
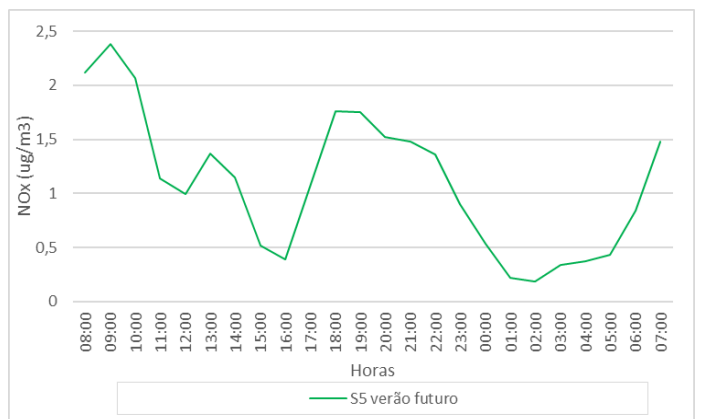
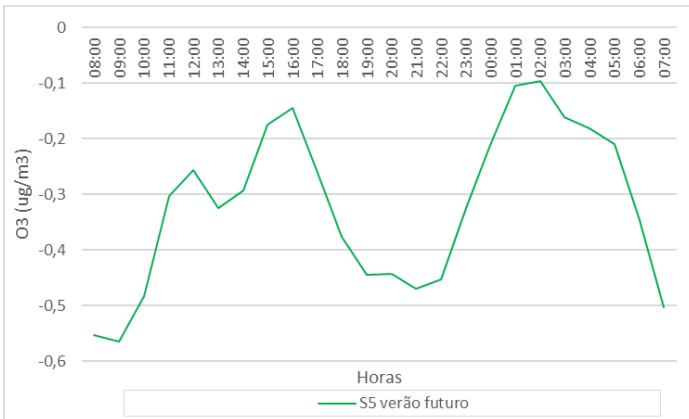
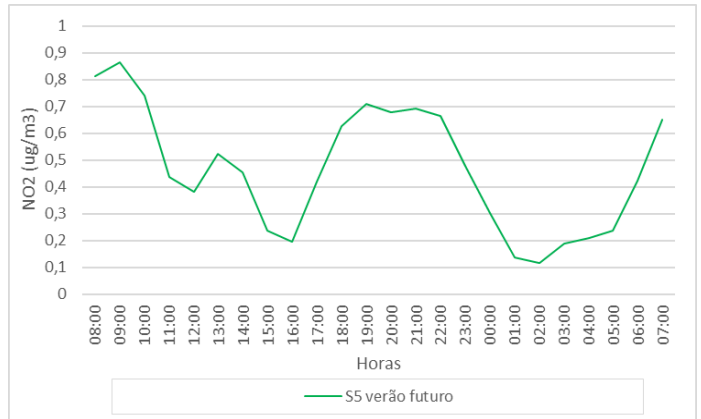
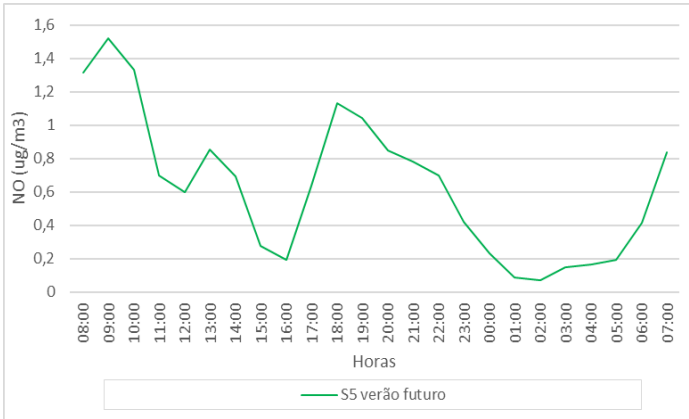
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



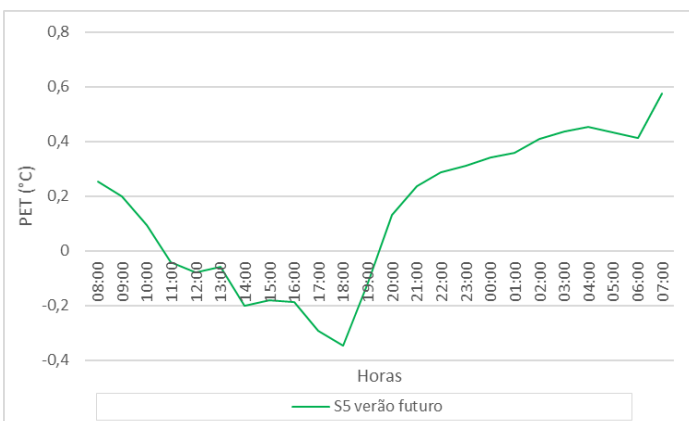
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



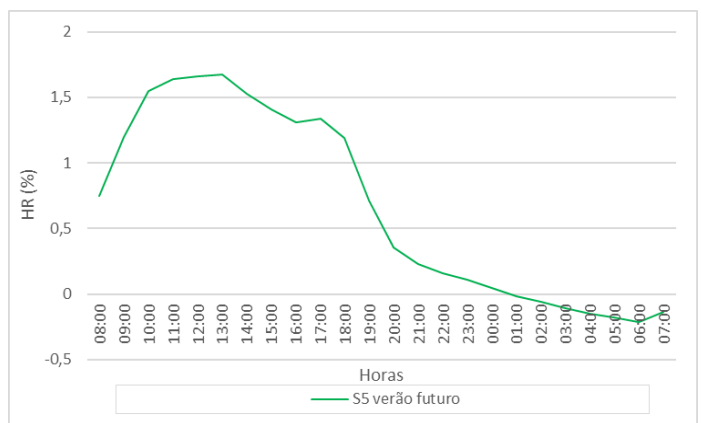
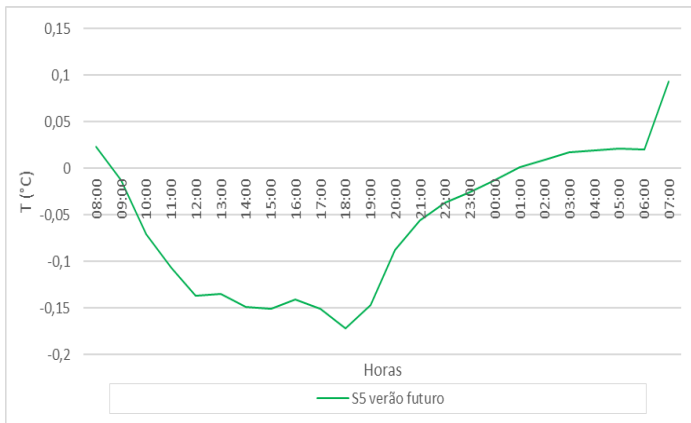
Grid – 110_92 Rua de São Francisco

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

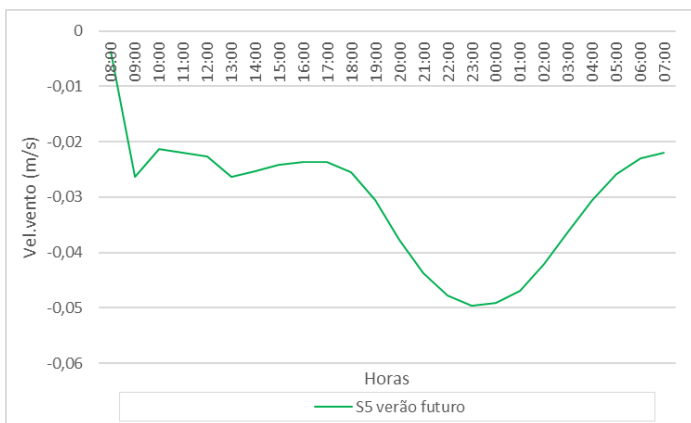
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão futuro	23,122	68,449	0,035	55,227	39,216	94,443	41,496	24,275	11,264	26,582
S5 verão futuro	23,064	69,115	0,032	55,289	39,376	94,664	41,333	24,288	11,275	27,000

Diferenças entre cenários na:

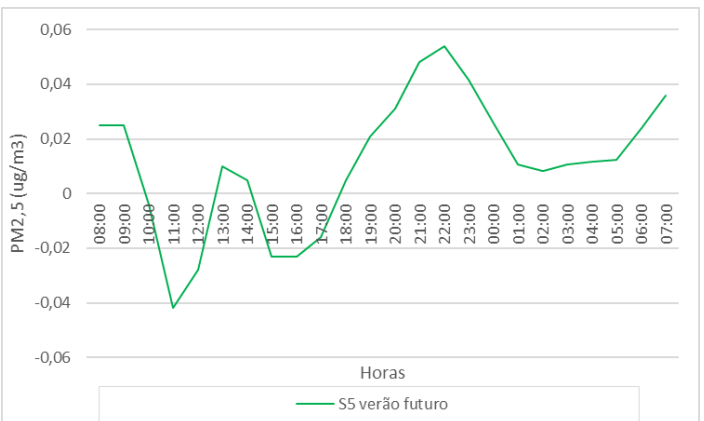
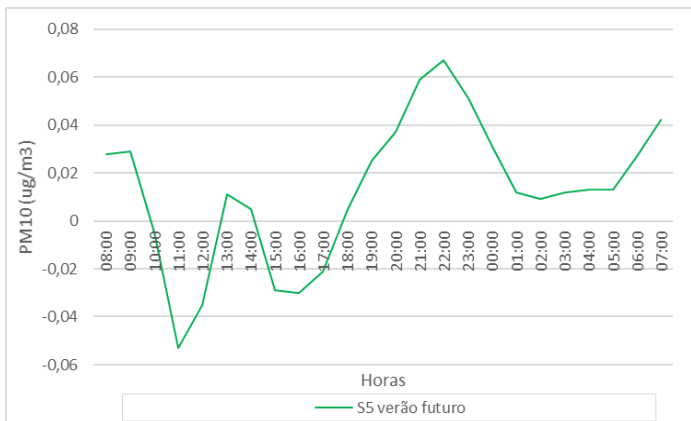
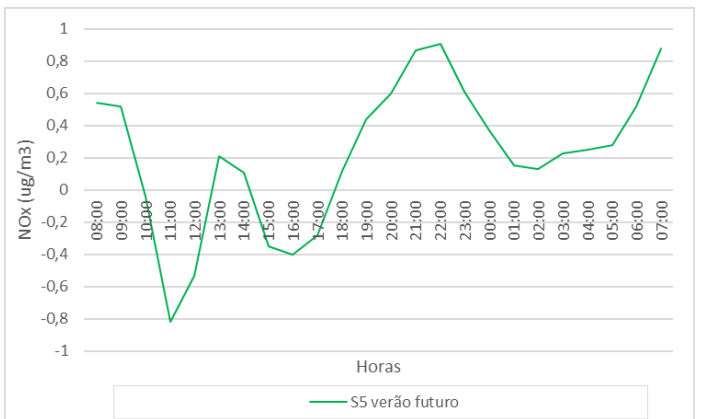
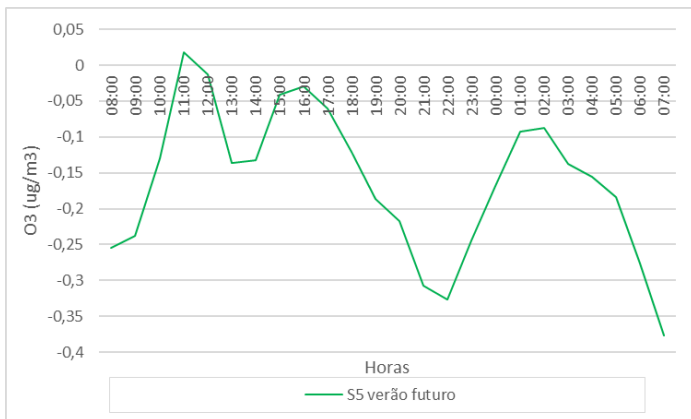
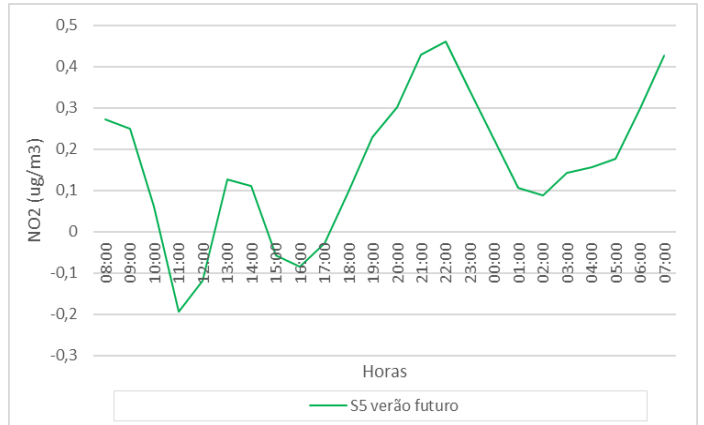
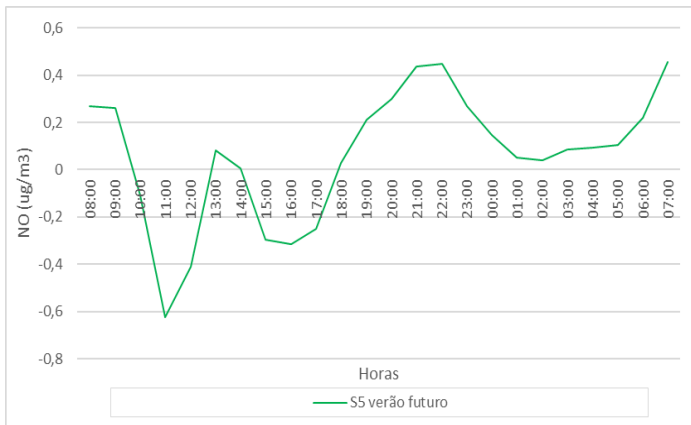
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



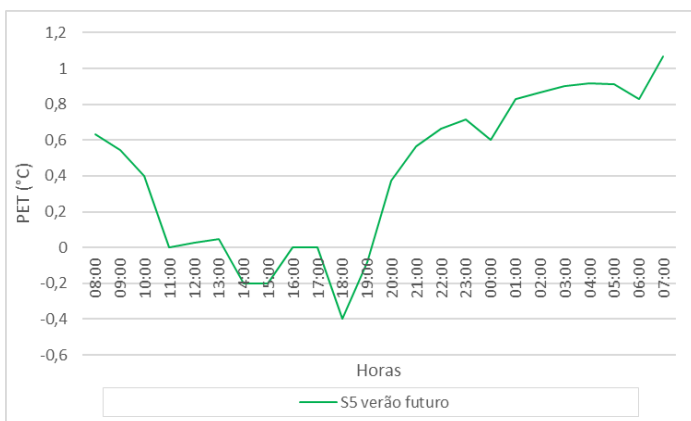
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



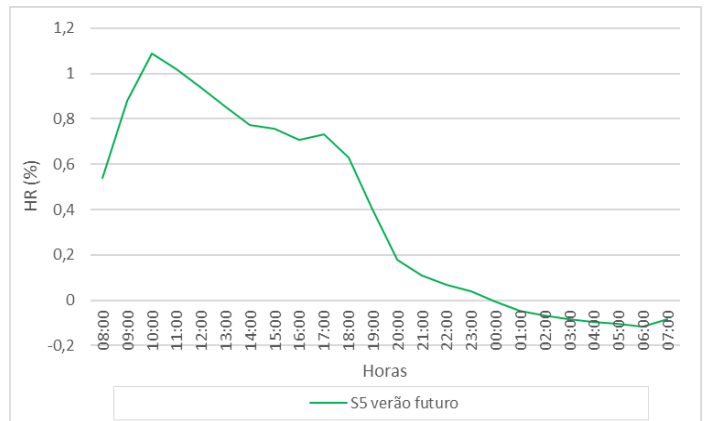
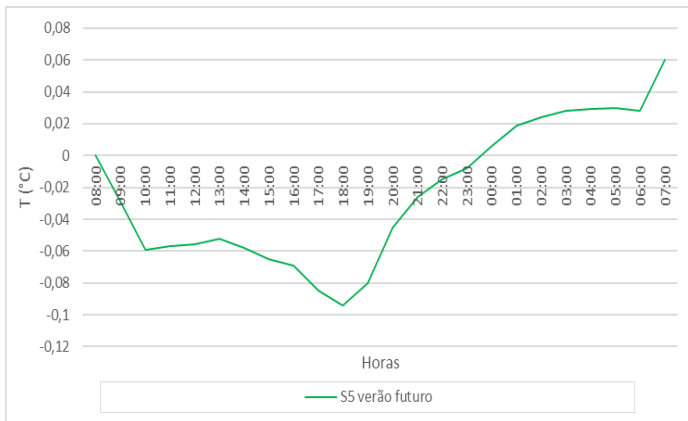
Grid 93_104 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

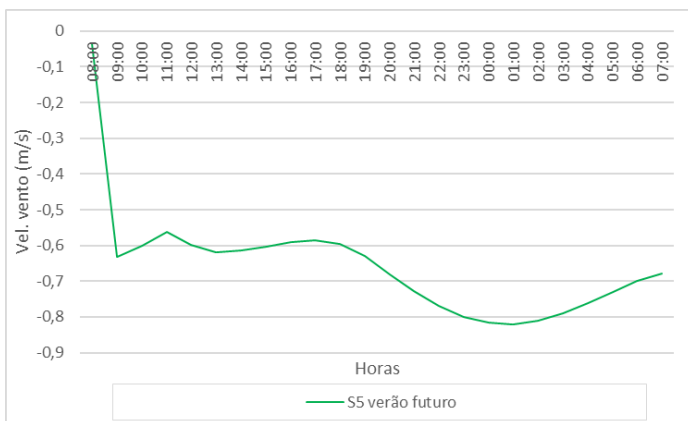
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão futuro	23,126	68,450	0,718	71,688	42,879	114,566	41,437	25,666	12,389	23,899
S5 verão futuro	23,102	68,829	0,682	73,184	43,542	116,727	41,110	25,807	12,504	24,152

Diferenças entre cenários na:

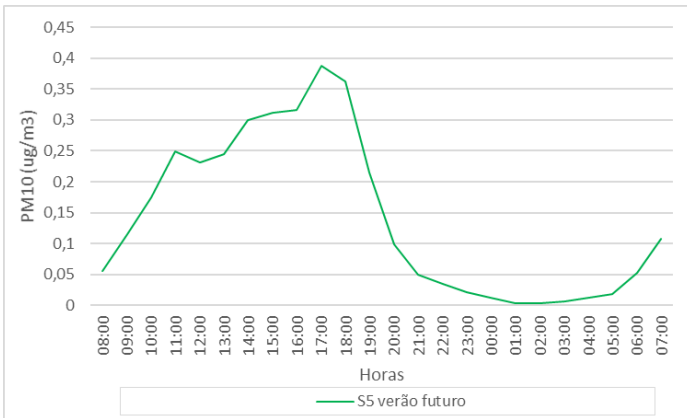
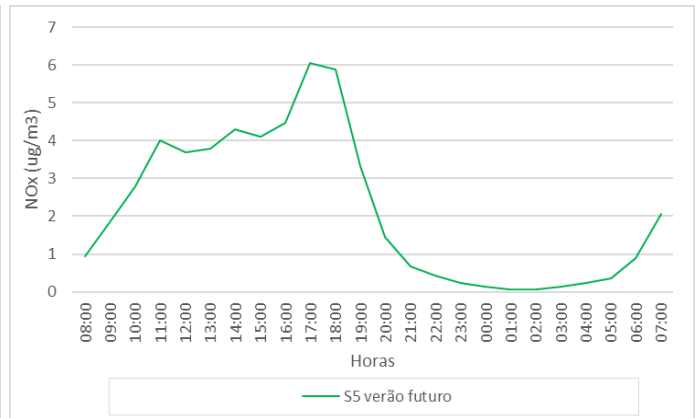
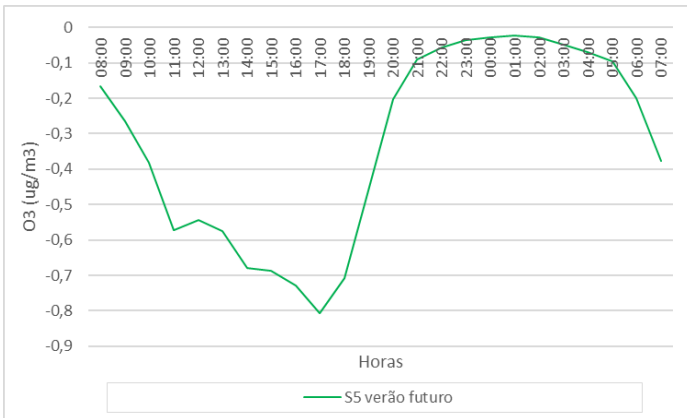
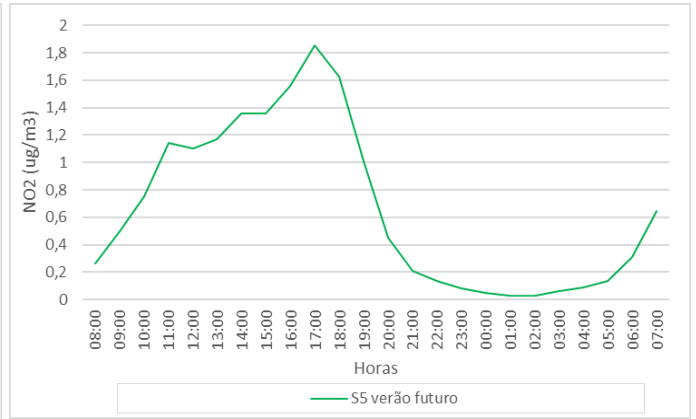
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



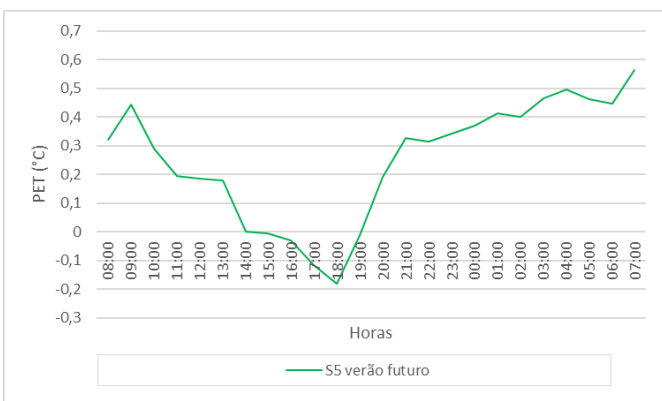
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



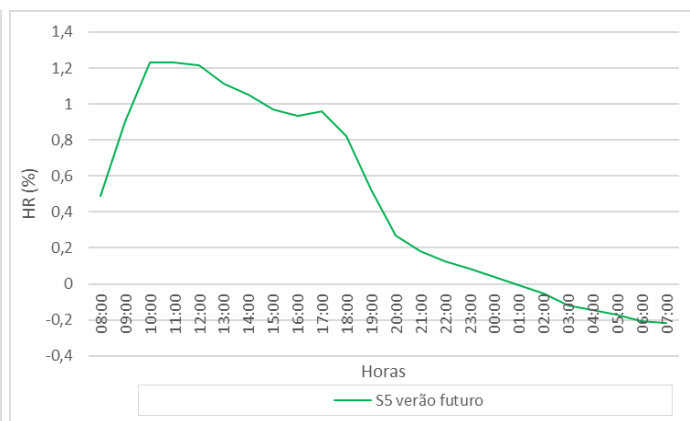
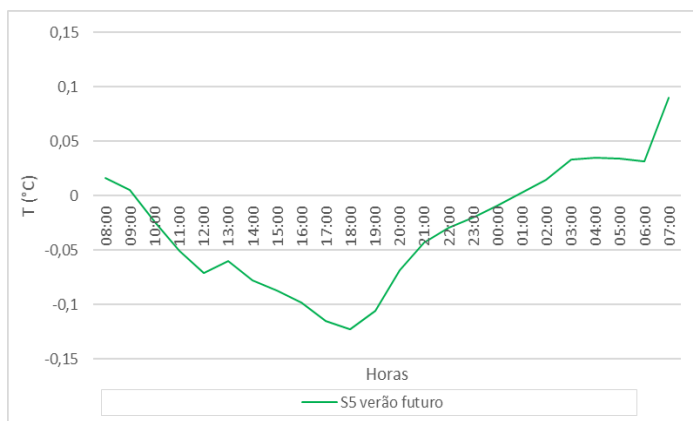
Grid 71_85 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

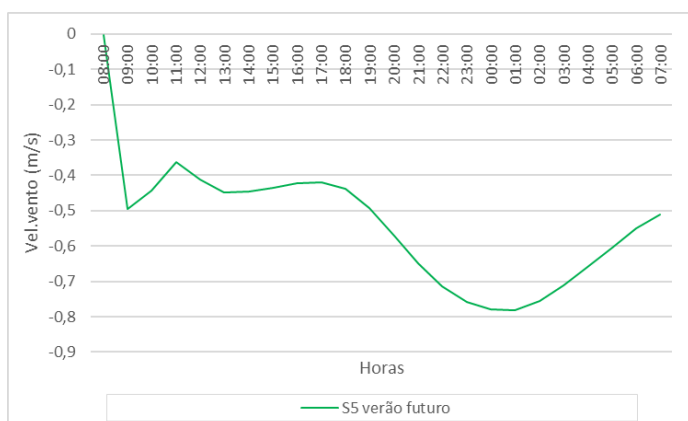
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline verão futuro	23,126	68,495	0,563	58,801	38,728	97,530	42,397	24,501	11,448	23,828
S5 verão futuro	23,096	68,963	0,558	58,991	38,846	97,836	42,317	24,520	11,463	24,020

Diferenças entre cenários na:

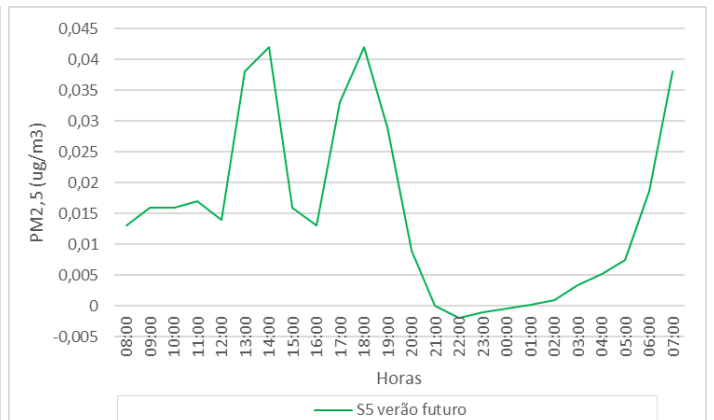
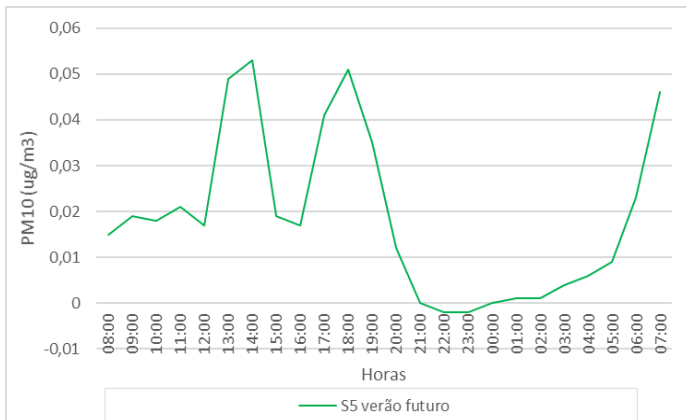
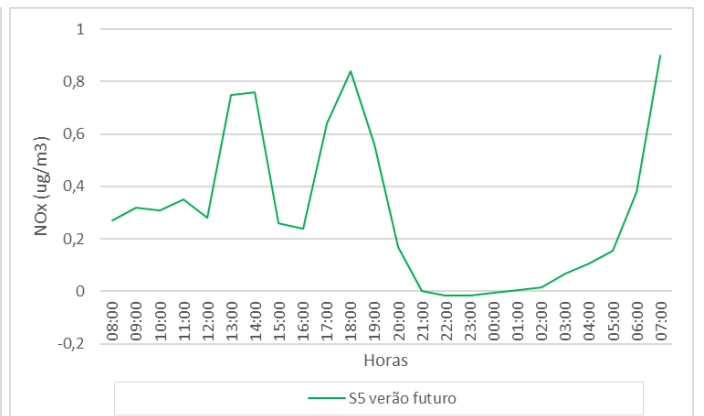
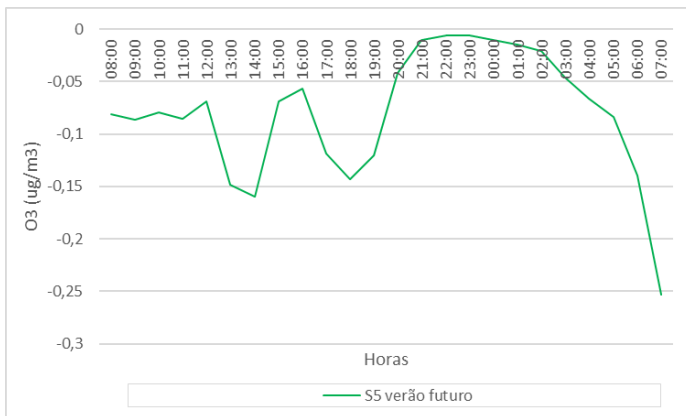
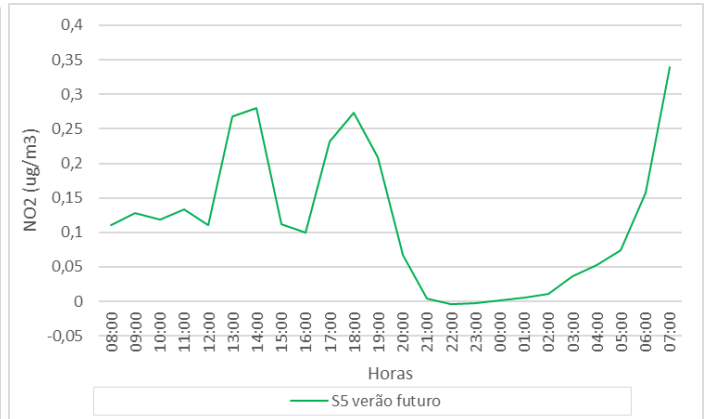
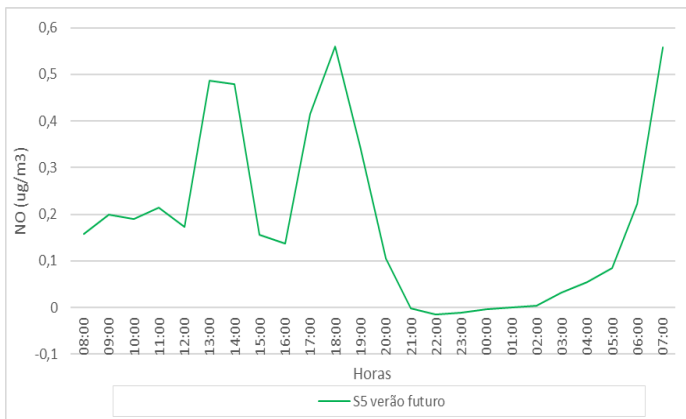
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



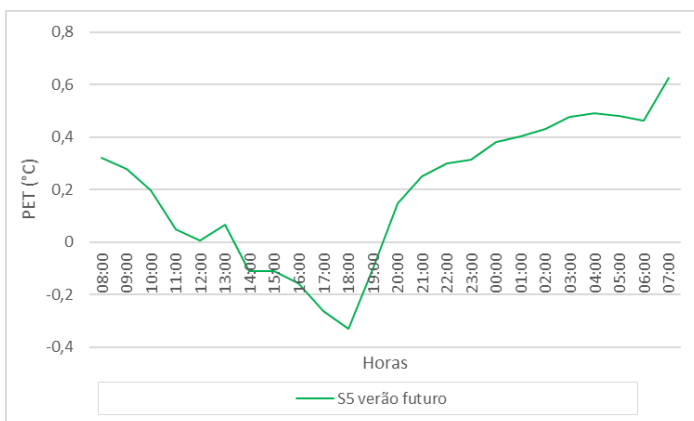
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



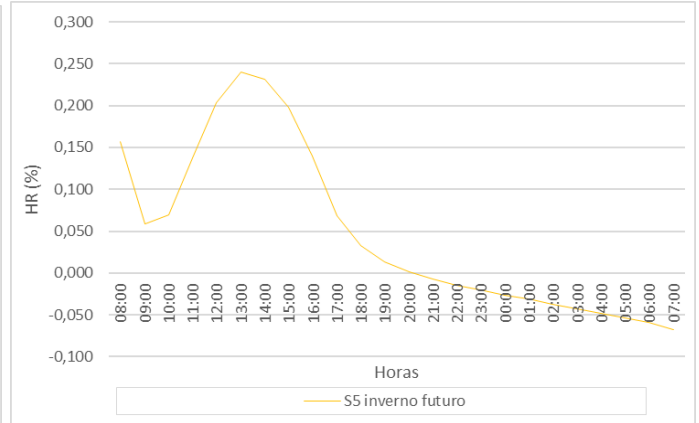
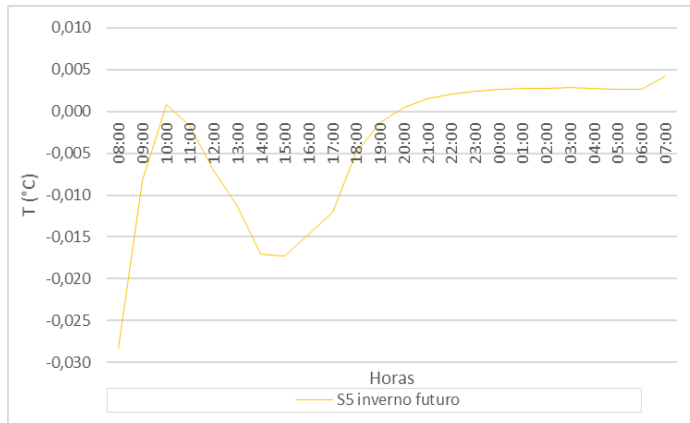
- PET (°C) (z=1,5m)



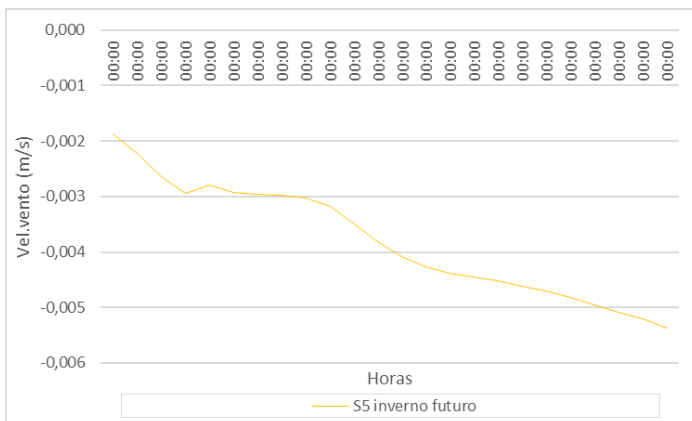
S5 inverno futuro vs Baseline inverno futuro

Diferenças dos resultados das médias espaciais a 1,5m de altura na área de estudo entre cenários na:

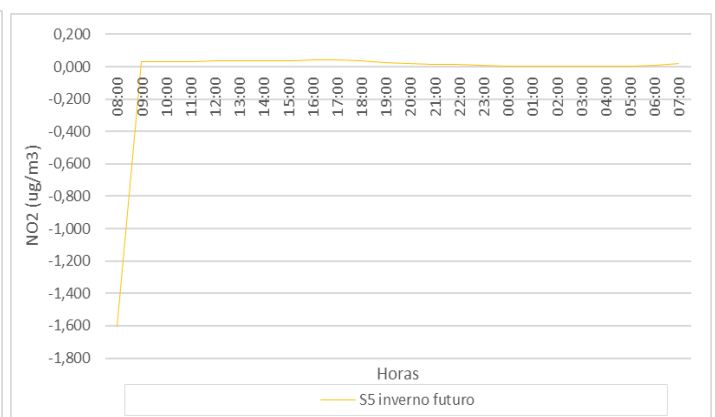
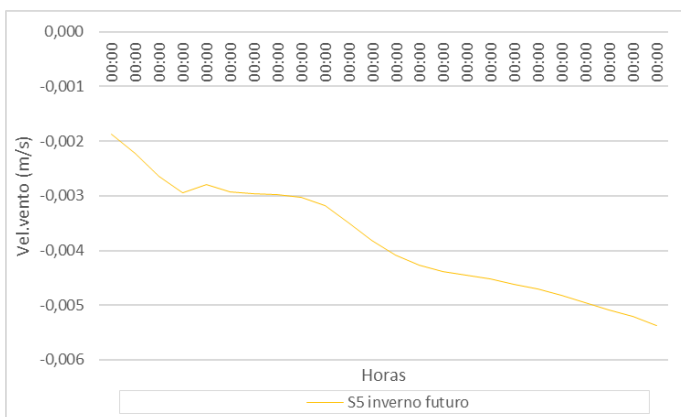
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)

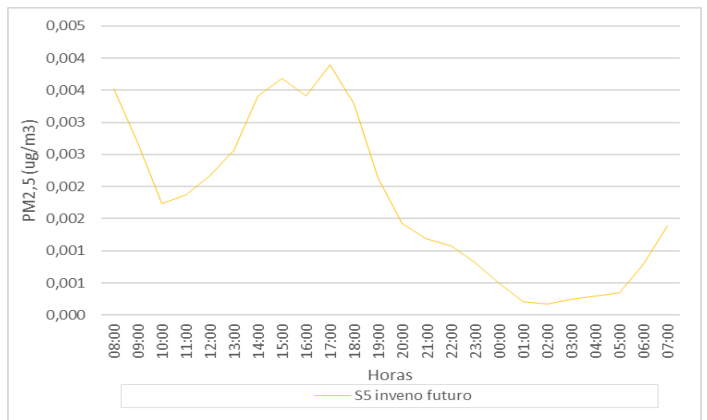
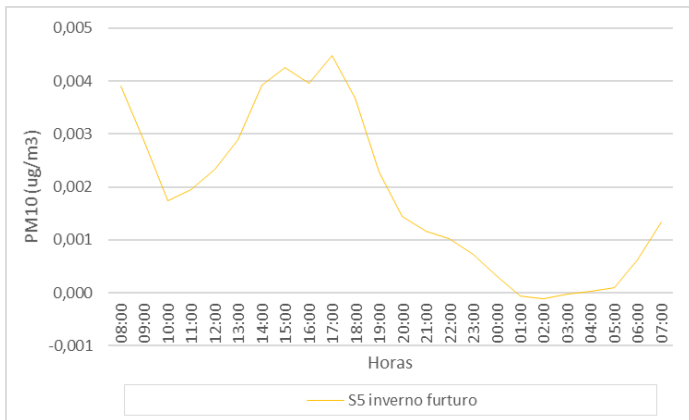
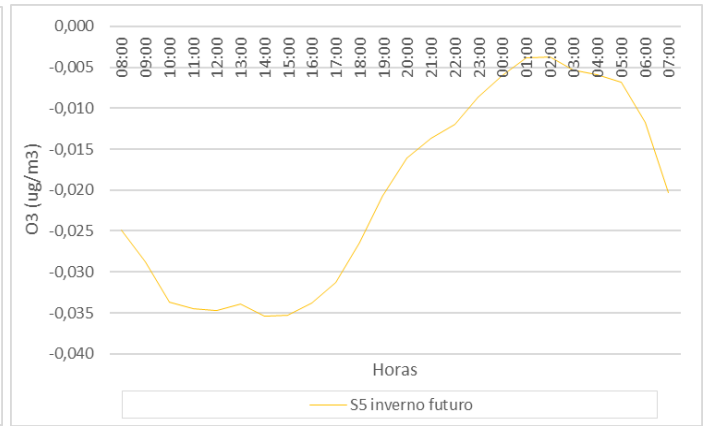
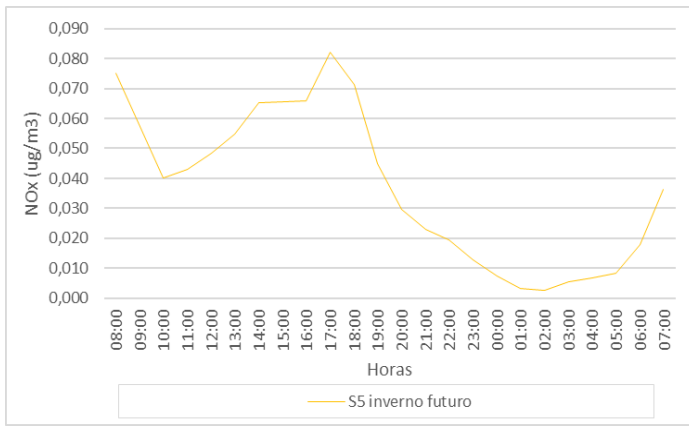


- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)

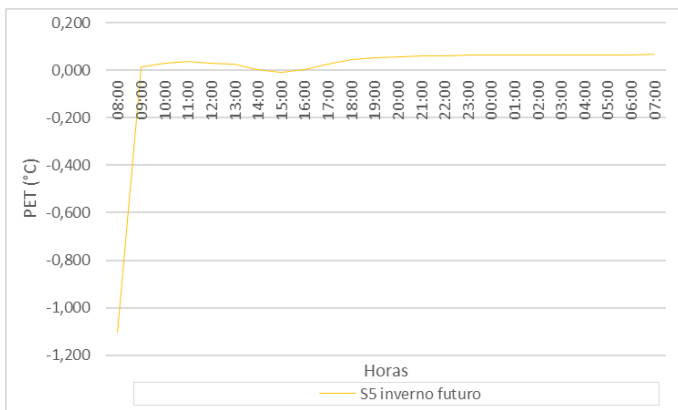


- Concentração de poluentes (z=1,5m)





- PET (°C) (z=1,5m)



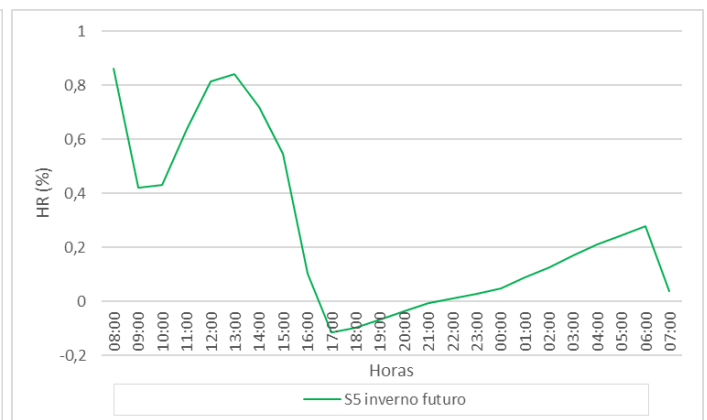
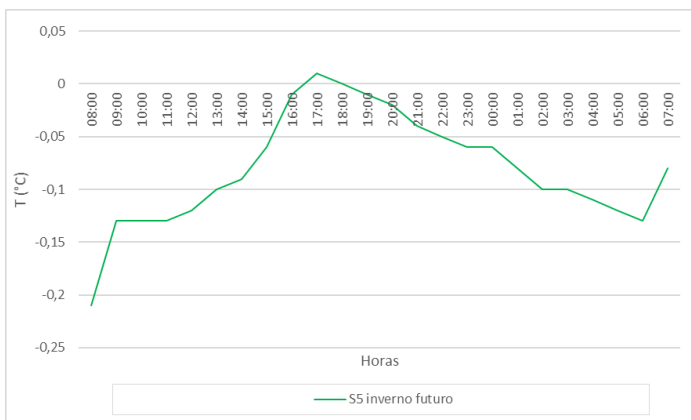
Grid - 25_48 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

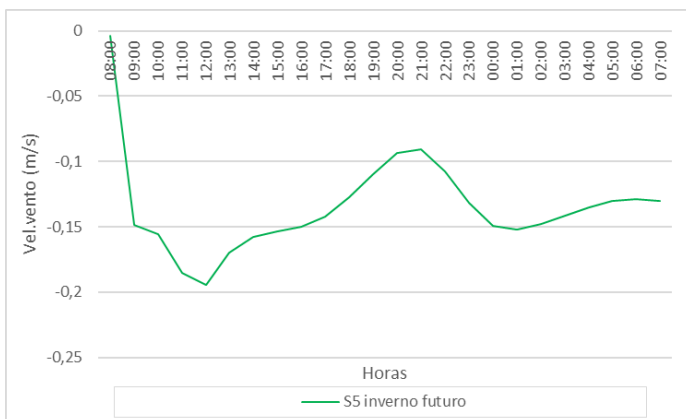
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,873	81,608	0,141	83,325	50,061	133,386	26,530	27,499	16,066	10,230
S5 inverno futuro	9,793	81,870	0,141	83,981	50,340	134,320	26,401	27,560	16,115	10,362

Diferenças entre cenários na:

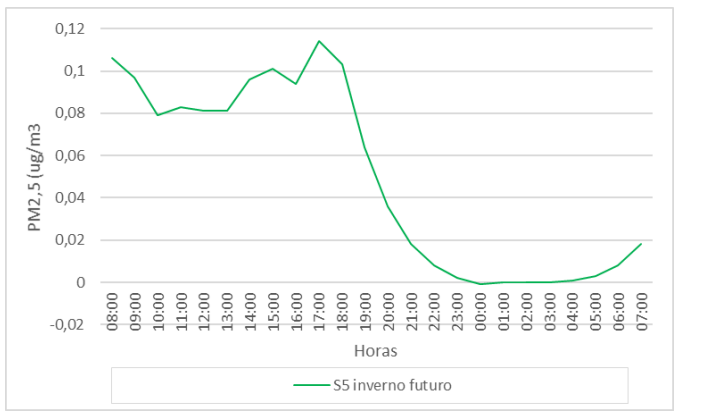
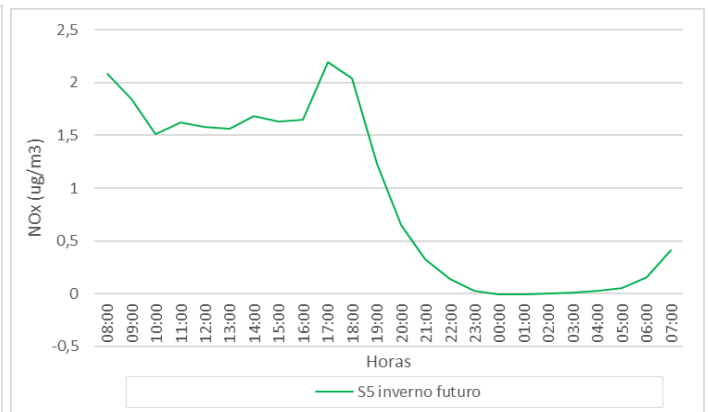
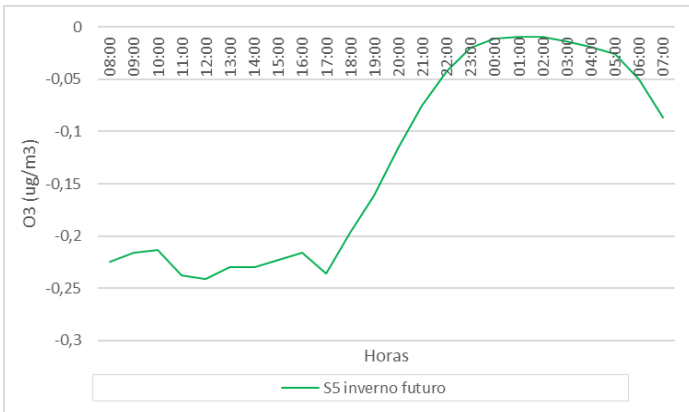
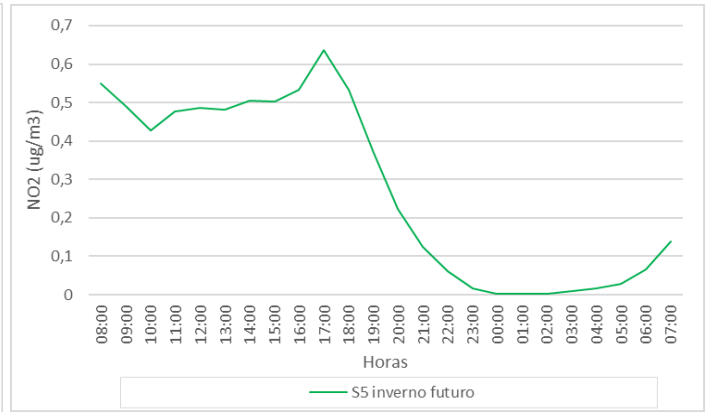
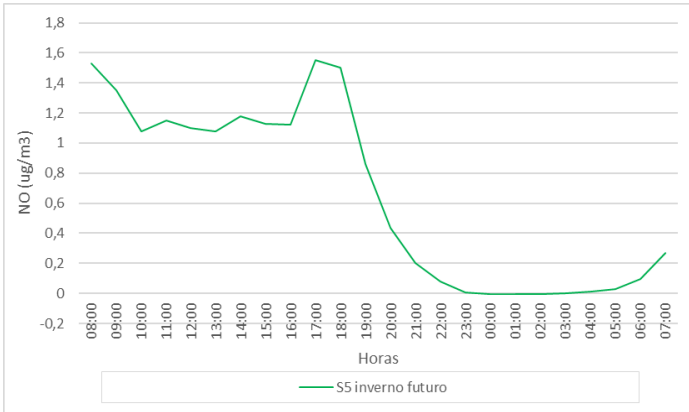
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



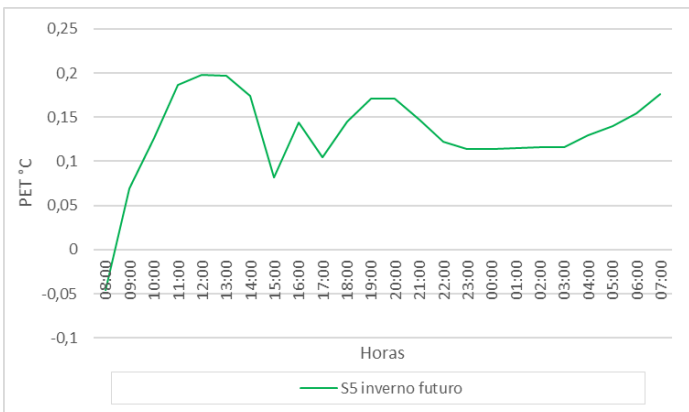
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



- PET (°C) (z=1,5m)



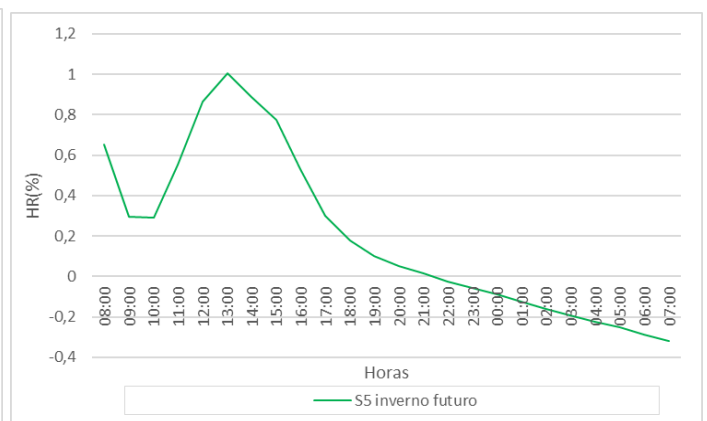
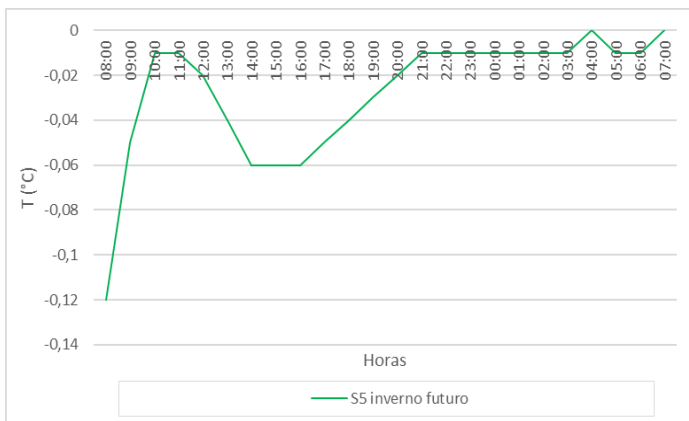
Grid - 106_71 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

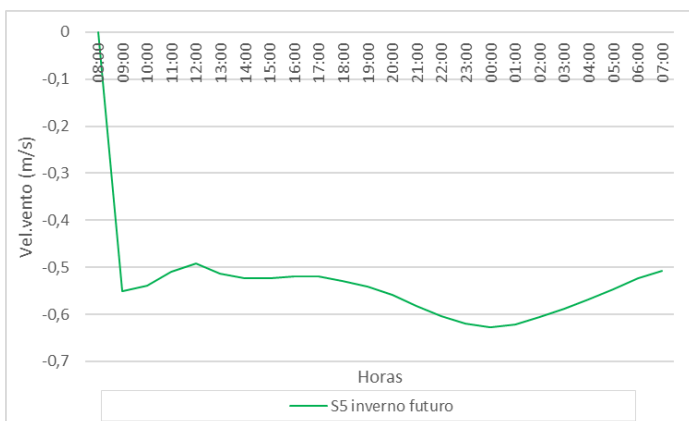
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NOx (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,820	81,671	0,555	59,969	43,669	103,638	27,926	25,458	14,409	8,861
S5 inverno futuro	9,793	81,870	0,553	60,001	43,703	103,703	27,900	25,462	14,412	8,981

Diferenças entre cenários na:

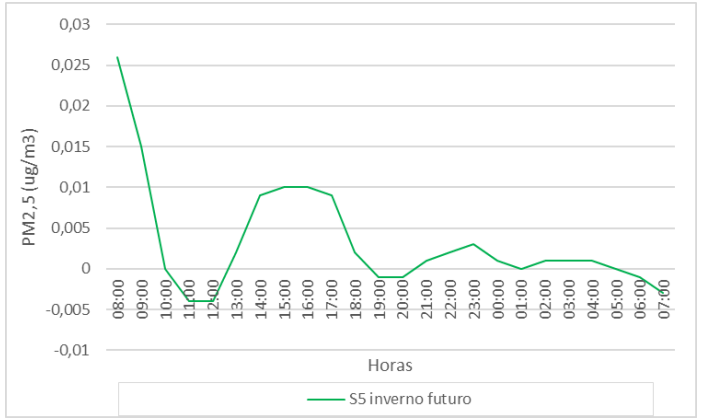
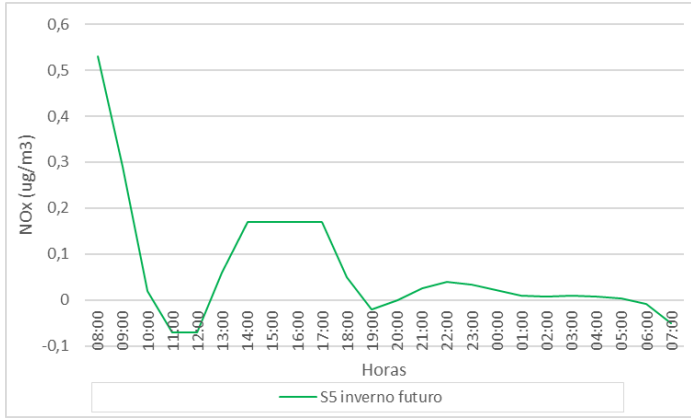
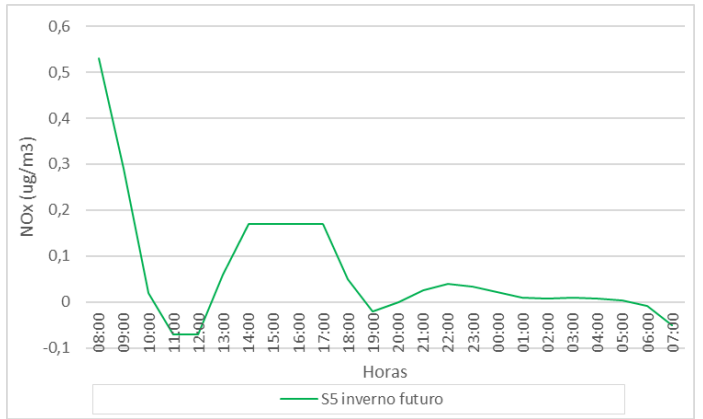
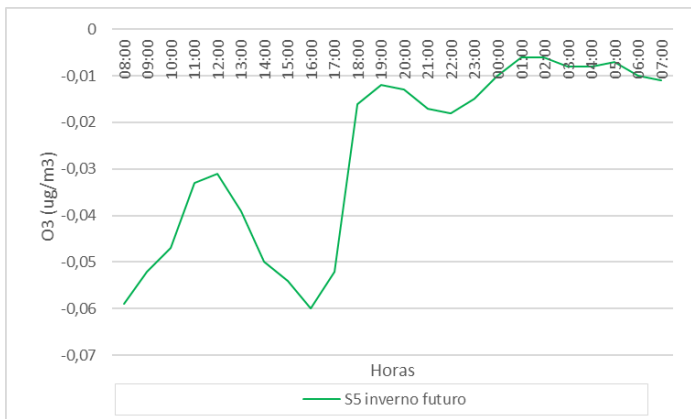
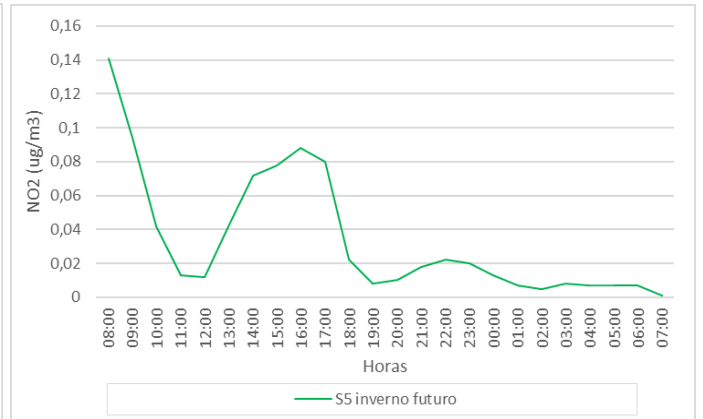
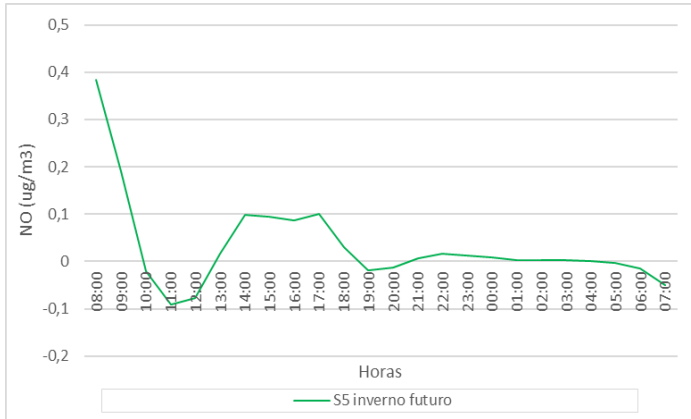
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



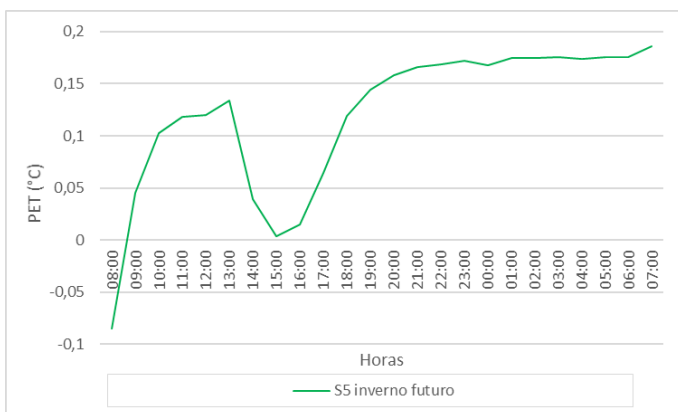
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



- PET (°C) (z=1,5m)



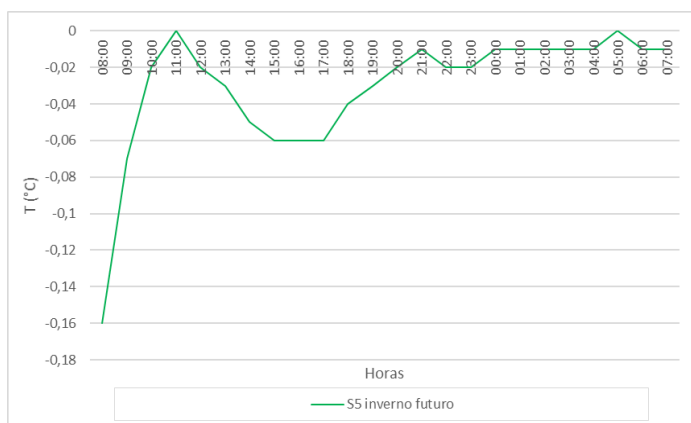
Grid – 110_92 Rua de São Francisco

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

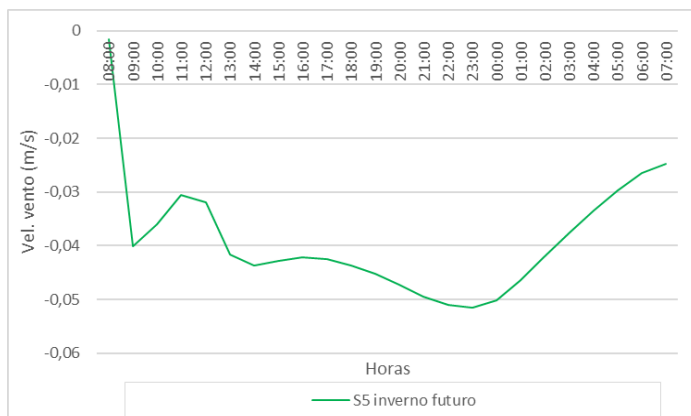
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,857	81,640	0,042	63,720	44,600	108,321	27,711	25,777	14,669	10,389
S5 inverno futuro	9,826	81,828	0,041	63,397	44,475	107,871	27,758	25,747	14,644	10,664

Diferenças entre cenários na:

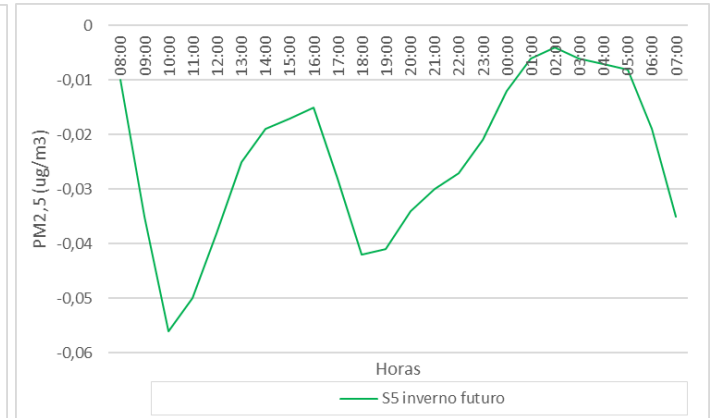
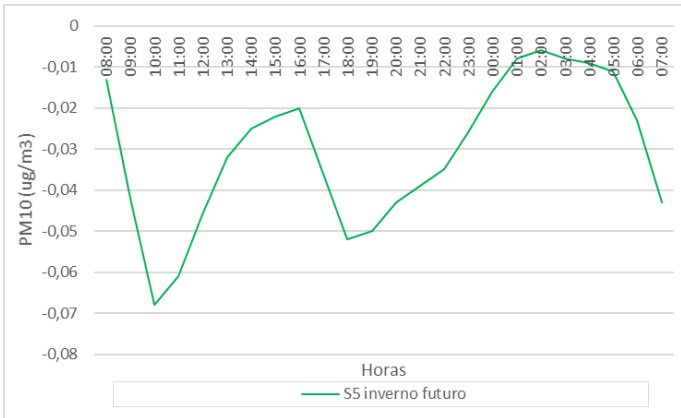
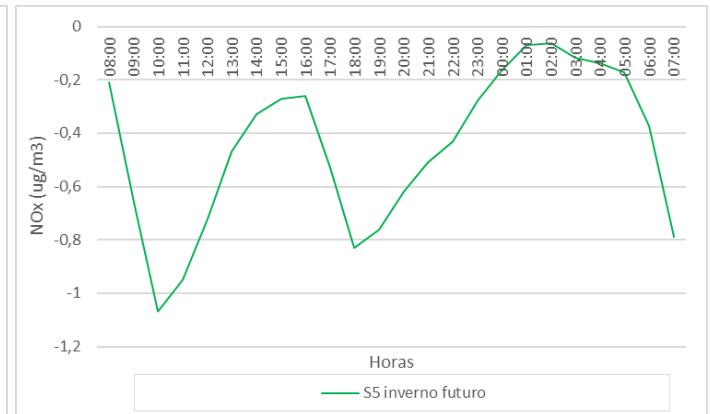
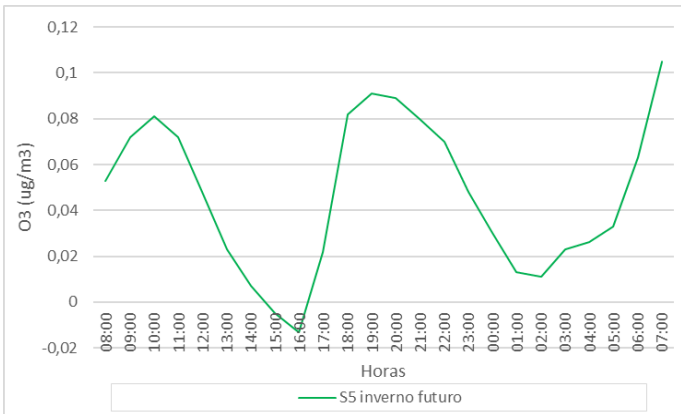
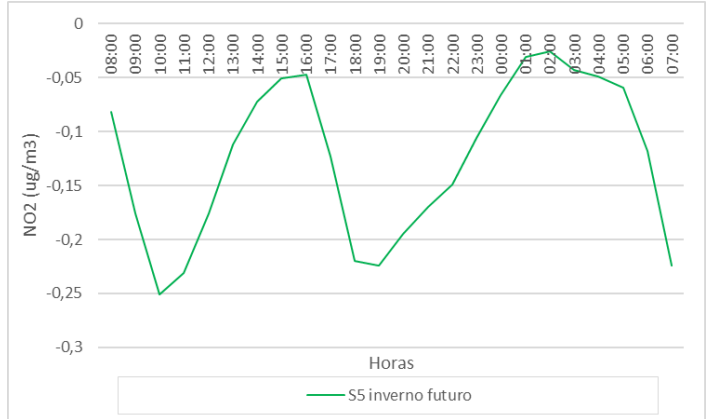
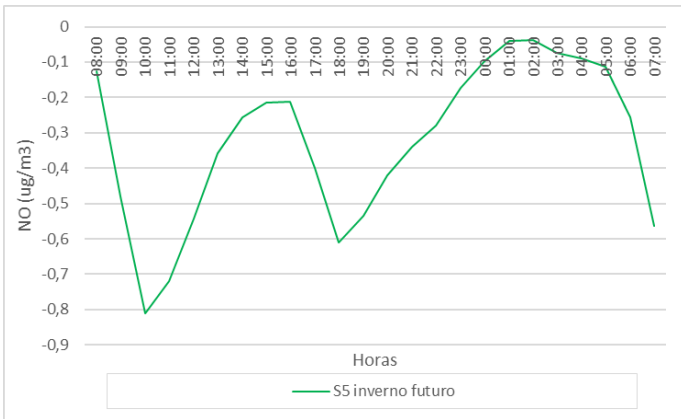
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



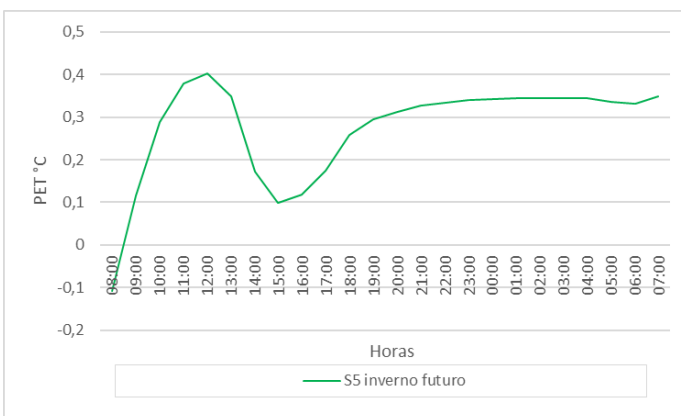
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



- PET (°C) (z=1,5m)



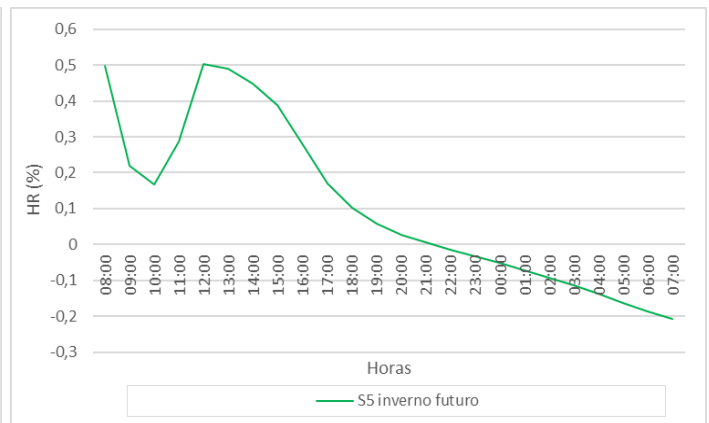
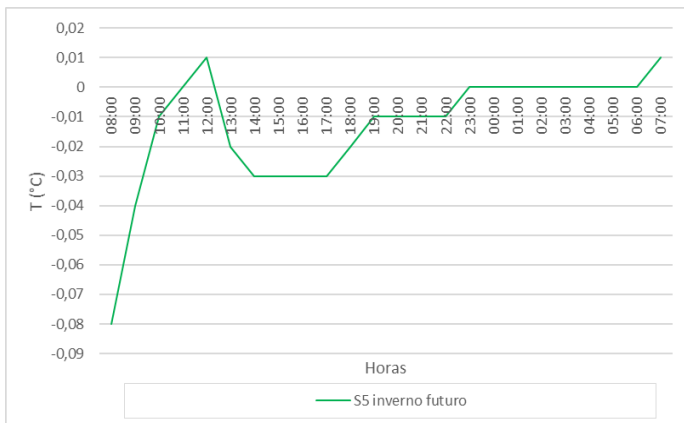
Grid 93_104 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

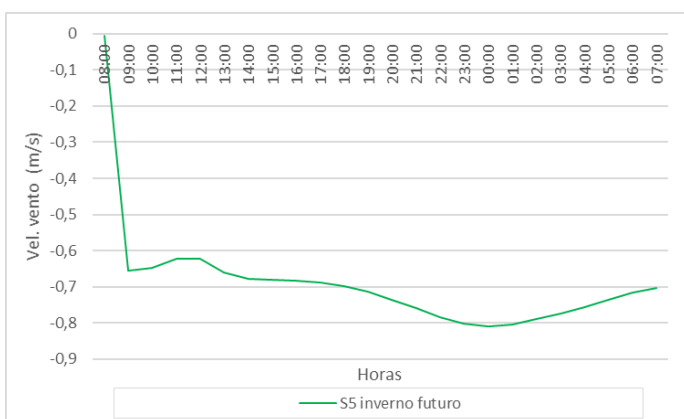
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO(μg/m ³)	NO ₂ (μg/m ³)	NO _x (μg/m ³)	O ₃ (μg/m ³)	PM ₁₀ (μg/m ³)	PM _{2,5} (μg/m ³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,858	81,685	0,723	81,723	48,149	129,870	28,089	27,278	15,883	8,250
S5 inverno futuro	9,845	81,792	0,715	81,626	48,113	129,738	28,102	27,269	15,875	8,375

Diferenças entre cenários na:

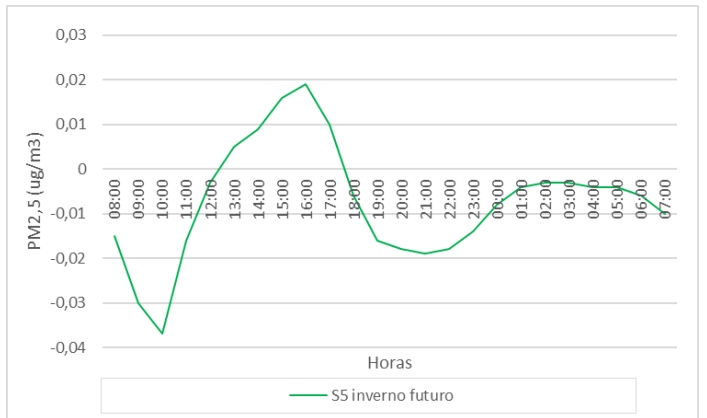
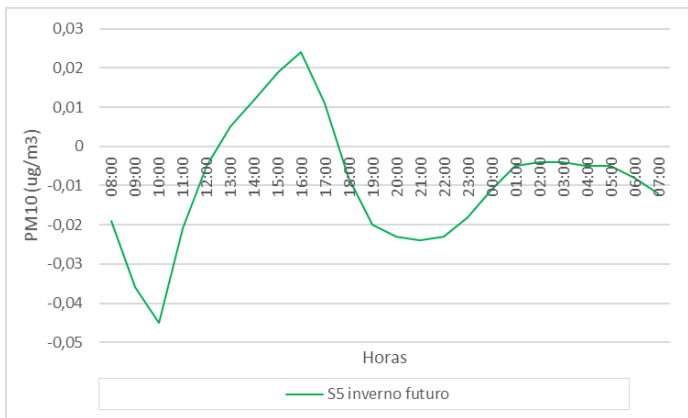
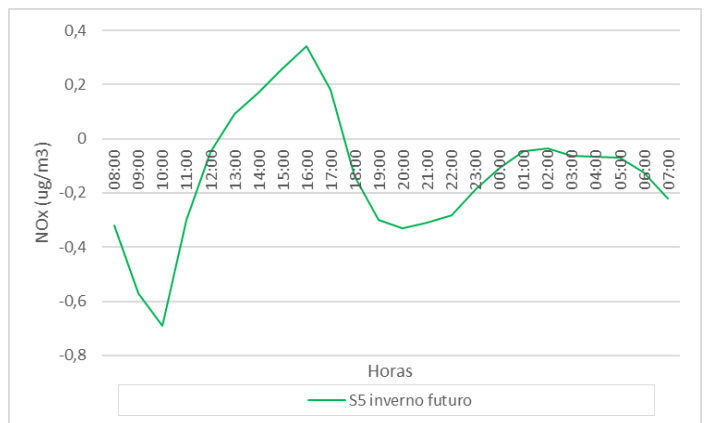
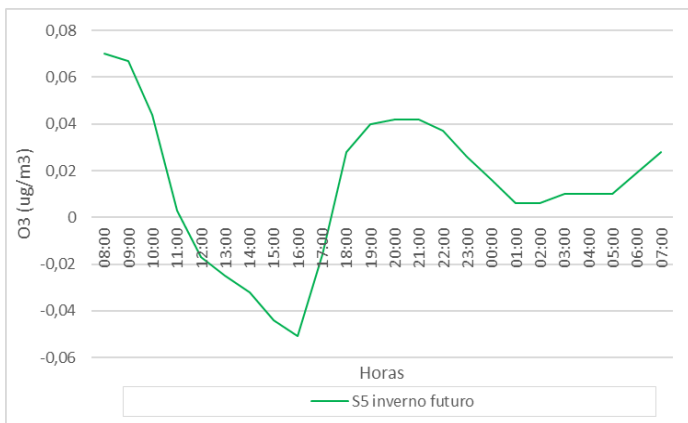
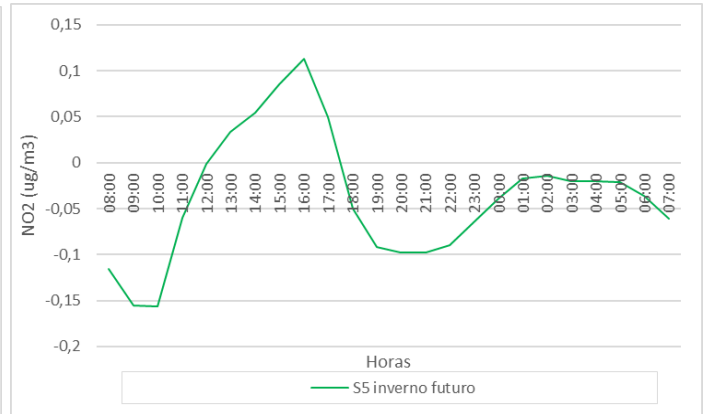
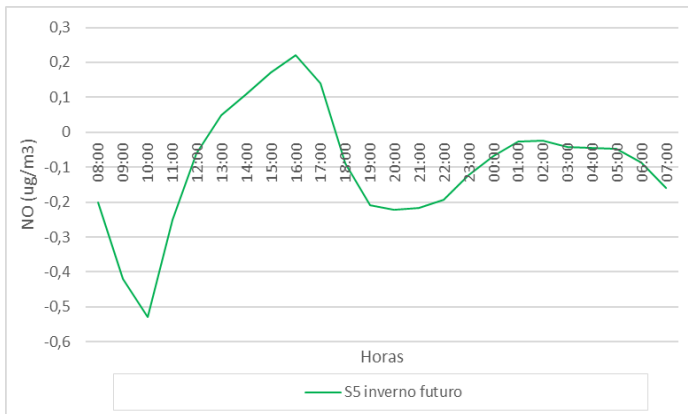
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



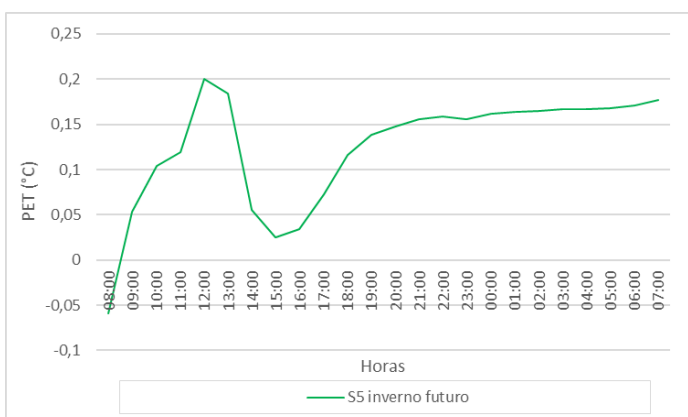
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



- PET (°C) (z=1,5m)



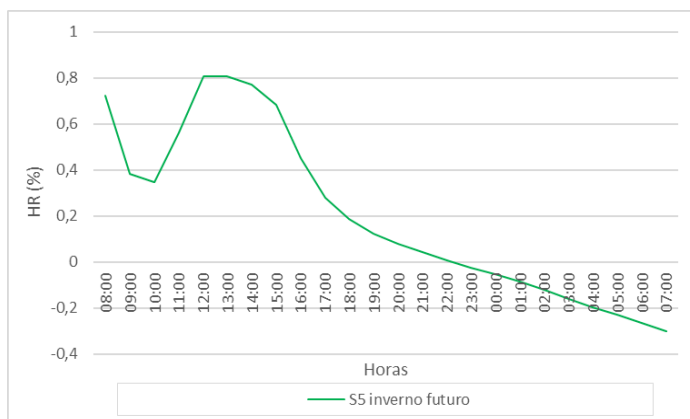
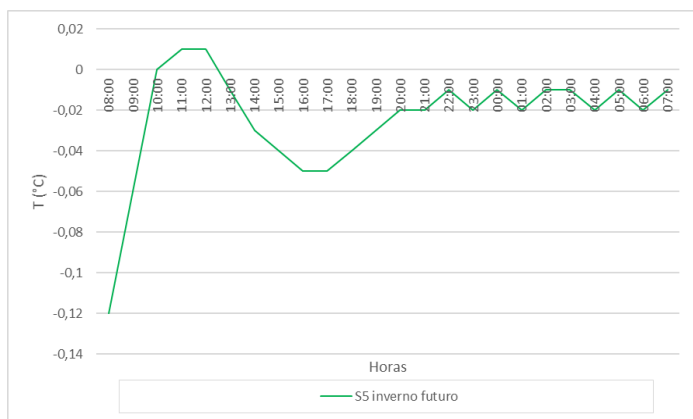
Grid 71_85 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

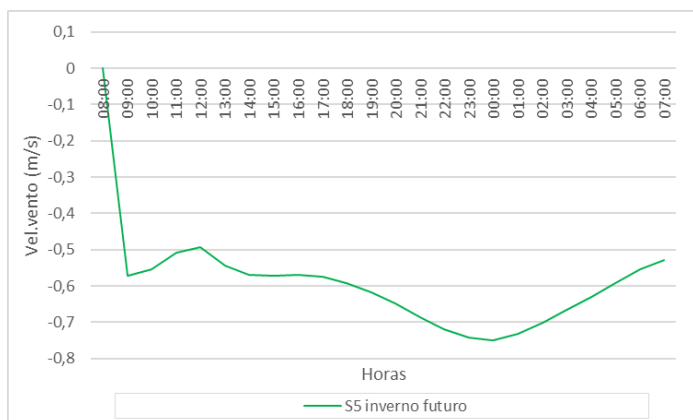
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NOx(µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10(µg/m³)	PM2,5(µg/m³)	PET (°C)
Baseline inverno futuro	9,863	81,753	0,613	66,051	43,598	109,648	28,910	25,891	14,761	8,996
S5 inverno futuro	9,838	81,953	0,612	66,057	43,610	109,667	28,900	25,892	14,762	9,128

Diferenças entre cenários na:

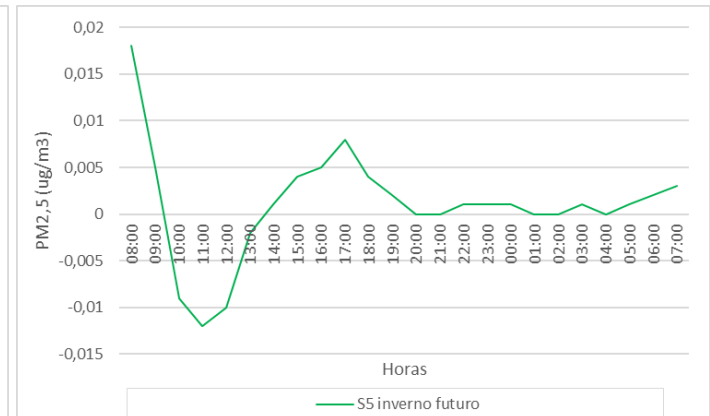
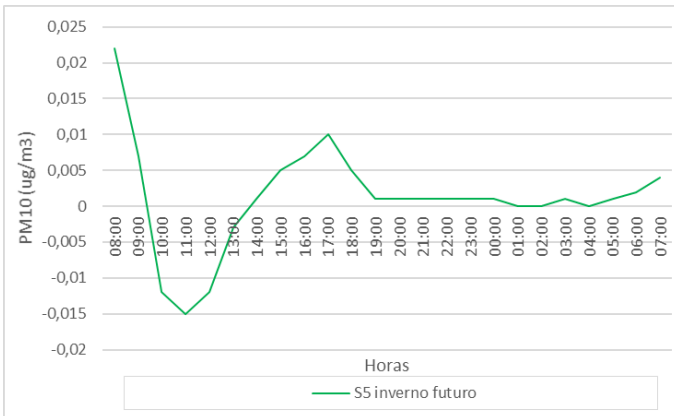
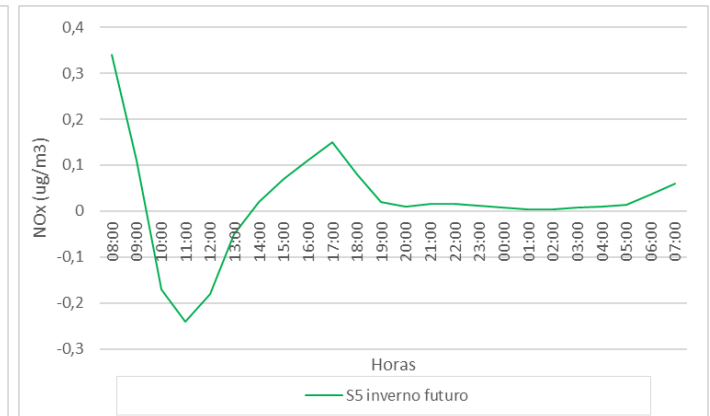
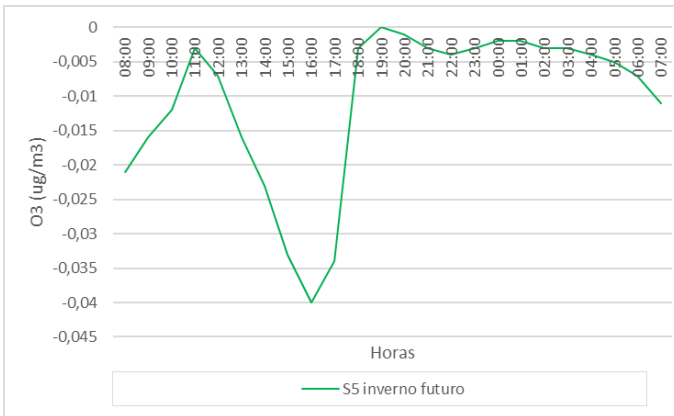
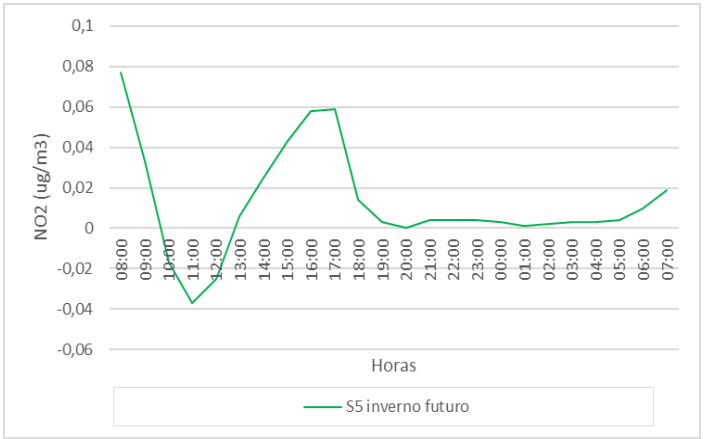
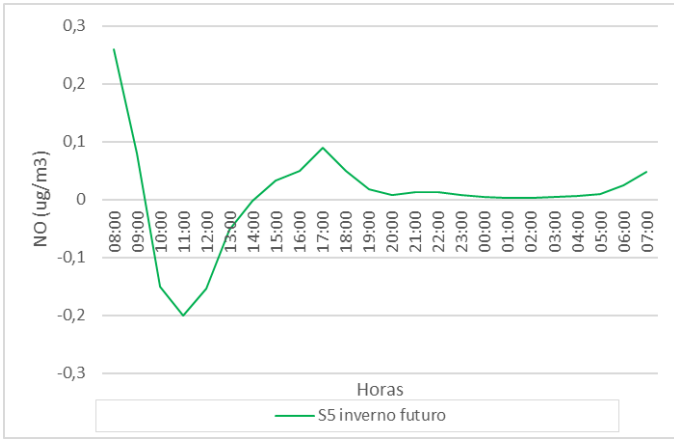
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



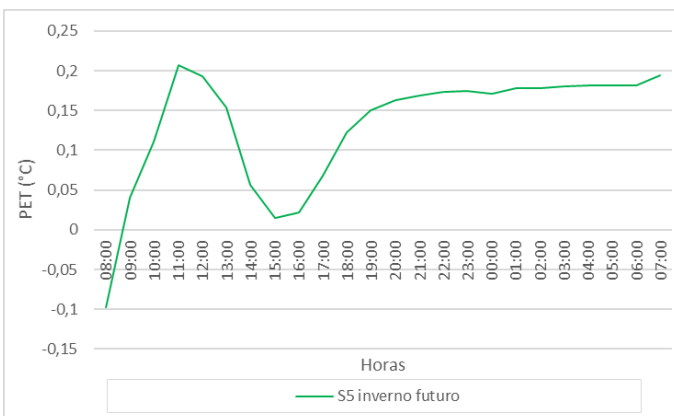
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



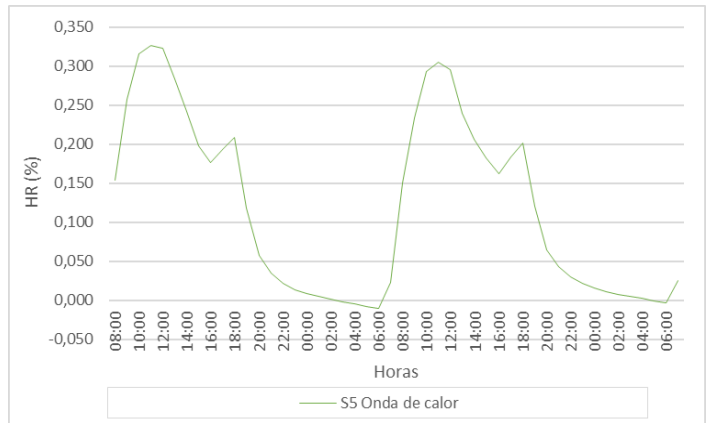
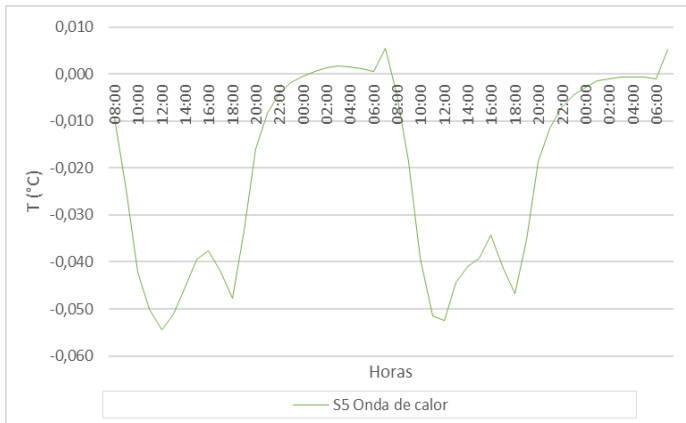
- PET (°C) (z=1,5m)



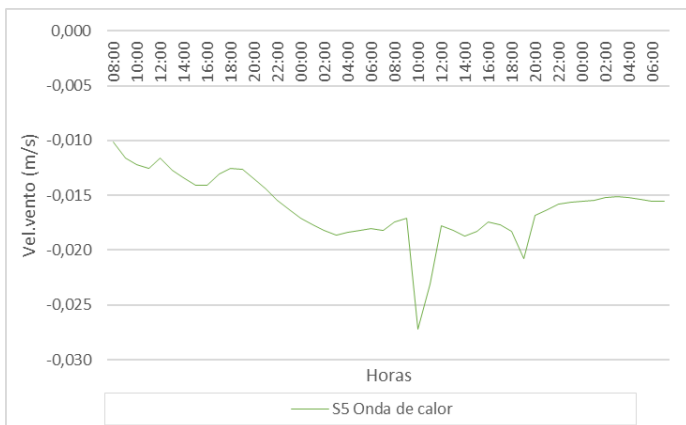
S5 Onda de Calor vs Baseline Onda de Calor

Diferenças dos resultados das médias espaciais a 1,5m de altura na área de estudo entre cenários na:

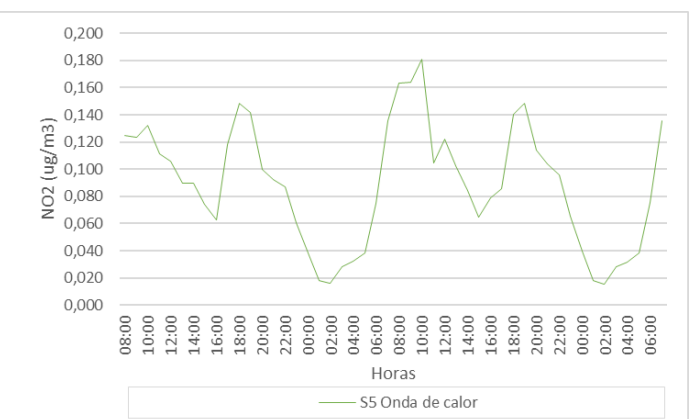
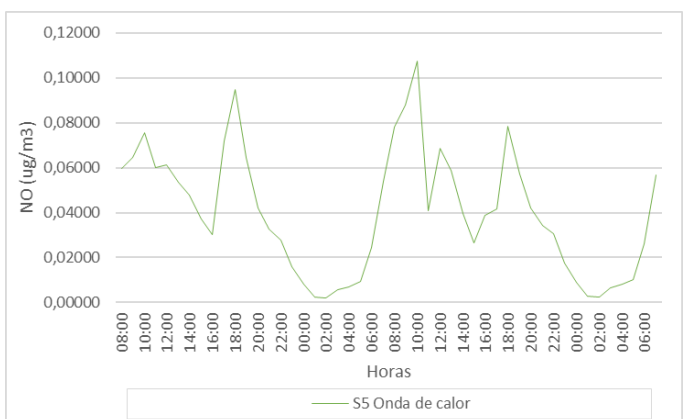
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)

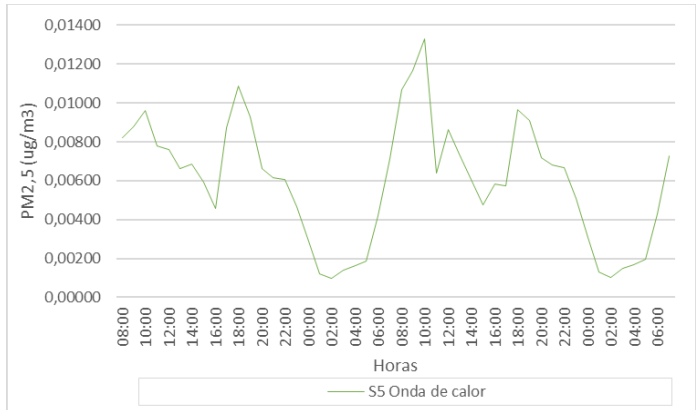
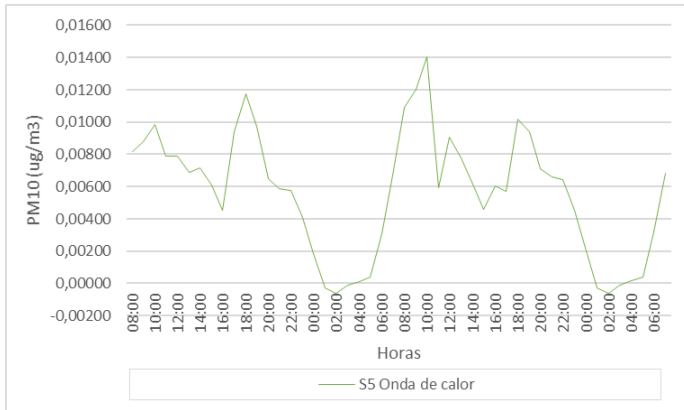
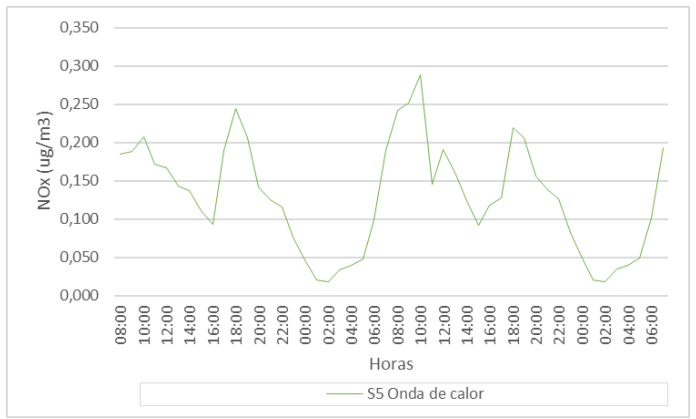
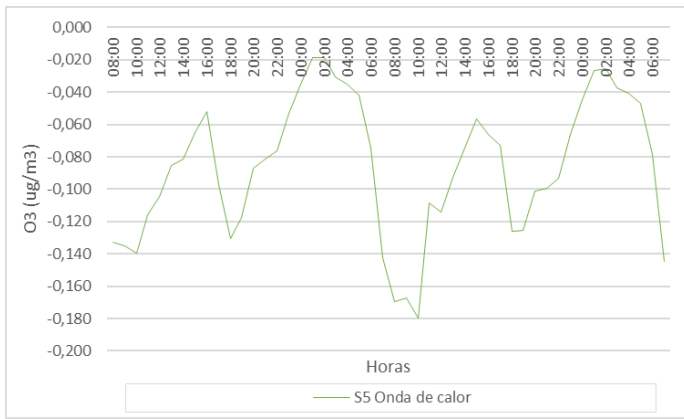


- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)

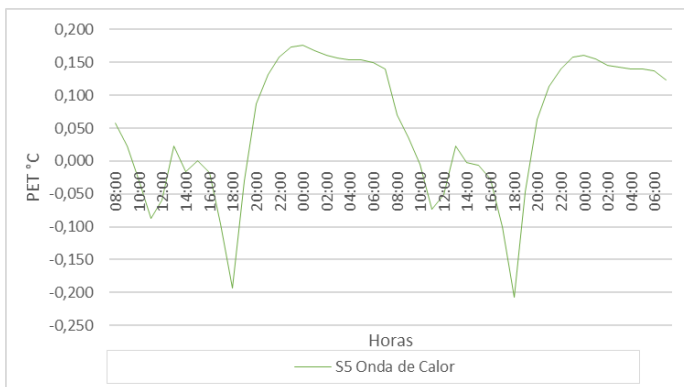


- Concentração dos Poluentes (z=1,5m)





- PET (°C) (z=1,5m)



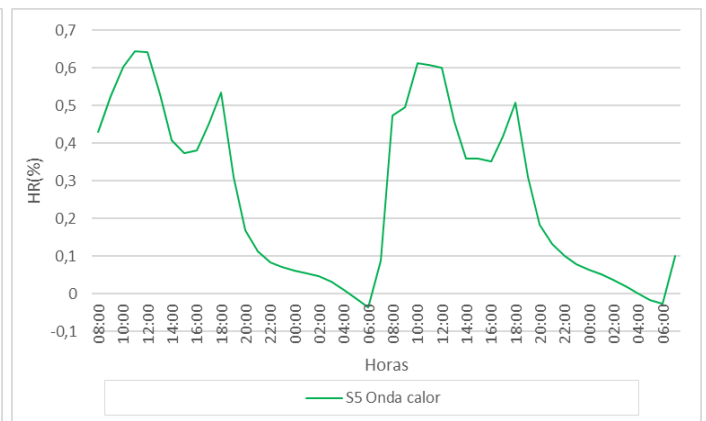
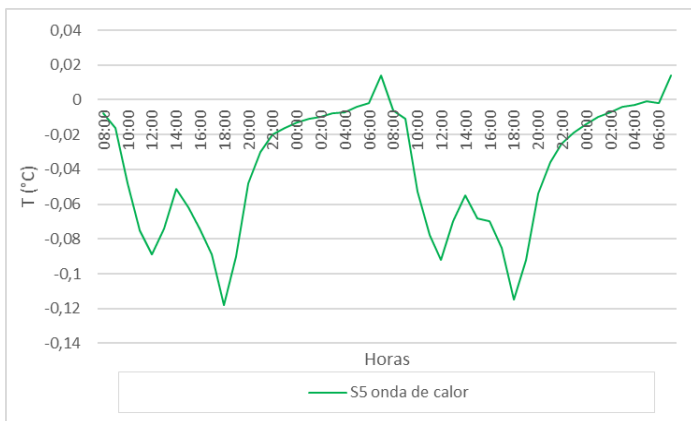
Grid - 25_48 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

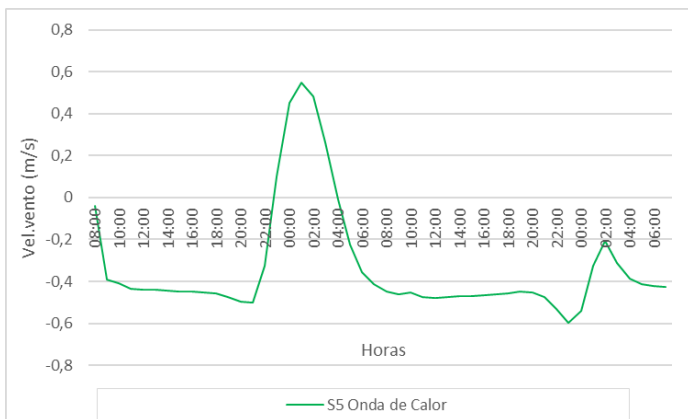
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NOx (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline Onda de Calor	31,878	61,476	0,203	58,724	55,329	114,499	53,781	52,679	20,605	38,255
S5 Onda de Calor	31,839	61,743	0,160	60,254	56,555	116,993	52,928	52,843	20,744	38,844

Diferenças entre cenários na:

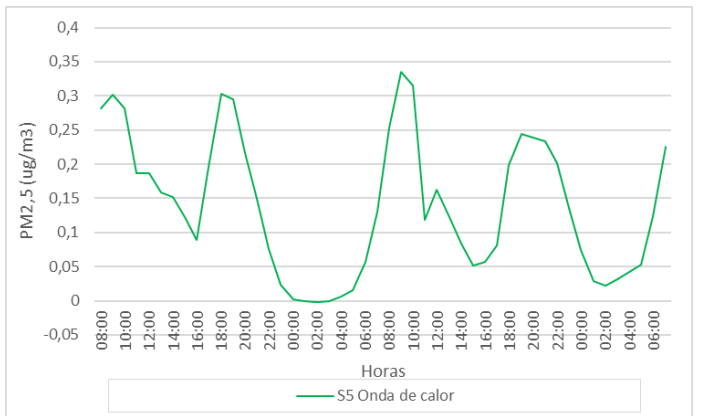
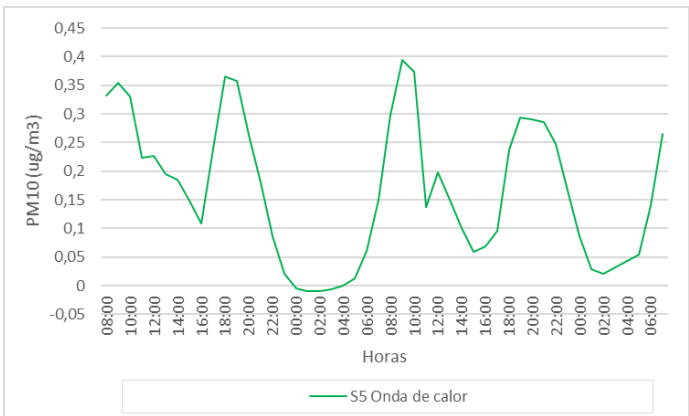
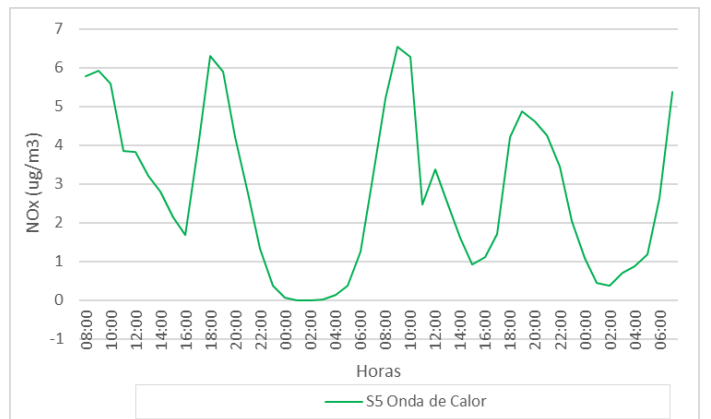
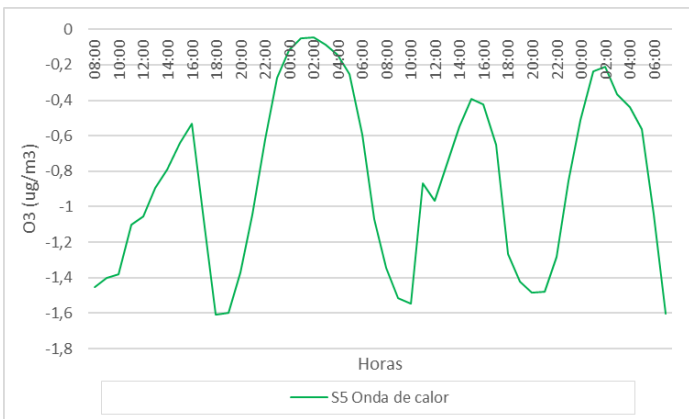
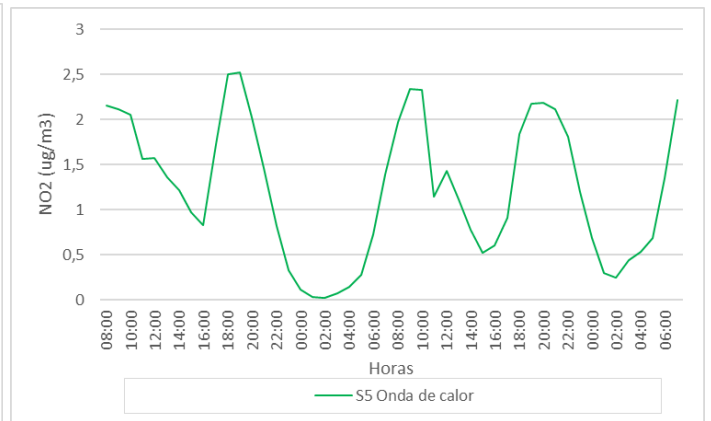
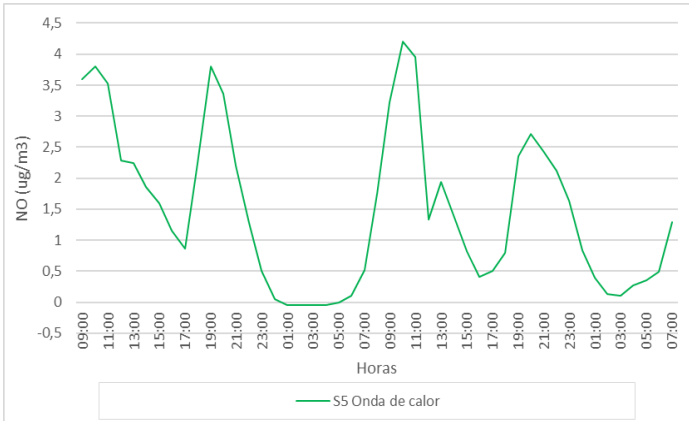
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



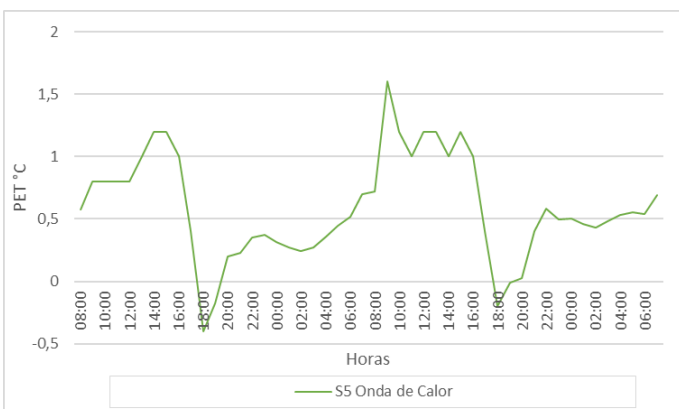
- Velocidade do Vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração dos poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)

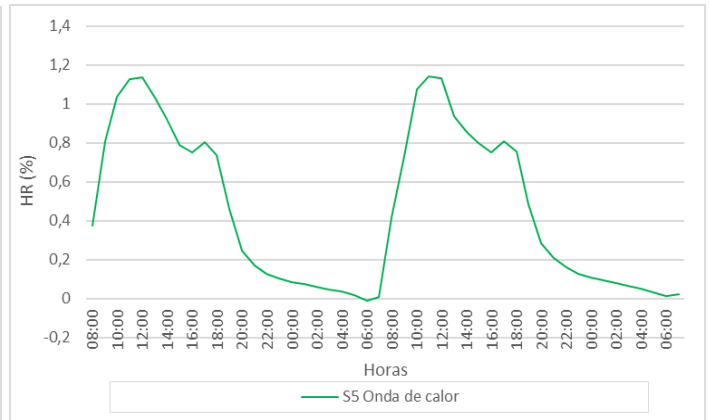
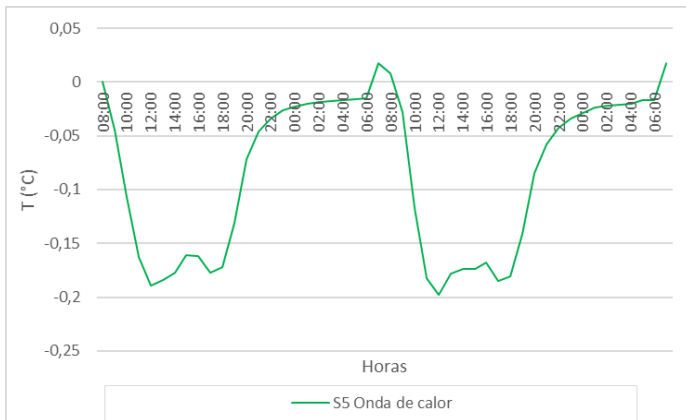


Grid – 106_71 Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

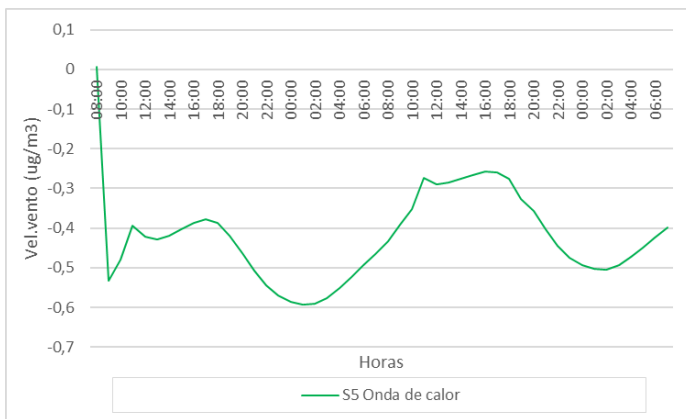
	Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)									
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NOx (µg/m ³)	O ³ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline Onda de Calor	31,800	61,646	0,430	46,505	52,495	98,851	54,399	51,644	19,754	35,923
Cenário Misto Onda de Calor	31,716	62,106	0,428	46,724	52,791	99,105	54,157	51,673	19,780	36,140

Diferenças entre cenários na:

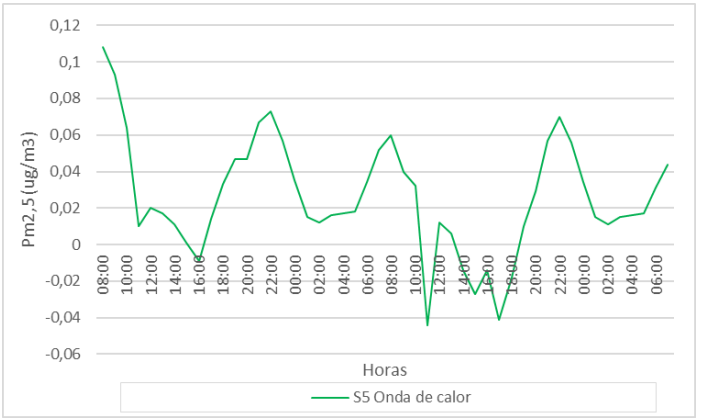
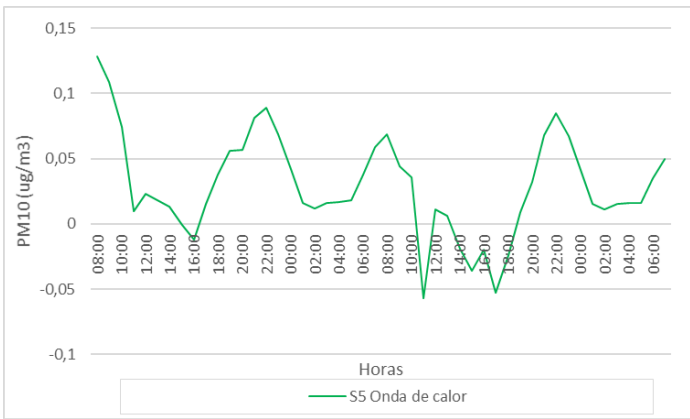
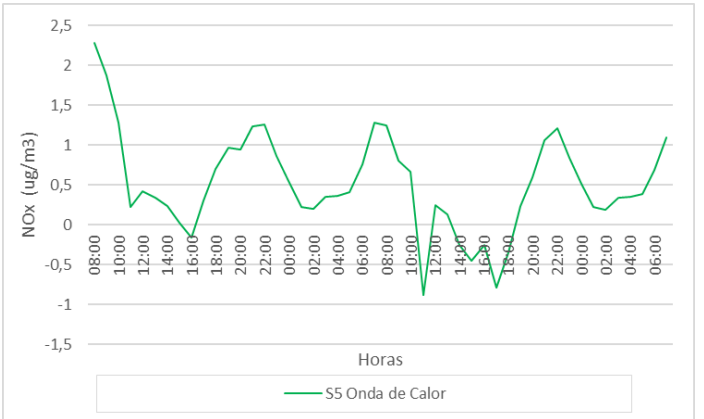
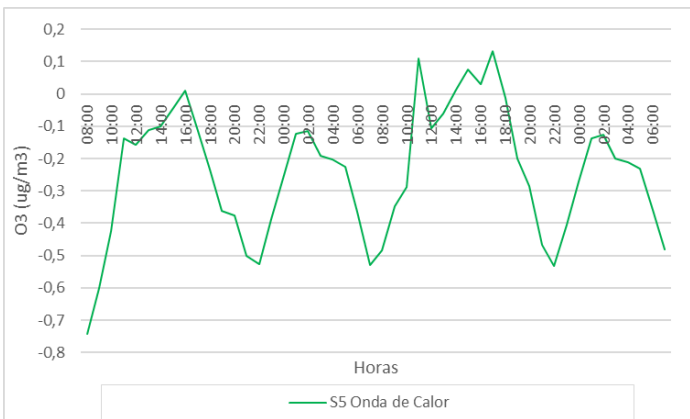
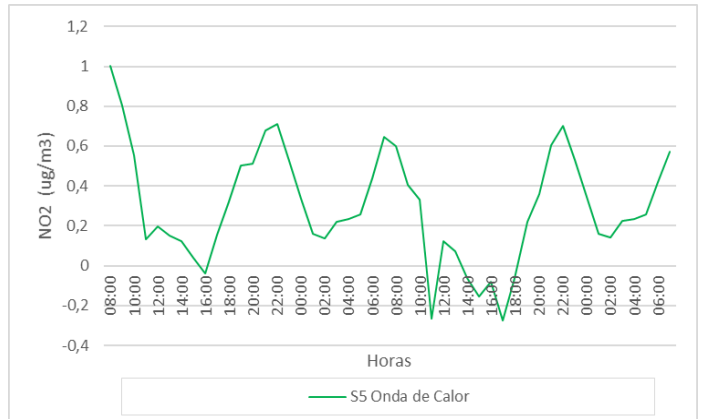
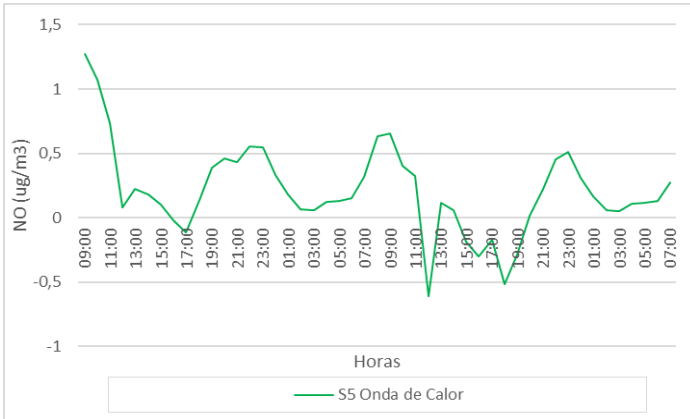
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



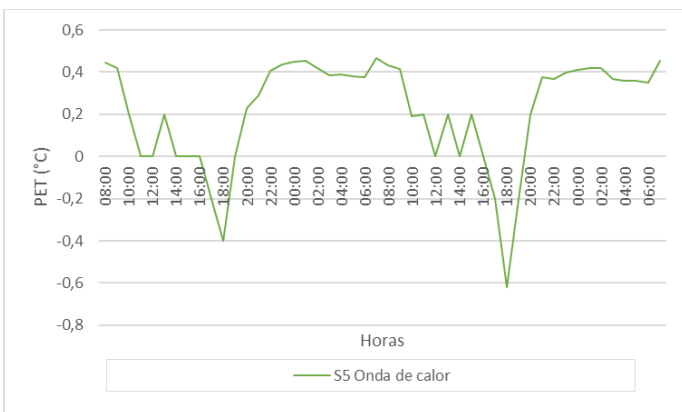
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração dos poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)

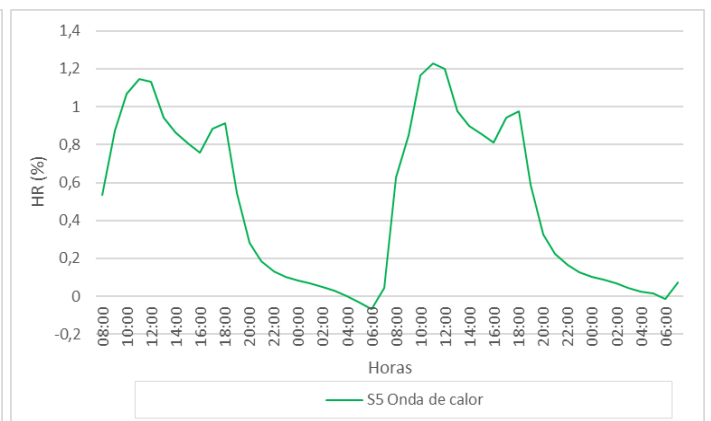
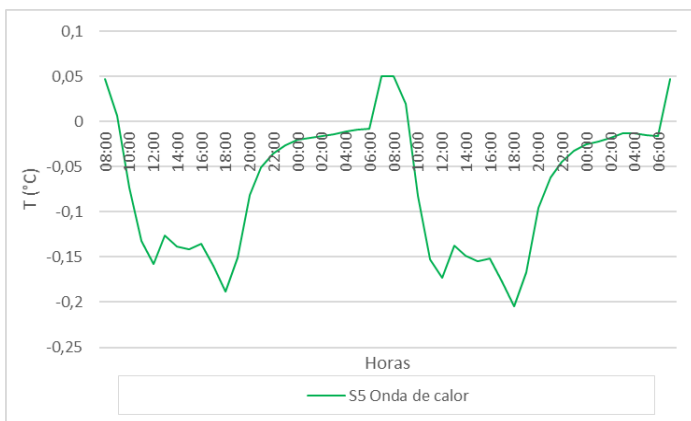


Grid – 110_92 Rua de São Francisco

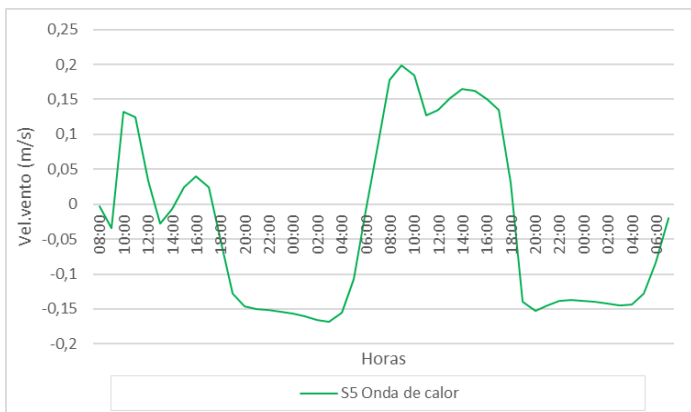
	Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)									
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NO _x (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline	31,858	61,511	0,029	51,323	53,770	104,861	54,020	52,058	20,090	38,082
Onda de Calor	31,788	62,005	0,028	51,264	53,891	104,961	53,875	52,058	20,092	38,538
S5 Onda de Calor										

Diferenças entre cenários na:

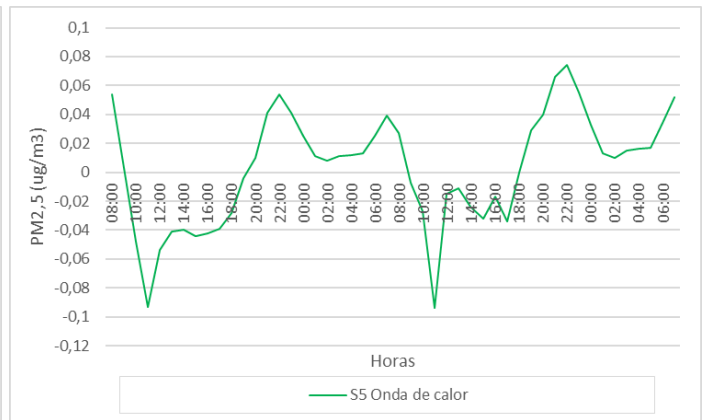
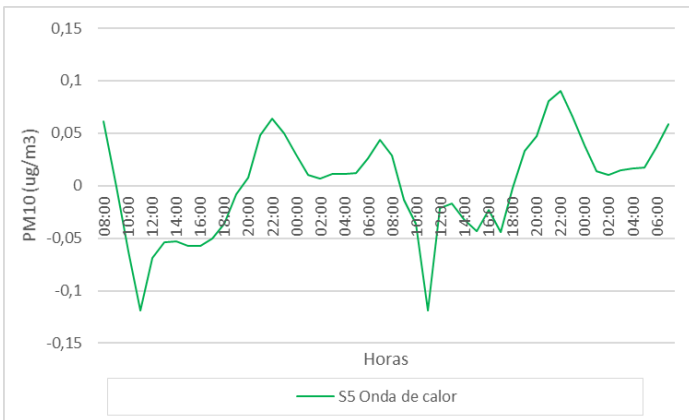
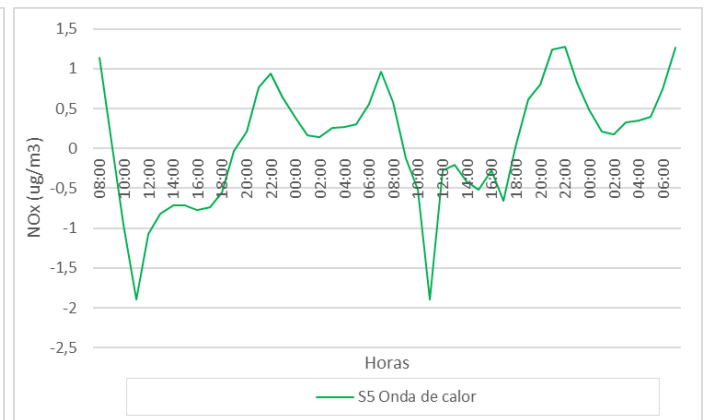
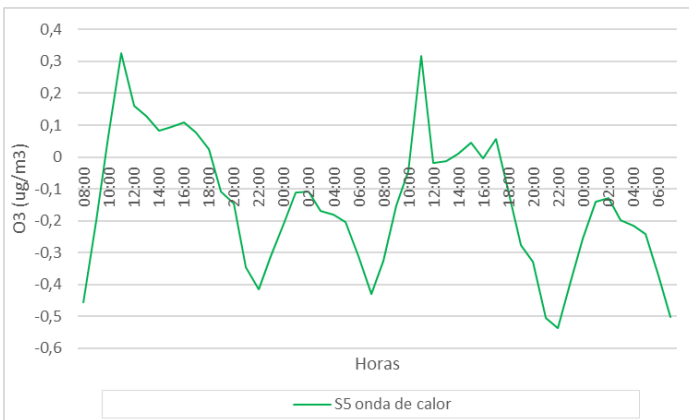
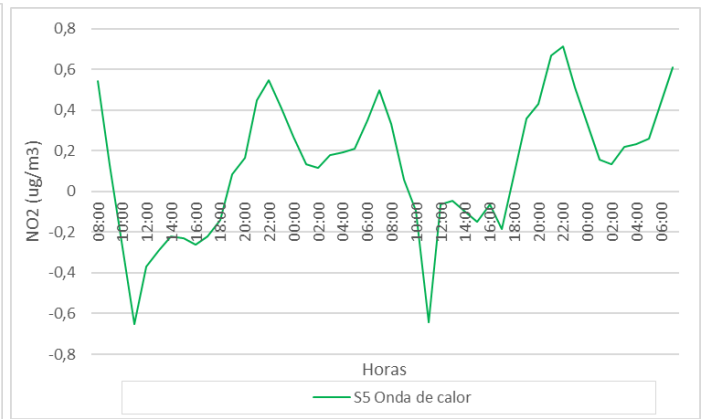
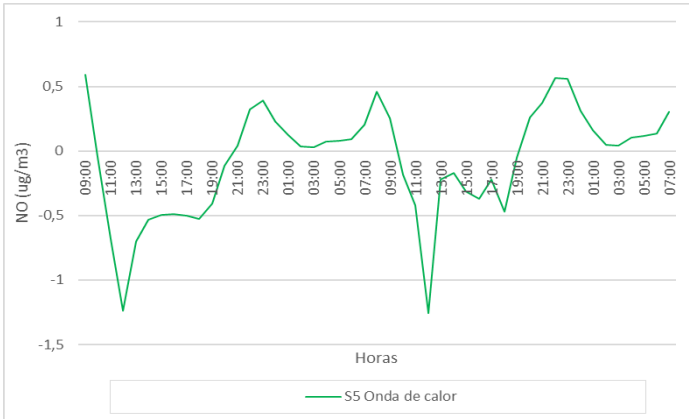
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



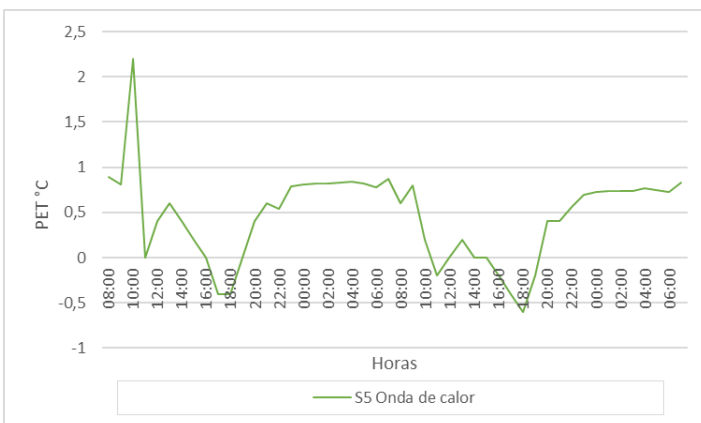
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



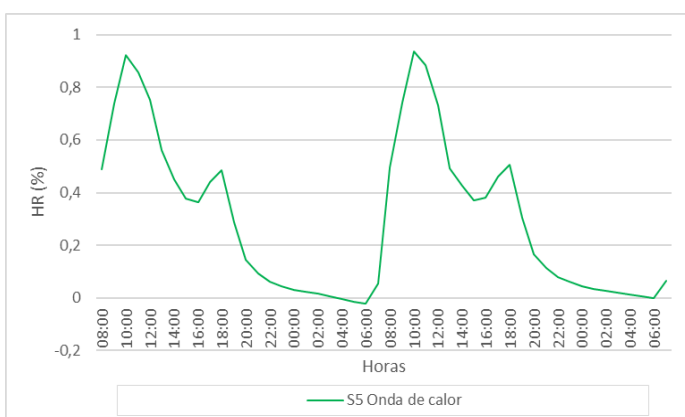
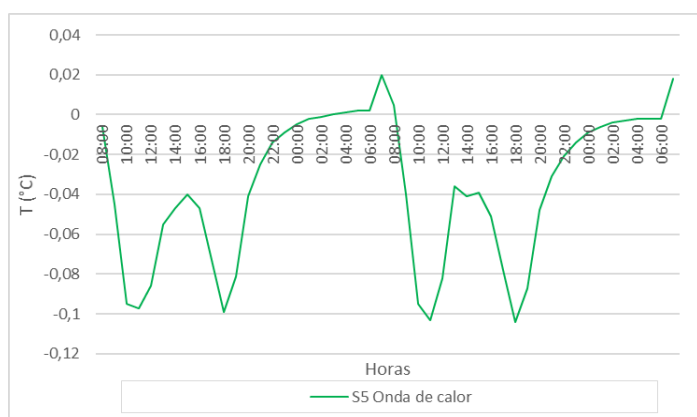
Grid 93_104 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

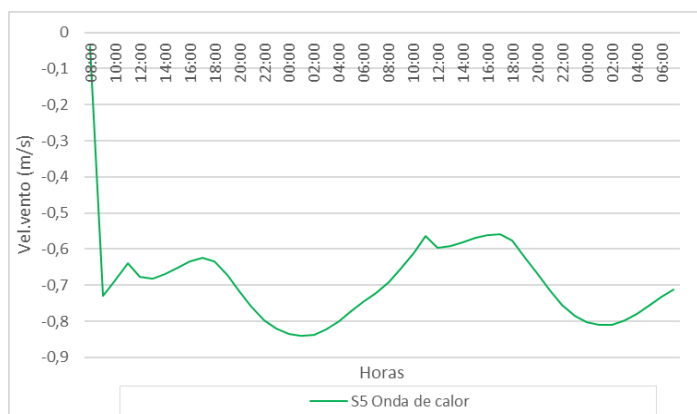
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	NOx (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2,5 (µg/m ³)	PET (°C)
Baseline Onda de Calor	31,870	61,422	0,686	66,257	57,085	122,495	53,961	53,317	21,108	35,304
S5 Onda de Calor	31,834	61,725	0,648	68,115	58,106	125,270	53,386	53,500	21,258	35,603

Diferenças entre cenários na:

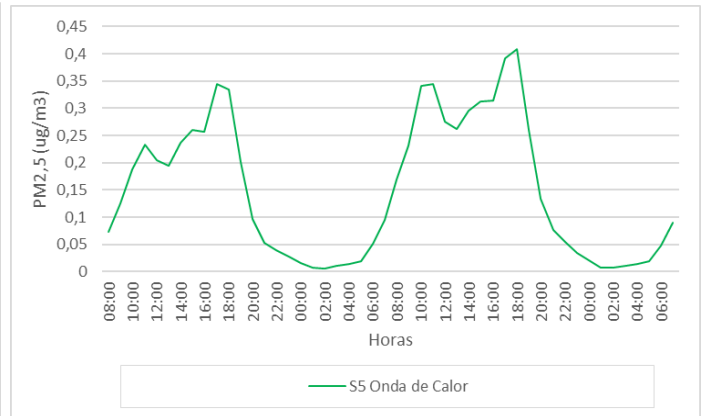
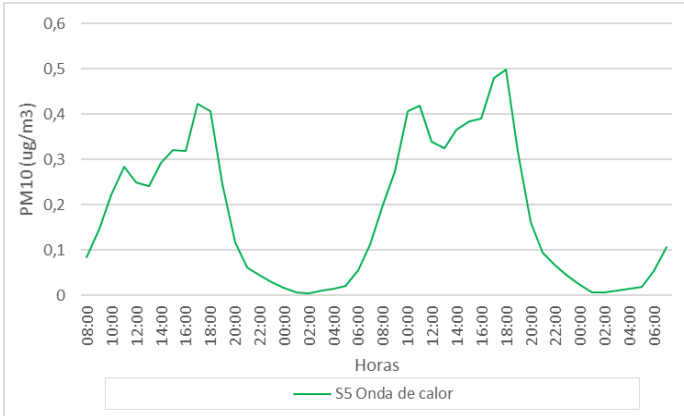
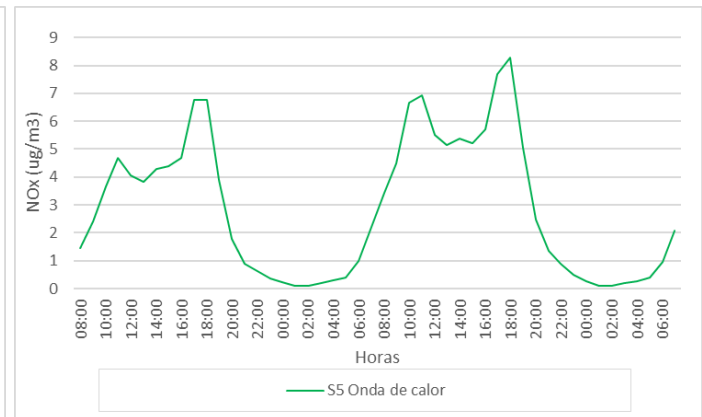
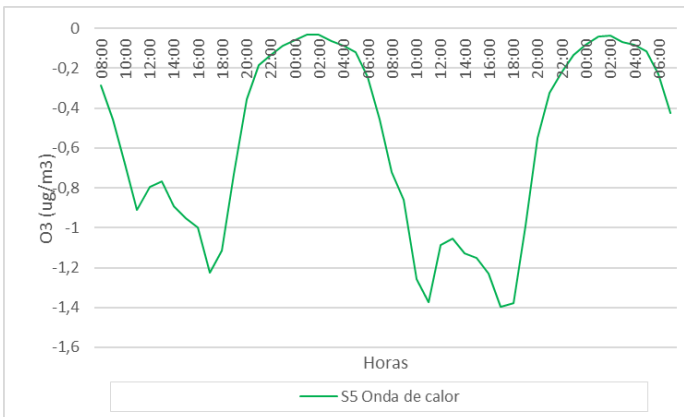
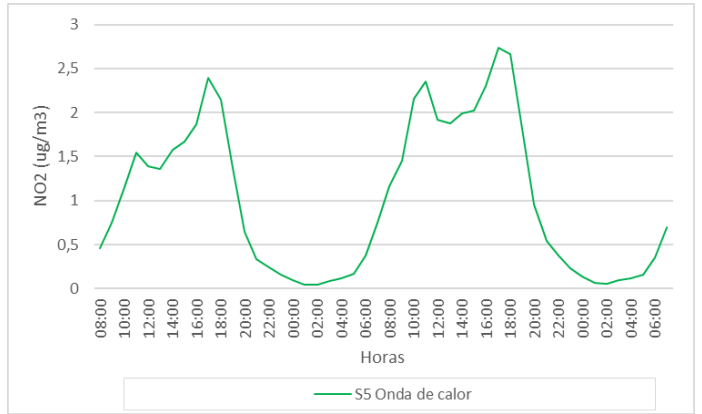
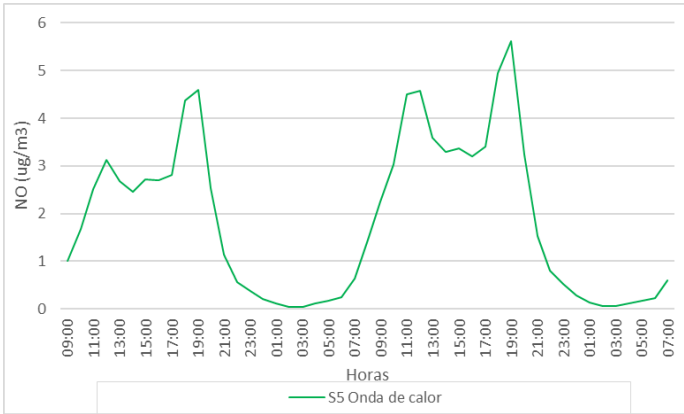
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



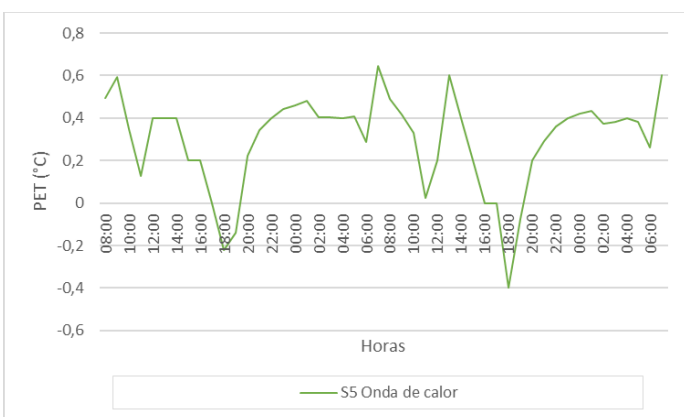
- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



• Concentração de poluentes (z=1,5m)



• PET (°C) (z=1,5m)



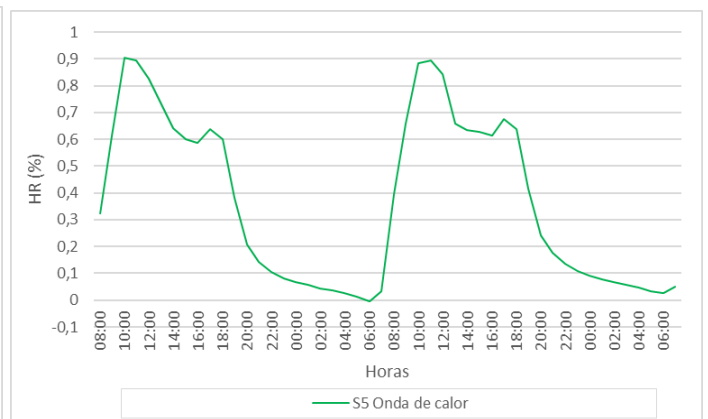
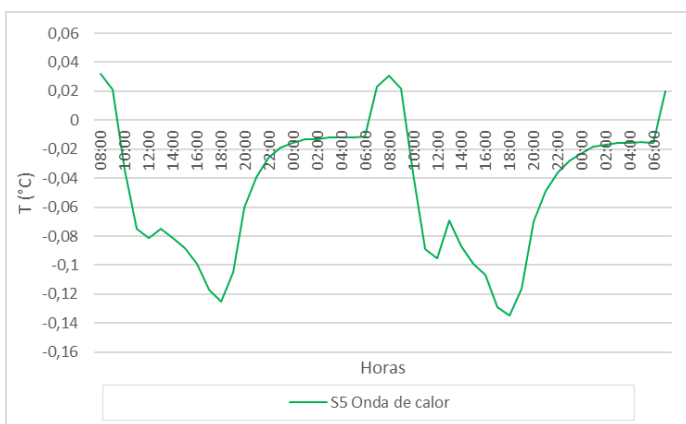
Grid 71_85 – Rua Capitão Mouzinho de Albuquerque

Parâmetros com médias diárias espaciais (z=1,5m)

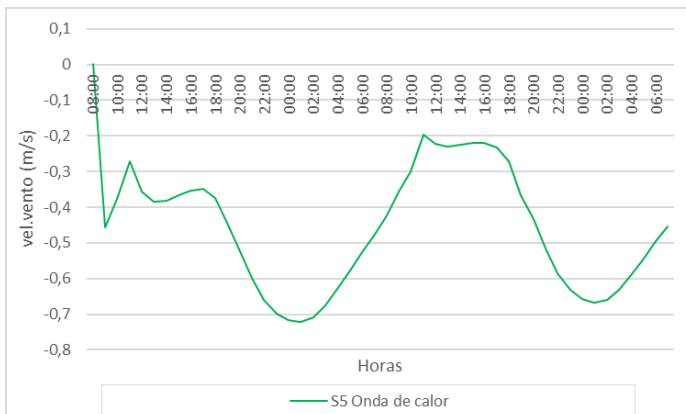
	Temperatura (°C)	Humidade e relativa (%)	Vel.vento (m/s)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	NOx (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	PET (°C)
Baseline Onda de Calor	31,865	61,500	0,462	54,975	53,287	108,356	54,866	52,291	20,279	35,746
S5 Onda de Calor	31,819	61,867	0,460	55,141	53,407	108,793	54,784	52,309	20,293	35,995

Diferenças entre cenários na:

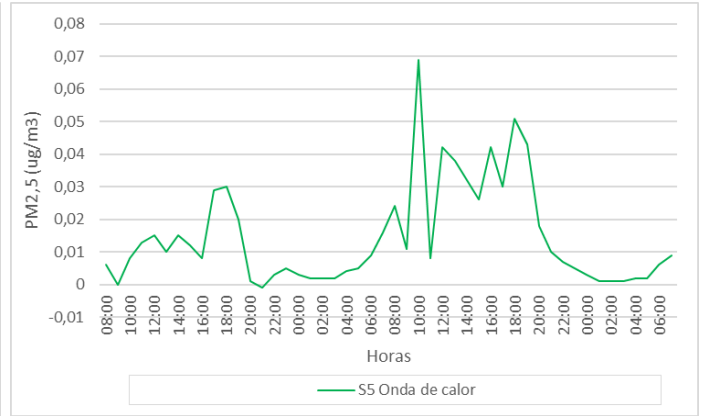
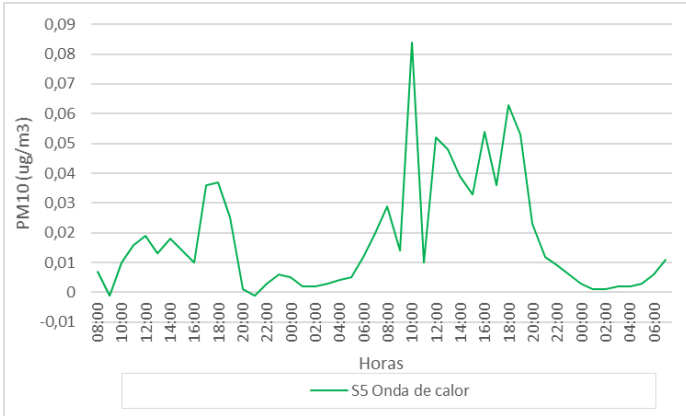
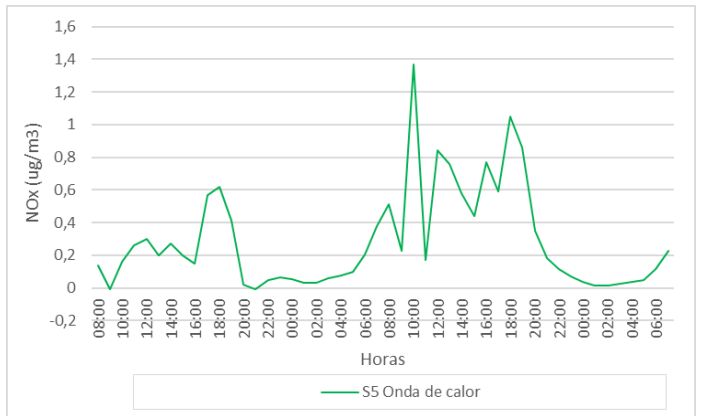
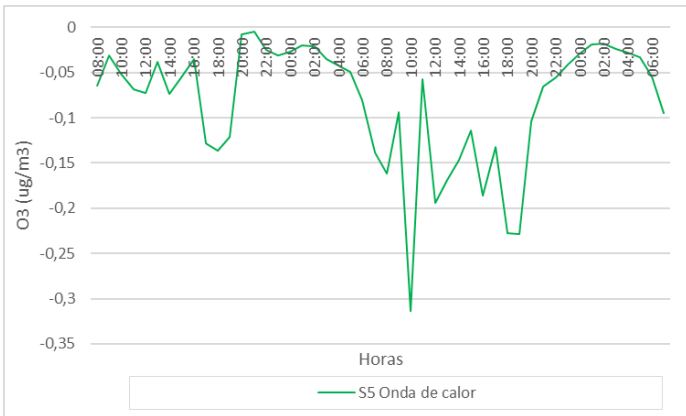
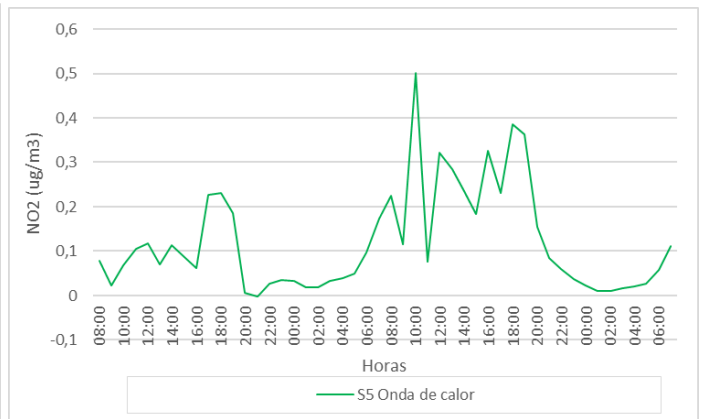
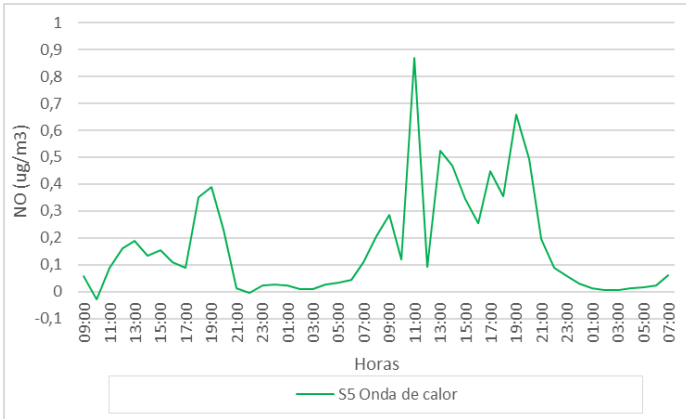
- Temperatura (°C) e Humidade Relativa (%) do ar (z=1,5m)



- Velocidade do vento (m/s) (z=1,5m)



- Concentração de poluentes (z=1,5m)



- PET (°C) (z=1,5m)

