

# Economia Circular para Cidades Saudáveis

## Circular Economy for Healthy Cities

Carlos Borrego

Departamento de Ambiente e Ordenamento & CESAM  
Universidade de Aveiro, Portugal  
cborrego@ua.pt  
ORCID: 0000-0002-1673-2084

### RESUMO

Os locais onde as pessoas vivem e trabalham, consomem e desperdiçam, têm um papel fundamental na transição para a economia circular. A crise da covid-19 destacou o caráter insustentável de determinadas tendências ambientais e sociais, e levou a reconsiderar os atuais padrões de produção e consumo, motivando a recuperação verde. Um dos aspetos mais relevantes prende-se com a governação e o território, em especial as zonas urbanas onde viverá mais de 80 por cento da população em 2050. Novas fontes de energia, tecnologias mais limpas e aumentar a resiliência urbana através das funções e serviços dos ecossistemas, são apenas exemplos de como melhorar o ambiente, combater as alterações climáticas, aumentar a circularidade da economia e promover a saúde humana. Usando o exemplo da cidade do Porto, os resultados contribuíram para o conhecimento da estrutura urbana, podendo ser de grande importância para os decisores políticos no combate aos impactos das alterações climáticas nas cidades.

### PALAVRAS-CHAVE

Economia circular, alterações climáticas, soluções baseadas na natureza, qualidade do ar, áreas urbanas.

### ABSTRACT

The places where people live and work, consume and throw away, play a key role in the transition to the circular economy. The covid-19 crisis highlighted the unsustainable character of certain environmental and social trends, and led to a reconsideration of current production and consumption patterns, motivating green recovery. One of the most relevant aspects is related to governance and territory, especially urban zones where more than 80 percent of the population will live in 2050. New energy sources, cleaner technologies and the increase of urban resilience through ecosystem services and functions, are just examples of how to improve the environment, combat climate change, enlarge the circularity of the economy and promote human health. Using the example of the city of Porto, the results contributed to the urban structure knowledge and could be of great importance for policy makers in combating the impacts of climate change on cities.

### KEYWORDS

Circular economy, climate change, nature-based solutions, air quality, urban areas.

## 1. Introdução

As Nações do Mundo, em que se inclui Portugal, precisam de ponderar (e sentir) o ambiente como uma oportunidade para melhorar e não como um entrave ao desenvolvimento. A capacidade técnico-científica atual, bem como os desafios sociais (e.g. alterações climáticas, crescimento populacional, escassez de recursos) que a sociedade enfrenta, devem proporcionar soluções inovadoras e sustentáveis, em que o desenvolvimento socioeconómico ocorra harmoniosamente com a proteção e o usufruto do ambiente. O cidadão deve ter um papel fundamental nesta transição, sendo simultaneamente um motor e um beneficiário da sociedade resiliente, baseada na circularidade da economia.

As razões da crise há muito que não são mistério: o aumento exponencial da população que se tem verificado desde 1950, a ampliação do poder de compra, a urbanização crescente e a adoção de uma postura consumista, em muito motivada pelos interesses das organizações, tem gerado a necessidade crescente de matérias-primas, bens alimentares, água, território, com a qualidade do ar a evoluir negativamente. Mesmo nas projeções mais conservadoras, prevê-se que nesta década exista um aumento de cerca de um terço na procura de bens como o petróleo, carvão e ferro, em muito motivado pelos países emergentes e pelo aumento do poder de compra das famílias (Elen MacArthur, 2013). O relatório de avaliação mundial em 2019 da Plataforma Intergovernamental Científica e Política sobre a Biodiversidade e os Serviços Ecossistémicos (Brondizio et al, 2019) revelou que as alterações climáticas afetam fortemente todo o recurso biota e são o terceiro principal fator de perda de biodiversidade.

Tais impactos fazem cada vez mais parte da atual realidade, refletindo-se em intempéries de crescente violência, alterações climáticas, degelo e subida do nível médio da água, desflorestação, erosão dos solos, aumento do risco de extinção de diversas espécies, incêndios cada vez mais devastadores, escassez de água potável, agravamento da qualidade do ar, entre muitos outros exemplos. Caso nada seja feito para reverter os profundos danos que está a causar ao planeta, esta sociedade pode mesmo ficar em contagem decrescente para a sexta extinção em massa do planeta, sendo esta a mais rápida que alguma vez ocorreu na sua história (Ceballos et al., 2017).

A compreensão e a ação na área do ambiente são intrinsecamente holísticas, sendo necessário analisar vários aspetos ambientais individualmente e também apreender as diferentes interações que existem entre eles. Os desafios setoriais

refletem a relevância do uso sustentável dos recursos naturais – água, ar, solo e biota –, bem como a gestão inteligente dos desperdícios. Todavia, é difícil continuar a pensar o ambiente sem contemplar a característica sistémica dos desafios ambientais, tais como a transição climática, a economia circular e o binómio ambiente-saúde, que têm um carácter mais integrador.

Porém, de repente, o chão desapareceu e por cima das nossas cabeças paira uma ameaça que é real, mas que não se conhece bem e que não se sabe quando irá embora. Na ignorância, os seres humanos interferiram de tal forma na natureza que agora são atacados por ela. A destruição de *habitats* e perda de biodiversidade, o tráfico de espécies, a intensificação das explorações agrícolas e pecuárias e as alterações climáticas aumentaram o risco de surgirem zoonoses, ou seja, doenças infecciosas transmitidas pelos animais aos seres humanos. Os parasitas, as bactérias e os vírus, ao perderem os seus hospedeiros habituais procuram novos animais selvagens, consumidos em algumas sociedades. Foi assim que surgiram doenças como, por exemplo, a sida, o ébola, a malária, o dengue, a varicela, a poliomielite, o zika e agora a covid-19.

Mas a humanidade continua a ocupar ecossistemas intocados e a explorar apressadamente os recursos naturais finitos. Na década de 1950, 66% do mundo era selvagem e as concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera eram 300 partes por milhão (ppm). Em 1990, a natureza selvagem caiu para 49% e o CO<sub>2</sub> aumentou para 350 ppm (FAO, 2018). Atualmente, a natureza selvagem ocupa apenas 23% do planeta, enquanto o CO<sub>2</sub> na atmosfera atingiu 431 ppm (em maio de 2020), a despeito da covid-19 e da recessão económica em 2020 (Copernicus EU, 2021).

A trajetória para o desenvolvimento sustentável parece ter sido retomada com a aprovação do Pacto Climático de Glasgow na 26ª Conferência das Partes (COP26) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (ainda que de forma pouco ambiciosa...), no dia 13 de novembro deste ano, e que mantém a ambição de conter o aumento da temperatura em 1,5°C. Além disso, reforça a necessidade de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 45% até 2030, em relação a 2010, promete mais apoios financeiros e regula o mercado do carbono (ONU, 2021).

Enfrentar a crise da sustentabilidade e acelerar a transição para a economia sustentável e circular, bem como neutra para o clima, exige ações na economia e na sociedade. São necessárias abordagens e atuações mais abrangentes e sistémicas nas cadeias de valor. Dito isto, a visão geral dos desafios nos diferentes

setores também pode ajudar a demonstrar a magnitude e a complexidade dos problemas que devem ser enfrentados.

## 2. Transição climática e economia circular

A crise sem precedentes da covid-19 destacou a natureza insustentável de certas tendências ambientais e sociais. Voltar ao “business as usual” deixou de ser uma opção, mas o novo normal tem de ser construído e suportado por decisões políticas ousadas. Desde a revolução industrial, a economia mundial desenvolveu um padrão de crescimento do tipo “extrair ▶ produzir ▶ consumir ▶ eliminar”, um modelo linear baseado na suposição de que os recursos são abundantes, disponíveis, fáceis de extrair e baratos para desperdiçar. A mudança radical implica refletir sobre as limitações desta economia linear atual, passando à economia circular (Fig. 1), mais eficiente e produtiva, um conceito estratégico inspirado em soluções baseadas na natureza (NBS, do inglês nature-based solutions), alicerçadas na prevenção, redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia.



Figura 1 – Economia circular (Fernandes, 2018)

Todos, organizações e cidadãos, são chamados a contribuir com soluções para a emergência climática e ambiental através da economia circular, suporte indispensável do desenvolvimento sustentável, o que implica uma transformação profunda dos mecanismos que regem, hoje, a produção e o consumo, para preservar o valor e utilidade dos materiais e energia utilizados e melhorar a sua produtividade. Ou seja, uma economia a fazer “mais com menos” e a aumentar

o valor do “menos” para poder ser partilhado, preparado para “voltar a casa” e ser reparado, reutilizado, remanufaturado e reciclado. Acresce ainda, que a eficiência no uso dos recursos, por si só, não garante a utilização decrescente de recursos, porque o uso pode ser eficiente, mas as quantidades utilizadas de recursos serem excessivas.

Por consequência, para alcançar o desenvolvimento sustentável tem também que se integrar a resiliência do ecossistema. Até ao momento, os esforços para enfrentar a crise climática focaram-se na transição para as energias renováveis, complementada pela eficiência energética. Embora sejam cruciais e totalmente consistentes com a economia circular, estas medidas só abrangem 55% das emissões. Os restantes 45% são emissões mais difíceis de reduzir, porque provêm do planeamento territorial e da produção de edifícios, veículos, produtos eletrónicos, vestuário, alimentos, embalagens e de outros bens e ativos que usamos diariamente. Não podem, por isso, ser desprezados.

Por estas razões, a economia circular não pode ser apenas reciclagem, eficiência energética ou biodiversidade. Trabalhar a transição para a economia circular vai mais além: implica uma transformação profunda dos mecanismos que regem, hoje, a engenharia, a economia e o cidadão, isto é, a produção, a inovação e o consumo, para preservar o valor e utilidade dos materiais e energia utilizados e melhorar a sua produtividade. Esta mudança drástica exige emissão zero até 2050 a fim de cumprir a meta de 1,5°C definida no Acordo de Paris e reforçada na COP26. Mesmo que essa meta seja alcançada, os custos para a economia global relacionados com as alterações climáticas aumentarão significativamente a cada décimo de elevação da temperatura.

Entre 1990 e 2018, a UE reduziu em 23% as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) (EC, 2020), enquanto a economia cresceu 61%. No entanto, vai ser necessário tomar medidas adicionais e todos os setores terão de contribuir, dado que se prevê que as atuais políticas apenas reduzam as emissões de GEE em 60% até 2050, pelo que há ainda muito por fazer para alcançar a neutralidade carbónica.

Portugal deve agora aproveitar a Lei de Bases do Clima, aprovada no passado dia 5 de novembro na Assembleia da República, depois de um processo de co-criação e ampla concertação, e onde foi incluída a ponderação do Clima como Património Comum da Humanidade, no seu artigo 15º, alínea f). Este reconhecimento implica a definição do clima estável como bem jurídico de Direito Internacional que deve ser gerido como bem comum, tornando visíveis não apenas

os danos causados no património comum do clima, mas também, e sobretudo, os benefícios positivos aí gerados, que é uma condição estrutural para construir uma economia capaz de restaurar um clima estável. Este novo instrumento legal é crucial para alinhar a política Climática Portuguesa das próximas décadas com os objetivos do Acordo de Paris.

Um dos aspetos mais relevantes prende-se com a governação e o território, em especial as comunidades urbanas onde viverá mais de 80% da população mundial em 2050. Promover cidades circulares, portanto mais resilientes, passa por novas fontes de energia, por tecnologias mais limpas e por aumentar a resiliência urbana através das funções e serviços dos ecossistemas (soluções baseadas na natureza). Estes são também exemplos de como melhorar o ambiente, combater as alterações climáticas, aumentar a circularidade da economia e promover a saúde humana.

Vários estudos (Ellen MacArthur, 2013) revelam que a economia circular tem potencial para aumentar a resiliência em relação aos efeitos físicos das alterações climáticas. De facto, ao manter os materiais em uso, os negócios podem dissociar a atividade económica do consumo de matérias-primas vulneráveis aos riscos climáticos e, portanto, gerar maior flexibilidade. Por exemplo, no sistema de alimentos, a agricultura regenerativa melhora a saúde do solo, aumentando a capacidade de absorção e retenção de água e a resiliência contra chuvas intensas e ondas de calor.

Além de enfrentar as causas e os efeitos das alterações climáticas, a economia circular ajuda a alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (Fig. 2) (Agenda das Nações Unidas 2030) e, entre eles, o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o ODS 12 (Produção e Consumo Sustentáveis). Ambos podem melhorar a qualidade do ar, reduzir a contaminação da água e proteger a biodiversidade. Esta transformação exige um esforço conjunto, devendo as instituições internacionais colocar a economia circular diretamente na agenda da transição climática, dando destaque a atividades de redução de emissões, como a melhoria da eficiência energética e o reflorestamento. Os governos e as cidades têm de incorporar a economia circular nas estratégias de planeamento e resiliência climática. As empresas devem escalar oportunidades que geram valor para o cliente respondendo à transição climática. E os investidores mobilizar capital para as carteiras de negócios que reduzam ativamente o risco climático. Sem dúvida que a transição climática é indispensável, mas deve ser justa e inclusiva, permitindo que todos aproveitem. No entanto, deverá também considerar que

Portugal tem uma modesta contribuição para o balanço mundial dos GEE. De facto, a China foi o país que mais emitiu em 2021 com 28% do total, seguida do EUA com 14% e, na Europa, a Alemanha com 2,15% e Portugal com 0,15%, valor bastante pequeno (GCP, 2021). Portanto, as políticas climáticas têm de ser enquadradas também com a economia, tornando-a eficaz com base na circularidade.



Figura 2 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS (INE, 2019)

É importante que os decisores políticos intensifiquem igualmente a implementação do European Green Deal (EC, 2021) ou Pacto Ecológico Europeu (com o título “A nossa ambição: ser o primeiro continente com um impacto neutro no clima”), e que cada cêntimo investido na recuperação da covid-19 represente um cêntimo para atingir a poluição zero, ou seja, para melhorar a prevenção das doenças decorrentes da poluição. Isto significa que há ações bem identificadas que os cidadãos podem realizar individualmente, mas a grande alavanca para a mudança sistémica é a aplicação adequada dos fundos de recuperação na emergência ambiental e climática.

### 3. Economia circular e soluções baseadas na natureza (NBS)

O despertar para a insustentabilidade da atual postura económica abriu portas à reflexão e à discussão sobre as possíveis alternativas para mudar as preocupantes perspetivas atuais para o futuro. Crescer de modo indefinido não significa evoluir, pois a evolução só pode acontecer se esse crescimento ocorrer de forma

distributiva, inclusiva e inteligente, gerando desta forma valor acrescentado para todas as partes envolvidas, sejam pessoas, animais ou sistemas ambientais.

Deve-se conceder uma atenção especial às cidades, que cobrem apenas uma pequena fração da Terra (aproximadamente 2% da superfície terrestre). Apesar disso, dada a cada vez maior fração da população mundial que vive nas cidades e a desproporcional parcela dos recursos usados por esses residentes urbanos, as cidades e seus habitantes são os principais motores da mudança ambiental global. As áreas urbanas são as principais fontes de emissões de carbono, com um contributo entre 70% a 90% (EEA, 2017), em especial as geradas pelo uso de energia, particularmente de edifícios e transportes.

Estas estatísticas revelam uma ligação direta entre as cidades e as alterações climáticas. Se, por um lado, as cidades são o principal contribuinte para estas alterações, por outro lado, as cidades são altamente vulneráveis aos seus efeitos, quer porque os eventos climáticos extremos podem ser especialmente perturbadores para os sistemas urbanos complexos, quer devido ao alto nível de urbanização e crescimento demográfico. Esta observação é particularmente pertinente dado que a cada semana a população urbana aumenta cerca de um milhão e meio de habitantes (ONU, 2017), e mais da metade desses 'recém-chegados' vivem em bairros com moradias precárias e pobreza extrema, onde a falta de infraestruturas deixa as comunidades ainda mais vulneráveis ao crescimento dos desastres naturais.

As cidades enfrentam, portanto, o duplo desafio de acompanhar o ritmo da urbanização e de se adaptar às alterações climáticas, partilhando os desafios e objetivos do desenvolvimento sustentável e, por isso, têm um papel fundamental a desempenhar na transição para uma economia circular neutra em carbono. Devem deter competências essenciais para a maioria das áreas políticas subjacentes à economia circular, como resíduos sólidos, água, ambiente construído, uso do território ou alterações climáticas. Estando mais próximas dos cidadãos e das empresas e mais ágeis na inovação e experimentação, os governos locais e regionais podem atuar como promotores e facilitadores da economia circular.

E sabe-se que, nas cidades, o maior problema associado às alterações climáticas é a poluição do ar, que se tornou uma preocupação crescente em todo o mundo, devido principalmente aos impactos que o ozono, o material particulado e outros poluentes atmosféricos têm na saúde humana. A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018) estima que todos os anos a poluição do ar dentro e fora de casa seja responsável por cerca de 7 milhões de mortes prematuras em todo

o mundo. E a maioria dessas mortes – 4,2 milhões – está associada à poluição ambiental (externa).

Devido às ligações entre as condições meteorológicas e a qualidade do ar, e embora a poluição atmosférica e as alterações climáticas se apresentem como problemas distintos, são “as duas faces da mesma moeda”. Apesar do importante conjunto de estudos sobre qualidade do ar realizados no âmbito das alterações climáticas nos últimos anos, a maioria desses estudos focou-se ao nível global ou regional, não atingindo maior detalhe, ou seja, não abordam a escala urbana ou municipal.

## 4. Sustentabilidade urbana

Como se referiu, as alterações climáticas estão intimamente ligadas ao desenvolvimento. Embora considerar as necessidades básicas continue a ser a prioridade, deve-se enfatizar que as atividades voltadas para a mitigação das alterações climáticas podem trazer co-benefícios significativos para o desenvolvimento sustentável também, como é o caso da poluição do ar.

A poluição atmosférica em áreas urbanas com população significativa tornou-se um importante tema de investigação nas últimas décadas, o que levou ao desenvolvimento de diversos estudos sobre o escoamento do ar e os padrões de dispersão dos poluentes nas cidades (Borrego et al., 2003). Mais recentemente, a interação entre alterações climáticas, emissões de poluentes atmosféricos e concentrações atmosféricas tem sido considerado um campo de investigação crucial. Como denotaram vários autores (Buccolieri et al., 2011; Amorim et al., 2013; Markakis et al., 2014; Monteiro et al., 2021), o impacto das alterações climáticas na qualidade do ar à escala local ainda é um desafio de investigação, que tem de ser explorado para compreender e prever com precisão as mudanças nos níveis de poluentes, quer nas condições climáticas futuras, quer nas diferentes escalas espaciais.

Isto é especialmente relevante uma vez que existem trabalhos que projetam um aumento das concentrações atmosféricas sob cenários de alterações climáticas (Lacressonnière et al., 2014). Nesse sentido, é fundamental que as cidades sejam capazes de absorver os impactos relacionados com as alterações climáticas e a má qualidade do ar. A inclusão de infraestruturas verdes (Fig. 3), como telhados verdes, áreas verdes urbanas, paredes verdes, têm sido apontadas como estratégias de baixo custo e facilmente aplicáveis para lidar com eventos climáticos extremos

(Carvalho et al., 2017, Rafael et al., 2017), bem como para melhorar a qualidade do ar e mitigar a poluição atmosférica (EEA, 2011). Na Europa, as emissões de poluentes atmosféricos diminuíram substancialmente nos últimos anos, resultando na melhoria da qualidade do ar em toda a região. No entanto, as concentrações de poluentes atmosféricos continuam bastante altas em muitas cidades europeias, mostrando que ainda ocorrem ultrapassagens dos padrões de qualidade do ar e, portanto, os problemas de qualidade do ar persistem (EEA, 2017).



Figura 3 – Exemplos de infraestruturas verdes

## 5. Arrefecer a cidade, melhorar a qualidade do ar e o conforto pedonal

O conceito de resiliência urbana tem sido amplamente utilizado na investigação mais recente para denotar a necessidade de as cidades aumentarem a capacidade de tolerar ou absorver os impactos relacionados com as alterações climáticas (p. ex., ondas de calor). Neste estudo, foram selecionadas duas medidas de resiliência: áreas verdes e telhados verdes.

A avaliação da qualidade do ar em Portugal continental e na área urbana do Porto em 2050 (futuro de médio prazo) foi realizada por Sá et al. (2016), usando modelação matemática de alta resolução espacial e cenários de emissões à escala urbana, à escala do bairro e da rua. Os resultados destacam a ideia de que as alterações climáticas são um desafio sistémico para as cidades. No entanto, as cidades também têm uma capacidade única para enfrentar o repto das alterações

climáticas globais, aplicando medidas locais para lidar com as vulnerabilidades próprias e necessidades específicas (EEA, 2016).

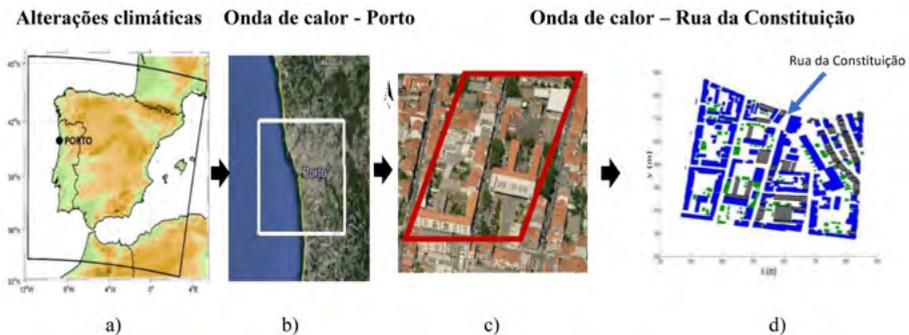
Como referido, estudou-se o arrefecimento da cidade do Porto com a introdução de infraestruturas verdes e respetivo contributo para a melhoria da qualidade do ar. A área urbana do Porto está localizada a noroeste de Portugal e é uma das maiores e mais densamente povoadas áreas urbanas do país (representa quase 25% do uso do solo urbano em Portugal), com cerca de 1,8 milhões de habitantes (INE, 2011). Foi identificada como uma das cidades europeias onde a orla urbana cresceu mais rapidamente (EEA, 2011), resultando no esgotamento de terras agrícolas e florestais. Como resultado da elevada taxa de urbanização, o Porto destaca-se como a área urbana portuguesa com menor proporção de áreas verdes e azuis (Amorim et al., 2013). O exemplo também foi escolhido por ser uma das cidades europeias com maior índice de expansão, por ter problemas de qualidade do ar e ter sido afetada pela onda de calor (Calado et al., 2004) de 30 julho a 14 agosto de 2003 (em Portugal houve 2099 mortes e 793 na cidade do Porto), sendo esperado no futuro um aquecimento da cidade de cerca de 1,9°C em 2050.

O principal objetivo deste estudo foi investigar e quantificar a eficácia de diferentes soluções baseadas na natureza na redução de temperatura e na melhoria da qualidade do ar em futuras ondas de calor (clima futuro de médio prazo), na área urbana do Porto. Analisaram-se a temperatura (T) e três poluentes atmosféricos críticos em áreas urbanas: material particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm (PM10), dióxido de azoto (NO<sub>2</sub>) e ozono (O<sub>3</sub>).

O clima do Porto é relativamente ameno (no verão as temperaturas variam entre 15 e 25°C e no inverno entre 5 e 15°C); no entanto mostra uma alta sazonalidade de temperatura, precipitação e variabilidade interanual. As projeções de tendências climáticas futuras para a área urbana do Porto indicam um aumento médio de cerca de 1,9°C no futuro de médio prazo (2046–2065), que pode quase duplicar no final do deste século (3,7°C), com um aumento do número anual de dias secos consecutivos (Borrego et al., 2015; Marta-Almeida et al., 2016). Espera-se que a ocorrência de ondas de calor nesta área, que nos dias de hoje não é uma grande preocupação, possa duplicar (cerca de 2,2 vezes mais do que no passado recente) no futuro a médio prazo e aumentar num fator de 3,6 no futuro de longo prazo, principalmente para os períodos de verão (Carvalho et al., 2017). Os efeitos destas alterações das condições climáticas nas pessoas serão agravados pelo mau isolamento dos edifícios, levando a um aumento da probabilidade de

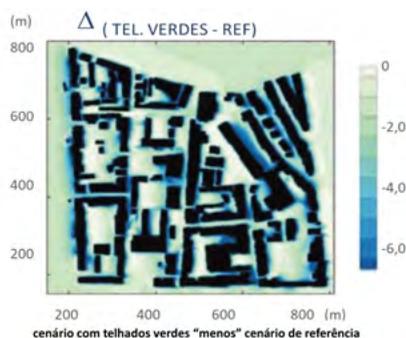
consequências graves para a saúde humana quando ocorrem eventos extremos, como ondas de calor (Monteiro e Velho, 2014).

A Figura 4 mostra a sequência dos domínios simulados, começando com o cálculo das alterações climáticas (a), passando pelas ondas de calor na área urbana (b) e depois no bairro da Rua da Constituição (c) e finalmente o domínio computacional (d) com a representação das zonas verdes e telhados verdes.



**Figura 4** – Domínios de simulação: a) cálculo das alterações climáticas, b) ondas de calor na zona urbana, c) bairro da Constituição, d) domínio de computação (com as zonas verdes e telhados verdes)

Para cumprir o objetivo fixado, através da avaliação da temperatura e do efeito aerodinâmico de infraestruturas verdes na dispersão da concentração de poluentes atmosféricos na área de estudo, foi aplicado o sistema de modelação composto pelos modelos WRF-CFD (Rafael et al., 2018). O desempenho do CFD foi avaliado e melhorado ao longo dos anos com dados medidos em estações meteorológicas e de qualidade do ar (Borrego et al., 2003; Amorim et al., 2013), bem como com ensaios físicos realizados em túnel de vento (Richards et al., 2006) com excelentes resultados.



**Figura 5** – Telhados verdes e efeito na temperatura

A Figura 5 representa o domínio da Rua da Constituição com a aplicação dos telhados verdes, vendo-se a redução de temperatura (resultante da diferença entre o 'cenário com telhados verdes' e o 'cenário de referência') na gama  $-1^{\circ}\text{C}$  e  $-2^{\circ}\text{C}$  na maior parte do domínio, atingindo máximos de  $-6^{\circ}\text{C}$  (pontualmente junto aos edifícios). Esta diminuição de temperatura é muito relevante quando se compara com a previsão de aumento a médio prazo (2050) de  $1,9^{\circ}\text{C}$ , podendo ser uma medida adequada para suavizar as ondas de calor prevista para meados do século XXI.

Dada a metodologia descrita, avaliou-se a capacidade do sistema de modelos numéricos para simular o escoamento do vento, uma vez que a maioria das medidas de resiliência em estudo irão influenciar o padrão do escoamento. De seguida, estimou-se a influência das medidas de resiliência na concentração de poluentes atmosféricos em termos de comportamento e magnitude. A análise foi feita com base horária e considerando a média espacial do domínio, tendo os perfis de concentração seguido o comportamento do fluxo de tráfego, conforme esperado, sendo as maiores concentrações obtidas nos dias da semana e para os períodos de pico do tráfego rodoviário.

Apresenta-se na Figura 6 a concentração do poluente PM10, a 3 m de altura, às 10h00 do dia, como exemplo das simulações feitas para todas as horas da semana. Compara-se, portanto, o comportamento das concentrações de PM10 no cenário de referência (situação atual) com o cenário urbano verde (introdução de áreas verdes e telhados verdes em todo o domínio). Neste caso, as concentrações máximas obtidas às 10h00, em ambos os cenários, tinham valores próximos do valor limite fixado na legislação, mas, quer a área afetada pelas concentrações, quer as concentrações, são menores no cenário verde.

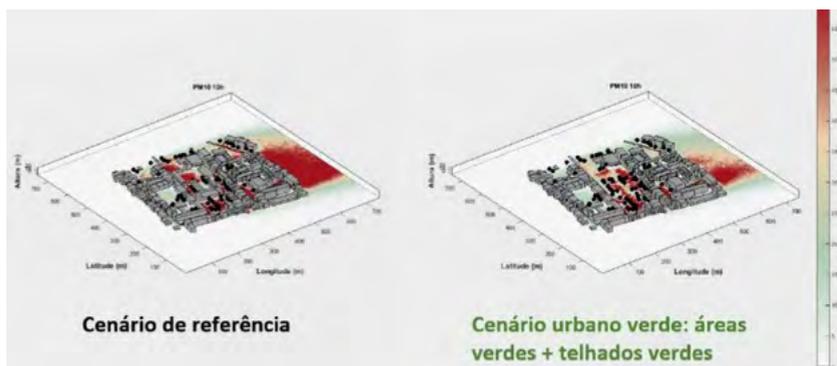


Figura 6 – Qualidade do ar e conforto pedonal: concentrações de PM10 a 3 m de altura e às 10h00

Estes resultados estão de acordo com os valores médios registados na estação de medição da qualidade do ar (classificada como estação de tráfego de acordo com a fonte de emissão dominante) localizada próxima ao domínio de estudo e resultam do efeito combinado de baixa velocidade do vento (e, por isso, não promove a dispersão) e emissões mais altas. Uma baixa dispersão implica que os poluentes atmosféricos ficam retidos perto da fonte emissora, aumentando os níveis de concentração dos poluentes atmosféricos. Resumindo, a qualidade do ar à escala local tem as seguintes características:

- dependente da morfologia urbana e condições climáticas locais (direção e velocidade do vento);
- dependente da presença de vegetação (localização, geometria e densidade de área foliar);
- apresenta redução em 20% das concentrações horárias de PM10 com a implementação de áreas verdes;
- indica aumento da velocidade do vento, o que significa aumento da dispersão dos poluentes atmosféricos;
- permite formação de novas áreas de recirculação, contribuindo para a geração de *hot-spots* (concentrações acumuladas no mesmo local) de poluentes.

## 6. Conclusões

Tornar uma cidade sustentável e resiliente à poluição do ar é uma necessidade crescente, principalmente no atual contexto de alterações climáticas. Hoje em dia, os problemas de qualidade do ar ainda persistem, especialmente nas cidades, onde vive a maior parte da população europeia. É fundamental a implementação de opções que vão além das medidas tecnológicas típicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes medidas de resiliência, com base em infraestruturas verdes, no escoamento e dispersão de poluentes atmosféricos numa zona urbana de Portugal. A análise dos cenários de resiliência demonstrou que as infraestruturas verdes têm um papel a desempenhar à escala da cidade.

Os resultados mostraram que a implantação da área verde urbana e dos telhados verdes levou à redução da temperatura (que é uma medida de adaptação às alterações climáticas urbanas) e à melhoria da qualidade do ar, com a diminuição global dos valores de concentração dos poluentes do ar, principalmente relacionada com maior ventilação e capacidade de dispersão nas ruas estreitas e com edifícios altos (tipo desfiladeiro). No entanto, em alguns *hot-spots*, a concen-

tração de poluentes atmosféricos aumentou devido às velocidades mais baixas do vento e à formação de áreas de recirculação adicionais. Mostrou também que a qualidade do ar local é fortemente dependente das ligações entre o fluxo de tráfego, as condições meteorológicas, a configuração 3D da rua (ser ou não desfiladeiro) e a presença de árvores. De maneira geral, os resultados indicam que a ausência de vegetação não beneficia a qualidade do ar urbano e, para todos os cenários, mostraram que a mudança da direção do vento pode afetar fortemente os padrões de dispersão dos poluentes (e concentrações), sendo este um fator mais sensível do que a velocidade do vento.

Não obstante os benefícios gerais, deve-se notar que em muitas áreas da cidade, as restrições de espaço significam que há poucas oportunidades para aumentar a extensão da vegetação (especialmente a densidade de árvores) dentro do tecido urbano existente. Este facto, aliado à formação de *hot-spots* nas áreas cobertas pelas árvores, mostra a importância da utilização de ferramentas de modelação numérica no processo de planeamento urbano com o objetivo de otimizar os benefícios das infraestruturas verdes na melhoria da qualidade do ar, do conforto humano, da interação com o clima e da saúde.

Embora as tendências gerais apresentadas neste estudo apontem para os benefícios das infraestruturas verdes, são necessários mais trabalhos para garantir que estes resultados sejam válidos para outras configurações de edifícios e outras morfologias urbanas, bem como para outras condições climáticas.

## 7. Agradecimentos

O autor agradece a todos os colegas do Grupo de Emissões, Modelação e Alterações Climáticas – GEMAC do Departamento de Ambiente e Ordenamento e do Centro de Estudos do Ambiente e Mar, da Universidade de Aveiro, o apoio para a realização destes trabalhos e, em especial, às Professoras Ana Isabel Miranda e Myriam Lopes, Doutoradas Alexandra Monteiro, Sandra Sorte e Vera Rodrigues.

## Referências bibliográficas

Amorim, J. H., Rodrigues, V., Tavares, R., Valente, C., & Borrego, C. (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of the Total Environment*, 461-462, 541-551.

- Borrego, C., Tchepel, O., Costa, A. M., Amorim, J. H., & Miranda, A. I. (2003). Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale. *Atmospheric Environment*, 37, 5197-5205.
- Borrego, C., Monteiro, A., Martins, H., Ferreira, J., Fernandes, A. P., Rafael, S., Miranda, A. I., Guevara, M., & Baldasano, J.M. (2015). Air quality plan for ozone: an urgent need for North Portugal. *Air quality, Atmosphere and Health*, 9, 447-460.
- Brondizio, E. S., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H. T. (Eds.) (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES)*. Bonn, Germany.
- Buccolieri, R., Salim, S. M., Leo, L. S., Di Sabatino, S., Chan, A., Lelpo, P., Gennaro, G., & Gromke C. (2011). Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. *Atmospheric Environment*, 45, 1702-1713.
- Calado, R., Nogueira, P. J., Paixão, E. J., Botelho, J., Carreira, M., & Falcão, J. M. (2004). A onda de calor de Agosto de 2003 e os efeitos sobre a mortalidade da população portuguesa. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, 22(2), 7-20.
- Carvalho, D., Martins, H., Marta-Almeida, M., Rocha, A., & Borrego, C. (2017). Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal). *Urban Climate*, 19, 1-27.
- Ceballos, G., Ehrlich, P., & Rodolfo, D. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America – PNAS* 25, 114 (30).
- Copernicus EU (2021). Copernicus Climate Change Service (C3S) annual report. ECMWF, EU, 2021.
- EC – European Commission SWD 298 final (2020). Kick-starting the journey towards a climate-neutral Europe by 2050. EU Climate Action Progress Report 2020.
- EC – European Commission (2021). European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_pt](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt)
- EEA – European Environment Agency (2011). Green infrastructure and territorial cohesion: The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. Luxembourg.
- EEA – European Environment Agency (2016). Circular Economy in Europe: Developing the knowledge base. Luxembourg.
- EEA – Environmental European Agency (2017). Air quality in Europe — 2017 report. EEA Report No 13/2017. Luxembourg.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. EMF, London.
- Fernandes P. (2018). *Sustentabilidade e a Economia Circular*. APCER, outubro 2021, <https://www.apcergroup.com/pt/newsroom/218/sustentabilidade-e-a-economia-circular>

- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). The State of World's Forests: Forest Pathways to Sustainable Development. Rome.
- GCP – Global Carbon Project (2021). Carbon budget 2021: An annual update of the global carbon budget and trends. <https://www.globalcarbonproject.org/about/index.htm>
- INE – Instituto Nacional de Estatística (2011). CENSOS, 2011 – Dados Estatísticos para Portugal. <http://censos.ine.pt>
- INE – Instituto Nacional de Estatística (2019). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – Agenda 2030. INE. <https://www.ine.pt/xurl/pub/377366012>
- Lacressonnière, G., Peuch, V. H., Vautard, R., Arteta, J., Déqué, M., Joly, M., Josse, B., Maréchal, V., & Saint-Martin, D. (2014). European air quality in the 2030s and 2050s: Impacts of global and regional emission trends and of climate change. *Atmospheric Environment*, 92, 348-358.
- Markakis, K., Valari, A., Colette, O., Sanchez, O., Perrussel, C., Honore, R., Vautard, R., Kilmont, Z., & Rao S. (2014). Air quality in the mid-21st century for the city of Paris under two climate scenarios; from the regional to local scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 7323-7340.
- Marta-Almeida, M., Teixeira, J., Carvalho, M., Melo-Gonçalves, P., & Rocha, A. (2016). High resolution climatic simulations for the Iberian Peninsula: Model validation. *Physics and Chemistry of the Earth*, 94, 94-105.
- Monteiro, A., & Velho, S. (2014). Health heat stress in the Porto metropolitan area – a matter of temperature or inadequate adaptation? *Journal of the Geographical Society of Berlin*, 145, 1-2, 80-95.
- Monteiro, A., Eusebio, C., Carneiro, M. J., Madaleno, M., Robaina, M., Rodrigues, V., Gama, C., Relvas, H., Russo, M., Oliveira, K., Lopes, M., & Borrego, C. (2021). Tourism and air quality during COVID-19 pandemic: lessons for the future. *Sustainability*, 13(7), 3906.
- ONU (2017). ONU News: Perspetiva Global Reportagens Humanas. <https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes>
- ONU (2021). 26ª Conferência das Partes (COP26) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas. <https://news.un.org/pt/story/2021/11/1770432>
- Rafael, S., Martins, H., Marta-Almeida, M., Sá, E., Coelho, S., Rocha, A., Borrego, C., & Lopes, M. (2017) Quantification and mapping of urban fluxes under climate change: application of WRF-SUEWS model to Greater Porto área (Portugal). *Environmental Research*, 155, 321-334.
- Rafael, S., Vicente, B., Rodrigues, V., Miranda, A. I., Borrego, C., & Lopes, M. (2018). Impacts of green infrastructures on aerodynamic flow and air quality in Porto's urban area. *Atmospheric Environment*, 190, 371-330.
- Richards, K., Schatzmann, M., & Leidl, B. (2006). A wind tunnel investigation of thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, 621-636.

- Sá, E., Martins, H., Ferreira, J., Marta-Almeida, M., Rocha, A., Carvalho, A., Freitas, S., & Borrego, C. (2016). Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal. *Atmospheric Environment*, 131, 209-224
- WHO – World Health Organization (2018). 9 out of 10 people worldwide breathe polluted air, but more countries are taking action. <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>