

Impacto ambiental da terapêutica inalada no tratamento da asma

The environmental impact of inhaled therapy in asthma treatment

Data de receção / Received in: 12/12/2024

Data de aceitação / Accepted for publication in: 03/04/2025

Rev Port Imunoalergologia 2025; 33 (4): 219-232

Mariana Bragança^{*,1} , Ana Luísa Pinhal^{*,1} , Margarida Areia^{*,2} , Duarte Nuno Silva^{*,3} ,
Maria João Vasconcelos⁴ , Ana Margarida Pereira⁵ , Inês Paciência⁶ 

¹ Serviço de Imunoalergologia, Unidade Local de Saúde de São João, Porto, Portugal

² Serviço de Imunoalergologia, Unidade Local de Saúde de Gaia e Espinho, Vila Nova de Gaia, Portugal

³ Serviço de Imunoalergologia, Unidade Local de Saúde de Santo António, Porto, Portugal

⁴ Unidade de Imunoalergologia, Hospital Lusíadas Porto, Lusíadas Saúde, Porto, Portugal

⁵ Unidade de Imunoalergologia, CUF-Porto Hospital e Instituto, Porto, Portugal

MEDCIDS – Departamento Medicina da Comunidade, Informação e Decisão em Saúde, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Porto, Portugal

PaCeIT – Patient Centered Innovation and Technologies, CINTESIS – Centro de Investigação em Tecnologias e Serviços de Saúde, Faculdade de Medicina da Universidade do Porto, Porto, Portugal

⁶ Center for Environmental and Respiratory Health Research (CERH), Research Unit of Population Health, University of Oulu, Oulu, Finlândia

* Estes autores contribuíram igualmente para o artigo

Contribuições dos autores: Inês Paciência, Ana Margarida Pereira e Maria João Vasconcelos conceptualizaram o artigo. Todos os autores contribuíram para a redação do artigo, reviram-no criticamente e aprovaram a sua versão final.

RESUMO

O setor da saúde é responsável por 4,4% das emissões de gases com efeito de estufa a nível mundial, sendo a cadeia de abastecimento de produtos farmacêuticos e dispositivos médicos a sua principal fonte. No tratamento da asma, os inaladores têm um impacto ambiental significativo, especialmente os inaladores pressurizados de dose calibrada (pMDI), devido ao uso de gases propelentes. Alternativas como inaladores de pó seco (DPI) ou dispositivos de névoa suave apresentam menor potencial de aquecimento global, mas a escolha do dispositivo deve ser primariamente adequada à clínica e ao doente. A otimização do diagnóstico, abordagem de fatores de agravamento e instituição de terapêutica adequada são algumas estratégias fundamentais para reduzir o impacto ambiental. Neste artigo é feita uma revisão da evidência científica sobre o impacto ambiental dos inaladores no tratamento

<http://doi.org/10.32932/rpia.2025.06.167>

da asma que serve de base à identificação de estratégias práticas, passíveis de implementação no dia-a-dia, visando reduzir a pegada de carbono.

Palavras-chave: Asma, pegada de carbono, alterações climáticas, ambiente, gases com efeito de estufa, terapêutica.

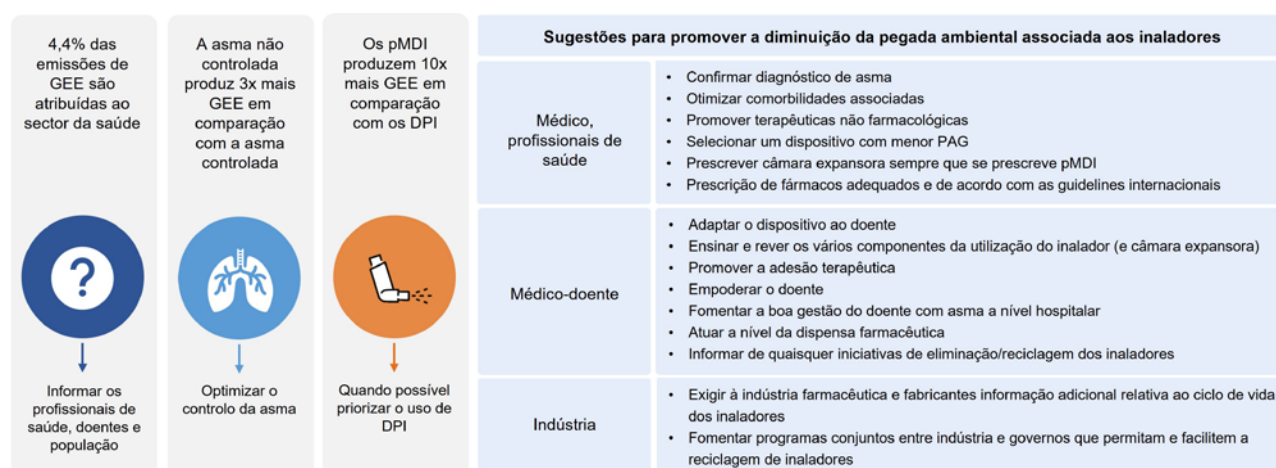
© 2025 Sociedade Portuguesa de Alergologia e Imunologia Clínica. Published by Publicações Ciência e Vida.
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

ABSTRACT

The healthcare sector is responsible for about 4.4% of global greenhouse gas emissions. The healthcare supply chain is the main source of emissions. Due to propellant gases, asthma inhalers, particularly pressurized metered dose inhalers (pMDI), have a significant environmental impact. Dry powder inhalers (DPIs) or soft mist devices have a substantially lower global warming potential compared to pMDI, but the selection of a device should first be driven by clinical appropriateness. Improving the accuracy of asthma diagnosis and management are key factors to reduce the environmental impact of asthma treatment. This article reviews the scientific evidence on the environmental impact of inhalers in asthma treatment and identifies a set of practical strategies that can be implemented in daily practice to reduce the carbon footprint of inhaler therapy.

Keywords: Asthma, carbon footprint, climate change, environment, greenhouse gases, therapeutics.

© 2025 Sociedade Portuguesa de Alergologia e Imunologia Clínica. Published by Publicações Ciência e Vida.
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



DPI – Inalador de pó seco; GEE – Gás com efeito de estufa; PAG – Potencial de aquecimento global; pMDI – Inaladores pressurizados de dose calibrada.

Graphical abstract. Resumo dos principais dados sobre o impacto ambiental dos inaladores e das estratégias para o reduzir

Glossário

- Gases com efeito de estufa (GEE): grupo de gases que contribuem para o aquecimento global e alterações climáticas. Dividem-se em dois grupos: (1) gases não fluorados (como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O)); e (2) gases fluorados (como o hidrofluorcarbonetos (HFC), perfluorcarbonetos (PFC), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e trifluoreto de azoto (NF_3)).
- *One Health*: abordagem que reconhece a conexão entre pessoas, animais, plantas e o ambiente que as acolhe, com o objetivo de alcançar mais e melhores resultados na área da saúde.
- Pegada de carbono: Quantificação do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto – da extração da matéria-prima ao descarte final, passando pela sua produção, transporte e utilização. É avaliada pela quantidade de emissão de gases com efeito de estufa e o seu valor é expresso em equivalentes de dióxido de carbono (CO_2eq).
- Potencial de aquecimento global (PAG): métrica que estima a contribuição relativa de um determinado gás de efeito estufa para o aquecimento global, em relação à mesma quantidade de um gás de referência (o CO_2) cujo PAG é definido como 1 (uma tonelada). Por exemplo, o PAG do metano é 25, o que significa que a emissão de uma tonelada de metano (CH_4) equivale, para efeitos do impacto sobre o aquecimento global, à emissão de 25 toneladas de CO_2 .

Abreviaturas

CFC: clorofluorcarboneto
 EAACI: *European Academy of Allergy & Clinical Immunology*
 DPI: inalador de pó seco (*dry powder inhaler*)
 GEE: gás com efeito de estufa
 HCWH: *Health Care Without Harm*
 HFA: hidrofluoralcano
 LAMA: antagonista muscarínico de longa ação (*long-acting muscarinic antagonist*)
 PAG: potencial de aquecimento global
 pMDI: inaladores pressurizados de dose calibrada (*pressurized metered dose inhaler*)
 SABA: agonista beta-2 de curta ação (*short acting beta-2 agonist*)

INTRODUÇÃO

O impacto ambiental do setor da saúde não é negligenciável, sendo responsável por 4,4% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) a nível mundial. Os GEE contribuem para o aquecimento global e alterações climáticas e têm sido o foco de múltiplas iniciativas com o objetivo de reduzir a sua libertação (1-3). Os três principais responsáveis por este impacto ambiental do setor da saúde são os Estados Unidos (27%, 546 $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$), a China (17%, 342 $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$) e a União Europeia (12%, 248 $\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$), que globalmente contribuem com 56% das emissões de CO_2 na saúde. Em Portugal, este setor representa 4,8% (3,61

$\text{MtCO}_2\text{eq/ano}$) das emissões de CO_2 (equivalente a 764 331 veículos de passageiros durante um ano) (1,2). A maioria das emissões de CO_2 (71%) provém da cadeia de abastecimento, incluindo produção, embalagem, transporte e descarte de bens, e serviços adquiridos pelos cuidados de saúde (p.e., produtos farmacêuticos e outros produtos químicos, dispositivos médicos e equipamentos hospitalares) (1,2). As restantes são provenientes das emissões diretas associadas ao funcionamento das instalações de saúde (17%) e das emissões indiretas associadas à distribuição de eletricidade/gás para aquecimento e/ou arrefecimento (12%) (1,2).

Os produtos farmacêuticos foram associados a 7,6-35,7% das emissões de GEE (4-6), sendo considerados especialmente relevantes os gases usados em contexto anestésico(4), e os medicamentos usados para o tratamento da asma e de outras patologias obstrutivas das vias aéreas (7). A terapêutica inalada, essencial no tratamento de doenças respiratórias como a asma, contribui significativamente para as emissões de GEE e, portanto, para o aquecimento global (8-12). Existem diferenças significativas na pegada de carbono entre os vários dispositivos disponíveis e a escolha do inalador e o seu descarte são pontos críticos (8,9,12,13). Através da pegada de carbono é possível comparar o potencial de aquecimento global (PAG) dos vários inaladores, podendo esta informação ser considerada na tomada de decisões para escolha do tratamento (8,9,13).

Este documento tem como principal objetivo a revisão da evidência científica sobre o impacto ambiental dos inaladores utilizados no tratamento da asma. O documento descreve também as iniciativas em curso para minimizar esse impacto e elenca estratégias de sustentabilidade, com o objetivo de consciencializar a população, especialmente profissionais de saúde e doentes com asma ou outras patologias crónicas obstrutivas das vias aéreas, sobre a problemática do impacto ambiental dos inaladores e possíveis formas de a abordar.

PEGADA DE CARBONO DA TERAPÊUTICA INALADA DA ASMA

A asma é uma doença inflamatória das vias aéreas que afeta crianças e adultos, sendo a doença respiratória crónica mais prevalente na infância (14). Estima-se que, em 2019, a asma afetasse 358 milhões de pessoas em todo o mundo (15). De acordo com o estudo EPI-ASTHMA, a prevalência de asma em adultos, em Portugal, é de 7,1% (16). A terapêutica inalada é o pilar do tratamento farmacológico nestes doentes, contribuindo para o controlo sintomático, a melhoria da qualidade de vida, a redução do risco de agudização, e, consequentemente, da morbi-mortalidade associada à asma (14).

Os principais dispositivos inalatórios utilizados no tratamento da asma são os inaladores pressurizados de dose calibrada (pMDI) e os inaladores de pó seco (DPI) (17). Existem também os inaladores de névoa suave, mais frequentemente utilizados na doença pulmonar obstrutiva crónica (17). A escolha do inalador a utilizar em cada doente deve ser individualizada e, apesar de ainda não ocupar um papel primordial nesta decisão, o impacto ambiental dos diferentes inaladores deve ser conhecido e considerado.

Os pMDI requerem utilização de gás propelente para aerossolização do fármaco, contrariamente aos DPI e aos inaladores de névoa suave. Os DPI dependem da energia gerada pelo esforço inspiratório do doente para dispen-

sar o fármaco e os inaladores de névoa suave usam um mecanismo de ativação livre de propelente (usando a energia mecânica produzida por uma mola que fica em tensão após girar a base do dispositivo antes da utilização) (18). Os propelentes são gases com elevada estabilidade e não apresentam toxicidade para o ser humano (19), contudo são o principal contribuinte para o impacto ambiental dos pMDI (Figura 1) (20,21). Para substituir os clorofluorcarbonetos (CFC), utilizados como propelentes em inaladores previamente ao Protocolo de Montreal, foram introduzidos os hidrofluoralcenos (HFA). Ao contrário dos CFC, os HFA não causam a destruição da camada de ozono (não sendo considerados GEE), mas têm um elevado PAG e contribuem a longo prazo para as alterações climáticas (20). Em 2016, foi feita uma emenda ao Protocolo de Montreal acordando uma redução progressiva dos HFA e a sua substituição por gases com baixo PAG. No entanto, foi criada uma exceção pela União Europeia (UE, Regulamento n.º 517/2014) para os propelentes de uso farmacológico, que poderão continuar a ser utilizados até que alternativas com PAG reduzido sejam identificadas e consideradas seguras (17). Em Portugal, os diferentes inaladores disponíveis usam como propelente o HFA134a ou HFA227, correspondendo a um PAG 100 (PAG para um horizonte temporal de 100 anos) entre 1300 e 3350 (Tabela 1 e Figura 1) (20,21). Atualmente, está em curso um ensaio clínico de fase III para avaliar a segurança e tolerabilidade do propelente HFA152a (22), que apresenta um PAG 100 dez vezes inferior ao HFA 134a (Figura 1) (20).

Os DPI não utilizam gás propelente. Desta forma, enquanto a maioria dos valores de PAG associados aos pMDI depende do propelente, e consequentemente da fase de utilização e fim de vida dos inaladores, a emissão de CO₂ dos DPI depende essencialmente da fase de produção (17). Os DPI apresentam um PAG expressivamente inferior ao dos pMDIs (aproximadamente 8 gCO₂eq/ utilização vs 82 a 119 gCO₂ eq/utilização, respetivamente) (17). Nos EUA estimou-se que os inaladores prescritos aos beneficiários dos centros Medicare e Medicaid resul-

Tabela 1. Inaladores pMDI disponíveis em Portugal e respetivos princípios ativos e propelentes

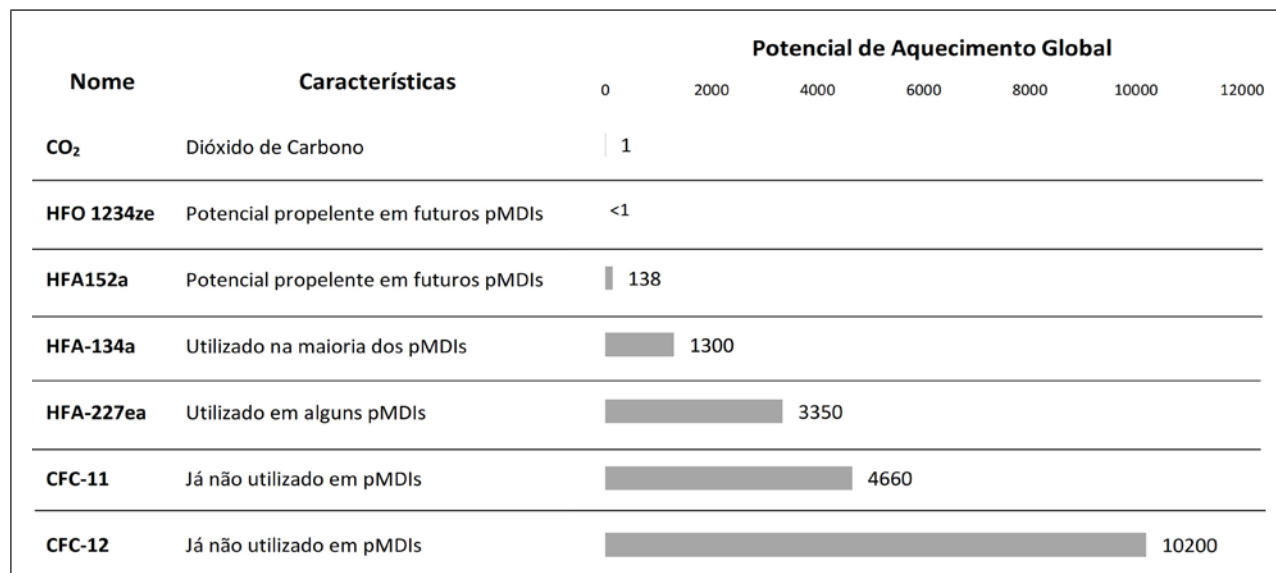
Princípio ativo	pMDI	Propelente
Formoterol (fumarato di-hidratado)	Atimos [®]	HFA 134a
Salbutamol (sulfato)	Ventilan inalador [®]	HFA 134a
	Salbutamol (MG)	HFA 134a
Salmeterol (xinafoato)	Dilamax inalador [®]	HFA 134a
	Serevent [®]	HFA 134a
Brometo de ipratrópio	Atrovent PA [®]	HFA 134a
	Brometo de Ipratrópio [®]	HFA 134a
Beclometasona (dipropionato)	Beclotaide [®]	HFA 134a
	Beclotaide forte [®]	HFA 134a
	Qvar Autohaler [®]	HFA 134a
Budesonida	Budesonida Budair [®]	HFA 134a
Fluticasona (propionato)	Brisovent inalador [®]	HFA 134a
	Flixotaide inalador [®]	HFA 134a
Budesonida + formoterol (fumarato di-hidratado)	Symbicort [®]	HFA 227
Fluticasona (propionato) + formoterol (fumarato di-hidratado)	Flutiform [®]	HFA 227
Fluticasona (propionato) + salmeterol (xinafoato)	Seretaide inalador [®]	HFA 134a
	Serkep [®]	HFA 134a
Formoterol (fumarato di-hidratado) + brometo de glicopirrónio + budesonida	Riltrava Aerosphere [®]	HFA 134a
	Trixeo Aerosphere [®]	HFA 134a
Brometo de ipratrópio + fenoterol (bromidrato)	Berodual PA [®]	HFA 134a

Informação obtida a partir dos Resumos das Características dos Medicamentos (RCM); pMDI – inaladores pressurizados de dose calibrada; MG – Medicamento genérico

taram na emissão de 1,11 MtCO₂eq durante o ano de 2022, equivalente ao uso anual de eletricidade de 226 960 habitações, sendo que 98,7% destas emissões estavam associadas aos pMDI (23). Em Portugal, um estudo recente mostrou resultados semelhantes, com os pMDI a

serem responsáveis por cerca de 95% do PAG da terapêutica inalada no ano de 2022 (com emissão de 30 665,6 tCO₂eq vs apenas 1594,6 tCO₂ eq pelos DPI) (24).

Estima-se que a substituição de pMDI por DPI num doente resulte numa redução de emissão de 420 kg de



CO₂ – dióxido de carbono; HFO – hidrofluorolefina; HFA – hidrofluoralceno; CFC – clorofluorcarboneto; pMDI – inaladores pressurizados de dose calibrada

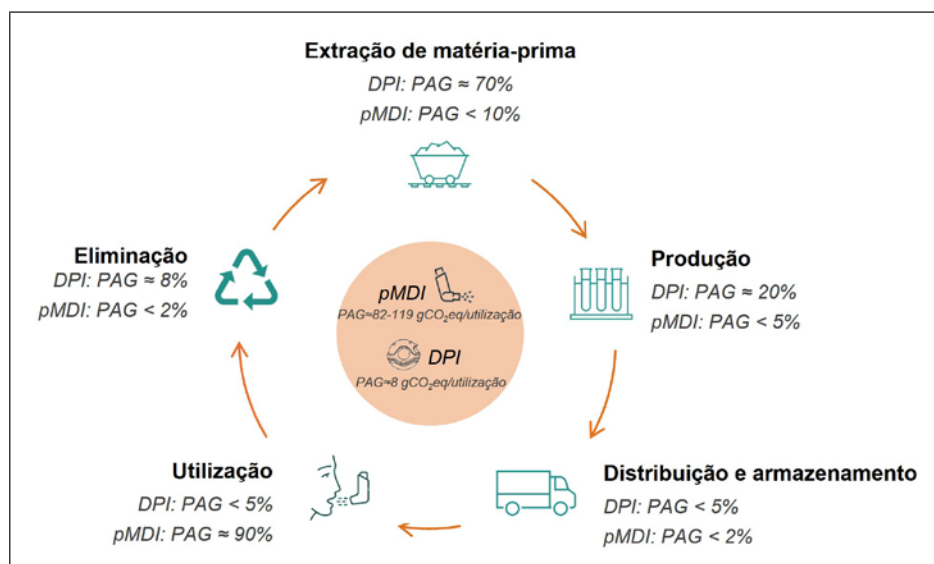
Figura 1. Propelentes: a sua utilização na prática clínica e o seu potencial de aquecimento global para um período temporal de 100 anos (PAG 100). (Adaptado das referências 20,21).

CO₂eq/ano (equivalente à substituição de carro a combustão para um carro híbrido ou a tornar-se vegetariano) (25). Apesar desta discrepância em termos de PAG, que favorece a prescrição de DPI, a correta utilização deste tipo de dispositivos depende da capacidade inspiratória e da colaboração do doente, o que limita a sua utilização em algumas situações (p.e., agudizações graves, crianças em idade pré-escolar...), nas quais os dispositivos pMDI são de uso preferencial (10,26).

Além do PAG, é fundamental considerar outros impactos ambientais, como o impacto na depleção de recursos, e possível toxicidade humana e para o meio ambiente, tendo em consideração todo o ciclo de vida do dispositivo. Esta avaliação global é intrínseca a cada dispositivo utilizado, considerando as suas particularidades. A comparação de pMDI com diferentes propelentes com o DPI Diskus® demonstrou que apesar de este DPI apresentar um PAG bastante inferior ao dos pMDI apresentou o pior resultado em oito outros domínios, com destaque para a depleção fóssil, eutroficação marinha e formação

de oxidantes fotoquímicos (27). Esta diferença está principalmente associada aos materiais utilizados no fabrico do DPI e ao seu descarte (27).

De acordo com um estudo que avaliou o impacto ambiental do ciclo de vida de diferentes inaladores, os DPI são a melhor opção para o PAG (impacto ambiental ≈ 690 vezes menor que o HFC-227ea) e camada de ozono (impacto 140 vezes menor que o HFC-227ea), enquanto o HFC-134a e o HFC-227ea são, dos pMDI, os que têm menor impacto na formação de oxidantes fotoquímicos (impacto 3,5–5 vezes menor do que os DPI) (27). A avaliação do impacto ambiental do ciclo de vida de diferentes inaladores demonstrou ainda que para os pMDI a maior emissão de GEE, e consequente maior PAG, ocorre durante a fase de utilização (Figura 2), que nos inaladores com HFC-134a contribui com 98% do PAG e nos inaladores com HFC-152a e HFC-227ea com 90% (27). Para os DPI, os principais contribuintes para o PAG são a extração de matéria-prima (≈ 70%) e o processo de produção (≈20%) (Figura 2). As contribuições da distri-



DPI – inalador de pó seco; PAG – potencial de aquecimento global; pMDI – inaladores pressurizados de dose calibrada.

Figura 2. Etapas do ciclo de vida dos inaladores e potencial de aquecimento global. Adaptada da referência (27).

buição e armazenamento e da eliminação são inferiores a 10% para os dois tipos de inaladores (27).

O impacto ambiental dos inaladores utilizados na terapêutica de um doente com asma não depende apenas do dispositivo prescrito. A inadequada gestão terapêutica e/ou a má adesão, associadas à sobreutilização de agonistas beta-2 de curta ação (SABA), associam-se a um controlo inadequado e a um maior risco de agudizações (28). Esta situação pode resultar num maior consumo de recursos humanos e materiais, com elevado impacto ambiental. De acordo com Gagné *et al.*, o uso adequado de SABA está associado a uma redução na libertação de aproximadamente 60 700 MtCO₂eq por ano (29). Em comparação com a asma controlada, estima-se que a asma não controlada se associe a emissões três vezes superiores de GEE (64 kg CO₂ vs. 192 kg CO₂eq/pessoa/ano no grupo de indivíduos com asma controlada vs. grupo com asma não controlada), sendo a utilização de SABA identificada como o principal responsável individual por esta diferença (30). Adicionalmente, deve ser considerado que

a própria gestão de crise se associa à utilização de dispositivos pMDI, incluindo em Portugal, em que os pMDI ainda prevalecem na terapêutica de alívio (24), potenciando ainda mais o seu impacto ambiental.

A terapêutica combinada para a asma, especificamente a associação budesonida + formoterol DPI, foi também associada a uma menor pegada de carbono em comparação com o uso de salbutamol pMDI quando necessário (95,8% inferior, *least-squares mean* 1,1 vs. 26,2 kgCO₂eq, *p*<0,001) e budesonida DPI de manutenção associada a salbutamol pMDI quando necessário (93,6% inferior, *least-squares mean* 1,1 vs. 17,3 kgCO₂eq, *p*<0,001) (31). Um estudo de Woodcock *et al.* reforça estes dados mostrando também que as emissões anuais de KgCO₂eq por doente (considerando tratamento de manutenção e alívio) foram significativamente inferiores no grupo tratado com uma associação fixa de furoato de fluticasona + vilanterol DPI comparativamente aos cuidados habituais (incluindo várias combinações de DPI e pMDI), sem que houvesse perda de controlo (consistentemente superior no grupo

tratado com a associação de furoato de fluticasona + vilanterol DPI) (10).

ESTRATÉGIAS PARA REDUZIR A PEGADA DE CARBONO

O conhecimento do impacto ambiental do setor da saúde tem levado a um número crescente de iniciativas globais, no sentido de reduzir a pegada de carbono e promover uma maior sustentabilidade (8-10). Intrinsecamente ligado a estas iniciativas está o conceito de *One Health* (32), que reconhece, através de uma perspetiva interdisciplinar, a conexão entre a saúde humana, animal, vegetal e ambiental com o objetivo de alcançar melhores resultados na área da saúde de forma mais sustentável (2).

Considerando o impacto significativo do tratamento inalado, as sociedades científicas dedicadas às patologias respiratórias têm vindo a sugerir e implementar estratégias globais para minimizar o impacto ambiental nos cuidados de saúde, com foco nas terapêuticas inaladas, mas sempre sem descurar a importância do controlo da patologia subjacente (11). A iniciativa *Go Green*, da *European Academy of Allergy & Clinical Immunology* (EAACI), é um exemplo de promoção de maior sustentabilidade através do desenvolvimento e implementação de medidas e comportamentos que promovam o equilíbrio entre a saúde humana e ambiental (33). Também em Portugal foram recentemente publicadas recomendações para a redução do impacto ambiental dos inaladores sob alçada do Conselho Português para a Saúde e Ambiente, das sociedades científicas que representam as especialidades com maior volume de prescrição destes medicamentos (incluindo a Sociedade Portuguesa de Pneumologia, a Sociedade Portuguesa de Alergologia e Imunologia Clínica, a Sociedade Portuguesa de Pediatria, a Sociedade Portuguesa de Medicina Interna e a Associação Portuguesa de Medicina Geral e Familiar) e de uma associação de doentes, a Associação Respira (24).

Na Tabela 2 sistematizam-se algumas estratégias que visam a redução do impacto ambiental do tratamento da asma e que poderão ser postas em prática, quer ao nível dos cuidados de saúde primários, quer a nível hospitalar.

Após confirmar o diagnóstico de asma, com base em meios complementares de diagnóstico adequados, é fundamental alcançar um bom controlo sintomático e minimizar o risco de agudizações e de morbimortalidade associadas à asma (14). A otimização da abordagem das comorbilidades e, sempre que possível e adequado, a promoção de terapêuticas não farmacológicas, deve ser privilegiada. O tratamento farmacológico deve incluir, na maioria dos doentes com asma, um corticoesteróide inalado e, quando indicado, um broncodilatador, administrados através de um (ou mais) dispositivos inalatórios adaptados individualmente a cada doente, potenciando a sua adequada utilização e a adesão terapêutica (14). Deve ser também considerado o PAG de cada inalador (Figura 1), dando preferência aos DPI, quando adequado, e aos inaladores com HFA 134a em detrimento de HFA 227ea, principalmente perante a existência de inaladores equivalentes (Tabela 1) (26). A inclusão de mecanismos de alerta sobre o PAG de cada inalador nos sistemas de prescrição (com base num sistema de cores), foi recomendada como uma estratégia a implementar em Portugal (24).

Paralelamente, outras estratégias devem ser tidas em conta para minimizar o impacto ambiental dos inaladores, nomeadamente evitar o armazenamento de inaladores, promover primariamente (quando possível e adequado) a utilização da medicação já existente e promover o descarte adequado dos dispositivos em fim de vida (34,35). Adicionalmente, é importante promover uma maior participação por parte da indústria farmacêutica e do governo nas estratégias de redução do impacto ambiental (36). Aliada a estas medidas, em Portugal é fundamental promover a disseminação de conhecimento sobre o impacto ambiental dos inaladores entre os médicos prescritores, colmatando o défice de conhecimento reportado por Campos et al (24), com 47,7% dos médicos prescritores

Tabela 2. Estratégias a implementar na prática clínica para promover a redução do impacto ambiental do tratamento da asma.

Confirmar diagnóstico de asma	História clínica e provas funcionais respiratórias compatíveis
Otimizar comorbilidades	Rinite, rinosinusite, obesidade, síndrome de apneia obstrutiva do sono, ansiedade, depressão, doença do refluxo gastroesofágico
Promover terapêutica não farmacológica	Cessação tabágica, perda ponderal, reabilitação pulmonar, aconselhamento psicológico e nutricional, imunização (influenza, pneumoc�tica, vírus sincial respiratório, SARS-CoV-2)
Selecionar um dispositivo com menor PAG	Preferir DPI sempre que adequado Preferir HFA 134a em detrimento de HFA 227ea Incluir mecanismos de alerta sobre o PAG de cada inalador nos sistemas de prescrição
Adaptar o dispositivo ao doente	Considerando a capacidade inspiratória, a compreensão da técnica inalatória e a preferência do doente
Prescrever câmara expansora (CE)	Em caso de prescrição de dispositivo pMDI
Ensinar e rever os vários componentes da utilização do inalador e CE em todos os contactos com o doente	Técnica inalatória, armazenamento e transporte, desinfecção, contagem de doses e validade
Prescrição de fármacos adequados e de acordo com as guidelines internacionais	Evitar SABA como terapêutica de resgate isolada Incluir corticosteroides inalados Evitar a inércia terapêutica A nível dos cuidados de saúde primários, referenciar à consulta de Imunoalergologia ou Pneumologia, quando adequado
Promover a adesão terapêutica	Diferentes fármacos num dispositivo Esquema MART (<i>Maintenance and Reliever Therapy</i>) ou dispositivo de uma única utilização diária Smart DPI
Empoderar o doente	Esclarecer o diagnóstico e prognóstico da doença Fornecer um plano de a��o escrito Disponibilidade para esclarecimento de d�vidas Promover uma boa relação médico-doente
Fomentar a boa gestão do doente com asma a nível hospitalar	Educar os vários intervenientes nos cuidados ao doente (identificação e abordagem terapêutica da agudização) Facilitar a utilização de câmara expansora na utilização de pMDI Ensinar e promover a contagem de doses nos pMDI Desinfetar e reutilizar câmaras expansoras e pMDI Disponibilizar um plano terapêutico adequado à data de alta Referenciação automática para consulta de Imunoalergologia ou Pneumologia
Atuar a nível da dispensa farmacêutica	Evitar o armazenamento de inaladores no domicílio Promover a utilização da medicação existente em primeiro lugar (p.e. ao trocar de inalador; se possível, terminar o que está a utilizar)
Exigir � indústria farmacêutica e fabricantes	Descrição do ciclo de vida de cada inalador Utilização de pMDI de volume inferior para minimizar o uso de propelente Contador de doses disponível em todos os dispositivos Desenvolvimento de novos dispositivos reutilizáveis
Fomentar programas conjuntos entre indústria e governos que permitam e facilitem a reciclagem de inaladores	
Ensino e sensibilização para a entrega dos inaladores em fim de vida em farmácias/parafarmácias	

PAG – Potencial de aquecimento global; DPI – Inaladores de p  seco; HFA – Hidrofluoralc o, pMDI – Inaladores pressurizados de dose calibrada; SABA – Agonista beta-2 de curta ação; MART – *Maintenance and Reliever Therapy*

a indicar desconhecimento sobre este tema, e sensibilizá-los para que tenham em consideração os aspetos ambientais no momento da prescrição (que atualmente não são tidos em conta por mais de 70% (24)).

EXEMPLOS DE INICIATIVAS NA COMUNIDADE

A nível mundial existem diversos exemplos de projetos desenhados especificamente para fomentar a redução da pegada de carbono associada ao uso de inaladores, quer promovendo a reciclagem dos dispositivos, quer a sua reutilização (37-49).

No Reino Unido, o projeto *Take AIR (Action for Inhaler Recycling)*, criado e financiado pela Chiesi, avaliou a viabilidade da recuperação e reciclagem de inaladores durante 12 meses. Os inaladores eram enviados para reciclagem/recuperação por correio pelos doentes, sem custos, em envelopes previamente entregues pelas farmácias e hospitais. Os pMDI eram desmontados e os seus componentes reciclados, se possível, enquanto o gás propelente restante era extraído para reaproveitamento nas indústrias de refrigeração e ar condicionado. Outros dispositivos, como os DPI, eram incinerados, com valorização energética. A *Take AIR* evitou que o equivalente a mais de 110 toneladas de emissões de CO₂ entrassem na atmosfera, demonstrando a viabilidade e eficácia da iniciativa (37). Outra iniciativa, também no Reino Unido, foi desenvolvida pela GlaxoSmithKline (GSK) entre 2011 e 2020, promovendo a devolução do inalador antigo e/ou usado na farmácia. De acordo com a GSK, mais de 1,2 milhões de inaladores foram reciclados e recuperados, evitando emissões de CO₂eq equivalentes à quantidade produzida por 8665 carros (tipo de carro não especificado) num ano (38,39).

Para além destes projetos, têm sido implementadas no Reino Unido outras iniciativas com o objetivo de incentivar a reciclagem de inaladores (40-42). Neste país parece existir maior sensibilização para esta temática,

com a disponibilização de informação à população, bem como plataformas de apoio aos profissionais de saúde com informação e materiais baseados na evidência, de forma a promover boas práticas e a favorecer uma maior sustentabilidade (43-45).

Em Portugal, a Valormed promove a recolha seletiva e a gestão de resíduos de embalagens e medicamentos através do Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagens e Medicamentos (SIGREM). As farmácias comunitárias e os locais ou estabelecimentos de venda de medicamentos não sujeitos a receita médica aderentes assumem a responsabilidade de receção dos resíduos posteriormente transportados, triados e orientados para centros de reciclagem ou para incineradores com valorização energética (46). Os dispositivos inalatórios, por conterem medicamentos, incluem-se no grupo de resíduos que devem ser eliminados desta forma; no entanto, não existe adequada sensibilização dos doentes e médicos para esta necessidade (50-52).

No que diz respeito às iniciativas para reutilização dos inaladores, um estudo recente avaliou a potencial redução das emissões de CO₂ associada à substituição de pMDI/DPI por inaladores reutilizáveis (Respimat) em 12 países europeus e nos Estados Unidos durante um período de 5 anos, usando um modelo de impacto ambiental (47). Os autores concluíram que a substituição de antagonista muscarínico de longa ação (LAMA) em dispositivo não reutilizável por Spiriva® Respimat Reusable e Spiolto® Respimat Reusable reduziria as emissões de CO₂ em 13,3-50,9% e 9,5-92,6%, evitando a emissão de 93-6228 e 31-50843 toneladas de CO₂, respetivamente (47).

Em Espanha, o estudo *AIRE project* teve como objetivo avaliar o conhecimento dos utilizadores de inaladores relativamente a como e onde descartar estes dispositivos após utilização, bem como a sua opinião sobre inaladores reutilizáveis. Os autores concluíram que, apesar de os utilizadores considerarem importante a reciclagem dos dispositivos e a eventual utilização de inaladores reutilizáveis, a maioria referia nunca ter sido informada pelos profissionais de saúde e não os depositava no local adequado (48).

Em Portugal, não temos conhecimento de qualquer iniciativa para reutilização dos inaladores.

Para além das iniciativas referidas no âmbito da reciclagem e reutilização dos inaladores, a indústria farmacêutica e os fabricantes apresentam também um papel relevante na redução do PAG dos inaladores através da implementação de estratégias de melhoria dos processos de produção. A título de exemplo, em quatro anos as emissões de CO₂ associadas ao ciclo de vida do Easyhaler® foram reduzidas em cerca de 10% (49).

PERSPETIVAS E CONCLUSÃO

Os inaladores prescritos para o tratamento da asma associam-se a impacto ambiental em todas as fases do seu ciclo de vida. Os pMDI são os dispositivos que mais contribuem para a emissão de GEE devido à utilização de propelente. A escolha de um inalador com menor impacto ambiental e clinicamente apropriado pode ter impacto significativo nas emissões de GEE, tendo os profissionais de saúde um papel relevante na proteção e promoção da saúde do planeta e das populações. No entanto, a gestão dos doentes com asma deve ter como objetivo primordial o seu controlo com a dose terapêutica mínima eficaz. É fundamental colocar o doente no centro dos cuidados e personalizar o seu tratamento, com um foco na melhor evidência científica disponível aliada à humanização dos cuidados de saúde. Um correto diagnóstico e a implementação de estratégias que promovam a adesão ao tratamento e controlo da doença (incluindo otimização das comorbilidades e intervenções não farmacológicas, como cessação tabágica, exposição a aeroalergénios, exposição ocupacional, etc) permitem também uma redução do impacto ambiental do tratamento da asma e os custos em saúde. Desta forma, além de melhores resultados clínicos, é possível contribuir para uma menor pegada ambiental.

A escolha de um inalador deverá assentar primariamente nas características e particularidades de cada doente, de forma a promover a adesão e o seu uso correto. Esta es-

colha deve também considerar o impacto ambiental de cada inalador. Na prática clínica, nos doentes que se encontram corretamente tratados, com a sua patologia controlada, a troca de inalador poderá ser considerada caso a caso tendo sempre em conta a sua efetividade e segurança e o consentimento e preferência do doente. No entanto, na necessidade de troca de inalador ou início de terapêutica inalada, o impacto ambiental do inalador selecionado deve ser tido em conta. Nos casos adequados, a prescrição de um DPI ou, na necessidade de pMDI, a escolha de um inalador contendo HFA134a em detrimento de HFA227 e a sua utilização com câmara expansora reduzem o impacto ambiental associado ao tratamento da asma.

É necessário sensibilizar os profissionais de saúde e a população para a forma correta de utilização e eliminação dos dispositivos inalatórios, bem como promover iniciativas para a sua reciclagem e reutilização.

Por fim, profissionais de saúde, doentes e cuidadores devem exigir da indústria farmacêutica e das entidades governamentais maior responsabilização e ações efetivas para minimizar o impacto ambiental da terapêutica inalada. É igualmente crucial garantir transparência e acesso a informações detalhadas sobre toda a cadeia de produção e eliminação destes produtos, para assegurar uma avaliação completa do impacto ambiental e promover soluções mais sustentáveis.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não existem conflitos de interesse.

ORCID

Mariana Bragança  0000-0002-7273-7031

Ana Luísa Pinhal  0000-0002-2996-2364

Margarida Areia  0000-0002-8274-2686


Duarte Nuno Silva  0000-0003-1475-5802

Maria João Vasconcelos  0000-0002-1176-153X

Ana Margarida Pereira  0000-0002-5468-0932

Inês Paciência  0000-0001-5762-7814

Autor correspondente

Mariana Bragança 

Serviço de Imunoalergologia, Unidade Local de Saúde
de São João, Porto, Portugal

E-mail: m_lbraganca@hotmail.com

REFERÊNCIAS

1. Karliner J, Slotterback S, Boyd R, Ashby B, Steele K, Wang J. Health care's climate footprint: the health sector contribution and opportunities for action. *Eur J Public Health* 2020;30(Suppl_5):ckaa165.843. doi: 10.1093/eurpub/ckaa165.843.
2. EAACI Knowledge Hub [Internet]. [citado 4 de agosto de 2024]. EAACI One Health 365. Disponível em: https://hub.eaaci.org/community_outreach/eaaci-one-health-365/.
3. Health care's climate footprint report [Internet]. Health Care Without Harm in collaboration with Arup; 2019 [citado 8 de novembro de 2024] p. 48. (Health Care Without Harm Climate-smart health care series). Report No.: Green Paper Number One. Disponível em: <https://global.noharm.org/media/4370/download?inline=1>.
4. Rodríguez-Jiménez L, Romero-Martín M, Spruell T, Steley Z, Gómez-Salgado J. The carbon footprint of healthcare settings: A systematic review. *J Adv Nurs*. 2023;79(8):2830-44. doi: 10.1111/jan.15671.
5. Wu R. The carbon footprint of the Chinese health-care system: An environmentally extended input-output and structural path analysis study. *Lancet Planet Health*. 2019;3(10):e413-9. doi: 10.1016/S2542-5196(19)30192-5.
6. Lim AEK, Perkins A, Agar JWM. The carbon footprint of an Australian satellite haemodialysis unit. *Aust Health Rev* 2013;37(3):369. doi: 10.1071/AH13022.
7. Déry L, Lachapelle P, Couillard S. The excessive carbon footprint of inhalers used in airway disease and its remedies. *TouchREVIEWS Respir Pulm Dis* 2023;8(2):1. doi: 10.17925/USPRD.2023.8.2.1.
8. Woodcock A, Beeh KM, Sagara H, Aumônier S, Addo-Yobo E, Khan J, et al. The environmental impact of inhaled therapy: making informed treatment choices. *Eur Respir J* 2022;60(1):2102106. doi: 10.1183/13993003.02106-2021.
9. Pernigotti D, Stonham C, Panigone S, Sandri F, Ferri R, Unal Y, et al. Reducing carbon footprint of inhalers: analysis of climate and clinical implications of different scenarios in five European countries. *BMJ Open Respir Res* 2021;8(1):e001071. doi: 10.1136/bmjresp-2021-001071.
10. Woodcock A, Janson C, Rees J, Frith L, Löfdahl M, Moore A, et al. Effects of switching from a metered dose inhaler to a dry powder inhaler on climate emissions and asthma control: post-hoc analysis. *Thorax* 2022;77(12):1187-92. doi: 10.1136/thoraxjnl-2021-218088.
11. Gupta S, Couillard S, Digby G, Tse SM, Green S, Penz E. Climate change and inhaler selection in patients with respiratory disease. *Chest* 2024;165(3):503-6. doi: 10.1016/j.chest.2023.09.025.
12. Bickhardt J, Czupalla C, Bader U. Reduktion klimaschädlicher Treibhausgase durch Auswahl der Inhalatoren in der Therapie von Patienten mit Asthma und COPD. *Pneumologie* 2022;76(05):321-9. doi: 10.1055/a-1771-5292.
13. Alzaabi A, Bell JP, Montero-Arias F, Price DB, Jackson DJ, Wang HC, et al. Greenhouse gas emissions from respiratory treatments: Results from the SABA CARBON international study. *Adv Ther* 2023;40(11):4836-56. doi: 10.1007/s12325-023-02663-2.
14. Global Initiative for Asthma. Global strategy for asthma management and prevention, 2023. [Internet]. 2023 [citado 30 de julho de 2024]. Disponível em: www.ginasthma.org.
15. Song P, Adeloye D, Salim H, Dos Santos JP, Campbell H, Sheikh A, et al. Global, regional, and national prevalence of asthma in 2019: A systematic analysis and modelling study. *J Glob Health* 2022;12:04052. doi: 10.7189/jogh.12.04052.
16. Brito D, Jácome C, Bulhões C, Barbosa MJ, Pina N, Alves Da Silva A, et al. Prevalence of asthma in Portuguese adults - the EPI-ASTHMA study, a nationwide population-based survey. *Pulmonology* 2025;31(1):2466920. doi: 10.1080/25310429.2025.2466920.
17. Panigone S, Sandri F, Ferri R, Volpato A, Nudo E, Nicolini G. Environmental impact of inhalers for respiratory diseases: decreasing the carbon footprint while preserving patient-tailored treatment. *BMJ Open Respir Res* 2020;7(1):e000571. doi: 10.1136/bmjresp-2020-000571.
18. Dalby R, Eicher J, Zierenberg B. RespiMat® Soft Mist™ Inhaler and its clinical utility in respiratory disorders. *Med Devices Evid Res* 2011;145. doi: 10.2147/MDER.S7409.
19. Janson C, Henderson R, Löfdahl M, Hedberg M, Sharma R, Wilkinson AJK. Carbon footprint impact of the choice of inhalers for asthma and COPD. *Thorax* 2020;75(1):82-4. doi: 10.1136/thoraxjnl-2019-213744.
20. Wilkinson A, Woodcock A. The environmental impact of inhalers for asthma: A green challenge and a golden opportunity. *Br J Clin Pharmacol*. 2022;88(7):3016-22. doi: 10.1111/bcp.15135.
21. Greenhouse Gas Protocol. Global Warming Potential Values [Internet]. [citado 27 de outubro de 2024]. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.
22. Chiesi Farmaceutici S.p.A. Comparison Between CHF5993 pMDI 200/6/12,5mg HFA-152a VS CHF5993 pMDI 200/6/12,5mg HFA-134a in Subjects With Asthma (TRECOS) [Internet]. [citado 20 de julho de 2024]. Disponível em: <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06264674?term=HFC%20152a%20&cond=asthma&rank=14>.
23. Tirumalasetty J, Miller SA, Prescott HC, DeTata S, Arroyo AC, Wilkinson AJK, et al. Greenhouse Gas Emissions and Costs of In-

- haler Devices in the US. *JAMA* 2024;332(12):1017. doi: 10.1001/jama.2024.15331.
24. Campos L, Rosa P, Carreiro Martins P, Xavier B, Leuschner P, M. Marques MI, et al. Recomendações para a redução do impacto ambiental dos inaladores em Portugal: Documento de Consenso. *Acta Médica Port* 2024;37(9):654-61. doi: 10.20344/amp.22062.
 25. Montgomery BD, Blakey JD. Respiratory inhalers and the environment. *Aust J Gen Pract* 2022;51(12):929-34. doi: 10.31128/AJGP-08-22-6536.
 26. Montoro J, Antolín-Amérigo D, Izquierdo-Domínguez A, Zapata J, González G, Valero A. Impact of asthma inhalers on global climate: A systematic review of their carbon footprint and clinical outcomes in Spain. *J Investig Allergy Clin Immunol* 2023;33(4):250-62. doi: 10.18176/jiaci.0887.
 27. Jeswani HK, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of inhalers. *J Clean Prod* 2019;237:117733. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117733.
 28. Janson C, Maslova E, Wilkinson A, Penz E, Papi A, Budgen N, et al. The carbon footprint of respiratory treatments in Europe and Canada: an observational study from the CARBON programme. *Eur Respir J* 2022;60(2):2102760. doi: 10.1183/13993003.02760-2021.
 29. Gagné M, Karanikas A, Green S, Gupta S. Reductions in inhaler greenhouse gas emissions by addressing care gaps in asthma and chronic obstructive pulmonary disease: an analysis. *BMJ Open Respir Res* 2023;10(1):e001716. doi: 10.1136/bmjresp-2023-001716.
 30. Wilkinson AJK, Maslova E, Janson C, Radhakrishnan V, Quint JK, Budgen N, et al. Greenhouse gas emissions associated with suboptimal asthma care in the UK: the SABINA healthCARE-Based environmental cost of treatment (CARBON) study. *Thorax* 2024;79(5):412-21. doi: 10.1136/thorax-2023-220259.
 31. Hatter L, Holliday M, Eathorne A, Bruce P, Pavord ID, Reddel HK, et al. The carbon footprint of as-needed budesonide/formoterol in mild asthma: a *post hoc* analysis. *Eur Respir J*. 2024;64(1):2301705. doi: 10.1183/13993003.01705-2023.
 32. Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar (ICBAS). Sobre One Health [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. Disponível em: <https://onehealth.icbas.up.pt/descricao-do-conceito-uma-saude-one-health/>.
 33. EAACI Knowledge Hub [Internet]. [citado 4 de agosto de 2024]. EAACI GoGreen webinar: How to go green via Inhalers. Disponível em: https://hub.eaaci.org/education_webinars/eaaci-gogreen-webinar-how-to-go-green-via-inhalers/.
 34. Usmani OS, Levy ML. Effective respiratory management of asthma and COPD and the environmental impacts of inhalers. *Npj Prim Care Respir Med* 2023;33(1):24. doi: 10.1038/s41533-023-00346-7.
 35. Asthma article 2: Disposing of asthma inhalers to reduce their environmental impact [Internet]. [citado 7 de março de 2025]. NHS England London patient information on green inhalers. Disponível em: <https://www.medicinesforchildren.org.uk/news/asthma-inhalers-and-the-environment/>.
 36. Huffman P, Hough E. A Hidden Contributor to Climate Change — Asthma Inhalers [Internet]. The Common Wealth Fund. 2023. Disponível em: <https://www.commonwealthfund.org/blog/2023/hidden-contributor-climate-change-asthma-inhalers>.
 37. Murphy A, Howlett D, Gowson A, Lewis H. Understanding the feasibility and environmental effectiveness of a pilot postal inhaler recovery and recycling scheme. *Npj Prim Care Respir Med* 2023;33(1):5. doi: 10.1038/s41533-023-00327-w.
 38. GlaxoSmithKline. Complete the Cycle: Breathe new life into your inhalers [Internet]. 2018 [citado 28 de outubro de 2024]. Disponível em: <https://www.kentcht.nhs.uk/wp-content/uploads/2019/08/Complete-the-cycle-leaflet.pdf>.
 39. Clews G. Inhaler recycling scheme that cut carbon emissions equivalent to more than 8500 cars is scrapped. *Pharm J* [Internet]. 2020 [citado 28 de outubro de 2024]; doi: 10.1211/PJ.2020.20208144. Disponível em: <https://pharmjdev.wpengine.com/article/news/inhaler-recycling-scheme-that-cut-carbon-emissions-equivalent-to-more-than-8500-cars-is-scrapped>.
 40. Swansea Bay Health News [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. Green scheme helps to breathe new life into used inhalers. Disponível em: <https://sbuhb.nhs.wales/news/swansea-bay-health-news/green-scheme-helps-to-breathe-new-life-into-used-inhalers/>.
 41. Hospital Times [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. UK-wide inhaler recycling scheme launched in push to reduce NHS emissions. Disponível em: <https://www.hospitaltimes.co.uk/uk-wide-inhaler-recycling-scheme/>.
 42. AstraZeneca UK Ltd, Royal Wolverhampton NHS. INSPIRE - Inhaler Return and recycling scheme. [Internet]. 2024 [citado 28 de outubro de 2024]. Disponível em: https://www.astrazeneca.co.uk/content/dam/intelligentcontent/unbranded/astrazeneca/uk/en/pdf/work-with-nhs-uk/Executive_Summary_of_Joint_Working_Inputs-Royal_Wolverhampton_NHS_Trust.pdf.
 43. Greener Practice [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. Engaging Primary Care for the health of people and planet. Disponível em: <https://www.greenerpractice.co.uk>.
 44. Green Inhaler: Making your inhaler more environmentally friendly [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. Green Inhaler. Disponível em: <https://greeninhaler.org>.
 45. Respiratory care [Internet]. [citado 28 de outubro de 2024]. Lowering the inhaler carbon footprint. Disponível em <https://www.prescipp.info/our-resources/webkits/respiratory-care/>.
 46. Figueiredo L. VALORMED - Relatório de Actividades 2023 - Resumo [Internet]. 2024 [citado 28 de outubro de 2024]. Disponível em: <https://valormed.pt/inst/wp-content/uploads/2023/04/Relatorio-de-Actividades-2023-Resumo.pdf>.
 47. Janson C, Hernando Platz J, Soular S, Langham S, Nicholson L, Hartgers-Gubbels ES. Reducing carbon footprint by switching to reusable soft-mist inhalers. *ERJ Open Res* 2023;9(3):00543-2022. doi: 10.1183/23120541.00543-2022.

48. De Simón Gutiérrez R, Ginel Mendoza L, Hidalgo Requena A, Rico Munilla D, Cantalapiedra Fernández F. ¿Desechan correctamente los pacientes sus dispositivos de inhalación? Proyecto AIRE. *Semergen* 2022;48(1):14-22. doi: 10.1016/j.semerg.2021.07.011.
49. Inget M, Hisinger-Mölkänen H, Howard M, Lähelmä S, Paronen N. Cradle-to-Grave Emission Reduction for Easyhaler Dry Powder Inhaler Product Portfolio. *Pulm Ther* 2023;9(4):527-33. doi: 10.1007/s41030-023-00239-7.
50. Law AV, Sakharkar P, Zargazadeh A, Tai BWB, Hess K, Hata M, et al. Taking stock of medication wastage: Unused medications in US households. *Res Soc Adm Pharm* 2015;11(4):571-8. doi: 10.1016/j.sapharm.2014.10.003.
51. Veiga A, Sousa AC, Sousa C, Oliveira M, Neto B. End-of-life management strategies of pharmaceuticals in Portuguese households. *Waste Manag Res J Sustain Circ Econ* 2023;41(1):235-47. doi: 10.1177/0734242X221105416.
52. Hiew SY, Low BY. A systematic review of the knowledge, attitude and practice of healthcare professionals and healthcare professional students towards household pharmaceutical waste disposal. *Explor Res Clin Soc Pharm* 2025;17:100556. doi: 10.1016/j.rcsop.2024.100556.