

01

OCCASIONAL
PAPERS 2022

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS
E ECONOMIA: UMA
INTRODUÇÃO

Bernardino Adão | António Antunes
Miguel Gouveia | Nuno Lourenço
João Valle e Azevedo



BANCO DE
PORTUGAL
EUROSISTEMA

01

OCCASIONAL PAPERS 2022

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E ECONOMIA: UMA INTRODUÇÃO

Bernardino Adão | António Antunes
Miguel Gouveia | Nuno Lourenço
João Valle e Azevedo

JANEIRO 2022

As opiniões expressas neste artigo são da responsabilidade dos autores, não coincidindo necessariamente com as do Banco de Portugal ou do Eurosistema.

Endereçar correspondência para:

Banco de Portugal
Rua do Comércio 148, 1100-150 Lisboa, Portugal
Tel.: +351 213 130 000, email: info@bportugal.pt



BANCO DE PORTUGAL
EUROSISTEMA

Lisboa, 2022 • www.bportugal.pt

Alterações climáticas e economia: uma introdução

Bernardino Adão

Banco de Portugal

António Antunes

Banco de Portugal

Miguel Gouveia

Universidade Católica Portuguesa

Nuno Lourenço

Banco de Portugal

João Valle e Azevedo

Banco de Portugal

Janeiro de 2022

Resumo

Neste trabalho expõe-se de forma acessível o funcionamento do sistema climático natural e os mecanismos através dos quais ocorre o aquecimento global. Documenta-se o aquecimento da superfície terrestre e a evolução da precipitação ao longo do século XX, incluindo para o caso português. Analisam-se também os canais de transmissão das alterações no clima à economia. O impacto provável no nível do PIB global é negativo, com uma gama de estimativas muito sensível à ocorrência de fenómenos dificilmente previsíveis. Discutem-se ainda propostas de política económica adequadas para o problema das emissões de carbono fóssil. Uma tributação significativa do carbono terá provavelmente que coexistir com o sistema de licenças de emissões de carbono atualmente existente. Analisa-se o papel dos bancos centrais na mitigação dos efeitos das emissões de CO₂ excessivas, destacando-se o reporte regulatório com um foco em questões ambientais e a assunção de responsabilidades de sustentabilidade e responsabilidade corporativa. Por fim, são apresentadas estimativas dos custos económicos associados às mudanças climáticas, baseadas em modelos. Conclui-se neste exemplo que a adoção de uma política ótima global pouparia a Portugal cerca de 0,5°C de aquecimento.

JEL: E21, E60, F40

Keywords: alterações climáticas, economia, impostos sobre carbono.

Agradecimentos: Os autores agradecem de modo especial a Pedro Matos Soares (Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa) a revisão cuidada da Secção 2. Agradecem também a Marta Abreu, João Amador, Nuno Alves, Luís Saramago e participantes em seminários internos do Banco de Portugal cobrindo o material deste artigo. As opiniões expressas neste trabalho são da responsabilidade dos autores, não coincidindo necessariamente com as do Banco de Portugal ou do Eurosistema. Eventuais erros ou omissões são também da exclusiva responsabilidade dos autores.

E-mail: badao@bportugal.pt; aantunes@bportugal.pt; mig@ucp.pt; nalourenco@bportugal.pt;
jvazevedo@bportugal.pt

Conteúdo

1	Visão geral	5
2	Aspetos geofísicos das alterações climáticas	7
2.1	O funcionamento do sistema climático natural	7
2.1.1	Termodinâmica tornada simples	8
2.1.2	Balanço energético do planeta Terra	9
2.1.3	Os GEE nas transferências de energia entre a superfície terrestre, a atmosfera e o espaço exterior	12
2.2	Os GEE como causa dominante de alterações climáticas	15
2.3	A evolução global de temperatura e precipitação	17
2.3.1	Dados climáticos publicamente disponíveis	17
2.3.2	Alterações de temperatura e precipitação da superfície terrestre	18
2.3.3	A evolução heterogénea de temperatura e precipitação em Portugal	20
2.3.4	Medidas de necessidade energética em Portugal	25
2.4	Algumas ideias a reter	26
3	Alterações climáticas em perspetiva económica	27
3.1	Impactos económicos das alterações climáticas	27
3.2	Mecanismos de interação entre a macroeconomia e o clima	29
3.2.1	Volatilidade de preços e rendimento	30
3.2.2	Fluxos de comércio internacional	30
3.2.3	Redução do stock de capital	30
3.2.4	Obsolescência de ativos	31
3.2.5	Migrações	31
3.2.6	Outros fatores	31
3.3	Desconto intertemporal	32
3.3.1	Enquadramento teórico e prática internacional	32
3.3.2	Calibração	36
3.3.3	Resultados	40
3.4	Política económica e alterações climáticas	40
3.4.1	Impostos sobre carbono e licenças de emissão transacionáveis	40
3.4.2	Implicações para o sistema financeiro	45
4	Avaliação prospetiva de políticas de mitigação: um exemplo	48
4.1	Modelo	50
4.1.1	O clima	50
4.1.2	O ciclo do carbono	52
4.1.3	Perdas económicas	54
4.1.4	A economia	56
4.2	Calibração	58
4.3	Resultados	60
4.4	Considerações adicionais	63

A Temperatura e precipitação na superfície terrestre e em Portugal continental **69**

1. Visão geral

Este trabalho é uma primeira tentativa dos autores de uma análise integrada das alterações climáticas do ponto de vista de um banco central. Na sua génese esteve um relatório interno elaborado a partir do outono de 2019. Os tópicos abordados podem ser agrupados em três áreas: as alterações do sistema climático natural; os aspetos económicos das alterações climáticas e medidas de política económica para mitigar os seus efeitos; e a análise prospetiva de uma política de mitigação ótima. Este trabalho serviu de base a um Tema em destaque publicado no Boletim Económico de outubro de 2021, mas contém uma análise mais detalhada e, em certas dimensões, mais idiossincrática.

Adotou-se o uso de dados de acesso geral, a consulta à literatura científica aplicável e a construção de metodologias dirigidas ao tópico sob análise. Quando possível e relevante, fez-se uma incursão ao caso português. Pretende-se dar uma visão abrangente de uma questão complexa que provavelmente irá manter ocupadas várias gerações futuras de académicos e decisores de política. Pela natureza exploratória deste trabalho e conseqüente inevitabilidade de erros e omissões, os autores acreditam poder beneficiar da indulgência do leitor.

A Secção 2 expõe de forma acessível o funcionamento do sistema climático natural e os mecanismos através dos quais ocorre o aquecimento global. Mostra-se também porque a concentração de CO₂ e de outros gases de efeito de estufa na atmosfera é uma das causas do aquecimento global. A secção propõe ainda novas quantificações dos efeitos das alterações climáticas, ao longo do século XX e até 2020, em termos de temperatura e precipitação, em toda a superfície terrestre mas também no território continental português. Documenta-se um aquecimento da superfície terrestre em linha com valores encontrados na literatura científica recente sobre o tema, de cerca de 1°C desde o início do século XX até ao presente. A partir da segunda metade do século XX o aumento anual da temperatura terrestre acelerou e cifrou-se em cerca de 0,017°C. No caso português os valores são menores, obtendo-se um aumento desde 1900 de cerca de 0,6°C e, a partir de 1950, um aumento anual de 0,0077°C. No que diz respeito à precipitação, os resultados globais não são tão marcados como no caso da temperatura, com aumentos em algumas regiões e reduções noutras. Em Portugal a variação da precipitação ao longo do século XX e até 2020 não difere estatisticamente de zero; medindo essa variação somente a partir de 1950 obtém-se um valor estatisticamente significativo mas baixo, embora ocorram algumas bolsas de redução de pluviosidade. Na secção mostra-se ainda que as alterações climáticas se manifestam com grande diferenciação espacial. Em Portugal isso reflete-se em variações significativas nas necessidades de arrefecimento e aquecimento dos edifícios, diferenciadas espacialmente e com alterações significativas após 1950. Por exemplo, em todo o interior e no sul do país ocorreu um aumento das necessidades de arrefecimento dos edifícios no verão. Já no que diz respeito ao aquecimento invernal, observou-se uma redução da sua necessidade sobretudo no norte do país.

Na Secção 3 faz-se um apanhado dos canais de transmissão das alterações no clima à economia, explicando-se os efeitos prováveis de, por exemplo, aumentos de temperatura e de eventos extremos. Uma das conclusões mais robustas desta revisão é que o impacto provável no nível do PIB global é negativo, ou seja, as alterações climáticas terão de facto custos relativamente a uma trajetória que ignorasse a sua existência, e situam-se, para cenários moderados de aumento da temperatura, num intervalo provavelmente centrado em 1,5% do PIB. No entanto, estas estimativas podem ser facilmente ultrapassadas no caso de ocorrerem fenómenos dificilmente previsíveis. Outro aspeto abordado na secção é o desconto temporal usado na avaliação de projetos ou políticas sobre o clima. Esta questão adquire especial importância porque a transição energética processar-se-á durante décadas. Usando uma metodologia simples, propõe-se um fator de desconto aplicável ao caso português entre 1% e 4% ao ano, dependendo das hipóteses sobre o comportamento dos agentes e de fatores estruturais da economia. Estes valores podem ser afinados consoante a aplicação e disponibilidade de novos dados.

A secção oferece uma discussão das propostas de política económica adequadas para o problema das emissões de carbono fóssil. Dela emerge a conclusão de que uma tributação significativa do carbono terá provavelmente que coexistir com o sistema de licenças de emissões de carbono atualmente existente, tendo em conta questões de incerteza, de incentivos dos agentes e de economia política. Faz-se ainda uma análise do papel dos bancos centrais na mitigação dos efeitos das emissões de CO₂ excessivas. Esse papel deverá ser acessório e não central porquanto a panóplia de instrumentos de política monetária à disposição dos bancos centrais não é em geral eficaz para a redução das emissões de CO₂. Em certos casos, a implementação de medidas inadequadas para o fim pretendido pode conduzir a resultados inesperados ou indesejáveis. Isso não significa que não haja diversas dimensões em que o papel dos bancos centrais seja útil, destacando-se o reporte regulatório com um foco em questões ambientais e a assunção das suas obrigações de sustentabilidade e responsabilidade corporativa.

Por fim, a Secção 4 apresenta uma estimativa dos custos e efeitos climáticos de uma política ótima aplicada na mitigação dos efeitos das emissões de carbono usando um *Integrated Assessment Model* (IAM), com resultados extrapolados para Portugal. Este exemplo assumidamente aproximado dá ao leitor uma quantificação das políticas ótimas sobre emissões carbónicas e adoção de tecnologia em energias renováveis. Vale a pena referir algumas das conclusões do exercício. A tributação das emissões de carbono por queima de combustíveis fósseis é a política mais eficaz para reduzir emissões e para a transição energética, enquanto as políticas que visam encorajar a adoção de tecnologias de produção energética renovável têm apenas um papel coadjutor. Além disso, os valores obtidos sugerem que as taxas aplicadas globalmente a emissões fósseis deverão ser aumentadas em cerca de 50% relativamente à situação atual. Dependendo da adoção ou não das políticas ótimas, os resultados sugerem também diferenças significativas na temperatura global: na solução ótima a temperatura do planeta aquece menos 0,8°C do que na situação em que nada é alterado face à configuração atual das políticas climáticas.

O caso português é mais mitigado porque a temperatura em Portugal tem uma sensibilidade à temperatura global terrestre de cerca de 0,6, ou seja, por cada grau Celsius de variação da temperatura global, a temperatura média em Portugal varia cerca de 0,6°C. A adoção da política ótima pouparia a Portugal cerca de 0,5°C de aquecimento. Embora estes aumentos da temperatura impliquem uma perda no PIB, o bem-estar aumenta face à política de nada ser feito cerca de 1,3% globalmente e 0,5% em Portugal, em termos de consumo equivalente. Estes números, por serem prospetivos e baseados em suposições simplificadoras e em parâmetros incertos, têm que ser interpretados como ilustrações; uma sugestão é olhar para eles como meras quantificações do problema.

2. Aspetos geofísicos das alterações climáticas

Esta secção pretende proporcionar ao leitor um primeiro contacto com a linguagem mais técnica associada às alterações climáticas e parte da constatação de que é difícil encontrar uma gramática comum aos diversos especialistas que se dedicam a esta questão. O nível de detalhe científico será, por isso, apenas o necessário para que o essencial dos argumentos de físicos, climatologistas e biólogos, entre outros, não se perca no momento em que economistas começam a olhar para eles e a formular as suas hipóteses e os seus modelos. Procurar-se-á dar uma primeira noção sobre o funcionamento do sistema climático natural e a razão porque ele é afetado pela concentração dos chamados gases de efeito de estufa, que serão designados pelo acrónimo GEE e de que o vapor de água e o dióxido de carbono (CO₂) são os mais conhecidos. A secção inclui também uma breve análise de dados climatológicos disponíveis publicamente e cobrindo um período de tempo longo, com foco especial no caso português; esta é porventura a parte que mais semelhanças tem com as metodologias usadas na economia.

Tratando-se de análise feita por economistas, os dados e as análises baseadas em modelos climatológicos serão tomados como inputs da abordagem quantitativa económica. Será, no entanto, necessária uma modelação do efeito da atividade económica sobre as emissões carbónicas; esse elo será discutido nas Secções 3 e 4.

2.1. O funcionamento do sistema climático natural

O sistema climático natural é incrivelmente complexo. Descrivê-lo com rigor é uma tarefa impossível; a única coisa que um cientista pode fazer é perceber os seus mecanismos, modelá-los e quantificá-los, ao mesmo tempo que procura perceber a magnitude do seu erro e o grau de insuficiência da sua análise. O clima terrestre resulta de uma infinidade de fenómenos naturais que interagem entre si e têm como intervenientes não só a atmosfera e a crosta terrestre mas também os oceanos, a criosfera (ou seja, a parte gelada ou que contém gelo da superfície terrestre e marítima), a biosfera, o interior da Terra, o Sol e a Lua. Poder-se-ia ainda elencar

outros elementos importantes – radiações cósmicas, por exemplo – mas fica clara a ideia de que modelá-los a todos é inviável e possivelmente desnecessário.

À primeira vista não é óbvio que a libertação de gases de efeito de estufa na atmosfera interfira com o clima a ponto de a questão se tornar importante. Para se ter uma ideia das quantidades envolvidas, a atmosfera tem um volume da ordem dos 26 mil milhões de quilómetros cúbicos, considerando a faixa que vai da superfície da Terra ao cimo da estratosfera, a cerca de 50 quilómetros de altitude. Por comparação, as emissões anuais de CO₂ por queima de combustíveis fósseis resultante das atividades humanas, estimadas para 2018 em cerca de 37 gigatoneladas de CO₂ (Friedlingstein *et al.* 2019),¹ ocupariam aproximadamente 20 mil quilómetros cúbicos à temperatura e pressão ambientes, ou seja, um volume 1,3 milhões de vezes menor, sendo que parte destas emissões são absorvidas pelos oceanos e outros sistemas terrestres.² No entanto, o efeito cumulativo destas emissões durante muitas décadas pode ser relevante se não houver mecanismos suficientemente poderosos para a sua eliminação da atmosfera. De facto, a concentração de CO₂ na atmosfera é atualmente de 414 partes por milhão (ppm) (Global Monitoring Laboratory 2020), ou seja, cerca de 0,041% do conteúdo gasoso da atmosfera. Embora este valor represente um acréscimo significativo face ao seu nível em meados do século XIX, quando era 280 ppm, como pode uma fração tão residual da atmosfera ter um impacto tão grande no sistema climático natural? Para responder a esta questão é necessário compreender três fenómenos:

- A termodinâmica dos corpos;
- O balanço energético do sistema formado pela Terra e pelo espaço que a circunda;
- O impacto dos GEE nas transferências de energia entre a superfície terrestre, a atmosfera e o espaço exterior.

2.1.1. Termodinâmica tornada simples. Um dos fenómenos mais conhecidos do mundo natural é que todos os corpos trocam energia entre si e que esta tende a fluir dos corpos mais quentes para os mais frios na ausência de fontes ou sumidouros de calor. Esta é a razão porque, enquanto lia este texto, o leitor poderá ter constatado que o café esquecido na chávena sobre a secretária ficou à temperatura ambiente,

1. As unidades usadas na literatura sobre emissões de carbono são a gigatonelada de dióxido de carbono (GtCO₂), a gigatonelada de carbono (GtC) e a parte por milhão (ppm). Uma GtC corresponde a 3,664 GtCO₂, e uma ppm corresponde a 7,782 GtCO₂. As emissões de outros GEE, como o metano, são convertidas em equivalentes carbónicos de acordo com o respetivo contributo para o efeito de estufa por unidade emitida.

2. Friedlingstein *et al.* (2019) estimam as emissões fósseis de carbono durante 2018 em cerca de 10 gigatoneladas. O peso molecular do CO₂ é 44 gramas por mole, enquanto o peso molecular do carbono é 12 gramas por mole, o que implica que cada gigatonelada de carbono emitida corresponda a cerca de 3,7 gigatoneladas de CO₂. Sabendo que um metro cúbico de CO₂ pesa 1,84 kg à pressão atmosférica normal e temperatura de 25°C, convertendo as emissões fósseis de CO₂ em volume obtém-se o número indicado. Note-se que nas camadas superiores da atmosfera a temperatura e pressão são muito inferiores pelo que o volume do CO₂ nessas camadas deverá ser ajustado.

quando antes estava quase no ponto de ebulição. A energia acumulada no café sob a forma de calor foi aquecendo tudo o que estava ao seu redor: primeiro a chávena e o ar em contacto com ele; depois o tampo da secretária e o ar em contacto com a chávena; finalmente, tudo o resto que estava um pouco mais afastado, e por aí em diante. A transferência de energia do café para tudo o que o circundava arrefeceu-o e aqueceu os objetos e ambiente à sua volta. A variação da energia total contida no café (também designada por entalpia) foi negativa. Ou seja, uma variação negativa da entalpia de um corpo arrefece-o, e uma variação positiva aquece-o. O processo inverso de aquecer o café acima da temperatura ambiente requer uma fonte de calor.

Como se processa então esta transferência de energia sob a forma de radiação? A resposta é complexa mas pode dizer-se o seguinte: um corpo radia tanto mais energia quanto mais quente estiver, dependendo isto da sua forma e dos materiais de que é composto. No caso do café, a energia é transferida principalmente sob a forma de calor. Há, no entanto, outras formas de radiação de energia, com destaque para a energia eletromagnética. Todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto (cerca de -273°C) radiam energia eletromagnética em diversas frequências. Por outro lado, os corpos também tendem a refletir a radiação eletromagnética que sobre eles incide. Um corpo negro reflete menos energia eletromagnética visível do que um corpo claro. No caso do café, a sua cor escura significa que a luz que nele incide não é refletida em frequência visível, sendo absorvida e aquecendo-o; no entanto, esse efeito é muito menor do que a transferência de calor acima descrita.

Em resumo: na ausência de fontes ou sumidouros de calor, os corpos trocam energia no sentido de os mais quentes ficarem mais frios, e os mais frios ficarem mais quentes. A energia radiada pelos corpos pode sê-lo sob a forma de calor ou de ondas eletromagnéticas, entre outras. Os corpos refletem parte da energia que incide sobre eles e absorvem a restante. Estas são as noções necessárias para se compreender o segundo fenómeno.

2.1.2. Balanço energético do planeta Terra. Pode-se pensar na Terra, na sua atmosfera e no espaço sideral que a rodeia como um sistema termodinâmico que troca energia entre as diversas componentes. O espaço sideral contém um corpo particular, o Sol, que assume uma importância fundamental. Trata-se de uma fonte de energia de enorme potência que inunda de radiação eletromagnética a Terra e a sua atmosfera, com a conseqüente transferência de calor. O calor do Sol é conseqüência de reações de fusão nuclear que ocorrem constantemente no seu núcleo e por sua vez produzem radiação eletromagnética em todas as direções. Uma parte dessa energia, sob a forma de luz visível, radiação ultravioleta e radiação infravermelha, entre outras, atinge a Terra e a sua atmosfera, que irão, como se viu anteriormente, refletir parte dessa energia e absorver a restante. A Figura 1 apresenta a magnitude da radiação do Sol para os vários comprimentos de onda (ou radiança espectral), normalizada pelo seu valor máximo. Note-se que a comprimentos de onda da radiação maiores correspondem frequências menores. Como se pode ver, a radiação do Sol é máxima em comprimentos de onda visíveis

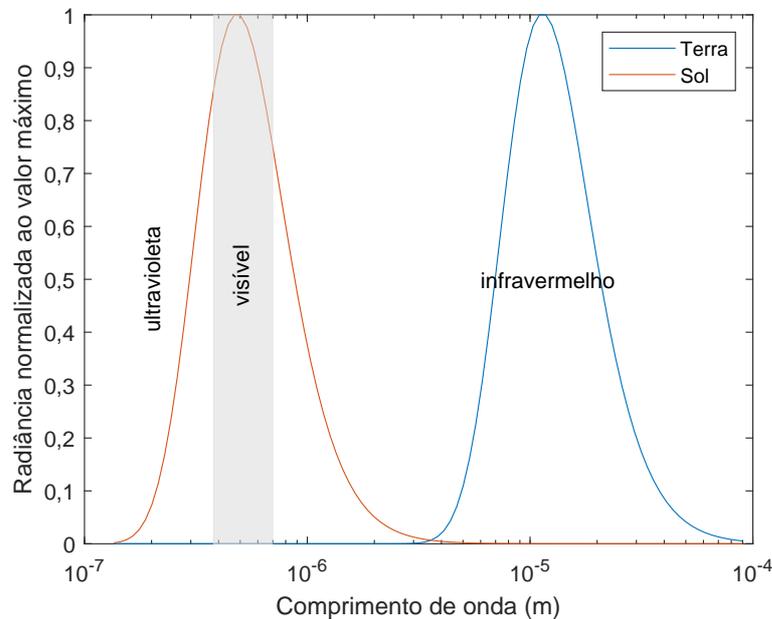


Figura 1: Radiância espectral do Sol e da Terra.

Fonte: cálculos dos autores.

Nota: Radiância espectral de Planck expressa em $\text{watt m}^{-3} \text{str}^{-1}$ normalizada ao seu valor máximo.

pelo olho humano e uma parte significativa da energia total que incide na terra (calculada pela área a cinzento sob a curva correspondente ao Sol) é luz visível.

Da energia absorvida, uma parte aquecerá a atmosfera, composta por nuvens (gotículas de água), diversos gases (incluindo GEE, oxigênio e azoto) e aerossóis, que são partículas de diversas origens (poluição e erupções vulcânicas, por exemplo) em suspensão na atmosfera, e outra parte irá aquecer o globo terrestre.

A relação entre a energia refletida por um corpo e a energia total que sobre ele incide designa-se por *albedo* e pode ser medida em unidades naturais ou em percentagem. O albedo varia com a frequência da radiação em causa. Medições recentes sugerem que o albedo terrestre na gama das frequências emitidas pelo Sol se situe próximo de 30%. Trata-se de uma noção importante em termodinâmica: um albedo próximo de 100% significa que o objeto reflete quase toda a luz que sobre ele incide. Um objeto escuro tende a absorver a luz que sobre ele incide, como vimos no exemplo do café, e por isso deverá ter um albedo baixo.

Se a energia solar que incide sobre a Terra não for compensada de alguma forma, esta irá aquecer até se tornar inabitável. Pelo contrário, sabemos que a temperatura terrestre, embora tendo sofrido oscilações muito significativas ao longo do tempo, não evidenciou uma tendência permanente de aumento. A explicação para a aparente impossibilidade é a radiação eletromagnética que todos os corpos

emitem referida anteriormente, por vezes designada por “radiação de Planck”. Ou seja, a Terra emite radiação eletromagnética por ter uma temperatura média na sua superfície superior (na verdade, muito superior) ao zero absoluto, o mesmo acontecendo com a atmosfera terrestre. Esta radiação processa-se sobretudo em comprimentos de onda acima da gama visível pelos seres humanos e compensa a energia que chega ao sistema formado pela Terra e pela sua atmosfera de forma a manter a temperatura aproximadamente constante. A Figura 1 mostra a intensidade dessa radiação terrestre nos vários comprimentos de onda. Observa-se que os valores são máximos em comprimentos de onda muito superiores aos da radiação solar e que praticamente não há sobreposição espectral na radiação dos dois corpos. Note-se que na figura a radiância espectral da Terra está normalizada ao seu valor máximo, que é cerca de 7,2 milhões de vezes menor do que o do Sol.

A temperatura atmosférica relativamente estável que torna possível a existência de vida como a conhecemos na Terra é o valor de equilíbrio entre a energia que chega do Sol e a que o sistema Terra-atmosfera emite para o espaço.

A Tabela 1 apresenta um resumo simplificado das trocas de energia entre a superfície terrestre, a sua atmosfera e o espaço. A primeira linha apresenta o fluxo de energia emitido pelo espaço – essencialmente o Sol – incidindo no sistema formado pelo planeta Terra e a sua atmosfera. Trata-se de um fluxo de energia por unidade de tempo e por unidade de superfície de exposição. Esta energia abarca um largo espectro de frequências mas é máxima nas da luz visível, sendo por isso muitas vezes chamada de *insolação*. Com base na temperatura do Sol e na sua distância média à Terra é possível calcular o seu valor médio ao longo de um ano, que é de 341,3 watt/m². Esta é uma referência útil e todos os valores da Tabela 1 estão expressos em percentagem deste valor, mesmo que não lhe sejam diretamente comparáveis.

Origem da energia	Tipo	Destino da energia			Total emitido
		Espaço	Atmosfera	Superfície	
Espaço	radiação solar	29,9	22,9	47,3	100,0
Atmosfera, GEE e outros gases	rad. onda longa	54,7		97,7	161,1
Atmosfera, nuvens	rad. onda longa	8,7			
Superfície	rad. onda longa	6,4	109,7		144,7
Superfície	evapotranspiração		23,5		
Superfície	rad. térmica		5,1		
Total recebido		99,7	161,1	145,0	

Tabela 1. Balanço energético entre a superfície do globo terrestre, a atmosfera e o espaço. Valores em percentagem da radiação solar média incidente no sistema Terra-atmosfera.

Fontes: Trenberth e Fasullo (2012) e cálculos dos autores.

Notas: O valor médio da radiação solar incidente no sistema Terra-atmosfera é 341,3 watt/m². Os parciais podem não somar os totais por diferenças no arredondamento.

Pode-se ver na tabela que cerca de 29,9% da radiação solar é refletida pelas nuvens e pela superfície terrestre (3/4 e 1/4 do total, respetivamente); este é o albedo terrestre. Os restantes 70,1% da insolação são absorvidos pela atmosfera (22,9%) e pelo globo terrestre (47,3%).

A atmosfera é uma componente autónoma do sistema climático terrestre. Os gases que a compõem radiam energia, tal como qualquer outro corpo, sobretudo em comprimentos de onda mais elevados do que os da luz visível. Parte dessa radiação perde-se no espaço: uma quantidade de energia equivalente a 8,7% do valor da insolação é emitida pelas gotículas de água das nuvens da atmosfera e 54,7% pelos GEE e outros gases atmosféricos. A restante radiação atmosférica incide na superfície terrestre, num valor equivalente a 97,7% do valor da insolação.

Quanto à superfície terrestre, a maior parte da energia emitida (116,1% do valor da insolação) corresponde à radiação eletromagnética inerente a qualquer corpo e processa-se a comprimentos de onda mais elevados do que os da luz visível. Esta radiação é absorvida pela atmosfera, com uma pequena parte (cerca de 6,4% do valor da insolação) a escapar-se diretamente para o espaço, a chamada "janela atmosférica".

Para além da radiação eletromagnética já vista, uma parte das trocas de energia entre a Terra e a sua atmosfera processa-se através de um fenómeno conhecido por *evapotranspiração*. Quando uma superfície com água é aquecida pelo Sol ou por outras fontes de calor, uma parte evapora-se. No caso das plantas, a perda de água por ação da luz solar dá-se por transpiração. Estes fenómenos tendem a aquecer a atmosfera e a arrefecer a superfície. Esta troca de calor vale cerca de 23,5% do valor da insolação. Refira-se ainda que a atividade vulcânica, os incêndios e outras formas de transferência de calor produzem um aquecimento da atmosfera cujo balanço é de 5,1% do valor da insolação.

A relevância dos gases atmosféricos no sistema climático da Terra é bem patente na sua emissão bruta de energia, 161,1% do valor da insolação, quando comparada com a da superfície terrestre, 144,7%.

Parece no entanto existir um desequilíbrio na tabela: a insolação (os 100% do canto superior direito) parece ser maior do que a energia que se destina ao espaço, que se pode calcular pela soma dos valores da primeira coluna (99,7% do valor da insolação). Esta diferença não é resultado de arredondamentos e, segundo Trenberth e Fasullo (2012), o seu valor preciso é 0,9 watt/m², ou 0,26% do valor da insolação. Esta grandeza pode estar afetada de alguns erros de medida mas é uma primeira indicação de um possível desequilíbrio que conduza a um aquecimento global.

2.1.3. Os GEE nas transferências de energia entre a superfície terrestre, a atmosfera e o espaço exterior. Como se pode ver na Tabela 1 só uma parte da energia emitida pela superfície terrestre é libertada para o espaço. Este facto é de vital importância; de seguida descreve-se porquê.

A energia emitida pelo sistema formado pela Terra e sua atmosfera processa-se sobretudo em comprimento de onda longo e pode ser modelada como um *corpo*

negro. Um corpo negro é uma abstração usada em termodinâmica para um corpo que absorve toda a energia sobre ele incidente e, se estiver em equilíbrio térmico, radia de forma isotrópica, ou seja, uniformemente em todas as direções e com uma distribuição espectral deduzida teoricamente e definida pela temperatura do corpo.

O total de energia emitida por um corpo negro à temperatura T (expressa em graus Kelvin) é dado pela expressão³

$$R = \sigma T^4 \quad (\text{watt/m}^2)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com valor $5,67 \times 10^{-8}$ watt/(m² K⁴). Ou seja, a energia radiada por um corpo negro varia com a quarta potência da sua temperatura.⁴ Na Tabela 1 temos que a energia emitida pela Terra e sua atmosfera que efetivamente alcança o espaço sideral é igual à energia total radiada por esse sistema menos a energia que é refletida para o espaço proveniente do Sol, o que dá aproximadamente 69,9% do valor da insolação, ou seja, $R_e = 238,5$ watt/m². Aplicando a fórmula mais acima, é como se a Terra e a sua atmosfera se comportassem como um corpo negro visto do espaço à temperatura de $T_e = 255^\circ\text{K}$. Este valor, que corresponde aproximadamente a -18°C , é consideravelmente menor do que qualquer estimativa que tenhamos para a temperatura da superfície terrestre. Esta estimativa sugere que há uma quantidade significativa de energia radiada em onda longa pela superfície terrestre que é aprisionada na atmosfera e constitui uma evidência do “efeito de estufa”.

A Tabela 1 mostra que a energia eletromagnética de onda longa⁵ emitida pela Terra é 116,1% do valor da insolação, o que corresponde a $R_s = 396$ watt/m². Este valor é muito diferente da radiação emitida pelo sistema Terra-atmosfera para o espaço sideral. Chama-se *transmitividade* da Terra à fração da energia por ela emitida que não fica retida na atmosfera. Designando-a τ , é fácil ver que o seu valor médio é $\tau = \frac{R_e}{R_s} = 0,6$. Ou seja, o efeito de estufa contribui para a retenção de cerca de 40% da energia radiada pelo planeta por efeito dos GEE.

Uma outra forma de ver a questão é comparar T_e , a temperatura do sistema Terra-atmosfera visto do espaço, e a temperatura à superfície da Terra, T_s . Esta é fácil de obter usando a fórmula acima e fazendo as hipóteses simplificadoras anteriores: $T_s \approx 289^\circ\text{K}$, ou seja, cerca de 16°C .

Quer em termos de balanço de energia, quer em termos de temperatura, existe uma grande diferença entre o que se passa à superfície da Terra e o que se observa do espaço sideral e esse efeito tem origem, pelo menos em parte, na atmosfera.

3. A temperatura deve estar expressa em graus Kelvin porque nesta escala o valor zero corresponde ao zero absoluto referido acima como a temperatura a que os corpos não emitem qualquer energia; desta forma, 0°K correspondem a -273°C .

4. A expressão anterior obtém-se a partir da radiancia espectral apresentada na Figura 1, não normalizada, por integração no comprimento de onda e no ângulo sólido ao centro medido em esterradianos.

5. As trocas de energia entre a Terra e a atmosfera sob a forma de evapotranspiração e transferência de calor não são relevantes para as trocas entre a Terra e o espaço.

Daí decorre que qualquer alteração da composição nos gases atmosféricos, em particular os GEE, e da sua distribuição pode ter efeitos de primeira ordem. Para isso acontecer, é necessário relacionar a concentração desses GEE e o potencial de retenção de energia na atmosfera.

A Terra estará em equilíbrio energético se a radiação de onda curta nela incidente – essencialmente sob a forma de luz solar – for igual à radiação por ela emitida em onda longa. Designemos por T_s a temperatura à superfície correspondente ao equilíbrio energético. Se R_S for a insolação, α o albedo terrestre e τ a transmitividade da Terra, terá que verificar-se

$$(1 - \alpha)R_S = \tau\sigma T_s^4. \quad (1)$$

Ou seja, a temperatura à superfície da Terra terá que ser tal que a energia solar nela incidente, descontado o efeito da reflexão, seja igual à energia radiada para o espaço sideral pela Terra, descontado o efeito de retenção da atmosfera. Fazendo estas contas e admitindo que a transmitividade não se altera, obtém-se $T_s \approx 290^\circ\text{K}$. Qual o significado deste valor ligeiramente superior a T_s ? É que a temperatura da superfície da Terra irá aumentar até se atingir a situação em que o desequilíbrio energético se anula. Por estas contas simples o valor desse aumento, relativamente à situação mostrada na Tabela 1, seria de cerca de 1°K , mas este valor está subestimado por razões explicadas um pouco abaixo. O ritmo a que o ajustamento se fará depende de muitos fatores mas cálculos rudimentares sugerem um ajustamento lento à escala humana, embora rápido à escala geológica (ver Secção 5 da lição 2 de Rose 2021).

O problema de determinar o que acontece à temperatura terrestre depende de como são afetadas as grandezas mostradas na equação (1) por ação dos GEE e das alterações por eles induzidas. Por outras palavras, conhecendo o efeito dos GEE no albedo terrestre e na transmitividade da Terra poderemos calcular a temperatura de equilíbrio à superfície do planeta. Infelizmente esses efeitos são difíceis de estimar e para isso são necessários modelos muito mais complexos do que o que acabámos de ver. Um efeito provável é que a transmitividade se possa reduzir à medida que a concentração dos GEE aumente, porque os GEE têm modos de absorção de energia nas frequências em que Terra a emite. Quanto menor for este parâmetro maior será a capacidade da atmosfera de absorver energia eletromagnética, aumentando o efeito de estufa.

Sobre estes, há efeitos desencadeados pela perturbação do equilíbrio que devem ser tidos em conta, genericamente designados de realimentação positiva ou negativa. Um exemplo de realimentação positiva é o aumento da quantidade de vapor de água (um GEE) na atmosfera: temperaturas mais altas aumentam a capacidade da atmosfera de o reter. Isto tenderia a aumentar o efeito de estufa e por isso tratar-se-ia de realimentação positiva.

Uma possível via de realimentação negativa será no albedo. Com o aumento da temperatura à superfície aumenta também a evapotranspiração e acredita-se que isso deverá aumentar a cobertura de nuvens. Tal implicaria um planeta mais claro quando visto do espaço e portanto um albedo maior, o que tenderia a contrariar

o aquecimento global, embora o efeito líquido da cobertura de nuvens não seja claro (ver IPCC 2021). Por outro lado, a redução das calotas polares decorrente do aumento da temperatura diminuiria mecanicamente o albedo do planeta. O efeito líquido destes mecanismos de realimentação por via do albedo vai provavelmente no sentido positivo (para uma discussão avançada deste tópico, ver lições 13 e 20 de Rose 2021).

Apesar destas qualificações, a caracterização simples de um equilíbrio energético é surpreendentemente rica. Por exemplo, podemos admitir que quanto maior a diferença entre $T_{\bar{s}}$ e T_s maior a velocidade de ajustamento da temperatura. Essa alteração permitirá caracterizar não só a temperatura de equilíbrio (como já vimos), mas também a velocidade de convergência para ela. Uma outra melhoria do modelo será usar uma descrição de cada camada da atmosfera: por assim dizer, cada região da atmosfera seria caracterizada por albedo, transmitividade e temperatura, consoante a sua composição em termos de GEE. Um terceiro nível seria a incorporação de modelos de dinâmica de fluidos para descrição dos fenómenos meteorológicos. Em seguida, a modelação explícita das gotículas nas nuvens adicionaria um nível de detalhe ao modelo. Estes modelos sofisticados são normalmente conhecidos por modelos de circulação global, ou GCM, para *Global Circulation Models*. Mais recentemente, a integração de elementos relacionados com a própria biosfera, ou seja, o conjunto dos seres vivos, originou os chamados ESM (de *Earth System Models*). Em todo o caso, o modelo mais simples já permite ver de onde vêm os desequilíbrios energéticos que conduzem ao aquecimento global.

2.2. Os GEE como causa dominante de alterações climáticas

Um último ponto importante tem a ver com a concentração de GEE na atmosfera. A emissão de alguns destes gases, incluindo o CO_2 , feita em qualquer parte do planeta irá afetar a sua concentração em *toda* a atmosfera e não apenas na parte próxima da fonte de emissão. Esse facto torna o problema especial do ponto de vista económico, significando estarmos perante uma externalidade: o emissor do GEE sujeita todos os demais agentes económicos aos seus efeitos sem incorrer nos custos totais da sua atividade. Acontece que, com a exceção do vapor de água, os GEE são componentes quase residuais da atmosfera. A Tabela 2 mostra que o mais determinante para o atual desequilíbrio energético, o CO_2 , constitui somente cerca de 0,04% da atmosfera. Outros GEE, como o ozono, o dióxido de azoto e o metano, são também uma pequeníssima parte da atmosfera. O GEE mais abundante e, em muitos sentidos, o mais importante é o vapor de água, ou seja, a fase gasosa da água dissolvida na atmosfera. A razão porque não é considerado uma causa primária importante do aquecimento global é que, para uma dada temperatura atmosférica, um excesso de vapor de água tende rapidamente a produzir precipitação, reduzindo a sua concentração.

Os GEE causam efeito de estufa porque os seus modos de absorção de energia ocorrem nos comprimentos de onda em que a Terra emite energia, atuando como uma barreira de transmissão para o espaço sideral. Nos comprimentos de onda em

Gás	Fórmula química	Quant. na atmosfera	Comp. de onda de absorção
Azoto	N ₂	78%	
Oxigénio	O ₂	21%	ultravioleta
Árgon	Ar	< 1%	
<i>GEE</i>			
Vapor de água	H ₂ O	0,5%	infravermelho
Dióxido de carbono	CO ₂	400 ppm	infravermelho
Metano	CH ₄	1,7 ppm	infravermelho
Ozono	O ₃	0,5 ppm	ultravioleta, infravermelho
Dióxido de azoto	NO ₂	0,31 ppm	infravermelho

Tabela 2. Gases atmosféricos.

Fonte: Adaptado de Marshall e Plumb (2008).

que o Sol emite energia os GEE tipicamente não a absorvem, com a exceção do ozono, que absorve raios ultravioleta e dessa forma protege os seres humanos dos seus efeitos cancerígenos. De um modo geral há três gamas de comprimentos de onda em que a atmosfera é transparente à radiação: a zona visível (comprimento de onda 0,3–0,9 μm), a chamada “janela atmosférica” (comprimento de onda 8–13 μm) e a banda das microondas (comprimento de onda a partir de 1 mm).

É importante notar que a presença de GEE na atmosfera, embora diminuta, é relevante para as suas características de absorção de energia eletromagnética. O vapor de água, por exemplo, constitui em geral uma parte relativamente pequena da atmosfera mas determina grande parte das suas zonas de absorção de ondas eletromagnéticas acima da região visível. Abaixo desta, na região ultravioleta, outro gás residual, o ozono, torna a atmosfera essencialmente opaca à radiação eletromagnética. Ou seja, pequenas concentrações de alguns gases têm efeitos muito significativos na transmitividade da atmosfera em certos comprimentos de onda e portanto a sua concentração tem efeitos no balanço geral de energia do planeta.

A concentração de CO₂ tem subido consistentemente desde meados do século XIX, passando de 285 ppm em 1850 para 410 ppm em 2019 (Global Monitoring Laboratory 2020). O ritmo de aumento entre 2009 e 2018 foi cerca de 2,3 ppm/ano (Friedlingstein *et al.* 2019). Grande parte deste aumento é devido à ação humana, com destaque para a queima de combustíveis fósseis para obtenção de energia, que transfere para a atmosfera o carbono neles acumulado por ação das plantas durante milhões de anos. O processo atual é muito brusco na medida em que devolve em algumas décadas o carbono sequestrado durante longos períodos. Infelizmente, esse carbono leva muito tempo até eventualmente se dissolver nos oceanos ou ser novamente sequestrado pela ação das plantas e outros processos. Calcula-se que cerca de metade das emissões de carbono por ação humana ocorridas desde 1850 ainda permaneçam na atmosfera. Esta é a razão porque o problema não se resolve por si numa escala de tempo razoável. A secção seguinte apresenta alguns contornos dessa alteração climática.

2.3. A evolução global de temperatura e precipitação

Nesta secção documenta-se a evolução ao longo do século XX da temperatura e precipitação terrestres. Estas duas medidas são frequentemente usadas por climatologistas para caracterizar cada tipo de clima, em especial se observadas com frequência mensal ou diária. Outras medidas relevantes são as temperaturas mínima e máxima mensais. Esta secção documenta alguns factos estilizados sobre alterações climáticas para o conjunto da superfície terrestre e para Portugal continental.

2.3.1. Dados climáticos publicamente disponíveis. Existem inúmeras bases de dados publicamente disponíveis sobre clima. Um exemplo é a *Global Historical Climatology Network-Monthly* (GHCN-M), um esforço de recolha de dados mais antigos existentes em diversos arquivos sobre o clima espalhados pelo mundo. Para uma caracterização detalhada destes dados, ver por exemplo Lawrimore *et al.* (2011) e Fick e Hijmans (2017). Estes trabalhos têm a vantagem de dar informação acerca de medidas adicionais sobre o clima e das diferenças regionais. Os dados utilizados neste trabalho são disponibilizados pela Universidade de Delaware, nos EUA, e produzidos por Matsuura e Willmott (2018b,a). Incluem temperatura e precipitação e cobrem toda a superfície terrestre do planeta com uma resolução de meio grau de longitude por meio grau de latitude, com frequência mensal desde 1900 até 2017. Esta resolução define pontos que distam entre si, na latitude de Portugal, cerca de 55,6 km no sentido norte-sul e 43,4 km no sentido este-oeste. Os dados climatológicos disponíveis em Matsuura e Willmott (2018b,a) implicam que o território continental português contenha 40 pontos, e serão atualizados para efeitos da presente análise.

Estes dados são complementados pela base de dados diária E-OBS (Haylock *et al.* 2008; Cornes *et al.* 2018). Trata-se de uma base de dados com resolução geográfica mais fina e com frequência diária no período 1950–2020, atualizada regularmente. Tal como a anterior, diz respeito à superfície terrestre e cobre toda a Europa. No território português continental ocorrem 936 pontos.⁶ Esta base de dados tem elevada conformidade com a base de dados da Universidade de Delaware para Portugal continental nos anos em que ambas estão disponíveis.

Com os dados diários é possível calcular medidas de consumo energético como a necessidade anual de aquecimento e de arrefecimento dos edifícios para o território português. Estes dados serão usados para uma caracterização espacial no território continental português da evolução de algumas medidas climáticas.⁷

6. Uma outra base de dados, a Iberia01 (Herrera *et al.* 2019), tem valores diários para o período 1971–2015 com uma resolução comparável à da E-OBS. A cobertura da Península Ibérica parece ter também menores erros temporais e espaciais do que a E-OBS, mas a sua menor cobertura temporal levou à utilização da E-OBS.

7. Os dados climatológicos em grelhas territoriais são tipicamente interpolações de dados de estações meteorológicas ajustados pela altitude e por outros fatores. Por esta razão, estão afetados

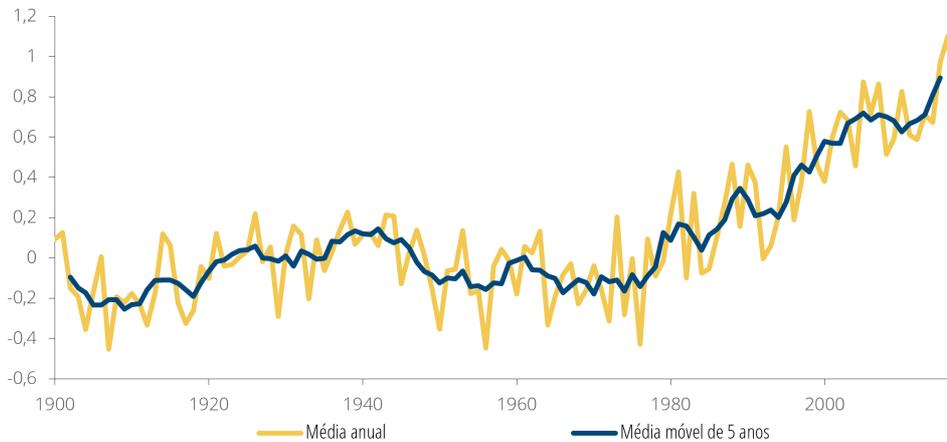


Figura 2: Anomalia da temperatura média anual na superfície terrestre para o período 1900–2017 relativamente à média do século XX, em °C.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média mensal. Os valores são ponderados pela área da célula geográfica respetiva, e expressos como a diferença relativamente à média do período 1900–1999.

2.3.2. Alterações de temperatura e precipitação da superfície terrestre. A Figura 2 mostra a evolução da temperatura no conjunto da superfície terrestre durante o período 1900–2017, expressa como a anomalia relativamente à média do século XX.⁸ Durante este período de mais de um século a temperatura mundial terrestre aumentou cerca de 1°C. Este aumento está concentrado na segunda metade do século passado, em especial a partir dos anos 1970. Durante o período 1950–2017 o ritmo de aquecimento da superfície terrestre, estimado usando uma regressão linear, foi de 0,017°C por ano. As razões deste aumento estão evidentemente sujeitas a discussão mas existe um mecanismo causal, descrito anteriormente, que terá contribuído para esta evolução. Segundo IPCC (2021), este aumento ter-se-á situado no intervalo 0,8–1,3°C durante os anos 2010, sendo “extremamente provável” que as emissões de GEE associadas à atividade humana sejam a causa dominante do aumento da temperatura observada na Figura 2.

A Figura 3 proporciona uma visão espacial desse aumento de temperatura. É muito evidente que a quase generalidade da superfície terrestre aqueceu durante

por margens de erro consideráveis em cada observação individual, tanto maiores quanto mais afastado for o ponto da grelha da estação meteorológica mais próxima e especialmente no caso da precipitação. Em todo o caso, isso não invalida que os resultados obtidos possam ser aceites com confiança. Nickl *et al.* (2010), Fick e Hijmans (2017), Cornes *et al.* (2018) e Herrera *et al.* (2019) apresentam discussões detalhadas desta questão.

8. Ver no Apêndice A uma breve caracterização das variáveis sob estudo na superfície terrestre e no território continental português a partir da segunda metade do século XX.

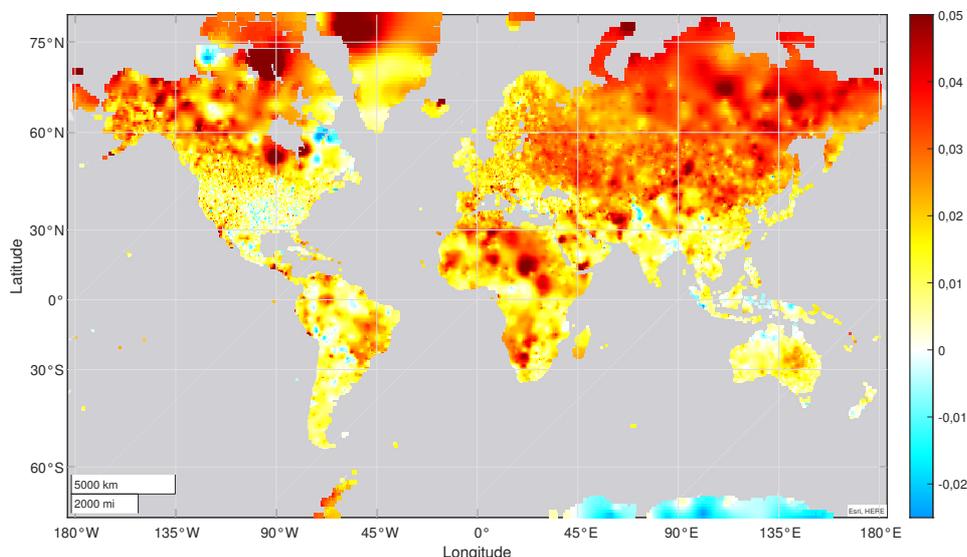


Figura 3: Variação da temperatura média anual na superfície terrestre para o período 1950–2017. Valores em °C por ano.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: Os valores representados correspondem ao declive para cada localização geográfica das retas de regressão da temperatura média anual na variável temporal (ano). A regressão é especificada com efeitos fixos por localização e com estes interagidos com a variável temporal. A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média diária. Valores truncados superiormente em 0,05°C.

os 68 anos desta análise. Este aumento é estatisticamente significativo para 82% da superfície terrestre (a um nível de significância de 5%), e contrasta com 2,8% da área terrestre com uma queda na temperatura média.

Estes resultados são compatíveis com a constatação de que há um aquecimento suficientemente forte e distribuído para ser estatisticamente significativo em vastas regiões. Este facto sugere que a causa deva ser sistémica, ou seja, não esteja relacionada com fatores locais como o aumento da urbanização, o aumento da concentração das populações ou o consumo regional de energia, antes devendo ser explicado pela notável rapidez de homogeneização de alguns GEE nas camadas inferiores da atmosfera.

Em relação à precipitação, os resultados são menos pronunciados na medida em que o aquecimento global tende, no agregado, a contribuir para um aumento da pluviosidade (IPCC 2021, pág. SPM-6). A Figura 4 mostra a precipitação global terrestre média no período sob estudo. Assinala-se uma queda abrupta da pluviosidade durante a segunda metade da década de 1970 e a primeira de 1980. Nickl *et al.* (2010) apresentam uma discussão desta queda da pluviosidade terrestre, que se centrou sobretudo na América do Norte, no subcontinente indiano e no sul

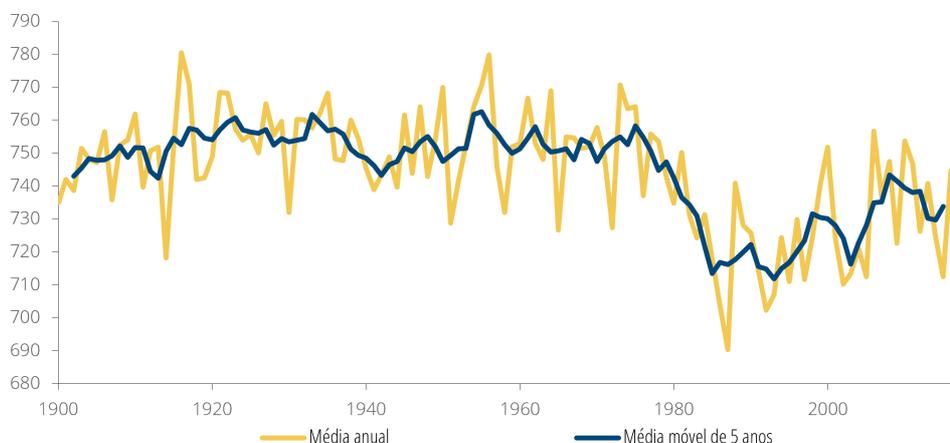


Figura 4: Precipitação anual média na superfície terrestre para o período 1900–2017, em mm.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: A precipitação anual média é definida como a média temporal do valor da precipitação acumulada ao longo do ano.

da Ásia. No entanto, a precipitação global terrestre tem vindo a aumentar a partir de 1985 a um ritmo médio de 0,87 mm por ano, tendo registado durante os anos 2010 valores comparáveis aos do início do século passado.

A Figura 5 proporciona uma visão espacial da precipitação no período 1950-2017. Ao contrário da temperatura, a precipitação tem um comportamento muito diferenciado por regiões, com aumentos numas e quedas noutras. O continente africano teve uma redução da precipitação, tal como partes do sudeste asiático, do sul da Europa e do Médio Oriente. Verificaram-se aumentos nas zonas temperadas da Europa, América do Norte e do Sul, bem como em vastas regiões a norte do subcontinente indiano. Em cerca de 13% da superfície terrestre observou-se um crescimento estatisticamente significativo da precipitação a um nível de significância de 5%, que contrasta com cerca 26% da superfície terrestre com uma redução estatisticamente significativa da precipitação. No entanto, a precipitação sobre os oceanos não é aqui contabilizada, pelo que o cálculo do valor total é difícil. O relatório do IPCC (2021, página SPM-6) indica que o aquecimento global deverá ter causado um aumento global da precipitação média anual.

As alterações documentadas têm vastas implicações económicas, tanto ao nível global como ao nível local. Elas escondem também uma elevada variabilidade dentro dos diversos territórios. O caso português é explorado na secção seguinte.

2.3.3. A evolução heterogénea de temperatura e precipitação em Portugal. Está fora do âmbito deste trabalho propor uma caracterização extensiva do clima português. O leitor interessado poderá consultar Fragoso (2008); de Lima *et al.*

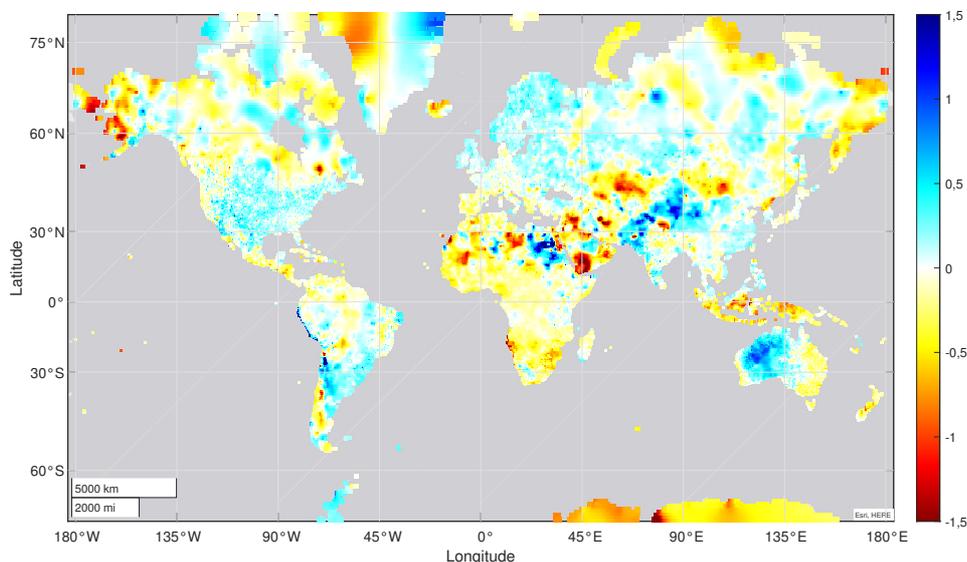


Figura 5: Variação percentual média da precipitação total anual na superfície terrestre para o período 1950–2017. Valores em percentagem anual.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: Os valores representados correspondem ao declive para cada localização geográfica das retas de regressão do logaritmo da precipitação total anual, medida em mm, na variável temporal (ano), multiplicados por 100. A regressão é especificada com efeitos fixos por localização e com estes interagidos com a variável temporal. A precipitação total anual é definida como a soma ao longo do ano da precipitação total mensal. Valores truncados para o intervalo $[-0,015; 0,015]$.

(2013); ver também o Apêndice A. Iremos apenas caracterizar a evolução ao longo do tempo de duas variáveis fundamentais de qualquer sistema climático: a temperatura média anual e a precipitação total anual.

Usando os dados da Universidade de Delaware da secção anterior nos pontos da grelha correspondentes ao território continental português, obtém-se a evolução da temperatura da Figura 6. Os resultados são mais mitigados do que para a totalidade da superfície terrestre do planeta, com um aumento durante o período 1900–2017 de $0,6^{\circ}\text{C}$. O aumento da temperatura a partir de 1950 foi $0,0077^{\circ}\text{C}$ por ano. Devido à pequena dimensão do território e à sua proximidade ao oceano, a temperatura média anual tem um comportamento mais volátil para Portugal do que para toda a superfície terrestre: o desvio-padrão temporal é cerca de $0,48^{\circ}\text{C}$ para Portugal, que contrasta com $0,34^{\circ}\text{C}$ para toda a superfície terrestre.

O caso português no que diz respeito à precipitação pode ser observado na Figura 7 e é novamente mais benigno do que para toda a superfície terrestre. Em termos estatísticos o total de precipitação não evidenciou uma tendência no período 1900–2017. Não se observam quedas abruptas e persistentes como a verificada para o conjunto da superfície terrestre a partir do final dos anos 1970 e que durou uma

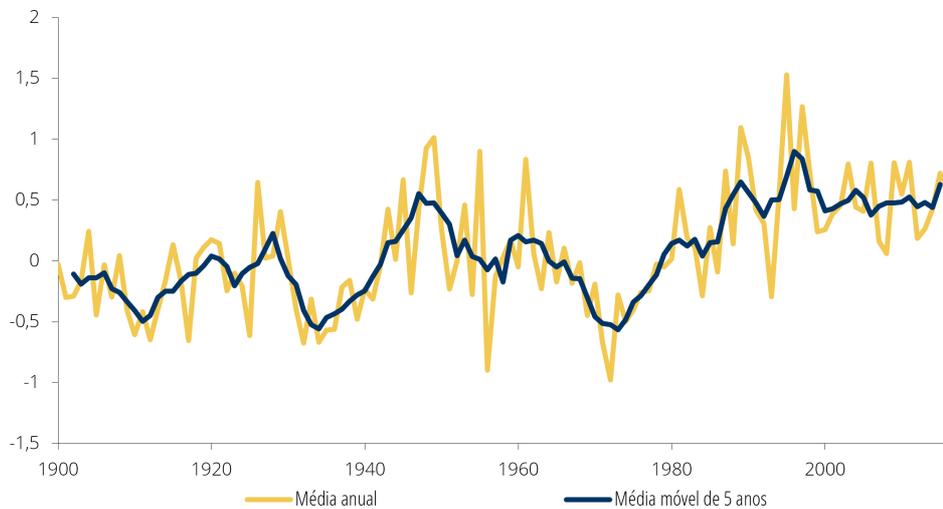


Figura 6: Anomalia da temperatura média anual em Portugal continental para o período 1900–2017 relativamente à média do século XX, em °C.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média mensal dos pontos da grelha incluídos em Portugal continental. Os valores são ponderados pela área da célula geográfica respetiva, e expressos como a diferença relativamente à média do período 1900–1999.

década. A variabilidade da pluviosidade anual é extremamente elevada, com um desvio-padrão de 193 mm em torno de uma média de 849 mm. Este valor contrasta fortemente com o desvio-padrão aplicável ao conjunto da superfície terrestre, no valor de 18 mm. Assinale-se, no entanto, que o número de estações pluviométricas existentes em Portugal usadas nesta base de dados foi-se reduzindo ao longo dos anos, em especial a partir de 2009 (para documentação do problema, ver Matsuura e Willmott 2018b; Herrera *et al.* 2019).

Este panorama esconde grande variabilidade espacial dentro do território português. O painel (a) da Figura 8 representa a variação média anual da temperatura durante o período 1950–2020 para cada uma das células definidas na base de dados E-OBS. O aumento parece ser maior no nordeste do país e no Algarve. Nestas regiões o ritmo de aquecimento estimado atinge por vezes valores superiores a $0,04^{\circ}\text{C}$ por cada ano decorrido, o que significa que após dez anos o aquecimento estimado é de $0,4^{\circ}\text{C}$. A figura mostra que não houve durante este período regiões em Portugal continental com reduções na temperatura média. É evidente que se trata de estimativas que nada garante continuarem a ser válidas no futuro, mas estes valores mostram que algumas regiões podem ser muito mais afetadas por alterações climáticas do que outras, mesmo se a tendência geral é de

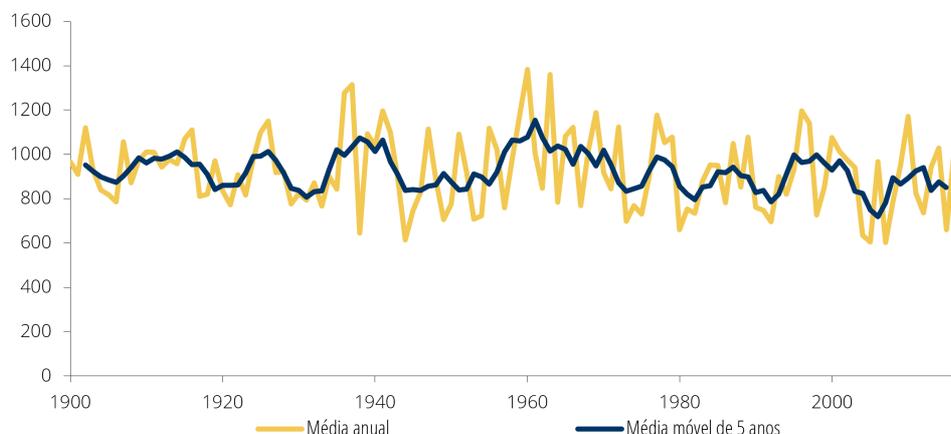


Figura 7: Precipitação anual média em Portugal continental para o período 1900–2017, em mm.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: A precipitação anual média é definida como a média para todas as unidades geográficas do valor da precipitação acumulada longo do ano. Os valores são ponderados pela área da célula geográfica respetiva.

aquecimento. Além disso, as tendências lineares estimadas são sensíveis a alterações no período sob estudo e à utilização de bases de dados alternativas.

Quanto à precipitação, o interior norte apresenta uma bolsa de significativa redução no período 1950–2020, como se vê no painel direito da Figura 8. Ainda que nesta região o ponto de partida seja de elevada pluviosidade, ocorreu uma redução superior a 1% ao ano, um valor que corresponde a uma queda anual de cerca 15 mm na precipitação total. Em contraste, todo o litoral e o sul do país foram largamente resistentes à redução da precipitação. Usando estes dados, a precipitação total do conjunto do território continental apresentou uma tendência decrescente estatisticamente significativa de 0,3% ao ano. Este valor, no entanto, é baixo e pode ser contrastado com um valor estatisticamente nulo obtido com a base de dados da Universidade de Delaware para o período 1900–2017 mencionado anteriormente. Assinale-se que a precipitação tem grande variabilidade de uns anos para os outros e tem tendência a gerar eventos extremos mais uniformes no território nacional do que as médias anuais de precipitação. Por exemplo, o sul de Portugal tem precipitações diárias com retorno de 50 anos (isto é, que se espera ocorram uma vez de 50 em 50 anos) semelhantes às do norte do país, muito embora a precipitação anual seja muito inferior, como documentam Fragoso (2008) e Herrera *et al.* (2019). Ou seja, os fenómenos mais extremos de precipitação distribuem-se pelo território continental português de forma mais uniforme do que a média anual.

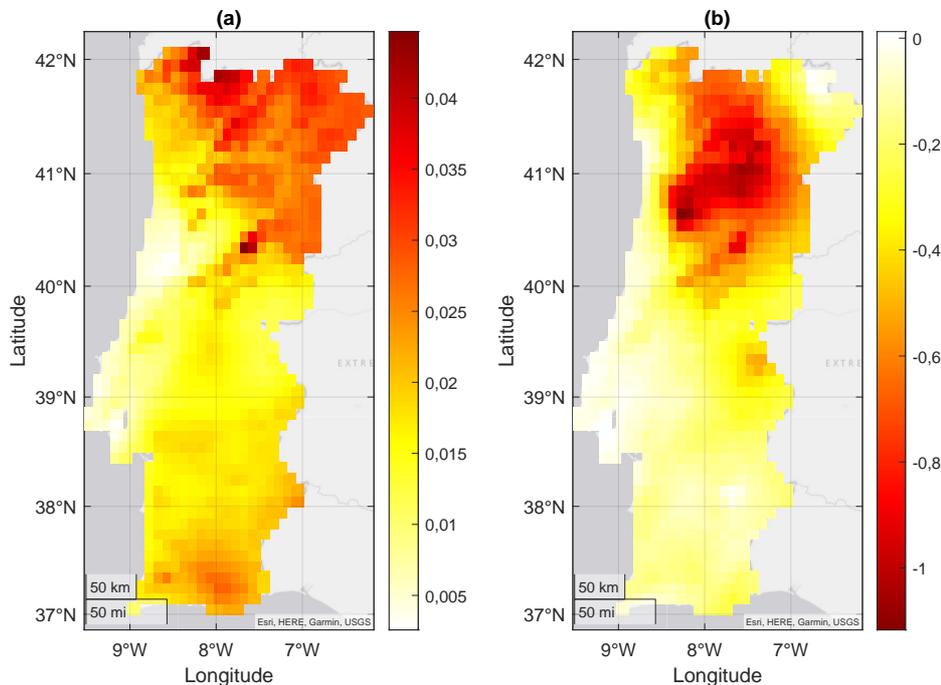


Figura 8: Variação média anual da temperatura e precipitação em Portugal continental para o período 1950–2020. Painel (a): variação média anual da temperatura média, em $^{\circ}\text{C}$ por ano. Painel (b): variação percentual média da precipitação total anual, em percentagem anual.

Fontes: E-OBS e cálculos dos autores.

Notas: Os valores indicados correspondem ao declive para cada localização geográfica das retas de regressão da variável dependente (temperatura média anual ou logaritmo natural precipitação total anual multiplicado por 100) na variável temporal (ano). A regressão é especificada com efeitos fixos por localização e com estes interagidos com a variável temporal. A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média diária. A precipitação total anual é definida como o valor acumulado ao longo do ano da precipitação diária.

As alterações climáticas não se esgotam em mudanças de grandezas como a temperatura média ou a precipitação total. Tão importante quanto a quantidade de precipitação que cai durante um ano é a sua distribuição ao longo dele e as condições de temperatura prevalentes. Por exemplo, Páscoa *et al.* (2021) documentam um padrão de secas mais prolongadas mas menos intensas na Península Ibérica no período 1971–2015. Isso resulta não só da tendência que também aqui encontramos de diminuição da precipitação em algumas localizações, mas da maior intensidade da evapotranspiração decorrente do aumento secular da temperatura. Este é um nível adicional de análise com relevância para o impacto económico das alterações climáticas mas que cai fora do âmbito deste trabalho.

2.3.4. Medidas de necessidade energética em Portugal. O padrão observado anteriormente ilustra de maneira clara que as alterações climáticas têm impactos muito heterogêneos sobre o território, e por consequência sobre as atividades económicas de cada localização. Esta conclusão é extrapolável para toda a superfície terrestre. Um dos aspetos mais óbvios desta alteração da temperatura tem a ver com o consumo de energia para aquecimento e para arrefecimento dos edifícios. Embora seja difícil calcular medidas precisas para este consumo, é possível ter deste uma ideia recorrendo a indicadores padronizados e publicados por organismos oficiais. Dois dos mais utilizados são os dias-graus de aquecimento ou arrefecimento em determinado país ou região. Intuitivamente dão-nos uma medida das necessidades de aquecimento ou arrefecimento dos edifícios para estes permanecerem a uma temperatura confortável ao longo do ano. Por exemplo, cada dia-grau adicional de aquecimento significa que é necessário elevar a temperatura em um grau Celsius durante um dia, ou então meio grau Celsius durante dois dias, e por aí em diante. O dispêndio de energia associado a estas necessidades varia evidentemente com as características dos edifícios. Se o isolamento térmico dos edifícios for melhorando ao longo do tempo, a energia necessária para um mesmo nível de aquecimento ou arrefecimento de um edifício irá ser menor. Essa é uma margem importante de redução das necessidades energéticas que estas medidas não capturam.

Com os dados diários disponíveis é possível calcular estes indicadores e a sua evolução desde 1950. A Figura 9 apresenta a variação estimada dos dias-graus de aquecimento e arrefecimento ao longo do período 1950–2020. Um aumento genérico da temperatura tenderá a reduzir as necessidades de aquecimento e a aumentar as necessidades de arrefecimento. As necessidades de aquecimento reduziram-se durante este período 3,7 dias-graus por ano, que é equivalente a todos os anos deixar de ser necessário elevar por um grau Celsius a temperatura dos edifícios durante três dias e 19 horas. Esta evolução implica uma poupança de energia mas esconde uma grande variabilidade no território português. É sobretudo a norte que se tornou menos necessário aquecer os edifícios, com uma redução anual em certos casos superior a 10 dias-graus, ou seja, o equivalente a deixar de ser necessário, por cada ano que passa, elevar a temperatura dos edifícios em um grau Celsius durante dez dias.

O painel direito da mesma figura mostra a variação anual das necessidades de arrefecimento durante o mesmo período. Aí verifica-se que toda a faixa interior do país passou a evidenciar maior necessidade de arrefecimento dos edifícios, o que representa um acréscimo no dispêndio de energia. O valor médio para o total do território continental foi 1,6 dias-graus Celsius por ano.

Estes resultados pretendem documentar tendências seculares que poderão ou não prolongar-se no futuro. Esse tipo de trabalho deve ser procurado na literatura especializada, particularmente na que utiliza modelos de projeção climática como os referidos anteriormente.

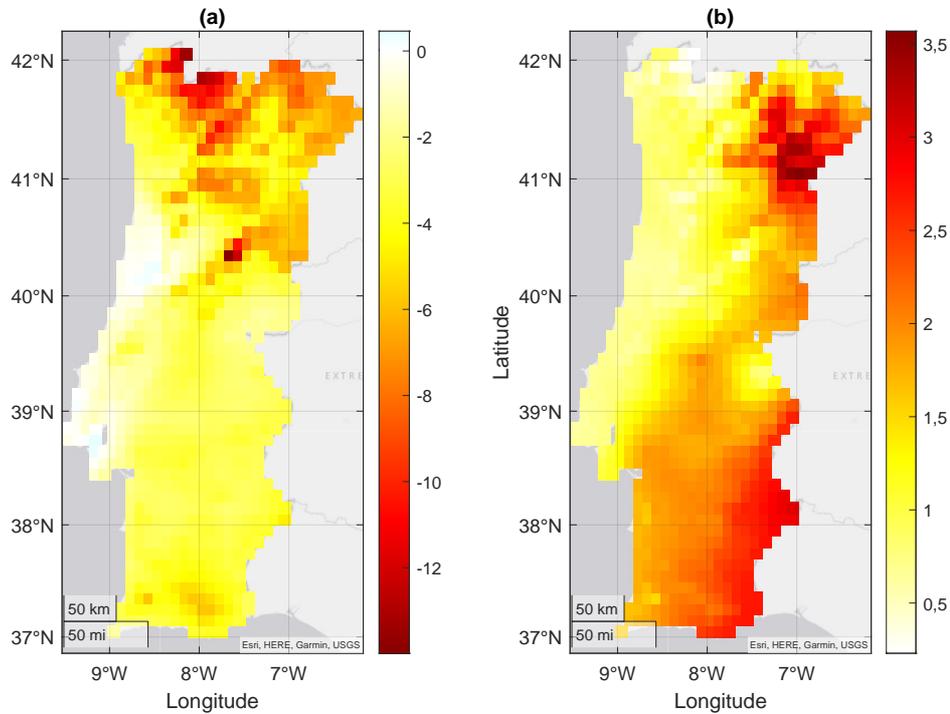


Figura 9: Variação média anual de dias-graus de aquecimento e arrefecimento em Portugal continental para o período 1950–2020. Painel (a): variação média anual de aquecimento, em dias-°C. Painel (b): variação média anual de arrefecimento, em dias-°C.

Fontes: E-OBS e cálculos dos autores.

Notas: Os valores indicados correspondem ao declive para cada localização geográfica das retas de regressão da variável dependente (dias-°C de aquecimento ou dias-°C de arrefecimento) na variável temporal (ano). A regressão é especificada com efeitos fixos por localização e com estes interagidos com a variável temporal. Para cada ano, os dias-°C de aquecimento são definidos como $\sum_{\{t \in A: T_t^m \leq 15^\circ\text{C}\}} (18^\circ\text{C} - T_t^m)$, em que T_t^m é a temperatura média em graus Celsius no dia t do ano A . Os dias-°C de arrefecimento são definidos como $\sum_{\{t \in A: T_t^m \geq 24^\circ\text{C}\}} (T_t^m - 21^\circ\text{C})$.

2.4. Algumas ideias a reter

As ideias principais a reter desta secção são poucas e simples. Primeiro, há um mecanismo causal bem conhecido associado à atividade humana e às emissões de GEE dela decorrentes que, devido à termodinâmica particular do sistema Terra-atmosfera, pode conduzir a um aquecimento progressivo da atmosfera.

Segundo, embora sempre tenham existido alterações aos sistemas climáticos da Terra, estas são agora mensuráveis e verificáveis a uma escala de tempo muito mais curta do que no passado.

Terceiro, ao longo do século XX e até ao momento atual há alterações sensíveis em variáveis climatológicas importantes, como a temperatura média e a precipitação total anual. Estas alterações vão no sentido de um aumento secular da temperatura da superfície terrestre.

Finalmente, as alterações nas variáveis climáticas mais importantes são espacialmente muito heterogéneas mesmo no interior de unidades geográficas relativamente pequenas como Portugal continental, e produzem consequências económicas muito difíceis de avaliar.

3. Alterações climáticas em perspetiva económica

Esta secção é composta por três blocos. No primeiro documenta-se a literatura económica existente sobre este tema, com ênfase nos impactos em termos de PIB da adoção de políticas apropriadas para mitigar os efeitos das emissões excessivas de dióxido de carbono. O segundo bloco analisa o problema prático de se saber qual o fator de desconto a aplicar na análise de políticas de mitigação. O terceiro bloco discute as várias opções de política económica preconizadas para este tipo de problema.

3.1. Impactos económicos das alterações climáticas

A natureza global do fenómeno das alterações climáticas aliada à sua repercussão num horizonte alargado potencia o estudo das suas implicações em vários domínios da economia: comércio internacional, crescimento e desenvolvimento económico, reorganização da produção e alocação dos fatores produtivos, entre outros. A compreensão das suas consequências tornou-se imperativa para informar as respostas de política, na medida em que os impactos interagem com diversos sistemas: físicos, biológicos ou humanos (IPCC 2014). Tal é particularmente relevante para os decisores responsáveis pela formulação de políticas de combate às alterações climáticas ou instituições envolvidas na modelização e previsão macroeconómica.

Uma visão largamente aceite sobre o fenómeno é a de que a quantificação dos impactos económicos resultantes das alterações climáticas está sujeita a elevada incerteza. Por um lado, trata-se de um fenómeno sem precedente histórico, com efeitos persistentes e diferenciados ao nível de geografias (Hsiang *et al.* 2017) ou setores. Por outro lado, a definição de um horizonte de análise para avaliação de políticas tende a ser discricionária. O estudo destes impactos assenta frequentemente em estimativas de modelos com base em hipóteses passíveis de serem questionadas e que podem ignorar efeitos potencialmente não lineares, subestimando assim os riscos associados. Um dos fatores preponderantes nos resultados refere-se à escolha da taxa de desconto (para uma visão crítica, ver Nordhaus 2007). Weitzman (2009) reconhece que a probabilidade de ocorrência

de eventos extremos não é negligenciável e que a existência de caudas pesadas na distribuição dos efeitos deve ser considerada nas análises custo-benefício.

A literatura distingue entre dois tipos de efeitos decorrentes das alterações climáticas: diretos e indiretos. Os efeitos diretos das alterações climáticas na economia referem-se sobretudo a distorções do funcionamento normal do sistema climático natural que induzem, por exemplo, a subida do nível da temperatura terrestre, o aumento do nível médio das águas do mar ou a maior frequência de eventos extremos, como inundações, secas ou tempestades. A frequência destes eventos tende a aumentar gradualmente ao longo do tempo, com a subida da temperatura média global. Por seu turno, os efeitos indiretos resultam principalmente da adaptação às novas condições do clima e aos esforços de mitigação das consequências das alterações climáticas, através da transição para uma economia de baixo carbono.

A diversidade dos efeitos das alterações climáticas dificulta a avaliação efetiva do seu impacto na economia. Por exemplo, a existência de culturas agrícolas afetadas por eventos de seca ou o maior crescimento destas devido a um ambiente com mais dióxido de carbono fazem com que o impacto decorrente das alterações climáticas seja de difícil compreensão. Assim, alguns autores têm proposto dois indicadores agregados:

- Impacto das alterações climáticas no bem-estar total;
- Distribuição desses impactos.

Tol (2018) revê as estimativas existentes na literatura do impacto das alterações climáticas para diferentes aumentos de temperatura (Tabela 3), assim como a distribuição desses impactos no mundo. Simultaneamente, o autor reconhece que a literatura não incorpora alguns elementos importantes (como a não linearidade de efeitos ou fenómenos atualmente desconhecidos) e que a incerteza em torno das estimativas motiva por si só a redução das emissões de GEE.

Aumento da temp. média global (°C)	N.º de estimativas	Impacto no nível do PIB (%)	
		Média das estimativas	Intervalo das estimativas
≤ 2	4	0,3	-0,5 a 2,3
2,5	11	-1,3	-3,0 a 0,1
2,9	2	-2	-2,1 a -2
3	6	-1,7	-3,6 a -0,9
3,2	1	-5,1	-5,1
5,4	1	-6,1	-6,1
6	1	-6,7	-6,7

Tabela 3. Impacto das alterações climáticas no PIB mundial.

Fonte: Adaptado de Tol (2018).

Nota: Impacto percentual no nível do PIB em 2100 relativamente a um cenário sem alterações climáticas.

No curto prazo, setores como a agricultura poderão beneficiar das consequências das alterações climáticas. Contudo, no longo prazo os impactos

negativos deverão exceder largamente os positivos. Os impactos mais severos que se fazem sentir nos países em desenvolvimento são atribuídos sobretudo ao nível de pobreza existente. Por um lado, a exposição destes países às condições do clima é maior devido ao papel preponderante da agricultura e dos recursos hídricos na economia. Por outro lado, estes países localizam-se em lugares mais quentes, fazendo com que os ecossistemas estejam mais próximos dos limites compatíveis com a habitabilidade humana. A capacidade de adaptação destes países tende a ser mais limitada devido aos baixos níveis de tecnologia prevalentes, rendimento *per capita* e grau de abertura das economias (Noy 2009).

Refira-se que, num contexto de teste de esforço, as estimativas são mais elevadas do que aquelas apresentadas na Tabela 3. Um relatório recentemente publicado (Swiss Re Institute 2021) considera não só os canais conhecidos de impacto do clima na economia, mas também os canais desconhecidos ou ainda não quantificados. A metodologia usada assenta em modelos desenvolvidos pela Moody's (2019) e aplica um fator de uma ordem de grandeza aos efeitos económicos acumulados devido ao aumento da temperatura. Os custos de uma trajetória de emissões de carbono comparáveis às do cenário⁹ SSP2-4.5 de IPCC (2021) face a um mundo sem aumento de temperatura poderiam ser da ordem de 13,9% em 2050, correspondendo a um aumento da temperatura de 2,6°C. Esse impacto incidiria sobretudo em países do sudeste asiático, como a Malásia, as Filipinas e Singapura, com quedas de cerca de 35%. África seria também muito afetada. Na Europa as quedas seriam de 8%. Estes valores devem ser interpretados como efeitos possíveis, embora não prováveis, e mostram quão prejudiciais poderão ser as alterações climáticas para a economia. Contudo, este tipo de abordagem tende também a ignorar desenvolvimentos tecnológicos positivos no combate a este problema.

3.2. Mecanismos de interação entre a macroeconomia e o clima

Na análise dos impactos das alterações climáticas na economia tem sido recorrente a avaliação ao nível de cada setor de forma individual e conseqüente agregação, a fim de se obterem estimativas do impacto agregado na economia em termos de bem-estar social. No entanto, as interligações dos diversos setores podem ser relevantes para captar efeitos indiretos. Alterações ao nível das necessidades de aquecimento ou arrefecimento podem afetar o preço da energia, o que terá repercussões em todos os setores que usam energia como input. Fankhauser e Tol (2005) analisam os efeitos dinâmicos através dos quais as alterações climáticas afetam o crescimento económico e, por conseguinte, o bem-estar social, focando-se nos mecanismos de afetação da poupança e da acumulação de capital.

Apesar da elevada incerteza em torno da quantificação dos impactos económicos das alterações climáticas, vários canais de transmissão têm sido

9. O cenário usado como base é o RCP4.5 de IPCC (2014).

identificados na literatura, com repercussões tanto do lado da procura como da oferta. Na parte que se segue salientam-se alguns desses mecanismos e sempre que possível documentam-se as quantificações existentes na literatura. Excluem-se, assim, vários domínios potencialmente afetados e de difícil quantificação, como por exemplo o setor do turismo, onde é expectável que certos destinos turísticos se tornem mais ou menos apelativos, em função das alterações locais do clima.

3.2.1. Volatilidade de preços e rendimento. A ocorrência de eventos extremos pode ser entendida como um choque negativo do lado da oferta, com repercussões no nível geral de preços das economias. Parker (2018) mostra que eventos extremos como tempestades e inundações podem causar um aumento da inflação nos países em desenvolvimento no curto prazo, ao passo que eventos como secas podem exercer pressões ascendentes nos preços de forma persistente. A distorção de preços relativos de bens alimentares ou de matérias-primas pode afetar em larga medida o nível geral de preços nas economias mais expostas ao setor primário. Uma via de transmissão importante é a energia, na medida em que as empresas que se insiram em setores de atividade intensivos no seu uso estarão mais vulneráveis a flutuações do seu preço. Torna-se, assim, relevante avaliar as interligações dos setores que usam energia como input nos processos produtivos.

O efeito do aumento da temperatura na volatilidade do rendimento tem sido igualmente documentado. Deryugina e Hsiang (2014) estudam o impacto das variações diárias de temperatura num período de 40 anos para os condados dos EUA, documentando um efeito negativo da temperatura na produtividade e no rendimento acima de um certo limite.

3.2.2. Fluxos de comércio internacional. O impacto de eventos extremos no comércio internacional encontra-se bem documentado na literatura. Usando um modelo gravitacional (170 países), Gassebner *et al.* (2010) estimam uma redução de 0,2% nas importações (0,1% no caso das exportações) em resultado de uma catástrofe significativa e que o nível de democracia e área geográfica constituem fatores preponderantes para a ordem de magnitude destes impactos. Os resultados de Oh e Reuveny (2010) apontam igualmente para uma redução do comércio internacional como consequência dos desastres naturais. A severidade dos efeitos dependerá do grau de integração das economias nas cadeias de valor globais. Mesmo economias menos expostas a eventos extremos podem estar fortemente dependentes dos mercados externos, sendo por isso afetadas pelos desenvolvimentos nos parceiros comerciais através das cadeias de valor globais. Tal poderá induzir uma realocação das empresas para zonas menos afetadas, traduzindo-se numa transferência de stock de capital, emprego e produção entre países.

3.2.3. Redução do stock de capital. A destruição de infraestruturas, redes de transporte, de fornecimento de energia e abastecimento de água pode reduzir fortemente o stock de capital da economia, traduzindo-se em perdas

da produtividade do trabalho e da atratividade do investimento produtivo. Por exemplo, Fankhauser e Tol (2005) documentam que a frequência de eventos extremos afeta a vida útil do capital físico, dada a maior velocidade de depreciação dos ativos, reduzindo assim os níveis de eficiência das tecnologias vigentes. Assim, existirá uma alocação de recursos do investimento produtivo para a adaptação, podendo estimular investimentos de reposição de stock de capital no curto prazo. A título de exemplo, a transição para uma economia de baixo carbono pode levar a alterações na eficiência energética de edifícios ou a investimentos em infraestruturas para mitigar a subida do nível do mar.

As consequências para o setor segurador não devem ser negligenciadas. A maior frequência de eventos extremos pode levar a que certos tipos de riscos se tornem demasiado caros para serem segurados; um exemplo é a existência de habitações em zonas vulneráveis a inundações. A exposição a riscos elevados ou não seguráveis no mercado pode levar as empresas e famílias a aumentarem as suas poupanças por motivo de precaução.

3.2.4. Obsolescência de ativos. A transição para uma economia de baixo carbono potencia a disrupção de algumas tecnologias vigentes, levando a que alguns ativos em certas indústrias se tornem obsoletos (*stranded assets*), com consequências diretas no emprego. O nível de perdas geradas dependerá do grau de exposição dos países a este tipo de ativos ou da taxa de adoção de tecnologias alternativas. Por exemplo, países com um elevado número de centrais termoelétricas ou com tecnologias intensivas no uso de carbono tenderão a ser mais afetados, pelo que uma transição abrupta poderá provocar perdas significativas no valor dos ativos, induzindo prejuízos avultados para o sistema financeiro no geral. Cavalcanti *et al.* (2021) oferecem uma estimativa de custos de longo prazo decorrentes da transição energética, concluindo que serão maiores para trabalhadores especializados em setores de uso mais intensivo de tecnologias energeticamente poluentes, e consequentemente para os países com maior relevância desses setores.

3.2.5. Migrações. A mobilidade do fator trabalho pode intensificar-se como resultado das alterações climáticas (Rigaud *et al.* 2018). Este fenómeno influencia as decisões de migração através dos determinantes habituais, em particular fatores económicos (por exemplo através da diminuição dos salários em áreas rurais ou do aumento dos preços de bens agrícolas), ambientais e, em larga medida, políticos. Cattaneo e Peri (2016) concluem que o aumento da temperatura e a ocorrência de desastres naturais fomentam a migração nos países em desenvolvimento, à exceção daqueles com menores níveis de rendimento, onde as populações não se conseguem realocar. Os fatores comportamentais, como a perceção da vulnerabilidade das famílias aos riscos emergentes das alterações climáticas, devem pesar igualmente na decisão de migrar.

3.2.6. Outros fatores. De salientar que as alterações climáticas podem causar perdas que vão para além do impacto no PIB. Existem fatores como os riscos para a

saúde, a perda de qualidade ambiental ou as disrupções em comunidades forçadas a realocar-se que não são captadas diretamente na medição deste agregado. Tal leva a esforços para complementar o PIB com contas-satélite que meçam variáveis ambientais e sociais que afetam o bem-estar. Este será porventura um desenvolvimento metodológico necessário nos próximos anos, a par de tópicos mais conhecidos como o abordado na secção seguinte.

3.3. Desconto intertemporal

Numa perspetiva económica, a avaliação do bem-estar de um agente económico assenta em considerar a sua utilidade atual e descontar para o momento atual toda a sua utilidade futura. A utilidade de cada momento pode ser medida de diversas formas, normalmente relacionadas com o consumo ou rendimento e com a quantidade de lazer usufruído em cada período de tempo. Qualquer que seja essa medida, ela tem que ser descontada para o momento presente. O seu uso está implícito, por exemplo, nas estimativas da Tabela 3, já que a diferentes taxas de desconto corresponderão diferentes regras de decisão dos agentes económicos e, por consequência, diferentes níveis do PIB no horizonte utilizado. Esta secção aborda este tema e propõe valores a utilizar na avaliação dos impactos de políticas a muito longo prazo, não necessariamente relativos a alterações climáticas.

3.3.1. Enquadramento teórico e prática internacional. A ideia de que custos ou benefícios futuros têm uma relevância menor que idênticos valores no presente é um princípio fundamental em economia. Normalmente, esse princípio é implementado descontando um valor futuro ao multiplicá-lo por um fator inferior à unidade. O valor hoje, V_0 , de um fluxo V_t , a gerar daqui a t anos, é dado por

$$V_0 = V_t \left(\frac{1}{1 + \rho} \right)^t$$

onde ρ é a taxa de desconto. Nesta secção abordam-se as duas principais orientações metodológicas que têm sido seguidas para definir taxas de atualização, bem como as escolhas de taxas de atualização para efeitos de análise de políticas públicas de vários países. Em conclusão, propõe-se uma gama de valores de referência para a taxa de atualização a utilizar em avaliações económicas das alterações climáticas.

As alterações climáticas ocorrem ao longo de prazos muito alargados, no mínimo dezenas de anos. Isso significa que é neste horizonte temporal longo que se deverá enquadrar qualquer avaliação económica das consequências das alterações climáticas, bem como dos custos e benefícios de políticas públicas destinadas a mitigar o seu impacto. Na medida em que os custos gerados por tais alterações se projetam para o futuro, e na medida em que os custos e benefícios de políticas públicas tenderão a ocorrer em momentos diferentes, é necessário estabelecer como se avaliarão valores económicos ao longo do tempo, ou seja, como se fará a atualização de valores futuros.

A escolha prévia da taxa de desconto é um requisito crucial de qualquer avaliação económica e pode tornar-se uma questão sensível. Uma atualização a taxas elevadas reduz fortemente o valor hodierno de grandezas futuras, minimizando a sua relevância. Um valor muito baixo resulta em consequências opostas. Por exemplo, o relatório Stern *et al.* (2006) foi muito criticado por ter utilizado uma taxa de atualização anual de 0,1%, um valor considerado como excessivamente reduzido e que por isso teria empolado os valores atualizados dos custos futuros associados às alterações climáticas.

No contexto português, o problema da escolha da taxa de atualização sofre adicionalmente com o facto de, em Portugal, não haver um enquadramento legal nem uma tradição estabelecida para definir as taxas de atualização a utilizar na análise de políticas públicas. No caso de outros países, as escolhas são mais claras e explícitas, dado que existem taxas de atualização de referência, oficialmente definidas.

No caso dos EUA, as taxas de atualização oficiais de referência são definidas pelo *Office of Management and Budget* (OMB), tendo os valores usados atualmente sido estabelecidos em 2003.¹⁰ A metodologia adotada no caso dos EUA assenta no conceito de custos de oportunidade e numa ótica positiva (por oposição a uma ótica normativa, a referir mais adiante), usando estimativas empíricas dos parâmetros relevantes. O OMB recomenda o uso de duas taxas, 3% e 7%, que deverão ser constantes ao longo do horizonte temporal da análise. A primeira taxa corresponde à média histórica, estimada em 2003, do valor real da taxa de rendibilidade de títulos da dívida pública a 10 anos. Este valor é interpretado como sendo uma estimativa da taxa de desconto intertemporal pura, ou seja, das preferências da sociedade. Na medida em que políticas públicas tenham um impacto na trajetória futura de consumo dos agregados familiares,¹¹ a taxa de 3% foi vista como sendo uma estimativa do custo de oportunidade destas alterações no consumo. Por outro lado, a taxa de 7% era, à época, a média histórica da taxa de rendibilidade bruta de investimentos privados e, nessa medida, o valor estimado para o custo de oportunidade do capital. Uma vez que as políticas públicas alteram os valores do investimento privado, a taxa de 7% corresponde ao custo de oportunidade relevante. A diferença entre os dois valores justifica-se, entre outras razões, pela existência de impostos e de prémios de risco. A lógica adotada pelo OMB é que a taxa de atualização de referência para a análise de uma política pública específica deveria ser uma média ponderada das duas taxas referidas, sendo as ponderações determinadas pela proporção do financiamento da política pública provenientes de reduções no consumo e a proporção proveniente de reduções no investimento privado.

10. OMB Circular A-4, de 17 de setembro de 2003.

11. Por exemplo pelo uso de políticas estimulando a poupança e o seu uso para financiamento de projetos públicos, ou de políticas reduzindo o consumo através de aumentos da tributação e redução do rendimento disponível.

Uma perspectiva crítica das regras seguidas nos EUA implica necessariamente dois temas distintos. Um primeiro prende-se com a validade das taxas estimadas em 2003, num mundo atual em que as taxas reais de rendibilidade de títulos da dívida pública são muito inferiores, sendo mesmo negativas em vários países, e com poucas perspectivas de tal situação se alterar significativamente a curto e médio prazo (Council of Economic Advisors 2017). O outro tema é de natureza metodológica e ética. A avaliação das consequências das alterações climáticas e das políticas que as enfrentam requer horizontes muito longos e a consideração de custos e benefícios para gerações futuras. Uma abordagem positiva como a adotada pelo OMB pode ser adequada para horizontes típicos nos mercados de capital privados, por exemplo dez anos, mas falha em horizontes substancialmente mais longos, dado que as gerações futuras não participam nos mercados de capital contemporâneos, ou seja, tendo em conta que os mercados de capital são necessariamente incompletos.

eticamente, as políticas públicas com horizontes longos deverão adotar uma metodologia onde os interesses das gerações futuras sejam tidos em conta. A implicação direta é que é mais adequado ter uma metodologia definida por critérios normativos do que uma metodologia positiva baseada nas estimativas empíricas de custos de oportunidade em mercados incompletos. A metodologia preferencialmente adotada nestes casos segue as ideias de Ramsey (1928) e baseia-se em estimativas das taxas marginais de substituição entre consumos em períodos diferentes, num modelo agregado com crescimento económico. A equação básica nesta análise é

$$\rho = r + \gamma\mu, \quad (2)$$

onde μ é a taxa de crescimento do consumo *per capita*, γ é a elasticidade da utilidade marginal do consumo, r é a taxa de preferência intertemporal pura (aquela que deve ser usada para atualizar a utilidade do consumo e não o consumo diretamente) e ρ a taxa de desconto social. O produto $\gamma\mu$ é geralmente designado como o efeito riqueza.

Esta abordagem metodológica é a consagrada oficialmente no caso do Reino Unido, onde a taxa de atualização de referência oficial é definida pelo Livro Verde do Tesouro britânico (H.M. Treasury 2020). De acordo com o Livro Verde (pp. 46) a taxa de atualização que representa as preferências sociais intertemporais tem duas componentes. Primeiro, uma taxa que reflete as preferências intertemporais puras r , ou seja, a impaciência dos agentes económicos.¹² Esta componente definiria a taxa de atualização social numa sociedade sem crescimento económico e é-lhe atribuído o valor de 1,5%.

No entanto, há uma expectativa de que o consumo *per capita* cresça no futuro, o que por comparação torna a utilidade marginal do consumo presente mais elevada. O crescimento adiciona uma componente de efeito riqueza à taxa de atualização. Esta é a componente $\gamma\mu$ na equação de Ramsey, onde se atribui o valor de 1 à

12. O valor inclui igualmente um prémio de risco catastrófico. O Livro Verde considera cenários adicionais (por exemplo para a saúde) com valores específicos.

elasticidade da utilidade marginal γ e o valor de 2% a μ , a taxa de crescimento do consumo *per capita*.

Agregando as duas componentes, ou seja, as preferências intertemporais puras e o efeito riqueza, a taxa de atualização real de referência escolhida no Reino Unido é de 3,5%. De notar que, na perspetiva oficial do Reino Unido, a taxa de atualização social é vista explicitamente como sendo independente do custo de financiamento das entidades públicas, quer por via de impostos, quer por via da utilização de dívida pública.

O Livro Verde contém ainda regras que se aplicam ao caso de atualização a prazos muito longos. As contribuições de Weitzman (1998) mostraram que no caso de haver incerteza sobre qual a taxa de desconto apropriada, a muito longo prazo as taxas devem reduzir-se gradualmente para o mais baixo de todos os valores plausíveis. O Livro Verde adota este resultado, preconizando a já referida taxa de 3,5% até horizontes de 30 anos, uma taxa de 3% a aplicar incrementalmente para horizontes entre 31 e 75 anos e de 2,5% para horizontes entre os 76 e os 125 anos.

Em França, a referência oficial para a taxa de desconto social é estabelecida por um organismo designado por *France Strategie*, seguindo os valores propostos no Relatório Quinet (2013). Uma consideração adicional relevante na literatura e já considerada nesse relatório é a extensão à incerteza na trajetória do consumo futuro, que Gollier (2002) aplicou à abordagem de Ramsey, ao ter em consideração como a incerteza na evolução futura do consumo afeta a taxa de desconto. A equação modificada de Gollier é

$$\rho = r + \gamma\mu - \frac{1}{2}\gamma^2\sigma^2, \quad (3)$$

onde, para além das variáveis já definidas na equação (2), σ é o desvio-padrão da taxa de crescimento do consumo *per capita*. A equação (3), ajustada pela incerteza no crescimento futuro do consumo, adiciona um termo negativo e, por conseguinte, tende a reduzir a estimativa original da taxa de desconto social, se bem que por montantes pequenos. A alteração é habitualmente interpretada como sendo motivada por precaução: sendo o crescimento do consumo futuro mais incerto, há uma compensação que penaliza menos o futuro e induz maior redução do consumo hoje, em troca de mais consumo amanhã.

A filosofia seguida em França é assim semelhante à do Reino Unido, ou seja, baseia-se na equação de Ramsey (com o ajustamento para o risco) embora o valor escolhido atualmente seja de 2,5%, o que em parte se deve à acentuada redução, nos anos recentes, das taxas de rentabilidade reais dos mercados financeiros e às indicações que esse fenómeno indiretamente dá sobre os valores das taxas puras de preferência intertemporal. Tal como no caso britânico, para horizontes temporais longos, acima dos 30 anos, as taxas de desconto em França são decrescentes, reduzindo-se progressivamente até 1,5%. As taxas de atualização referidas poderão

ser acrescidas de um prémio de risco de 2%. Este prémio de risco decai no tempo até 1,5%.¹³

3.3.2. Calibração. O passo seguinte da análise consiste em calibrar a equação (3) por forma a obter uma estimativa da taxa de desconto a utilizar. Não é óbvio se a perspetiva relevante deve ser definida de forma mais estreita, tendo em conta especificamente a situação portuguesa, ou de forma mais alargada, adotando a perspetiva da área do euro. Tendo em conta que ambas as perspetivas podem ser válidas, em circunstâncias alternativas, os resultados a apresentar incluem ambos os casos.

A equação (3) necessita de quatro inputs para determinar a taxa de desconto. Dois deles têm uma natureza de previsão: a taxa de crescimento média do consumo e o seu desvio-padrão. A taxa de atualização intertemporal pura pode ser estimada pela taxa de rentabilidade de ativos sem risco, líquida de impostos, embora os dados sejam “ruidosos” e afetados por intervenções de política monetária e económica que geram desvios, mesmo que transitórios. Por fim, a elasticidade da utilidade marginal do consumo pode ser calibrada por referência a escolhas feitas por outros países.

O problema conceptual que nos preocupa nesta fase é escolher qual a medida de consumo mais apropriada. Uma primeira escolha será naturalmente o consumo privado. Contudo, ao longo dos anos, o peso relativo do setor público cresceu pelo que também aumentou o peso do consumo público no PIB. Parte desse crescimento pode não ser diretamente relevante para a determinação da taxa de desconto, mas há tipos de consumo – como sejam a educação, cuidados de saúde, transportes e eventualmente outras áreas – em que ocorreu um crescimento do consumo público ao longo dos anos e que pode ser considerado como substituindo o consumo privado. Por estas razões, poder-se-ia contemplar o caso do consumo total, onde o privado e o público são somados. No entanto, as diferenças encontradas face a considerar apenas o consumo privado não são qualitativamente relevantes e por isso optou-se por usar apenas este último.

A partir dos dados da evolução histórica do consumo privado *per capita* em Portugal e na área do euro calculam-se as séries anuais das taxas de crescimento (operacionalizadas como as diferenças dos logaritmos) e as respetivas médias e desvios-padrão. O resultado pode ser visto nas Figuras 10 e 11. As taxas de crescimento do consumo exibem uma tendência decrescente ao longo do período em análise. Essa tendência é relevante na medida em que o objetivo pretendido é estimar a evolução futura da média e da volatilidade das taxas de crescimento do consumo. A comparação entre as Figuras 10 e 11 sugere que a volatilidade das taxas de crescimento do consumo é maior em Portugal.

13. O relatório Quinet (2013) aborda ajustamentos ao risco adicionais inspirados nos modelos financeiros *Capital Asset Pricing Model*, tendo em conta as características dos setores onde se fará o investimento público.

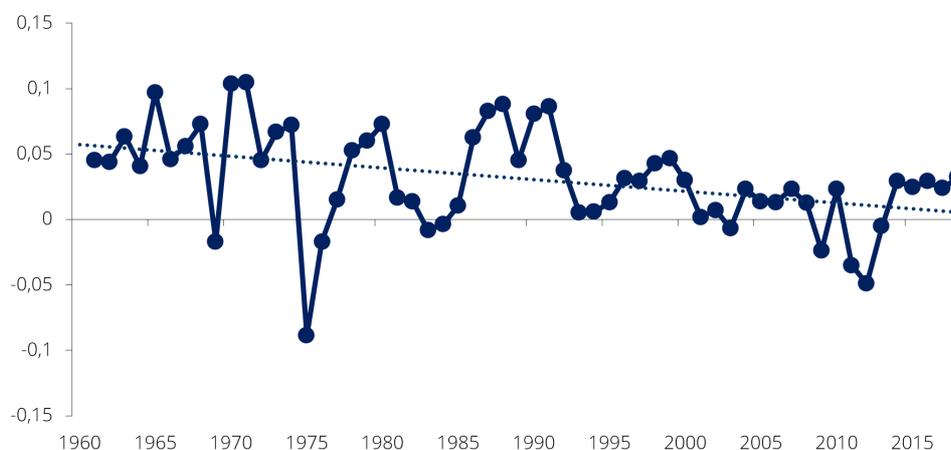


Figura 10: Taxa de crescimento do consumo *per capita* em Portugal. Valores em unidades naturais.

Fontes: PORDATA e cálculos dos autores.

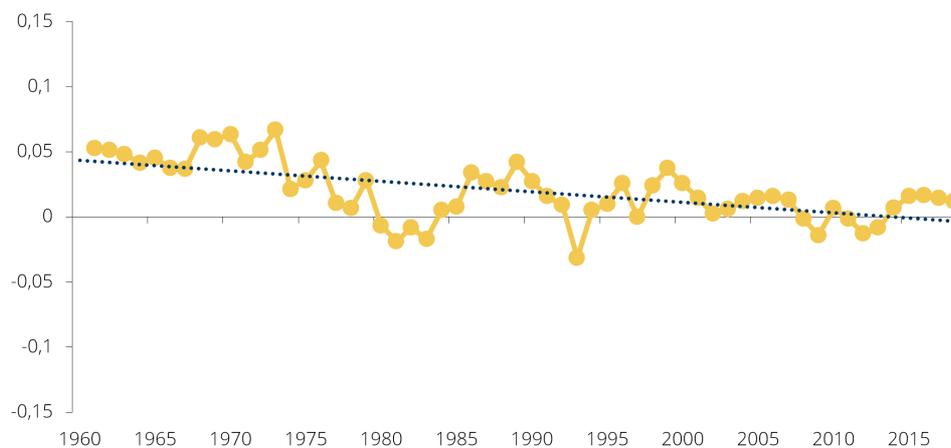


Figura 11: Taxa de crescimento do consumo *per capita* na área do euro. Valores em unidades naturais.

Fontes: PORDATA e cálculos dos autores.

A Tabela 4 reporta as médias e desvios-padrão das taxas de crescimento do consumo para o período total, para os períodos 1980-2018 e 2000-2018. Os resultados confirmam a tendência decrescente das taxas de crescimento do consumo e mostram que médias e desvios-padrão destas taxas diferem entre o caso português e o da área do euro. Tendo em conta que o intervalo de tempo 2000-2018 é afetado

		Área do euro	Portugal
1960-2018	Média	0,019	0,03
	Desvio-padrão	0,022	0,037
1980-2018	Média	0,009	0,023
	Desvio-padrão	0,016	0,031
2000-2018	Média	0,007	0,008
	Desvio-padrão	0,011	0,024

Tabela 4. Estatísticas-resumo da taxa de crescimento na área do euro e em Portugal durante o período 1960-2018 e subperíodos selecionados.

Fontes: PORDATA e cálculos dos autores.

pela grande recessão e pela crise dos soberanos, será prudente assumir que o futuro trará alguma melhoria no que às taxas de crescimento do consumo diz respeito. Um ponto de referência razoável para a evolução futura poderá ser um valor médio para a taxa de crescimento do consumo em Portugal de 1,6% e um desvio-padrão de 2,7%. Para a área do euro um valor médio para a taxa de crescimento do consumo poderá ser de 0,8% com um desvio-padrão de 1,3%.

O passo seguinte consiste em estimar a taxa de preferência intertemporal pura. Não há uma forma óbvia de estimar este parâmetro, ou mais precisamente como é que este parâmetro eventualmente evolui ao longo do tempo. No caso das escolhas das taxas de atualização feitas nos EUA, no Reino Unido e em França, a estimativa da taxa de preferência intertemporal pura baseia-se na taxa real de juro sem risco e após impostos,

$$r = \frac{i(1-t) - \pi}{1 + \pi}$$

onde r é a taxa de preferência intertemporal pura, π é a taxa de inflação, i é a taxa nominal bruta de ativos sem risco e t é a taxa marginal de imposto paga pelos agregados familiares sobre os juros recebidos. A variável empírica habitualmente utilizada como aproximação da taxa de rendibilidade nominal sem risco é a taxa de rendibilidade da dívida pública a prazos entre os cinco e os dez anos. A esta informação é necessário adicionar uma taxa marginal média de tributação dos rendimentos de juros. As estimativas que se apresentam de seguida, para os casos de Portugal e da Alemanha, usam ambas a taxa marginal de 28% vigente em Portugal para rendimentos do capital, que no caso alemão é apenas uma aproximação.

A Figura 12 apresenta a evolução da média anual das taxas reais líquidas de imposto para a dívida pública em Portugal e na Alemanha.

A utilização desta informação requer alguns juízos prévios. Em primeiro lugar, apesar de ocorrerem taxas de rentabilidade reais líquidas negativas, será assumido que essa situação não é uma boa estimativa a longo prazo. Serão calculadas médias para as quais os valores negativos contribuíram, mas não se projeta uma evolução com uma continuação sustentada de taxas negativas. Em segundo lugar, nos anos

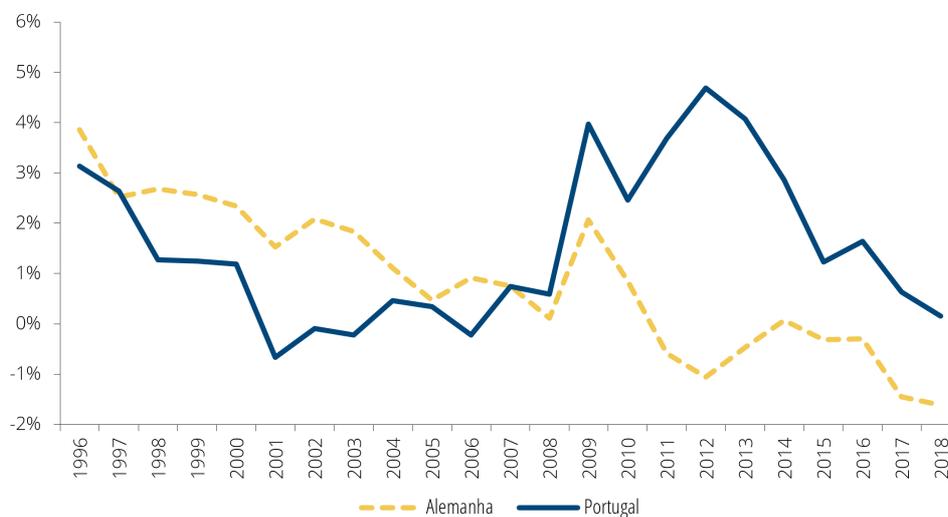


Figura 12: Taxas de juro reais líquidas de imposto em Portugal e na Alemanha.

Fontes: Ameco (*Nominal long-term interest rates*, ILN, e taxa de crescimento do Índice Harmonizado de Preços no Consumidor, ZCPIH).

Nota: Assume-se taxa marginal de tributação dos juros de 28%.

de 2009 a 2014 as taxas de juro da dívida portuguesa foram muito elevadas face a anos anteriores e posteriores devido a uma situação aguda de risco-país. Não é razoável usar os valores das taxas de juro da dívida portuguesa nesses anos para estimar uma taxa de juro de ativos sem risco. Em vez disso opta-se por eliminar esses anos no cálculo da taxa de rentabilidade de referência. Poderia continuar a pôr-se a possibilidade de a taxa de juro sem risco relevante para a sociedade portuguesa ser a da dívida alemã ou a da dívida portuguesa (neste caso respeitante a anos menos excecionais). Acontece que a questão é empiricamente menos relevante do que se poderia pensar. Retirando os anos entre 2009 e 2014 da amostra portuguesa, e calculando as taxas de rentabilidade reais médias líquidas para a dívida pública de Portugal e da Alemanha desde o ano 2000, o valor é igual para os dois países: 0,44%. Arredondando e em conclusão, poderá ser razoável utilizar 0,5% como estimativa empírica da taxa de rentabilidade real líquida de impostos para ativos sem risco. Esta taxa é apropriada para avaliar políticas públicas numa perspetiva portuguesa, sendo sensato considerar outros valores, como sejam 0 ou 1%.

O parâmetro final cuja estimativa é necessária para utilizar a equação (3) é γ , a elasticidade da utilidade marginal do consumo. Assumindo funções utilidade isoelásticas, é possível obter estimativas empíricas de γ por via de estudos das elasticidades de substituição intertemporal, dos comportamentos perante o risco (como por exemplo a gestão da composição do património entre ativos com

diferentes perfis de risco), ou então estudos da progressividade do sistema fiscal. Não se conhecendo estudos representativos estimando γ para as preferências dos portugueses, a alternativa é importar estimativas de outros países que possam servir de referência. O já referido Livro Verde britânico explicita o valor $\gamma = 1$. No caso francês, o relatório Quinet (2013) não explicita o valor de γ , mas o anterior relatório Lebègue (2005) tinha utilizado $\gamma = 2$. O *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects Economic Appraisal Tool for Cohesion Policy* de 2008, da Comissão Europeia, no Quadro B2 do anexo B (citado por Economides *et al.* 2018), reporta valores de γ para 11 países europeus, entre 1,12 e 1,79 com uma média e mediana de 1,44. Depreende-se destes dados que um valor de 1,5 pode ser uma referência adequada quer para o caso português quer para o caso da área do euro.

3.3.3. Resultados. Assumindo uma taxa de crescimento média para o consumo per capita de 1,6%, um desvio-padrão para esta taxa de 2,7%, uma elasticidade da utilidade marginal do rendimento de 1,5 e uma taxa de preferência intertemporal pura de 0,5%, obtemos, por via da equação (2), a estimativa central de 2,8% para a taxa de atualização real a usar na análise numa perspetiva portuguesa. Por outro lado, usando uma taxa média de crescimento do consumo *per capita* de 1% com um desvio-padrão de 1,3%, sendo os outros parâmetros os mesmos do caso português, obtém-se uma taxa de atualização numa perspetiva da área do euro de 1,7%.

A Tabela 5 mostra o resultado de uma análise paramétrica de sensibilidade, com os diferentes valores obtidos para a taxa de atualização, partindo de valores diferenciados para os vários parâmetros relevantes. Os valores na tabela variam aproximadamente entre 0,66% e 4%, um intervalo demasiado amplo para permitir certezas. A parte quantitativa da Secção 4 usa o limite superior deste intervalo.

3.4. Política económica e alterações climáticas

Na medida em que as emissões decorrentes do uso de combustíveis fósseis exerçam externalidades negativas sobre os agentes económicos, é possível conceber políticas destinadas a mitigar os seus efeitos e a induzir maiores níveis de bem-estar. Esta secção aborda esse problema sob duas perspetivas: as políticas económicas gerais apropriadas para o problema, e as especificidades relativas ao sistema financeiro e aos bancos centrais.

3.4.1. Impostos sobre carbono e licenças de emissão transacionáveis. A intervenção mais referida para lidar com as alterações climáticas é a de impor um preço sobre as emissões de carbono e de outros GEE. A ideia na base dessa intervenção é que quanto mais alto for o valor a pagar pela emissão de GEE, menor será a quantidade de emissões a ocorrer. Ao terem de pagar pela emissão de carbono, os agentes económicos são incentivados a reduzir as emissões, quer reduzindo as atividades geradoras de GEE quer inovando para reduzir a dependência da atividade económica de fontes de energia como os combustíveis fósseis. Para

$\gamma = 1,5$		σ				
r	μ	0,01	0,013	0,02	0,027	0,028
0	0,005	0,0074	0,0073	0,0071	0,0067	0,0066
0	0,01	0,0149	0,0148	0,0146	0,0142	0,0141
0	0,015	0,0224	0,0223	0,0221	0,0217	0,0216
0	0,02	0,0299	0,0298	0,0296	0,0292	0,0291
0,005	0,005	0,0124	0,0123	0,0121	0,0117	0,0116
0,005	0,01	0,0199	0,0198	0,0196	0,0192	0,0191
0,005	0,015	0,0274	0,0273	0,0271	0,0267	0,0266
0,005	0,02	0,0349	0,0348	0,0346	0,0342	0,0341
0,01	0,005	0,0174	0,0173	0,0171	0,0167	0,0166
0,01	0,01	0,0249	0,0248	0,0246	0,0242	0,0241
0,01	0,015	0,0324	0,0323	0,0321	0,0317	0,0316
0,01	0,02	0,0399	0,0398	0,0396	0,0392	0,0391

Tabela 5. Valores alternativos para a taxa de desconto em função dos parâmetros de calibração. μ é a taxa de crescimento do consumo, γ é a elasticidade da utilidade marginal do consumo, r é a taxa de desconto intertemporal da utilidade e σ é a volatilidade da taxa de crescimento do consumo.

Fonte: Cálculos dos autores.

Nota: A taxa de atualização é dada por (3).

uma dada redução agregada das emissões de GEE, os custos totais suportados pela sociedade são menores se forem usados mecanismos com preço do carbono ao invés de intervenções de regulação direta de atividades económicas, geralmente designadas por *command and control*, já que a mesma redução de emissões pode ser conseguida com menores custos por não serem criadas outras distorções.

Há pelo menos dois mecanismos alternativos para impor um preço ao carbono. O primeiro mecanismo consiste na introdução de impostos corretores, os chamados impostos de Pigou: bens e serviços são objeto de impostos (adicionais) cujo valor depende da quantidade de carbono emitido na produção e distribuição. Um exemplo em Portugal é o do custo de um litro de combustível incluir um imposto correspondente à emissão de carbono associada. O exemplo de quantificação da Secção 4 assenta largamente numa política deste tipo.

O segundo mecanismo é o reverso da medalha do caso anterior: em vez de se fixar um preço, fixa-se uma quantidade agregada de emissões de carbono, a que corresponde uma dada quantidade de licenças transacionáveis, abordagem esta proposta por vários autores, inspirados na análise das externalidades e da especificação de direitos de propriedade de Ronald Coase. A compra de uma destas licenças concede o direito a emitir uma unidade de carbono. O mecanismo mais relevante deste tipo é o sistema de licenças de emissões europeu (ETS europeu, da designação *Emissions Trading System*), onde a unidade base é a tonelada métrica de CO₂. Este tipo de sistema é conhecido por *cap and trade*: as autoridades definem

um número total de licenças (*cap*), as quais podem ser compradas e vendidas pelos agentes económicos (*trade*).

Num cenário sem incerteza, os dois mecanismos são equivalentes. Para uma dada trajetória ao longo do tempo do imposto por unidade de CO₂, os agentes económicos procuram certas quantidades de emissões. Para uma dada trajetória nas quantidades de licenças de emissão disponíveis, a procura de licenças determina a trajetória dos preços dessas licenças. É possível encontrar qual o preço do carbono num mecanismo de imposto que resulta na quantidade agregada de emissões pretendida e é possível encontrar a quantidade de licenças a emitir que resultam num equilíbrio com o preço por unidade de CO₂ pretendido.

Uma outra consequência relevante destes mecanismos é a receita gerada para o Estado. Também aqui há uma equivalência, já que a receita dos impostos de Pigou pode ser obtida com as receitas da venda de licenças de emissão em leilões. Mesmo no caso mais complexo, em que partes das licenças são atribuídas gratuitamente aos agentes económicos com base na experiência,¹⁴ é possível definir esquemas de tributação com isenção de quantidades inframarginais de emissão, e que têm um impacto semelhante na receita do Estado .

Nos cenários com incerteza revelam-se algumas diferenças entre os dois mecanismos. Se a procura de emissões flutuar, por exemplo devido a flutuações da atividade económica, a existência de um preço fixo do carbono gerará volatilidade na quantidade de emissões efetuada. Por outro lado, num cenário com *cap and trade*, a quantidade de emissões é fixa por desenho, mas a flutuação da procura reflete-se na volatilidade dos preços das licenças de emissão.

Qual o sistema economicamente mais eficiente? A resposta depende da sensibilidade dos custos ambientais e dos custos da redução de emissões, em relação à quantidade de emissões. Adaptando a análise clássica sobre a questão impostos versus licenças, ver Weitzman (1974), é possível concluir que se os custos ambientais são mais sensíveis à quantidade de emissões que os custos da redução das emissões, é preferível reduzir a incerteza na quantidade de emissões, o que aponta para um mecanismo de *cap and trade*. Por outro lado, se a sensibilidade dos custos de redução das emissões for maior, é preferível reduzir a incerteza nesse custo, o que aponta para a superioridade de um mecanismo de imposto sobre o carbono (Adar e Griffin 1976). Na medida em que os custos ambientais

14. Atribuir licenças com base na experiência histórica é designado como *grandfathering*, e ocorre geralmente nos períodos iniciais de funcionamento de mecanismos de *cap and trade* para facilitar a sua viabilidade política ao reduzir a oposição das empresas abrangidas pelo esquema. Na medida em que as empresas mais eficientes ou inovadoras consigam reduzir as suas emissões, elas poderão vender as licenças excedentes. As empresas que precisem de emitir mais têm de comprar licenças. Estas transações explicam porque é que a distribuição inicial de licenças não compromete a eficiência do mecanismo, embora tal distribuição pudesse levantar aparentes questões de equidade, quer do ponto de vista redistributivo, quer do ponto de vista da comparação entre empresas incumbentes e novas empresas sem historial de emissões. Ainda que o *grandfathering* seja usado inicialmente, à medida que os sistemas de *cap and trade* amadurecem e se institucionalizam será cada vez maior a percentagem das licenças vendidas em leilões.

dependem do stock de GEE e não sendo este muito afetado pelas emissões num ano em particular, há quem defenda que a sensibilidade dos custos ambientais à quantidade de emissões é menor do que a sensibilidade dos custos da redução das emissões, o que significaria uma superioridade da utilização de impostos de Pigou. Contudo, esta superioridade emerge apenas numa lógica de curto prazo, não sendo necessariamente válida a longo prazo. Por outro lado, Stavins (1996) estudou a correlação entre as flutuações dos custos de redução de emissões e os custos ambientais, chegando à conclusão de que esta correlação implica uma superioridade do mecanismo de *cap and trade*.

Outras questões relevantes prendem-se com os custos de transação e os custos administrativos dos dois mecanismos em análise. Em ambos os casos, a disponibilidade de boa informação e a capacidade para monitorar as emissões dos agentes económicos e punir desvios são necessárias para o funcionamento correto desses mecanismos. É consensual que um mecanismo de impostos tem menos custos administrativos e menos complexidade que um mecanismo de *cap and trade*. Isso é verdade quando se tem em conta os custos de arranque e de gestão da distribuição das licenças num mercado ativo e a sua monitorização. Por outro lado, muitos países já têm estruturas que administram a tributação de combustíveis. Além disso, é possível que comportamentos não concorrenciais e de manipulação do mercado possam enfraquecer a capacidade do *cap and trade* na obtenção do controlo eficiente das emissões de GEE globais. Por outro lado, o *cap and trade* ajusta-se mais rápida e flexivelmente a alterações nos custos de redução das emissões, algo que poderia requerer alterações nos impostos de mais difícil e lenta concretização. A possibilidade de poupança das licenças adquiridas para uma utilização em períodos posteriores (o chamado *banking*) ou a criação de sistemas de reserva para estabilização de preços (caso do ETS europeu) permitem mitigar os problemas de volatilidade de preços a que os mecanismos de *cap and trade* estão sujeitos. Adicionalmente, há a possibilidade de impor limites mínimos ou máximos aos preços das licenças. Na prática, a maior parte dos ETS existentes atualmente adotaram os PSAM (de *Price or Supply Adjustment Mechanisms*) para reduzir a ocorrência de picos (positivos ou negativos) nos preços das licenças. Uma outra desvantagem do *cap and trade* é que este mecanismo apresenta mais incompatibilidades que a tributação do carbono quando se consideram as interações com intervenções complementares, como é o caso da implementação de standards nos combustíveis, ou o favorecimento de investimentos “verdes” nos mercados financeiros; ver também Secção 3.4.2.

A tendência que alguns grupos de interesse ou setores de atividade económica têm para conseguir tratamentos fiscais especiais mostra que existe a possibilidade de os impostos sobre o carbono, na prática, resolverem imperfeitamente os problemas para que foram criados. Tal situação é exemplificada pela utilização de combustíveis geradores de GEE que não só não paga pelas emissões, como é mesmo subsidiada.

Quer a aplicação de impostos quer o requisito de licenças podem incidir em entidades no topo da cadeia energética, sendo possível reduzir o âmbito

de aplicação de milhões de emissores a jusante, para números substancialmente menores a montante. Possivelmente, esta incidência a montante será mais fácil numas áreas do que noutras, sendo que o *cap and trade* poderá funcionar bem na redução de emissões de grandes empresas (por exemplo, produtoras de eletricidade) ao passo que os impostos poderão funcionar melhor nas áreas dos transportes ou na climatização das habitações. Outra área em que os impostos se apresentam como instrumentos necessários é nos ajustamentos na fronteira, resultando na tributação de importações provenientes de produtores que não suportam custos razoáveis com as emissões de carbono. Uma alternativa aos ajustamentos na fronteira seria uma tributação mais a jusante nos circuitos económicos, por exemplo na utilização e consumo dos produtos importados pelos consumidores finais.

Há duas conclusões que têm sido retiradas deste conjunto de considerações. Uma é que os detalhes de implementação do imposto sobre o carbono ou do *cap and trade* são potencialmente mais importantes do que as diferenças conceptuais entre os dois mecanismos. A segunda conclusão é que a melhor forma de impor preços sobre o carbono requer um sistema com a utilização simultânea de *cap and trade* e de impostos sobre o carbono. Este sistema híbrido corresponde à situação no terreno, particularmente na Europa.¹⁵ O ETS europeu cobre apenas uma parte das atividades económicas, em particular em setores como a geração de energia, fundições, celuloses, cimentos e, mais recentemente, a aviação. Em geral, apenas as empresas de grande dimensão fazem parte do ETS. Em simultâneo, em muitos países Europeus há impostos de carbono que incidem sobre atividades económicas não cobertas pelos ETS, nomeadamente os transportes terrestres.

Apesar da existência de ETS e das aplicações de impostos sobre o carbono em várias regiões do mundo, a percentagem global de emissões de CO₂ que paga um preço é ainda reduzida. Os preços praticados são muito heterogéneos quando se comparam os vários países e regiões. Os preços efetivos, ponderados pelas taxas de cobertura, são baixos: William Nordhaus¹⁶ estimou em \$1,7 o preço efetivo de uma tonelada de CO₂, um valor que contrasta com preços no intervalo \$40–\$80 que várias análises dizem ser o necessário para obter os resultados desejados a longo prazo na concentração de GEE na atmosfera e na limitação dos aumentos na temperatura a 2°C.

De acordo com as estimativas atuais, apenas 21,5% das emissões mundiais estão cobertas por ETS ou por impostos sobre carbono. A mesma fonte refere que apenas 3,76% das emissões mundiais pagam um preço pela emissão de carbono acima de \$40 por tonelada de CO₂.

15. No ETS europeu participam os 27 países da UE, além da Noruega, Liechtenstein e Islândia. A Suíça estabeleceu uma ligação integrando o seu ETS no ETS europeu. Por sua vez, o Reino Unido criou o seu próprio ETS para substituir a anterior participação no ETS europeu. Um desenvolvimento positivo recente é que em julho de 2021 se iniciou o funcionamento pleno do ETS na China, o país com maiores emissões de CO₂ no mundo, sendo estimado que este mercado cubra cerca de 40% das emissões do país.

16. Ver <https://bcf.princeton.edu/events/williamnordhaus/>.

Existe uma grande heterogeneidade entre países. Segundo o Banco Mundial, Portugal terá, em 2021, cerca de 29% das suas emissões de CO₂ cobertas por impostos sobre carbono, um valor mais baixo do que o dos países escandinavos (Noruega 66%, Suécia 40%) mas mais elevado que o de outros países da EU (Polónia 4%, Espanha 3%). Por sua vez, o ETS europeu cobre cerca de 39% das emissões na União Europeia.

Na presente situação, o principal objetivo das políticas públicas deveria ser o de expandir o âmbito das medidas que resultam num preço das emissões de carbono, por forma a cobrir uma maior proporção das emissões. O preço efetivo deveria ser mais elevado do que atualmente e mais homogéneo geograficamente. Esse preço deve estar adequado aos danos ambientais gerados e em linha com os objetivos globais estabelecidos para a redução de emissões de GEE. Outras opções de política, como é o caso das políticas de regulação e supervisão dos mercados financeiros deverão ser complementares destes objetivos, quer fortalecendo a sua implementação, quer dirigindo-se à correção de outras falhas de mercado.

3.4.2. Implicações para o sistema financeiro. Complementando medidas de carácter fiscal, tem sido relevado o papel do sistema financeiro na diminuição das emissões de GEE, dado o seu papel fundamental na afetação de recursos na economia. Ainda que se reconheça uma maior eficácia das medidas fiscais, deve sublinhar-se que medidas relacionadas com o sistema financeiro podem, em princípio, resultar numa melhor combinação global de políticas. De facto, subsiste incerteza sobre os pressupostos que determinam o desenho específico das medidas fiscais e sobre o nível de tributação desejável. Há ainda considerações relevantes de economia política, relativas à incidência nominal dos impostos e aos efeitos redistributivos dos mesmos, que podem justificar um maior papel atribuído a outras políticas. Para uma análise aprofundada da questão, ver Adão e Lourenço (2021).

Sob o ponto de vista económico, o primeiro passo na análise de medidas dirigidas ao sistema financeiro deve passar por identificar as falhas de mercado às quais estas podem responder. Neste contexto, as falhas de mercado comumente apontadas resultam de: i) insuficiências no reporte de informação sobre os efeitos ambientais de determinadas indústrias ou empresas e sobre a sua suscetibilidade às alterações climáticas, que podem gerar um escasso reconhecimento do risco que lhes está associado, e conseqüente excessivo investimento; e ii) externalidades de determinadas atividades, que serão negativas se gerarem emissões de GEE demasiado elevadas face ao que seria socialmente desejável (ver Secção 3.4.1), e positivas no caso de investimento demasiado baixo em desenvolvimento e adoção de tecnologias de energias renováveis, caracterizadas por ganhos na produção em massa ou economias de rede.

A primeira falha pode ser colmatada com divulgação adicional de informação; as segundas podem ser resolvidas com medidas fiscais ou equivalentes. A inexistência de informação ambiental granular, prospetiva e verificável persiste, sobretudo em empresas de pequena dimensão. Acresce que, apesar de algumas empresas estabelecerem os seus próprios objetivos de redução de emissões, essa informação

não é sempre divulgada publicamente, o que torna difícil a aferição do seu papel no combate às alterações climáticas. Assim, medidas enquadráveis na regulação e supervisão do sistema financeiro, tendentes a garantir informação credível e comparável, a divulgação padronizada de dados ambientais pelas empresas e a correspondência com uma taxonomia globalmente aceite concorreriam para uma melhor avaliação dos riscos climáticos e do impacto ambiental das empresas por parte dos consumidores e dos investidores. No entanto, é necessário garantir que a qualidade do reporte exigido seja verificável e que os respetivos custos não sejam demasiado elevados. Esta orientação pode ser complementada com o papel dos bancos centrais enquanto autoridades monetárias – i.e., mesmo quando não sejam supervisores – uma vez que o desenho da política monetária (por exemplo, programas de compras de obrigações de empresas) pode ser condicionado a requisitos de reporte por parte de bancos e de empresas que se financiem no mercado de capitais.

As questões de reporte são relevantes para a aferição e controle de risco, dimensão que tem assumido um papel relevante no desenho de políticas dirigidas ao sistema financeiro. Neste âmbito, e no caso do sistema bancário, têm também surgido propostas no sentido de conferir um tratamento regulatório mais favorável, em termos de requisitos de capital e outros, a crédito “verde”, ou crédito a empresas ou projetos que assim sejam classificados. Note-se, no entanto, que o objetivo dos requisitos de capital é garantir que os bancos têm capacidade de absorver perdas. À partida, não há razões para crer que os projetos verdes têm menos risco do que outros projetos. De facto, este tipo de políticas parece ter como objetivo sintetizar um subsídio a atividades verdes. Em qualquer caso, levantam questões relevantes de implementação e eficácia.

Primeiro, há uma enorme dificuldade em caracterizar projetos ou empresas de acordo com o seu caráter verde.

Segundo, a existência de um regime mais favorável cria incentivos à designada arbitragem regulatória, que, neste caso, irá no sentido de designar quaisquer projetos ou empresas como verdes. Para tal não suceder seria necessária uma camada adicional de escrutínio à supervisão do sistema financeiro, que pode resultar num significativo dispêndio de recursos. Do ponto de vista dos bancos também haveria dispêndio de recursos na exploração da diferença de tratamento regulatório entre os tipos de crédito. Em geral, este custo seria tanto maior quanto mais favorável fosse o tratamento regulatório dos projetos verdes.

Terceiro, é difícil garantir que um determinado financiamento se destina a um fim específico dentro de uma empresa ou grupo empresarial. Na verdade, o financiamento a uma empresa-mãe ou a uma subsidiária pode ser canalizado para empresas do grupo (ou mesmo externas) menos verdes, contrariando o objetivo das medidas.

Finalmente, ainda que fosse possível implementar um sistema rigoroso e eficaz de controlo nas dimensões acima referidas, nada impede que formas não bancárias de financiamento ou financiamento externo com origem em jurisdições mais lenientes nesta dimensão, num contexto de livre circulação de capitais, continuem

a suportar as atividades pouco verdes. Tal deveria suceder porque estas medidas são ineficazes para reduzir a diferença, que pode ser muito significativa, entre o retorno privado e o retorno social de projetos intensivos em GEE. Persistindo a diferença, os fluxos de financiamento não cessarão. Só medidas mais gerais, como as medidas fiscais vistas anteriormente, ainda que com necessidades de coordenação internacional, têm o potencial de reduzir de forma visível esta diferença.

Os bancos centrais têm também um papel na possível subsidiação de atividades verdes, através da compra de obrigações verdes ou, no contexto de operações de refinanciamento aos bancos, no tratamento (mais favorável) dos créditos verdes dados como garantia, através, por exemplo, de *haircuts* menores. Tal poderia resultar, em particular, na subsidiação à produção de energia com base em fontes renováveis. Note-se, no entanto, que o uso de subsídios à energia verde pode ter efeitos contraproducentes. Hassler *et al.* (2020) mostram que o uso de subsídios à energia verde se traduz num maior consumo de energia no total, mas tem efeitos limitados na atenuação do aumento da temperatura global.

No caso das operações de refinanciamento haverá, mais uma vez, motivações relacionadas com a subsidiação de setores ou empresas mais verdes que, no entanto, são justificadas com o risco incorrido pelos bancos centrais. Se as preocupações forem exclusivamente de risco não será necessário particionar o crédito em verde e não verde; bastará medir o risco adicional imposto pelas alterações climáticas às empresas e incorporá-lo no enquadramento dos ativos de garantia. Em qualquer caso, e mais uma vez, o efeito benéfico desse tipo de intervenção pressupõe a correta identificação desse tipo de riscos. Mas mesmo que essa identificação seja correta, é de notar que o incentivo marginal à concessão de crédito a projetos verdes é, por esta via, muito baixo. O único benefício resulta do uso de carteiras de crédito verde como ativos de garantia em operações de refinanciamento futuras. Só em situações pontuais (de crise) é que estas carteiras de crédito são tipicamente utilizadas nestas operações. E ainda que fossem utilizadas mais regularmente, as diferenças de *haircut* entre crédito verde e outro não resultariam, regra geral, em restrições relevantes aos montantes de financiamento.

No caso dos programas de compras de ativos focados em obrigações de empresas (que poderão ser eventualmente direcionados a projetos ou empresas verdes), é importante notar que esta é uma ferramenta recente com o objetivo específico de reforçar o caráter acomodatório da política monetária. Quando estes programas não existiam, a política monetária tinha a capacidade de afetar de forma transversal os diferentes segmentos dos mercados financeiros, incluindo o financiamento a empresas não verdes. A extensão do efeito das compras verdes existirá, mas poderá ser baixa. Além disso, estes programas são destinados a cumprir objetivos de inflação ou de estabilização macroeconómica, cessando quando estes objetivos são atingidos. A existência de programas permanentes de compras de ativos com determinadas características poderia entrar em conflito com os objetivos da política monetária e com os mandatos dos bancos centrais. A atribuição de responsabilidades verdes à política monetária, num contexto em que a sua eficácia é limitada, pode resultar numa ameaça à independência dos bancos

centrais. A reivindicação de um papel ativo na resposta às alterações climáticas pode traduzir-se em custos de reputação elevados, comprometendo a ação do banco central no futuro. Acresce que a independência de um banco central é concedida sob a condição de que este opera sob uma esfera limitada de competências.

O que se refere atrás não impede que os bancos centrais, enquanto organizações relevantes, cumpram critérios de sustentabilidade e responsabilidade corporativa. Nesta dimensão haverá, seguramente, muito trabalho a fazer. O Banco de Portugal, por exemplo, participa na Network for Greening the Financial System (NGFS) e no Roteiro Nacional para a Adaptação 2100, para além do seu investimento nos fundos verdes do Banco de Pagamentos Internacionais (BIS). O leitor é convidado a consultar os documentos já publicados da recente revisão da estratégia de política monetária do BCE, que enumeram as diversas iniciativas em curso e a iniciar neste âmbito.

Ficam de fora desta análise algumas políticas gerais e setoriais que procuram mitigar as alterações climáticas, bem como as que procuram adaptar os sistemas produtivos existentes às que se venham a verificar. Refira-se como exemplo os incentivos a atividades de investigação e desenvolvimento tendentes à mitigação das emissões carbónicas ou à adaptação aos seus efeitos. Os resultados deste tipo de iniciativa são incertos, mas a engenhosidade e capacidade de inovação de cientistas e empresários não devem ser subestimadas. Estão nesta categoria os esforços em tornar mais limpas as tecnologias de produção energética, o aumento da eficiência energética dos processos produtivos e dos transportes, os sistemas de acumulação de energia, as tecnologias ou processos de sequestro de carbono atmosférico, entre outros exemplos. As prescrições de política descritas anteriormente e assentes em impostos ou licenças de emissão já fornecem, de resto, incentivos para este tipo de investimento.

4. Avaliação prospetiva de políticas de mitigação: um exemplo

Nesta secção discutem-se as alterações climáticas no mundo e em Portugal utilizando um modelo que integra a economia global e o clima num único quadro analítico. A secção é construída em torno do artigo de Adão *et al.* (2021), em que se investiga a transição ótima de uma economia mundial que utiliza essencialmente combustíveis fósseis para uma economia mundial alimentada por energia renovável, usando um modelo IAM. Com base nos resultados para a economia mundial, estuda-se a economia portuguesa em termos de aumento da temperatura e custos no PIB para as diversas trajetórias de política.

Este exercício é uma primeira tentativa de avaliar os potenciais efeitos das alterações climáticas na economia global e na economia portuguesa a um prazo muito longo. Ficam de fora desta análise questões como o impacto de prazo mais curto (na ordem de alguns anos) proveniente dos gastos necessários para a transição energética, os efeitos na distribuição de riqueza e rendimento, entre outros. Futuros

trabalhos não deixarão de abordar estes e outros tópicos no contexto das alterações climáticas.

No modelo a energia pode ser produzida utilizando fontes fósseis ou renováveis. O setor de combustíveis fósseis gera uma externalidade negativa – os efeitos económicos da emissão de CO₂ – e a investigação e desenvolvimento (I&D) no setor de renováveis beneficia de sinergias, que geram uma externalidade positiva. A presença destas externalidades leva, em termos líquidos, a uma utilização excessiva de combustíveis fósseis e a um subinvestimento em energia renovável. O ótimo pode ser descentralizado por uma política que inclua um imposto pigouviano como o referido na Secção 3.4.1 sobre as emissões de carbono, em conjugação com uma taxa sobre o subinvestimento em I&D nas tecnologias renováveis, rebatida uniformemente aos detentores das empresas, as famílias.¹⁷ Um dos focos do trabalho é o grau de substituíbilidade entre os impostos sobre o carbono e as taxas sobre subinvestimento. Usando um modelo calibrado, investiga-se a importância quantitativa e a complementaridade potencial entre os dois instrumentos de política, estudando os seus efeitos isoladamente e em conjunto.

Os resultados para a economia global sugerem que o imposto pigouviano quase consegue, por si só, implementar o equilíbrio ótimo. Tal não significa que as sinergias do investimento em I&D em energias renováveis sejam quantitativamente irrelevantes ao longo da transição energética. Existem complementaridades entre os impostos sobre o carbono e a taxa sobre subinvestimento em energias renováveis, com ganhos consideráveis de bem-estar quando ambas as políticas estão presentes. Mudar do status quo – definido como a evolução que ocorrerá sem alterações substanciais na política económica relevantes para as emissões de carbono – para o imposto pigouviano ótimo por si só resultaria num ganho de bem-estar equivalente no consumo de 1,02%. Por outro lado, a comparação entre o status quo e a situação em que as duas políticas são aplicadas sugere um ganho de bem-estar equivalente no consumo de 1,43%, confirmando a importância decisiva do imposto sobre o carbono.

A transição para uma economia global que usa exclusivamente fontes de energia renovável acontecerá em 2070 se ambas as políticas forem seguidas. No caso de não haver alterações nas políticas atuais a economia global só em 2130 dependerá completamente das energias renováveis. A contrapartida disso é que o consumo cumulativo de combustíveis fósseis será muito menor se as políticas ótimas forem adotadas, num nível correspondente a menos de metade do caso em que as políticas não se alteram.

Em relação ao nível pré-industrial, a temperatura global aumentará em torno de 2°C no caso de adoção simultânea do imposto pigouviano ótimo e da taxa sobre subinvestimento no setor renovável. Esse valor será 2,2°C se apenas o imposto

17. No modelo, a taxa sobre subinvestimento em energias renováveis é neutra em relação à receita fiscal porque em equilíbrio as empresas do setor escolhem o nível de investimento em energias renováveis que as isenta de qualquer taxa. Esta política pode também ser implementada por meio de um subsídio a estas empresas financiado por impostos uniformes sobre as famílias.

pigouviano ótimo for adotado, mas aumentará para cerca de 2,8°C se nenhum dos instrumentos for implementado.

No caso português, as mudanças na temperatura serão menores em todos os cenários. Isto acontece porque se estima que por cada grau Celsius de aumento na temperatura global a temperatura média em Portugal aumentará cerca de 0,6°C. Assim, se o imposto pigouviano ótimo for adotado, o aumento na temperatura será de 1,2–1,3°C, com o menor valor a corresponder ao caso em que a política ótima para energias renováveis está em vigor. Caso contrário, o aumento será de cerca de 1,7°C. As perdas económicas também podem ser limitadas, entre 0,4% e 0,8% do PIB em 2100. No entanto, o consumo será, em média, cerca de 0,4% superior à situação do status quo, em que as duas margens de atuação do governo – o imposto de Pigou sobre o carbono e a política para adoção de novas tecnologias de energias renováveis – não se alteram no horizonte temporal do modelo.

O leitor menos interessado nos detalhes teóricos e metodológicos deste exercício pode ignorar as Secções 4.1 a 4.2. Para leitores interessados nas hipóteses quantitativas sobre o clima, as emissões de carbono e as perdas económicas decorrentes das alterações no clima, recomenda-se a leitura da Secção 4.1 até à Secção 4.1.3.

4.1. Modelo

O modelo utilizado tem quatro módulos: o clima, o ciclo do carbono, os custos e a economia. O módulo da economia é composto por consumidores e produtores. As suas ações são determinantes para as emissões de carbono, que aumentam o nível de carbono na atmosfera. O módulo dos custos estabelece como a economia é afetada pelo clima. O módulo do carbono modela a relação dinâmica entre as emissões de carbono e a concentração de carbono na atmosfera. Finalmente, o módulo do clima estabelece a relação entre a concentração de carbono na atmosfera e o clima. Em baixo apresenta-se em detalhe cada um desses módulos e especifica-se a sua interação.

4.1.1. O clima. O objetivo do módulo de clima é determinar como a quantidade de carbono na atmosfera determina o clima. Considera-se a descrição mais simples do clima – a temperatura atmosférica média global da superfície terrestre – através de uma função que a relaciona com a quantidade de carbono na atmosfera. Os mecanismos subjacentes a esta relação e os dados geofísicos apresentados na Secção 2 sugerem que a temperatura média global seja uma função crescente da quantidade de carbono na atmosfera. Considera-se uma relação simples entre as duas grandezas como a que tem sido usada com frequência na literatura sobre alterações climáticas:

$$T(S_t) = \frac{\lambda}{\ln(2)} \ln\left(\frac{S_t}{\bar{S}}\right), \quad (4)$$

onde S_t indica a quantidade de carbono na atmosfera em t , \bar{S} é a quantidade pré-industrial do nível de carbono na atmosfera e λ é um parâmetro de sensibilidade.

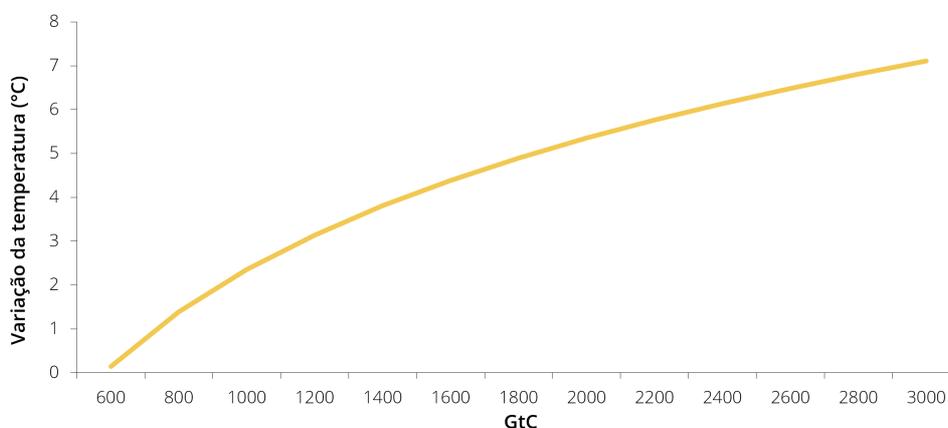


Figura 13: Alteração na temperatura média global em função do quantidade de carbono na atmosfera.

De acordo com o IPCC (2013) o valor para λ estará “provavelmente no intervalo 1,5–4,5°C”. Como Golosov *et al.* (2014) e Acemoglu *et al.* (2016), assume-se $\lambda = 3^\circ\text{C}$ e $\bar{S} = 581 \text{ GtC}$.¹⁸ A Figura 13 mostra a relação entre as concentrações de carbono e as variações na temperatura. O eixo das abcissas vai de 600 GtC, valor que corresponde aproximadamente aos níveis pré-industriais, até 3000 GtC, valor que corresponde às estimativas mais elevadas para as reservas totais de combustível fóssil disponíveis. De acordo com essa função, se, por exemplo, o stock de carbono atmosférico aumentasse para 1200 GtC, haveria um aumento de 3°C na temperatura média global em relação à temperatura pré-industrial.

A dimensão potencial dos danos ambientais decorrentes da queima de combustíveis fósseis depende trivialmente de quanto combustível fóssil resta para ser queimado. Esse valor não é conhecido com rigor e as estimativas dependem das definições usadas. A definição mais restritiva consiste nas reservas provadas, que são aquelas cujos dados geológicos e de engenharia demonstram com razoável certeza serem recuperáveis em anos futuros a partir de reservatórios conhecidos sob as condições económicas e operacionais existentes. À medida que a tecnologia e os preços se alteram, essa quantidade normalmente aumenta com o tempo.

Dadas as diferentes definições e estimativas, as quantidades estimadas diferem e mudarão com o tempo. A British Petroleum (2015) refere que as reservas provadas globais de petróleo e gás natural são de aproximadamente 200 GtC e 100 GtC, respetivamente. Dada a taxa atual de emissões de cerca de 10 GtC por ano (Friedlingstein *et al.* 2019) essas reservas durariam 30 anos. Em relação ao carvão,

18. Este valor, embora provenha de uma fonte diferente, corresponde aproximadamente a uma concentração de carbono na atmosfera de 274 ppm, próximo do valor de 285 ppm estimado para 1850 e referido na página 16 da Secção 2. Esta pequena discrepância não tem qualquer impacto nos resultados desta análise.

as reservas provadas estão em torno dos 600 GtC. Definições menos restritivas de reservas estimam quantidades maiores. Por exemplo, McGlade e Ekins (2015) estimam as reservas recuperáveis de petróleo, gás natural e carvão em cerca de 600 GtC, 400 GtC e 3000 GtC, respetivamente.

A relação estatística entre a temperatura média global terrestre e a sua equivalente em Portugal pode ser obtida utilizando os dados históricos referidos na Secção 2.3. A relação entre a temperatura global, T_t , e a temperatura em Portugal, $T_{P,t}$, é estimada usando o modelo estatístico linear

$$T_{P,t} = \bar{T}_P + a \times T_t + \varepsilon_t, \quad (5)$$

onde \bar{T}_P é a constante do modelo, a é a sensibilidade da temperatura média em Portugal à temperatura média global terrestre e ε_t é o termo de erro. Consideram-se temperaturas médias anuais desde 1900 até 2017 em Portugal e no mundo provenientes de Matsuura e Willmott (2018a). A temperatura para Portugal corresponde à média anual dos 40 pontos da grelha da base de dados que se situam em Portugal continental (Figura 6), enquanto a temperatura global terrestre corresponde à temperatura média anual de todos os pontos da grelha, incluindo a Antártica (Figura 2). As estimativas para o modelo são $\bar{T}_P = 9,65$ e $a = 0,59$, sendo ambos os valores estatisticamente significativos. Para um aumento de 1°C na temperatura global, a temperatura média em Portugal sobe cerca de $0,59^\circ\text{C}$. Esta sensibilidade também foi calculada usando a média por década das temperaturas global e em Portugal, com resultados semelhantes.

4.1.2. O ciclo do carbono. O módulo do ciclo do carbono é uma relação simples entre as emissões de carbono ao longo do tempo e a concentração de carbono na atmosfera. Seguimos Golosov *et al.* (2014) e Acemoglu *et al.* (2016):

$$S_t - \bar{S} = \sum_{n=0}^{t-t^*} (1 - d_n) f_{t-n}, \quad t > t^*, \quad (6)$$

onde $d_n \in [0; 1]$ e f_{t-n} indica as emissões de carbono no período $t - n$, sendo a dimensão do período dez anos. O termo $1 - d_n$ representa a fração do carbono emitido n períodos atrás que ainda está na atmosfera e t^* define o início da industrialização. Do carbono emitido, uma fração φ_L permanece na atmosfera para sempre, uma fração $(1 - \varphi_0)$ das emissões restantes é capturada pela biosfera e a parte restante, $(1 - \varphi_L)\varphi_0$, decai à taxa geométrica φ . Matematicamente,

$$1 - d_n = \varphi_L + (1 - \varphi_L)\varphi_0(1 - \varphi)^n. \quad (7)$$

Assim, o nível de carbono na atmosfera pode ser decomposto numa parte permanente, S_t^p , e numa parte sujeita a depreciação, S_t^d :

$$S_t = S_t^p + S_t^d, \quad (8)$$

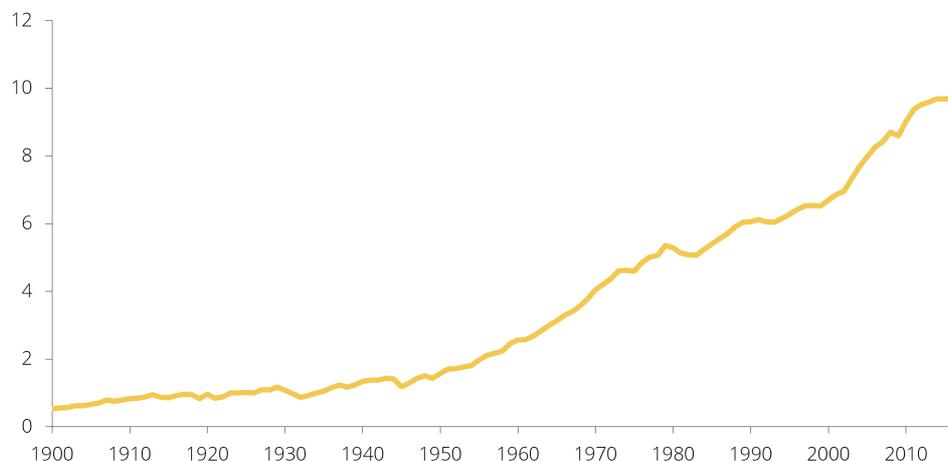


Figura 14: Emissões de carbono anuais, em GtC.

Fonte: Global Carbon Project, <http://www.globalcarbonatlas.org/en/C02-emissions>.

onde

$$\begin{aligned} S_t^p &= S_{t-1}^p + \varphi_L f_t \\ S_t^d &= (1 - \varphi) S_{t-1}^d + (1 - \varphi_L) \varphi_0 f_t. \end{aligned} \quad (9)$$

Como explicado em Archer (2005), Golosov *et al.* (2014) e Acemoglu *et al.* (2016), esta especificação aproxima-se da dinâmica complexa da concentração de carbono na atmosfera. Os três parâmetros do modelo de carbono são calibrados para replicar três factos estilizados. Considera-se $\varphi_L = 0,2$ porque no relatório do IPCC de 2007 (Solomon *et al.* 2007) se indica que cerca de 20% de qualquer emissão ficará na atmosfera por milhares de anos. Como em Golosov *et al.* (2014), toma-se $\varphi = 0,0228$ pois segundo Archer (2005) o excesso de carbono que não permanece na atmosfera “para sempre” tem uma meia-vida de cerca de 300 anos. Novamente de acordo com Solomon *et al.* (2007), cerca de metade do carbono que chega à atmosfera é removido após 30 anos. Isso implica $d_2 = 0,5$ na fórmula (6); após a substituição de φ e φ_L obtém-se $\varphi_0 = 0,393$.¹⁹

A Figura 14 mostra as emissões globais, f_t , de 1900 a 2017. No início do século as emissões anuais eram de cerca de 0,5 GtC, atingindo quase 10 GtC nos anos mais recentes (Friedlingstein *et al.* 2019).

A Figura 15 mostra a tracejado a concentração de carbono na atmosfera, e a linha sólida representa a concentração atmosférica prevista pelo modelo. A

19. Acemoglu *et al.* (2016) usam uma estratégia diferente para identificar esses parâmetros. Fixando $\varphi_L = 0,2$, usam a meia-vida de 30 anos do carbono e as emissões de carbono durante o período 1900–2008 para estimar φ e φ_0 .

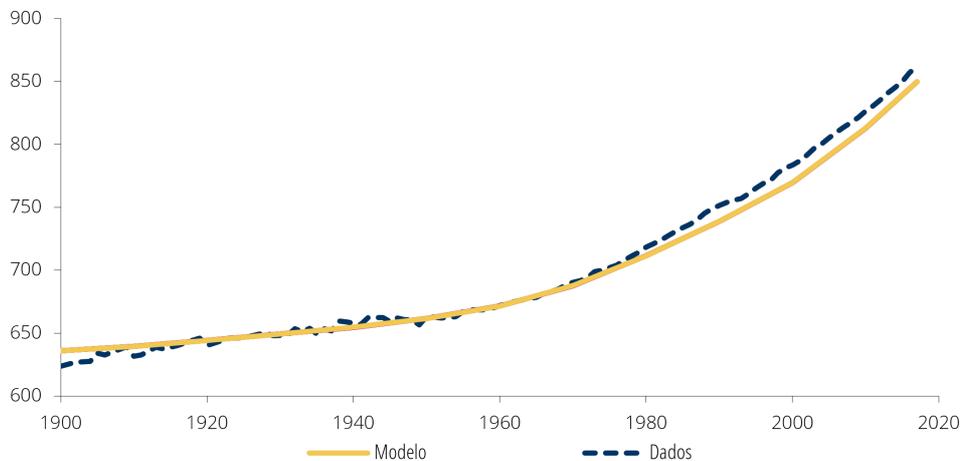


Figura 15: Concentração atmosférica do carbono, em GtC.

Fontes: Sítio internet <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> e cálculos dos autores.

concentração global de carbono na atmosfera tem aumentado a uma taxa crescente. Era cerca de 630 GtC em 1900 e subiu para cerca de 860 GtC em 2017.

4.1.3. Perdas económicas. A terceira parte do modelo especifica como a economia é afetada pelas alterações climáticas. Assumimos, como muitos outros, que as perdas económicas do aquecimento global são proporcionais ao PIB e uma função da temperatura média global (Nordhaus 1991, 1993; Nordhaus e Boyer 2000; Nordhaus e Sztorc 2013; Golosov *et al.* 2014; Acemoglu *et al.* 2016). Normalmente, admite-se que as perdas económicas sejam uma função convexa da temperatura, ou seja, que a inclinação da função de perdas, $D(T)$, aumenta com o nível da temperatura. Em vez disso, vamos assumir que a função de dano tem como argumento a concentração de carbono, S . Por exemplo, a função de dano de Nordhaus é especificada como

$$1 - D_N(T_t) = \frac{1}{1 + \varphi T_t^2}, \quad (10)$$

onde T_t é o aumento global médio na temperatura acima do nível pré-industrial, com $\varphi = 0,0028388$.²⁰ A combinação de uma relação côncava entre as concentrações de carbono e a temperatura – equação (4) – e uma relação convexa entre a temperatura e as perdas económicas – (10) – implica neste caso um efeito marginal aproximadamente constante entre a concentração de carbono

20. Trivialmente, a função de dano D_N acima duma temperatura muito alta torna-se côncava porque é limitada superiormente pela unidade.

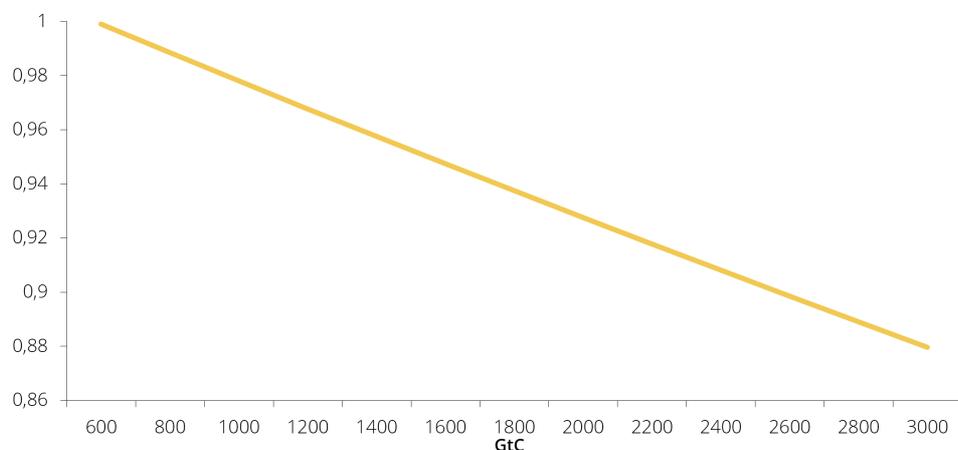


Figura 16: PIB em função da concentração de CO₂ na atmosfera, medido em fração do caso sem aumento da temperatura.

Fontes: Golosov *et al.* (2014), Acemoglu *et al.* (2016) e cálculos dos autores.

e as perdas. Como em Golosov *et al.* (2014) e Acemoglu *et al.* (2016) assume-se

$$1 - D(T(S_t)) = \exp(-\pi (S_t - \bar{S})) , \quad (11)$$

com $\pi = 5,3 \times 10^{-5}$. Essa equação implica que o perda marginal medida como uma parcela do PIB por unidade marginal de carbono na atmosfera é constante e dado por π . A Figura 16 mostra a relação entre a concentração de carbono e as perdas líquidas.

O intervalo do eixo horizontal vai de 600 GtC, que corresponde aos níveis pré-industriais, a 3000 GtC, que corresponde às estimativas mais altas para a quantidade total de combustível fóssil extraível. Esta calibração para π dá perdas moderadas do PIB. Por exemplo, se num cenário irrealista os 900 GtC de combustível fóssil correspondentes às reservas totais imediatamente disponíveis (British Petroleum 2015) fossem usados num muito curto período de tempo, então a concentração de carbono na atmosfera subiria para 1323 GtC, decrescendo posteriormente de acordo com as expressões descritas anteriormente.²¹ Para esta quantidade de concentração de carbono na atmosfera, as perdas máximas de PIB seriam em torno de 3,8%.

Existem muitas outras maneiras pelas quais as alterações climáticas podem afetar a economia e que não são levadas em consideração pela nossa formulação. Por exemplo, muitos dos custos não têm um preço de mercado. Adicionalmente,

21. Este valor corresponde à soma de 860 GtC, a concentração atual, mais o aumento na concentração decorrente da emissão de 900 GtC que, de acordo com a calibração descrita anteriormente, é aproximadamente igual a $463 = 900 \times (0,8 \times 0,393 + 0,2)$ GtC.

as emissões de carbono provavelmente afetarão o clima por muito tempo, o que implica que o peso dado às gerações futuras seja muito importante para quantificar os custos. Um terceiro exemplo: há um grau muito grande de incerteza em como a mudança climática global pode afetar a economia. Algumas destas preocupações podem ser acomodadas neste tipo de análise por ajustamento da taxa de desconto intertemporal, mas noutros casos isso não é possível.

4.1.4. A economia. No modelo, a energia, o capital e o trabalho são inputs na produção do bem de consumo final. A energia pode ser produzida a partir de fontes fósseis ou renováveis. Ambos os tipos de energia requerem capital, que também é usado na produção do bem final. A cada momento, a produtividade na produção de energia renovável pode aumentar como resultado da substituição do capital por uma versão mais moderna. A melhoria tecnológica beneficia de sinergias decorrentes do investimento agregado no setor renovável. Esse efeito indireto por si só levaria a um subinvestimento em energia renovável. Além disso, o investimento cria custos associados ao desmantelamento e substituição de equipamentos antigos, modelados como um choque de produtividade adverso temporário na função de produção das empresas de energia renovável. É importante salientar que esses custos são tanto maiores quanto mais capital for repostado.

Na economia existem empresas que produzem o bem final e empresas que produzem energia. A função de produção do bem final é Cobb-Douglas:

$$\begin{aligned} y_t &= A_t (k_t^g)^{\theta_k} (l_t)^{\theta_l} (e_t)^{1-\theta} \\ &= (1 - D(S_t)) \tilde{A}_t (k_t^g)^{\theta_k} (l_t)^{\theta_l} (e_t)^{1-\theta} \\ &= \exp(-\pi(S_t - \bar{S})) \tilde{A}_t ((k_t^g)^{\theta_k} (l_t)^{\theta_l} (e_t)^{1-\theta}), \end{aligned} \quad (12)$$

onde k_t^g , l_t e e_t são capital, trabalho e energia, respetivamente, e \tilde{A} é um parâmetro de produtividade tal que $A_t = (1 - D(S_t)) \tilde{A}_t$, onde θ , θ_k , $\theta_l \in [0; 1]$, e $\theta_k + \theta_l = \theta$.

Assume-se que a energia pode ser produzida usando fontes fósseis ou renováveis, e que os dois tipos de energia são substitutos perfeitos na produção do bem final.²² A função de produção de energia derivada de combustíveis fósseis é dada por

$$e_t^f = (f_t)^{1-\alpha_f} (k_t^f)^{\alpha_f}, \quad (13)$$

onde f_t e k_t^f são as quantidades de combustível fóssil e capital, respetivamente, e $\alpha_f \in [0; 1]$. A quantidade de combustível fóssil, w_t , evolui segundo a equação:

$$w_t = w_{t-1} - f_t. \quad (14)$$

O setor de empresas produtoras de energia renovável é competitivo. As empresas produtoras de energia renovável podem melhorar a sua produtividade, que está

22. Uma alta substituíbilidade entre as fontes de energia parece uma hipótese razoável no longo prazo, já que se espera que o armazenamento de energia de fonte renovável esteja disponível nas próximas décadas.

por sua vez sujeita a sinergias decorrentes do investimento agregado no setor de renováveis. É bem conhecido que esse efeito leva a um subinvestimento geral em energia renovável. A função de produção de energia renovável para a empresa j é dada por

$$e_{j,t}^r = \Psi(i_{j,t}) (\mathcal{E}_{j,t})^{1-\alpha_r} (k_{j,t}^r)^{\alpha_r}, \quad (15)$$

onde $\mathcal{E}_{j,t}$ é uma medida de produtividade da empresa, $\mathcal{E}_{j,0}$ é dado para todo o j , $\alpha_r \in [0; 1]$, $k_{j,t}^r$ é o capital usado pela empresa e $i_{j,t}$ é a sua taxa de adoção de novas tecnologias. A produtividade da empresa aumenta com $i_{j,t}$,

$$\ln \mathcal{E}_{j,t+1} = \xi i_{j,t} + (1 - \xi) \frac{\int_0^1 i_{j,t} k_{j,t}^r dj}{\int_0^1 k_{j,t}^r dj} + \ln \mathcal{E}_{j,t}, \quad (16)$$

onde $0 \leq \xi \leq 1$ parametriza a intensidade das sinergias. Por exemplo, $\xi = 1$ corresponde ao caso em que não há sinergias, enquanto $\xi = 0$ implica que a produtividade é inteiramente determinada por sinergias decorrentes do investimento em renováveis. Na expressão acima, normalizamos a adoção agregada de novas tecnologias pela quantidade de capital, para abstrair de qualquer vantagem que possa advir da dimensão das empresas. Finalmente, a função $\Psi(i_{j,t})$ captura o custo de adoção da tecnologia. Assume-se que a adoção de uma tecnologia mais recente reduz a produção corrente,

$$\Psi(i) = \left(1 - \left(\frac{i}{\bar{i}} \right)^\psi \right)^{1/\psi}. \quad (17)$$

Ψ é tal que $\Psi(0) = 1$, $\Psi'(\cdot) < 0$, $\Psi''(\cdot) < 0$, e $\Psi(\bar{i}) = 0$, para um valor positivo de \bar{i} .

A economia é perfeitamente competitiva. A família representativa possui todas as empresas da economia, o capital e o combustível fóssil. Aluga o capital às empresas e vende combustível fóssil às empresas do setor não renovável. A família escolhe uma trajetória de consumo que maximiza a utilidade $\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t u(c_t)$ e satisfaz a sua restrição orçamental tomando os preços como exógenos. As empresas consideram os preços como um dado e maximizam os lucros. Todos os mercados estão em equilíbrio. Em cada período, os fatores de produção são alocados livremente entre os setores. O capital total usado na economia é igual à oferta total; ou seja, para todo o t ,

$$k_t^g + k_t^f + \int_0^1 k_{j,t}^r dj = k_t. \quad (18)$$

A procura por trabalho é igual à oferta de trabalho:

$$l_t = 1. \quad (19)$$

A energia utilizada na produção do bem final é igual ao fornecimento total de energia:

$$e_t = e_t^f + \int_0^1 e_{j,t}^r dj. \quad (20)$$

O consumo, c_t , mais o investimento, $k_{t+1} - (1 - \delta)k_t$, onde δ é a taxa de depreciação do capital, é igual à oferta do bem final:

$$c_t + k_{t+1} - (1 - \delta)k_t = A_t(k_t^g)^{\theta_k}(l_t)^{\theta_l}(e_t)^{1-\theta}. \quad (21)$$

O equilíbrio competitivo é caracterizado por subinvestimento no setor de energia renovável, devido aos efeitos de sinergia, e excesso de produção no setor de energia proveniente de combustíveis fósseis, devido à externalidade ambiental das emissões de carbono. Ambas as distorções podem ser totalmente acomodadas com o uso de dois instrumentos independentes:

1. Uma taxa sobre as empresas do setor das energias renováveis proporcional ao seu nível de subinvestimento em I&D, rebatida uniformemente para as famílias;
2. Uma taxa pigouviana que compensa a externalidade das emissões de carbono, rebatida uniformemente para as famílias.

Em equilíbrio as empresas do setor renovável escolhem o nível ótimo de investimento em I&D pelo que essa taxa não gera receita fiscal; Adão *et al.* (2021) fornecem os detalhes dos dois mecanismos.

4.2. Calibração

A calibração dos danos ambientais já foi detalhada acima. Nesta secção especificam-se os restantes parâmetros da economia. Especifica-se a função de utilidade instantânea como $u(c) = \ln(c)$. Definindo a duração de cada período como 10 anos, assume-se uma taxa de desconto $\beta = 0,96^{10}$. Este valor, correspondente a uma taxa de desconto anual de 4%, encontra-se no limiar superior indicado na Secção 3.3. Na Secção 4.3 faz-se uma breve discussão das alterações nos resultados que ocorreriam no caso de se utilizar um desconto menor do futuro.

Dado o número de anos de cada período, assume-se que depreciação do capital é total, isto é, $\delta = 1$. Em relação à função de produção do bem final, a fração do rendimento do capital é $\Theta_k = (1/3) \times 0,95$, enquanto a fração do rendimento do trabalho é $\theta_l = (2/3) \times 0,95$. A parcela da energia é então dada por $1 - \theta = 1 - (\theta_k + \theta_l)$. A participação do capital na produção de energia é $\alpha_r = \alpha_f = 0,5$. Define-se a taxa de crescimento da produtividade no setor do produto final de forma a que a taxa de crescimento de longo prazo seja 2% e a taxa de crescimento da população seja nula. Para calibrar Ψ precisamos atribuir valores aos seus dois parâmetros, \bar{i} e ψ . Estes dois parâmetros são determinados a partir de três condições: (i) a expressão para a taxa de crescimento assintótico ótimo de longo prazo da adoção de tecnologia, (ii) a imposição de que as taxas de crescimento de longo prazo no sector da energia renovável e do bem final são iguais, e (iii) a suposição de que a função dos custos de adopção é côncava. O valor calibrado para o máximo da taxa de adoção implica uma taxa de crescimento anual máxima de cerca de 5% no setor renovável, o que é amplamente consistente com as médias históricas de redução de custos do setor (para mais detalhes, ver Adão *et al.* 2021).

Define-se 2015 como ano inicial do exercício. Os quatro parâmetros relacionados com o setor da energia que ainda falta calibrar são a quantidade de combustível fóssil existente, no sentido discutido na Secção 4.1.1, w_0 , a produtividade do setor renovável, \mathcal{E}_0 , o imposto pigouviano inicial, τ^f , e o efeito colateral da adoção de tecnologia renovável, ξ . Na calibração definimos $w_0 = 923$ GtC. A quantidade inicial de petróleo e gás natural é 253,8 GtC, enquanto a quantidade inicial de carvão é 666 GtC (para uma explicação detalhada destes valores, ver Secção 4.3 de Li *et al.* 2016).

Os valores de \mathcal{E}_0 , τ^f e ξ são conjuntamente determinados de forma a obter coincidência com três valores retirados dos dados: (i) a parcela inicial de energia renovável na produção total de energia, s_0 , (ii) o consumo inicial de combustível fóssil, f_0 , e (iii) a mudança na participação de energia renovável no último período, ou seja, desde 2005, $s_0 - s_{-1}$.

A política ótima tem de corrigir as duas distorções na economia. Há subinvestimento no setor da energia renovável devido a efeitos externos positivos, e existem custos sociais associados à externalidade das emissões de carbono. Ambas as distorções podem ser completamente resolvidas usando dois instrumentos. No primeiro caso, a solução é uma política que tribute as empresas no setor renovável em proporção do seu subinvestimento. Tal política implementa o nível ótimo de investimento ao fazer com que as empresas fiquem indiferentes entre pagar o imposto e escolher o nível socialmente ótimo de investimento. No segundo caso, a solução é um imposto pigouviano que internalize a externalidade das emissões de carbono. Como em Golosov *et al.* (2014), se a função utilidade for logarítmica e a depreciação do capital igual a 100%, como se admite este texto, então a taxa do imposto não depende do crescimento da economia. Isto implica que nas simulações desta secção se admitirá que as políticas ótimas são iniciadas instantaneamente.

A política ótima tem implicações interessantes. A política usada nas empresas que produzem energia renovável não gera receita fiscal, e induz inovação adicional em relação ao equilíbrio competitivo ao implementar o nível de investimento correspondente ao caso em que não há efeitos de sinergia, ou seja, $\xi = 1$. O imposto pigouviano reduz o lucro das empresas no setor da energia não renovável, mas a transferência para as famílias no mesmo montante faz com que a sua restrição orçamental não se altere.

Denotamos por τ^f o valor do imposto pigouviano em percentagem do seu nível ótimo, τ^* , e por ξ o valor dos efeitos de sinergia, que são totalmente internalizados quando $\xi = 1$. Tomando $\mathcal{E}_0 = 14,92$, $\tau^f = 0,63\tau^*$ e $\xi = 0,54\xi^*$, o modelo reproduz os valores iniciais do consumo de combustível fóssil, $f_0 = 100$ GtC, a fração atual das energias renováveis, $s_0 = 10,2\%$, e a taxa de crescimento da fração das energias renováveis, $s_0 - s_{-1} = 2,3\%$. Este último valor inclui todas as energias renováveis modernas e tradicionais, incluindo biomassa. Calcula-se uma taxa de crescimento inicial de 10 anos de 4,7% para as energias renováveis, com uma taxa

correspondente de 2% para todo o setor de energia. A energia nuclear não é incluída neste cálculo.²³

A produtividade inicial do setor renovável afeta a participação das energias renováveis na produção total de energia. Por sua vez, os efeitos colaterais da adoção de tecnologias renováveis afetam a mudança na produtividade do setor renovável e, conseqüentemente, a mudança na participação das energias renováveis. Além disso, o imposto pigouviano afeta o uso de combustível fóssil e, conseqüentemente, as partes relativas ao combustível fóssil e às fontes renováveis na produção total de energia.

4.3. Resultados

A calibração dos parâmetros da política (a taxa inicial de imposto de Pigou, τ^f , e a taxa inicial de adoção de tecnologia, ξ) permite avaliar o efeito do imposto sobre emissões e da política direcionada à adoção de energias renováveis de forma separada e em conjunto. O modelo é simulado considerando diferentes cenários para os dois parâmetros de política. A Figura 17 mostra as trajetórias para a participação da energia renovável (painel de topo), consumo de combustível fóssil acumulado (painel do meio) e temperaturas globais (painel inferior), em cada cenário de política. As diversas linhas indicam os diversos tipos de política, ou seja, o status quo, a política de adoção ótima de tecnologia, a imposição do imposto pigouviano ótimo, e as duas políticas ótimas implementadas em simultâneo.

O primeiro painel mostra a fração das energias renováveis na produção de energia ao longo do tempo para os diferentes cenários de política. A política de adoção de energia renovável (a tracejado) reduz a fração de energias renováveis no curto prazo em relação ao caso do status quo (a pontilhado). Por outro lado, a produção de energia torna-se totalmente assente na parte renovável mais cedo do que no status quo. Em contraste, com o imposto de Pigou no seu nível ótimo e na ausência da política ótima de adoção da tecnologia renovável (a traço-ponto), a fração de energia renovável aumenta imediatamente. Na situação em que ambas as políticas são implementadas em simultâneo (a cheio), a fração de energia renovável não se altera imediatamente. No entanto, a transição para uma economia global totalmente renovável ocorre em 2080, mais cedo do que nos outros três cenários.

O segundo painel descreve a evolução do consumo cumulativo de combustíveis fósseis nos mesmos quatro cenários. Curiosamente, sem o imposto pigouviano ótimo o consumo cumulativo de combustíveis fósseis é inicialmente um pouco mais intenso no caso de a externalidade da tecnologia ser internalizada (a tracejado) do que no caso do status quo (a pontilhado). Isso ocorre porque o crescimento mais rápido da produtividade da energia renovável permite que a economia dependa totalmente da energia renovável mais cedo. Da mesma forma, no cenário em que o imposto pigouviano e a adoção da tecnologia são definidos de forma ótima (a

23. Consultar <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.

cheio), a economia atinge o estado de energia totalmente renovável mais cedo e mais combustível fóssil é deixado sem uso. Consistente com o “paradoxo verde”, isso também implica um uso maior de combustível fóssil inicialmente do que no caso em que somente o imposto pigouviano ótimo está em vigor (a traço-ponto).

O terceiro painel mostra as trajetórias das temperaturas globais nos quatro cenários de política. Consistente com o uso de combustível fóssil no painel superior, a temperatura global aumenta tanto no cenário status quo quanto no cenário de adoção de tecnologia ideal, chegando a cerca de 2,8°C acima do nível pré-industrial. A temperatura sob a política de adoção de tecnologia (mas na ausência de um imposto pigouviano ótimo) cai um pouco mais rápido do que no caso do status quo. No caso do imposto pigouviano ótimo e caso com ambas as políticas ótimas, as temperaturas globais atingem o pico em torno de 2,2 e 2,0°C acima do nível pré-industrial, respetivamente, e depois diminuem lentamente com o tempo.

Em seguida, analisa-se o bem-estar associado a esses cenários. Seguindo Robert E. Lucas (1987), calcula-se o ganho de bem-estar em termos do consumo percentual equivalente a cada uma das políticas, relativamente ao caso do status quo. Mudar desse cenário de referência por via da adoção ideal de tecnologia por si só implicaria um ganho equivalente de consumo de 0,25%. Isto corresponde a dizer que um agente estaria indiferente entre beneficiar da trajetória ótima de consumo e ter uma trajetória de consumo igual à do status quo aumentada em 0,25%.

Com o imposto pigouviano ótimo implementado isoladamente obtém-se um ganho de 1,02%, confirmando a importância relativa do imposto sobre o carbono. A comparação do status quo com a situação em que as duas políticas são aplicadas resulta num ganho de bem-estar equivalente de consumo de 1,43%. A diferença entre a soma dos ganhos de bem-estar da aplicação isolada de cada uma das políticas e o ganho de bem-estar da sua implementação em simultâneo é cerca de 0,16%. Isto sugere uma complementaridade considerável entre as duas políticas.

Os resultados anteriores mostram que estimular o nível ótimo de I&D no setor de renováveis não é uma alternativa aos impostos sobre o carbono. Tal política por si só fornece benefícios relativamente pequenos. Este modelo sugere que há complementaridades entre as duas políticas, ou seja, que ganhos consideráveis de bem-estar podem ser obtidos quando as políticas são adotadas simultaneamente.

Os resultados para a economia global sugerem efeitos mais limitados em Portugal. A julgar por dependências passadas, a mudança de temperatura em Portugal será menos pronunciada do que no conjunto do planeta. Usando a regressão (5), a variação da temperatura em Portugal, $\Delta T_{P,t}$, está relacionada com a variação da temperatura global, ΔT_t , de acordo com

$$\Delta T_{P,t} = 0,59 \times \Delta T_t. \quad (22)$$

A Figura 18 mostra a evolução da temperatura em Portugal para os quatro cenários. Dado que a variação da temperatura global se situará entre 2 e 2,8°C, consoante as políticas climáticas sejam ou não adotadas, a variação da temperatura em Portugal expectável ficará entre 1,2 e 1,7°C.

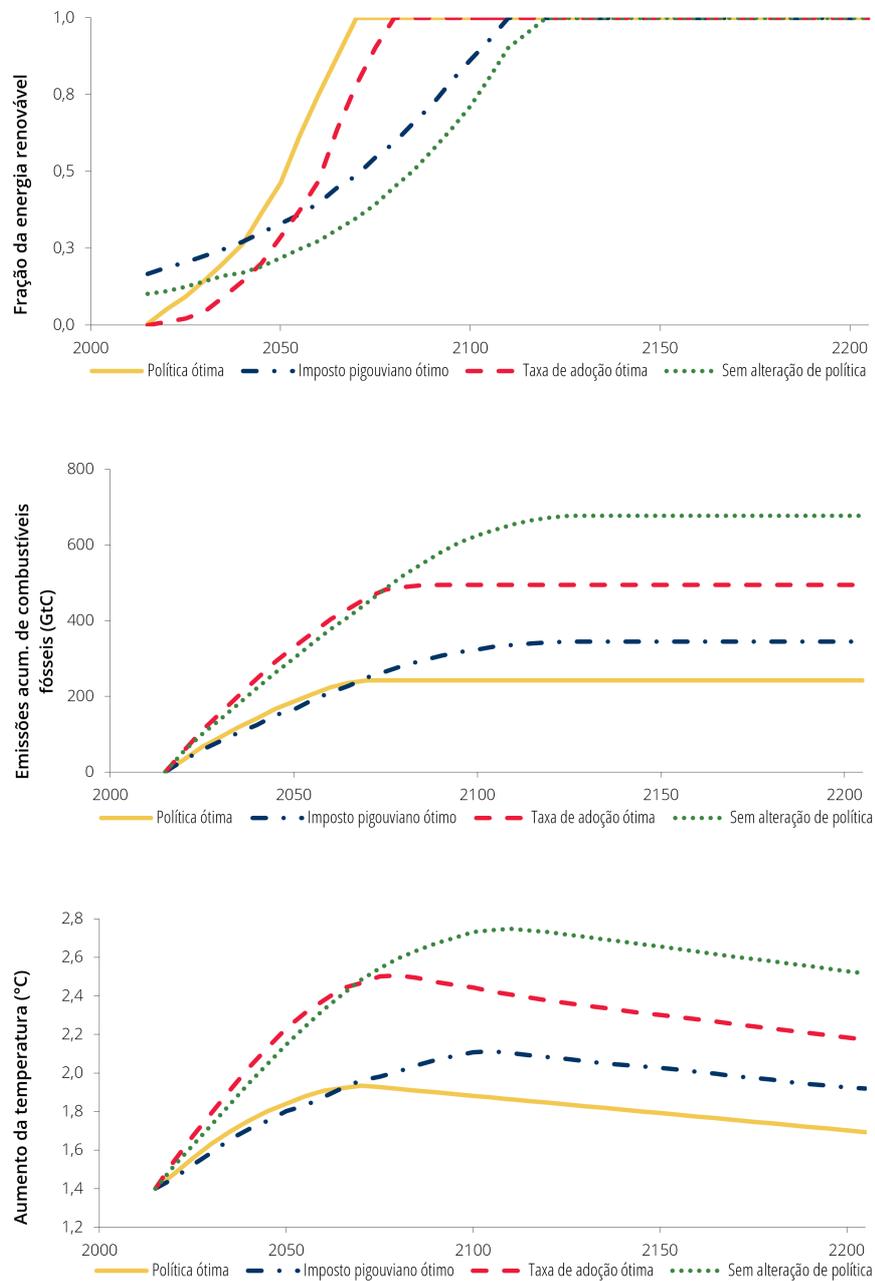


Figura 17: Fração da energia renovável no total, consumo de combustíveis fósseis e temperatura global.

As perdas no PIB também podem ser relativamente baixas. Supondo que a função de dano de Nordhaus (10) é válida para Portugal, as perdas em termos

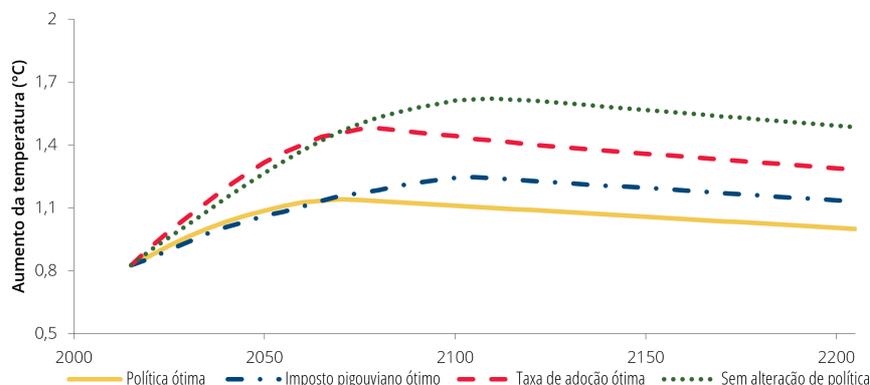


Figura 18: Variação da temperatura em Portugal face à situação inicial.

do PIB estarão entre 0,4% e 0,8% face ao status quo. O ganho de bem-estar de consumo em Portugal de adotar as políticas ótimas em relação ao status quo é cerca de 0,4%. Ainda assim, este valor significa que o ganho de bem-estar estimado face ao status quo corresponderia a uma trajetória do consumo privado português com cerca de 520 milhões de euros adicionais permanentemente, a preços constantes a partir de hoje.

4.4. Considerações adicionais

Esta secção fornece estimativas do impacto das alterações climáticas em quatro cenários: status quo, imposto pigouviano ótimo, política ótima de investimento em I&D para empresas que operam no setor de energias renováveis, e ambas as políticas em simultâneo. O melhor resultado é obtido neste último caso. Induzir o nível ótimo de inovação tecnológica em energias renováveis – muitas vezes considerado como uma política mais fácil de implementar – é, por si só, pouco eficaz, enquanto o imposto de Pigou ótimo já é, mesmo isoladamente, muito eficaz para reduzir as emissões de carbono.

As estimativas obtidas estão sujeitas a muitas incertezas. A relação entre as emissões de carbono e eventos climáticos extremos não foi levada em consideração. A relação entre carbono e temperatura pode ser não linear devido aos chamados “pontos de inflexão”, ou seja, níveis de aumento capazes de induzirem mecanismos adicionais de realimentação positiva, como discutido na Secção 2.1.3.

Considera-se apenas a perda de PIB, mas outros custos não quantificados pelos mercados, como conflitos decorrentes de movimentos migratórios de pessoas ou a perda de biodiversidade, também devem ser considerados. Por outro lado, futuras melhorias tecnológicas podem permitir o sequestro de carbono, não apenas das emissões, mas também do carbono na atmosfera. Por essas razões, estas estimativas para o impacto das alterações climáticas na economia devem ser consideradas avaliações muito imprecisas dos valores que um dia se irão verificar.

Como referido anteriormente, o fator de desconto usado nesta análise situa-se no limite superior dos valores propostos na Secção 3.3. Como se alterariam estes resultados com descontos inferiores, ou seja, dando mais peso ao futuro? A resposta genérica é que os efeitos de longo prazo no clima e no produto seriam menos pronunciados porque as gerações futuras, vivendo num estado estacionário, teriam que ter maior bem-estar do que no exercício atual. Isso seria obtido em princípio com uma adoção mais rápida de novas tecnologias induzida por maiores impostos sobre o carbono. A política de inovação assentaria também num esquema induzindo uma internalização total dos efeitos do investimento das empresas. Nesta perspectiva, os valores fornecidos na secção anterior são limites superiores aos efeitos totais mas, dada a incerteza que rodeia todo o exercício, eles não podem senão ser encarados como estimativas conservadoras de efeitos que podem ser muito piores. E um aspeto não negligenciável é que, devido à dinâmica da adoção de novas tecnologias, a fixação de taxas sobre carbono mais altas do que o ótimo não induzem perdas significativas na economia: mais vale errar por excesso e enfrentar custos baixos por esse erro, do que errar por defeito e enfrentar perdas de bem-estar enormes (Hassler *et al.* 2020).

Referências

- Acemoglu, Daron, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley, e William Kerr (2016). “Transition to clean technology.” *Journal of Political Economy*, 124(1), 52–104.
- Adar, Zvi e James M. Griffin (1976). “Uncertainty and the choice of pollution control instruments.” *Journal of Environmental Economics and Management*, 3(3), 178–188.
- Adão, Bernardino e Nuno Lourenço (2021). “Resposta às alterações climáticas.” In *Perspetivas sobre a revisão da estratégia de política monetária do BCE*, editado por Ildeberta Abreu e João Valle e Azevedo, cap. 5, pp. 27–30. Banco de Portugal, Lisboa, Portugal.
- Adão, Bernardino, Borghan Narajabad, e Ted Temzelides (2021). “Scrapping, renewable technology adoption, and growth.” Working Paper 11, Banco de Portugal.
- Archer, David (2005). “Fate of fossil fuel CO₂ in geologic time.” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C9).
- British Petroleum (2015). “BP statistical review of world energy.” URL <http://bp.com/statisticalreview>.
- Cattaneo, C. e G. Peri (2016). “The migration response to increasing temperatures.” *Journal of Development Economics*, 122, 127–146.
- Cavalcanti, Tiago, Zeina Hasna, e César Santos (2021). “Climate Change Mitigation Policies: Aggregate and Distributional Effects.” Working Paper 17, Banco de Portugal.
- Cornes, Richard C., Gerard van der Schrier, Else J. M. van den Besselaar, e Philip D. Jones (2018). “An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and

- Precipitation Datasets." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391–9409.
- Council of Economic Advisors (2017). "Discounting for public policy: Theory and recent evidence on the merits of updating the discount rate." Issue Brief January.
- de Lima, M. Isabel P., Fátima Espírito Santo, Sofia Cunha, e Álvaro Silva (2013). "Tendências nos extremos de precipitação em Portugal Continental em 1941–2012." *Riscos Naturais Antrópicos e Mistos – Homenagem ao Professor Doutor Fernando Rebelo, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal*, pp. 325–337.
- Deryugina, Tatyana e Solomon M. Hsiang (2014). "Does the environment still matter? Daily temperature and income in the United States." Working Paper 20750, National Bureau of Economic Research.
- Economides, George, Andreas Papandreou, Eftichios Sartzetakis, e Anastasios Xepapadeas (2018). *The Economics of Climate Change*. Bank of Greece.
- Fankhauser, Samuel e Richard S. J. Tol (2005). "On climate change and economic growth." *Resource and Energy Economics*, 27(1), 1–17.
- Fick, Stephen E. e Robert J. Hijmans (2017). "WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas." *International Journal of Climatology*.
- Fragoso, Marcelo Henrique Carapito Martinho (2008). *Climatologia das precipitações intensas no Sul de Portugal*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Friedlingstein, Pierre, Matthew W. Jones, Michael O'Sullivan, Robbie M. Andrew, Judith Hauck, Glen P. Peters, Wouter Peters, Julia Pongratz, Stephen Sitch, Corinne Le Quéré, et al. (2019). "Global carbon budget 2019." *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838.
- Gassebner, M., A. Keck, e R. Teh (2010). "Shaken, Not Stirred: The Impact of Disasters on International Trade." *Review of International Economics*, 18(2), 351–368.
- Global Monitoring Laboratory (2020). "Trends in Atmospheric Carbon Dioxide." <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>.
- Gollier, Christian (2002). "Discounting an uncertain future." *Journal of Public Economics*, 85(2), 149–166.
- Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krusell, e Aleh Tsyvinski (2014). "Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium." *Econometrica*, 82(1), 41–88.
- Hassler, John, Per Krusell, Conny Olovsson, e Michael Reiter (2020). "On the effectiveness of climate policies." Working paper, IIES.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, e M. New (2008). "A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D20).
- Herrera, Sixto, Rita Margarida Cardoso, Pedro Matos Soares, Fátima Espírito Santo, Pedro Viterbo, e José Manuel Gutiérrez (2019). "Iberia01: a new gridded dataset of daily precipitation and temperatures over Iberia." *Earth System Science Data*, 11(4), 1947–1956.

- H.M. Treasury (2020). "The Green Book: Central government guidance on appraisal and evaluation." URL https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/938046/The_Green_Book_2020.pdf.
- Hsiang, S., R. Kopp, A. Jina, J. Rising, M. Delgado, S. Mohan, D. J. Rasmussen, R. Muir-Wood, P. Wilson, M. Oppenheimer, K. Larsen, e T. Houser (2017). "Estimating economic damage from climate change in the United States." *Science*, 356, 1362–1369.
- IPCC (2013). "Climate change 2013: the physical science basis." In *Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, e P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014). "Climate Change 2014: Synthesis Report." In *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por Core Writing Team, R. K. Pachauri, e L. A. Meyer. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genebra, Suíça.
- IPCC (2021). "Climate change 2021: the physical science basis. Summary for policymakers." In *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, editado por V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, e B. Zhou. Cambridge University Press.
- Lawrimore, Jay H., Matthew J. Menne, Byron E. Gleason, Claude N. Williams, David B. Wuertz, Russell S. Vose, e Jared Rennie (2011). "An overview of the Global Historical Climatology Network monthly mean temperature data set, version 3." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- Lebègue, Daniel (2005). "Révision du taux d'actualisation des investissements publics." Rel. téc., Commisariat Général du Plan.
- Li, Xin, Borghan Narajabad, e Ted Temzelides (2016). "Robust dynamic energy use and climate change." *Quantitative Economics*, 7(3), 821–857.
- Marshall, John e R. Allan Plumb (2008). *Atmosphere, Ocean and Climate Dynamics*. 1 ed., Academic Press, URL <https://www.elsevier.com/books/atmosphere-ocean-and-climate-dynamics/marshall/978-0-08-055670-3>.
- Matsuura, Kenji e Cort J. Willmott (2018a). "Terrestrial Air Temperature: 1900–2017 Gridded Monthly Time Series." URL http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2017/README.GlobalTsT2017.html.
- Matsuura, Kenji e Cort J. Willmott (2018b). "Terrestrial Precipitation: 1900–2017 Gridded Monthly Time Series." URL http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2017/README.GlobalTsP2017.html.
- McGlade, Christophe e Paul Ekins (2015). "The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 C." *Nature*, 517(7533), 187–190.

- Moody's (2019). "The Economic Implications of Climate Change." URL <https://www.moodyanalytics.com/-/media/article/2019/economic-implications-of-climate-change.pdf>.
- Nickl, Elsa, Cort J. Willmott, Kenji Matsuura, e Scott M. Robeson (2010). "Changes in annual land-surface precipitation over the twentieth and early twenty-first century." *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4), 729–739.
- Nordhaus, W. D. (2007). "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change." *Journal of Economic Literature*, XLV, 686–702.
- Nordhaus, William D. (1991). "Economic approaches to greenhouse warming." *Global warming: Economic policy responses*, pp. 33–68.
- Nordhaus, William D. (1993). "Rolling the 'DICE': an optimal transition path for controlling greenhouse gases." *Resource and Energy Economics*, 15(1), 27–50.
- Nordhaus, William D. e Joseph Boyer (2000). *Warming the world: economic models of global warming*. MIT Press.
- Nordhaus, William D. e Paul Sztorc (2013). "DICE 2013R: Introduction and user's manual." *Yale University and the National Bureau of Economic Research, USA*.
- Noy, I. (2009). "The macroeconomic consequences of disasters." *Journal of Development Economics*, 88, 221–231.
- Oh, C. H. e R. Reuveny (2010). "Climatic natural disasters, political risk, and international trade." *Global Environmental Change*, 20, 243–254.
- Parker, M. (2018). "The Impact of Disasters on Inflation." *Economics of Disasters and Climate Change*, 2(1), 21–48.
- Páscoa, Patrícia, Ana Russo, Célia M. Gouveia, Pedro M. M. Soares, Rita M. Cardoso, João A. M. Careto, e Andreia F. S. Ribeiro (2021). "A high-resolution view of the recent drought trends over the Iberian Peninsula." *Weather and Climate Extremes*, 32(100320), 1–9.
- Quinet, Emile (2013). "Factoring Sustainable Development into Project Appraisal." URL <https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/5jz40rncm222-en>.
- Ramsey, Frank Plumpton (1928). "A mathematical theory of saving." *Economic Journal*, 38(152), 543–559.
- Rigaud, K. K., A. de Sherbinin, B. Jones, J. Bergmann, V. Clement, K. Ober, J. Schewe, S. Adamo, B. McCusker, S. Heuser, e A. Midgley (2018). *Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration*. World Bank, Washington DC.
- Robert E. Lucas, Jr. (1987). *Models of Business Cycles*. Blackwell.
- Rose, Brian E. J. (2021). "The Climate Laboratory: A hands-on approach to climate physics and climate modeling." JupyterBook, URL <https://brian-rose.github.io/ClimateLaboratoryBook/home>.
- Solomon, Susan, Martin Manning, Melinda Marquis, Dahe Qin, et al. (2007). *Climate change 2007—the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC*, vol. 4. Cambridge University Press.
- Stavins, Robert N. (1996). "Correlated uncertainty and policy instrument choice." *Journal of Environmental Economics and Management*, 30(2), 218–232.

- Stern, Nicholas H., Siobhan Peters, Vicki Bakhshi, Alex Bowen, Catherine Cameron, Sebastian Catovsky, Diane Crane, Sophie Cruickshank, Simon Dietz, Nicola Edmonson, e outros (2006). *Stern Review: The economics of climate change*, vol. 30. Cambridge University Press.
- Swiss Re Institute (2021). "The economics of climate change: no action not an option." URL <https://www.swissre.com/dam/jcr:e73ee7c3-7f83-4c17-a2b8-8ef23a8d3312/swiss-re-institute-expertise-publicationeconomics-of-climate-change.pdf>.
- Tol, R. S. J. (2018). "The Economic Impacts of Climate Change." *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(1), 4–25.
- Trenberth, Kevin E. e John T. Fasullo (2012). "Tracking Earth's energy: From El Niño to global warming." *Surveys in Geophysics*, 33(3-4), 413–426.
- Weitzman, Martin L. (1974). "Prices vs. quantities." *Review of Economic Studies*, 41(4), 477–491.
- Weitzman, Martin L. (1998). "Why the far-distant future should be discounted at its lowest possible rate." *Journal of Environmental Economics and Management*, 36(3), 201–208.
- Weitzman, Martin L. (2009). "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change." *Review of Economics and Statistics*, 1, 1–19.

Apêndice: Temperatura e precipitação na superfície terrestre e em Portugal continental

Apresenta-se neste apêndice (Figuras A.1–A.3) a temperatura e precipitação médias para a superfície terrestre e para o território de Portugal continental. Não é objetivo deste trabalho caracterizar o clima dessas unidades geográficas; remete-se o leitor para a abundante literatura sobre este tema e, no caso português, para os trabalhos de Fragoso (2008) e de Lima *et al.* (2013).

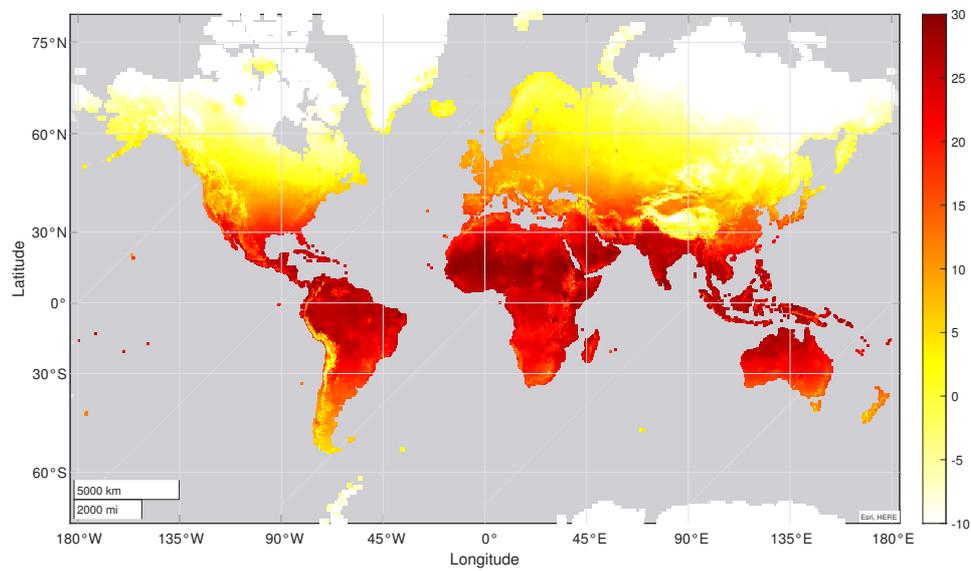


Figura A.1: Temperatura média anual na superfície terrestre para o período 1950–2017. Valores em °C.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018a) e cálculos dos autores.

Notas: A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média mensal. Valores em °C truncados para o intervalo $[-10; 30]$.

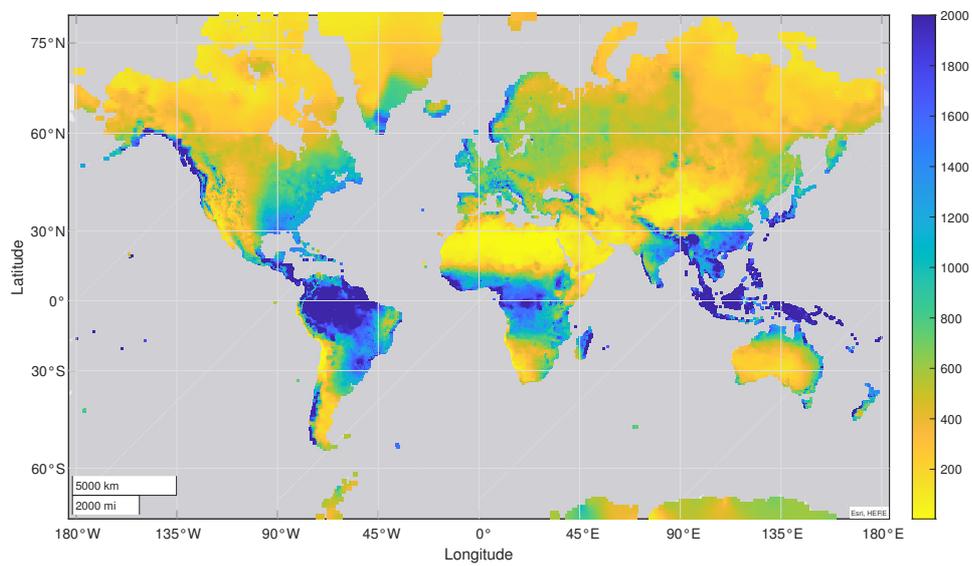


Figura A.2: Precipitação anual média na superfície terrestre para o período 1950–2017. Valores em mm.

Fontes: Matsuura e Willmott (2018b) e cálculos dos autores.

Notas: A precipitação anual média é definida como a média temporal do valor da precipitação acumulada ao longo do ano. Valores em mm truncados para o intervalo [0; 2000].

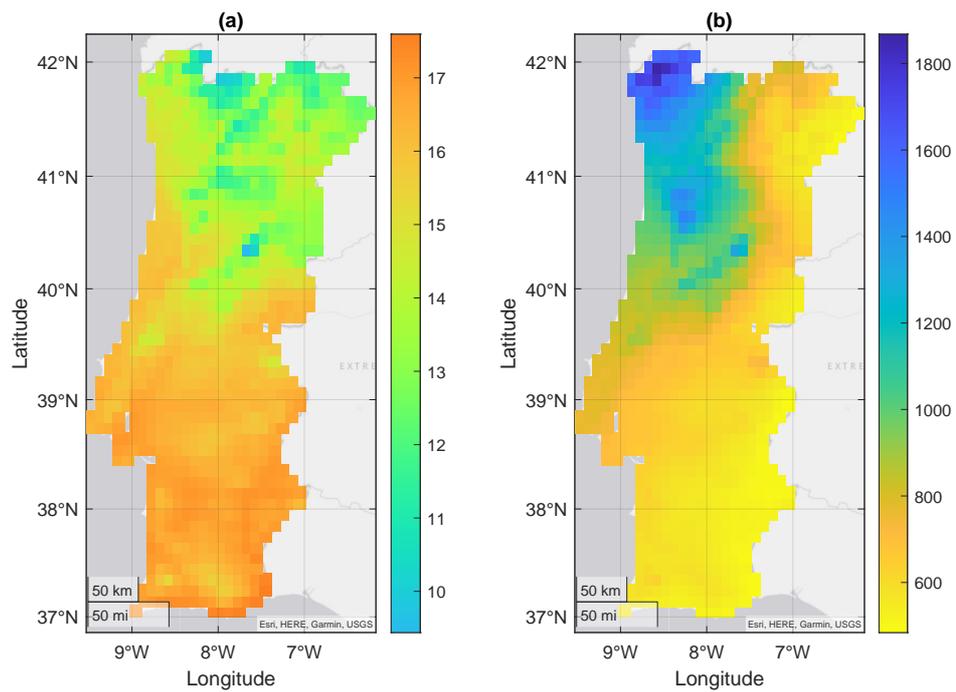


Figura A.3: Temperatura média anual e precipitação total anual em Portugal continental para o período 1971–2015. Painel (a): temperatura média anual, em °C. Painel (b): precipitação total anual, em mm.

Fontes: E-OBS e cálculos dos autores.

Notas: A temperatura média anual é definida como a média ao longo do ano da temperatura média diária. A precipitação total anual é o valor cumulativo da precipitação ao longo do ano.

Occasional Papers

2019

- 1|19 The Deepening of the Economic and Monetary Union
João Amador | João Valle e Azevedo
Cláudia Braz
- 2|19 A tentative exploration of the effects of Brexit on foreign direct investment *vis-à-vis* the United Kingdom
Ana de Almeida | Duncan Van Limbergen
Marco Hoeberichts | Teresa Sastre
- 3|19 Sovereign exposures in the Portuguese banking system: evidence from an original dataset
Maria Manuel Campos | Ana Rita Mateus
Álvaro Pina
- 4|19 Economic consequences of high public debt and challenges ahead for the euro area
Cristina Checherita-Westphal | Pascal Jacquinet | Pablo Burriel | Maria Manuel Campos | Francesco Caprioli | Pietro Rizza

2020

- 1|20 Banco de Portugal TARGET balance: evolution and main drivers
Rita Soares | Joana Sousa-Leite | João Filipe | Nuno Nóbrega
- 2|20 Imputation of the Portuguese Household Finance and Consumption Survey
Luís Martins
- 3|20 O impacto de curto prazo da pandemia COVID-19 nas empresas portuguesas
Cristina Manteu | Nuno Monteiro
Ana Sequeira
- 4|20 Occasional paper on crypto-assets
Banco de Portugal working group on crypto-assets

2021

- 1|21 Avaliação da exposição do sistema bancário português a sociedades não financeiras sensíveis aos riscos climáticos de transição
Ricardo Marques | Ana Margarida Carvalho

2022

- 1|22 Alterações climáticas e economia: uma introdução
Bernardino Adão | António Antunes | Miguel Gouveia | Nuno Lourenço | João Valle e Azevedo

