

VOLUME 3

Diagnóstico sobre o Desconforto Bioclimático no Concelho do Porto.

Modelo Climático do Porto e Identificação de Áreas Críticas.

Autores

Ana Monteiro (coord)

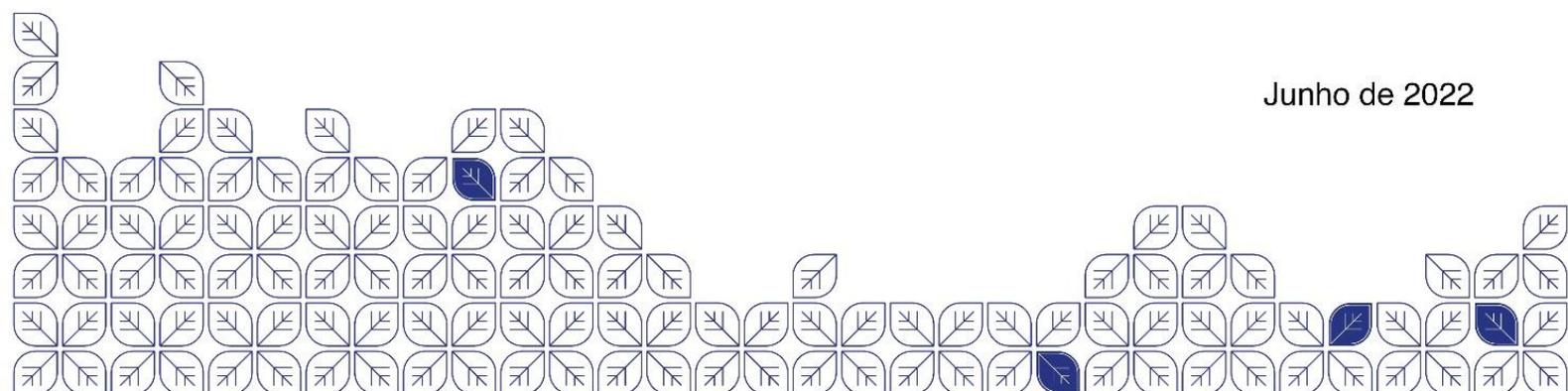
Helena Madureira

Manuela Laranjeira

Catarina Pinheiro

Maysa Valença

Junho de 2022



Título

Índice Ambiental do Porto - Diagnóstico sobre o Desconforto Bioclimático no Concelho do Porto. Modelo Climático do Porto e Identificação de Áreas Críticas. **Volume 3**

Autores

Monteiro, Ana

Madureira, Helena

Laranjeira, Manuela

Pinheiro, Catarina

Valença, Maysa

Edição

FLUP | Porto | 2022

ISBN 978-989-9193-18-5

DOI <https://doi.org/10.21747/978-989-9193-18-5/dia>

ÍNDICE

Índice de Figuras	3
Índice de Tabelas	4
I. Sumário executivo.....	5
Preâmbulo	6
1. Desafio	6
2. Objetivo	8
3. Resultados relevantes	8
3.1. Áreas no Porto responsáveis pela menor e maior produção de carga térmica, no Verão e no Inverno	8
3.2. A importância da malha urbana do Porto para potenciar ou limitar a regulação da temperatura do ar no Verão e no Inverno, através da ventilação	11
3.3. Áreas críticas no Porto do ponto de vista do desconforto bioclimático pelo calor e frio extremos	15
3.4. Áreas prioritárias no Porto para a promoção da qualificação ambiental outdoor, no verão e/ou no Inverno	18
II. Relatório Técnico: Descrição e Justificação Metodológica	22
1. Distinção de Áreas em Função da Carga Térmica Produzida.....	23
1.1. Variáveis de base	23
1.2. Metodologia.....	24
2. Delineação do Sistema de Ventilação	47
2.1. Variáveis de base	48
2.2. Metodologia.....	48
3. Síntese Final	59
3.1. Principais Resultados e Pontos-Chave a Reter	60
Mapas Anexos	70
Referências Bibliográficas	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Densidade média da cobertura de árvores (2018)	25
Figura 2 – Proporção de área impermeabilizada por quarteirão (2018)	26
Figura 3 – Proporção de área impermeabilizada por subsecção estatística (2011).....	26
Figura 4 – Albedo das superfícies	28
Figura 5 – Evapotranspiração potencial normalizada em janeiro	29
Figura 6 – Evapotranspiração potencial normalizada em julho	29
Figura 7 – Evapotranspiração de referência média de janeiro (1970-2000)	30
Figura 8 – Evapotranspiração de referência média de julho (1970-2000)	30
Figura 9 – Coeficiente cultural (Kc)	31
Figura 10 – Temperatura de superfície média no verão, no período diurno de aquecimento	35
Figura 11 – Temperatura de superfície média no inverno, no período diurno de aquecimento	35
Figura 12 – Temperatura de superfície média no verão, no período noturno de arrefecimento	36
Figura 13 – Temperatura de superfície média no inverno, no período noturno de arrefecimento	36
Figura 14 – Avaliação dos processos de arrefecimento do ar. Baseado em Geneletti et al. (2016).	37
Figura 15 – Grupos de áreas verdes e respetiva tipologia	38
Figura 16 – Tipologia de áreas com maior artificialização	42
Figura 17 – Tipologia de áreas verdes.....	43
Figura 18 – Tipologia das áreas de transição	43
Figura 19 – Estatísticas descritivas dos grupos de cobertura e uso do solo	47
Figura 20 – Hipsometria do Porto	49
Figura 21 – Fluxos acumulados de ar no Porto	49
Figura 22 – Vertentes expostas ao vento regional no verão	50
Figura 23 – Exposição ao vento regional no verão	50
Figura 24 – Vertentes expostas ao vento regional no inverno	51
Figura 25 – Exposição ao vento regional no inverno	51
Figura 26 – Facilidade de circulação da brisa do mar	53
Figura 27 – Exposição à brisa do mar.....	54
Figura 28 – Efeito de frescura das áreas verdes no verão (período noturno)	54
Figura 29 – Efeito de frescura das áreas verdes no inverno (período noturno)	55
Figura 30 – Rugosidade aerodinâmica.....	56
Figura 31 – Carga térmica no Porto	61
Figura 32 – Sistema de ventilação no Porto, no Verão	62
Figura 33 – Sistema de ventilação no Porto, no inverno	63
Figura 34 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (calor extremo) no verão	66
Figura 35 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (frio extremo) no inverno	68
Figura 36 – Áreas prioritárias para a qualificação ambiental outdoor	69
Figura 37 – Intensidade da radiação solar incidente no solstício de verão (W/m ²)	70
Figura 38 – Intensidade da radiação solar incidente no solstício de inverno (W/m ²)	70
Figura 39 – Período médio da radiação solar incidente direta no solstício de verão (nº horas)	71
Figura 40 – Período médio da radiação solar incidente direta no solstício de inverno (nº horas)	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Agrupamento das subclasses de cobertura e uso do solo (com a identificação dos grupos de áreas verdes) e respetivos valores do coeficiente cultural e do albedo	27
Tabela 2 – Avaliação da disponibilidade de imagens Landsat 8 OLI ¹ (sem nuvens) para os dias com temperatura máxima(°C) mais elevada, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto - Serra do Pilar	33
Tabela 3 – Avaliação da disponibilidade de imagens Landsat 8 OLI ¹ (sem nuvens) para os dias com temperatura mínima (°C) mais baixa, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto - Serra do Pilar	34
Tabela 4 – Caracterização dos dias de captura das imagens Landsat 8 OLI noturnas ¹ de verão e dos dias antecedentes, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto – Pedras Rubras.....	34
Tabela 5 – Estatísticas descritivas do Grupo 1	39
Tabela 6 – Estatísticas descritivas do Grupo 2	40
Tabela 7 – Estatísticas descritivas do Grupo 3.....	41
Tabela 8 – Estatísticas descritivas das variáveis caraterizadoras das Áreas com Maior Artificialização.....	45
Tabela 9 – Estatísticas descritivas das variáveis caraterizadoras das Áreas Verdes	46
Tabela 10 – Estatísticas descritivas das variáveis caraterizadoras das Áreas Mistas de Transição.....	47
Tabela 11 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no verão	63
Tabela 12 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no verão	63
Tabela 13 – Matriz de classificação das áreas críticas no verão (calor extremo)	65
Tabela 14 – Matriz de classificação das áreas críticas no inverno (frio extremo)	67
Tabela 15 – Matriz de níveis de prioridade para a promoção da qualificação ambiental outdoor.....	68

I. SUMÁRIO EXECUTIVO

Preâmbulo

De acordo com o estabelecido no Caderno de Encargos do Contrato nº CP/2/2021/DMC outorgado a 23 de fevereiro de 2022, vimos, por este meio, dar cumprimento ao estabelecido na alínea c) do ponto 2 da 5ª Cláusula onde se prevê que até à 1.ª semana do 4.º mês após outorga de contrato seja entregue o relatório de acompanhamento relativo à fase 2 e à fase 3 (até ao ponto 3.11).

Este *Deliverable* (D3), de acordo com o Contrato nº CP/2/2021/DMC outorgado a 23 de fevereiro de 2022, prevê que depois de recolhida e analisada a informação fundamental disponível sejam identificadas espacialmente as áreas críticas do ponto de vista do desconforto bioclimático no concelho do Porto.

Estas *Áreas Críticas* do ponto de vista do desconforto bioclimático serão aquelas onde a aplicação do artigo 145º do Plano Diretor Municipal do Porto¹ em vigor deverá ser particularmente incentivada nas operações urbanísticas que venham a ser realizadas.

1. Desafio

O repto para esta etapa foi caracterizar à escala espacial adequada as condições de (des)conforto bioclimático *outdoor* no concelho do Porto onde a introdução voluntária de medidas complementares nas futuras operações urbanísticas a estabelecer no Índice Ambiental (IA.Porto) possam vir a gerar, com uma grande probabilidade de sucesso, melhorias substantivas na adaptação aos riscos climáticos e na inserção harmoniosa do modo de vida urbano no ecossistema em que se insere.

As evidências científicas sobre o aumento significativo dos eventos térmicos extremos no concelho do Porto, a partir da década de 1990² (Monteiro *et al.*, 2018), alia-se ao envelhecimento da população residente, que inclui um número crescente de indivíduos com mais de 65 anos³, para colocar este território frente ao maior desafio a que as sociedades urbanas contemporâneas têm de responder nos nossos dias – o da mudança de paradigma de qualidade de vida e bem-estar–, dada a crescente vulnerabilidade das pessoas, das economias e da natureza perante o aumento de frequência de paroxismos climáticos em espaços urbanos muito artificializados, alheados do seu ecossistema e, portanto, resistentes à adaptação.

¹ Artigo 145º Fomento de qualificação ambiental

1 — A Câmara Municipal irá estabelecer uma normativa que permita qualificar as operações urbanísticas na perspetiva ambiental e energética (índice ambiental).

2 — As operações urbanísticas que requeiram a respetiva qualificação ambiental poderão gozar, em função da qualificação que obtenham e em conformidade com futura regulamentação municipal:

a) De redução de encargos urbanísticos; e/ou

b) De majoração do índice de edificabilidade de 0,2 nas áreas de blocos isolados de implantação livre e áreas de atividades económicas de tipo II, respetivamente, até ao máximo de 1,2 e de 1,6. (Diário da República, 2ª Série de 20 de Janeiro de 2022, pg.356)

² Documentada nas longas séries de registos climáticos das estações de Porto - Serra do Pilar (1900 - 2007) e Porto - Pedras Rubras.

³ Como atestam os resultados provisórios dos Censos 2021.

Fazer e viver a cidade passa, cada vez mais, por intervir à micro e mesoescala de modo holístico e sistémico para que todas as intervenções levem em conta simultaneamente a adaptação aos riscos climáticos, o incremento da vitalidade socioeconómica, a inclusão e a equidade.

À escala local, tem vindo a ser escolhida como estratégia de ação a tentativa de replicação do modo de funcionamento dos ecossistemas, experimentando, por exemplo, a renaturalização dos espaços abertos públicos, as intervenções 'verdes' nos edifícios, a reposição do bom funcionamento do ciclo hidrológico ou a modificação do cocktail gasoso da baixa atmosfera (CE, 2015) ou seja, medidas que visem: i) a redução do *stress* térmico, fomentando assim a adaptação aos riscos climáticos decorrentes de eventos térmicos extremos (e adicionalmente a mitigação climática à escala local, através do aumento do sequestro de carbono); ii) a redução dos gastos energéticos, ao nível do quarteirão e dos edifícios individuais; iii) a redução da incidência de tipos crónicos e dispendiosos de doença, como doenças cardíacas e respiratórias, obesidade, diabetes tipo 2, contagiosas e a saúde mental e psiquiátrica.

A integração da qualificação ambiental *outdoor* no planeamento e no desenho urbano requer uma maior atenção sobre o modo como a saúde e o bem-estar na cidade podem ser mantidos e promovidos (CE, 2015). E é precisamente neste âmbito que se destaca o conforto bioclimático. Ainda que os efeitos mais graves sobre a saúde estejam relacionados com os eventos térmicos extremos, uma grande parte da população pode sofrer sintomas de *stress* térmico decorrentes de grandes diferenças térmicas em curtas distâncias e/ou em períodos temporalmente muito próximos.

A avaliação do conforto térmico no concelho do Porto, a partir do índice *Physiological Equivalent Temperature* (PET) entre 2002 e 2016, revela o predomínio de condições de desconforto ao longo do ano, tanto devido ao calor como ao frio (Monteiro, 2020). Por outro lado, o efeito climático da urbanização amplifica estas situações, criando mosaicos bioclimaticamente muito diversos. Os fatores motivadores deste fenómeno são bem conhecidos:

- Predominância de materiais artificiais nas construções e pavimentos;
- Produção de calor antrópico pelo tráfego, indústria e sistemas de climatização;
- Elevada densidade de edifícios com volumetrias diversas;
- Reduzida cobertura vegetal, nomeadamente de porte arbóreo;
- Reduzida presença de solo e superfícies permeáveis.

A Câmara Municipal do Porto, atenta à necessidade de adaptar o território às ameaças climáticas cada vez mais graves, inesperadas e frequentes, alargou e melhorou o diagnóstico de suporte à decisão, carreando o maior leque possível de evidência científica nas mais diversas áreas temáticas e designadamente também no domínio da climatologia. A assunção clara da necessidade de avaliar a cascata de consequências espoletadas por qualquer intervenção no espaço sugeriu a inclusão, pioneira em Portugal, do Artº 145º na versão atual do Plano Diretor Municipal (PDM, 2022). Como se trata de um incentivo voluntário, exige grande clareza e precisão para garantir a motivação e o seu sucesso.

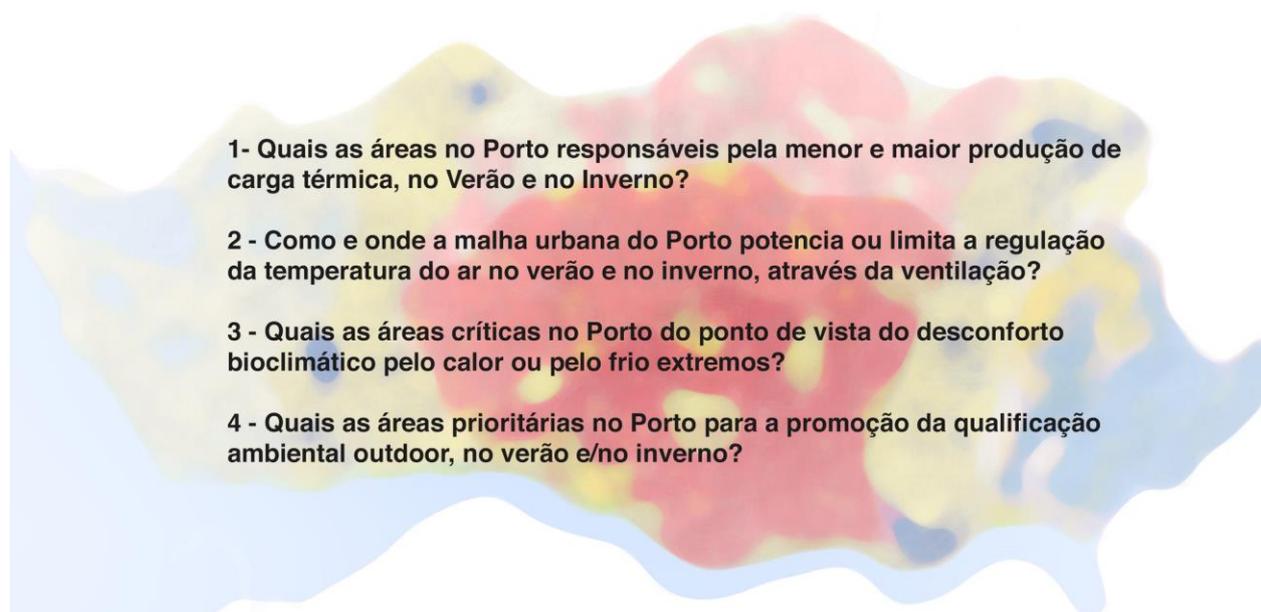
No entanto, tendo em conta o carácter complexo e caótico do comportamento dos sistemas climáticos e a imensa teia relacional natural e artificial existente nos espaços urbanizados, qualquer intervenção com o propósito de melhorar a adaptação aos riscos climáticos terá sempre de saber conviver com um grau substantivo de incerteza, que só pode ser atenuado com uma monitorização rigorosa e com uma capacidade de (re)ação expedita.

Identificando os mosaicos de (des)conforto e bem-estar no Porto, este relatório procura sobretudo dar um contributo útil para fazer com que o ÍA.Porto seja o mais eficaz possível, melhorando a proximidade entre o que a evidência científica sugere, o que os resultados mostram e o que as pessoas sentem. Porque disto dependerá o reconhecimento da importância e a apropriação voluntária desta normativa por parte de todos os atores.

2. Objetivo

Sabendo que o ÍA. Porto, na sua normativa, oferecerá a oportunidade de usufruir de incentivos a todos os promotores de operações urbanísticas que voluntariamente decidam complementar os seus projetos com um leque de medidas de qualificação ambiental, o conhecimento das áreas prioritárias para a a qualificação ambiental *outdoor* pretende ser uma âncora fundamental para: i) a escolha das terapias mais adequadas que integrarão a ferramenta de ponderação dos incentivos; ii) elucidar o promotor, de forma simples, sobre as características de conforto bioclimático em que vai fazer o seu investimento.

A definição das áreas prioritárias para a qualificação ambiental outdoor resultou da resposta a quatro questões principais:



3. Resultados relevantes

3.1. Áreas no Porto responsáveis pela menor e maior produção de carga térmica, no Verão e no Inverno

Por carga térmica entende-se a quantidade de calor ou o somatório de todas as formas de calor presentes num determinado ambiente. Quando a carga térmica de um dado local é elevada, o calor produzido vai sobreaquecer o ar. Isto implica que, quando pretendida, a reposição da situação inicial só poderá ser assegurada com a eliminação de parte do calor excedentário colocado na atmosfera. E isso pode ser conseguido quer com a gestão dos materiais artificiais utilizados e da forma e densidade do edificado, quer com a atenuação das emissões de calor antrópico, mas também da utilização de áreas verdes devido ao seu efeito de arrefecimento do ar (Ren *et al.*, 2012).

Em meio urbano, o balanço energético depende, para além da radiação solar recebida, dos materiais artificiais, do calor antrópico e da densidade, volumetria e geometria do edificado, bem como da presença de mosaicos de água superficiais e de áreas verdes (Ren *et al.*, 2012). Deste modo, a avaliação da carga térmica permite identificar as áreas do Porto que mais contribuem para o sobreaquecimento do ar, tanto localmente como nas áreas adjacentes ou próximas, e a

formação de ilhas de calor e de frescura urbanas, que modificam as condições de conforto bioclimático vivenciadas junto ao solo.

A este padrão já de si bastante complexo, acresce ainda a especificidade do *sítio* e da *posição geográfica* portuense que conjugadas com a latitude recriam ao longo do ano pelo menos três momentos termicamente muito diversos: i) o verão; ii) o inverno; iii) o outono e primavera. Esta nota não é um pormenor porque tem implicações consideráveis no sucesso das ações a incluir no ÍA.Porto porque o menu de terapêuticas que venham a ser sugeridas para atenuar as patologias identificadas, e que são intervenções duradouras de um menu internacionalmente testado, terão de ter em conta a variabilidade comportamental dos alvos durante o ano.

Deste modo, a avaliação da carga térmica permite identificar as áreas do Porto que mais contribuem para o sobreaquecimento ou o arrefecimento do ar, tanto localmente como nas áreas adjacentes ou próximas (Figura SE1).

Os quarteirões do concelho do Porto foram classificados em função da respetiva carga térmica, permitindo desta maneira distinguir três grandes tipos de áreas:

- **Áreas com baixa carga térmica:** conjunto das áreas verdes com uma significativa capacidade de produção de ar fresco ou frio, devido ao sombreamento e/ou à evapotranspiração. No verão, geram um microclima favorável para os seres humanos e têm igualmente um efeito de frescura direto sobre os quarteirões edificados circunvizinhos. No inverno, a formação de ar frio noturno nas áreas com elevada arborização ou de vegetação predominantemente herbácea contribui para o aumento do desconforto térmico. Esta situação agrava-se quando aliada a más condições de ventilação (ou seja, dificuldade de drenagem através de movimentos catabáticos), que se repercutem na estagnação do ar frio.
- **Áreas com moderada carga térmica:** conjunto de áreas com coberturas e usos do solo muito heterogéneos, que incluem desde quarteirões consideravelmente edificados até aos que apresentam uma muito baixa impermeabilização da superfície. Estas áreas individualizam-se mais pela carga térmica moderada, tanto no verão como no inverno, do que pela respetiva capacidade de arrefecimento do ar. Com efeito, a produção de ar fresco ou frio depende de tipo de vegetação predominante (herbáceo, arbustivo ou arbóreo) em cada quarteirão. Distinguem-se dois tipos de áreas de transição: (1) os quarteirões localizados nas freguesias periféricas, adjacentes às áreas verdes, que beneficiarão diretamente do efeito de frescura que estas criam no verão; e, (2) os quarteirões situados em pleno núcleo central do Porto, inseridos no tecido urbano contínuo, que contribuirão para a atenuação local da carga térmica e o sobreaquecimento do ar no verão, beneficiando climaticamente a sua vizinhança imediata.
- **Áreas com elevada carga térmica:** conjunto de quarteirões com elevada densidade da edificação e de impermeabilização da superfície, exibindo uma elevada carga térmica (ou mesmo sobrecarga no verão) e tendência para o sobreaquecimento do ar ou a formação da ilha de calor urbano, tanto no verão como no inverno (neste caso, apenas durante a noite). Possuem uma capacidade de arrefecimento do ar muito reduzida, devido à presença pontual da vegetação e à evapotranspiração residual, pelo que constituem áreas problemáticas no verão.



• Figura SE₁ – Carga térmica no Porto

3.2. A importância da malha urbana do Porto para potenciar ou limitar a regulação da temperatura do ar no Verão e no Inverno, através da ventilação

A circulação do ar, ou ventilação, no interior da malha urbana é imprescindível para salvaguardar a sua renovação, uma vez que garante:

- a substituição do ar quente (geralmente poluído), que se forma nas áreas com maior carga térmica, por ar fresco (com menor ou sem carga poluente);
- a drenagem do ar frio, evitando a sua acumulação e estagnação.

Posto isto, para o modelo climático do Porto, delineou-se o sistema de ventilação urbana em função da sua importância para a 'compensação climática', à semelhança do modelo de Berlim (Senate Department for Urban Development, Building and Housing, 2003). Assim, no verão, a ventilação promove a redução do calor ambiente por meio dos processos de trocas de ar, contribuindo para a melhoria do conforto bioclimático nas áreas onde a carga térmica é elevada e moderada. Já no inverno, a ventilação impede a estagnação do ar frio por meio da sua drenagem, em áreas com baixa carga térmica.

Não obstante, é essencial atender ao facto de que a ventilação elevada no inverno contribui em algumas áreas para o desconforto pelo frio extremo, uma vez que induz a dissipação do calor ambiente (perdas térmicas). Por sua vez, teve-se igualmente em conta que a densidade e a altura do edificado (ou seja, a rugosidade aerodinâmica da superfície) dificultam a entrada e o movimento do ar na camada urbana abaixo do nível das coberturas dos edifícios, comprometendo assim o papel da ventilação nas trocas de ar e redução do desconforto bioclimático. Acresce ainda que o potencial de ventilação foi avaliado relativamente às noites de verão e de inverno, quando as condições de *stress* térmico pelo calor ou pelo frio têm consequências mais severas sobre a saúde.

No Porto, o ar fresco ou frio noturno pode ter diversas proveniências:

- transporte por ventos gerados à escala regional, sob certas condições meteorológicas de maior agitação atmosférica (ventos regionais);
- transporte por ventos gerados à escala local, a partir do mar próximo à linha de costa e do rio Douro (brisa do mar e brisa do rio, respetivamente);
- fluxos gerados à escala intraurbana, a partir das áreas mais frias ou frescas (orografia, espaços verdes, ruas muito sombrias, orientação da rede viária favorável à travagem ou aceleração do vento, canais rodo ou ferroviários, etc.).

As brisas do mar e do rio, assim como os fluxos de ar intraurbanos só se formam ou são mais evidentes sob condições meteorológicas de calma atmosférica (noites anticiclónicas), sendo que estas predominam no verão. É também no verão que as brisas são mais intensas.

Pelo explanado, o sistema de ventilação do Porto foi definido em função dos seguintes fatores:

- exposição aos ventos regionais de N, NW e W no verão, e de S, SE e E no inverno (Monteiro *et al.*, 2018);
- exposição à brisa do mar e do rio;
- efeito de frescura das áreas verdes;
- rugosidade aerodinâmica da malha urbana;
- existência de canais ou corredores de ventilação preferenciais, no interior da malha urbana.

Da interseção destas variáveis resultaram grandes áreas com condições homogéneas no verão e no inverno, que foram hierarquizadas em função do respetivo potencial de ventilação.

No caso do verão, distinguem-se seis áreas homogéneas (Figura SE2), cujos critérios de classificação se encontram sintetizados na Tabela SE1. Para o inverno, delimitaram-se sete áreas homogéneas (Figura SE3), cujos critérios de classificação se encontram sintetizados na Tabela SE2

Tabela SE1 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no verão

Área (ID)	Exposição			Produção de ar fresco pelas áreas verdes	Rugosidade	Principais Processos de Trocas de Ar	Potencial de Ventilação
	Vento Regional	Brisa do Mar	Brisa do Rio (margem ribeirinha)				
1	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Muito Baixo	Predominantemente Elevada	— (Brisa do rio)	Muito Baixo
2	Elevada	Sem influência	Sem influência	Baixo	Moderada a Elevada	Vento Regional	Baixo
3	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Moderado
4	Elevada	Sem influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Moderado
5	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Brisa do Parque, potenciada pela orografia.	Elevado
6	Moderada a Elevada	Elevada a Moderada	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Brisa do Mar (Vento Regional, Brisa do Parque)	Muito Elevado

Tabela SE2 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no inverno

Área (ID)	Exposição			Produção de ar fresco pelas áreas verdes	Rugosidade	Principais Processos de Trocas de Ar	Potencial de ventilação
	Vento Regional	Brisa do Mar	Brisa do Rio (margem ribeirinha)				
1	Moderada a Elevada	Sem Influência	Moderada	Muito Baixo	Predominantemente Elevada	Vento Regional	Moderado
2	Baixa a Muito Baixa	Sem Influência	Sem influência	Baixo	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Muito Baixo
3	Elevada	Sem Influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Elevado
4	Baixa a Muito Baixa	Sem Influência	Sem influência	Moderado	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Baixo
5	Elevada	Sem Influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Elevado
6	Moderada a Elevada	Sem Influência	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Vento Regional e Brisa do Parque, potenciada pela orografia	Muito Elevado
7	Baixa a Muito Baixa	Elevada a Moderada	Moderada	Baixa	Moderada a Elevada	Brisa do Mar	Moderado

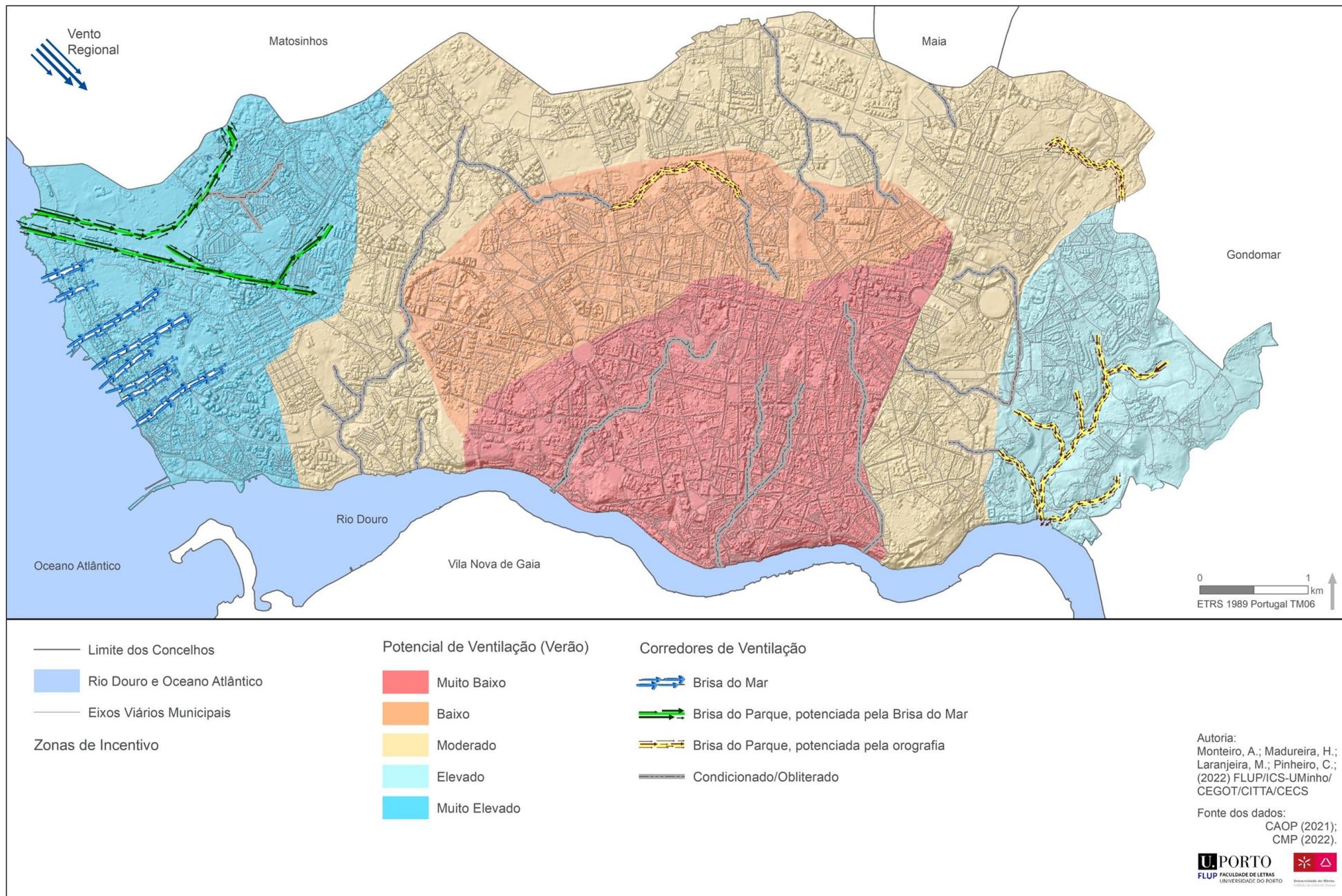


Figura SE2 – Sistema de ventilação no Porto, no Verão

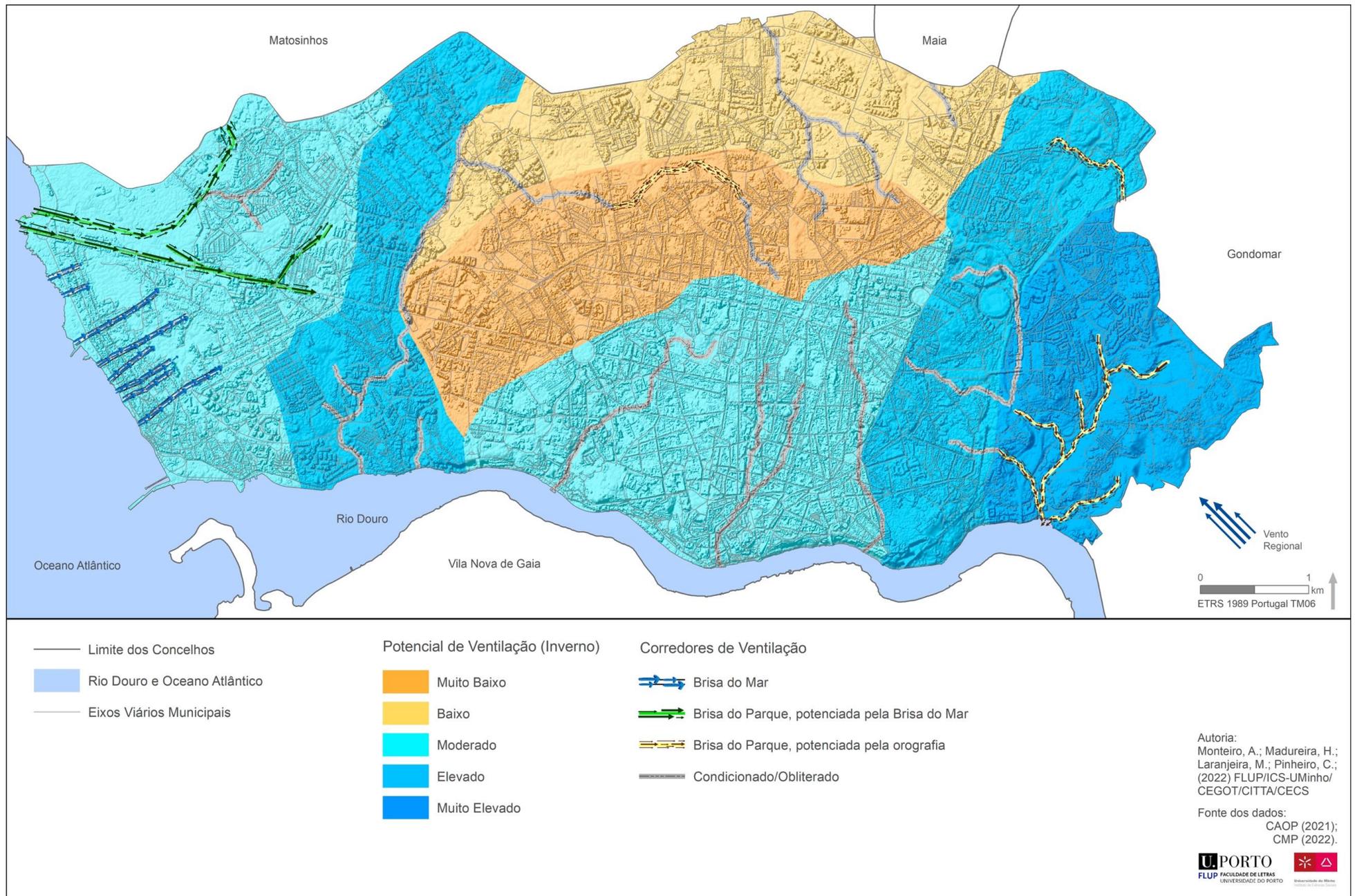


Figura SE₃ – Sistema de ventilação no Porto, no inverno

3.3. Áreas críticas no Porto do ponto de vista do desconforto bioclimático pelo calor e frio extremos

As áreas críticas do ponto de vista do desconforto bioclimático foram classificadas com base no cruzamento da informação acerca da carga térmica e do potencial de ventilação para cada quarteirão. No que diz respeito ao verão, a classificação das áreas críticas partiu da consideração de duas situações diametralmente opostas, sendo que se têm:

- *áreas extremamente críticas em relação ao calor extremo* onde, a par da produção de elevada carga térmica, se verifica um potencial de ventilação baixo a muito baixo; e,
- *áreas nada críticas em relação ao calor extremo*, caracterizadas simultaneamente por baixa carga térmica e um potencial de ventilação muito elevado a elevado.

As áreas caracterizadas por níveis críticos intermédios obtiveram-se através dos restantes cruzamentos entre as classes de carga térmica e de potencial de ventilação, tal como consta na Tabela SE3. Daqui, resultou o mapa síntese da Figura SE4.

Para atenuar o calor extremo no verão é importante utilizar – e maximizar – a capacidade de arrefecimento do ar pelas áreas verdes existentes e desta forma mitigar os efeitos prejudiciais da ilha de calor urbano sobre o conforto bioclimático, a saúde e os gastos energéticos com o esforço de climatização dos edifícios (Aleksandrowicz *et al.*, 2017). Neste sentido, apontam-se as seguintes recomendações no que diz respeito à carga térmica:

- **Áreas com elevada carga térmica:** trata-se das áreas mais problemáticas no verão, cuja melhoria das condições bioclimáticas passa necessariamente pela eliminação de parte do calor ambiente, através de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que aumentem a sombra (natural e/ou artificial) e reduzam o nível de impermeabilização (*de-sealing*), incrementando o arrefecimento evaporativo do ar por superfícies permeáveis e vegetadas.
- **Áreas com moderada carga térmica:** no seu conjunto, são áreas especialmente sensíveis à densificação do edificado pelo aumento da carga térmica que acarreta, tanto mais que no Porto estas áreas consubstanciam a interface espacial entre os quarteirões com baixa e elevada carga térmica. A adoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que minimizem os ganhos térmicos deve ser acautelada em todas as intervenções urbanísticas.
- **Áreas com baixa carga térmica:** correspondem a áreas verdes muito sensíveis tanto ao aumento da impermeabilização do solo como à redução da cobertura vegetal (especialmente de nível arbóreo), que modificam negativamente a carga térmica. São áreas cuja capacidade de arrefecimento do ar no verão deve ser salvaguardada.

A par disto, é importante atender igualmente aos seguintes aspetos relativos ao potencial de ventilação nas noites de verão (Tabela SE3)

- **Áreas com potencial de ventilação muito baixo a baixo:** constituem as áreas mais problemáticas durante a noite no verão, pelo que necessitam de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que promovam as trocas de calor à microescala (escalas do quarteirão e do edifício), bem como a (re)criação de corredores de ventilação.
- **Áreas com potencial de ventilação moderado:** nestas áreas são particularmente necessárias medidas de qualificação ambiental *outdoor* que reforcem/otimizem o potencial de ventilação atual, através da (re)criação de corredores de ventilação.

- **Áreas com potencial de ventilação elevado a muito elevado:** nestas áreas é fundamental salvaguardar o potencial de ventilação atual, preservando os corredores de ventilação existentes e (re)criando-os onde necessário.

A classificação das áreas críticas em relação ao desconforto sentido no inverno fez-se de acordo com a lógica adotada para o caso do verão. Desta feita, assumiram-se como extremos opostos as seguintes situações:

- *áreas extremamente críticas em relação ao frio extremo* onde se verifica baixa carga térmica em simultâneo com um potencial de ventilação elevado a muito elevado; e,
- *áreas nada críticas em relação ao frio extremo*, caracterizadas por elevada carga térmica e um potencial de ventilação muito baixo a baixo.

A partir dos outros cruzamentos possíveis entre as diferentes classes de carga térmica e de potencial de ventilação, identificaram-se as áreas com níveis críticos intermédios, como mostra a Tabela SE4. O mapa síntese correspondente é ilustrado na Figura SE5.

No inverno é fundamental promover condições de abrigo que diminuam o desconforto *outdoor* causado pelo frio extremo (Tabela SE4). A par disto, é também necessária a minimização das perdas térmicas por parte dos edifícios, de maneira a reduzir as necessidades energéticas de climatização. A este respeito, apontam-se as seguintes recomendações relativas à carga térmica:

- **Áreas com baixa carga térmica:** constituem as áreas mais problemáticas no inverno. Por se tratarem no seu conjunto de áreas verdes, quanto maior for o grau de arborização, por um lado, ou a superfície ocupada por vegetação herbácea (com elevado *sky view factor*), por outro, maior será a produção de ar frio noturno. Assim, uma adequada seleção das espécies arbóreas, bem como a composição e configuração espacial dos vários níveis de vegetação nestas áreas são aspetos cruciais a ter em atenção na adoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor*, de modo a promover o aumento dos ganhos térmicos durante o inverno.
- **Áreas com moderada carga térmica:** no seu conjunto, são áreas onde devem ser promovidas, em todas as intervenções urbanísticas, medidas de qualificação ambiental *outdoor* que minimizem as perdas térmicas.
- **Áreas com elevada carga térmica:** não constituem áreas problemáticas no inverno, devendo-se acautelar as perdas térmicas.

Concomitantemente, é necessário considerar os seguintes aspetos relativos ao potencial de ventilação nas noites de inverno (Tabela SE4):

- **Áreas com potencial de ventilação elevado a muito elevado:** são áreas que se revelam muito problemáticas no inverno, pois potenciam o desconforto bioclimático pelo frio extremo, dada a dissipação do calor ambiente (e eventual efeito *wind chill*). Por outro lado, quando coincidem com áreas verdes, produtoras de ar frio noturno, torna-se crucial salvaguardar o potencial de ventilação, de modo a impedir a estagnação do ar. Assim sendo, nestas áreas são tão importantes as medidas de qualificação ambiental que promovam condições de abrigo *outdoor*, como preservar ou (re)criar corredores de ventilação que assegurem a drenagem do ar frio, onde necessário.
- **Áreas com potencial de ventilação moderado:** nestas áreas são particularmente necessárias medidas de qualificação ambiental que otimizem as condições de abrigo *outdoor*.
- **Áreas com potencial de ventilação muito baixo a baixo:** nestas áreas as intervenções urbanísticas devem salvaguardar/aproveitar as condições de abrigo *outdoor*

Tabela SE3 – Matriz de classificação das áreas críticas no verão (calor extremo)

Potencial de Ventilação \ Carga Térmica	Muito Elevado a Elevado	Moderado	Baixo a Muito Baixo
Baixa	Nada Críticas salvaguardar a capacidade de arrefecimento do ar	Pouco Críticas otimizar a ventilação	Críticas promover a ventilação
Moderada	Pouco Críticas otimizar a capacidade de arrefecimento do ar	Críticas otimizar a capacidade de arrefecimento do ar e a ventilação	Muito Críticas promover a ventilação e otimizar a capacidade de arrefecimento do ar
Elevada	Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar	Muito Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar e otimizar a ventilação	Extremamente Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar e a ventilação

Tabela SE4 – Matriz de classificação das áreas críticas no inverno (frio extremo)

Potencial de Ventilação \ Carga Térmica	Muito Baixo a Baixo	Moderado	Elevado a Muito Elevado
Elevada	Nada Críticas salvaguardar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Pouco Críticas otimizar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Críticas promover as condições de abrigo <i>outdoor</i>
Moderada	Pouco Críticas minimizar as perdas térmicas	Críticas minimizar as perdas térmicas e otimizar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Muito Críticas salvaguardar a ventilação (impedir a estagnação do ar frio), promover as condições de abrigo <i>outdoor</i> e minimizar as perdas térmicas
Baixa	Críticas promover os ganhos térmicos	Críticas Salvaguardar a ventilação (efeito amenizador da temperatura do ar pelas brisas do mar e rio)	Extremamente Críticas salvaguardar a ventilação (impedir a estagnação do ar frio), promover as condições de abrigo <i>outdoor</i> e os ganhos térmicos

3.4. Áreas prioritárias no Porto para a promoção da qualificação ambiental outdoor, no verão e/ou no Inverno

A conjugação das áreas críticas devido ao desconforto pelo calor (verão) e ao desconforto pelo frio (inverno) constituiu a base para estabelecer diferentes graus de prioridade no que respeita à promoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor* em cada uma destas estações do ano (Tabela SE5). Esta síntese final consubstancia-se na definição das áreas prioritárias para a promoção da qualificação ambiental outdoor (Figura SE6).

Tabela SE5 – Matriz de níveis de prioridade para a promoção da qualificação ambiental outdoor

		Áreas Críticas em Relação ao Frio Extremo (Inverno)				
		Extremamente Crítica	Muito Crítica	Crítica	Pouco Crítica	Não Crítica
Área Críticas em Relação ao Calor Extremo (Verão)	Extremamente Crítica	S.O.	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário
	Muito Crítica	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável
	Crítica	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.
	Pouco Crítica	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.	S.O.
	Não Crítica	Prioritário	S.O.	Recomendável	S.O.	S.O.

S.O.=Sem Observações

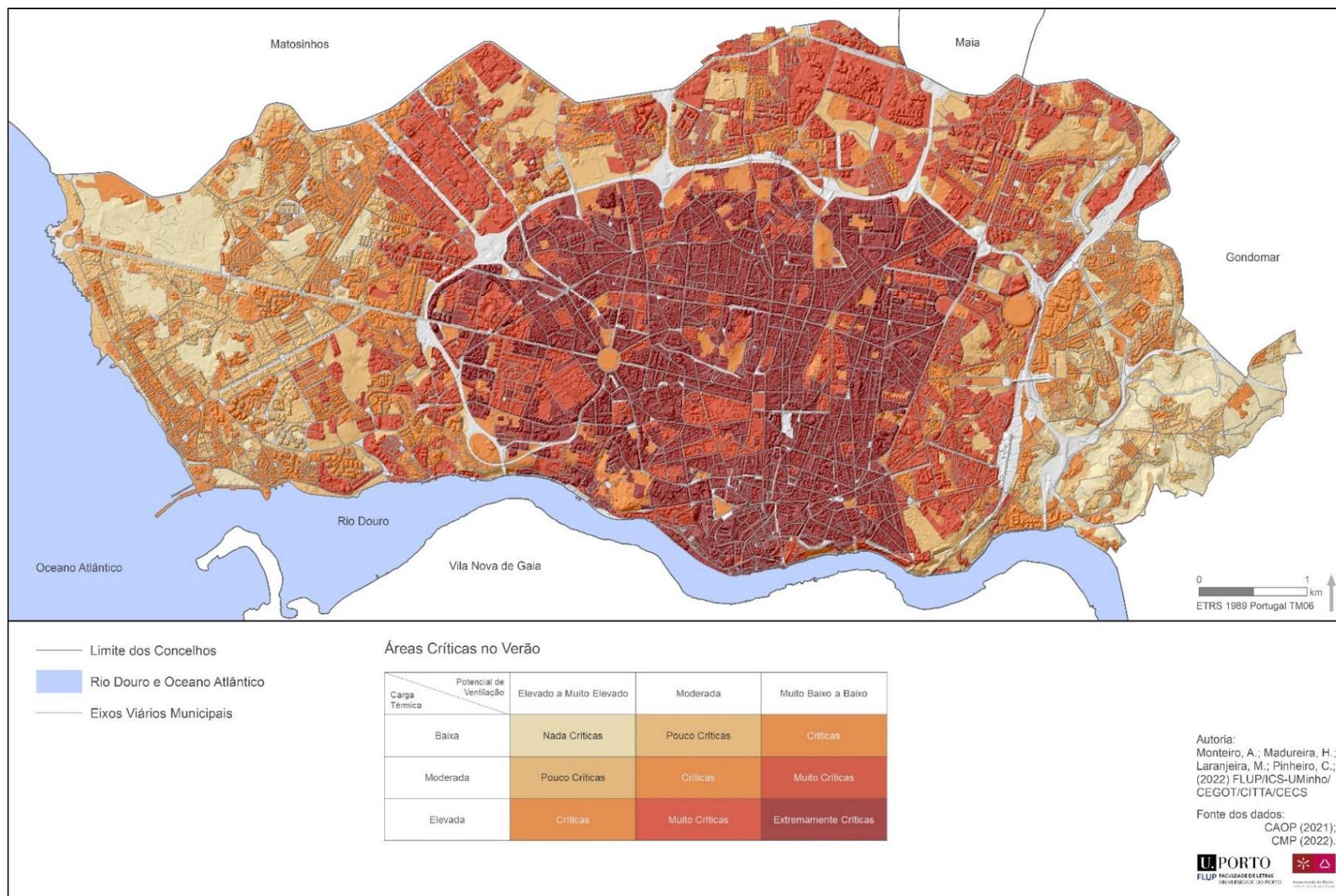


Figura SE4 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (calor extremo) no verão

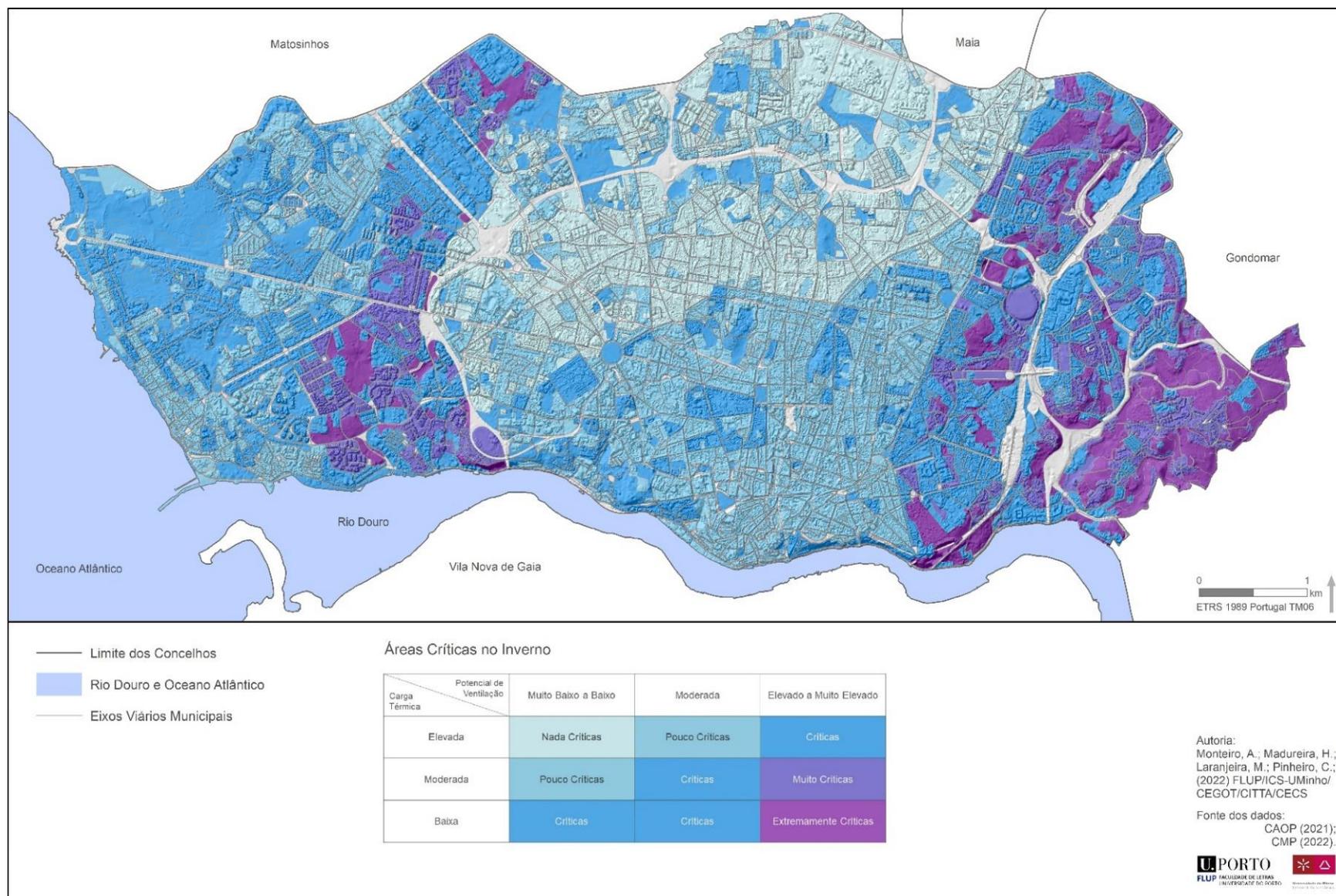
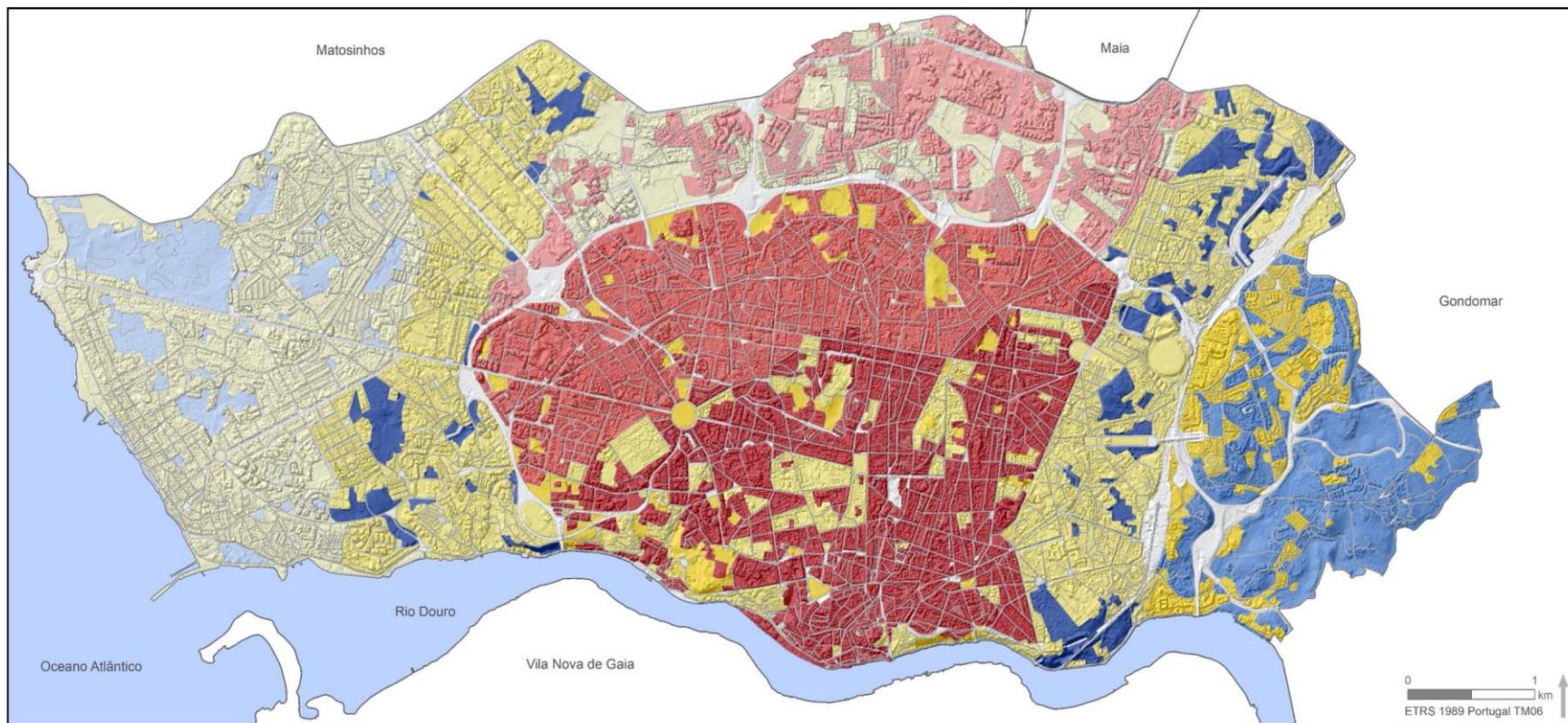


Figura SE5 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (frio extremo) no inverno



- Limite dos Concelhos
- Rio Douro e Oceano Atlântico
- Eixos Viários Municipais

Prioridade para Qualificação Ambiental Outdoor

		Áreas Críticas em Relação ao Frio Extremo (Inverno)				
		Extremamente Crítica	Muito Crítica	Crítica	Pouco Crítica	Não Crítica
Área Críticas em Relação ao Calor Extremo (Verão)	Extremamente Crítica	S.O.	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário
	Muito Crítica	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável
	Crítica	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.
	Pouco Crítica	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.	S.O.
	Não Crítica	Prioritário	S.O.	Recomendável	S.O.	S.O.

Autoria:
 Monteiro, A.; Madureira, H.;
 Laranjeira, M.; Pinheiro, C.;
 (2022) FLUP/ICS-UMinho/
 CEGOT/CITTA/CECS

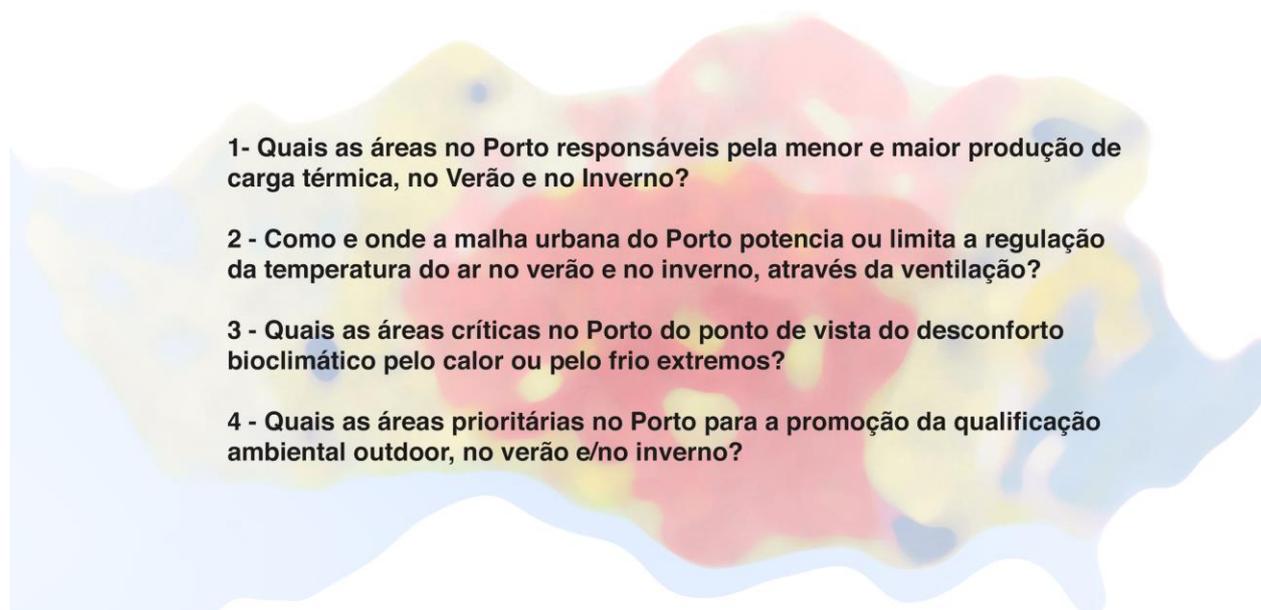
Fonte dos dados:
 CAOP (2021);
 CMP (2022).



Figura SE6 – Áreas prioritárias para a qualificação ambiental outdoor

II. RELATÓRIO TÉCNICO: DESCRIÇÃO E JUSTIFICAÇÃO METODOLÓGICA

O objetivo do presente estudo consistiu, em primeiro lugar, no desenvolvimento de um modelo climático estruturado em torno das duas primeiras questões de partida supramencionadas, no qual assenta o diagnóstico sobre o desconforto bioclimático do Porto (que responde à terceira questão de partida). E, em segundo lugar, na priorização das áreas críticas identificadas relativamente à promoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor*, respondendo assim à quarta questão de partida.



Neste documento pretende-se descrever, com o detalhe possível, os pressupostos e procedimentos adotados para tratar e analisar as variáveis do modelo climático, assim como a análise aos resultados diretamente obtidos com os métodos utilizados. Esta secção foi estruturada de forma sequencial, de acordo com as duas vertentes fulcrais do modelo climático do Porto:

1. Distinção de áreas em função da carga térmica produzida;
2. Delineação do sistema de ventilação.

Para a elaboração do modelo climático do Porto realizou-se uma revisão abrangente da literatura científica, bem como da experiência de outras cidades, guiada pelos exemplos da aplicação de índices ambientais analisados pela equipa do projeto em relatório anterior – e de que se destaca o caso particular de Berlim (Alemanha). Esta revisão permitiu informar a seleção das variáveis ou indicadores mais adequados ao modelo climático.

Para cada componente, desenvolveram-se os seguintes tópicos: variáveis utilizadas; metodologia, incluindo sempre que necessária a descrição de resultados intercalares.

1. Distinção de Áreas em Função da Carga Térmica Produzida

1.1. Variáveis de base

De entre as características da cobertura e uso do solo que se demonstram determinantes para avaliar a carga térmica e a formação de microclimas urbanos próximo da superfície (na atmosfera urbana inferior, ou camada urbana ao nível das coberturas), examinaram-se as seguintes, à escala do quarteirão:

- Área impermeabilizada (%);
- Albedo das superfícies;

- Sombra das árvores, gerada em função da cobertura do solo pelas respetivas copas (%);
- Evapotranspiração potencial normalizada, para janeiro e julho;
- Temperatura de superfície, no período diurno de aquecimento (11h), para o verão e o inverno;
- Temperatura de superfície, no período noturno de arrefecimento (22h), para o verão e o inverno.

Adicionalmente, foram tidas em conta duas variáveis relativas à radiação solar incidente nos solstícios do verão e do inverno – ou seja, a intensidade da radiação (W/m^2) e o período médio da radiação direta (nº horas de sol).

Conferiram-se as bases de dados geográficos da Câmara Municipal do Porto (CMP) com as produzidas e disponibilizadas pelo *Land Monitoring Service*, do Programa Copernicus da União Europeia (Agência Europeia do Ambiente), tendo-se optado por utilizar estas últimas devido quer ao maior pormenor dos limites espaciais dos vários quarteirões quer à elevada desagregação do sistema de classificação da cobertura e uso do solo – nomeadamente no que se refere à distinção entre vários tipos de tecido urbano, em função da respetiva densidade do edificado e grau de impermeabilização da superfície. As duas bases de dados a que se recorreu foram especificamente as seguintes:

- Cobertura e uso do Solo: 'Urban Atlas 2018', cuja informação técnica (metadata) pode ser consultada em <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018>;
- Grau da densidade da cobertura das árvores: 'High Resolution Layer: Tree Cover Density (TCD) 2018', cuja informação técnica (metadata) pode ser consultada em <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/foresTs/tree-cover-density/status-maps/tree-cover-density-2018>.

O cálculo de determinadas variáveis exigiu a obtenção de informação a partir de bases de dados mundiais, nomeadamente:

- Evapotranspiração de referência (ET_o): o CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) facultou informação espacial global sobre a evapotranspiração potencial (média), para o período 1970-2000, a partir da base de dados 'Global Reference Evapo-Transpiration (Global-ET_o)', produzida por Trabucco e Zomer (2019), e disponibilizada em <https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>;
- Temperatura de Superfície: derivada a partir da banda térmica de imagens selecionadas do Arquivo Landsat, disponibilizado pelo United States Geological Survey (USGS), em <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

1.2. Metodologia

A avaliação da carga térmica implicou a realização de um conjunto de etapas metodológicas e processuais que se passam a descrever. Na sua maioria, os dados originais utilizados para derivar as variáveis supramencionadas consistem em séries espaciais de valores contínuos (em formato *raster*), pelo que se procedeu ao cálculo do valor médio para o polígono correspondente a cada quarteirão particular. Para determinados parâmetros ou variáveis foram adotados valores de referência, divulgados em publicações basilares, tal como será esclarecido oportunamente.

1.2.1. Classificação da cobertura e uso do solo, em função da área impermeabilizada e da densidade da cobertura de árvores

O produto *raster* 'High Resolution Layer: Tree Cover Density (TCD) 2018' fornece informação sobre a cobertura proporcional da copa das árvores por *pixel*, com uma resolução espacial de 10m, que varia entre 0% (totalidade da área não coberta por árvores) e 100%, sendo que a densidade de cobertura das árvores é definida como a projeção vertical das copas das árvores para uma superfície horizontal (<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/foresTs/tree-cover-density/status-maps/tree-cover-density-2018>). O valor médio desta variável foi calculado para cada quarteirão como um indicador da importância da sombra gerada pelas árvores aí existentes (Figura 1).



Figura 1 – Densidade média da cobertura de árvores (2018)

Cruzando esta informação com o sistema de classificação do 'Urban Atlas 2018', com 24 classes representadas no concelho do Porto, procedeu-se a uma subdivisão da cobertura e uso do solo, em função dos intervalos da densidade média de cobertura das árvores de 0%, 0-10%, 10-20%, 20-40%, 40-60% e 60-80% (Figura 1). Como resultado, obteve-se um conjunto de 57 subclasses.

O conjunto alargado de subclasses foi alvo de um reagrupamento, tendo em conta os seguintes critérios:

- dicotomia entre áreas não construídas/edificadas (superfícies não impermeabilizadas) e áreas construídas/edificadas (superfícies impermeabilizadas);
- grau de impermeabilização do solo nas áreas construídas/edificadas (Figura 2), com base na informação complementar às várias classes de tecido urbano do 'Urban Atlas 2018' ('Sealing Level'; S.L.) – que apresenta um maior pormenor relativamente aos dados por subsecção estatística (Figura 3) – e/ou na verificação visual a partir da fotografia área/imagem de satélite disponibilizada pela plataforma Google Earth;
- classe da densidade média da cobertura de árvores.

Assim, alcançou-se um total de 28 grupos, tal como a Tabela 1 sintetiza. De entre os grupos obtidos, distinguiram-se aqueles em que a cobertura do solo é predominantemente herbácea (ou eventualmente arbustiva) – podendo esta estar associada às margens dos corpos de água – e cuja densidade média de cobertura das árvores é em geral superior a 10-20% (excetuam-se os casos dos grupos 15 e 16) para definir o conjunto das áreas que serão doravante designadas como 'áreas verdes'. Foi ainda incluído neste conjunto o grupo 18 (corpos de água e zonas húmidas, sem presença de árvores), com uma muito reduzida representação no concelho do Porto.



Figura 2 – Proporção de área impermeabilizada por bairro (2018)



Figura 3 – Proporção de área impermeabilizada por subsecção estatística (2011)

Tabela 1 – Agrupamento das subclasses de cobertura e uso do solo (com a identificação dos grupos de áreas verdes) e respetivos valores do coeficiente cultural e do albedo

Subclasse de Cobertura do solo/ Uso do solo (Cs/Us)	Grupo de Cs/Us	Área Verde	Coefficiente Cultural (Kc)	Valor Representativo de S.I. para o Cálculo de Kc*/ Cs de Referência para o Valor de Kc	Albedo [†]
T.U. Contínuo (S.I.>80%) e D.M.A=0% U. Industrial, Comercial, Militar, Privada e D.M.A=0% Área Portuária e D.M.A=0% Equip. Desportivo e Lazer e D.M.A=0% Estrutura Isolada e D.M.A=0%	1		0,125	S.I.=95%	0,15
T.U. Contínuo (S.I.>80%) e D.M.A=0-10% U. Industrial, Comercial, Militar, Privada e D.M.A=0-10% Estrutura Isolada e D.M.A=0-10%	2		0,125	S.I.=95%	0,15
T.U. Contínuo (S.I.>80%) e D.M.A=10-20% U. Industrial, Comercial, Militar, Privada e D.M.A=10-20%	3		0,125	S.I.=95%	0,15
T.U. Contínuo (S.I.>80%) e D.M.A=20-40% U. Industrial, Comercial, Militar, Privada e D.M.A=20-40%	4		0,125	S.I.=95%	0,15
Áreas em Construção e D.M.A=0% Litoral c/ ou s/ Vegetação e D.M.A=0%	5		0,5	solo nu**	0,20
Áreas em Construção e D.M.A=0-10% Pedreiras e Lixeiras e D.M.A=0-10%	6		0,5	solo nu**	0,20
T.U. Denso (S.I.50-80%) e D.M.A.=0% Espaço Verde Urbano e D.M.A=0%	7		0,275	S.I.=65%	0,15
T.U. Denso (S.I.50-80%) e D.M.A.=0-10% Equip. Desportivo e Lazer e D.M.A=0-10%	8		0,275	S.I.=65%	0,15
T.U. Dens. Média (S.I.30-50%) e D.M.A.=10-20% Equip. Desportivo e Lazer e D.M.A=10-20%	9		0,4	S.I.=40%	0,19
T.U. Dens. Baixa (S.I.<30%) e D.M.A.=0-10% Espaço Verde Urbano e D.M.A=0-10%	10		0,55	S.I.=10%	0,19
Veg. Herbácea e D.M.A=10-20% Espaço Verde Urbano e D.M.A=10-20%	11	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,20
Veg. Herbácea e D.M.A=20-40% Floresta e D.M.A=20-40% Espaço Verde urbano e D.M.A=20-40% Equip. Desportivo e Lazer e D.M.A=20-40%	12	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,20
Veg. Herbácea e D.M.A=40-60% Floresta e D.M.A=40-60% Espaço Verde Urbano e D.M.A=40-60%	13	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,15
Veg. Herbácea e D.M.A=60-80% Floresta e D.M.A=60-80% Espaço Verde Urbano e D.M.A=60-80%	14	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,15
Veg. Herbácea e D.M.A=0%	15	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,20
Veg. Herbácea e D.M.A=0-10%	16	Sim	0,95	herbáceas, arbustos, árvores de folha larga**	0,20
Corpo de Água e D.M.A=10-20% Corpo de Água e D.M.A=20-40%	17	Sim	1	água; zonas húmidas**	0,075
Corpo de Água e D.M.A=0% Zona Húmida e D.M.A=0%	18	0	1	água; zonas húmidas**	0,075
Pedreiras e Lixeiras e D.M.A=20-40%	19	0	0,5	solo nu**	0,20
T.U. Denso (S.I.50-80%) e D.M.A=10-20%	20	0	0,275	S.I.=65%	0,15
T.U. Denso (S.I.50-80%) e D.M.A=20-40%	21	0	0,275	S.I.=65%	0,15
T.U. Dens. Média (S.I.30-50%) e D.M.A=0%	22	0	0,4	S.I.=40%	0,19
T.U. Dens. Média (S.I.30-50%) e D.M.A=0-10%	23	0	0,4	S.I.=40%	0,19
T.U. Dens. Média (S.I.30-50%) e D.M.A=20-40%	24	0	0,4	S.I.=40%	0,19
T.U. Dens. Baixa (S.I.<30%) e D.M.A=0%	25	0	0,55	S.I.=10%	0,19
T.U. Dens. Baixa (S.I.<30%) e D.M.A=10-20%	26	0	0,55	S.I.=10%	0,19
T.U. Dens. Baixa (S.I.<30%) e D.M.A=20-40%	27	0	0,55	S.I.=10%	0,19
T.U. Dens. Baixa (S.I.<30%) e D.M.A=40-60%	28	0	0,55	S.I.=10%	0,19

T.U.= Tecido Urbano; D.M.A=Densidade Média da Cobertura de Árvores (%); S.I.=Superfície Impermeabilizada(%); *calculado com base na equação $Kc=S.I.*0,1+(1-S.I.)*0,6$, em que S.I.=Superfície Impermeabilizada (o a 1), em Sharp *et al.* (2020); **adaptado de Zawadzka *et al.* (2021) e Sharp *et al.* (2020); †adaptado de Stewart e Oke(2012) e de Goward(2005), que se baseia em Sellers(1965)

1.2.2. Caracterização do albedo e da evapotranspiração potencial normalizada por grupos de cobertura e uso do solo

A fim de estimar o albedo das superfícies, atribuiu-se um valor representativo a cada quarteirão em função do respetivo grupo de cobertura e uso do solo, como consta na Tabela 1. Estes valores basearam-se em duas fontes principais. A primeira consistiu nos intervalos indicativos para o albedo associado às diversas 'Zonas Climáticas Locais' ('Local Climate Zones'; LCZ) – zonamento este que se fundamenta igualmente em diferentes tipos de áreas edificadas e de cobertura do solo -, de acordo com Stewart e Oke (2012). E a segunda diz respeito aos valores de referência do albedo para um conjunto de superfícies selecionadas, publicados em Goward (2005), com base em Sellers (1965). Comparando os valores ou intervalos de valor apresentados nas fontes consultadas, optou-se sempre pela adoção de um valor intermédio do albedo como sendo o representativo para o grupo de cobertura e uso do solo em causa (Tabela 1 e Figura 4).



Figura 4 – Albedo das superfícies

Para avaliar a evapotranspiração potencial por grupo de cobertura e uso do solo elegeu-se o método de cálculo proposto em Sharp *et al.* (2020), que pretende obter um valor normalizado de acordo com a seguinte equação:

$$ETI = Kc * ETO / ETmax$$

em que,

[Eq.1]

ETI=Evapotranspiração Potencial Normalizada (variação entre 0 e 1);

Kc=Coefficiente de Cultura;

ETo=Evapotranspiração de Referência (mm);

ETmax=Valor máximo de ETo na área em causa (mm).

A ETo depende essencialmente das condições climáticas (radiação solar, temperatura do ar, precipitação, humidade relativa do ar, vento) e representa a evapotranspiração de uma cultura padrão (relva, suficientemente irrigada). A ponderação de ETo pelo Kc permite ajustar este valor de referência a cada tipo de cobertura e uso do solo, em função das suas características e processo preponderante (transpiração, nas áreas verdes e evaporação a partir da superfície, nas

áreas não vegetadas). Neste seguimento, calculou-se a ETI relativa aos meses de janeiro e julho para cada quarteirão (Figura 5 e Figura 6, disponibilizados pelo CGIAR-CSI (como referido anteriormente), bem como nos valores de referência de Kc para cada grupo de cobertura e uso do solo (Figura 9), baseados em Sharp *et. al.* (2021) e Zawadzka *et al.* (2021), constantes na Tabela 1.

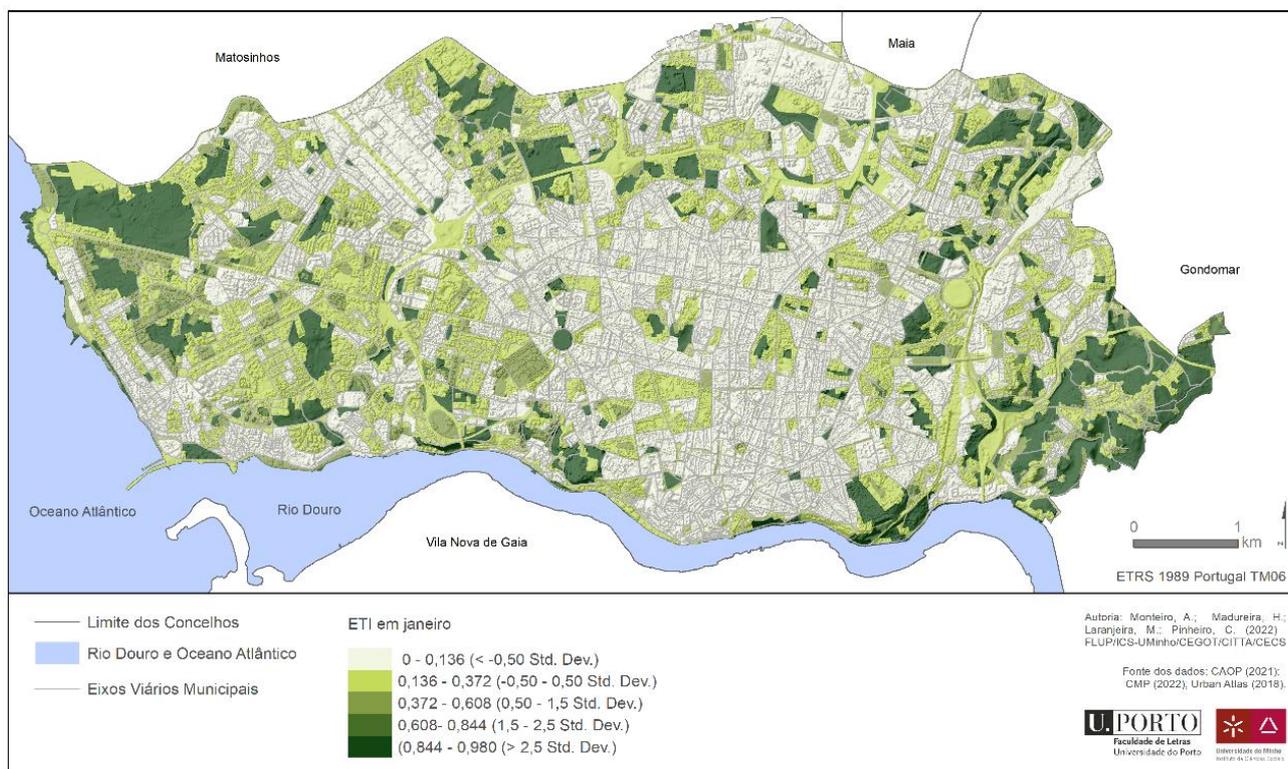


Figura 5 – Evapotranspiração potencial normalizada em janeiro



Figura 6 – Evapotranspiração potencial normalizada em julho

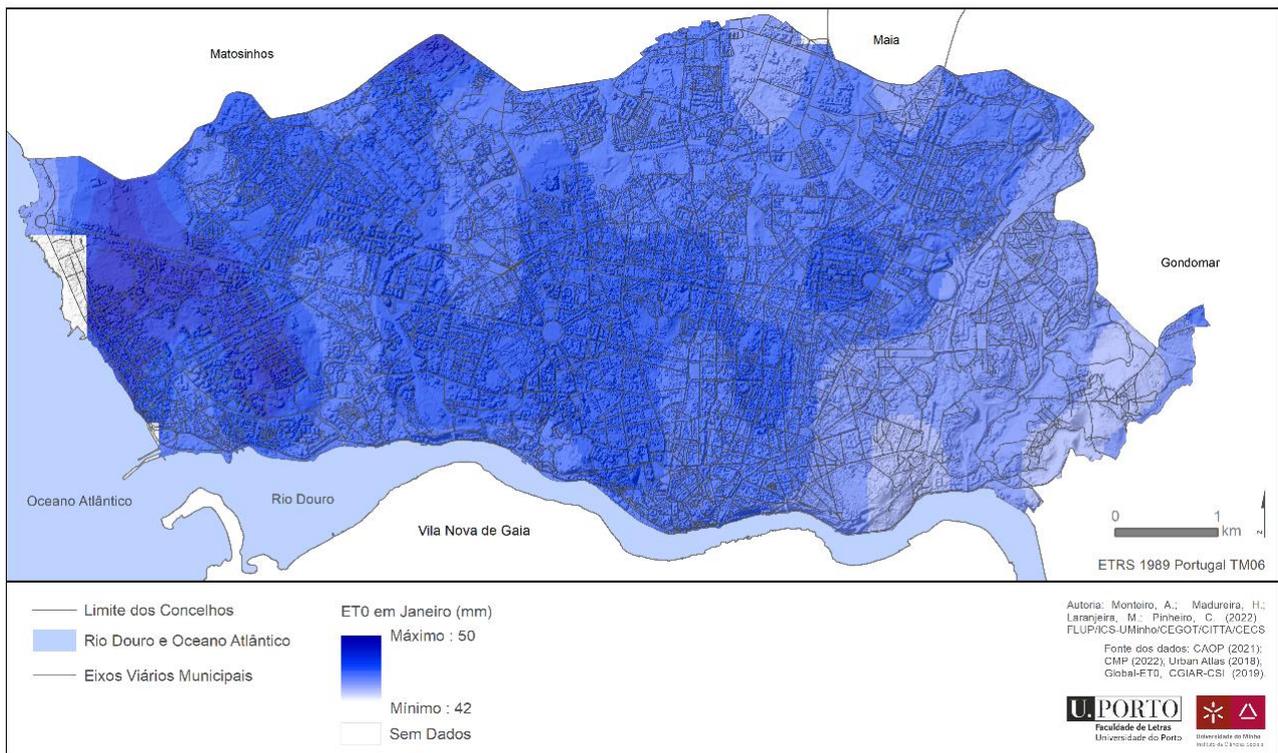


Figura 7 – Evapotranspiração de referência média de janeiro (1970-2000)

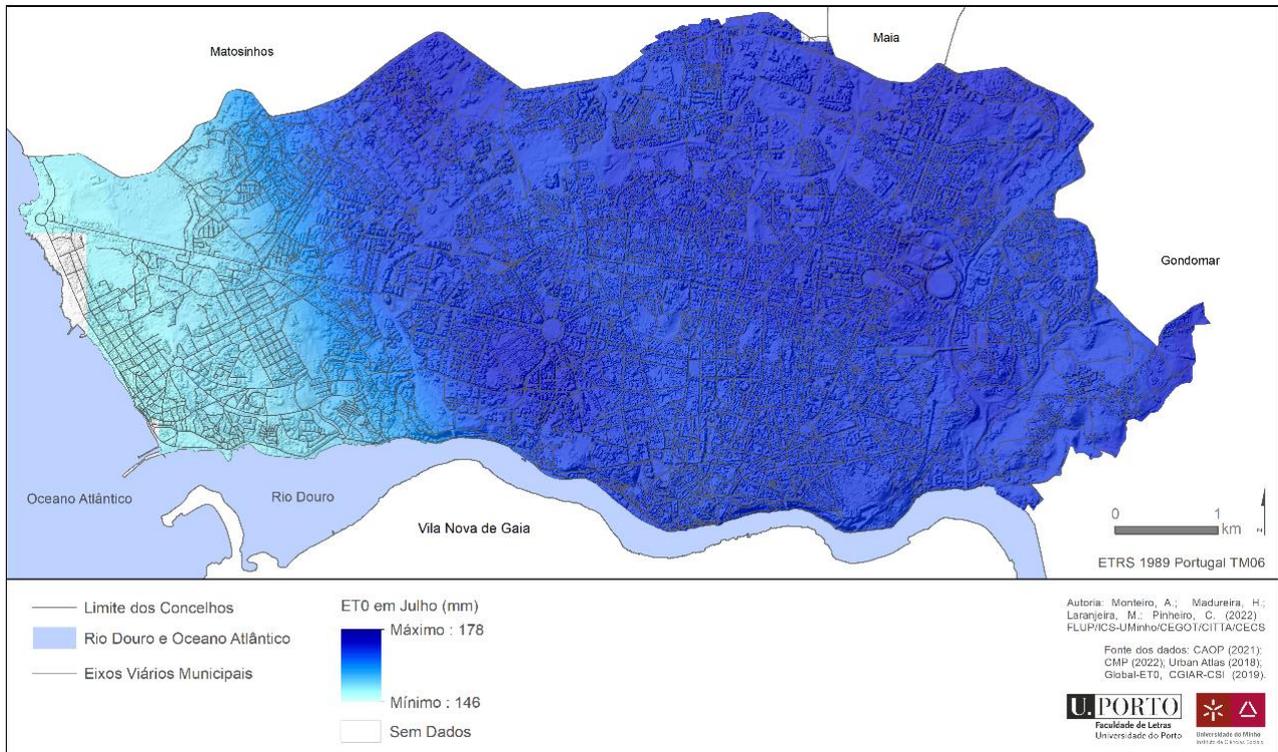


Figura 8 – Evapotranspiração de referência média de julho (1970-2000)

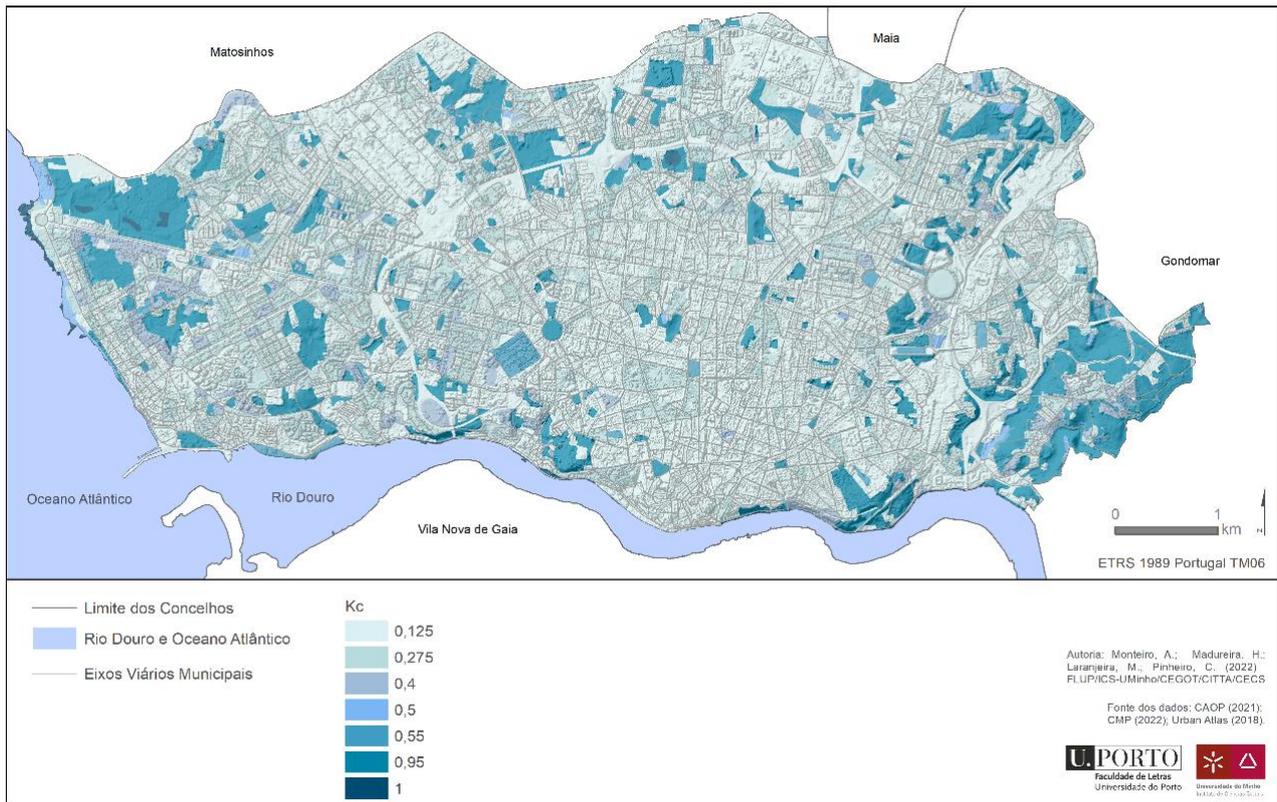


Figura 9 – Coeficiente cultural (Kc)

1.2.3. Cálculo das temperaturas de superfície

Para a análise do ambiente térmico do município do Porto recorreu-se ao arquivo Landsat, mais especificamente ao satélite Landsat 8 OLI, que capta imagens diurnas (*Path 204, Row 031 – 11:13 AM – GMT*) e noturnas (*Path 67, Row 213 – 22:19 PM – GMT*). Contudo, importa notar que o *download* das imagens diurnas do Landsat pode ser efetuado diretamente a partir do United States Geological Survey (USGS) em <https://earthexplorer.usgs.gov/>, enquanto as imagens noturnas são disponibilizadas apenas mediante pedido ao USGS. Com efeito, os procedimentos de seleção das imagens diurnas e noturnas a incluir no estudo relevam-se necessariamente distintos.

Em específico, definiram-se quatro conjuntos de imagens, representativos das seguintes situações: (i) dia no verão; (ii) dia no inverno; (iii) noite no verão; e, (iv) noite no inverno. Note-se que, a nebulosidade inviabiliza totalmente a utilização das imagens, pelo que a análise se restringe obrigatoriamente a condições anticiclónicas.

Para a seleção das imagens diurnas, primeiramente procedeu-se a uma triagem dos registos da Estação Climatológica do Porto - Serra do Pilar (Lat. 41°08'N; Long. 8°36'W; Alt. 93m), no intervalo 2015-2021, de modo a listar os 12 dias com a temperatura máxima mais elevada e os 12 dias com a temperatura mínima mais baixa (Tabela 2 e Tabela 3). Em seguida, cruzaram-se as datas obtidas com o arquivo Landsat para averiguar a disponibilidade de imagens, e, curiosamente, não se verificou nenhuma coincidência entre a passagem do satélite e as datas em que se registaram os valores máximos e mínimos de temperatura. Para maximizar a obtenção de resultados, alargou-se a premissa temporal, correspondendo a imagem selecionada à captura mais próxima (antes ou depois) de cada data em questão. Posto isto, obtiveram-se seis imagens para o verão e três para o inverno.

Para contextualizar os dias de passagem do Landsat procedeu-se à sua caracterização em função dos registos climáticos da Estação Climatológica Porto - Serra do Pilar, sempre que estes dados estavam disponíveis (Tabela 2 e Tabela 3). Ressalve-se que, no caso do verão se optou por não incluir na análise as imagens de 02/08/2017 e de 01/07/2017, em

virtude da ausência de dados de caracterização, e a imagem de 28/07/2021, face às indicações de ocorrência de precipitação (Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4). A imagem de 21/08/2018 não foi incluída por se tratar de uma data muito próxima da imagem de 05/08/2018, mas que apresenta valores de temperatura máxima mais discrepantes. Em sentido oposto, incluiu-se na análise uma imagem de 25/07/2020, por ser coincidente com o período noturno (cujos procedimentos de seleção se descrevem em seguida).

Na 'Coleção 2 - Nível 2', os produtos Landsat já se encontram-se pré-processados, pelo que a banda térmica (ST10), disponibilizada no formato GeoTIFF e com uma resolução de 30m (à semelhança das outras bandas), inclui as necessárias correções radiométricas e atmosféricas (USGS, 2022). A temperatura de superfície (Ts) é obtida por meio da aplicação de um fator de conversão fornecido pelo USGS (2022), sendo que em simultâneo se converteram os valores de Kelvin para graus Celsius:

$$Ts = (ST10 * 0,00341802 + 149) - 273,15$$

em que,

[Eq.2]

Ts=Temperatura de superfície (°C);
ST10=Banda 10 do Landsat 8.

Por fim, efetuou-se o recorte das imagens térmicas para a área administrativa do concelho do Porto, e calculou-se a média de Ts para período diurno de aquecimento no verão – com base nas imagens de 17/07/2016, 05/08/2018 e 25/07/2020 (Figura 10) – e no inverno – a partir das imagens de 06/01/2017, 01/01/2021 e 17/01/2021 (Figura 11).

Para a geração dos mapas da temperatura de superfície noturna foram capturadas imagens da 'Coleção 1 – Nível 1' do satélite Landsat 8 OLI, banda 10 do canal infravermelho termal/TIRS 1, com resolução espacial de 100 metros, mas tratadas e disponibilizadas com pixel de 30 metros pela USGS. As constantes de calibração radiométrica do sensor possibilitaram a conversão dos números digitais (ND) em energia radiante representados em tons de cinza. Para a conversão dos níveis de cinza em informações de radiância foi aplicada a fórmula (USGS, 2018):

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

em que,

[Eq.3]

L_λ=Radiância do topo da atmosfera (Watts/(m² * srad * μm));
M_L=Fator multiplicativo de redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_MULT_BAND_x, onde x é o número da banda);
Q_{cal}= Valores de pixel quantificados e calibrados do produto padrão (DN);
A_L=Fator aditivo de redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_ADD_BAND_x, onde x é o número da banda).

A partir da energia radiante do canal infravermelho termal foi possível obter a temperatura dos alvos, em Kelvin, por meio da fórmula (USGS, 2018):

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

em que,

[Eq.4]

T=Temperatura efetiva no satélite em Kelvin;
K₂=Constante de calibração 2 – valor – 1321.08;
K₁=Constante de calibração 1 – valor – 774.89;
L=Radiância espectral, em Watts / (metro quadrado ster * * mm).

Após esses procedimentos foi feita a conversão da temperatura Kelvin em graus Celsius, subtraindo os valores de temperatura Kelvin de cada pixel da imagem por 273,15.

As quatro imagens representativas do período noturno de arrefecimento no verão foram sintetizadas numa única, em função do valor da média, tal como explicitado anteriormente para as imagens diurnas. Por fim, a partir da Ts média obtida em cada situação – *i.e.*, período diurno de aquecimento, no verão e no inverno, e período noturno de arrefecimento, no verão e no inverno – procedeu-se à extração do valor médio para cada quarteirão, à semelhança do efetuado anteriormente para as outras variáveis (Figura 12 e Figura 13).

Tabela 2 – Avaliação da disponibilidade de imagens Landsat 8 OLI¹ (sem nuvens) para os dias com temperatura máxima(°C) mais elevada, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto - Serra do Pilar

Data ²	Prec. (mm)	T. méd. (°C)	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	HR méd. (%)	HR máx. (%)	HR mín. (%)	Rumo méd. (°)	Rumo máx. (°)	Rumo pred. (°)	V. Méd. (km/h)	V. Máx. (km/h)	Rad. global (kJ/m ²)
25/07/2016	0	28,3	39	19,9	51	83	20	-	-	-	-	-	25288
15/07/2016	0	27,6	38,4	18,3	36	84	18	-	-	-	-	-	24676
03/07/2016	0	26,9	38,2	15,7	55	95	25	-	-	-	-	-	26655
24/07/2016	0	28,2	37,8	19,5	48	83	24	-	-	-	-	-	-
16/07/2016	0	26,7	37,6	18,1	43	75	20	-	-	-	-	-	26136
17/07/2016	0	24,9	34,7	15,5	47	90	21	-	-	-	-	-	26689
20/08/2017	0	29,1	39,5	18,3	41	87	14	-	-	-	-	-	18651,3
02/08/2017³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03/07/2017	0	28,7	38,8	18	45	84	19	-	-	-	-	-	25191
01/07/2017³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03/08/2018	0	28,4	38,1	22,6	60	83	26	-	-	-	-	-	17305,9
02/08/2018	0	28,3	38	19,6	60	94	30	-	-	-	-	-	20838,6
04/08/2018	0	29,1	37,5	22	61	86	33	-	-	-	-	-	19609,5
05/08/2018	0	26,8	36,9	20,7	69	98	34	-	-	-	-	-	19780,8
20/08/2018	0	28,3	37,2	19,4	40	73	22	-	-	-	-	-	20639,9
21/08/2018³	0	25,3	34	19,6	56	89	25	-	-	-	-	-	20204,5
16/07/2021	0	27,6	37	19,6	41	74	19	91	339	3	18	29,2	29726,3
28/07/2021³	0,1	21,2	27,8	14,1	68	98	44	302	357	7	14,8	37,8	29097,6

Notas: 1- as datas referentes às imagens Landsat encontram-se a negrito e sombreadas a preto; 2 - as datas encontram-se ordenadas de modo decrescente em função da temperatura máxima registada no intervalo 2015-2021; 3 - imagem Landsat não incluída na análise; – sem dados. **Variáveis:** Prec. – precipitação; T. méd. - temperatura média; T. máx. - temperatura máxima; T. mín. - temperatura mínima; HR méd. - humidade relativa média; HR máx. - humidade relativa máxima; HR mín. - humidade relativa mínima; Rumo méd. – rumo médio do vento; Rumo máx. - rumo máximo do vento; Rumo Pred. – rumo predominante do vento; V. Méd. – velocidade média; V. Máx. – velocidade máxima.

Tabela 3 – Avaliação da disponibilidade de imagens Landsat 8 OLI¹ (sem nuvens) para os dias com temperatura mínima (°C) mais baixa, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto - Serra do Pilar

Data ²	Prec. (mm)	T. méd. (°C)	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	HR méd. (%)	HR máx. (%)	HR mín. (%)	Rumo méd. (°)	Rumo máx. (°)	Rumo pred. (°)	V. Méd. (km/h)	V. Máx. (km/h)	Rad. global (kJ/m ²)
20/01/2017	0	6,7	16,7	-0,6	64	95	34	-	-	-	-	-	7665,1
23/01/2017	0,1	5,9	16,1	-0,1	82	100	34	-	-	-	-	-	10066,9
25/01/2017	0,1	7,1	16,6	0	79	100	33	-	-	-	-	-	10171,4
15/01/2017	0	7	15	0,1	77	100	49	-	-	-	-	-	9590,8
19/01/2017	0	5	13,3	0,1	60	92	30	-	-	-	-	-	10043,2
06/01/2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09/01/2021	0	4,4	8,5	-1,1	56	82	40	68	26	1	19,4	28,1	-
08/01/2021	0,1	4,1	9,3	-0,7	61	95	27	103	114	2	12,6	42,5	9685
07/01/2021	0,2	3,7	10,1	-0,6	75	96	39	109	121	2	13,7	22,3	9418,1
05/01/2021	0,2	3,5	10,3	-0,5	85	98	47	116	132	3	8,6	20,2	-
01/01/2021	2,3	6	10,2	2,3	84	98	61	254	352	7	16,2	38,5	-
13/01/2021	0,3	4,3	11,4	-0,4	83	97	47	126	128	3	12,2	19,8	9377,9
14/01/2021	0,1	4,1	12,1	-0,4	90	98	56	112	-	3	12,2	-	-
12/01/2021	0,1	4,5	12,2	-0,3	77	96	41	102	143	3	13,3	23,4	9334
17/01/2021	0,2	5,6	14,4	0,3	77	94	45	129	132	3	12,2	23	-

Notas: 1- as datas referentes às imagens Landsat encontram-se a negrito e sombreadas a preto; 2 - as datas encontram-se ordenadas de modo decrescente em função da temperatura máxima registada no intervalo 2015-2021; – sem dados. **Variáveis:** **Prec.** – precipitação; **T. méd.** - temperatura média; **T. máx.** - temperatura máxima; **T. mín.** - temperatura mínima; **HR méd.** - humidade relativa média; **HR máx.** - humidade relativa máxima; **HR mín.** - humidade relativa mínima; **Rumo méd.** – rumo médio do vento; **Rumo máx.** - rumo máximo do vento; **Rumo Pred.** – rumo predominante do vento; **V. Méd.** – velocidade média; **V. Máx.** – velocidade máxima.

Tabela 4 – Caracterização dos dias de captura das imagens Landsat 8 OLI noturnas⁴ de verão e dos dias antecedentes, com base nos registos da Estação Climatológica do Porto – Pedras Rubras

Data	Prec. (mm)	T. méd. (°C)	T. máx. (°C)	T. mín. (°C)	HR méd. (%)	HR máx. (%)	HR mín. (%)	Rumo méd. (°)	Rumo máx. (°)	Rumo pred. (°)	V. Méd. (km/h)	V. Máx. (km/h)	Rad. global (kJ/m ²)
07/07/2020	0	20,1	24,4	17	78	95	58	255	-	-	10,1	23,4	30028
08/07/2020	0	17,9	20,8	16,4	87	97	71	260	-	-	9	20,2	17397,9
09/07/2020	0	19	23,5	15,8	82	100	55	268	-	-	11,9	40	28608,7
23/07/2020	0	19,6	24,5	16,6	85	99	57	68	-	-	11,5	36	26976,2
24/07/2020	0	19,6	25,4	14,8	75	94	49	52	-	-	16,2	50	29300,2
25/07/2020	0	18,9	23,5	14,5	81	98	58	284	-	-	19,8	59,4	29367,9
09/09/2020	0	23,6	31,3	17,9	35	57	19	62	-	-	11,9	31,7	21876,2
10/09/2020	0	20,8	28,9	15,4	55	84	31	62	-	-	7,2	24,5	20067,7
11/09/2020	0	20,1	25,4	15	71	88	46	62	-	-	5,8	18,4	18370,5
25/09/2020	0	15,8	20,4	11,8	68	81	45	74	-	-	17,3	51,1	16878,3
26/09/2020	5,3	15,2	18,6	10,7	83	99	66	78	-	-	10,4	39,6	9998,2
27/09/2020	0	17,4	21,3	12,3	80	94	60	78	-	-	17,3	48,2	16448,3

Notas: 1 -as datas referentes às imagens Landsat encontram-se a negrito e sombreadas a preto; – sem dados. **Variáveis:** **Prec.** – precipitação; **T. méd.** - temperatura média; **T. máx.** - temperatura máxima; **T. mín.** - temperatura mínima; **HR méd.** - humidade relativa média; **HR máx.** - humidade relativa máxima; **HR mín.** - humidade relativa mínima; **Rumo méd.** – rumo médio do vento; **Rumo máx.** - rumo máximo do vento; **Rumo Pred.** – rumo predominante do vento; **V. Méd.** – velocidade média; **V. Máx.** – velocidade máxima.

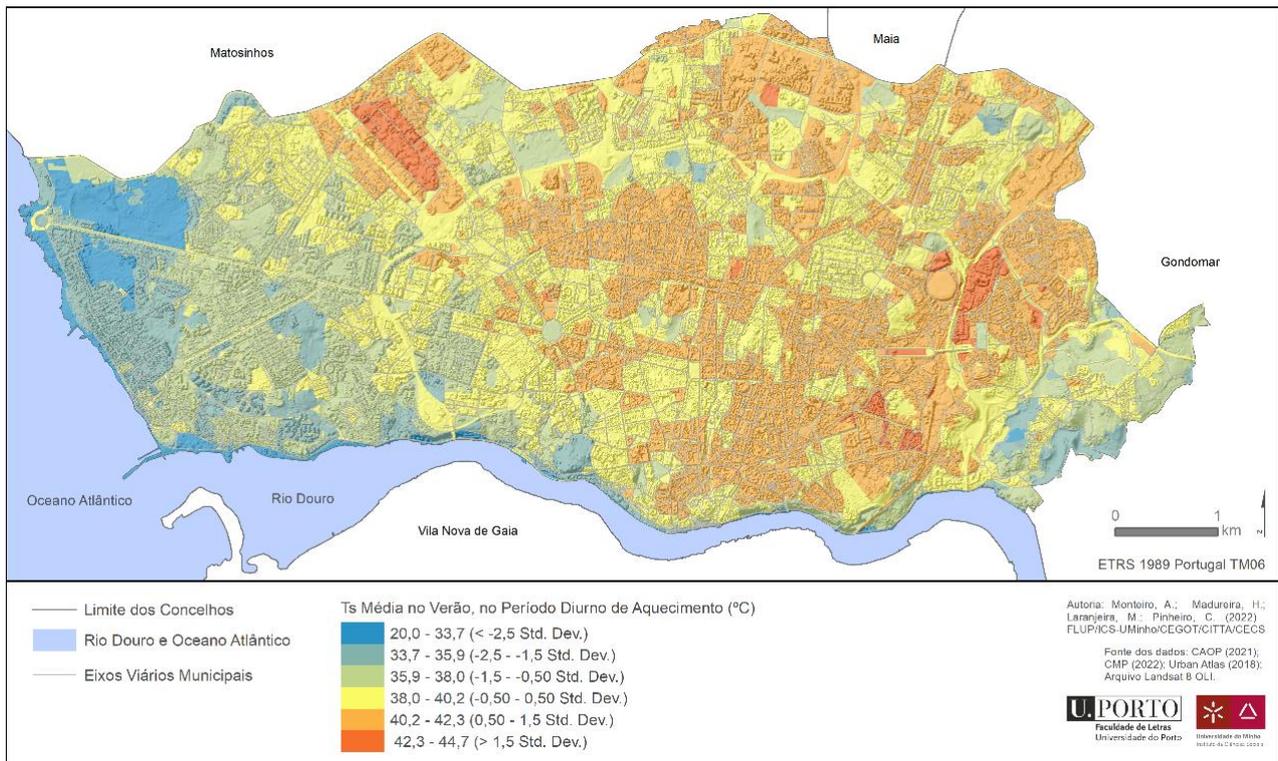


Figura 10 – Temperatura de superfície média no verão, no período diurno de aquecimento

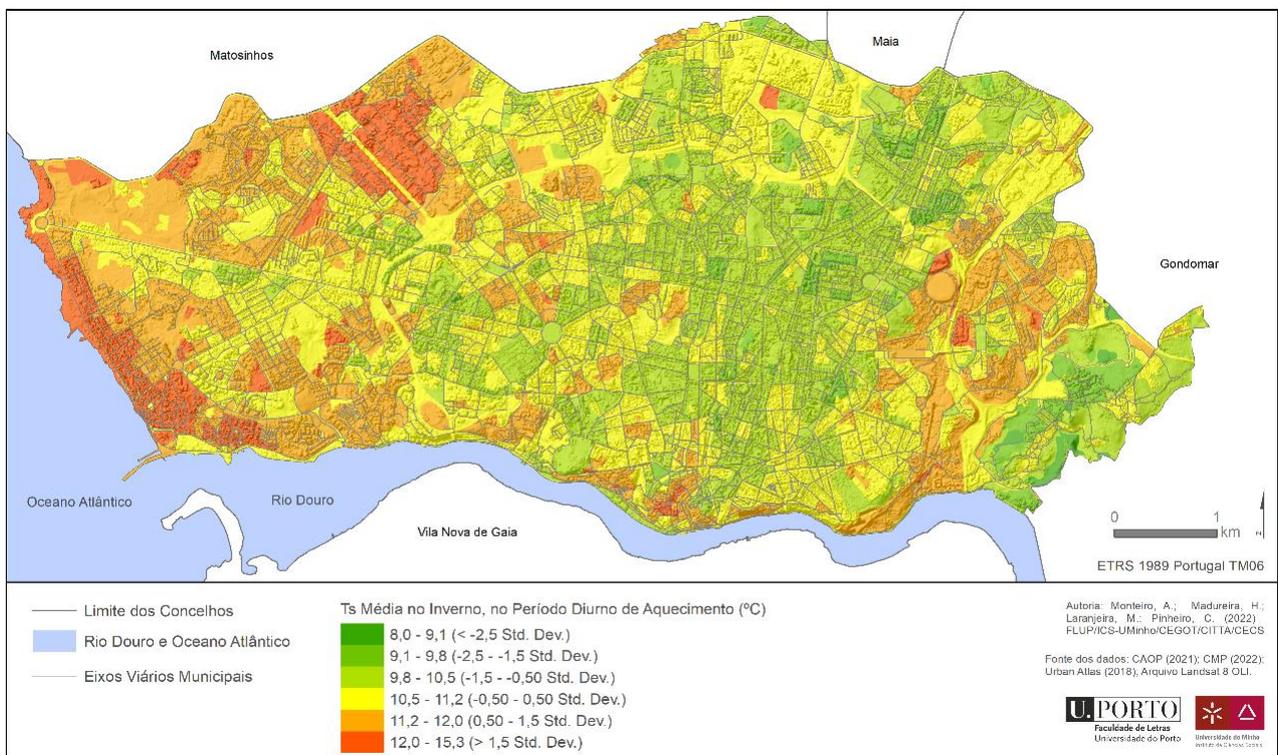


Figura 11 – Temperatura de superfície média no inverno, no período diurno de aquecimento

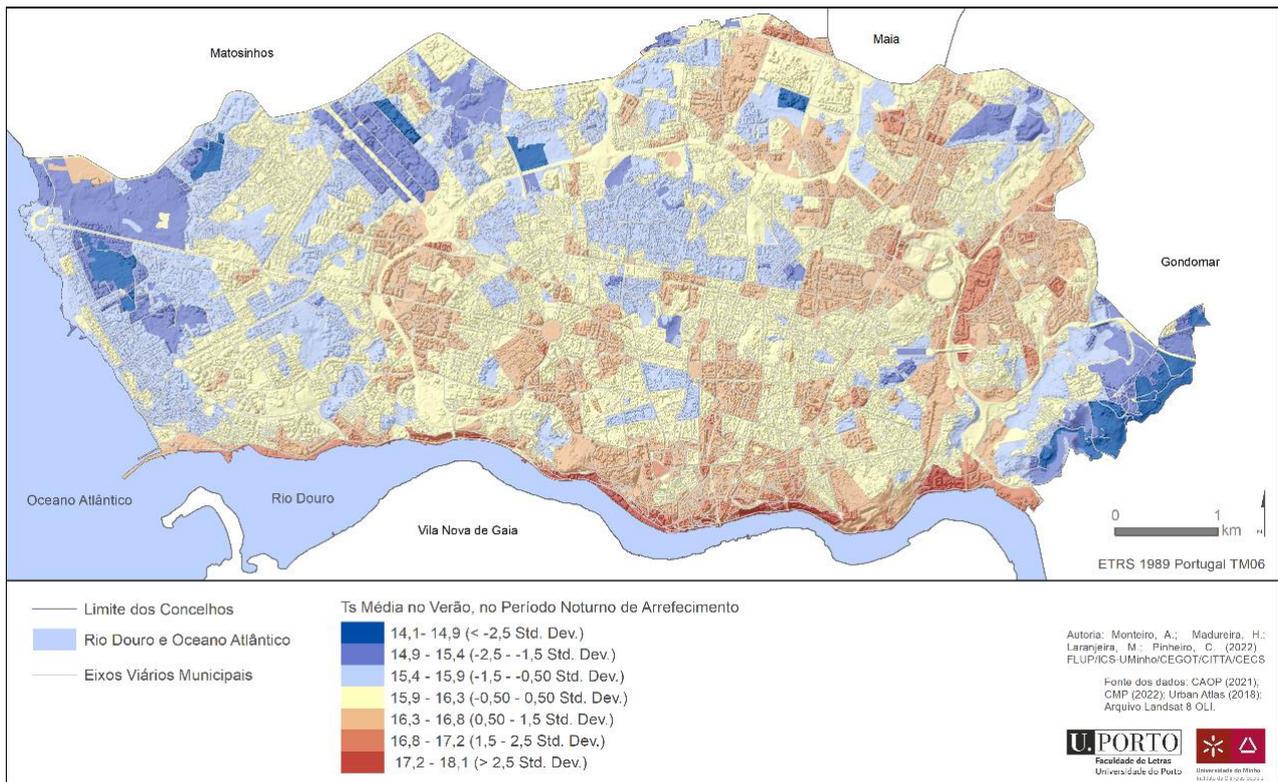


Figura 12 – Temperatura de superfície média no verão, no período noturno de arrefecimento

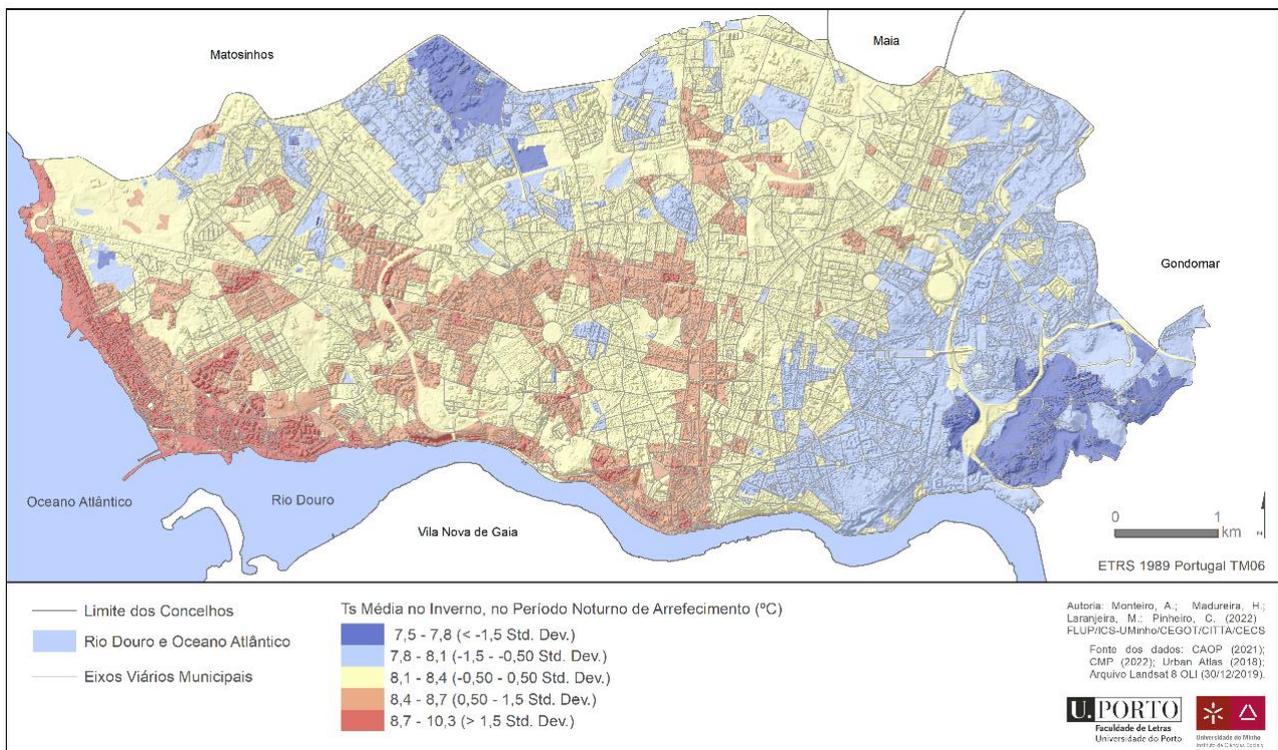


Figura 13 – Temperatura de superfície média no inverno, no período noturno de arrefecimento

1.2.4. Avaliação da produção de ar fresco ou frio por grupos de áreas verdes

A capacidade de arrefecimento do ar pelas áreas verdes manifesta-se, em termos gerais, de dois modos:

- (i) a diminuição das temperaturas da superfície e do ar no seu interior (por comparação com a envolvente imediata), suficientemente importante para ser responsável pela produção local de uma massa de ar fresco ou frio, dando origem a uma 'ilha de frescura';
- (ii) a saída do ar fresco ou frio em direção às áreas circundantes, que vai substituindo o ar quente aí presente a partir do anoitecer e ao longo da noite, criando assim um 'efeito de frescura' sensível ou mensurável (redução da temperatura noturna do ar) até a uma dada distância horizontal, conhecido genericamente por brisa do parque.

Desta maneira, avaliou-se o potencial de arrefecimento das designadas 'áreas verdes' do Porto, distinguindo-se os dois mecanismos mencionados. A produção de ar fresco ou frio por estas áreas constitui um dos principais fatores de redução da carga térmica (por eliminação de parte do calor ambiente), pelo que foi avaliada no contexto desta componente do modelo climático. Por sua vez, o efeito de frescura das 'áreas verdes' sobre a envolvente construída foi analisado no âmbito do sistema de ventilação, como adiante se descreverá.

Dependendo das características predominantes da cobertura vegetal nas 'áreas verdes', a importância de cada um dos principais processos de arrefecimento do ar durante o dia – por sombreamento, evapotranspiração e/ou reflexão da radiação solar incidente (Figura 14) – pode variar significativamente e, por consequência, também a capacidade de produção de uma massa de ar fresco ou frio.

Ao longo da noite, o arrefecimento do ar é comandado pela perda de calor a partir da superfície, que é tanto mais intensa quanto maior for a desobstrução do horizonte ou quantidade de céu visível (*sky view factor*), sendo por isso mais importante onde predomina a vegetação herbácea, rasteira.

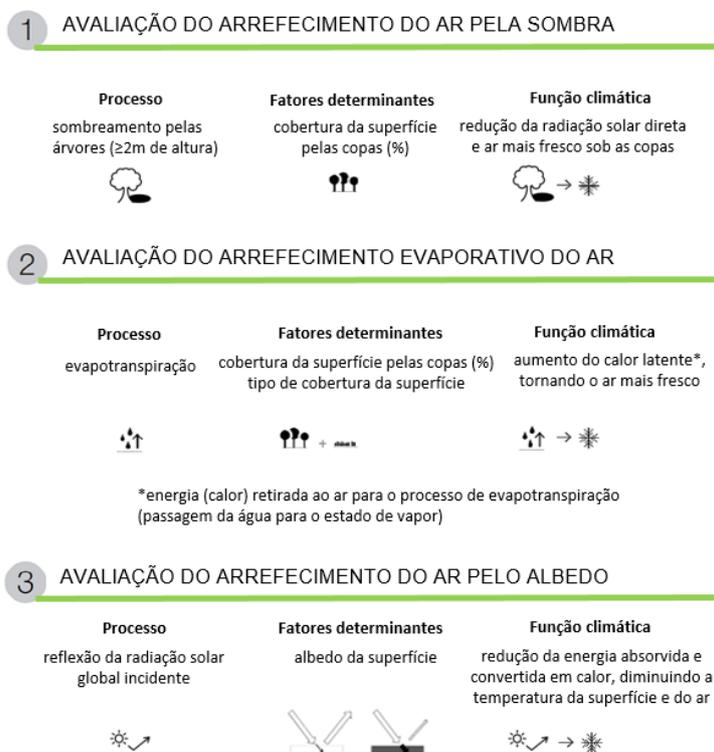


Figura 14 – Avaliação dos processos de arrefecimento do ar. Baseado em Geneletti et al. (2016).

Posto isto, optou-se por avaliar a produção de ar fresco ou frio em função de grupos de 'áreas verdes', com características estruturais e comportamentos climáticos semelhantes. Neste sentido, recorreu-se à análise de grupos em SIG, concretamente à ferramenta *Grouping Analysis* (na extensão *Spatial Statistics > Clusters*), do ArcGIS-ArcMAP.

Com base no *Grouping Analysis* distinguiram-se três grandes grupos de 'áreas verdes' no Porto, como evidencia a Figura 15, que se passam a descrever.



Figura 15 – Grupos de áreas verdes e respetiva tipologia

Grupo 1:

- Número de Quarteirões: 154 (61,1% do total de quarteirões de 'Áreas Verdes')
- Área Total: 335,8 ha (56,0% da área total de 'Áreas Verdes')
- Área Mínima: 0,3 ha
- Área Máxima: 14,4 ha
- Área Média: 2,2 ha

Classes de cobertura e uso do solo predominantes (Figura 15):

- Vegetação Herbácea e D.M.A.=0-40% (Áreas Sem Uso Corrente, Terrenos Aráveis, Pastagens);
- Espaços Verdes e D.M.A.=10-40% (Espaços Verdes Urbanos).

Este Grupo de 'Áreas Verdes' caracteriza-se estatisticamente por (Tabela 5):

- densidade média da cobertura de árvores (DENS_ÁRV) mais baixa (varia entre 0% e 41,5%, com média de 14,9%);
- média do ALBEDO mais elevada, devido aos valores representativos mais elevados desta variável associados à vegetação herbácea (0,20), que predomina como cobertura da superfície em várias tipologias pouco arborizadas deste Grupo, incluindo certos espaços verdes urbanos;

- média da Evapotranspiração Potencial Normalizada (ETI) no verão (ETI_JUL_07) próxima do valor correspondente ao Grupo 3, e relativamente baixa no inverno (ETI_JAN_01);
- valores intermédios da temperatura de superfície para o período diurno de aquecimento no inverno (MED_INVER) e a média mais baixa para o período noturno de arrefecimento nesta estação do ano (MED_INOT);
- média mais elevada da temperatura de superfície para o período diurno de aquecimento no verão (MED_VER_A) e, ao contrário, média da temperatura de superfície para o período noturno de arrefecimento (MED_VNOT) mais baixa, mas neste caso a par com a média do Grupo 2.

Tabela 5 – Estatísticas descritivas do Grupo 1

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
MED_VER_A	38,8209	1,7833	31,1903	42,2862
ALBEDO	0,2000	0,0000	0,2000	0,2000
ETI_JUL_07	0,9266	0,0185	0,8451	0,9500
DENS_ÁRVO	14,8609	10,9410	0,0000	41,5448
MED_INOT	8,0639	0,2118	7,6332	8,6660
MED_INVER	10,7257	0,6584	8,8038	12,1602
ETI_JAN_01	0,8740	0,0213	0,8032	0,9306
MED_VNOT	15,7999	0,6012	14,1296	17,8980

Os resultados obtidos permitem inferir o comportamento climático deste Grupo, tendo-se assim que se trata de 'Áreas Verdes':

- mais quentes durante o dia no verão, devido à reduzida arborização (não constituem, portanto, 'ilhas de frescura');
- produtoras de ar fresco durante a noite no verão, devido ao elevado *sky view factor* ('ilhas de frescura' noturna), sendo que se tiverem uma dimensão >2ha podem gerar uma importante brisa do parque, dada a reduzida rugosidade aerodinâmica que as caracteriza;
- produtoras de ar frio no inverno (sobretudo durante noite), devido ao elevado *sky view factor*, podendo eventualmente gerar importante brisa do parque (ar frio) durante a noite, dada a sua reduzida rugosidade.

Grupo 2:

- Número de Quarteirões: 41 (16,3% do total de quarteirões de Áreas Verdes)
- Área Total: 140,8 ha (23,5% da área total de Áreas Verdes)
- Área Mínima: 0,26 ha
- Área Máxima: 60,8 ha
- Área Média: 3,4 há

Classes de cobertura e uso do solo predominantes (Figura 15):

- Espaços Verdes e D.M.A.=10-80% (Espaços Verdes Urbanos);

- Vegetação Herbácea e D.M.A.=0-80% (Áreas Sem Uso Corrente, Pastagens).

Este Grupo de 'Áreas Verdes' caracteriza-se estatisticamente por (Tabela 6):

- densidade média da cobertura de árvores (DENS_ÁRV), com valores intermédios entre o Grupo 1 e o Grupo 3 (varia entre 0% e 70%, com média de 25,7%);
- média do ALBEDO relativamente elevada, associada à vegetação herbácea que caracteriza a cobertura da superfície de várias tipologias de áreas não construídas, bem como de certos espaços verdes urbanos deste Grupo (valor representativo do albedo de 0,20);
- valores médios da Evapotranspiração Potencial Normalizada (ETI) muito mais baixos no verão (ETI_JUL_07) comparativamente aos outros Grupos de 'Áreas Verdes', e os mais baixos no inverno (ETI_JAN_01), embora a diferença não seja tão pronunciada neste caso;
- médias da temperatura de superfície no inverno que se distinguem por serem claramente as mais elevadas, quer no período diurno de aquecimento (MED_INVER) quer no período noturno de arrefecimento (MED_INOT);
- média mais baixa da temperatura de superfície para o período diurno de aquecimento no verão (MED_VER_A), sendo que a média da temperatura de superfície para o período noturno de arrefecimento (MED_VNOT) é igualmente a mais baixa, mas neste caso a par com a média do Grupo 1.

Estes resultados permitem inferir que as 'Áreas Verdes' incluídas neste Grupo 2 se caracterizam por ser:

- produtoras de ar fresco no verão (constituindo 'ilhas de frescura'), tanto de dia como durante a noite, sendo que se tiverem uma dimensão >2ha podem gerar uma importante brisa do parque;
- amenizadoras da temperatura do ar no inverno, quer de dia quer de noite; contudo, devido ao menor gradiente térmico entre estas 'Áreas Verdes' e o seu entorno não se gera uma notável brisa do parque durante a noite.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas do Grupo 2

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
MED_VER_A	36,0988	2,2348	31,9595	41,1565
ALBEDO	0,1866	0,0222	0,1500	0,2000
ETI_JUL_07	0,8389	0,0370	0,7423	0,9101
DENS_ÁRVO	25,6904	19,6380	0,0000	70,1143
MED_INOT	8,4797	0,3647	7,8732	10,0970
MED_INVER	11,3937	0,6410	10,4494	14,7401
ETI_JAN_01	0,8680	0,0473	0,7541	0,9306
MED_VNOT	15,8021	0,5032	14,5222	16,9764

Grupo 3:

- Número de Quarteirões: 53 (21,1% do total de quarteirões de Áreas Verdes)
- Área Total: 122,4 ha (20,4% da área total de Áreas Verdes)
- Área Mínima: 0,36 ha
- Área Máxima: 16,8 ha
- Área Total: 122,4 ha
- Área Média: 2,3 ha

Classes de cobertura e uso do solo predominantes (Figura 15):

- Espaços Verdes e D.M.A.=40-80% (Espaços Verdes Urbanos);

- Floresta e D.M.A.=40-80% (Florestas).

Este Grupo de 'Áreas Verdes' caracteriza-se estatisticamente por (Tabela 7):

- densidade média da cobertura de árvores (DENS_ÁRV) mais elevada (varia entre 9,7% e 80,1%, com média de 50,6%), sendo que este Grupo inclui as manchas mais arborizadas, de floresta e determinados espaços verdes;
- média do ALBEDO muito mais baixa, devido aos valores representativos mais baixos para o albedo das áreas com maior arborização (0,15) e corpos de água e áreas adjacentes (0,075);
- média da Evapotranspiração Potencial Normalizada (ETI) no verão (ETI_JUL_07) próxima do valor médio para o Grupo 1, e a mais elevada no inverno (ETI_JAN_01);
- média mais baixa da temperatura de superfície para o período diurno de aquecimento no inverno (MED_INVER) e próxima do valor médio obtido para o Grupo1, embora menos baixa, relativamente ao período noturno de arrefecimento (MED_INOT);
- média da temperatura de superfície para o período diurno de aquecimento no verão (MED_VER_A) relativamente baixa, sendo que a média da temperatura de superfície para o período noturno de arrefecimento (MED_VNOT) é a mais elevada.

Tabela 7 – Estatísticas descritivas do Grupo 3

Variable	Mean	Std. Dev.	Min	Max
MED_VER_A	36,9916	2,2102	31,0059	39,9945
ALBEDO	0,1443	0,0198	0,0750	0,1500
ETI_JUL_07	0,9271	0,0205	0,8719	0,9941
DENS_ÁRVO	50,6178	13,3209	9,7407	80,1271
MED_INOT	8,1813	0,2732	7,5970	8,8136
MED_INVER	10,3979	0,7927	7,9645	11,8145
ETI_JAN_01	0,8900	0,0286	0,8185	0,9790
MED_VNOT	15,9662	0,4981	14,4978	16,8085

Dados estes resultados, é possível inferir que o Grupo 3 distingue as 'Áreas Verdes' cujo comportamento climático é o seguinte:

- são produtoras de ar fresco durante o dia, no verão ('ilhas de frescura' diurnas);
- arrefecem menos à noite no verão do que as outras 'Áreas Verdes', devido ao reduzido *sky view factor* resultante da elevada arborização, por isso contribuem menos (ou mais tardiamente, durante madrugada) para a produção de ar fresco; não obstante, se tiverem uma dimensão >2ha podem gerar uma significativa brisa do parque;
- são produtoras de ar frio no inverno (sobretudo de dia), sendo que poderão gerar uma importante brisa do parque (ar frio) durante a noite.

1.2.5. Avaliação da carga térmica associada aos grupos de cobertura e uso do solo

O conhecimento prévio do clima e ambiente urbano do concelho do Porto, patente no relatório exaustivo de Monteiro *et al.* (2018) elaborado no âmbito da revisão do Plano Diretor Municipal (PDM), bem como a análise exploratória das variáveis de base supramencionadas permitiram assumir os pressupostos teóricos de que:

- por um lado, as áreas com avultada artificialização – entendida como o elevado grau de impermeabilização do solo e/ou densificação do edificado, que acarreta a modificação tridimensional da superfície e o predomínio dos materiais artificiais – estão fortemente associadas à produção de uma elevada carga térmica, com tendência para o sobreaquecimento do ar e a formação da ilha de calor urbano;
- por outro lado, as áreas não construídas e com vegetação são, em termos comparativos, responsáveis por uma menor carga térmica e apresentam uma significativa capacidade de arrefecimento do ar.

Assim, num primeiro momento, bipartiu-se o estudo entre os grupos de cobertura e uso do solo caracterizados por >80% da superfície impermeabilizada (grupos 1 a 4, constantes na Tabela 1 e Figura 16) e os grupos que constituem as áreas verdes (Tabela 1), tal como definidas anteriormente (Figura 17).

Entre estes dois grandes tipos de área com características opostas, tem-se um conjunto muito heterogéneo de coberturas e usos do solo que compreende um extenso número de grupos (confrontar a Tabela 1).

, desde os relativos às áreas não construídas e de solo nu até aos que abrangem o tecido urbano com variável grau de impermeabilização (de <30% a 50-80%), densidade de construção (baixa a densa) e cobertura das árvores (de 0% a 60%). Por consequência, presumiu-se que estas áreas mistas mantêm funções climáticas de transição entre as áreas com sobrecarga térmica e as áreas produtoras de ar fresco ou frio (Figura 18).

Note-se que foram excluídas desta análise pequenas áreas rochosas junto à linha de costa e na margem ribeirinha do Douro, pertencentes ao grupo 18 (Tabela 1).

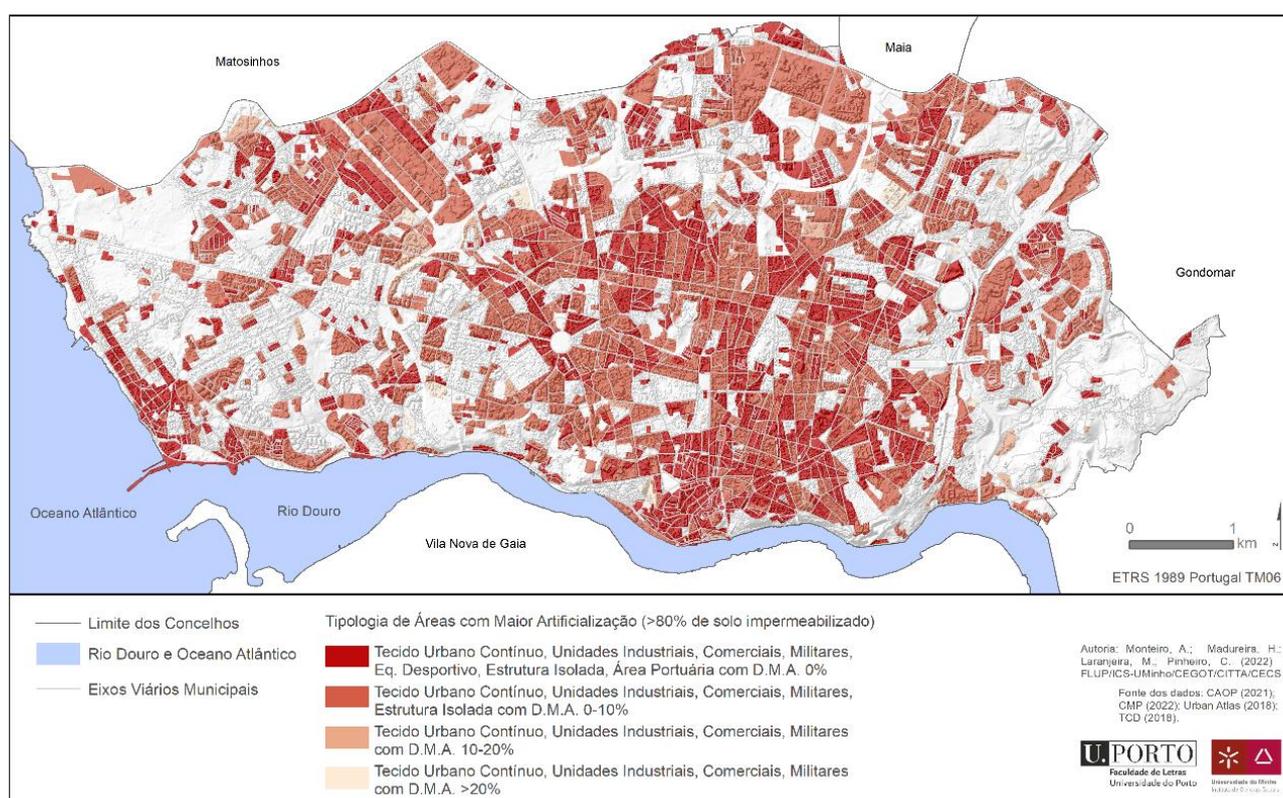


Figura 16 – Tipologia de áreas com maior artificialização

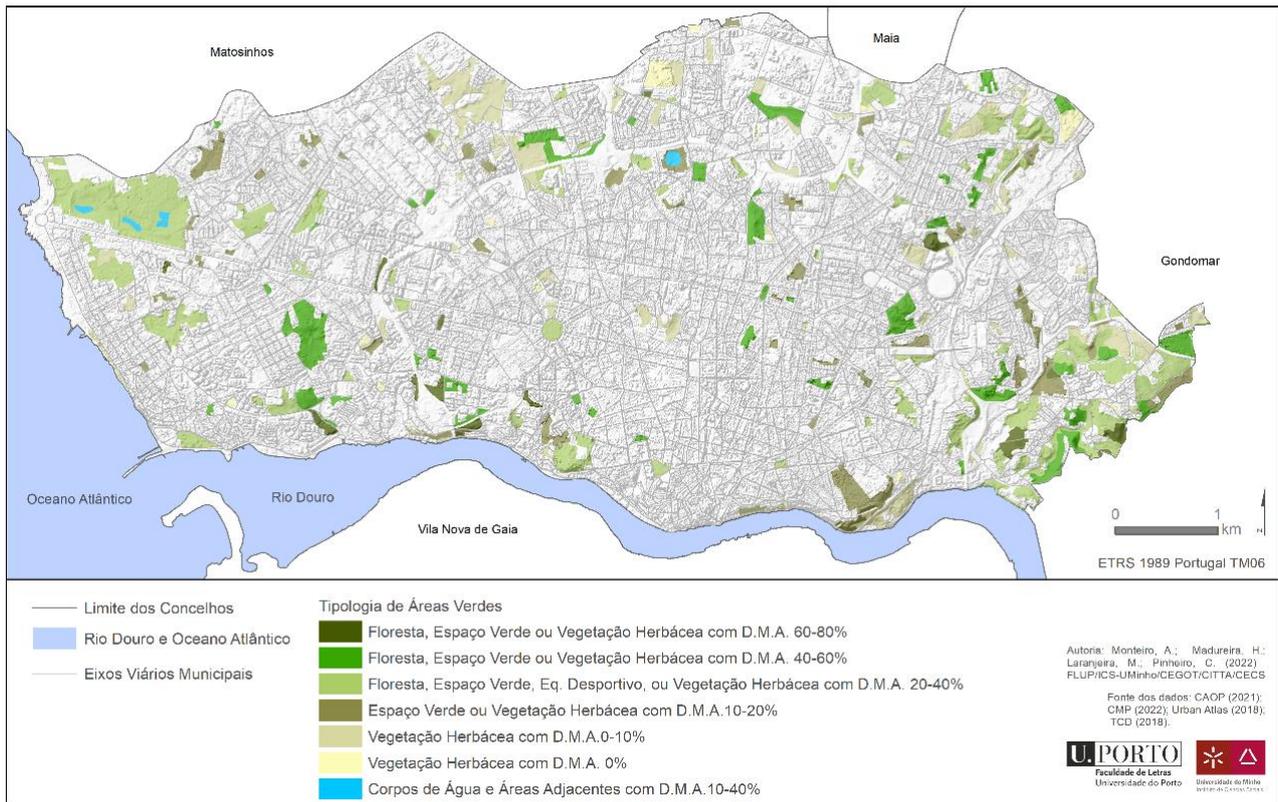


Figura 17 – Tipologia de áreas verdes



Figura 18 – Tipologia das áreas de transição

As variáveis de base serviram de indicadores para avaliar a carga térmica produzida pelas 'áreas com maior artificialização', 'áreas verdes' e 'áreas mistas de transição' – e consequentemente o seu contributo para a formação do calor urbano no concelho do Porto –, tendo em conta os seguintes argumentos:

- a variação dos valores da temperatura de superfície (Ts) permite inferir a importância relativa do sobreaquecimento das superfícies e do ar na camada urbana ao nível das coberturas (Figura 10 e Figura 11), bem como comparar o ritmo do arrefecimento no início da noite (Figura 12 e Figura 13) entre os três tipos de áreas consideradas;
- a variação dos valores da densidade de cobertura das árvores (Figura 1), ETI (Figura 5 e Figura 6) e albedo (Figura 4) permite inferir, em termos comparativos, a importância relativa de cada um dos principais processos de arrefecimento do ar (por sombreamento, evapotranspiração e reflexão da radiação solar incidente, Figura 14, entre os três tipos de áreas consideradas (Geneletti *et al.*, 2016; Zardo *et al.*, 2017 e Sharp *et al.*, 2020).

Posto isto, com o auxílio das estatísticas descritivas calculadas para cada variável de base, que sintetizam a distribuição dos valores das respetivas séries de dados, elaborou-se a avaliação pretendida. Adicionalmente às tabelas que acompanham a análise, ilustram-se de forma gráfica as medidas estatísticas julgadas mais relevantes, de maneira a possibilitar a sua comparação simultânea entre os três tipos de áreas analisadas.

Para a construção dos gráficos, e atendendo ao facto de que as variáveis estudadas apresentam escalas de valor e unidades de medida muito diferentes, procedeu-se à sua normalização no conjunto da base de dados. Esta operação realizou-se com recurso ao programa estatístico XLSTAT 2022.2.1.1304, tendo-se optado pelo método de transformação de variáveis para uma escala de 0 a 100. Com base nos valores normalizados entre 0 e 100, calcularam-se novamente as medidas estatísticas a ilustrar (1º quartil, média e 3º quartil). É necessário destacar que os gráficos elaborados pretendem exclusivamente mostrar estas estatísticas em termos relativos (e não os seus reais valores, que se podem consultar nas tabelas apresentadas), com o único objetivo de enfatizar as diferenças (ou semelhanças) entre as 'áreas com maior artificialização', 'áreas verdes' e 'áreas mistas de transição' no que respeita às variáveis examinadas.

Áreas com maior Artificialização – Elevada carga térmica (ou sobrecarga)

Estas áreas dizem respeito a 1542 quarteirões (64% do total de quarteirões) e abarcam 1853,4ha (44,7% da área total), sendo assim as mais representadas no concelho. Consequentemente, a sua influência sobre o ambiente térmico, em particular – e o clima do Porto, em geral –, é determinante.

O elevado grau de impermeabilização do solo (>80%) que distingue este conjunto de quarteirões implica que na sua maioria se encontrem quase desprovidos de vegetação de porte arbóreo, facto que se reflete numa densidade média da cobertura de árvores nula ou excessivamente baixa (Tabela 8 e Figura 19). Em consonância com isto, o processo de evapotranspiração será aqui muito limitado ao longo do ano, tal como sugerem os reduzidos valores de ETI para janeiro e julho (Tabela 8 e Figura 19). Assim, e atendendo igualmente ao baixo albedo das superfícies (valor representativo de 0,15 para todas as subclasses de cobertura e usos do solo;

Tabela 1), é expectável que a capacidade de arrefecimento do ar esteja muito comprometida nestas áreas.

A variação de Ts média revela que a elevada carga térmica – produzida principalmente nos quarteirões densamente edificadas, com espaços industriais ou comerciais, e adjacentes às vias com tráfego intenso – sobressai de um modo mais evidente e alargado ao conjunto destas áreas no período diurno de aquecimento no verão, em que se registam os valores mais elevados (confrontar o 1º quartil) e diferenciados de Ts relativamente às 'áreas mistas de transição' e às 'áreas verdes' (Figura 19) Além disto, o arrefecimento das superfícies no início das noites de verão é, de um modo geral, mais lento nestas áreas em relação às restantes, uma vez que mantêm valores de Ts média claramente superiores às 22h (Figura 19).

No inverno, as superfícies na maioria dos quarteirões de tecido urbano contínuo permanecem relativamente frescas no período diurno de aquecimento (Figura 11), embora tanto o padrão espacial como a distribuição dos valores de Ts média não sejam claramente distintos dos que caracterizam as 'áreas mistas de transição' e as 'áreas verdes' (Figura 19). O arrefecimento noturno é em geral menos acentuado às 22h, tal como sucede no verão (Figura 19), mas o padrão espacial de Ts mostra-se bastante mais complexo (Figura 13); note-se, porém, que estes dados se limitam a uma única situação noturna (imagem Landsat OLI de 30/12/2019).

Os resultados obtidos, corroborados pelos dados e conclusões de Monteiro *et al.* (2018), sugerem assim que as 'áreas com maior artificialização' se diferenciam nitidamente no concelho do Porto durante o verão pela sobrecarga térmica, contribuindo deste modo para a formação da ilha de calor urbano em situações meteorológicas de abrigo aerológico (estados do tempo anticiclónicos), que são as predominantes ao longo desta estação do ano. No inverno, estas áreas distinguem-se por uma carga térmica mais elevada, sobretudo à noite.

Tabela 8 – Estatísticas descritivas das variáveis caracterizadoras das Áreas com Maior Artificialização

Estatística	D.M.A. (%)	ETI janeiro	ETI julho	Ts média diurna, inverno (°C)	Ts média diurna, verão (°C)	Ts média noturna, inverno (°C)	Ts média noturna, verão (°C)
Valor Mínimo	0,00	0,00	0,00	9,01	26,65	7,58	14,55
Valor Máximo	46,51	0,32	0,34	15,33	44,71	10,35	18,02
Frequência do Mínimo	907	4	4	1	1	1	1
Frequência do Máximo	1	1	1	1	1	1	1
Amplitude de Valores	46,51	0,32	0,34	6,31	18,06	2,77	3,47
1º Quartil	0,00	0,12	0,12	10,36	38,94	8,16	15,91
Mediana	0,00	0,12	0,12	10,75	40,12	8,29	16,16
3º Quartil	1,71	0,12	0,13	11,26	40,86	8,46	16,43
Média	1,86	0,13	0,13	10,86	39,66	8,33	16,18
Desvio-padrão	4,56	0,03	0,03	0,72	1,88	0,28	0,40
Coefficiente de Variação	2,46	0,21	0,20	0,07	0,05	0,03	0,02

D.M.A.=Densidade Média da Cobertura de Árvores

Áreas Verdes – Baixa carga térmica

Estas áreas ocupam 252 quarteirões (10,5% do total de quarteirões), somando 599,5ha (14,5% da área total do concelho do Porto).

A Ts média mais baixa durante o período diurno de aquecimento no verão e o arrefecimento das superfícies mais rápido e significativo nas primeiras horas da noite – sobretudo em relação às 'áreas com maior artificialização' –, tanto no verão como no inverno (Tabela 9 e Figura 19), são possíveis devido aos seguintes fatores:

- a inexistente ou diminuta impermeabilização do solo, que propicia elevados valores de ETI, tanto no verão como no inverno;
- o albedo relativamente mais elevado;

- uma maior densidade média de cobertura das árvores. Não obstante, é de salientar que o predomínio de inúmeras parcelas de vegetação herbácea, pouco ou não arborizadas, sobre as manchas florestais remanescentes no concelho (Figura 17) se reflita num valor médio desta variável notavelmente baixo (apenas 24%; Tabela 9).

Estes resultados apontam, de um modo geral e em termos comparativos, para a baixa carga térmica das 'áreas verdes', especialmente no verão, devido a uma significativa capacidade de produzir ar fresco ou frio.

Tabela 9 – Estatísticas descritivas das variáveis caracterizadoras das Áreas Verdes

Estatística	D.M.A.(%)	Albedo	ETI janeiro	ETI julho	Ts média diurna, inverno (°C)	Ts média diurna, verão (°C)	Ts média noturna, inverno (°C)	Ts média noturna, verão (°C)
Valor Mínimo	0,00	0,08	0,73	0,74	7,96	31,01	7,60	14,13
Valor Máximo	80,13	0,20	0,98	0,99	14,74	42,29	10,10	17,90
Frequência do Mínimo	27	4	1	1	1	1	1	1
Frequência do Máximo	1	188	1	1	1	1	1	1
Amplitude de Valores	80,13	0,13	0,24	0,25	6,78	11,28	2,50	3,77
1º Quartil	8,01	0,15	0,87	0,90	10,28	36,57	7,98	15,51
Mediana	19,94	0,20	0,88	0,93	10,83	38,32	8,13	15,88
3º Quartil	39,16	0,20	0,89	0,94	11,29	39,59	8,33	16,22
Média	23,91	0,19	0,88	0,91	10,77	37,99	8,16	15,84
Desvio-padrão	19,57	0,03	0,03	0,04	0,75	2,24	0,30	0,57
Coeficiente de Variação	0,82	0,14	0,04	0,04	0,07	0,06	0,04	0,04

D.M.A.=Densidade Média da Cobertura de Árvores

Áreas Mistas de Transição – Moderada carga térmica

Estas áreas distribuem-se por 614 quarteirões (25,5% do total de quarteirões), correspondendo a 927,8 ha (22,4% da área total do concelho do Porto).

O menor grau de impermeabilização do solo (muito variável, mas não excedendo 80%) permite de algum modo compensar, através do processo da evapotranspiração, a escassa presença de árvores na maioria dos quarteirões – e presumivelmente o efeito pouco notável do sombreamento na redução da temperatura do ar, para o conjunto destas 'áreas mistas de transição' –, ainda que os valores de ETI ao longo do ano sejam bastante reduzidos (Tabela 10 e Figura 19). Por sua vez, o albedo mais elevado numa parte significativa dos quarteirões (veja-se o 3º Quartil) deverá ter um efeito térmico apreciável.

A capacidade de arrefecimento do ar será nestas áreas limitada, como os resultados obtidos indicam. No entanto, graças a uma mais baixa densidade de ocupação e artificialização da superfície, a carga térmica produzida ainda não atinge a magnitude da que individualiza as 'áreas de maior artificialização'. De facto, as 'áreas mistas de transição' apresentam uma variação de Ts média que as aproxima mais das 'áreas verdes', em particular no que respeita o período diurno de aquecimento no verão (Tabela 10 e Figura 19). Já o arrefecimento das superfícies no início da noite é no conjunto destas áreas relativamente menos rápido e pronunciado do que nas 'áreas verdes', tanto no verão como no inverno (Tabela 10 e Figura 19).

Tabela 10 – Estatísticas descritivas das variáveis caracterizadoras das Áreas Mistas de Transição

Estatística	D.M.A.(%)	Albedo	ETI janeiro	ETI julho	Ts média diurna, inverno (°C)	Ts média diurna, verão (°C)	Ts média noturna inverno (°C)	Ts média noturna, verão (°C)
Valor Mínimo	0,00	0,15	0,00	0,00	8,59	31,98	7,51	14,06
Valor Máximo	57,93	0,20	0,87	0,94	14,24	43,45	9,97	17,56
Frequência do Mínimo	116	450	7	7	1	1	1	1
Frequência do Máximo	1	13	1	1	1	1	1	1
Amplitude de Valores	57,93	0,05	0,87	0,94	5,65	11,47	2,47	3,50
1º Quartil	0,69	0,15	0,26	0,27	10,49	37,00	8,06	15,70
Mediana	3,99	0,15	0,26	0,27	11,00	38,50	8,25	15,94
3º Quartil	9,16	0,19	0,37	0,36	11,37	39,75	8,44	16,20
Média	6,95	0,16	0,31	0,32	10,97	38,33	8,26	15,93
Desvio-padrão	8,59	0,02	0,09	0,10	0,68	1,95	0,30	0,44
Coeficiente de Variação	1,24	0,10	0,30	0,31	0,06	0,05	0,04	0,03

D.M.A.=Densidade Média da Cobertura de Árvores

As 'áreas mistas de transição' exibem uma distribuição espacial que tanto as remete para as freguesias periféricas como as situam em pleno núcleo central do Porto (Figura 18). Assim sendo, o seu contexto climático (ambiente térmico) é manifestamente diverso, bem como as funções que podem desempenhar na globalidade do clima urbano do Porto – desde os (1) quarteirões adjacentes às 'áreas verdes', que beneficiarão diretamente do efeito de frescura que estas criam, até aos (2) quarteirões inseridos no tecido urbano contínuo, que contribuirão para a atenuação local da carga térmica e sobreaquecimento do ar, beneficiando climaticamente a sua vizinhança imediata.

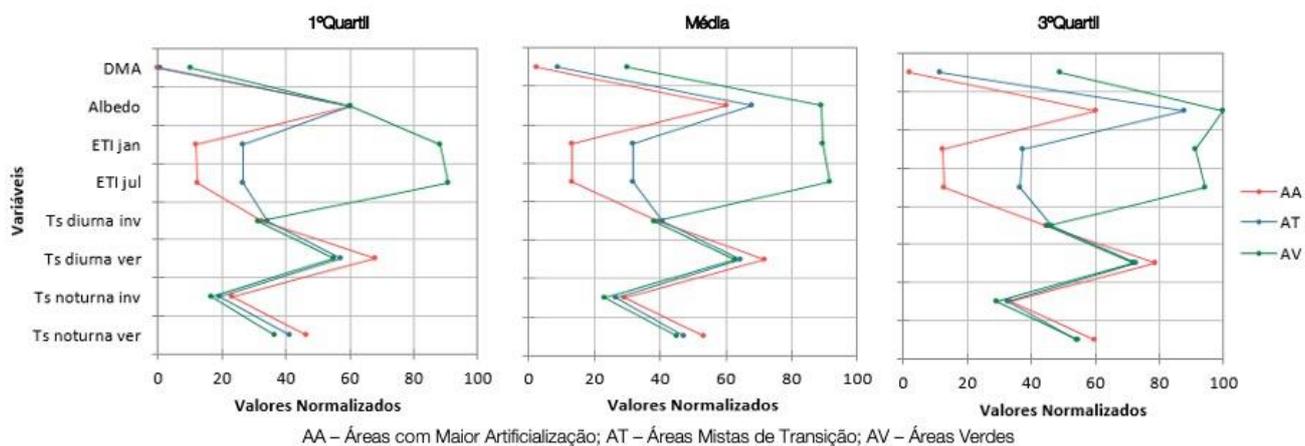


Figura 19 – Estatísticas descritivas dos grupos de cobertura e uso do solo

2. Delineação do Sistema de Ventilação

2.1. Variáveis de base

Para a delimitação do sistema de ventilação do município do Porto recorreu-se à informação fornecida pela Câmara Municipal do Porto, designadamente: (i) a base topográfica; e, (ii) o ponto mais elevado da construção. Além disto, foi utilizada a informação relativa à capacidade de arrefecimento das 'Áreas Verdes'.

2.2. Metodologia

Para deslindar o sistema de ventilação do Porto começou-se por avaliar o modo como a orografia e a proximidade ao mar e ao rio condicionam a exposição aos ventos regionais dominantes e às brisas do mar e do rio, respetivamente. Desta forma, a partir da base topográfica do Porto construiu-se um Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT) e uma representação tridimensional do relevo (Figura 20), bem como a carta de exposição das vertentes.

Partindo do pressuposto que, as linhas de água e os corredores de ventilação apresentam um comportamento espacial similar (Acero *et al.*, 2013; Tong *et al.*, 2021), considerou-se pertinente recriar a rede de drenagem, que no concelho do Porto se encontra profundamente modificada. A partir do MDT, e com recurso à ferramenta 'Hydrology' do ArcGIS, obteve-se a direção dos fluxos de água, e, em seguida, um mapa de fluxos acumulados (Figura 21), que permitem inferir a direção e o volume de ar que escoam através de cada célula do raster (Acero *et al.*, 2013).

2.2.1. Caracterização da exposição ao vento regional

O vento regional durante o verão sopra predominantemente do quadrante N e NW, pelo que se efetuou uma reclassificação da carta de exposição de modo a salientar as vertentes orientadas a N, NW e W (Figura 22), conforme Monteiro *et al.* (2018). Com base nesta informação, e com auxílio dos mapas topográfico e de fluxos acumulados, efetuou-se a divisão do concelho do Porto em três setores, que apresentam um grau distinto de exposição ao vento regional, nomeadamente: (i) elevado; (ii) moderado a elevado; e, (iii) baixo a muito baixo (Figura 23).

No inverno os rumos predominantes do vento são de NE e SE (e ainda de NW), pelo que se reclassificou a carta de exposição de modo a salientar as vertentes expostas a S, SE e E (Figura 24), conforme Monteiro *et al.* (2018). Como realizado anteriormente para o verão, cruzou-se esta informação com os mapas topográfico e de fluxos acumulados, obtendo-se no concelho do Porto seis setores com características homogéneas de ventilação, que foram classificados em função dos graus de exposição ao vento regional definidos anteriormente (Figura 25).

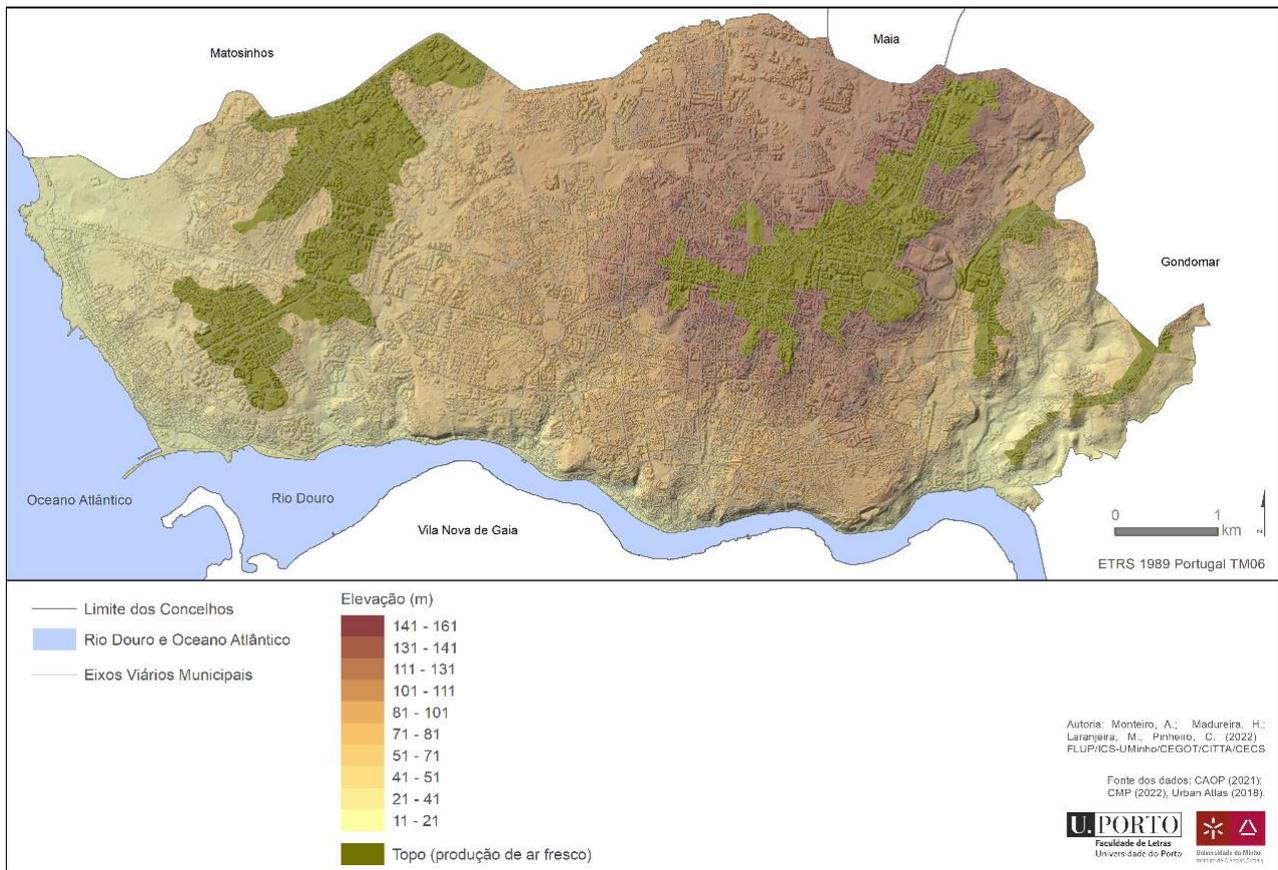


Figura 20 – Hipsometria do Porto

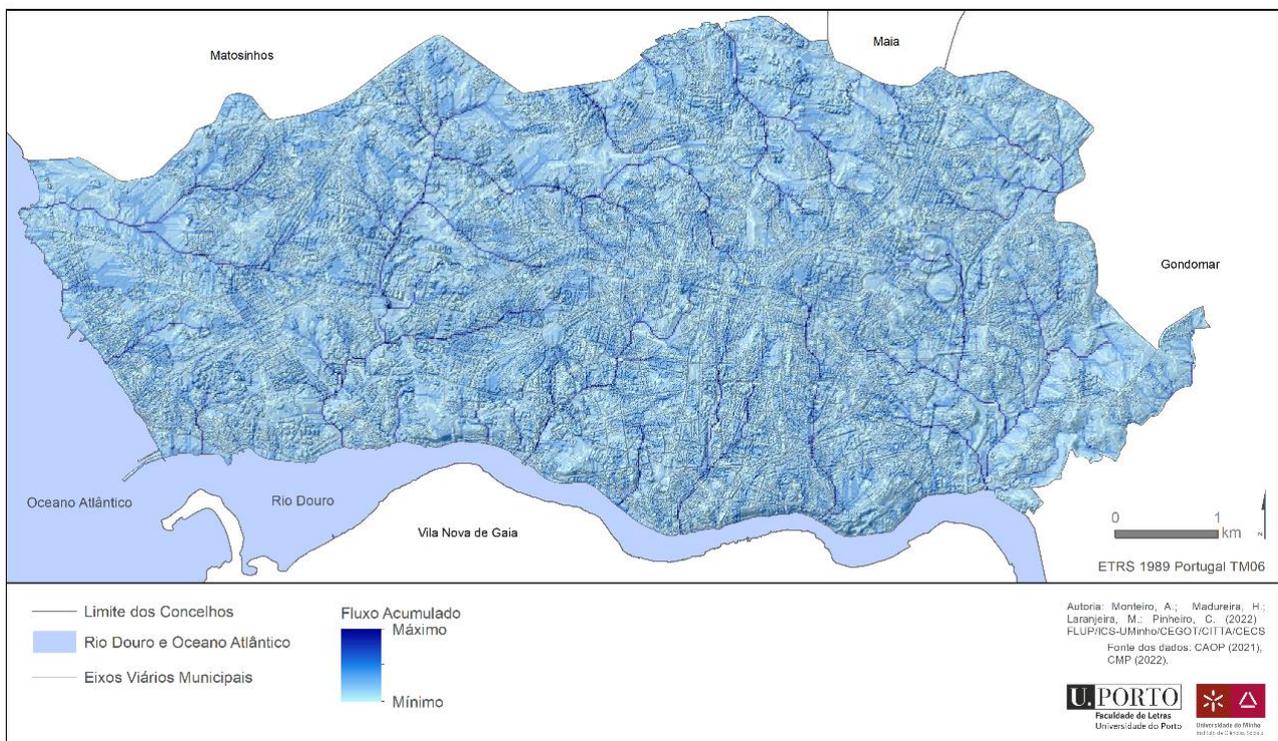


Figura 21 – Fluxos acumulados de ar no Porto

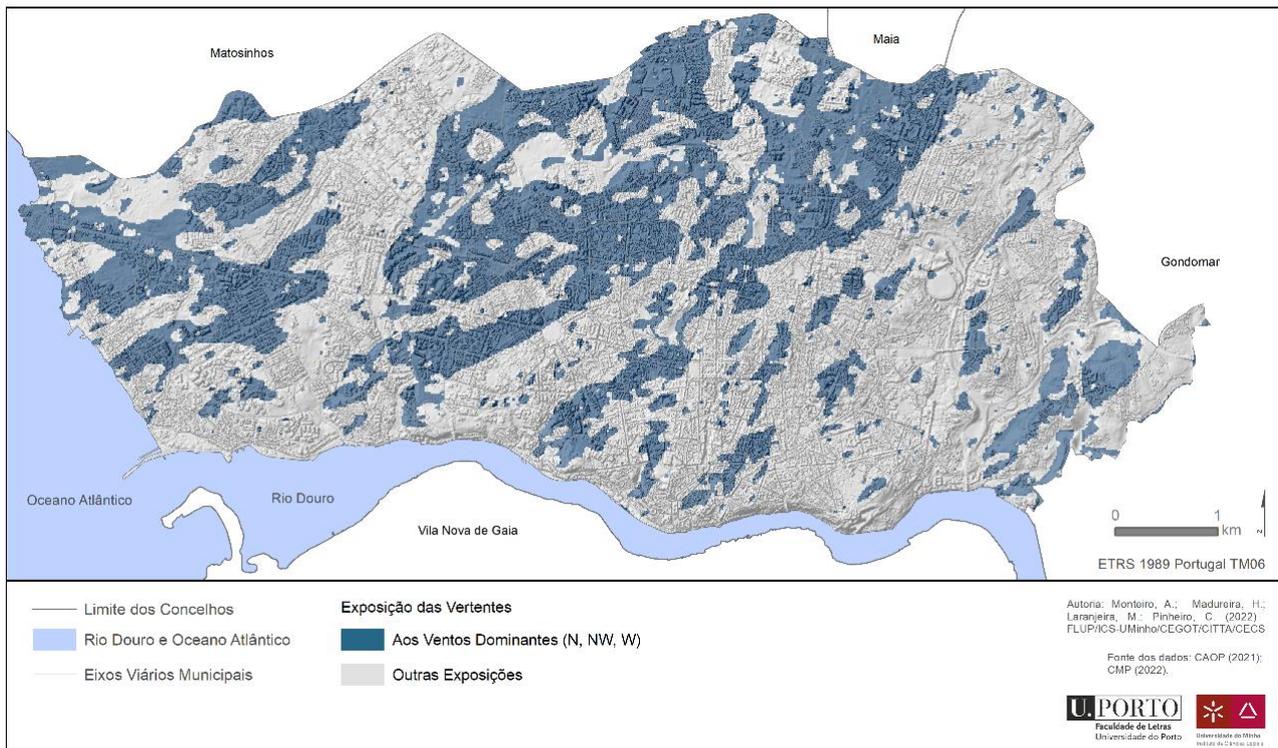


Figura 22 – Vertentes expostas ao vento regional no verão

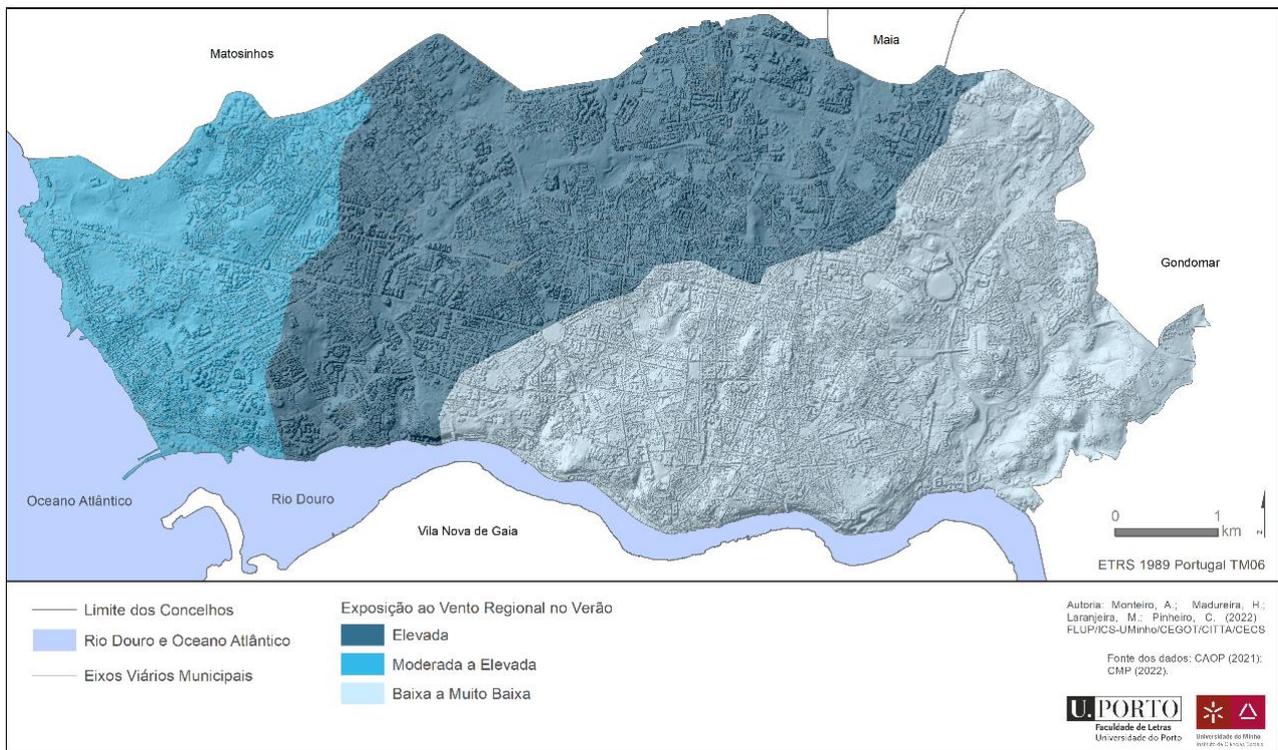


Figura 23 – Exposição ao vento regional no verão

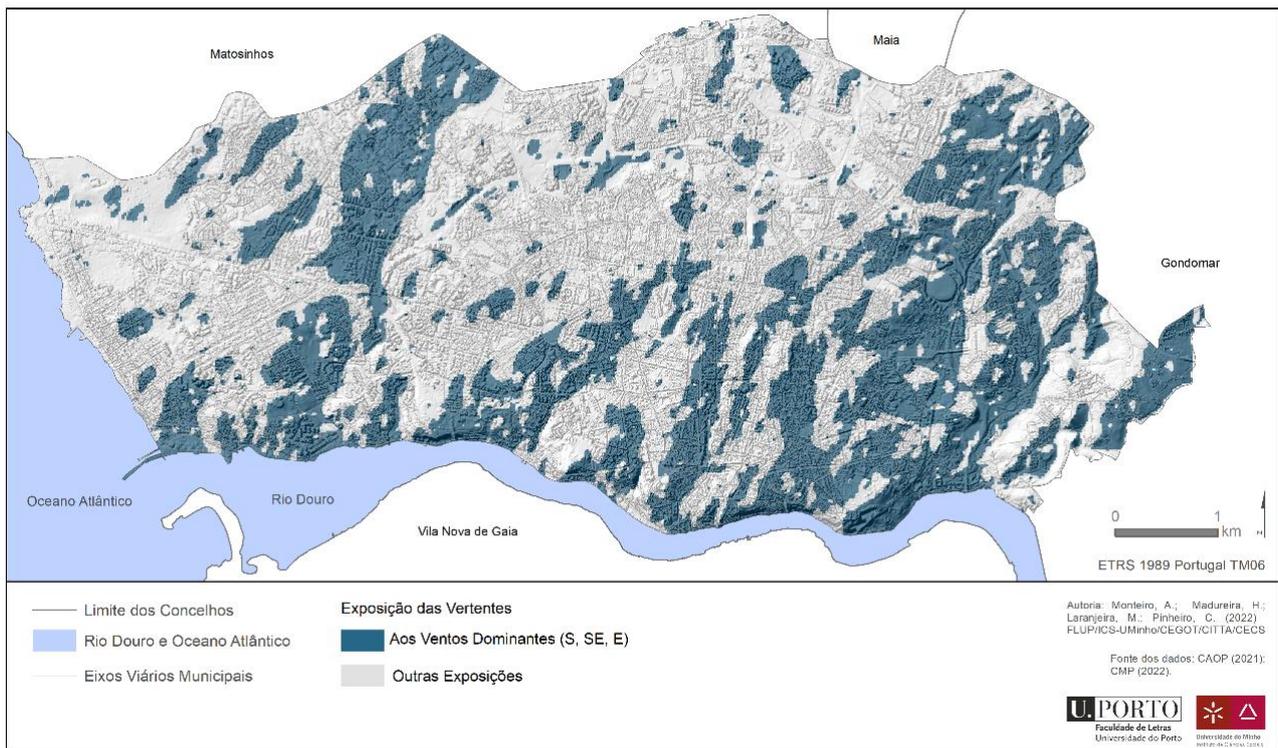


Figura 24 – Vertentes expostas ao vento regional no inverno

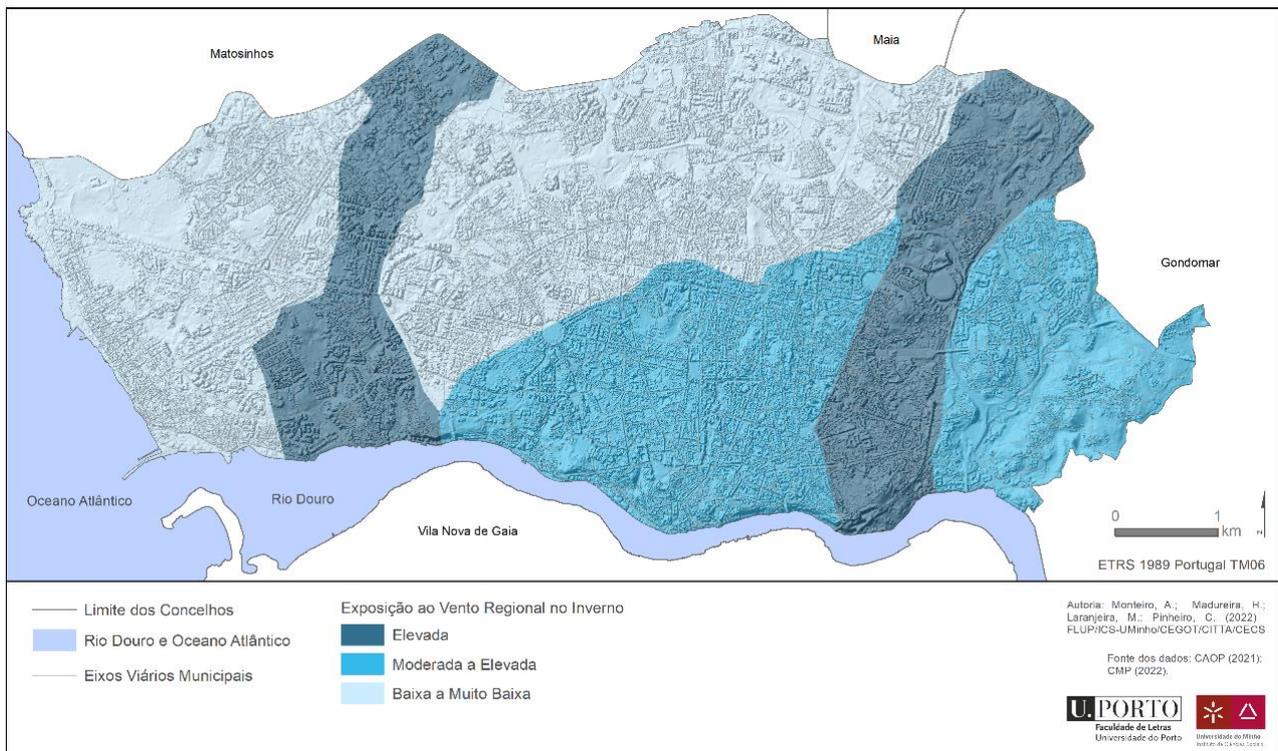


Figura 25 – Exposição ao vento regional no inverno

2.2.2. Delimitação da exposição à brisa do mar e do rio

A capacidade de penetração da brisa do mar diminui gradualmente com o afastar à linha de costa (Aherns e Henson, 2016). Para reproduzir esta questão efetuou-se um conjunto de *buffers*, seguindo os limiares apresentados em Monteiro *et al.* (2008), que traduzem a seguinte classificação relativamente à facilidade de circulação da brisa do mar: elevada até 500m, média de 500m a 2000m, e, baixa a partir dos 2000m (Figura 26).

No concelho do Porto distinguem-se duas de exposição à brisa do mar: elevada a moderada e sem influência (Figura 27). Esta informação permitiu detalhar as características de ventilação dos setores definidos anteriormente em função da exposição aos ventos regionais (verão e inverno).

A brisa do rio decorre da proximidade ao rio Douro. De acordo com Monteiro *et al.* (2008), a facilidade de circulação deste fluxo de ar será elevada numa distância inferior a 50m da margem ribeirinha, média entre os 50 a 100m e baixa a partir dos 100m. Assim, apesar da localização sobranceira ao rio Douro, a influência da brisa do rio no Porto encontra-se muito limitada pela compactidade urbana.

2.2.3. Avaliação das trocas de ar intraurbanas termicamente induzidas

Considerando que os principais topos correspondem às áreas densamente urbanizadas e caracterizadas por uma elevada carga térmica, com se viu anteriormente, a produção de ar frio durante as noites de calma anticiclónica, e subsequentes movimentos catabáticos, será muito residual, com exceção do setor este do concelho do Porto.

De entre os fluxos de ar intraurbanos termicamente induzidos salienta-se o efeito de frescura das áreas verdes (em termos genéricos), associado à formação da brisa do parque.

O efeito de frescura das áreas verdes sobre a envolvente construída é entendido como a distância, a partir dos limites dos respetivos quarteirões, até à qual é expectável que se faça sentir (isto é, seja mensurável) um arrefecimento do ar (redução da temperatura do ar) significativo relacionado com a produção de ar fresco ou frio no seu interior. Este arrefecimento é causado por movimentos de trocas de ar gerados entre as áreas verdes (que se mantêm mais frescas) e os quarteirões circunvizinhos (que se encontram mais quentes), com a resultante saída do ar fresco ou frio produzido nas áreas verdes em direção à sua envolvente construída imediata ou relativamente próxima, caso a deslocação do ar fresco ou frio junto à superfície possa ser conduzida através das ruas. Este efeito de frescura é conhecido por brisa do parque, embora seja promovido pelos vários tipos de área verde, pelo que alguns autores se referem à 'brisa das áreas verdes'.

A distância a que se faz sentir um considerável efeito de frescura, ou brisa do parque, depende de certas características estruturais das áreas verdes, nomeadamente:

- **Dimensão (área):** os limiares significativos de área (AREA) que foram adotados basearam-se em Geneletti *et al.* (2016), Monteiro *et al.* (2016), Zardo *et al.* (2017), Aram *et al.* (2019), Sharp *et al.* (2020).
- **Forma (compactidade):** avaliada a partir do Ratio do Perímetro pela Área (P/A) calculado para o total dos 252 quarteirões que constituem as 'Áreas Verdes' do Porto. O limiar significativo de $P/A=0,03$ baseou-se em Monteiro *et al.* (2016), no seu estudo relativo a um conjunto de parques na cidade de Londres (clima temperado marítimo).
- **Proximidade (agregação):** a avaliação do efeito de frescura conjunto criado por *clusters* de pequenos espaços verdes que se encontram a uma distância entre si inferior à da distância a que o efeito de frescura se poderá fazer sentir, em função do somatório das suas áreas (que deverá ser $\geq 2ha$), foi baseada nas conclusões e recomendações para o planeamento urbano de um estudo de referência por Shashua-Bar e Hoffman (2000), realizado em clima subtropical mediterrânico. Partindo do pressuposto, sustentado nos resultados obtidos em Monteiro *et al.* (2016), de que o efeito de frescura associado a 'Áreas Verdes' com dimensão de 2ha se estenderá

pelo menos até à distância de 50m, identificaram-se todos os quarteirões no conjunto dos 252 considerados que se encontram numa vizinhança de 50m, através do cálculo da distância euclidiana ao vizinho mais próximo (NEAR_DIST).

Posto isto, procedeu-se ao cruzamento destas três variáveis para estimar as distâncias médias significativas correspondentes ao efeito de frescura originado a partir dos três grupos de 'Áreas Verdes', tal como segue:

- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $AREA \geq 15ha$, a distância a que se fará sentir o efeito de frescura é superior a 100m (podendo a distância máxima ser muito variável e dependente de outros fatores). Verificou-se que só o Parque da Cidade reúne esta condição, e apenas no verão;
- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $4 \geq AREA > 15ha$, a distância a que se fará sentir o efeito de frescura é de, pelo menos, 100m;
- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $2 > AREA > 4ha$ e $P/A \leq 0,03$, a distância a que se fará sentir o efeito de frescura é de, pelo menos, 50m;
- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $2 > AREA > 4ha$ e $P/A > 0,03$, o efeito de frescura não se fará sentir significativamente para além do respetivo limite;
- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $AREA \leq 2ha$ e $NEAR_DIST > 50m$, o efeito de frescura não se fará sentir significativamente para além do respetivo limite;
- Quando o quarteirão da 'Área Verde' se caracteriza por $AREA \leq 2ha$ e $NEAR_DIST \leq 50m$, o efeito de frescura agregado do cluster de 'áreas verdes' (com número variável de quarteirões, consoante o caso) far-se-á sentir a uma distância até 50m.

Conjugando a capacidade de produção do ar fresco ou frio (avaliada anteriormente) com a estimativa do efeito de frescura em função das diversas características das 'Áreas Verdes' do Porto, elaboraram-se os mapas seguintes, relativos ao verão (Figura 28) e ao inverno (Figura 29).

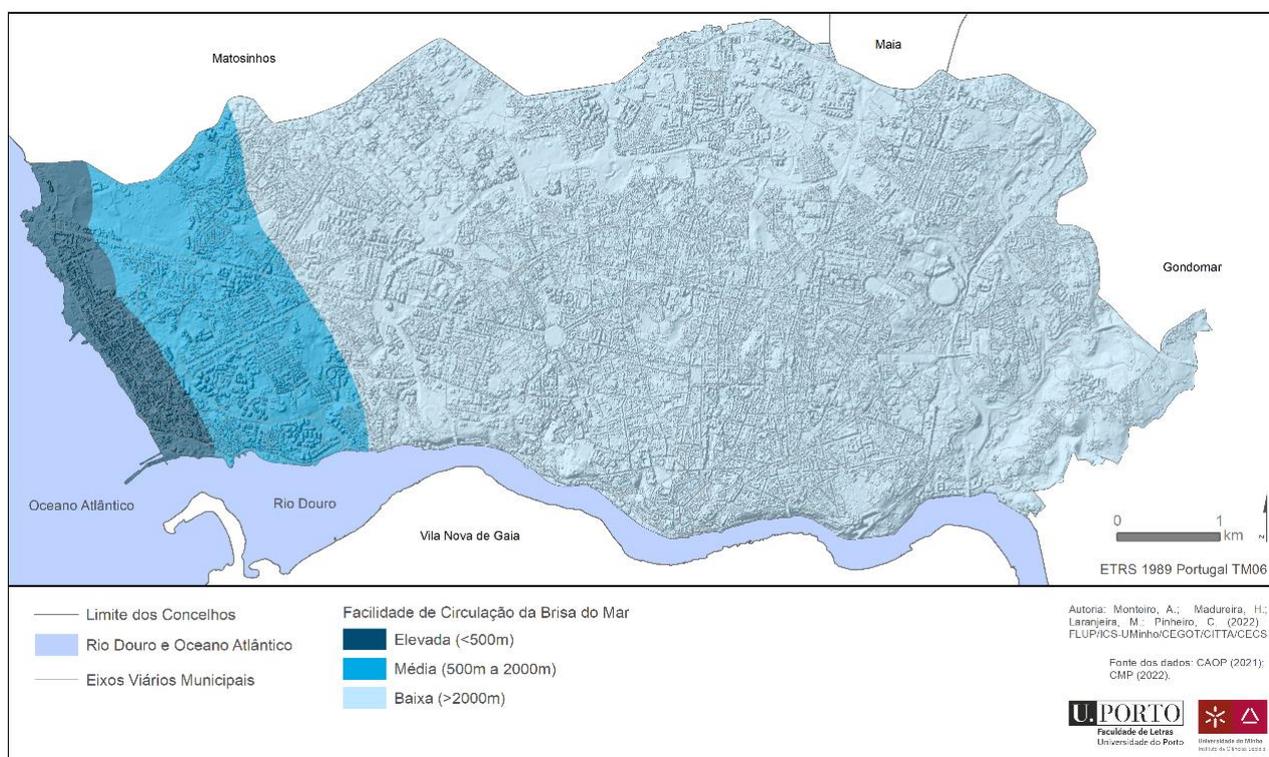


Figura 26 – Facilidade de circulação da brisa do mar

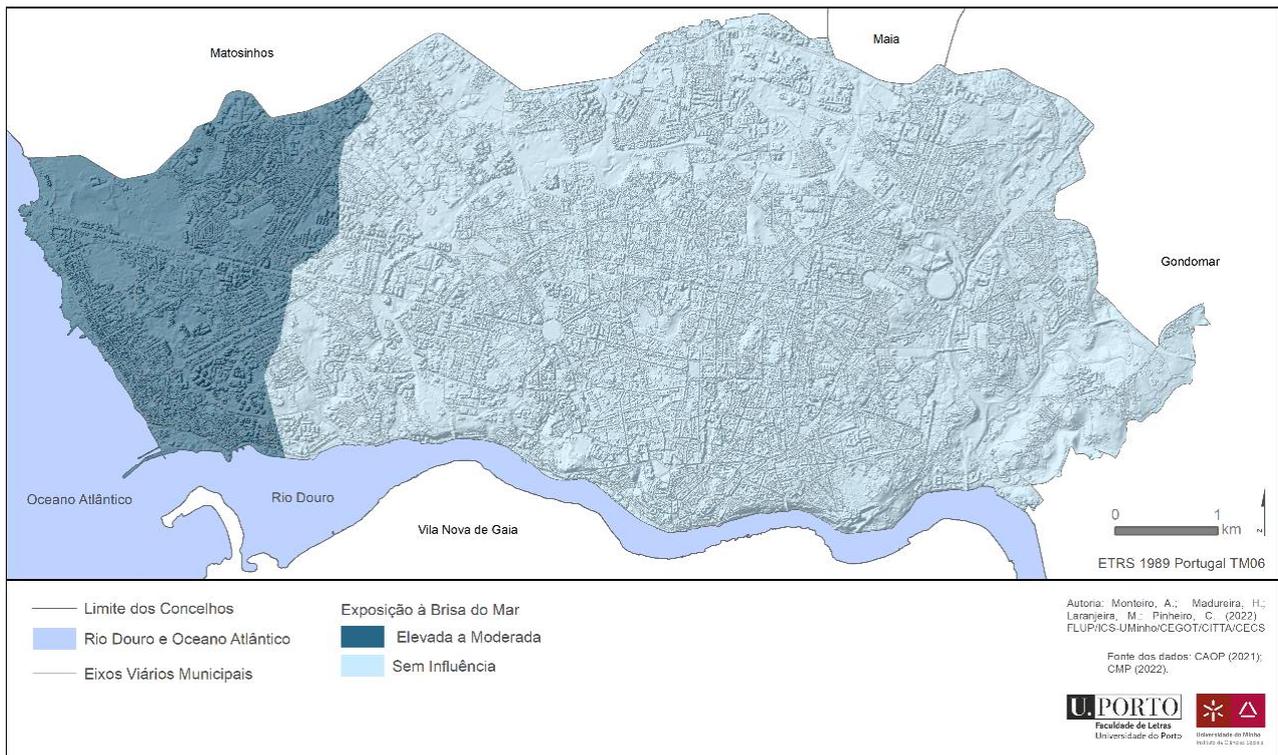


Figura 27 – Exposição à brisa do mar

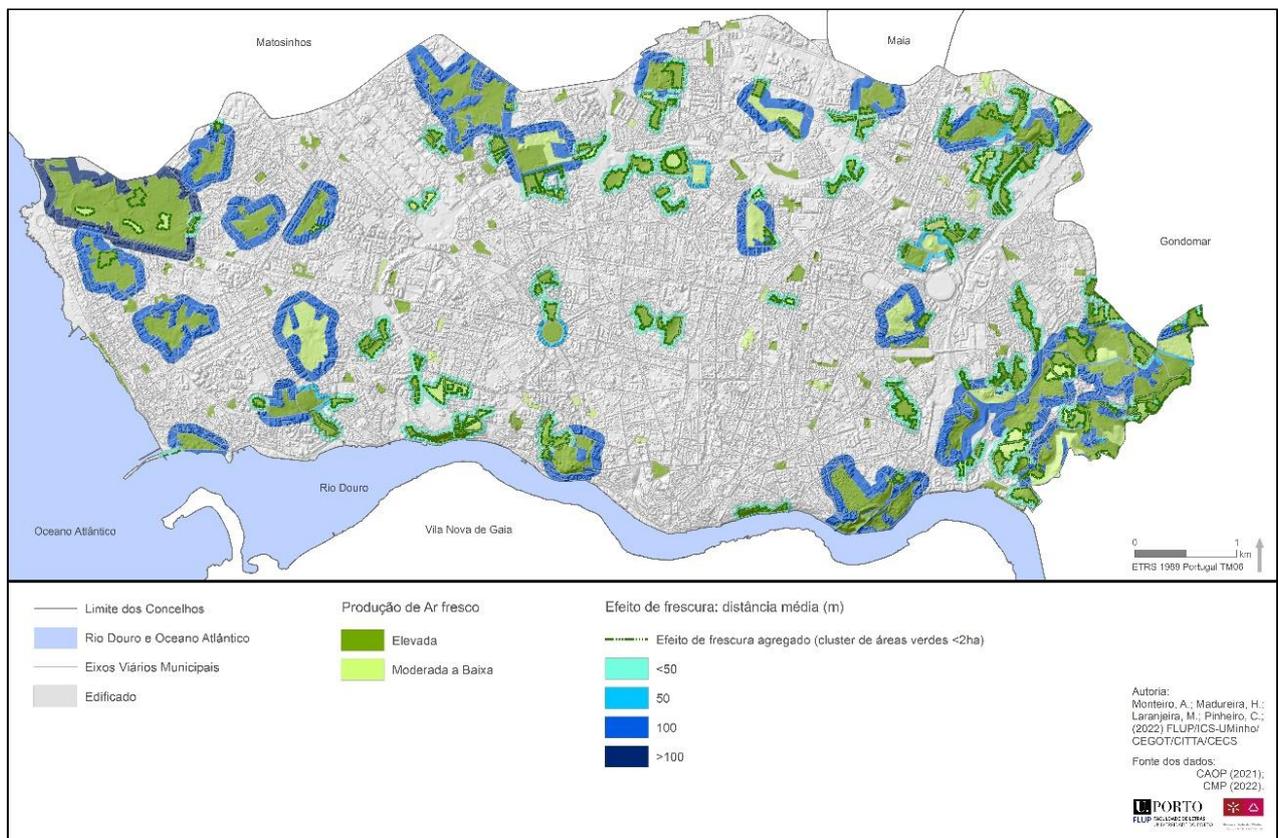


Figura 28 – Efeito de frescura das áreas verdes no verão (período noturno)



Figura 29 – Efeito de frescura das áreas verdes no inverno (período noturno)

2.2.4. Cálculo da rugosidade aerodinâmica

O efeito de barreira à ventilação causado pelas características do edificado é avaliado pela rugosidade aerodinâmica, definida como a intensidade da influência da superfície sobre a velocidade do vento (Ren *et al.*, 2012). Quanto mais rugosa for a superfície, menor será a velocidade do vento na camada urbana ao nível das coberturas e o potencial de ventilação no interior da malha urbana.

A ausência de dados meteorológicos à escala microclimática motiva a utilização de métodos morfométricos (ou geométricos), assentes em valores empíricos, em detrimento dos métodos anemométricos (ou micrometeorológicos), dependentes de observações de campo. A abordagem morfométrica mais comum assenta no pressuposto de que, em primeira instância, a rugosidade é função da altura dos elementos (Grimmond e Oke, 1999).

Importa notar que, para obter a altura dos elementos foi necessário empreender um conjunto de pré-processamentos da informação relativa ao 'ponto mais elevado da construção', uma vez que o valor de cota fornecido, além da altura da construção, inclui igualmente a altitude da superfície. Com efeito, ao valor da cota da construção subtraiu-se a altitude da superfície, obtida previamente do MDT. De seguida, calculou-se a média da altura da construção verificada em cada quarteirão.

Neste trabalho o comprimento da rugosidade aerodinâmica (*roughness length* - Z_o) foi obtido com base na seguinte equação (Grimmond e Oke, 1999):

$$Z_o = f_o \overline{Z_H}$$

em que,

[Eq.3]

Z_o = rugosidade da superfície;

f_o = coeficientes empírico = 0,10;

$\overline{Z_H}$ = altura média dos elementos.

Nas áreas sem construção (e, portanto, sem informação relativa à altura dos elementos) adotou-se valores típicos de rugosidade (Z_o), em função do uso/ocupação do solo, definidos em estudos de referência (Davenport *et al.*, 2000; Stewart e Oke, 2012). Os valores de rugosidade foram classificados em função dos limiares propostos em Davenport *et al.* (2000), nomeadamente (Figura 30): muito baixa (<0,1), baixa (0,1 a 0,3), moderada (0,3 a 0,7), elevada (0,7 a 1,5) e muito elevada (>1,5).

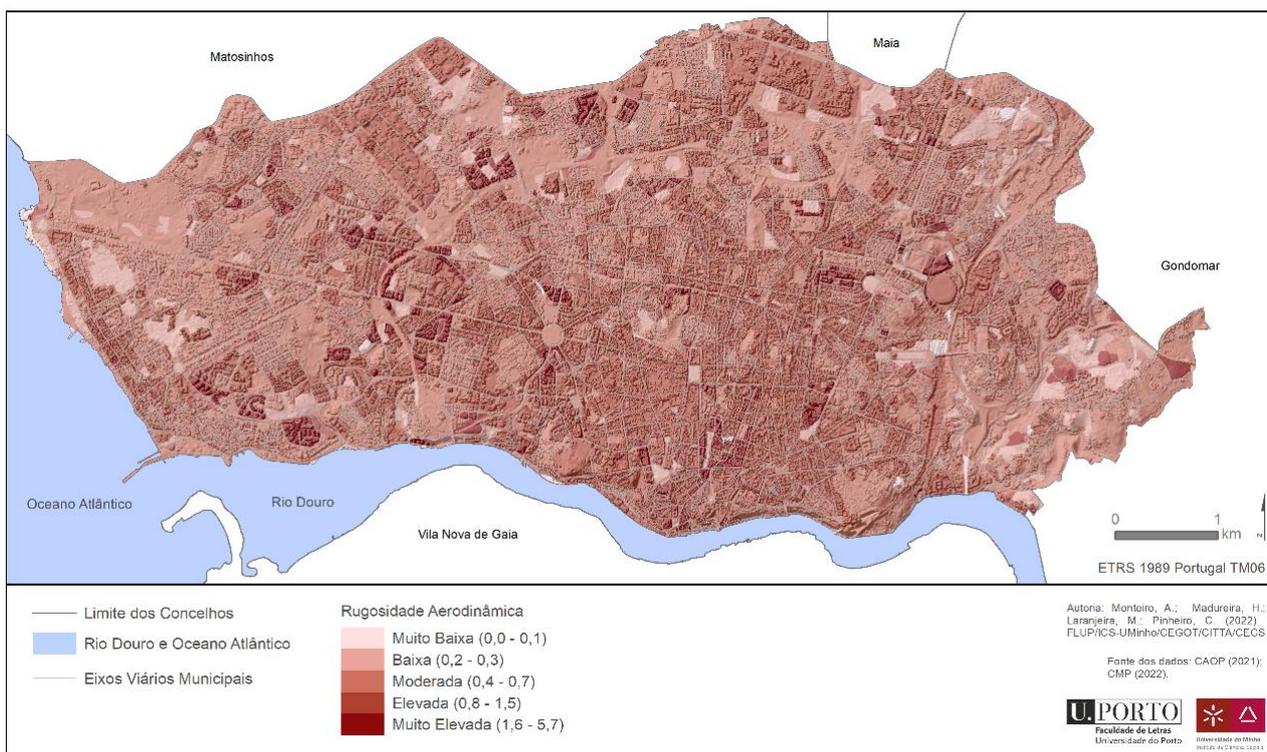


Figura 30 – Rugosidade aerodinâmica

2.2.5. Classificação de áreas homogêneas de ventilação

As áreas homogêneas de ventilação no Porto decorrem do cruzamento de quatro variáveis:

- grau de exposição ao vento regional;
- grau de exposição às brisas do mar e do rio;
- maior ou menor presença de 'Áreas Verdes';
- rugosidade aerodinâmica.

Desta interseção resultaram seis áreas homogêneas de ventilação no verão e sete no inverno. Cabe aqui complementar tal informação com uma descrição pormenorizada de cada área homogênea, remetendo a leitura para os mapas sobre o sistema de ventilação no verão e no inverno, introduzidos igualmente na Síntese Geral.

No verão, distinguem-se as seguintes áreas homogêneas (Figura 32):

- Área 1 – potencial de ventilação muito baixo:** as trocas de ar possuem uma influência residual na redução da temperatura do ar, devido à posição de abrigo aos ventos regionais de N, NW e W, à reduzida presença de áreas

verdes produtoras de ar fresco e a uma rugosidade elevada a muito elevada, que limita a entrada da brisa do rio. Consequentemente, constitui uma área problemática.

- **Área 2 – potencial de ventilação baixo:** os ventos regionais de N, NW e W constituem o principal mecanismo responsável pela redução da temperatura do ar. Porém, o potencial de ventilação natural associado a estes ventos está muito condicionado pela rugosidade das áreas limítrofes (Área 4). Além disso, em situações de calma anticiclónica, as trocas de ar são muito limitadas, quer devido à reduzida presença de áreas verdes produtoras de ar fresco quer à rugosidade moderada a elevada, pelo que as condições térmicas se deterioram durante a noite. Trata-se de uma área de elevada sensibilidade relativamente à redução dos *clusters* de áreas verdes existentes (dimensão <2ha e distância até 50m entre si) e ao aumento de barreiras que possam restringir a circulação do ar próximo da superfície, especialmente na Área 4.
- **Área 3 – potencial de ventilação moderado:** em virtude da posição de abrigo em relação aos ventos regionais de N, NW e W, o principal mecanismo responsável pelas trocas de ar constitui a brisa do parque, formada a partir de uma importante presença de áreas verdes produtoras de ar fresco. A rugosidade moderada a elevada condiciona a distância do efeito das brisas do parque e rio, e limita significativamente os movimentos catabáticos. Deste modo, constitui uma área com elevada sensibilidade relativamente à redução das áreas verdes e ao aumento de barreiras que possam restringir a circulação do ar próximo da superfície.
- **Área 4 – potencial de ventilação moderado:** os ventos regionais de N, NW e W constituem o principal mecanismo responsável pela redução da temperatura do ar. A presença de extensas áreas verdes produtoras de ar fresco promove também importantes trocas de ar em situações de calma anticiclónica, através da brisa do parque. Contudo, o potencial de ventilação natural associado a estes dois mecanismos encontra-se condicionado pela rugosidade moderada a elevada. Esta condição limita também a advecção do ar fresco produzido localmente até às áreas envolventes (Área 2). Daqui resulta uma elevada sensibilidade relativamente à redução das áreas verdes e ao aumento de barreiras que possam restringir a circulação do ar próximo da superfície.
- **Área 5 – potencial de ventilação elevado:** apesar da posição de abrigo em relação aos ventos regionais de N, NW e W, as trocas de ar são promovidas pela brisa do rio e a considerável presença de áreas verdes produtoras de ar fresco e subsequente formação da brisa do parque que, ao contrário do que sucede na generalidade do concelho será ainda potenciada pela orografia (movimentos catabáticos ou descendentes do ar fresco, ao longo de entalhes na vertente e do vale principal), dada a menor perturbação causada pela área construída. Isto resulta na elevada sensibilidade à redução das áreas verdes existentes e densificação do tecido urbano, particularmente ao longo dos corredores preferenciais de ventilação, que devem ser mantidos.
- **Área 6 – potencial de ventilação muito elevado:** os ventos regionais de N, NW e W, as brisas do mar, do rio e do parque – em particular, a gerada pelo Parque da Cidade – promovem as trocas de ar e possuem significativo potencial de redução da temperatura do ar. Por consequência, trata-se de uma área de muito alta sensibilidade relativamente à redução das áreas verdes e ao aumento de barreiras que possam restringir a circulação do ar próximo da superfície.

No inverno, as áreas homogéneas em relação ao potencial de ventilação são as que seguem (Figura 33):

- **Área 1 – potencial de ventilação moderado:** os ventos regionais de S, SE, e E constituem o principal mecanismo de renovação do ar. A rugosidade elevada a muito elevada, que caracteriza o conjunto da área, perturba significativamente a circulação do vento regional no interior da malha urbana, promove a criação de fluxos turbulentos de ar à microescala (escala do quarteirão e do edifício) e limita a entrada da brisa do rio.
- **Área 2 – potencial de ventilação muito baixo:** a posição de abrigo em relação aos ventos regionais de S, SE e E, bem como a reduzida presença de áreas verdes, limita a renovação do ar no conjunto da área. Não obstante, ocorre uma menor dissipação do calor, que atenua o desconforto bioclimático.

- **Área 3 – potencial de ventilação elevado:** os ventos regionais de S, SE, e E constituem o principal mecanismo de renovação do ar. Em noites de calma anticiclónica, as extensas áreas verdes promovem a advecção do ar frio aí produzido (brisa do parque), causando o arrefecimento dos quarteirões circunvizinhos. Pelo contrário, a brisa do rio promove nestas noites a amenização da temperatura do ar junto à margem ribeirinha. Deste modo, constitui uma área sensível ao aumento de barreiras que impeçam, por um lado, a entrada da brisa do rio, e, por outro, a drenagem do ar frio, promovendo consequentemente a sua estagnação na camada urbana abaixo das copas das árvores e das coberturas dos edifícios.
- **Área 4 – potencial de ventilação baixo:** em virtude da posição de abrigo em relação aos ventos regionais de S, SE e E, a presença de extensas áreas verdes produtoras de ar frio constitui o principal mecanismo de trocas de ar sob condições anticiclónicas, arrefecendo, por conseguinte, as áreas limítrofes.
- **Área 5 – potencial de ventilação elevado:** a exposição direta aos ventos regionais de S, SE, e E é determinante para renovação do ar nesta área. Em noites de calma anticiclónica é a presença de áreas verdes e a brisa do rio que rege as trocas de ar. Neste sentido, trata-se de uma área sensível ao aumento de barreiras que impeçam a circulação do ar junto à superfície, limitando a influência amenizadora da brisa do rio e contribuindo para a estagnação do ar frio.
- **Área 6 – potencial de ventilação muito elevado:** os ventos regionais de S, SE, e E determinam a renovação do ar nesta área. Sob condições de abrigo aerológico, as numerosas e extensas áreas verdes são responsáveis por uma elevada produção de ar frio, que é drenado ao longo das vertentes e do fundo de vale. Por se tratar de uma área muito problemática no inverno, é crucial salvaguardar os corredores de ventilação preferenciais da densificação urbana, que impeça os movimentos catabáticos e conduza a um arrefecimento acentuado da superfície decorrente da estagnação generalizada do ar frio.
- **Área 7 – potencial de ventilação moderado:** a posição de abrigo em relação aos ventos regionais de S, SE, e E somada à influência da brisa do mar (e do rio) incrementa a amenização generalizada da temperatura do ar nesta área. Com efeito, não ocorre brisa do parque em noites de calma anticiclónica devido ao esbatimento do gradiente térmico entre as áreas verdes – nomeadamente o Parque da Cidade – e a envolvente construída.

2.2.6. Demarcação dos corredores de ventilação preferenciais

Os corredores de ventilação são condicionados pela rugosidade da superfície, pela topografia e pelas circulações termicamente induzidas (Acero *et al.*, 2013). Por conseguinte, os corredores de ventilação preferenciais foram classificados em função do mecanismo ou mecanismos responsáveis pela sua dinâmica, nomeadamente:

- brisa do mar, decorrente do aquecimento desigual do mar e da superfície terrestre;
- brisa do parque, que traduz o efeito de frescura das 'Áreas Verdes';
- fluxo catabático, induzido pela topografia.

Em todo o setor central do Porto (e margem ribeirinha) a densidade e verticalização do edificado (rugosidade elevada a muito elevada) causa atrito à progressão dos fluxos de ar, desencadeia turbilhões e vórtices, pelo que os corredores de ventilação (mesmos os preferenciais, coincidentes com os entalhes da superfície) se encontrarão condicionados/obliterados.

3. Síntese Final

O papel determinante das diversas coberturas e usos do solo na formação de microclimas urbanos entre o nível da superfície e o nível da cobertura dos edifícios (isto é, na atmosfera urbana inferior, camada urbana ao nível das coberturas ou *canopy layer*) encontra-se sobejamente reconhecido e investigado no seio da comunidade científica (Oke *et al.*, 2017). Estas coberturas e usos do solo alinham-se ao longo de um gradiente entre dois grandes tipos: as superfícies impermeáveis e edificadas, por um lado, e as superfícies permeáveis e sem construção, por outro.

São os microclimas resultantes do complexo gradiente artificial-natural urbano que, em grande medida, condicionam a experiência individual e coletiva de conforto e desconforto bioclimático. Assim sendo, o modelo climático do Porto alicerçou-se nas características da cobertura e uso do solo cuja influência climática não só foi já demonstrada na literatura como serviu igualmente de base a outros modelos climáticos de numerosas cidades em todo mundo (Ng e Ren, 2015).

Tendo em conta o exposto, elegeu-se o quarteirão como unidade espacial de referência (ou resolução espacial) para o modelo desenvolvido. Conferiram-se as bases de dados geográficos da Câmara Municipal do Porto (CMP) com as produzidas e disponibilizadas pelo *Land Monitoring Service*, do Programa Copernicus da União Europeia (Agência Europeia do Ambiente), designadamente o 'Urban Atlas 2018', tendo-se optado por utilizar esta última devido quer ao maior pormenor dos limites espaciais dos vários quarteirões quer à elevada desagregação do sistema de classificação da cobertura e uso do solo.

Uma vez que a discriminação de grandes áreas no concelho do Porto com funções climáticas distintas assentou na avaliação individual dos seus quarteirões (num total aproximado de 2440), criou-se para este estudo uma extensa base de dados, no âmbito de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), em que cada quarteirão se encontra caracterizado relativamente a todas as variáveis analisadas. Esta caracterização dos quarteirões efetuou-se de duas maneiras, consoante os casos:

- através do valor médio calculado para o respetivo polígono, com base nas ferramentas do programa ArcGIS-ArcMap;
- pela adoção de um valor de referência, com base em publicações basilares.

Finalmente, convém salientar que o conhecimento prévio do clima e ambiente urbano do concelho do Porto, patente no relatório exaustivo de Monteiro *et al.* (2018) elaborado no contexto da revisão do Plano Diretor Municipal (PDM), constituiu uma peça fundamental para a elaboração do modelo climático.

3.1. Principais Resultados e Pontos-Chave a Reter

3.1.1. Distinção de Áreas em Função da Carga Térmica Produzida

Relevância

Por carga térmica entende-se a quantidade de calor ou o somatório de todas as formas de calor presentes num determinado ambiente. Quando a carga térmica de um dado local é elevada, o calor produzido vai sobreaquecer o ar. Em ambiente urbano, a carga térmica depende essencialmente dos materiais artificiais, calor antrópico e densidade do edificado, mas também da presença de áreas verdes devido ao seu efeito de arrefecimento do ar (Ren *et al.*, 2012). Deste modo, a avaliação da carga térmica permite identificar as áreas do Porto que mais contribuem para o sobreaquecimento ou o arrefecimento do ar, tanto localmente como nas áreas adjacentes ou próximas.

Mapa Final e Descrição

Os quarteirões do concelho do Porto foram classificados em função da respetiva carga térmica, permitindo desta maneira distinguir três grandes tipos de áreas (Figura 31):

- **Áreas com baixa carga térmica:** conjunto das áreas verdes com uma significativa capacidade de produção de ar fresco ou frio, devido ao sombreamento e/ou à evapotranspiração. No verão, geram um microclima favorável e têm igualmente um efeito de frescura direto sobre os quarteirões edificados circunvizinhos. No inverno, a formação de ar frio noturno nas áreas com elevada arborização ou de vegetação predominantemente herbácea contribui para o aumento do desconforto térmico. Esta situação agrava-se quando aliada a más condições de ventilação (ou seja, dificuldade de drenagem através de movimentos catabáticos), que se repercutem na estagnação do ar frio.
- **Áreas com moderada carga térmica:** conjunto de áreas com coberturas e usos do solo muito heterogéneos, que incluem desde quarteirões consideravelmente edificados até aos que apresentam uma muito baixa impermeabilização da superfície. Estas áreas individualizam-se mais pela carga térmica moderada, tanto no verão como no inverno, do que pela respetiva capacidade de arrefecimento do ar. Com efeito, a produção de ar fresco ou frio depende de tipo de vegetação predominante (herbáceo, arbustivo ou arbóreo) em cada quarteirão. Distinguem-se dois tipos de áreas de transição: (1) os quarteirões localizados nas freguesias periféricas, adjacentes às áreas verdes, que beneficiarão diretamente do efeito de frescura que estas criam no verão; e, (2) os quarteirões situados em pleno núcleo central do Porto, inseridos no tecido urbano contínuo, que contribuirão para a atenuação local da carga térmica e o sobreaquecimento do ar no verão, beneficiando climaticamente a sua vizinhança imediata.
- **Áreas com elevada carga térmica:** conjunto de quarteirões com elevada densidade da edificação e de impermeabilização da superfície, exibindo uma elevada carga térmica (ou mesmo sobrecarga no verão) e tendência para o sobreaquecimento do ar ou a formação da ilha de calor urbano, tanto no verão como no inverno (neste caso, apenas durante a noite). Possuem uma capacidade de arrefecimento do ar muito reduzida, devido à presença pontual da vegetação e à evapotranspiração residual, pelo que constituem áreas problemáticas no verão.



Figura 31 – Carga térmica no Porto

3.1.2. Delineação do Sistema de Ventilação

Relevância

A circulação do ar, ou ventilação, no interior da malha urbana é imprescindível para salvaguardar a sua renovação, uma vez que garante:

- a substituição do ar quente (geralmente poluído), que se forma nas áreas com maior carga térmica, por ar fresco (com menor ou sem carga poluente);
- a drenagem do ar frio, evitando a sua acumulação e estagnação.

Posto isto, para o modelo climático do Porto, delineou-se o sistema de ventilação urbana em função da sua importância para a 'compensação climática', à semelhança do modelo de Berlim (Senate Department for Urban Development, Building and Housing, 2003). Assim, no verão, a ventilação promove a redução do calor ambiente por meio dos processos de trocas de ar, contribuindo para a melhoria do conforto bioclimático nas áreas onde a carga térmica é elevada e moderada. Já no inverno, a ventilação impede a estagnação do ar frio por meio da sua drenagem, em áreas com baixa carga térmica. Não obstante, é essencial atender ao facto de que a ventilação elevada no inverno contribui em algumas áreas para o desconforto pelo frio extremo, uma vez que induz a dissipação do calor ambiente (perdas térmicas).

Por sua vez, teve-se igualmente em conta que a densidade e a altura do edificado (ou seja, a rugosidade aerodinâmica da superfície) dificultam a entrada e o movimento do ar na camada urbana abaixo do nível das coberturas dos edifícios, comprometendo assim o papel da ventilação nas trocas de ar e redução do desconforto bioclimático. Acresce ainda que o potencial de ventilação foi avaliado relativamente às noites de verão e de inverno, quando as condições de *stress* térmico pelo calor ou pelo frio têm consequências mais severas sobre a saúde.

No Porto, o ar fresco ou frio noturno pode ter diversas proveniências:

- transporte por ventos gerados à escala regional, sob certas condições meteorológicas de maior agitação atmosférica (ventos regionais);
- transporte por ventos gerados à escala local, a partir do mar próximo à linha de costa e do rio Douro (brisa do mar e brisa do rio, respetivamente);
- fluxos gerados à escala intraurbana, a partir das áreas verdes ou induzidos pela orografia.

As brisas do mar e do rio, assim como os fluxos de ar intraurbanos só se formam ou são mais evidentes sob condições meteorológicas de calma atmosférica (noites anticiclónicas), sendo que estas predominam no verão. É também no verão que as brisas são mais intensas.

Pelo explanado, o sistema de ventilação do Porto foi definido em função dos seguintes fatores:

- exposição aos ventos regionais de N, NW e W no verão, e de S, SE e E no inverno (Monteiro *et al.*, 2018);
- exposição à brisa do mar e do rio;
- efeito de frescura das áreas verdes;
- rugosidade aerodinâmica da malha urbana;
- existência de canais ou corredores de ventilação preferenciais, no interior da malha urbana.

Da interseção destas variáveis resultaram grandes áreas com condições homogéneas no verão e no inverno, que foram hierarquizadas em função do respetivo potencial de ventilação.

Mapas Finais e Descrição

No caso do verão, distinguem-se seis áreas homogéneas (Figura 32), cujos critérios de classificação se encontram sintetizados na Tabela 11.

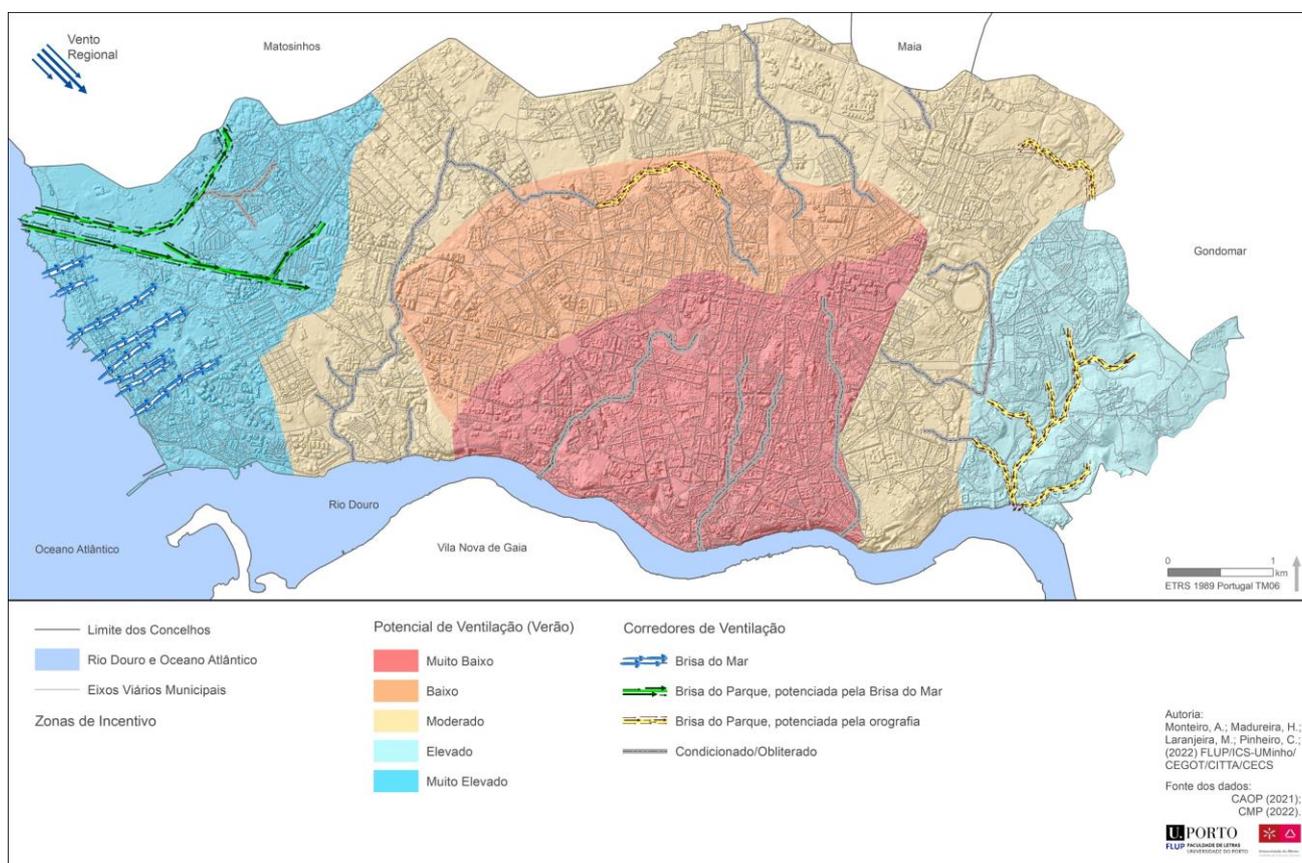


Figura 32 – Sistema de ventilação no Porto, no Verão

Tabela 11 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no verão

Área (ID)	Exposição			Produção de ar fresco pelas áreas verdes	Rugosidade	Principais Processos de Trocas de Ar	Potencial de Ventilação
	Vento Regional	Brisa do Mar	Brisa do Rio (margem ribeirinha)				
1	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Muito Baixo	Predominantemente Elevada	— (Brisa do rio)	Muito Baixo
2	Elevada	Sem influência	Sem influência	Baixo	Moderada a Elevada	Vento Regional	Baixo
3	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Moderado
4	Elevada	Sem influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Moderado
5	Baixa a Muito Baixa	Sem influência	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Brisa do Parque, potenciada pela orografia.	Elevado
6	Moderada a Elevada	Elevada a Moderada	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Brisa do Mar (Vento Regional, Brisa do Parque)	Muito Elevado

Para o inverno, delimitaram-se sete áreas homogéneas Figura 33, cujos critérios de classificação se encontram sintetizados na Tabela 12.

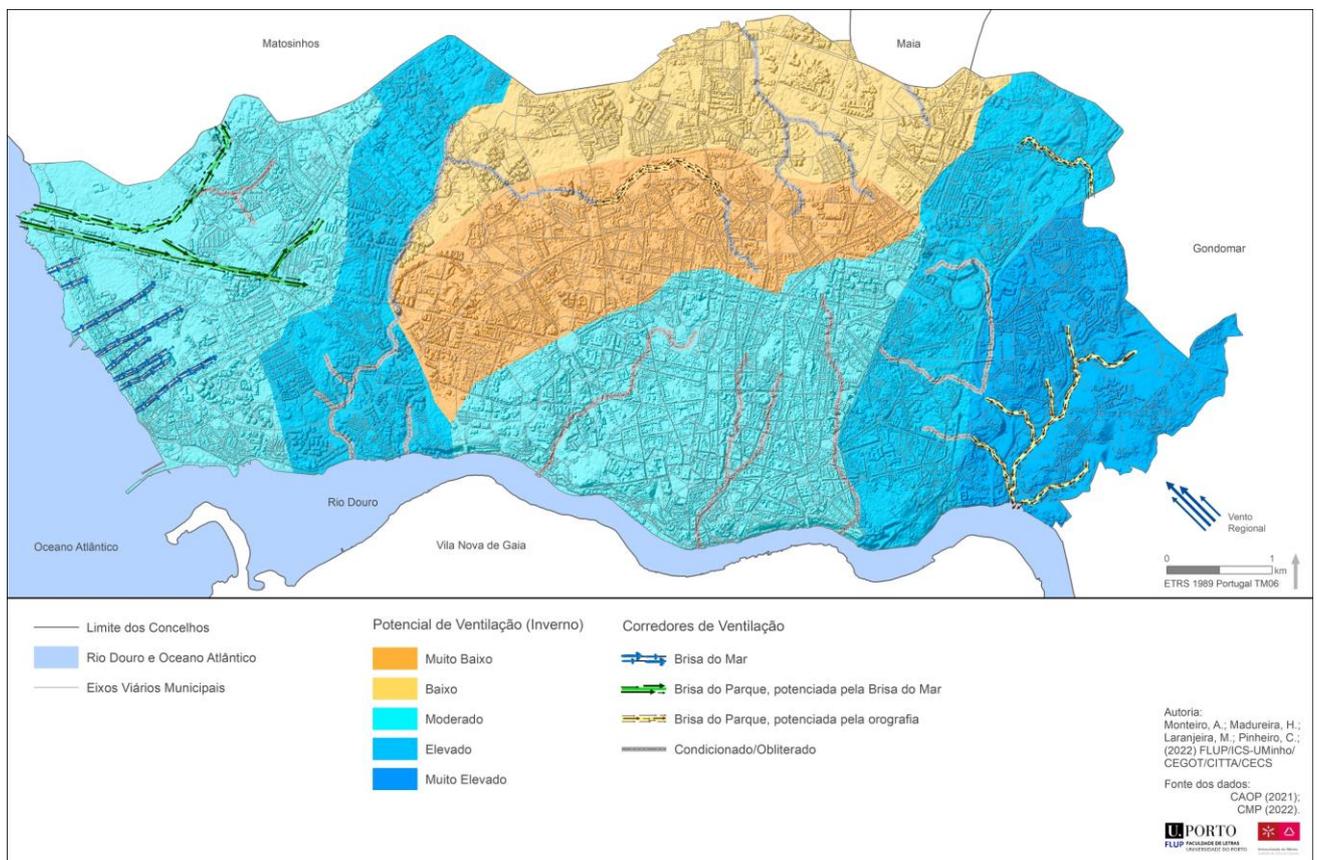


Figura 33 – Sistema de ventilação no Porto, no inverno

Tabela 12 – Critérios da classificação das áreas homogéneas de ventilação no verão

Área (ID)	Exposição			Produção de ar fresco pelas áreas verdes	Rugosidade	Principais Processos de Trocas de Ar	Potencial de ventilação
	Vento Regional	Brisa do Mar	Brisa do Rio (margem ribeirinha)				
1	Moderada a Elevada	Sem Influência	Moderada	Muito Baixo	Predominantemente Elevada	Vento Regional	Moderado
2	Baixa a Muito Baixa	Sem Influência	Sem influência	Baixo	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Muito Baixo
3	Elevada	Sem Influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Elevado
4	Baixa a Muito Baixa	Sem Influência	Sem influência	Moderado	Moderada a Elevada	Brisa do Parque	Baixo
5	Elevada	Sem Influência	Moderada	Moderado	Moderada a Elevada	Vento Regional (Brisa do Parque)	Elevado
6	Moderada a Elevada	Sem Influência	Moderada	Elevado	Predominantemente Moderada	Vento Regional e Brisa do Parque, potenciada pela orografia	Muito Elevado
7	Baixa a Muito Baixa	Elevada a Moderada	Moderada	Baixa	Moderada a Elevada	Brisa do Mar	Moderado

3.1.3. Classificação de Áreas Críticas em Função do Desconforto Bioclimático

As áreas críticas do ponto de vista do desconforto bioclimático foram classificadas com base no cruzamento da informação acerca da carga térmica e do potencial de ventilação para cada quarteirão. No que diz respeito ao verão, a classificação das áreas críticas partiu da consideração de duas situações diametralmente opostas, sendo que se têm:

- *áreas extremamente críticas em relação ao calor extremo* onde, a par da produção de elevada carga térmica, se verifica um potencial de ventilação baixo a muito baixo; e,
- *áreas nada críticas em relação ao calor extremo*, caracterizadas simultaneamente por baixa carga térmica e um potencial de ventilação muito elevado a elevado.

As áreas caracterizadas por níveis críticos intermédios obtiveram-se através dos restantes cruzamentos entre as classes de carga térmica e de potencial de ventilação, tal como consta na Tabela 13. Daqui, resultou o mapa síntese da Figura 34.

Para atenuar o calor extremo no verão é importante utilizar – e maximizar – a capacidade de arrefecimento do ar pelas áreas verdes existentes (Tabela 13) e desta forma mitigar os efeitos prejudiciais da ilha de calor urbano sobre o conforto bioclimático, a saúde e os gastos energéticos com o esforço de climatização dos edifícios (Aleksandrowicz *et al.*, 2017). Neste sentido, apontam-se as seguintes recomendações no que diz respeito à carga térmica:

- **Áreas com elevada carga térmica:** trata-se das áreas mais problemáticas no verão, cuja melhoria das condições bioclimáticas passa necessariamente pela eliminação de parte do calor ambiente, através de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que aumentem a sombra (natural e/ou artificial) e reduzam o nível de impermeabilização (*de-sealing*), incrementando o arrefecimento evaporativo do ar por superfícies permeáveis e vegetadas.
- **Áreas com moderada carga térmica:** no seu conjunto, são áreas especialmente sensíveis à densificação do edificado pelo aumento da carga térmica que acarreta, tanto mais que no Porto estas áreas consubstanciam a

interface espacial entre os quarteirões com baixa e elevada carga térmica. A adoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que minimizem os ganhos térmicos deve ser acautelada em todas as intervenções urbanísticas.

- **Áreas com baixa carga térmica:** correspondem a áreas verdes muito sensíveis tanto ao aumento da impermeabilização do solo como à redução da cobertura vegetal (especialmente de nível arbóreo), que modificam negativamente a carga térmica. São áreas cuja capacidade de arrefecimento do ar no verão deve ser salvaguardada.

A par disto, é importante atender igualmente aos seguintes aspetos relativos ao potencial de ventilação nas noites de verão (Tabela 11):

- **Áreas com potencial de ventilação muito baixo a baixo:** constituem as áreas mais problemáticas durante a noite no verão, pelo que necessitam de medidas de qualificação ambiental *outdoor* que promovam as trocas de calor à microescala (escalas do quarteirão e do edifício), bem como a (re)criação de corredores de ventilação.
- **Áreas com potencial de ventilação moderado:** nestas áreas são particularmente necessárias medidas de qualificação ambiental *outdoor* que reforcem/otimizem o potencial de ventilação atual, através da (re)criação de corredores de ventilação.
- **Áreas com potencial de ventilação elevado a muito elevado:** nestas áreas é fundamental salvaguardar o potencial de ventilação atual, preservando os corredores de ventilação existentes e (re)criando-os onde necessário.

Tabela 13 – Matriz de classificação das áreas críticas no verão (calor extremo)

Potencial de Ventilação \ Carga Térmica	Muito Elevado a Elevado	Moderado	Baixo a Muito Baixo
Baixa	Nada Críticas salvaguardar a capacidade de arrefecimento do ar	Pouco Críticas otimizar a ventilação	Críticas promover a ventilação
Moderada	Pouco Críticas otimizar a capacidade de arrefecimento do ar	Críticas otimizar a capacidade de arrefecimento do ar e a ventilação	Muito Críticas promover a ventilação e otimizar a capacidade de arrefecimento do ar
Elevada	Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar	Muito Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar e otimizar a ventilação	Extremamente Críticas promover a capacidade de arrefecimento do ar e a ventilação

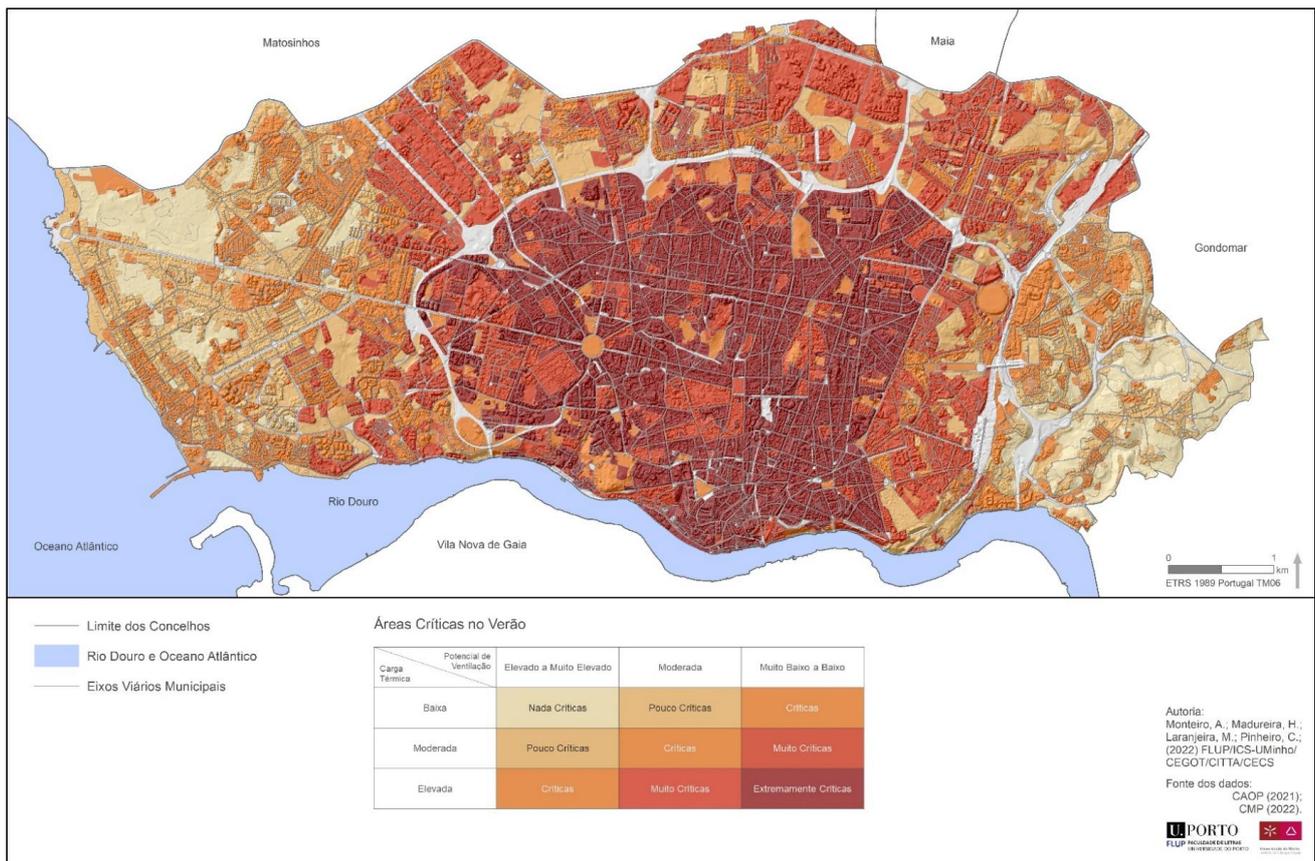


Figura 34 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (calor extremo) no verão

A classificação das áreas críticas em relação ao desconforto sentido no inverno fez-se de acordo com a lógica adotada para o caso do verão. Desta feita, assumiram-se como extremos opostos as seguintes situações:

- (i) *áreas extremamente críticas em relação ao frio extremo* onde se verifica baixa carga térmica em simultâneo com um potencial de ventilação elevado a muito elevado; e,
- (ii) *áreas nada críticas em relação ao frio extremo*, caracterizadas por elevada carga térmica e um potencial de ventilação muito baixo a baixo.

A partir dos outros cruzamentos possíveis entre as diferentes classes de carga térmica e de potencial de ventilação, identificaram-se as áreas com níveis críticos intermédios, como mostra a Tabela 14. O mapa síntese correspondente é ilustrado na Figura 35.

No inverno é fundamental promover condições de abrigo que diminuam o desconforto *outdoor* causado pelo frio extremo (Tabela 14). A par disto, é também necessária a minimização das perdas térmicas por parte dos edifícios, de maneira a reduzir as necessidades energéticas de climatização. A este respeito, apontam-se as seguintes recomendações relativas à carga térmica:

- **Áreas com baixa carga térmica:** constituem as áreas mais problemáticas no inverno. Por se tratarem no seu conjunto de áreas verdes, quanto maior for o grau de arborização, por um lado, ou a superfície ocupada por vegetação herbácea (com elevado *sky view factor*), por outro, maior será a produção de ar frio noturno. Assim, uma adequada seleção das espécies arbóreas, bem como a composição e configuração espacial dos vários níveis de vegetação nestas áreas são aspetos cruciais a ter em atenção na adoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor*, de modo a promover o aumento dos ganhos térmicos durante o inverno.

- **Áreas com moderada carga térmica:** no seu conjunto, são áreas onde devem ser promovidas, em todas as intervenções urbanísticas, medidas de qualificação ambiental *outdoor* que minimizem as perdas térmicas.
- **Áreas com elevada carga térmica:** não constituem áreas problemáticas no inverno, devendo-se acautelar as perdas térmicas.

Concomitantemente, é necessário considerar os seguintes aspetos relativos ao potencial de ventilação nas noites de inverno (Tabela 12):

- **Áreas com potencial de ventilação elevado a muito elevado:** são áreas que se revelam muito problemáticas no inverno, pois potenciam o desconforto bioclimático pelo frio extremo, dada a dissipação do calor ambiente (e eventual efeito *wind chill*). Por outro lado, quando coincidem com áreas verdes, produtoras de ar frio noturno, torna-se crucial salvaguardar o potencial de ventilação, de modo a impedir a estagnação do ar. Assim sendo, nestas áreas são tão importantes as medidas de qualificação ambiental que promovam condições de abrigo *outdoor*, como preservar ou (re)criar corredores de ventilação que assegurem a drenagem do ar frio, onde necessário.
- **Áreas com potencial de ventilação moderado:** nestas áreas são particularmente necessárias medidas de qualificação ambiental que otimizem as condições de abrigo *outdoor*.
- **Áreas com potencial de ventilação muito baixo a baixo:** nestas áreas as intervenções urbanísticas devem salvaguardar/aproveitar as condições de abrigo *outdoor*.

Tabela 14 – Matriz de classificação das áreas críticas no inverno (frio extremo)

Potencial de Ventilação \ Carga Térmica	Muito Baixo a Baixo	Moderado	Elevado a Muito Elevado
Elevada	Nada Críticas salvaguardar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Pouco Críticas otimizar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Críticas promover as condições de abrigo <i>outdoor</i>
Moderada	Pouco Críticas minimizar as perdas térmicas	Críticas minimizar as perdas térmicas e otimizar as condições de abrigo <i>outdoor</i>	Muito Críticas salvaguardar a ventilação (impedir a estagnação do ar frio), promover as condições de abrigo <i>outdoor</i> e minimizar as perdas térmicas
Baixa	Críticas promover os ganhos térmicos	Críticas Salvaguardar a ventilação (efeito amenizador da temperatura do ar pelas brisas do mar e rio)	Extremamente Críticas salvaguardar a ventilação (impedir a estagnação do ar frio), promover as condições de abrigo <i>outdoor</i> e os ganhos térmicos

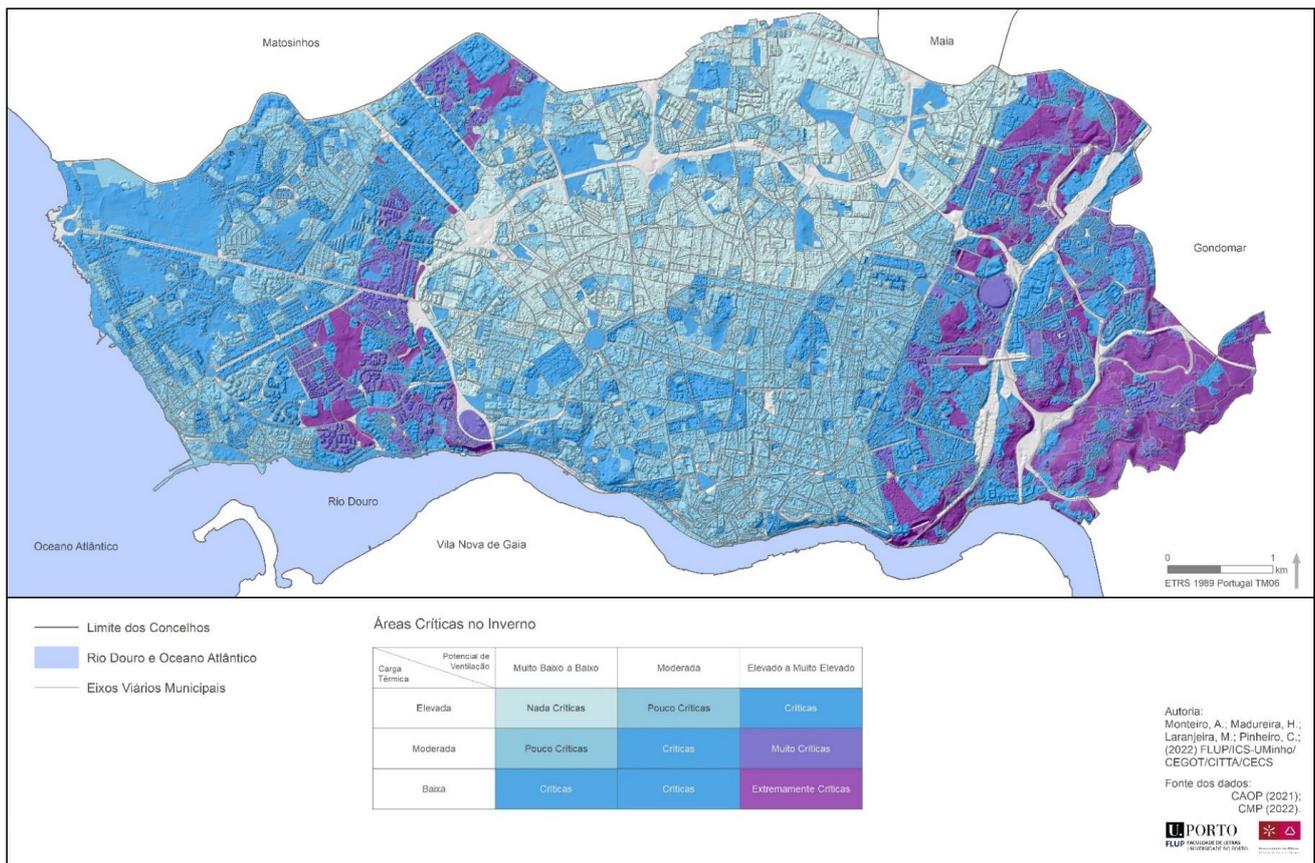


Figura 35 – Áreas críticas em função do desconforto bioclimático (frio extremo) no inverno

3.1.4. Identificação de Áreas Prioritárias para a Promoção da Qualificação Ambiental *Outdoor*

A conjugação das áreas críticas devido ao desconforto pelo calor (verão) e ao desconforto pelo frio (inverno) constitui a base para estabelecer diferentes graus de prioridade no que respeita a promoção de medidas de qualificação ambiental *outdoor* em cada uma destas estações do ano. Esta síntese final consubstancia-se na matriz seguinte (Tabela 15) e no mapa da Figura 36.

Tabela 15 – Matriz de níveis de prioridade para a promoção da qualificação ambiental *outdoor*

		Áreas Críticas em Relação ao Frio Extremo (Inverno)				
		Extremamente Crítica	Muito Crítica	Crítica	Pouco Crítica	Não Crítica
Área Críticas em Relação ao Calor Extremo (Verão)	Extremamente Crítica	S.O.	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário
	Muito Crítica	S.O.	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável
	Crítica	S.O.	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.
	Pouco Crítica	Muito prioritário	Prioritário	Recomendável	S.O.	S.O.
	Não Crítica	Prioritário	S.O.	Recomendável	S.O.	S.O.

S.O.=Sem Observações

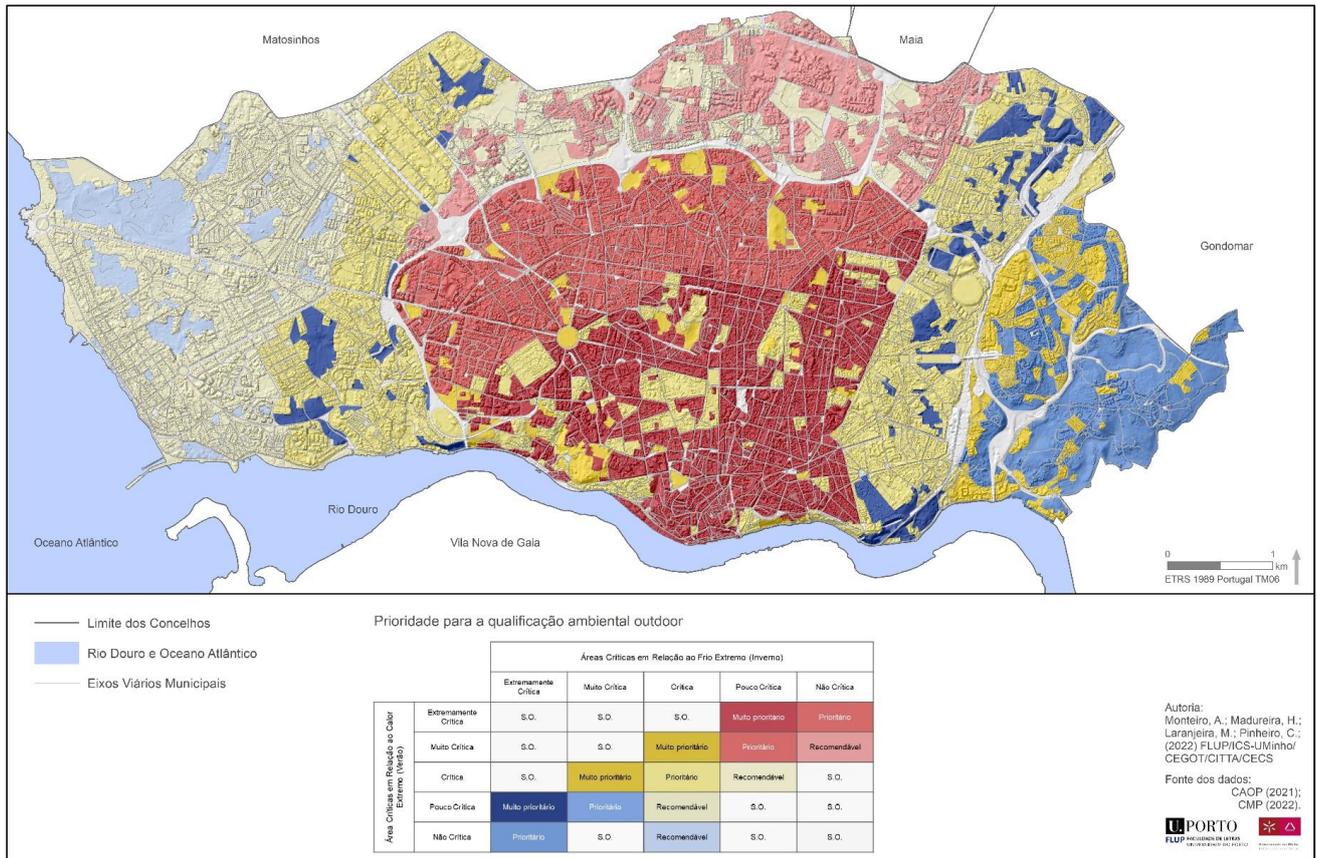


Figura 36 – Áreas prioritárias para a qualificação ambiental outdoor

Mapas Anexos

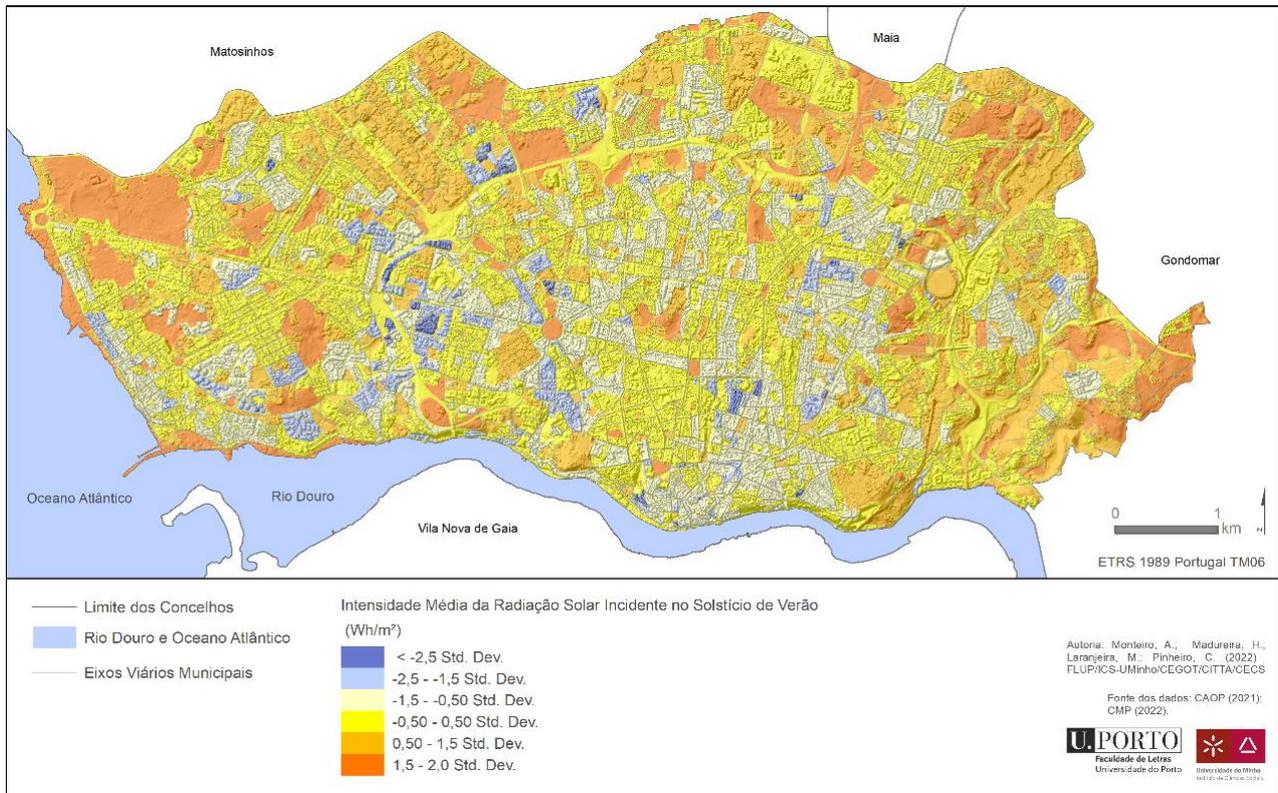


Figura 37 – Intensidade da radiação solar incidente no solstício de verão (W/m²)

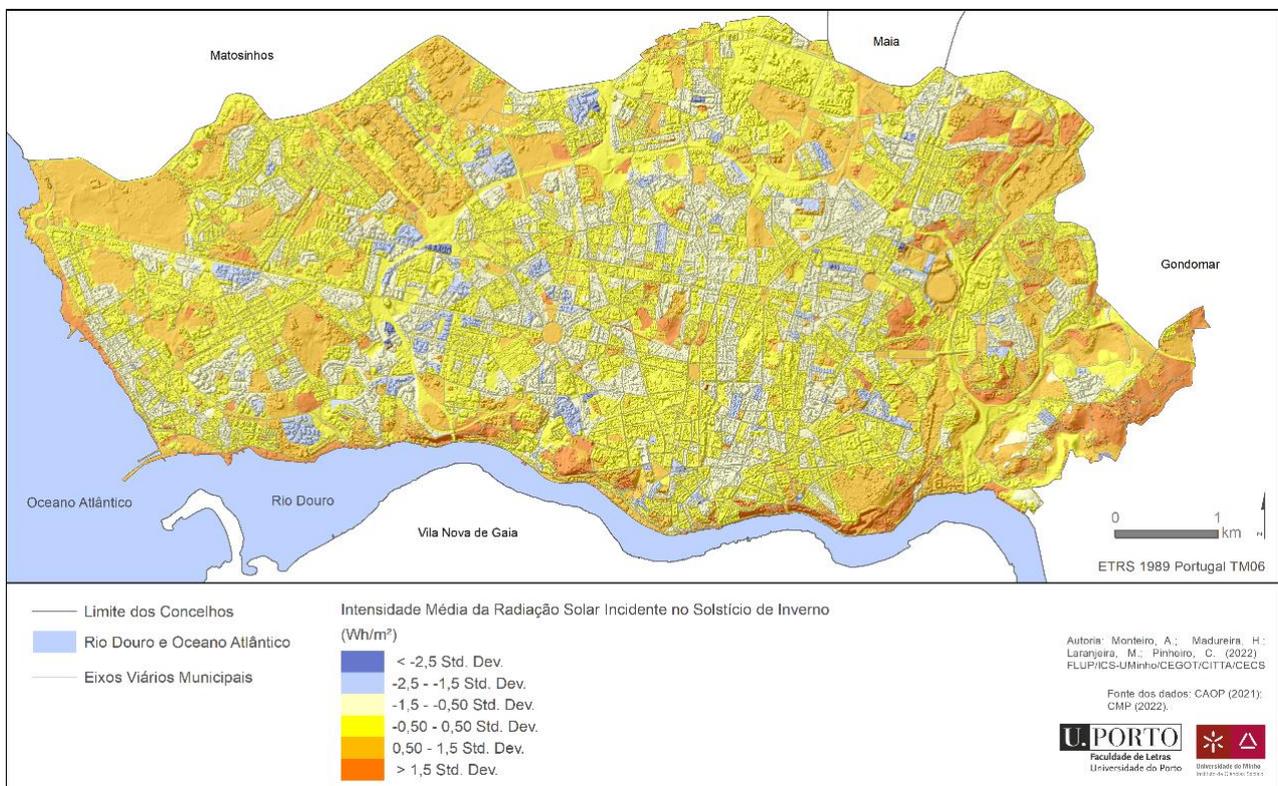


Figura 38 – Intensidade da radiação solar incidente no solstício de inverno (W/m²)

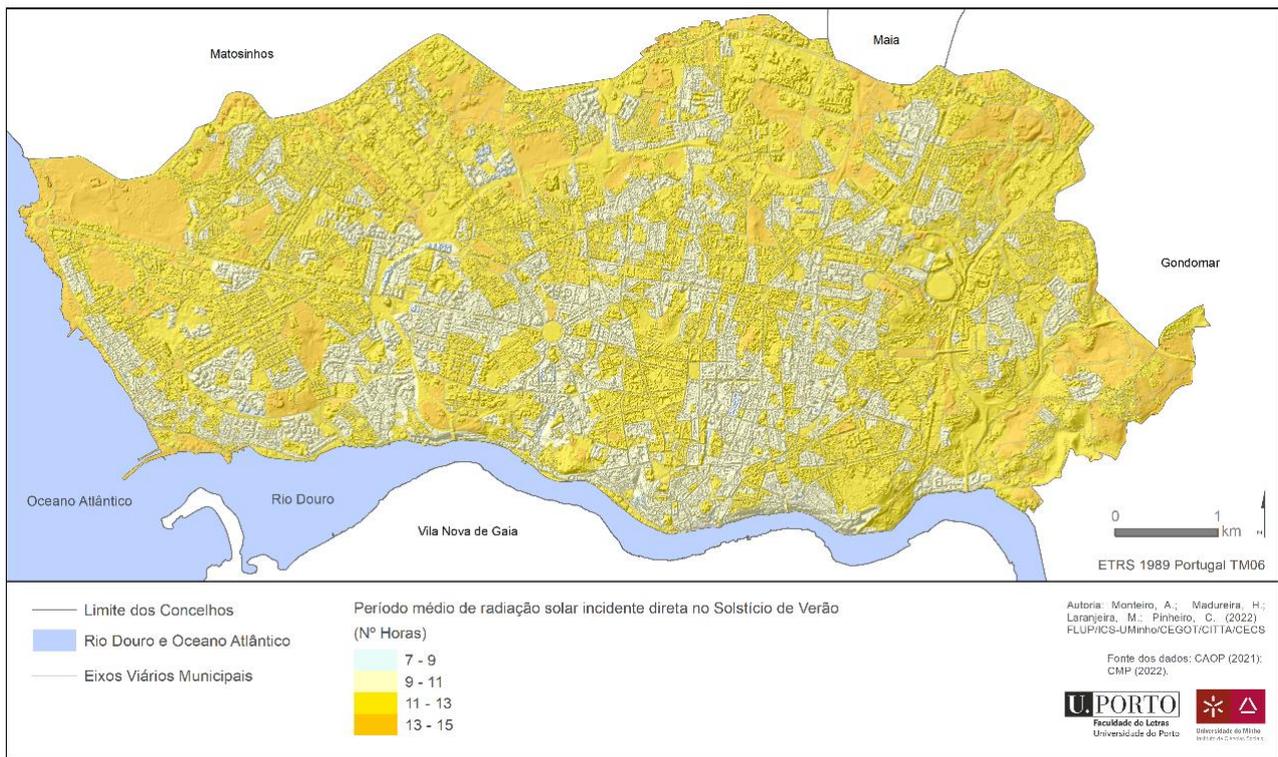


Figura 39 – Período médio da radiação solar incidente direta no solstício de verão (nº horas)

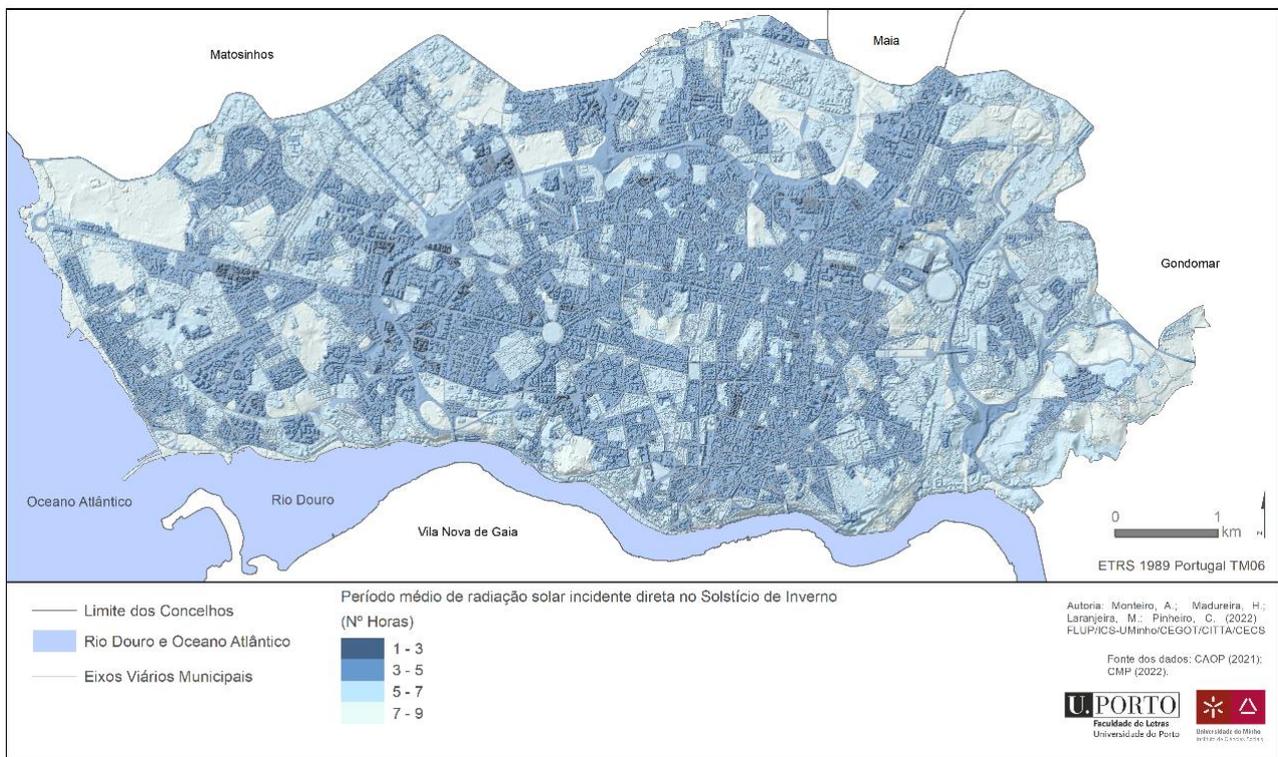


Figura 40 – Período médio da radiação solar incidente direta no solstício de inverno (nº horas)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, J., Arrizabalaga, J., Kupski, S., & Katzschnner, L. (2013). Deriving an Urban Cliguhae Map in coastal areas with complex terrain in the Basque Country (Spain). *Urban Climate*, 4, 35-60.
- Ahrens, C. & Henson, R. (2015). *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage Learning Canada Inc.
- Aleksandrowicz, O., Vuckovic, M., Kiesel, K., & Mahdavi, A. (2017). Current trends in urban heat island mitigation research: Observations based on a comprehensive research repository. *Urban Climate*, 21, 1-26.
- Aram, F., García, E. H., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4), e01339.
- CE (2015). *Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities - Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities'*. European Union.
- Davenport, A., Grimmond, C., Oke, T., & Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *American Meteorological Society*, 96-99.
- Forman, T. (2014). *Urban Ecology. Science of Cities*. Cambridge University Press.
- Geneletti, D. Zardo, L, Cortinovis, C (2016). Promoting nature-based solutions for climate adaptation in cities through impact assessment. In D. Geneletti (Ed), *Handbook on biodiversity and ecosystem services in impact assessment*. Edward Elgar Publishing, pp. 428-452
- Goward, S. (2005). Albedo and Reflectivity, in J. Oliver, *Encyclopedia of World Climatology*, pp.32-35, Springer.
- Grimmond, C., & Oke, T. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38(9), 1262-1292.
- Monteiro, A. (2020). Conforto. In J. Rio Fernandes (Ed.), *Geografia do Porto*. Book Cover, pp. 170-181.
- Monteiro, A. (coordenação); Madureira, H.; Fonseca, L.; & Velho, S. (2018). *Suporte Biofísico e Ambiente. Clima e Ambiente Urbano – Relatório de Caracterização e Diagnóstico para a Revisão do Plano Diretor Municipal do Porto*. Câmara Municipal do Porto.
- Monteiro, M., Doick, K., Handley, P., & Peace, A. (2016). The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 16, 160-169.
- Ng, E., & Ren, C. (Eds.). (2015). *The urban climatic map: a methodology for sustainable urban planning*. Routledge.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Ren, C., Spit, T., Lenzholzer, S., Yim, H., Heusinkveld, B., van Hove, B., ... & Katzschnner, L. (2012). Urban climate map system for Dutch spatial planning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 207-221.
- Sellers, W. (1965). *Physical Climatology*. University of Chicago Press
- Senate Department for Urban Development, Building and Housing (2003). *04.10 Climate Model Berlin – Analysis Maps (Edition 2003)*. Berlin Environmental Atlas. Disponível em <https://www.berlin.de/umweltatlas/assets/klima/klimaanalyse/analysekarten/en-texte/eka410.pdf>.
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., Glowinski, K., Griffin, R., Guannel, G., Guerry, A., Johnson, J., Hamel, P., Kennedy, C., Kim, C.K., Lacayo, M., Lonsdorf, E., Mandle, L., Rogers, L., Silver, J., Toft, J., Verutes, G., Vogl, A. L., Wood, S., & Wyatt, K. (2020). *InVEST 3.10.2 User's Guide. The Natural Capital Project*, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 31(3), 221-235.
- Stewart, I., & Oke, T. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- The World Bank (2021). A catalogue of nature-based solutions for urban resilience. World Bank Group.
- Tong, Z., Luo, Y., & Zhou, J. (2021). Mapping the urban natural ventilation potential by hydrological simulation. *Building Simulation*, 14(2), 351-364.
- Trabucco, A., & Zomer, R. (2019). *Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ETo) Climate Database (Version 2.0)*. Disponible em: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>.
- USGS (2018). Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. U.S. Department of the Interior. Disponible em: https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.
- USGS (2022). *Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide (Version 4.0)*. Disponible em: https://dg-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-1619_Landsat-8-9-C2-L2-ScienceProductGuide-v4.pdf.
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26, 225-235.
- Zwadzka, J., Harris, R., & Corstanje, R. (2021). Assessment of heat mitigation capacity of urban greenspaces with the use of InVEST urban cooling model, verified with day-time land surface temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 214(104163), 12p.