

POR QUE COMBATER O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?

Ação integrada para mitigar a mudança climática, melhorar a qualidade do ar e promover a segurança alimentar

CLEAN
AIR
FUND



CLEAN AIR
TASK FORCE



CONTEÚDO

SUMÁRIO EXECUTIVO	2
O QUE É O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?	4
POR QUE O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?	8
Potencial situação "ganha-ganha-ganha" para o clima, a saúde e a agricultura	8
Mudança climática	9
Poluição atmosférica e saúde	10
Agricultura e ecossistemas	12
Um problema grave que provavelmente piorará	14
Uma lacuna na estratégia global sobre o clima e a poluição atmosférica	15
Mudança climática	15
Poluição atmosférica e saúde	16
Agricultura e ecossistemas	16
COMO COMBATER O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?	17
ESTUDOS DE CASO	20
RECOMENDAÇÕES	25
Elaboração de políticas e regulamentação	25
Ciência e pesquisa	25
Financiamento e apoio técnico	26
REFERÊNCIAS	30

Autores:

Karen Johanna Blanco, Alberto Cruzado, Monica Espinosa, Juan Felipe Franco, Juliana Klakamp, Rodolfo Lacy, Stephanie Montero Bending, Ricardo Morales Betancourt, Luis Gerardo Ruiz Suarez, Zitely Tzompa Sosa (Força-Tarefa Climática - *Clean Air Task Force*, Instituto Ar Limpo - *Clean Air Institute, Hill*). Anna Garson, Tom Grylls, Arindam Roy (Fundo Ar Limpo - *Clean Air Fund*) e Ross Hunter (consultor independente).

Revisores e grupo consultivo:

Os autores agradecem a Helen Worden, Lu Keding, Mogesh Naidoo, Zuhelen Veronica Padilla Barrera e a todos os membros do Comitê Diretor do Relatório de Avaliação do Ozônio Troposférico (TOAR) por sua contribuição e apoio. Agradecimentos especiais a todos os membros do Grupo Consultivo por suas valiosas contribuições e comentários: Alex T. Archibald, Alberto Ayala, Ally Lewis, Chris Malley e Sergio Sanchez. Agradecimentos adicionais a David McCabe, Lesley Feldman (Força-Tarefa Climática - *Clean Air Task Force*) e Scarlett Quinn-Savory (Coalizão Clima e Ar Limpo - *Climate and Clean Air Coalition*) por suas revisões e contribuições.

SUMÁRIO EXECUTIVO

O ozônio troposférico é um gás de efeito estufa e poluente atmosférico que aquece a atmosfera terrestre, prejudica a saúde humana quando inalado e prejudica a produtividade de lavouras e florestas.

Como gás de efeito estufa, é responsável por cerca de 0,23°C do aquecimento atual. Contudo, as agendas de políticas climáticas nos níveis global, regional e nacional carecem de ações específicas para reduzir a concentração do ozônio troposférico. Sendo ele um superpoluente responsável por uma fração significativa do aquecimento global, isso precisa mudar.

Diferentemente de muitos outros gases e partículas, o ozônio troposférico não é emitido diretamente, mas formado na atmosfera quando a luz solar interage com uma combinação de outros gases poluentes. As principais substâncias que contribuem para o aumento dos níveis desse poluente atmosférico tóxico são metano (um potente gás de efeito estufa), óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis e monóxidos de carbono. Tais "precursores" são emitidos por uma diversa gama de atividades, por exemplo, transportes, indústria, pecuária e geração de energia, bem como por incêndios florestais e queimadas.

A redução das concentrações do ozônio troposférico é uma estratégia promissora e ainda subutilizada para mitigar o impacto da mudança climática induzida pela atividade humana nos próximos anos. Ação focada pode, simultaneamente, melhorar a qualidade do ar e reduzir as mortes precoces (cerca de 500.000) e os custos econômicos (US\$500 bilhões) associados aos danos do ozônio troposférico a cada ano. A redução das concentrações de ozônio também melhorará a produtividade das principais culturas agrícolas - milho, arroz e trigo, por exemplo - das quais bilhões de pessoas dependem.

A redução do ozônio troposférico apresenta um desafio único, pois requer ação inteligente e rápida em relação a vários gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, bem como a diversos setores econômicos. Este é um problema crescente e negligenciado que exige uma abordagem integrada, tanto em

nível local quanto global, que possa enfrentar conjuntamente a mudança climática e a poluição atmosférica, paralelamente a esforços acelerados para traduzir a ciência em políticas.

Mas o progresso é possível, apesar dessa complexidade. Este relatório descreve como algumas cidades e regiões - Los Angeles, Cidade do México, Beijing e a Europa - conseguiram reduzir os níveis de ozônio troposférico por meio do controle direcionado da poluição.

Existem medidas concretas que os governos e outros tomadores de decisão podem tomar agora. Muitas delas estão alinhadas aos esforços já em curso, como o Compromisso Global do Metano (*Global Methane Pledge*) e as Diretrizes de Qualidade do Ar da Organização Mundial da Saúde (OMS). Este relatório analisa políticas e medidas por setor e por poluente precursor, tendo em vista que cada local apresentará uma combinação diferente de precursores, dependendo das suas fontes e condições locais.

Em paralelo, mais pesquisas e iniciativas científicas são necessárias para melhor compreender os consideráveis benefícios da redução do ozônio troposférico e para suprir as lacunas de conhecimento que nos impedem de mitigar a mudança climática de forma acelerada.

Nossas recomendações para formuladores de políticas, cientistas e financiadores apresentam ações que podem ser implementadas imediatamente. Conclamamos a adoção de medidas ousadas para obter os consideráveis benefícios que essas ações trarão, incluindo a mitigação mais rápida da mudança climática, ar mais limpo para bilhões de pessoas e maior segurança alimentar global.

O ozônio troposférico é responsável por

0,23°C

do aquecimento atual

A redução do ozônio troposférico pode proporcionar uma tripla vitória para o clima, a saúde e a agricultura:



CLIMA

A redução dos níveis de ozônio troposférico contribuirá para evitar a elevação adicional da temperatura global nas próximas décadas. Os níveis de ozônio troposférico aumentaram significativamente no último século. Desde 1995, o aumento tem variado de 2% a 12% por década, dependendo da região, em larga medida devido à rápida industrialização e urbanização. Estima-se que esse aumento responda por 0,23°C do aquecimento global ocorrido de 1750 até o presente. Reduzir os níveis de superpoluentes, como o ozônio troposférico, pode mitigar o aquecimento quase quatro vezes mais rapidamente do que a descarbonização conseguiria isoladamente.

Atores importantes da ação climática estão se tornando cada vez mais conscientes desta questão urgente. No início deste ano, os governos dos Estados Unidos e da China reconheceram a necessidade de cooperação técnica e fortalecimento de capacidades para desenvolver soluções para reduzir o ozônio troposférico, como parte dos esforços para enfrentar a mudança climática.¹



SAÚDE

O ozônio troposférico impõe sérios riscos à saúde e a sua redução proporcionaria ganhos substanciais, com a melhoria rápida da qualidade ar. Ele agrava problemas respiratórios, diminui a função pulmonar e exacerba condições crônicas como asma, bronquite e enfisema, tendo sido também associado a complicações no diabetes tipo 2 e em doenças cardiovasculares.

Nove em cada dez pessoas em nosso planeta, estão expostas a níveis de ozônio troposférico acima dos limites recomendados pela OMS, o que contribui para a ocorrência de quase meio milhão de mortes precoces a cada ano. A observância das diretrizes da OMS salvaria centenas de milhares de vidas e proporcionaria benefícios econômicos de até US\$500 bilhões anuais com a redução das despesas de saúde.



AGRICULTURA

O ozônio troposférico causa graves danos a várias culturas alimentares essenciais, reduzindo o tamanho dos grãos, a quantidade de sementes, a taxa de crescimento e a resistência das plantas a estresses ambientais. Ele também acelera o processo de envelhecimento das folhas e causa lesões visíveis nas plantas, por exemplo, clorose e necrose.

O resultado são diminuições significativas na produtividade agrícola global. Para lavouras básicas como trigo, soja e milho, as perdas econômicas totais resultantes dos danos causados pelo ozônio podem chegar a US\$35 bilhões anuais até 2030, calculadas a preços de 2000. Reduzir o ozônio troposférico melhoraria a segurança alimentar global, aumentando a produtividade de culturas que alimentam bilhões de pessoas.



O QUE É O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?

O ozônio troposférico é um gás reativo que causa múltiplos impactos. Níveis elevados de ozônio troposférico contribuem simultaneamente para o aquecimento global e a mudança climática, prejudicam a saúde humana, reduzem a produtividade agrícola e degradam os ecossistemas.

Diferentemente de muitos outros poluentes, o ozônio troposférico não é emitido diretamente, sendo formado na atmosfera quando outros poluentes reagem quimicamente na presença da luz solar. Esses poluentes precursores - incluindo metano (um potente gás de efeito estufa), óxidos de nitrogênio (NOx), compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOCs) e monóxido de carbono (CO) - são emitidos abundantemente por diversas atividades humanas comuns. As principais fontes são os transportes (incluindo aviação e transporte marítimo), a indústria, a pecuária e geração de energia, bem como incêndios florestais e queimadas (vide Figura 1).

O ozônio troposférico pode ser formado e destruído rapidamente na atmosfera, o que significa que seus níveis estão sempre mudando, sendo afetados pelos níveis locais de poluentes precursores, bem como pelas condições meteorológicas e climáticas. Devido à sua abundância na atmosfera e vida atmosférica relativamente mais longa em comparação a outros precursores (cerca de 12 anos), o metano impacta fortemente o ozônio troposférico em escala global, mesmo em locais remotos como acima dos oceanos.² As emissões de NMVOCs, NOx e CO desencadeiam uma série de reações interligadas que afetam os níveis de ozônio troposférico em períodos de horas, dias e meses. Esses poluentes precursores afetam os níveis de ozônio troposférico mais rapidamente e mais localmente do que o metano, embora também tenham efeitos regionais importantes.

Os níveis de ozônio troposférico, portanto, variam significativamente em todo o mundo e ao longo de ciclos diários e anuais. Por exemplo, há uma clara distinção entre os Hemisférios Norte e Sul, com níveis historicamente mais altos no Norte devido à sua maior densidade populacional, extensa urbanização e industrialização, e maiores emissões totais de precursores. Os níveis de ozônio troposférico também diferem localmente entre áreas urbanas, rurais e industriais, principalmente em resultado das condições locais e da proximidade das fontes emissoras.

O ozônio troposférico é fotoquímica e termicamente ativo, o que significa que sua formação e destruição são também determinadas pela temperatura e pelos níveis de luz solar. Isso significa que os trópicos desempenham um papel importante na formação do ozônio troposférico em escala global³ e que o aumento das temperaturas causado pela mudança climática vem desencadeando episódios recorrentes de elevação significativa nos níveis desse poluente, resultando num ciclo vicioso. Níveis elevados de ozônio aparecem como um "smog" fotoquímico tóxico, que é a névoa marrom frequentemente visível sobre cidades quentes e poluídas.

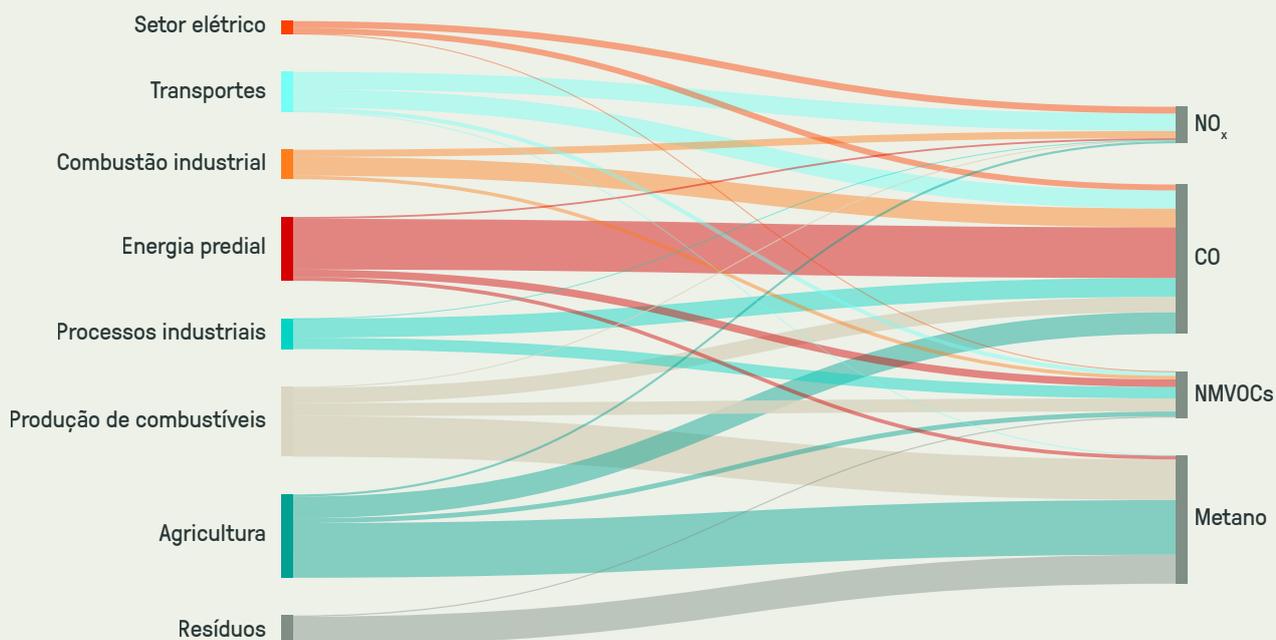
“ ... responsável por meio milhão de mortes precoces a cada ano

A complexa combinação de poluentes precursores, fontes de emissões e fatores ambientais faz com que a redução do ozônio troposférico seja um desafio para cientistas e formuladores de políticas em todos os níveis. Nem toda redução nas emissões de poluentes precursores resultará na diminuição dos níveis locais do ozônio troposférico.^{4,5} A combinação específica de precursores presentes em cada região, juntamente com as condições meteorológicas e climáticas, determina se a redução de metano, NO_x, NMVOCs e/ou CO será o caminho mais eficaz. Em certos casos, a diminuição na emissão de determinado precursor pode até aumentar os níveis locais de ozônio troposférico. Os efeitos também

podem diferir perto do solo e nas partes mais altas da troposfera, resultando diferentes benefícios para a saúde e o clima. As lacunas no conhecimento científico sobre esse aspecto da mitigação do ozônio troposférico, que podem prejudicar a elaboração de políticas e a tomada de decisões eficazes, só poderão ser preenchidas com mais pesquisas.

Os poluentes e as fontes de emissão responsáveis pela formação de ozônio na troposfera também causam vários outros desafios ambientais. O NO_x, por exemplo, contribui para a formação de material particulado, que é responsável por mais de 8 milhões de mortes precoces anuais, enquanto o metano é, por si só, um gás de efeito estufa.

FIGURA 1: RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES GLOBAIS DE POLUENTES PRECURSORES DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO E SUAS FONTES E SUBSETORES DE EMISSÃO



Fonte de dados: Inventário de emissões EDGAR. Nota: A figura não inclui as emissões causadas por incêndios florestais e queimadas.

BOX 1: OZÔNIO "BOM" E OZÔNIO "RUIM"

O ozônio pode ser encontrado principalmente em duas camadas da atmosfera terrestre. O ozônio troposférico, ou ozônio "ruim", é aquele presente na atmosfera até cerca de 15 quilômetros acima do nível do solo. Nessa camada, o ozônio atua como um gás de efeito estufa superpoluente, contribuindo significativamente para o aquecimento global ao absorver a radiação infravermelha e, assim, aquecer o ar circundante. Na parte inferior dessa camada - a superfície terrestre - o ozônio troposférico é muitas vezes chamado de "ozônio ao nível do solo", sendo responsável por quase meio milhão de mortes precoces a cada ano e por substancial dano à produtividade agrícola.

O ozônio desempenha um papel muito diferente na estratosfera - a camada atmosférica aproximadamente entre 15 e 40 quilômetros acima da superfície terrestre. Aqui, a camada de ozônio nos protege, absorvendo a radiação ultravioleta nociva. Esta é a camada de ozônio "bom", protegida pelo Protocolo de Montreal, um acordo negociado internacionalmente. O ozônio estratosférico ("bom") e o troposférico ("ruim") estão interligados. A boa notícia é que podemos proteger a camada de ozônio benéfica ao mesmo tempo em que agimos para reduzir os níveis nocivos de ozônio troposférico. Há também cada vez mais evidências de que o aumento dos níveis de ozônio troposférico e de outros gases de efeito estufa pode corroer a camada de ozônio estratosférico, reforçando a importância e a urgência do combate tanto ao ozônio troposférico quanto à mudança climática de forma mais ampla.⁷

FIGURA 2: OS MÚLTIPLOS PAPÉIS E NOMES DO OZÔNIO EM DIFERENTES NÍVEIS DA ATMOSFERA TERRESTRE



Tráfego intenso na hora do "rush" matinal em Jacarta, Indonésia. Crédito: Aji Styawan/Climate Visuals



POR QUE O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?

1. Potencial situação "ganha-ganha-ganha" para o clima, a saúde e a agricultura

IMPACTOS DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO NO CLIMA, NA SAÚDE, NA AGRICULTURA E NOS ECOSISTEMAS:

aquecimento global de **0,23°C** até o momento

500.000 mortes precoces por ano

custos econômicos anuais de **US\$0,5 trilhão**

diminuição de **até 26%** na produtividade agrícola global

diminuição de **11%** na produtividade florestal



MUDANÇA CLIMÁTICA

Reduzir os níveis de ozônio troposférico é importante para desacelerar a elevação da temperatura nas próximas décadas.

O ozônio troposférico é um dos superpoluentesⁱ conjuntamente responsáveis por quase metade do aquecimento global ocorrido até o momento.⁷ O ozônio sozinho contribuiu com cerca de 0,23°Cⁱⁱ para o aumento da temperatura desde o período pré-industrial. Cerca de 40% desse aquecimento ocorre pela formação de ozônio mediada por metano e 56%, pela formação de ozônio mediada por NMVOCs, CO e NOx.⁸

Reduzir os níveis de superpoluentes, como o ozônio troposférico, pode mitigar o aquecimento quase quatro vezes mais rapidamente do que a descarbonização conseguiria isoladamente até 2050.⁹ Juntamente com programas de descarbonização profunda, medidas específicas para combater os poluentes que elevam os níveis de ozônio troposférico devem ser um componente importante da estratégia climática global. Mesmo num cenário de descarbonização combinando medidas voltadas aos precursores do ozônio troposférico com programas de redução das emissões nos setores de energia, tratamento de resíduos e agricultura, o metano ainda representaria 0,19°C de aquecimento evitado até 2050. O efeito de outros precursores do ozônio troposférico (NMVOCs, CO e NOx) talvez seja de 0,11°C.^{10,11}

i Os superpoluentes são agentes de aquecimento muito mais potentes do que o CO₂, por tonelada, incluindo metano, ozônio troposférico, gases fluorados (gases F; como HFCs), óxido nitroso (N₂O) e carbono negro. Todos os superpoluentes, com exceção do N₂O, são também poluentes climáticos de vida curta.

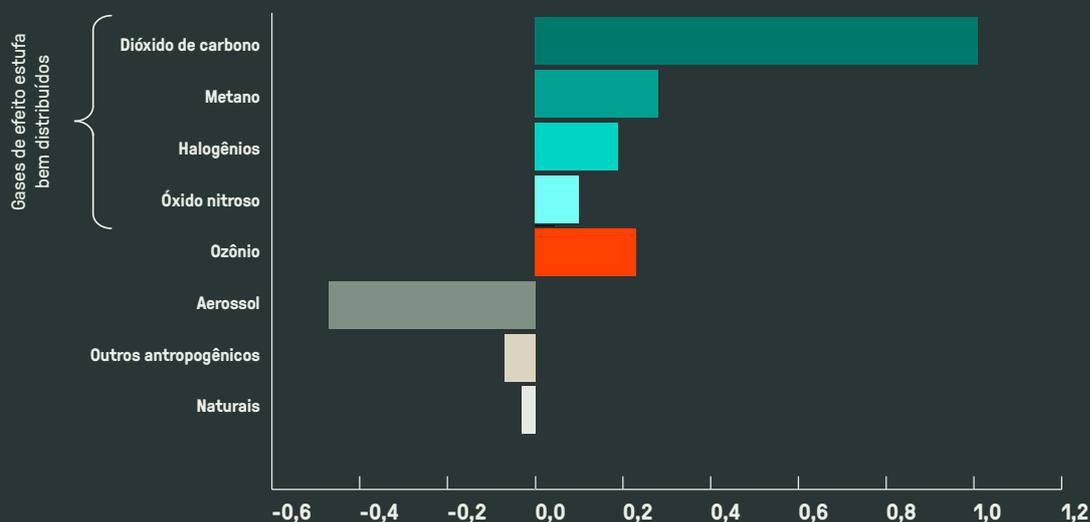
ii A estimativa do aquecimento até o presente vem do Relatório de Avaliação do IPCC 6, Capítulo 7, com valor médio de 0,23°C calculado utilizando um método baseado em concentrações. Tal valor captura o forçamento climático do ozônio troposférico (grande forçamento positivo) e do ozônio estratosférico (pequeno forçamento majoritariamente negativo). Chega-se a valor semelhante (0,25°C) a partir dos dados apresentados no Capítulo 6 do Relatório de Avaliação do IPCC 6, por meio da extrapolação das contribuições das emissões de precursores do ozônio troposférico para o aquecimento global.

Os efeitos climáticos do ozônio troposférico são sentidos mais fortemente nas regiões onde os seus níveis são mais elevados. Na Índia, o aumento nos níveis desse ozônio está associado a um aquecimento local estimado em até 0,5°C entre 2005 e 2020.¹² Na China, estima-se que o ozônio troposférico tenha elevado as temperaturas da superfície em 0,43°C entre 1951 e 2000, além de estar associado a alterações na monção de verão do leste asiático.¹³ Ele também contribui para o aquecimento dos oceanos, sendo responsável por 18% do aquecimento histórico observado no Oceano Antártico.¹⁴ Essa tendência de aquecimento tem consequências significativas, incluindo a aceleração do derretimento do gelo antártico, uma das principais causas da elevação do nível do mar.¹⁵

Apesar do potencial que a redução do ozônio troposférico tem para mitigar o clima no curto prazo, persistem lacunas na nossa compreensão e capacidade de concretizar esse aquecimento evitado, especialmente no que diz respeito às políticas e medidas para reduzir as emissões de NMVOCs, CO e NOx. Mais pesquisas são necessárias para melhorar nossa compreensão dos efeitos climáticos e dos ciclos de "feedback" associados ao ozônio troposférico, analisando como e onde seus precursores interagem na atmosfera, com especial ênfase nos impactos climáticos regionais.

É importante notar que todos os precursores do ozônio troposférico são forçantes climáticas de vida curta que afetam a mudança climática de várias maneiras. O NOx, por exemplo, também afeta os níveis de metano, estando essa interação associada a um efeito de aquecimento líquido.¹⁶ Os poluentes também são frequentemente emitidos juntamente com outros gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Políticas e medidas devem levar em conta os efeitos de múltiplos poluentes, inclusive a resposta do ozônio troposférico.

FIGURA 3: CONTRIBUIÇÃO DOS AGENTES FORÇANTES DO CLIMA PARA A MUDANÇA NA TEMPERATURA DE 2019 EM COMPARAÇÃO A 1750



Fonte de dados: IPCC, 2021, Capítulo 7, Figura 7.7



POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE

Combater o ozônio troposférico trará grandes benefícios à saúde pública por meio da melhoria da qualidade do ar.

O ozônio ao nível do solo apresenta sérios riscos à saúde, especialmente para crianças, idosos e pessoas que trabalham ao ar livre. A ciência já demonstrou fartamente que ele agrava problemas respiratórios, diminui a função pulmonar e exacerba condições crônicas como asma, bronquite e enfisema, tendo sido também associado a complicações no diabetes tipo 2 e em doenças cardiovasculares.

Nove em cada dez pessoas estão expostas a níveis de ozônio troposférico acima dos limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o que contribui para a ocorrência de quase meio milhão de mortes precoces a cada ano.¹⁸ Estima-se que o custo global anual desses impactos na saúde exceda meio trilhão de dólaresⁱⁱⁱ, havendo evidências de que esse valor possa ser significativamente mais alto quando consideradas causas adicionais de morte.¹⁹



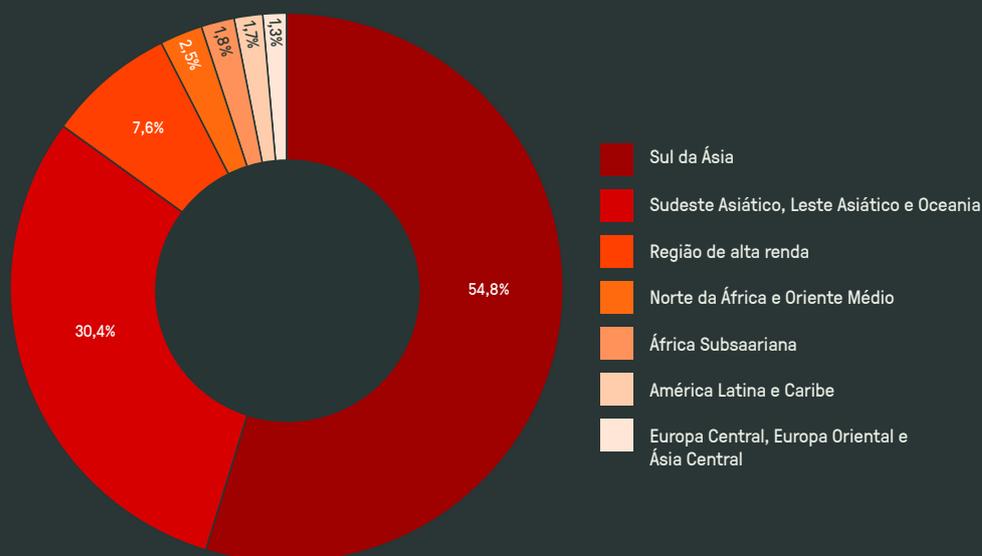
Embora o Sul Global sofra de forma desproporcional os impactos do ozônio ao nível do solo sobre a saúde, as regiões de alta renda também são significativamente afetadas.²⁰ Os níveis mais elevados de exposição ao ozônio são registrados no Sul da Ásia, Norte da África, Oriente Médio e África Subsaariana. Qatar, Nepal e Índia apresentam os mais altos níveis de exposição da população. O sul da Ásia responde por 55% das mortes atribuíveis ao ozônio, seguido pelo leste da Ásia. A Índia e a China juntas representam 75% das mortes globais atribuíveis ao ozônio. As regiões de alta renda respondem por 8% das mortes atribuíveis ao ozônio, com a América do Norte tendo a terceira maior taxa de mortalidade regional decorrente do ozônio troposférico (4 mortes por 100.000), seguida pela Europa Ocidental.²¹

A redução das concentrações de ozônio ao nível do solo pode gerar benefícios significativos à saúde e promover a equidade na saúde. As diretrizes e metas provisórias da OMS servem como referência

para que os governos estabeleçam seus próprios objetivos e implementem planos para reduzir o ozônio ao nível do solo. Cumprir as diretrizes da OMS para o ozônio em nível global poderia prevenir até meio milhão de mortes precoces anuais e também ajudaria a enfrentar problemas de saúde associados ao aumento das temperaturas – como doenças infecciosas, problemas cardiovasculares e mortalidade relacionada ao calor – além da insegurança alimentar, uma das principais causas de desnutrição.²²

Além disso, muitas das políticas e medidas de redução dos precursores do ozônio troposférico ao mesmo tempo reduzem os níveis de outros poluentes atmosféricos nocivos, como PM_{2,5} e carbono negro. Considerando o PM_{2,5} e o ozônio, a poluição atmosférica contribui para mais de oito milhões de mortes precoces anuais e gera custos econômicos que superam US\$8 trilhões.^{23,24} As políticas e medidas devem levar em conta os efeitos de múltiplos poluentes sobre a poluição atmosférica e a saúde pública, bem como a resposta climática.

FIGURA 4: PERCENTUAL DE MORTES PRECOSES ATRIBUÍVEIS AO OZÔNIO POR REGIÃO EM 2019^{iv}



Fonte de dados: Ferramenta de resultados do Estudo da Carga Global de Doenças (Global Burden of Disease - GBD).

iii Em 2022, o Banco Mundial publicou um relatório detalhando o custo global dos danos à saúde – tanto mortalidade quanto morbidade – associados à poluição do ar ambiente e doméstico, chegando a US\$8,1 trilhões em 2019. Para estimar o custo monetário da mortalidade global atribuível ao ozônio, utilizamos os dados desse relatório para calcular o Valor da Vida Estatística (VSL) por país, juntamente com a estimativa do Estudo da Carga Global de Doenças (GBD), que atribui 469.793 mortes ao ozônio em 2019. Calculamos o VSL para 179 dos 204 países e territórios incluídos no Estudo GBD, pois os dados não estavam disponíveis para os 25 países restantes. A VSL variou de US\$0,04 milhão em Burundi a US\$9,9 milhões em Luxemburgo. O custo total da mortalidade atribuível ao ozônio em 2019 ultrapassou meio trilhão de dólares, atingindo US\$553.465.000.000. Esse valor é considerado conservador porque exclui os impactos econômicos dos efeitos na saúde em 25 países e leva em conta apenas a mortalidade..

iv. As regiões se referem às super-regiões da Carga Global de Doença (GBD). As sete super-regiões GBD foram agrupadas com base nos padrões das causas de morte.



AGRICULTURA E ECOSISTEMAS

O ozônio troposférico afeta a segurança alimentar, reduzindo a produtividade agrícola e prejudicando as florestas e outros ecossistemas importantes.

O ozônio penetra nas plantas pelos poros das folhas (estômatos), e, uma vez no interior, provoca estresse oxidativo, que interfere nas funções fisiológicas - como fotossíntese e transporte de nutrientes -, reduzindo o tamanho dos grãos, a quantidade de sementes e a taxa de crescimento.²⁵ A resposta dos poros a estresses ambientais pode ficar mais lenta, reduzindo a resiliência das plantas e as tornando mais suscetíveis a doenças.²⁶ Isso pode causar danos visíveis, como clorose, necrose e envelhecimento precoce das folhas.

Tais efeitos reduzem significativamente a produtividade global da agricultura, especialmente nas culturas básicas sensíveis, como trigo, soja e milho. O Painel Intergovernamental sobre a Mudança Climática (IPCC) estima que, num cenário de alta das emissões futuras, a produtividade global poderá cair, até 2030, entre 5% e 26% para o trigo, 15% e 19% para a soja, e 4% e 9% para o milho. A perda econômica total para essas três culturas em 2030 pode chegar a US\$35 bilhões (em valores de 2000).²⁷ A Figura X mostra estimativas regionais das perdas agrícolas, com valores-limite superiores notavelmente altos para o trigo no leste da Ásia, sul da Ásia e Europa - e para a soja na África Subsaariana.

O ozônio troposférico não apenas está diretamente associado às perdas agrícolas, mas também tem efeitos indiretos sobre os desafios climáticos mais amplos relativos à agricultura. Se os produtores agrícolas responderem à redução da produtividade incrementando o uso de fertilizantes, o que elevará as emissões de outro superpoluente, o óxido nitroso (N₂O), acabarão causando mais aquecimento. E se compensarem a queda na produtividade desmatando novas áreas para fazer avançar a fronteira agrícola, prejudicarão o papel das florestas como sumidouros de carbono²⁸.



À medida que a mudança climática e a geopolítica pressionam o comércio de alimentos e a segurança alimentar em todo o planeta, o combate ao ozônio troposférico se torna uma maneira de aumentar a produtividade agrícola e apoiar os produtores.

Este é um benefício importante para o setor agrícola, que enfrenta pressão cada vez maior para adaptar suas práticas com o objetivo de reduzir as emissões.

As árvores também são afetadas pelo ozônio, que diminui sua capacidade de absorver e armazenar o dióxido de carbono da atmosfera. Níveis elevados de ozônio podem reduzir em até 11% a produtividade primária global das árvores florestais.²⁹ A produtividade florestal serve como indicador da quantidade de carbono que

uma floresta consegue sequestrar ou armazenar. Se por um lado as florestas correm o risco de deixar de atuar como sumidouros líquidos de carbono para se tornar emissoras líquidas, por outro lado, a redução do ozônio troposférico oferece a oportunidade de proteger as florestas e maximizar o sequestro de carbono proporcionado por ecossistemas mais saudáveis.³⁰

É importante notar que os efeitos do ozônio troposférico na agricultura e nas florestas não são lineares. Muitos outros fatores também têm influência e podem potencializar ou diminuir seu impacto. Fatores como a fertilização resultante do aumento dos níveis de CO₂, a temperatura, a disponibilidade de água, os nutrientes do solo e o uso de fertilizantes também têm efeito significativo sobre a produtividade agrícola e outras questões relativas à segurança alimentar e à mudança climática.³¹

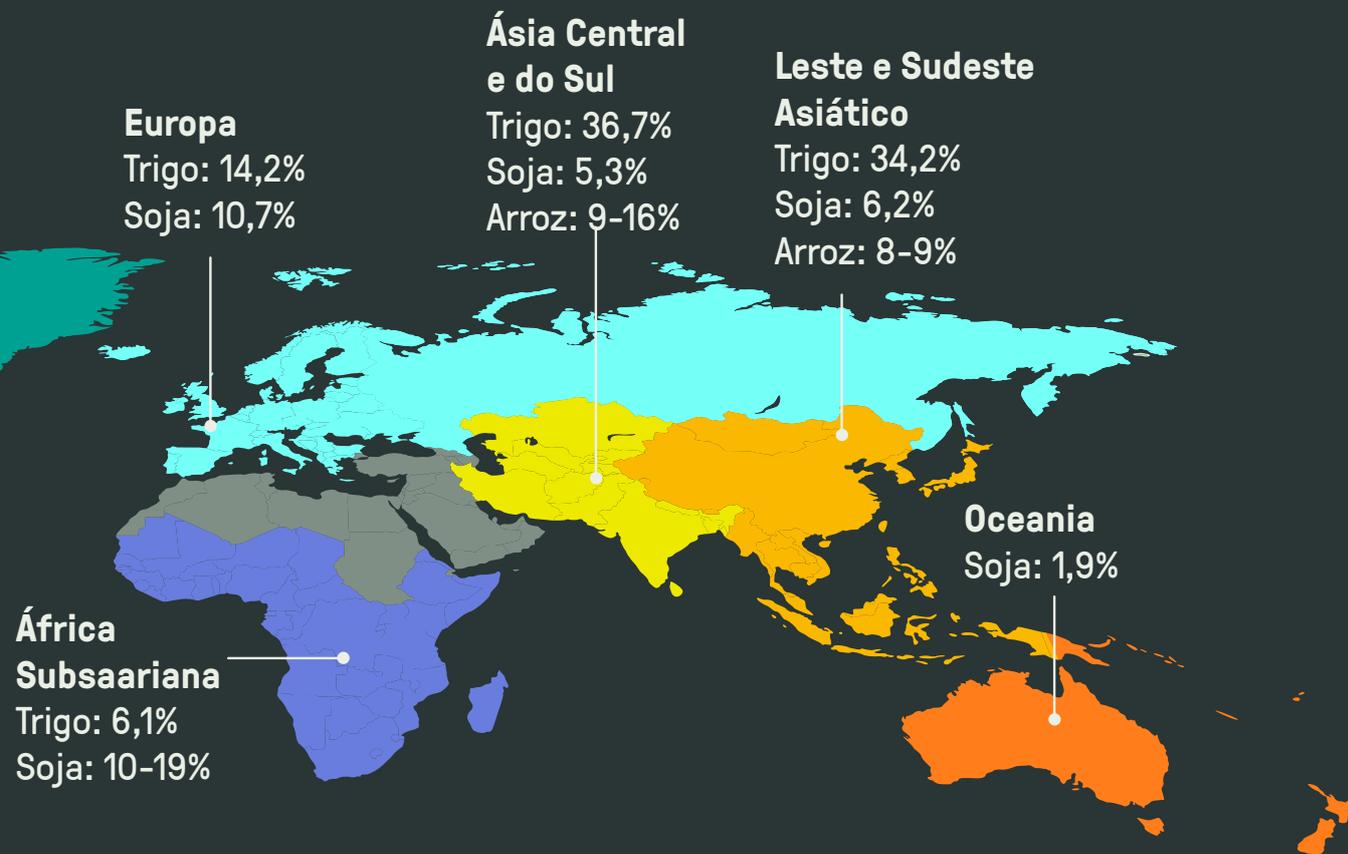


FIGURA 5: PERDA DA PRODUTIVIDADE RELATIVA REGIONAL ESTIMADA PARA CULTURAS BÁSICAS DEVIDO À EXPOSIÇÃO AO OZÔNIO

Fonte de dados: As estimativas foram coletadas da literatura mais recente disponível. Os valores regionais foram obtidos pela extrapolação dos dados de estudos de nível nacional e regional, quando necessário.^{32,33,34,35,36}

2. Um problema grave que provavelmente piorará

Os níveis de ozônio troposférico aumentaram aproximadamente 40% desde o período pré-industrial³⁷ e vêm mais recentemente aumentando 2-12% por década, dependendo da região. Esse aumento advém em larga medida de atividades humanas decorrentes da rápida industrialização e urbanização, que emitem grande volume de precursores do ozônio troposférico. Os maiores aumentos no ozônio troposférico são encontrados no Golfo Pérsico, na Índia, no leste da Ásia, no norte da América do Sul e no sudeste da Ásia.³⁸

O combate ao ozônio ao nível do solo se mostrou eficaz em algumas áreas. Dados coletados em diversos pontos da superfície indicam que as políticas de melhoria da qualidade do ar implementadas ao longo das últimas décadas contribuíram para a redução geral da concentração de ozônio ao nível do solo nos EUA e na Europa Ocidental.^{39,40} Contudo, medições de superfície em outras regiões, como a China continental, detectaram concentrações elevadas de ozônio ao nível do solo e uma tendência de crescimento.⁴¹ Isso apesar da significativa e recente redução nas emissões de NOx no mesmo período (2013 a 2017), o que ressalta a complexidade da questão das fontes precursoras. Aumentos semelhantes foram registrados noutros países do leste da Ásia (por exemplo, na República da Coreia e no Japão), bem como na Índia.⁴² Quanto ao seu impacto na saúde, esses aumentos na concentração de ozônio ao nível do solo elevaram em 38% a taxa global de mortalidade atribuível ao ozônio entre 1990 e 2019.⁴³

Nas próximas décadas, as mudanças nos níveis de ozônio troposférico dependerão dos caminhos políticos adotados em relação à descarbonização, à mitigação do metano e à redução da poluição. A prioridade dada ao combate ao ozônio troposférico e às suas causas na formulação de políticas será um fator decisivo. Cenários de altas emissões projetam aumentos nos níveis globais desse ozônio até 2050 em comparação a 2015, incluindo elevações de 8% no sul da Ásia e de 5% no Oriente Médio. Uma versão desse cenário com menos emissões de metano prevê uma redução global de 11% do ozônio troposférico no mesmo período.⁴⁴ Se as emissões de NOx, NMVOCs e CO também forem reduzidas, essa queda chegará a 19%.^{45,46,47} Tendências recentes observadas nos EUA e na Europa Ocidental mostram que diminuições maiores e mais rápidas são possíveis se o tema receber a atenção que merece.⁴⁸

Além da complexidade das respostas do ozônio troposférico aos futuros caminhos socioeconômicos, há ainda o desafio adicional de que o aquecimento do clima também influenciará, por sua vez, os níveis desse poluente. Há incerteza sobre como isso se desenrolará em nível local ou global.⁴⁹

Precisamos enfrentar esse problema de forma mais inteligente, de modo que beneficie tanto o clima quanto a saúde. Especificamente, é necessário integrar essa questão ao processo de tomada de decisão sobre as principais fontes emissoras dos poluentes precursores (vide a Seção 4). A oportunidade de mitigar a mudança climática e de melhorar a qualidade do ar em curto prazo requer um olhar mais atento.

“ Os níveis de ozônio troposférico aumentaram aproximadamente 40% desde o período pré-industrial.

3. Uma lacuna na estratégia global sobre o clima e a poluição atmosférica

É difícil reduzir as concentrações de ozônio troposférico devido à complexidade da sua formação fotoquímica, à diversidade das fontes emissoras dos seus poluentes precursores, às condições ambientais que favorecem sua formação e à capacidade tanto do ozônio quanto dos seus precursores de viajar longas distâncias – impactando regiões e comunidades distantes do local onde o ozônio foi formado ou seus precursores, emitidos. Assim, a mitigação da formação do ozônio troposférico requer a articulação entre políticas climáticas e de qualidade do ar, por meio de uma abordagem multipolvente e da cooperação das múltiplas partes interessadas. Isso criaria as bases para uma ação integrada mais abrangente voltada à mitigação da mudança climática e ao controle da qualidade do ar, áreas onde hoje há grandes lacunas.



MUDANÇA CLIMÁTICA

Muitas pesquisas foram feitas e numerosas políticas foram implementadas para combater o ozônio troposférico desde que ele foi reconhecido como nocivo à saúde humana, na década de 1950. Contudo, o reconhecimento das interações entre a qualidade do ar local e a mudança climática global ainda é insuficiente. Resulta haver poucos estudos sobre os efeitos climáticos do ozônio troposférico e os ciclos de “feedback” nos níveis local, regional e global.

Apesar de ser um gás de efeito estufa, o ozônio troposférico não foi incluído no Acordo de Paris e tampouco é citado em acordos tratando de “todos os gases de efeito estufa”.⁵⁰ Poucos planos nacionais de redução de emissões, conhecidos como Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), mencionam o ozônio troposférico, destacando-se como exceções notáveis as da Tunísia e da Micronésia. Os precursores do ozônio troposférico são mencionados em número maior de NDCs, incluindo os da Nigéria, de Tonga e do Marrocos.⁵¹ Mas a maior parte desses precursores tipicamente não consta dos relatórios climáticos publicados no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (UNFCCC), e muitos países carecem de inventários de emissões nacionais e subnacionais.

As políticas climáticas implementadas vêm há muitos anos negligenciando as sinergias e interações entre as medidas voltadas ao clima e à poluição atmosférica, apesar de esses dois problemas claramente exigirem tratamento conjunto e do papel fundamental que os superpoluentes (ozônio troposférico, metano, carbono negro) têm em ambos.

O IPCC está elaborando um Relatório Metodológico sobre Inventários das Forçantes Climáticas de Vida Curta, previsto para 2027, contendo orientações para que governos publiquem dados sobre as emissões de precursores do ozônio troposférico.⁵² Alguns países – o México, por exemplo – já assumiram a liderança ao incluir, juntamente com os gases de efeito estufa, as emissões desses precursores nos seus inventários nacionais e processos de medição, publicação de dados e verificação (MRV).⁵³ Por meio da pioneira Aliança para o Ar Limpo (Alliance for Clean Air), coordenada pelo Fórum Econômico Mundial para galvanizar a ação do setor privado, algumas empresas multinacionais também já divulgam informações sobre as suas emissões desses precursores.⁵⁴



POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE

Historicamente, o problema do ozônio troposférico tem sido tratado como uma questão de poluição atmosférica e de saúde. Seguindo a orientação da OMS, alguns governos - por exemplo, da China, da União Europeia, do México, da África do Sul, dos EUA e do Reino Unido - estabeleceram limites para a exposição de curto prazo ao ozônio troposférico, mas a maioria das metas nacionais fica aquém daquelas preconizadas pela OMS. Até onde sabemos, a diretriz para exposição de longo prazo introduzida nas Diretrizes da OMS em 2021 ainda não foi incorporada a nenhuma norma nacional de qualidade do ar.

Fóruns e redes regionais - como a Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça de Longa Distância (LRTAP) da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) e a Rede de Monitoramento da Deposição de Ácido no Leste Asiático (EANET) - têm longo histórico de cooperação internacional sobre a poluição atmosférica, incluindo o ozônio troposférico. As Partes do Protocolo de Gotemburgo, no âmbito da LRTAP, assumiram compromissos de redução das emissões de precursores como NO_x e NMVOCs, mas não de metano e monóxido de carbono (CO). A revisão do protocolo hoje em curso representa uma oportunidade para inclusão dos precursores faltantes.

O material particulado fino (PM_{2,5}) tem o maior impacto direto na saúde, sendo por isso frequentemente utilizado como indicador substituto ("proxy") para a exposição à poluição atmosférica. Além das ações voltadas ao PM_{2,5}, é necessário incluir e fortalecer os métodos de monitoramento e redução do ozônio troposférico e dos seus precursores nas estratégias de controle da qualidade do ar nos níveis regional, nacional e local, abrangendo todas as fontes de poluição atmosférica.

De modo geral, é necessário ampliar a conscientização dos atores climáticos sobre o ozônio troposférico - em termos dos seus níveis crescentes de exposição, efeitos na saúde e impactos mais amplos - em prol dos esforços coletivos para sua mitigação.



AGRICULTURA E ECOSISTEMAS

Um dos fatores que limitam a eficácia das ações de mitigação dos efeitos do ozônio na vegetação é a falta de monitoramento em áreas rurais, especialmente nos países em desenvolvimento.⁵⁵ Essa lacuna de dados dificulta a avaliação precisa do impacto do ozônio na segurança alimentar de cada país e na degradação dos serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e a biodiversidade.⁵⁶ Da mesma forma, as pesquisas sobre os impactos do ozônio na agricultura se concentram apenas num subconjunto de regiões. Precisamos fazer mais para discutir e comunicar esses impactos nas lavouras e ecossistemas com as partes interessadas dos setores de alimentos, agricultura e biodiversidade, abrangendo uma gama mais ampla de regiões geográficas.

COMO COMBATER O OZÔNIO TROPOSFÉRICO?

Nosso conhecimento atual sobre os efeitos nocivos das fontes emissoras de precursores do ozônio troposférico já é suficiente para justificar ações imediatas. Mas ainda restam importantes dúvidas sobre quais políticas e medidas serão mais eficazes para maximizar os potenciais benefícios climáticos, de saúde e agrícolas nos próximos anos, especialmente diante das variações nos contextos locais e nos níveis de esforço voltados à ação climática e à melhoria da qualidade do ar.⁵⁷

As concentrações do ozônio troposférico são influenciadas por fontes regionais e locais, variando em função de reações químicas complexas. Para serem eficazes, estratégias de controle devem ser formuladas especificamente para cada combinação de emissões de poluentes precursores e escala de interesse. Resulta que as estratégias dependem de fontes de dados locais relevantes, além de diretrizes e ferramentas claras que orientem a tomada de decisão. Essas duas áreas ainda exigem avanços significativos. A coordenação de esforços em todos os níveis, do subnacional ao internacional, também é importante considerando que as mudanças nas emissões impactarão o ozônio troposférico tanto localmente quanto em regiões mais distantes da fonte.

As ações de redução das emissões frequentemente envolvem dilemas (“trade-offs”). Por exemplo, a substituição de certos biocombustíveis para reduzir as

emissões líquidas de dióxido de carbono pode inadvertidamente aumentar as emissões de precursores do ozônio troposférico.

Da mesma forma, avanços tecnológicos voltados ao uso de hidrogênio em motores de combustão tendem a gerar mais emissões de NOx do que aqueles direcionados ao uso de células a combustível de hidrogênio. Por isso, é importante usar uma abordagem integrada e multipolvente ao considerar políticas e medidas de redução das emissões de gases de efeito estufa, superpoluentes e poluentes atmosféricos. Esforços de mitigação climática que desconsiderem seus efeitos nos níveis de ozônio troposférico podem levar à perda de oportunidades ou gerar consequências imprevistas.

Em termos de políticas e medidas, os precursores do ozônio troposférico têm origem numa ampla gama de setores, como mostra a Tabela 1 abaixo. Muitas dessas alavancas políticas podem já ter sido incluídas em estratégias governamentais de emissão líquida zero e/ou de melhoria da qualidade do ar. Algumas fontes, como as emissões de NMVOCs da indústria química, evidenciam áreas que demandam esforços adicionais e mais direcionados para reduzir seu impacto sobre o ozônio troposférico. Em outras, como o setor de aviação, compreender o impacto das emissões de NOx nos níveis de ozônio troposférico é fundamental para aprimorar a avaliação e agir de forma eficaz sobre os impactos climáticos dessas emissões.



Labaredas emitidas por uma instalação industrial em Witbank, Emalahleni, África do Sul.
Crédito: Gulshan Khan / Climate Visuals

SETOR	ALAVANCAS POLÍTICAS	POLUENTES MITIGADOS
Setores de petróleo, gás e carvão	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar programas de detecção sistemática e reparo de vazamentos de gasodutos, implementar tecnologias de controle de emissões em usinas de geração, substituir equipamentos obsoletos por alternativas mais eficientes e eliminar práticas como a queima de gás ("flaring"), salvo em casos de emergência.⁵⁸ Instalar sistemas de extração de metano em minas de carvão para capturar o metano antes que ele se disperse na atmosfera.⁵⁹ Promover políticas de incentivo ao investimento em tecnologias de captura e aproveitamento do metano, como a geração de energia ou a produção de outros produtos. 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, CO, NOx, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM2,5, PM10</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N2O, CO2</p>
Setor elétrico	<ul style="list-style-type: none"> Acelerar a transição para fontes renováveis de energia e tecnologias limpas, acompanhada da implementação de normas rigorosas para as emissões das usinas existentes.⁶⁰ Adotar programas de eficiência energética que levem à redução do consumo de energia elétrica no setor. Adotar estratégias eficazes de mudança comportamental focadas na eficiência energética, visando à redução da demanda por eletricidade. 	<p>Precusores do ozônio troposférico: NOx, CO</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM2,5, PM10, SO2</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N2O, CO2</p>
Combustão industrial	<ul style="list-style-type: none"> Implementar tecnologias avançadas para redução das emissões residuais resultantes da queima de combustíveis fósseis. Os métodos eficazes de controle de emissão de NOx incluem queima com baixo teor de NOx, requeima com gás natural, redução catalítica e não catalítica, controle do excesso de ar, modificação da combustão do ar de superaquecimento, recirculação dos gases de combustão e combustão estequiométrica.⁶¹ Tornar obrigatória a implementação de sistemas de monitoramento contínuo de emissões (CEMS) em grandes unidades industriais.⁶² Introduzir a tributação progressiva das emissões de NOx com base no volume gerado.⁶³ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: NOx, CO, NMVOCs, metano</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM2,5, PM10, SO2</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N2O, CO2</p>
Processos industriais (indústria de produtos químicos orgânicos e de cimento)	<ul style="list-style-type: none"> Estabelecer normas e equipamentos de controle para indústrias fabris muito dependentes de solventes orgânicos. Promover a adoção de combustíveis alternativos e o aumento da eficiência energética, com o objetivo de reduzir as emissões diretas e os precursores do ozônio troposférico.⁶⁴ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: NOx, CO, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM2,5, PM10</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N2O, CO2</p>
Cadeia de abastecimento de combustíveis	<ul style="list-style-type: none"> Aplicar medidas de controle das emissões evaporativas em toda a cadeia de abastecimento de gasolina e gás, desde a produção até a distribuição.⁶⁵ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: NMVOCs, metano</p>
Setor agropecuário - Pecuária	<ul style="list-style-type: none"> Aprimorar as práticas de manejo animal, incluindo a melhoria da alimentação, gestão da saúde, nutrição e reprodução. Incorporar aditivos alimentares que reduzam a emissão de metano. Adotar práticas de manejo do esterco - por exemplo, uso de separadores sólido-líquido, diminuição do tempo de armazenamento, cobertura das lagoas de armazenamento, uso adequado de digestores anaeróbicos e de aditivos e tecnologias avançadas. 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano</p> <p>Outros poluentes climáticos: N2O</p>
Setor agropecuário - Agricultura	<ul style="list-style-type: none"> Aprimorar o manejo da água no cultivo do arroz por meio da semeadura direta, do uso de aditivos inibidores de metano, da compostagem da palha e da introdução de espécies híbridas alternativas na produção de arroz. Promover o uso de fertilizantes de liberação lenta e tecnologias de aplicação de alta precisão, com o objetivo de minimizar as emissões de óxido nitroso, um potente gás de efeito estufa, e de substâncias que destroem a camada de ozônio. Promover práticas sustentáveis, como a redução do revolvimento do solo, o uso de cobertura vegetal e a rotação de culturas, a fim de melhorar a saúde do solo, reduzir a erosão e aumentar o sequestro de carbono.⁶⁶ Defender a substituição da queima de matéria orgânica no campo por estratégias alternativas que preservem a integridade do solo, reduzam a erosão e minimizem a emissão de poluentes, incluindo precursores do ozônio troposférico.⁶⁷ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, NOx, VOC</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM2,5, PM10, NH3</p> <p>Outros poluentes climáticos: N2O</p>

Resíduos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> Implementar estratégias de redução do descarte de resíduos orgânicos e recicláveis em aterros sanitários, promovendo práticas sustentáveis como a compostagem, a digestão anaeróbica em diferentes escalas, programas de economia circular e a reutilização de materiais. Incentivar programas de prevenção ou proibição da queima de resíduos a céu aberto. 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, NMVOCs, CO</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: NH₃, PM_{2,5}, SO₂</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro</p>
Transporte rodoviário	<ul style="list-style-type: none"> Incentivar a mudança para meios de transporte mais limpos, priorizando o uso de veículos não motorizados e implementando estratégias que reduzam a dependência de veículos particulares. Promover a adoção ampla de veículos elétricos, incluindo veículos autônomos, e ampliar as redes de transporte público eletrificado. Priorizar a substituição dos combustíveis fósseis por alternativas mais limpas, como hidrogênio verde e biocombustíveis, com vistas à redução significativa das emissões de NO_x, COV e CO.^{68,69} Implementar normas rigorosas para as emissões de NO_x dos veículos a diesel, especialmente os veículos pesados de transporte rodoviário e os equipamentos "off-road" utilizados nos setores de construção e agrícola.⁷⁰ Incentivar programas estabelecendo zonas de baixa emissão.⁷¹ Incentivar programas obrigatórios de inspeção e controle de emissões. 	<p>Precusores do ozônio troposférico: CO, NO_x, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM_{2,5}, PM₁₀</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, CO₂</p>
Incêndios florestais e queimadas	<ul style="list-style-type: none"> Os incêndios florestais e as queimadas liberam na atmosfera altos níveis de precursores do ozônio troposférico. As estratégias de mitigação incluem: Fazer o manejo da biomassa combustível com o uso de queimadas controladas e pastoreio regulado, empregando sistemas avançados de detecção, como VANTs e sensoriamento remoto.⁷² Promover medidas preventivas, como campanhas educativas, e o planejamento do uso do solo com enfoque na resistência ao fogo.⁷³ Reforçar a coordenação entre agências, comunidades e proprietários de terras. Investir na pesquisa do comportamento do fogo e no fortalecimento da capacidade de combate a incêndios com treinamento e equipamento moderno.⁷⁴ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, CO, NO_x, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM_{2,5}, PM₁₀</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N₂O, CO₂</p>
Energia predial	<p>Ambientes rurais</p> <ul style="list-style-type: none"> Promover a adoção de fogões e lareiras ecológicas com sistemas de ventilação que direcionem a fumaça para o exterior. Para substituir o uso da lenha como combustível, incentivar a utilização de painéis solares e sistemas de aquecimento elétrico para a cocção e conservação de alimentos e para a calefação. Reforçar programas de educação que promovam práticas sustentáveis, consumo responsável de lenha e iniciativas de reforestamento.⁷⁵ <p>Ambientes urbanos</p> <ul style="list-style-type: none"> Promover a transição para eletrodomésticos mais eficientes e melhorar o isolamento térmico das moradias. Incentivar programas de substituição dos sistemas convencionais a eletricidade ou gás - como fogões, aquecedores de água e ar condicionado - por sistemas a energia solar.⁷⁶ Introduzir tecnologias sustentáveis nas normas de construção para novas moradias.⁷⁷ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, CO, NO_x, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM_{2,5}, PM₁₀</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N₂O, CO₂</p>
Aviação	<ul style="list-style-type: none"> Uma abordagem abrangente para o setor da aviação exige o desenvolvimento de Combustíveis de Aviação Sustentáveis (SAFs) e de alternativas baseadas no hidrogênio. Implementar iniciativas de eficiência energética nas instalações terrestres, com a utilização de fontes alternativas de energia. Implementar processos de certificação para aeronaves de nova geração. Estabelecer metas obrigatórias de redução das emissões do setor de aviação para assegurar progresso mensurável e responsabilidade na prestação de contas.⁷⁸ 	<p>Precusores do ozônio troposférico: metano, CO, NO_x, NMVOCs</p> <p>Outros poluentes atmosféricos: PM_{2,5}, PM₁₀</p> <p>Outros poluentes climáticos: carbono negro, N₂O, CO₂</p>

ESTUDOS DE CASO

Várias cidades e regiões conseguiram reduzir o ozônio troposférico, algumas de forma mais duradoura do que outras. Identificar as práticas mais eficazes e as lições que essas regiões têm a nos ensinar contribuirá para a criação de soluções abrangentes aplicáveis a outras áreas.

Note-se que a maior parte dos estudos de caso e dados disponíveis decorre da ênfase dada ao ozônio ao nível do solo por cientistas, formuladores de políticas e entidades atuantes no campo da poluição atmosférica. Há uma lacuna significativa na avaliação e na liderança das ações a respeito do ozônio troposférico sob a perspectiva da mudança climática, sendo urgentemente necessária uma ação integrada

para enfrentar o problema de maneira abrangente.

LOS ANGELES, CIDADE DO MÉXICO, BEIJING E A EUROPA ESCOLHERAM CAMINHOS DIFERENTES PARA COMBATER O OZÔNIO TROPOSFÉRICO. EMBORA CADA UM DESSES EXEMPLOS CONTE UMA HISTÓRIA DIFERENTE, HÁ LIÇÕES IMPORTANTES A TIRAR DESSES ESTUDOS DE CASO:

- O sucesso da mitigação depende de: informações científicas abrangentes; coleta contínua de dados em campo; inventários integrados de emissões em níveis regional e local; vontade política; disponibilidade de recursos econômicos e tecnológicos; além de coordenação e cooperação entre múltiplos atores.
- Historicamente, os avanços na mitigação do ozônio troposférico decorreram da adoção de normas ambiciosas de controle da qualidade do ar. As abordagens integradas aos esforços de mitigação da mudança climática são reconhecidas como as melhores práticas.
- Embora tenha havido êxito na redução dos precursores do ozônio troposférico, os significativos desafios remanescentes reforçam a necessidade de esforços contínuos e coordenados.
- O controle eficaz do ozônio troposférico requer monitoramento mais robusto e investimento em capacitação para abordar os dilemas apresentados pelas estratégias voltadas às diferentes fontes e setores emissores. As estratégias de mitigação devem ser adaptadas às especificidades de cada local e de cada combinação de poluentes. Elas também precisam ser dinâmicas, adaptando-se às mudanças nos precursores e nas fontes de emissão ao longo do tempo e permitindo às autoridades tomar medidas contínuas para a redução do ozônio troposférico.
- O benefício que a mitigação do ozônio troposférico trará ao clima é frequentemente negligenciado. Foram conduzidas poucas análises sobre os benefícios climáticos do controle do ozônio troposférico em diferentes escalas, o que abriu significativa lacuna de evidências nessa área. Reconhecer os múltiplos benefícios climáticos da mitigação do ozônio troposférico é fundamental para conceber medidas que integrem diversos objetivos, como a melhoria da qualidade do ar e o enfrentamento da mudança climática.

Bacia de Los Angeles

Los Angeles talvez seja o exemplo mais famoso da adoção de medidas de controle da poluição destinadas a combater o ozônio troposférico.

As concentrações médias máximas diárias de ozônio troposférico, mensuradas em janelas de oito horas, caíram 32% em toda essa cidade californiana entre 1987 e 2000.

Desde a década de 1980, as emissões de NMVOCs provenientes dos setores de transporte e de produtos químicos (por exemplo, pesticidas) foram reduzidas em até 70%. As emissões de NOx e do setor de transportes diminuíram mais de 50% no mesmo período.

Los Angeles teve êxito graças à implementação em todo o estado de uma estratégia abrangente abarcando ampla gama de ferramentas e medidas políticas. Os principais componentes desta estratégia são:

1. O Programa de Mercados de Incentivo ao Ar Limpo Regional (RECLAIM) utiliza mecanismos de mercado para promover a redução das emissões industriais de NOx e SOx.
2. O Programa Memorial Carl Moyer oferece incentivos financeiros à adoção de tecnologia de baixa emissão em 35 distritos locais de monitoramento da qualidade do ar.
3. O Programa Regulatório de Produtos de Consumo tem como foco a redução das emissões de NMVOCs provenientes de produtos domésticos e de cuidados pessoais.

Esses programas inovadores são coordenados pelo Conselho de Recursos do Ar da Califórnia (*California Air Resources Board*), que supervisiona 15 bacias e 25 distritos de monitoramento da qualidade do ar, apoiando-se em capacidades técnicas, gerenciais e legais aprimoradas. As políticas são elaboradas de modo a assegurar uma implementação eficaz em áreas com populações altamente diversificadas, com o objetivo de proteger as comunidades mais vulneráveis e desfavorecidas contra os impactos desproporcionais da poluição. O arcabouço regulatório da Califórnia continua sendo referência para programas de qualidade do ar noutros estados.

O progresso na redução dos níveis de ozônio troposférico em Los Angeles e em outras regiões da Califórnia estagnou nos últimos anos, apesar das reduções nos precursores. Alguns estudos ligam certos fenômenos de mudança climática cada vez mais frequentes na Califórnia - ondas de calor, secas e incêndios florestais - ao aumento dos níveis locais de ozônio.

Em nível nacional, as contestações judiciais à autoridade da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) para estabelecer normas e regulamentos de emissões terão impactos concretos sobre as autoridades estaduais e municipais. Em junho de 2024, a Suprema Corte dos EUA suspendeu a política de "boa vizinhança" da EPA, que tinha por objetivo reduzir as emissões de ozônio em estados vizinhos. O assunto continua "sub judice".



Área Metropolitana da Cidade do México

A Área Metropolitana da Cidade do México (AMCM), uma das maiores cidades do mundo, enfrentou graves problemas de qualidade do ar no início dos anos 90. Em 1992, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a OMS declararam a cidade como a mais poluída do mundo.⁷⁹

O México reagiu implementando um arcabouço regulatório abrangente. A Lei Geral de Equilíbrio Ecológico e Proteção Ambiental atribuiu responsabilidades jurisdicionais específicas aos governos federal, estadual e local para o enfrentamento dos altos níveis de poluição atmosférica, incluindo o controle do ozônio troposférico. Para enfrentar os desafios na AMCM, foi adotada uma abordagem regional, com a criação da Comissão Metropolitana Ambiental para coordenar a ação numa área maior.

As normas criadas ao longo da década de 1990 tinham como objetivo controlar importantes precursores do ozônio troposférico, especificamente NMVOCs e NOx, sendo o setor de transportes identificado como a sua fonte primária. A prefeitura tomou medidas para aprimorar a tecnologia veicular e a qualidade dos combustíveis, promovendo sistemas de controle de emissões e reformulando a composição da gasolina para limitar o teor de NMVOCs reativos. As autoridades também promoveram: o transporte público, a restrição ao uso de veículos particulares e o aprimoramento do planejamento urbano e da educação ambiental. Também foram reduzidas as emissões das principais indústrias, por meio da substituição do óleo combustível pesado por gás natural e da diminuição de vazamentos.

Implementadas a partir de 1990, essas intervenções resultaram em significativas melhorias:

- A proporção de dias com níveis de ozônio ao nível do solo acima do teto (>70 ppb) caiu de 80%, em 1990, para 50%, em 2010. Os picos horários de ozônio caíram de 85-185 ppb (1990) para 57-92 ppb (2015).
- Entre 1990 e 2015, as concentrações de ozônio nos meses de pico apresentaram redução superior a 30%, considerando os valores máximos horários.
- Outros poluentes também apresentaram reduções acentuadas nas suas concentrações entre 1990 e 2015: CO (92%), NO2 (50%), SO2 (99%) e PM10 (92%).⁸⁰

Apesar das diferenças significativas em termos de capacidade institucional, recursos financeiros e conhecimento técnico, a AMCM se beneficiou da experiência de Los Angeles - que havia iniciado seus esforços para melhorar a qualidade do ar duas décadas antes - e adotou estratégias e tecnologias semelhantes de controle de emissões.⁸¹

O êxito da Cidade do México na mitigação do ozônio é mais bem ilustrado pelos benefícios observados na saúde pública dos seus habitantes. Por exemplo, a redução dos níveis de ozônio troposférico na cidade entre 1990 e 2015 evitou aproximadamente 4.100 mortes precoces, alongando a expectativa de vida em quase dois anos.⁸² Os anos de vida perdidos por morte precoce e vividos com problemas de saúde caíram do pico de 143, em 1990, para 42 por 100.000 habitantes.⁸³

Contudo, desde 2010 não se consegue reduzir os níveis de ozônio troposférico. Atualmente, 60-70% dos dias ainda registram concentrações máximas de ozônio superiores aos níveis considerados saudáveis pelas autoridades locais. Isso nos mostra que, embora as medidas de controle adotadas tenham comprovado que uma cidade grande e complexa pode melhorar a qualidade do ar e reduzir os níveis locais de ozônio troposférico, a combinação distinta de poluentes precursores e fontes de emissão - somada à contínua expansão urbana em diferentes paisagens e à mudança climática - vem limitando a eficácia dessas medidas e impedindo novas reduções nas concentrações de ozônio.

Beijing e arredores

Beijing abrange diversas zonas geográficas, desde o seu núcleo urbano até a periferia rural, o que significa que os padrões de poluição atmosférica variam de uma parte para outra da cidade. Entre 1998 e 2022, a população cresceu 76,5% e o consumo de energia aumentou 82%, mas as concentrações médias anuais de poluentes-chave diminuíram drasticamente. A queda foi de 97% para SO₂, 69% para NO₂, 71% para PM₁₀ e 6,6% para o ozônio troposférico (máxima de oito horas, percentil 90).⁸⁴

A prefeitura adotou medidas cada vez mais sofisticadas para melhorar a qualidade do ar, integrando o controle de PM_{2,5} e do ozônio troposférico às metas de mitigação de carbono.⁸⁵ Entre 2013 e 2017, essas ações resultaram na redução de 43% nas emissões de NO_x - com foco principal em veículos e caldeiras a carvão - e de 42% nas emissões de NMVOCs, concentrando-se em fontes industriais, residenciais e móveis.

É importante ressaltar que Beijing, Tianjin e 26 municípios vizinhos operam sob uma estrutura regional inovadora concebida para coordenar o controle dos poluentes nocivos, incluindo o ozônio troposférico. Essa estrutura abrange planejamento integrado, monitoramento padronizado, respostas coordenadas a emergências e compartilhamento de dados em tempo real entre as diferentes jurisdições. Esse modelo contribuiu significativamente para a melhoria da qualidade do ar em toda a região e pode servir de referência para outras grandes áreas metropolitanas que enfrentam problemas de poluição atmosférica.

Uma lição fundamental do caso de Beijing é a necessidade de políticas de incentivo econômico que ofereçam apoio financeiro às medidas de controle da poluição, por meio de subsídios, taxas, incentivos fiscais e mecanismos de precificação. Além disso, Beijing aumentou significativamente os recursos financeiros dedicados à melhoria da qualidade do ar, multiplicando-os por dez em oito anos.

Os níveis de ozônio troposférico em Beijing ainda apresentam variações significativas, e os efeitos das políticas de redução não têm sido consistentes em toda a cidade e nos seus arredores. A cidade ainda registra concentrações de ozônio acima dos limites recomendados, e os dias de alta poluição continuam a representar riscos significativos à saúde. Similarmente à Cidade do México, as mudanças nas fontes de poluição - resultantes de ações anteriores para melhorar a qualidade do ar, entre outros fatores - influenciaram os níveis de ozônio troposférico. A próxima fase da estratégia de Beijing para o controle da poluição atmosférica buscará alinhar os padrões de qualidade do ar com as metas climáticas, com foco específico no duplo impacto do ozônio troposférico sobre o clima e a qualidade do ar.⁸⁶



Europa

A União Europeia é um exemplo importantíssimo de como as políticas regionais e a cooperação podem ser eficazes no enfrentamento do ozônio troposférico. A Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (UNECE) estabeleceu, em 1983, a primeira convenção ambiental de caráter regional: a Convenção sobre Poluição Atmosférica Transfronteiriça de Longa Distância (CLRTAP), com o objetivo de reduzir as emissões e o transporte de longa distância de poluentes nocivos, abrangendo inicialmente a Europa e a América do Norte. Adotado em 1999 no âmbito da CLR-TAP e revisado em 2012, o Protocolo de Gotemburgo para Reduzir a Acidificação, a Eutrofização e o Ozônio ao Nível do Solo é uma norma de caráter obrigatório que estabelece limites máximos para as emissões nacionais de NOx, SO2, NMVOCs, amoníaco (NH3) e partículas finas (PM2,5). O Protocolo determina às Partes com os níveis mais altos de emissões, cujas emissões causem impactos mais graves à saúde humana e/ou ao meio ambiente, ou possam ser reduzidas a custo relativamente baixo, que façam os maiores cortes.⁸⁷ Vinte e sete Partes da UNECE são signatárias do Protocolo de Gotemburgo.

A União Europeia também regulamenta o ozônio e seus precursores por meio de diversos instrumentos legais, incluindo a Diretiva e os Compromissos Nacionais de Teto de Emissões, a Diretiva da Qualidade do Ar Ambiente e outras metas e regulamentos regionais voltados à redução de emissões nos setores industrial, de transportes e de geração de energia.

Houve significativo progresso na redução das emissões de precursores de ozônio troposférico em toda a UE como resultado desse conjunto de regulamentos regionais. Entre 2005 e 2022, as emissões de NOx e NMVOCs caíram 50% e mais de 30%, respectivamente.⁸⁸ As concentrações de ozônio ao nível do solo na região permanecem sujeitas a elevado grau de flutuação. No entanto, dados da Agência Europeia do Meio Ambiente (AEA) indicam uma tendência geral e gradual de queda na proporção da população urbana exposta a níveis elevados de ozônio, passando de um pico de 64% em 2003 para 19% em 2022.⁸⁹

Embora essa redução seja significativa, ela contrasta com a exposição a outros poluentes, como o dióxido de nitrogênio (NO2): menos de 1% da população da UE esteve exposta a concentrações acima dos limites europeus de qualidade do ar. Apesar dessas melhorias significativas na qualidade do ar europeu nos últimos 30 anos, o ozônio troposférico continua sendo um dos poluentes mais difíceis de serem combatidos.

A revisão atualmente em curso do Protocolo de Gotemburgo oferece às Partes a oportunidade de assumir compromissos mais ambiciosos de redução das emissões de poluentes precursores do ozônio troposférico e de definir novas metas obrigatórias para poluentes nocivos ainda não contemplados explicitamente no protocolo, como o metano e o carbono negro.



Cerca de 70% das fontes altamente poluentes de calefação residencial em Gierałtowice, na Polônia, já foram substituídas, mas as remanescentes ainda contribuem grandemente para a poluição atmosférica, especialmente à noite, quando os habitantes voltam para suas casas e ligam a calefação. Crédito: Anna Liminowicz/Climate Visuals

RECOMENDAÇÕES

As recomendações abaixo se destinam a formuladores de políticas, pesquisadores e financiadores. Essas medidas podem ajudar a mitigar a mudança climática nas próximas décadas, melhorar a qualidade do ar para bilhões de pessoas e reforçar a segurança alimentar global.

Elaboração de políticas e regulamentação

A liderança e a ação rápida sobre o ozônio troposférico são fundamentais para - em conjunto com a descarbonização profunda e com o combate a outros superpoluentes e à poluição atmosférica de forma geral - mitigar os piores efeitos da mudança climática e da degradação da qualidade do ar. Os formuladores de políticas devem:

DEMONSTRAR LIDERANÇA E AMBIÇÃO QUANTO ÀS AGENDAS INTERNACIONAIS DO CLIMA E DA SAÚDE:

- Promover esforços para que o ozônio troposférico e outros poluentes não CO₂ sejam incorporados com destaque nos processos e relatórios da CQNUMC, com base no resultado do Balanço Global de 2023 da ONU (Decisão 1/CMA.5, 2023), que conclama as Partes a contribuir para a redução acelerada e substancial das emissões não CO₂ até 2030.
- Aderir ao Compromisso Global do Metano e assegurar sua plena implementação.
- Incluir a redução das emissões de metano como requisito nas metas aplicáveis aos gases de efeito estufa em toda a economia, além de incluir, nas versões atualizadas das Contribuições Nacionalmente Determinadas, medidas adicionais e metas específicas voltadas à redução das emissões de precursores do ozônio troposférico.⁹⁰
- Defender o desenvolvimento e a adoção do Relatório Metodológico do IPCC de 2027 sobre Inventários para Forçantes Climáticas de Vida Curta. Os países que já mantêm inventários integrados e avançados de emissões e qualidade do ar, incluindo gases de efeito estufa, devem ser considerados "adotantes iniciais".
- Cumprir os objetivos do Acordo de Paris e do Programa de Trabalho de Nairóbi da CQNUMC, integrando a saúde e o desenvolvimento sustentável às negociações governamentais e às estratégias de resposta às ameaças da mudança climática.
- Adotar, apoiar e fortalecer abordagens regionais de combate à poluição atmosférica, por exemplo:
 - Estabelecendo compromissos obrigatórios e ambiciosos, atualizados, de redução das emissões de NMVOCs e NO_x, bem como novos compromissos específicos de redução das emissões de metano e carbono negro, no âmbito do processo de revisão do Protocolo de Gotemburgo da UNECE.
 - Apoiando os esforços de mitigação e promovendo a inclusão, com destaque, do ozônio troposférico e de outros superpoluentes em programas regionais, como o Plano de Ação Regional da ONU sobre Poluição Atmosférica (ESCAP) e o Programa Africano para a Melhoria da Qualidade do Ar da UNEA.

ADOTAR UMA ABORDAGEM INTEGRADA E MULTIPOLUENTE PARA ENFRENTAR A MUDANÇA CLIMÁTICA E A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA:

- Elaborar e implementar políticas e medidas que considerem os efeitos de múltiplos poluentes, as suas fontes específicas de emissão, as interações entre poluentes emitidos conjuntamente, as emissões primárias e a formação secundária de poluentes. Isso significa, por exemplo, que os esforços para reduzir o PM_{2,5} devem levar em conta seus efeitos sobre o ozônio troposférico e que as políticas e os instrumentos de controle da qualidade do ar devem estar integrados às estratégias de enfrentamento da mudança climática.
- Promover uma colaboração intergovernamental eficaz, de modo a facilitar a integração entre abordagens nacionais e subnacionais:
 - Implantar inventários integrados de emissões abarcando todos os gases de efeito estufa, superpoluentes e poluentes atmosféricos. Compartilhar dados e metodologias de compilação de forma irrestrita, por meio de estruturas regionais e globais relevantes, como os Relatórios Bienais de Transparência.
 - Criar e manter redes de monitoramento do ozônio troposférico e de outros poluentes atmosféricos, usando os dados disponíveis para subsidiar ações de controle da qualidade do ar e planos de mitigação da mudança climática.
 - Garantir a integração entre os trabalhos voltados ao metano - frequentemente conduzidos pelos órgãos dedicados à mudança climática - e os relacionados ao ozônio troposférico e seus poluentes precursores - frequentemente liderados por órgãos de controle da poluição atmosférica -, de modo que as políticas sejam elaboradas de forma holística, considerando todos os poluentes relevantes.

IMPLEMENTAR MEDIDAS OUSADAS E ABRANGENTES VOLTADAS ÀS FONTES PRECURSORAS DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO:

- Compreender e analisar as fontes de precursores do ozônio troposférico, identificando medidas adicionais específicas para aquelas fontes que não tenham sido contempladas noutras ações, por exemplo, voltadas às indústrias químicas ou ao uso de solventes.
- Atualizar e aplicar normas sobre o ozônio troposférico alinhadas às diretrizes e metas provisórias da OMS.
- Acelerar a transição para fontes de energia mais limpas e melhorar a eficiência energética:
 - Criar e implementar normas mais rigorosas de controle de todos os poluentes atmosféricos, gases de efeito estufa e superpoluentes.
 - Definir ações estratégicas para os setores que mais contribuem para a emissão de precursores do ozônio troposférico.
 - Acelerar os programas de eficiência energética e a transição para fontes de energia mais limpas.
 - Criar e implementar programas inovadores, tais como: mecanismos de mercado para redução de emissões industriais; incentivos financeiros para adoção de tecnologias de baixa emissão; e instrumentos regulatórios voltados à diminuição das emissões de precursores em setores estratégicos.
- Adaptar as políticas aos contextos e às fontes de emissão locais. Criar e reforçar estruturas de apoio à ação nos níveis subnacional e nacional.

Ciência e pesquisa

Já sabemos o suficiente para acelerar as ações voltadas à redução das emissões de precursores do ozônio troposférico. No entanto, dúvidas importantes e questões-chave seguem sem resposta ou solução. Suprir essas lacunas aprimorará nosso conhecimento e nos permitirá formular políticas mais eficazes, maximizando os potenciais benefícios para o clima, a saúde e a agricultura.

É fundamental que tomadores de decisão e cientistas colaborem uns com os outros numa perspectiva de longo prazo. As complexidades técnicas da formação do ozônio troposférico e das suas interações com fatores meteorológicos e climáticos tornam essencial o avanço do conhecimento e da pesquisa científica para embasar abordagens e medidas políticas eficazes. Isso é necessário para que as intervenções possam evoluir e se adaptar conforme avança o nosso entendimento e entram em vigor políticas mais amplas de descarbonização. A colaboração internacional dentro da comunidade científica é crucial para criar e fortalecer capacidades em regiões com recursos técnicos mais limitados.

FINANCIADORES PÚBLICOS E PRIVADOS DEVEM APOIAR NOVAS PESQUISAS CIENTÍFICAS VOLTADAS AO ENFRENTAMENTO DAS QUESTÕES MAIS PERTINENTES, COM O OBJETIVO DE EMBASAR ESTRATÉGIAS DE COMBATE À MUDANÇA CLIMÁTICA E DE MELHORIA DA QUALIDADE DO AR:

- Avançar na compreensão das respostas climáticas dos precursores do ozônio troposférico. Como indicado no resumo do Relatório de Avaliação do IPCC 6, é necessário aprofundar os estudos sobre os efeitos climáticos específicos dos NMVOCs, do CO e do NOx por país e por região, incluindo as respostas de temperatura e outros impactos climáticos regionais.
- Analisar caminhos políticos que maximizem os benefícios para o clima e a saúde. Persistem lacunas fundamentais em nossa compreensão dos efeitos climáticos das políticas e medidas que promovem reduções substanciais nas emissões de precursores do ozônio troposférico em diversos setores. Uma atualização da Avaliação Integrada sobre Carbono Negro e Ozônio Troposférico do PNUMA e da OMS poderia fornecer orientações políticas fundamentadas em evidências científicas. O ponto crítico é que precisamos de estudos que respondam a questões fundamentais, como: "Além da descarbonização profunda, que políticas e medidas de mitigação adicionais são necessárias para controlar os precursores do ozônio troposférico e manter o mundo num caminho compatível com a meta de 1,5 °C?".
- Desenvolver ferramentas e diretrizes para apoiar os formuladores de políticas. É necessário um esforço considerável para dar aos formuladores de políticas o conhecimento científico necessário para orientar decisões sobre quais emissões precursoras representam as rotas mais eficazes no combate ao ozônio troposférico nos níveis local, regional e global. Embora os conjuntos de dados e modelos já existam, ainda são necessários estudos direcionados para identificar e desenvolver parametrizações e ferramentas que os formuladores de políticas possam aplicar. As categorizações de regime - orientações baseadas no equilíbrio químico local, por exemplo, regimes limitados por NOx ou por VOC - são uma abordagem promissora, mas ainda exigem mais estudos e adaptação aos contextos locais.
- Aprimorar o monitoramento e a mensuração do ozônio troposférico e dos seus precursores. É necessário ampliar os investimentos em monitoramento para aprofundar nossa compreensão das flutuações regionais e globais nos níveis de ozônio troposférico, inclusive em áreas rurais, a fim de aprimorar a análise dos impactos sobre a agricultura e os ecossistemas.

- Melhorar os fatores de emissão dos poluentes precursores do ozônio troposférico. São necessários mais estudos sobre fatores de emissão e dados de atividade para aprimorar as estimativas e os inventários de emissões, levando em conta a ampla diversidade dos setores emissores e as variações que podem ocorrer dentro de cada um deles. O foco deve ser direcionado às regiões com menor volume de pesquisas, visando a fortalecer as orientações já existentes para governos e empresas.
- Expandir ainda mais a base de evidências sobre os impactos à saúde. Décadas de pesquisa confirmaram haver sólida relação entre a exposição ao ozônio e certos impactos na saúde respiratória. No entanto, permanece a necessidade urgente de conduzir estudos epidemiológicos de longo prazo em países de baixa e média renda, a fim de melhor compreender o impacto do ozônio na mortalidade por todas as causas.⁹¹

Financiamento e apoio técnico

O combate à poluição atmosférica ao ar livre é significativamente subfinanciado em nível global, tendo recebido menos de 1% do financiamento internacional total para o desenvolvimento entre 2018 e 2022.⁹⁷ Os esforços de redução do ozônio troposférico e dos seus precursores devem ser apoiados por países doadores, bancos multilaterais de desenvolvimento (BMDs) e fundações filantrópicas por meio de doações e financiamento concessionário voltados ao desenvolvimento, evitando causar estresse fiscal aos países beneficiários. Para se ter êxito na redução dos níveis de ozônio troposférico e na emissão dos seus precursores, é fundamental adotar uma abordagem sistemática de financiamento e capacitação, integrando diversas fontes, como detalhado a seguir:

1. Fortalecer os mecanismos tradicionais de financiamento: aprimorar os instrumentos financeiros já existentes no setor ambiental, como esquemas de compensação de emissões, tributação de combustíveis fósseis e outros tributos específicos voltados ao gerenciamento da qualidade do ar.
2. Criar condições de mercado: Incentivar a participação do setor privado em iniciativas de financiamento alinhadas às políticas de melhoria da qualidade do ar e de mitigação da mudança climática.
3. Criar e implementar subsídios e transferências: Fornecer ajuda governamental direta a cidades e entidades privadas, com o objetivo de viabilizar políticas de melhoria da qualidade do ar e de mitigação da mudança climática.
4. Desenvolver capacidade para projetos de mitigação financiáveis: Fortalecer competências e instituições - especialmente em países em desenvolvimento com acesso limitado a recursos e conhecimento técnico - para viabilizar um "pipeline" de projetos aptos a captar recursos de fundos internacionais de desenvolvimento e financiamento climático.

OS ESFORÇOS DE COOPERAÇÃO INTERNACIONAL DEVEM INCLUIR:

- Incentivar uma abordagem integrada da poluição atmosférica nos critérios de seleção de projetos: fundos de desenvolvimento e fundos climáticos devem adotar metodologias abrangentes de controle da poluição atmosférica que gerem benefícios locais e globais. É necessário elaborar critérios de habilitação de projetos, à semelhança das diretrizes de gênero e sociais atualmente em vigor.

Inspeção de rotina de uma estação de monitoramento da qualidade do ar ambiente operada pelos Serviços Meteorológicos da África do Sul. Crédito: Gulshan Khan / Climate Visuals



REFERÊNCIAS

1. U.S. Department of State (2024) The Sprint to Cut Climate Super Pollutants: COP 29 Summit on Methane and Non-CO2 GHGs. Disponível em: <https://www.state.gov/the-sprint-to-cut-climate-super-pollutants-cop-29-summit-on-methane-and-non-co2-ghgs/>
2. Lu, X., Zhang, L., & Shen, L. (2019). Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns. *Current Pollution Reports*, 5(4), 238–260
3. Gaudel, A., Bourgeois, I., Li, M., Chang, K. L., Ziemke, J., Sauvage, B. & Cooper, O. R. (2024). Tropical tropospheric ozone distribution and trends from in situ and satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(17), 997510000.
4. Cuesta et al., 2022. Ozone pollution during the COVID-19 lockdown in the spring of 2020 over Europe, analysed from satellite observations, in situ measurements, and models. doi.org/10.5194/acp-22-4471-2022.
5. Sillman, S., & He, D. (2002). Some theoretical results concerning O3-NOx-VOC chemistry and NOx-VOC indicators. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D22), ACH-26.
6. Santer, B. D., Po-Chedley, S., Zhao, L., Zou, C. Z., Fu, Q., Solomon, S., ... & Taylor, K. E. (2023). Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(20), e2300758120.
7. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, 22.1(c), Pean, 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. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, No prelo,' doi:10.1017/9781009157896. Fig SPM2.
8. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, 22.1(c), Pean, 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. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, EUA, No prelo,' doi:10.1017/9781009157896. Capítulo 6.
9. Dreyfus, G. B., Xu, Y., Shindell, D. T., Zaelke, D., & Ramanathan, V. (2022). Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(22), e2123536119.
10. IPCC, 2021. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2(1), 2391.
11. Dreyfus, G. B., Xu, Y., Shindell, D. T., Zaelke, D., & Ramanathan, V. (2022). Mitigating climate disruption in time: A self-consistent approach for avoiding both near-term and long-term global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(22), e2123536119
12. Rathore, A., Gopikrishnan, G. S., & Kuttippurath, J. (2023). Changes in tropospheric ozone over India: Variability, longterm trends and climate forcing. *Atmospheric Environment*, 309, 119959.
13. Chang, W., Liao, H., & Wang, H. (2009). Climate responses to direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases in eastern China over 1951-2000. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26, 748-762. Li, S., Wang, T., Zanis, P., Melas, D., & Zhuang, B. (2018). Impact of tropospheric ozone on summer climate in China. *Journal of Meteorological Research*, 32(2), 279-287.
14. Liu, W., Hegglin, M. I., Checa-Garcia, R., Li, S., Gillett, N. P., Lyu, K & Swart, N. C. (2022). Stratospheric ozone depletion and tropospheric ozone increases drive Southern Ocean interior warming. *Nature Climate Change*, 12(4), 365-372.
15. Cai, W., Gao, L., Luo, Y., Li, X., Zheng, X., Zhang, X & Xie, S. P. (2023). Southern Ocean warming and its climatic impacts. *Science Bulletin*, 68(9), 946-960.
16. Stevenson, D.S., Derwent, R.G., Wild, O. and Collins, W.J., 2022. COVID-19 lockdown emission reductions have the potential to explain over half of the coincident increase in global atmospheric methane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(21), pp.14243-14252.
17. United States Environmental Protection Agency (2024) Health Effects of Ozone Pollution. Disponível em: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>
18. Health Effects Institute. (2024a). State of Global Air 2024. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.
19. Malley CS, Henze DK, Kuylenstierna JCI, Vallack HW, Davila Y, Anenberg SC, Turner MC, Ashmore MR. Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults >30Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure. *Environ Health Perspect*. AGO 2022 doi: 10.1289/EHP1390. PMID: 28858826; PMCID: PMC5880233. Sun, H., van Daalen, K., Morawska, L., Guillas, S., Giorio, C., Di, Q. Kan, H., Loo, E., Shek, L., Watts, N., & Guo, Y. & Archibald, A. (2024). An estimate of global cardiovascular mortality burden attributable to ambient ozone exposure reveals urban- rural environmental injustice. *One Earth*. <https://doi.org/10.1016Zi.oneear.2024.08.018>

20. Health Effects Institute. (2024a). State of Global Air 2024. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute. Malashock, D.A., Delang, M.N., Becker, J.S., Serre, M.L., West, J., Chang, K., Cooper, O.R., Anenberg, S.C. (2022a) Estimates of ozone concentrations and attributable mortality in urban, peri-urban and rural areas worldwide in 2019. *Environ. Res. Lett.* 17 054023. DOI 10.1088/1748-9326/ac66f3
21. Health Effects Institute. (2024a). State of Global Air 2024. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.
22. Rocque RJ, Beaudoin C, Ndjaboue R, et al. Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. *BMJ Open* 2021;11:e046333. doi:10.1136/bmjopen-2020-046333 WHO. (2015). Connecting global priorities: biodiversity and human health: a state of knowledge review. Available from Connecting global priorities: biodiversity and human health: a state of knowledge review (who.int)
23. Lelieveld, J., Haines, A., Burnett, R., Tonne, C., Klingmuller, K., Munzel, T. and Pozzer, A., 2023. Air pollution deaths attributable to fossil fuels: observational and modelling study. *bmj*, 383.
24. World Bank, 2022. The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. *International Development in Focus*. <http://hdl.handle.net/10986/36501>
25. Emberson, L., Plejdel, H., Ainsworth, E., van den Berg, M., Ren, W., Osborne, S., Mills, G., Pandey, D., Dentener, F., Bilker, P., Ewert, F., Koeble, R., & Van Dingenen, R. (2018). Ozone effects on crops and consideration in crop models. *EUROPEAN JOURNAL OF AGRONOMY*, 100, 19-34. <https://doi.org/10.1016/i.eia.2018.06.002>
26. Jolivet, Y., Bagard, M., Cabane, M., Vaultier, M.-N., Gandin, A., Affif, D., Dizengremel, P., & Le Thiec, D. (2016). Deciphering the ozone-induced changes in cellular processes: a prerequisite for ozone risk assessment at the tree and forest levels. *Annals of Forest Science*, 73(4), 923-943. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0580-3> Krupa, S. V., & Manning, W. J. (1988). Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. *Environmental Pollution*, 50(1), 101-137. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90187-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90187-X)
27. Avnery, S., Mauzerall, D., Liu, J., & Horowitz, L. (2011). Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 45, 2297-2309. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.002>
28. Avnery, S., Mauzerall, D., Liu, J., & Horowitz, L. (2011). Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 45, 2297-2309. <https://doi.org/10.1016/i.atmosenv.2011.01.002> Chuwah, C., van Noje, T., van Vuuren, D., Stehfest, E., & Hazeleger, W. (2015). Global impacts of surface ozone changes on crop yields and land use. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 106, 11-23. <https://doi.org/10.1016/i.atmosenv.2015.01.062>
29. Wittig, V. E., Ainsworth, E. A., Naidu, S. L., Karnosky, D. F., & Long, S. P. (2009). Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Global Change Biology*, 15(2), 396-424. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01774.x>
30. Felzer, B., Reilly, J., Melillo, J., Kicklighter, D., Sarofim, M., Wang, C., Prinn, R., & Zhuang, Q. (2005). Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model. *Climatic Change*, 73, 345-373. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-005-6776-4>
31. Leung, F., Sitch, S., Tai, A., Wiltshire, A., Gornall, J., Folberth, G., & Unger, N. (2022). CO₂ fertilization of crops offsets yield losses due to future surface ozone damage and climate change. *Environmental Research Letters*, 17, Article 074007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7246> Tai, A., & Martin, M. (2017). Impacts of ozone air pollution and temperature extremes on crop yields: Spatial variability, adaptation and implications for future food security. *ATMOSPHERIC ENVIRONMENT*, 169, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.002>
32. Schauburger, B., Rolinski, S., Schaphoff, S., & Muller, C. (2019). Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 1-15.
33. Debaje, S. B. (2014). Estimated crop yield losses due to surface ozone exposure and economic damage in India. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 7329-7338.
34. Li, D., Shindell, D., Ding, D., Lu, X., Zhang, L., & Zhang, Y. (2022). Surface ozone impacts on major crop production in China from 2010 to 2017. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(4), 2625-2638.
35. McGrath, J. M., Betzelberger, A. M., Wang, S., Shook, E., Zhu, X. G., Long, S. P., & Ainsworth, E. A. (2015). An analysis of ozone damage to historical maize and soybean yields in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(46), 14390-14395.
36. Sharps, K., Vieno, M., Beck, R., Hayes, F., & Harmens, H. (2021). Quantifying the impact of ozone on crops in SubSaharan Africa demonstrates regional and local hotspots of production loss. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(44), 62338-62352.
37. Lyu, X., Li, K., Guo, H., Morawska, L., Zhou, B., Zeren, Y., Jiang, F., Chen, C., Goldstein, A.H., Xu, X. and Wang, T., 2023. A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges. *One Earth*, 6(8), pp.964-977.
38. Gaudel, A., Cooper, O. R., Chang, K. L., Bourgeois, I., Ziemke, J. R., Strode, S. A & Granier, C. (2020). Aircraft observations since the 1990s reveal increases of tropospheric ozone at multiple locations across the Northern Hemisphere. *Science Advances*, 6(34), eaba8272.
39. Lyu, X., Li, K., Guo, H., Morawska, L., Zhou, B., Zeren, Y., Jiang, F., Chen, C., Goldstein, A.H., Xu, X. and Wang, T., 2023. A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges. *One Earth*, 6(8), pp.964-977.
40. Lyu, X., Li, K., Guo, H., Morawska, L., Zhou, B., Zeren, Y., ... & Blake, D. R. (2023). A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges. *One Earth*, 6(8), 964-977.

41. Lu, X., Hong, J., Zhang, L., Cooper, O. R., Schultz, M. G., Xu, X. & Zhang, Y. (2018). Severe surface ozone pollution in China: a global perspective. *Environmental Science & Technology Letters*, 5(8), 487-494.
42. Rathore, A., Gopikrishnan, G. S., & Kuttippurath, J. (2023). Changes in tropospheric ozone over India: Variability, longterm trends and climate forcing. *Atmospheric Environment*, 309, 119959.
43. Health Effects Institute. (2024b). *State of Global Air 2024*. Special Report. Boston, MA:Health Effects Institute.
44. Staniaszek, Z., Griffiths, P.T., Folberth, G.A., O'Connor, F.M., Abraham, N.L. and Archibald, A.T., 2022. The role of future anthropogenic methane emissions in air quality and climate. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1), p.21.
45. IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C.
46. Karagodin-Doyennel, A., Rozanov, E., Sukhodolov, T., Egorova, T., Sedlacek, J. and Peter, T., 2023. The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(8), pp.4801-4817.
47. Liu, Z., Doherty, R.M., Wild, O., O'connor, F.M. and Turnock, S.T., 2022. Tropospheric ozone changes and ozone sensitivity from the present day to the future under shared socio-economic pathways. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(2), pp.1209-1227.
48. Lyu, X., Li, K., Guo, H., Morawska, L., Zhou, B., Zeren, Y., Jiang, F., Chen, C., Goldstein, A.H., Xu, X. and Wang, T., 2023. A synergistic ozone-climate control to address emerging ozone pollution challenges. *One Earth*, 6(8), pp.964-977.
49. Dewan, S. and Lakhani, A., 2022. Tropospheric ozone and its natural precursors impacted by climatic changes in emission and dynamics. *Frontiers in Environmental Science*, 10, p.1007942.
50. United Nations Framework Convention on Climate Change (2023) Outcome of the first global stocktake. Available at: Outcome of the first global stocktake. Draft decision -/CMA.5. Proposal by the President | UNFCCC
51. The Global Climate and Health Alliance (2021) Clean Air NDC Scorecard. Available at: Clean Air NDC Scorecard - The Global Climate and Health Alliance
52. The Intergovernmental Panel on Climate Change (2024) 2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-lived Climate Forcers. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/methodology-report-on-short-lived-dimate-forcers/>
53. Government of Mexico (2022) UNFCCC National Inventory Report. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/512232>
54. World Economic Forum (2024) Alliance for Clean Air. Disponível em: Driving Clean Air Solutions - Alliance for Clean Air - World Economic Forum
55. Ruiz-Suarez, L. G., Mar-Morales, B. E., Garcia-Reynoso, J. A., Andraca-Ayala, G. L., Torres-Jardon, R., Garcia-Yee, J., Barrera-Huertas, H. A., Gavilan-Garcia, A., & Basaldua Cruz, R. (2018). Estimation of the impact of ozone on four economically important crops in the city belt of central Mexico. *Atmosphere*, 9, 223. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/atmos9060223>
56. Mills, G., Plejhel, H., Malley, C. S., Sinha, B., Cooper, O. R., Schultz, M. G., Neufeld, H. S., Simpson, D., Sharps, K., & Feng, Z. (2018). Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day tropospheric ozone distribution and trends relevant to vegetation. *Elem Sci Anth*, 6, 47. <Go to WoS>://CCC:000381077300013
57. Akimoto, H. and Tanimoto, H., 2022. Rethinking of the adverse effects of NOx-control on the reduction of methane and tropospheric ozone-Challenges toward a denitrified society. *Atmospheric Environment*, 277, p.119033.
58. IEA (2023), *Global Methane Tracker 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023>. Licence: CC BY 4.0
59. IEA (2023), *Global Methane Tracker 2023*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2023>. Licence: CC BY 4.0
60. United States Environmental Protection Agency (1999) Technical Bulletin: Nitrogen Oxides (Nox), Why and How They are Controlled. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/fnoxdoc.pdf>
61. United States Environmental Protection Agency (1999) Technical Bulletin: Nitrogen Oxides (Nox), Why and How They are Controlled. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/fnoxdoc.pdf>
62. Xiaojia Chen, Qizhen Liu, Tao Sheng, Fang Li, Zhefeng Xu, Deming Han, Xufeng Zhang, Xiqian Huang, Qingyan Fu, Jinping Cheng. A high temporal-spatial emission inventory and updated emission factors for coal-fired power plants in Shanghai, China, *Science of The Total Environment*, Volume 688, 2019, Pages 94-102, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.201>.
63. OECD (2021) Assessment of the Air Pollution Tax and Emission Concentration Limits in the Czech Republic. Disponível em: [https://one.oecd.org/document/ENV/WKP\(2021\)6/en/pdf](https://one.oecd.org/document/ENV/WKP(2021)6/en/pdf)
64. Global Cement and Concrete Association (2022) Getting to Net Zero. Disponível em: <https://gccassociation.org/concretefuture/getting-to-net-zero/>
65. Cui, L., Li, H. W., Huang, Y., Zhang, Z., Lee, S. C., Blake, D. R., Wang, X. M., Ho, K. F., & Cao, J. J. (2021). The characteristics and sources of roadside VOCs in Hong Kong: Effect of the LPG catalytic converter replacement programme. *The Science of the Total Environment*, 757(143811), 143811. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143811> Zhang, C., Xu, T., Wu, G., Gao, F., Liu, Y., Gong, D., Wang, H., Zhang, C., & Wang, B. (2022). Reduction of fugitive VOC emissions using leak detection and repair (LDAR) in a petroleum refinery of Pearl River Delta, China. *Applied Energy*, 324(119701), 119701. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119701>
66. Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., Jensen, T. L., & Fixen, P. E. (2009). Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 133(3-4), 247-266.

67. Velazquez-Marti, B., Fernandez-Gonzalez, E., Lopez-Cortes, I., & Salazar-Hernandez, D. M. (2011). Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in Mediterranean olive groves. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3208-3217
68. American Lung Association (2023). Driving to clean air. Disponível em: <https://www.lung.org/getmedia/9e9947ea-d4a6-476c-9c78-ccc7d49ffe2/ala-driving-to-clean-air-report.pdf>
69. Mousavinezhad, S., Choi, Y., Khorshidian, N., Ghahremanloo, M. and Momeni, M., 2024. Air quality and health cobenefits of vehicle electrification and emission controls in the most populated United States urban hubs: Insights from New York, Los Angeles, Chicago, and Houston. *Science of The Total Environment*, 912, p.169577.
70. Chen, Z., Liu, Q., Liu, H., & Wang, T. (2024). Recent advances in SCR systems of heavy-duty diesel vehicles-low-temperature NOx reduction technology and combination of SCR with remote OBD. *Atmosphere*, 15(8), 997. <https://doi.org/10.3390/atmos15080997>
71. Linares, A. (2024). Zonas de Bajas Emisiones: la guía esencial. [cleancitiescampaign.org](https://spain.cleancitiescampaign.org/wp-content/uploads/2024/10/Zonas-de-Bajas-Emisiones-la-guia-esencial_v3.pdf). https://spain.cleancitiescampaign.org/wp-content/uploads/2024/10/Zonas-de-Bajas-Emisiones-la-guia-esencial_v3.pdf
72. FAO (2006). Fire management: voluntary guidelines. Principles and strategic actions. Available at: Fire management Voluntary guidelines: Principles and strategic actions - Fire Management Working Paper 17/E Yuan, C., Zhang, Y., & Liu, Z. (2015). "A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques". *Canadian Journal of Forest Research*, 45(7), 783-792.
73. Scotford, E., Misonne, D., & Lewis, A. (2023). Guide on Ambient Air Quality Legislation - Air Pollution Series. (Air Pollution Series). The United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/42536>
74. UNECE (2015) Guidelines for Reporting Emissions and Projections Data under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Available at: unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2015/AIR/EB/English.pdf United States Environmental Protection Agency (2019) Wildfire Smoke: A Guide for Public Health Officials. Disponível em: [wildfire_smoke_2019_update.pdf](http://www.epa.gov/wildfire-smoke_2019_update.pdf)
75. World Bank. 2023. Energy Sector Management Assistance Program.Unlocking Clean Cooking Pathways: A Practitioner's Keys to Progress. Washington, DC. Licença: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO
76. World Health Organization (WHO). (2022). Indoor Air Quality Guidelines - Global Update: Evidence-Based Standards for Healthy Homes. Geneva, Suíça: WHO Press.
77. World Bank (2023). Building Code Checklist for Fire Safety (English). Washington, D.C. : World Bank Group.
78. ICAO. (2022). "Environmental Report 2022: Aviation and Environment". Air Transport Action Group (ATAG). (2021). "Waypoint 2050: Balancing Growth in Connectivity with a Comprehensive Global Air Transport Response to the Climate Emergency
79. Air Quality Life Index (2023) Mexico City: ProAire (1990). Disponível em: <https://aqli.epic.uchicago.edu/policy-impacts/mexico-city-proaire-1990/>
80. SEDEMA (2018). Red automática de monitoreo ambiental. Disponível em <http://www.aire.cdmx.gob.mx/>
81. Molina, L. T., Velasco, E., Retama, A., & Zavala, M. (2019). Experience from integrated air quality management in the Mexico City Metropolitan Area and Singapore. *Atmosphere*, 10(9), 512.
82. Dockery, D., Rojas-Bracho, L., & Evans, J. (2019). Benefits of air pollution control on life expectancy in Mexico City 1990 to 2015. *Environmental Epidemiology*, 3, 100.
83. Institute for Health Metrics and Evaluation. (IHME). GBD Results. Seattle, WA: IHME, University of Washington, 2024. Disponível em <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/> (o link é externo). [acesso em 26/09/2024]
84. Li, Shengyue; Wang, Shuxiao; Wu, Qingru; Zhao, Bin; Jiang, Yueqi; Zheng, Haotian; et al. (2024). Integrated Benefits of Synergistically Reducing Air Pollutants and Carbon Dioxide in China. ACS Publications. Collection. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00599>
85. United Nations Environment Programme (2019) A Review of 20 Years' Air Pollution Control in Beijing. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27645/ZairPolCh_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
86. <https://unece.org/environment-policy/air/protocol-abate-acidification-eutrophication-and-ground-level-ozone>
87. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-of-the-main-air#:text=Figure%20202005%20to%202022&text=Under%20the%20NECD%2C%20all%20EU,emission%20reduction%20commitments%20in%202022>
88. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/exceedance-of-air-quality-standards?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b>
89. Climate and Clean Air Coalition (2024) Non-CO2 Pollutants in Nationally Determined Contributions. Disponível em: <https://www.ccacoalition.org/content/non-co2-pollutants-nationally-determined-contributions-ndcs>
90. Huangfu, P. and Atkinson, R., 2020. Long-term exposure to NO2 and O3 and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment international*, 144, p.105998.
91. Clean Air Fund (2024) The State of Global Air Quality Funding 2024. Disponível em: The State of Global Air Quality Funding 2024 - Clean Air Fund

O Clean Air Fund (Reino Unido) está registrado na Inglaterra como pessoa jurídica sob o número 11766712 e como instituição beneficente sob o número 118369. Endereço de registro: 20 St Thomas Street, Londres SE1 9RS Para mais informações, contate-nos em: info@cleanairfund.org ou www.cleanairfund.org.

Tradução:

CEBRI

Centro Brasileiro de Relações Internacionais