

**Nome do autor:** Victoria Valente Tieppo Martin **Série em 2025:** (x)3a; ( )2a ou anterior

**Título da redação:** A Química na Linha de Frente Contra o “Carbono Invisível” da Respiração

**Desenvolvimento do texto:** Considerar e quantificar o impacto da respiração humana no balanço global de carbono

“A natureza tem uma estrutura feminina: (...) sabe se vingar como ninguém”, afirmou Marina Silva, ambientalista brasileira. Quando falamos em suprir a crescente demanda energética mundial, impulsionada pelo princípio de “desenvolvimento econômico a qualquer custo”, nos deparamos com um modelo produtivo baseado primordialmente na queima indiscriminada de combustíveis fósseis, derivada da industrialização acelerada, e na agropecuária extensiva. Esse sistema produtivo tem provocado uma série de desequilíbrios ecológicos, cuja manifestação mais alarmante é a intensificação dos fenômenos climáticos extremos, que representam a “vingança” da natureza, como sugere a citação inicial, refletida no aumento de ondas de calor, secas severas e fenômenos meteorológicos intensos, na desertificação de solos férteis e na elevação do nível dos oceanos. <sup>1</sup>

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) são o motor dessa comutação. A humanidade já ultrapassou diversos limiares ambientais críticos, e a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera atingiu níveis sem precedentes. No entanto, há um fator menos estudado, mas biologicamente inevitável: a própria atividade humana enquanto organismo vivo. <sup>1,2</sup>

A respiração e os processos metabólicos humanos liberam CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) em proporções variáveis, influenciadas por diversos fatores. O metabolismo aeróbico, em específico, gera CO<sub>2</sub> como subproduto inevitável da respiração celular ( $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + ATP$ ). Embora a contribuição individual seja ínfima quando comparada às grandes fontes emissoras, a soma dessas pequenas frações, multiplicada pelos mais de 8 bilhões de habitantes do planeta, aponta a relevância dessa emissão no balanço global de carbono. <sup>2</sup>

Os GEE regulam o equilíbrio térmico terrestre, mas seu aumento acelerado tem intensificado o aquecimento global. O CO<sub>2</sub>, responsável por 76% das emissões, subiu de 280 ppm no período pré-industrial para mais de 415 ppm em 2021. Já o CH<sub>4</sub>, com potencial de aquecimento 28 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, aumentou 150% desde a Revolução Industrial, sendo originado pela pecuária e degradação de resíduos orgânicos. Por sua vez, o N<sub>2</sub>O, apesar de menos abundante e não composto por carbono, possui um potencial 265 vezes maior que o CO<sub>2</sub> e teve sua concentração elevada em 20% desde o século XIX, impulsionado pela intensificação da agricultura. <sup>1,4,6</sup>

Para quantificar as emissões respiratórias humanas de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, pesquisadores do Reino Unido conduziram um experimento com 104 voluntários. As amostras de ar exalado foram coletadas em sacos de amostragem Tedlar, utilizando um sistema de válvula unidirecional para garantir a obtenção do ar alveolar, evitando a contaminação com ar ambiente. Os voluntários foram instruídos a realizar expirações controladas, e cada amostra foi imediatamente armazenada para posterior análise laboratorial. O estudo registrou variáveis individuais, como idade, sexo, dieta e tabagismo, a fim de correlacioná-las com as concentrações exaladas dos gases analisados. <sup>2</sup>

As amostras foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada a detectores específicos para CH<sub>4</sub> (detector de ionização por chama) e N<sub>2</sub>O (detector de captura de elétrons). Os resultados mostraram que 31% dos participantes foram classificados como *methane producers* (MPs), ou seja, exalavam CH<sub>4</sub> em concentrações superiores ao nível atmosférico de referência (~1,9 ppm). A prevalência de MPs aumentou com a idade, sendo 25% entre aqueles com menos de 30 anos e 40% nos mais velhos. Além disso, 38% das mulheres apresentaram emissões detectáveis de CH<sub>4</sub>, contra 25% dos homens. Já as emissões de N<sub>2</sub>O, detectadas em todos os participantes, apresentaram valores médios de 0,6 ppm, sem correlação significativa com as variáveis. A

extrapolação dos dados indicou que a população do Reino Unido emite anualmente cerca de 1,04 Gg de CH<sub>4</sub> e 0,069 Gg de N<sub>2</sub>O, totalizando um impacto climático equivalente a 53,9 Gg de CO<sub>2</sub>. Embora essa fração seja pequena em comparação com fontes industriais e agrícolas, o estudo sugere que as emissões biogênicas humanas podem representar uma variável relevante para os inventários de gases de efeito estufa, especialmente considerando discrepâncias observadas entre medições diretas (*top-down*) e estimativas setoriais (*bottom-up*).<sup>2</sup>

Analogamente e à luz desse exposto, em ambiente laboratorial escolar buscou-se verificar como as mesmas variáveis individuais anteriormente citadas influenciam a exalação de CO<sub>2</sub>, conduzindo um experimento com 18 voluntários. Utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) para capturar o CO<sub>2</sub> exalado, analisando a velocidade da reação e a formação de carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) (NaOH + CO<sub>2</sub> → Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O) como indicador indireto da concentração de gás liberado. Os voluntários foram avaliados em repouso e após diferentes períodos de atividade física (2 e 5 min), permitindo uma análise comparativa das variações na produção de CO<sub>2</sub> sob diferentes condições fisiológicas.

Imagem 1. Do arquivo do autor, componentes utilizados para realização do experimento



Rótulo da embalagem: "NaOH"  
Hidróxido de sódio  
0,4 M/L"

Imagem 2. Do arquivo do autor, voluntário realizando o experimento



Imagem 3. Do arquivo do autor, demonstração da formação de bolhas (CO<sub>2</sub>) na solução

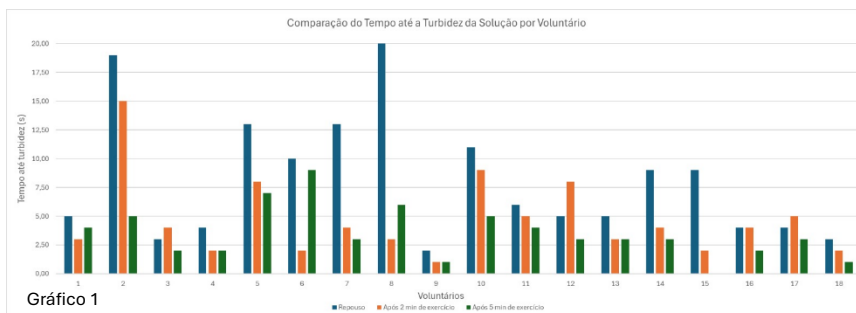


Gráfico 1

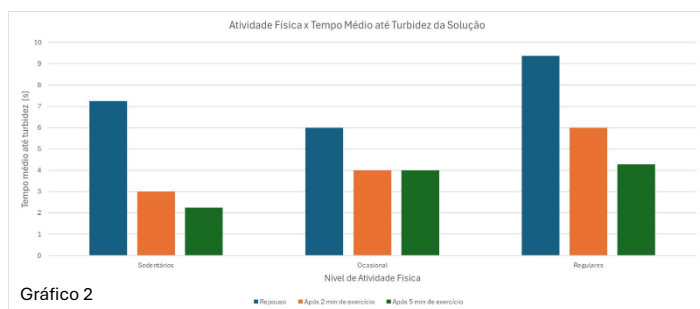


Gráfico 2

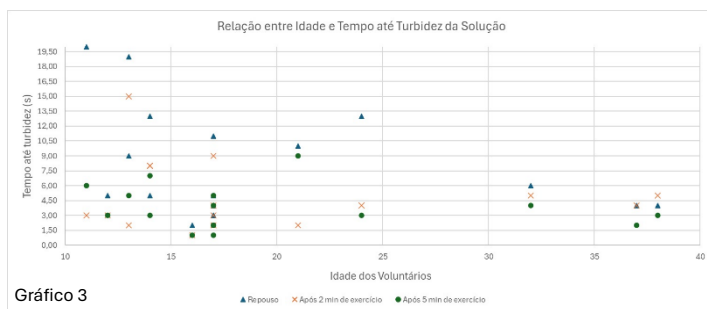


Gráfico 3

Os resultados demonstraram que a atividade física (vide gráfico 2) tem influência direta na eliminação de CO<sub>2</sub>, tornando o metabolismo mais eficiente e reduzindo o tempo necessário para a solução atingir turbidez. Indivíduos que praticam exercícios regularmente apresentam maior taxa de exalação do gás, enquanto sedentários tendem a exibir respostas mais lentas à troca gasosa. O impacto da idade (vide gráfico 3) também se mostrou relevante, com voluntários mais velhos apresentando uma produção de CO<sub>2</sub> ligeiramente maior, enquanto indivíduos mais jovens tiveram tempos de turbidez mais longos.

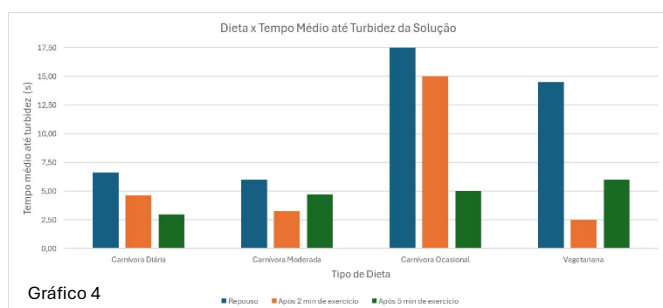


Gráfico 4

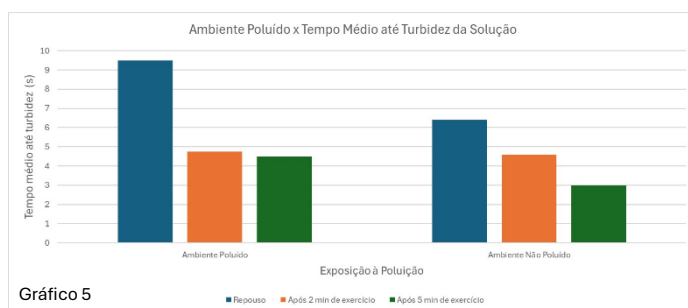
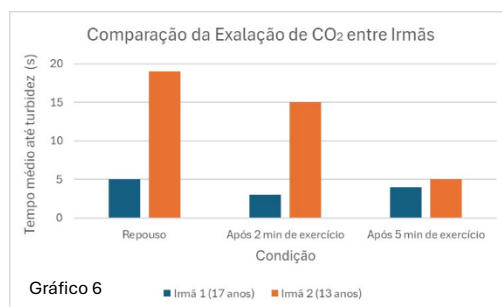


Gráfico 5

A análise da dieta (vide gráfico 4) revelou que participantes que seguem uma alimentação carnívora diária exalam CO<sub>2</sub> mais rapidamente do que vegetarianos ou aqueles com menor consumo de proteínas animais. Isso sugere que a composição da dieta influencia o metabolismo energético e, conseqüentemente, a taxa de produção do gás. Além disso, fatores ambientais (vide gráfico 5), como a exposição à poluição, podem afetar sutilmente a função pulmonar, levando a variações na eficiência da troca gasosa.



A comparação entre duas irmãs voluntárias (vide gráfico 6) evidenciou que outros fatores além de idade, condição clínica e dieta podem modular significativamente a eliminação de CO<sub>2</sub>. A irmã mais velha, asmática e carnívora moderada apresentou tempos de turbidez reduzidos, indicando um metabolismo mais acelerado, enquanto a irmã mais nova, não asmática e carnívora ocasional, teve um aumento mais expressivo na exalação de CO<sub>2</sub> após o exercício físico. Esse achado reforça que, embora fatores gerais sejam preditores importantes, há uma forte influência de características individuais na ventilação e metabolismo.

Embora o cerne da discussão sobre mitigação climática esteja na descarbonização, uma abordagem holística exige a consideração de outros gases de efeito estufa, ainda que secundários dentro desse contexto. Nesse sentido, enquanto o estudo britânico evidenciou a influência de fatores fisiológicos na exalação de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O pela respiração humana e o experimento laboratorial demonstrou a correlação entre metabolismo e eliminação de CO<sub>2</sub>, uma pesquisa conduzida na Universidade de Heidelberg trouxe uma perspectiva complementar ao revelar que processos naturais também impactam o balanço global de GEE. Sob condições laboratoriais controladas, 34 espécies vegetais foram analisadas e constatou-se que todas emitiam N<sub>2</sub>O em quantidades verificáveis, podendo representar de 5% a 10% das concentrações atmosféricas desse gás. Diferentemente dos dois primeiros estudos, que focalizaram nas emissões biogênicas humanas, essa pesquisa expandiu os horizontes, demonstrando que a vegetação terrestre participa ativamente dos fluxos biogeoquímicos. Ainda que o CO<sub>2</sub> seja o principal alvo das estratégias de descarbonização, é imperativo reconhecer a interação entre processos metabólicos de organismos heterotróficos e autotróficos para permitir uma abordagem científica integrativa e em acordo com os desafios reais da crise climática.<sup>3</sup>

No que tange as estratégias de mitigação das mudanças climáticas, as tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) se apresentam como soluções promissoras para reduzir as concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera. Essas tecnologias envolvem a captura do CO<sub>2</sub>, seguida de seu armazenamento em reservatórios geológicos ou de sua conversão em produtos úteis, como combustíveis e produtos químicos.<sup>5</sup>

A captura de CO<sub>2</sub> pode ser realizada através de formas variadas, como absorção química, adsorção física e separação por membranas. Uma vez capturado, o CO<sub>2</sub> pode ser utilizado como matéria-prima na síntese de compostos químicos, sobressaindo-se a produção de metanol (CH<sub>3</sub>OH), cuja reação química para síntese ocorre a partir de CO<sub>2</sub> e hidrogênio (H<sub>2</sub>) (CO<sub>2</sub>+3H<sub>2</sub>→CH<sub>3</sub>OH+H<sub>2</sub>O).<sup>5</sup>

Essa reação é catalisada por metais, como cobre ou zinco, e necessita de condições específicas de temperatura e pressão para atingir eficiência e seletividade adequadas. O hidrogênio utilizado pode ser obtido através de eletrólise da água, especialmente quando alimentada por fontes de energia renovável, potencializando a sustentabilidade do processo.<sup>5</sup>

No Brasil, já existem diversas iniciativas em andamento para implementar tecnologias CCUS. Por exemplo, a Petrobrás já realiza operações de captura e armazenamento de carbono em 23 plataformas marítimas de petróleo e gás. Em São Paulo, o Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI), a partir de uma parceria entre a Shell e a FAPESP, estuda instalar uma planta-piloto no Instituto de Química da Universidade de São Paulo (IQ-USP) para a geração de metanol verde, que empregará o CO<sub>2</sub> capturado no processo de produção de etanol.<sup>5</sup>

A Química é a chave para reverter a crise climática. Seja ao quantificar emissões biogênicas ou ao transformar CO<sub>2</sub> em diversos produtos, ela reestabelece nosso papel no ciclo do carbono. Mais do que explicar fenômenos, oferece soluções objetivas: captura, reutilização e armazenamento do carbono não são apenas possibilidades, mas imperativos para possibilitar um futuro sustentável. A descarbonização não é um ideal distante, mas sim um caminho factível elaborado pela ciência—e a Química está na linha de frente dessa mudança.

### Bibliografia

1. Base Científica, A. ([s.d.]). *Mudança do Clima 2021*. Gov.br. Recuperado 8 de março de 2025, de [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC\\_mudanca2.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf)
2. Dawson, B., Drewer, J., Roberts, T., Levy, P., Heal, M., & Cowan, N. (2023). Measurements of methane and nitrous oxide in human breath and the development of UK scale emissions. *PloS One*, 18(12), e0295157. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295157>
3. *Plants emit greenhouse gas nitrous oxide at substantial amounts*. ([s.d.]). Uni-heidelberg.de. Recuperado 8 de março de 2025, de <https://www.uni-heidelberg.de/en/newsroom/plants-emit-greenhouse-gas-nitrous-oxide-at-substantial-amounts>
4. Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., Davidson, E. A., Ciais, P., Jackson, R. B., Janssens-Maenhout, G., Prather, M. J., Regnier, P., Pan, N., Pan, S., Peters, G. P., Shi, H., Tubiello, F. N., Zaehle, S., Zhou, F., ... Yao, Y. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586(7828), 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>
5. Zapparoli, D. ([s.d.]). *Remover carbono da atmosfera pode ajudar a conter o aquecimento global*. Fapesp.br. Recuperado 8 de março de 2025, de <https://revistapesquisa.fapesp.br/remover-carbono-da-atmosfera-pode-ajudar-a-conter-o-aquecimento-global/>
6. ([S.d.]-a). iop.org. Recuperado 8 de março de 2025, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab9ed2?ref=lightson.news>