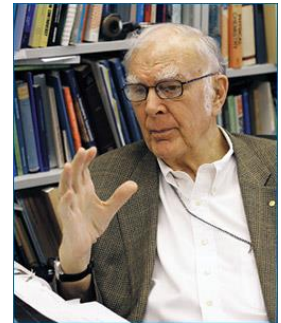


O buraco do ozono: Revelando os perigos escondidos dos sprays

A rotina matinal pode incluir uma vaporização com laca de cabelo, um pequeno jorro de creme de barbear, ou um spray de desodorizante. Fazemos essas coisas quase que automaticamente, sem sequer pensar nisso. Aerossóis são comuns, convenientes e inofensivos, não são? É difícil imaginar que essas atividades diárias podem estar a afetar a atmosfera 15 km acima da superfície da Terra para os próximos cem anos, mas na década de 1970, os químicos Mario Molina e F. Sherwood Rowland descobriram isso mesmo.



À esquerda, Mario Molina dirige-se ao Senado do México em 2008. À direita, F. Sherwood Rowland durante uma entrevista em 2007.

Na época, muitos itens domésticos normais continham CFCs — uma classe de compostos químicos que são constituídos por combinações de cloro (C), flúor (F), e átomos de carbono (C). Desenvolvido na década de 1930 sob o nome comercial Freon, eram considerados produtos químicos maravilha. Eles não são tóxicos, não são inflamáveis, não reagem com quaisquer produtos químicos comuns e, assim, foram considerados seguros para o meio ambiente. Quando Molina e Rowland começaram o seu trabalho, os CFCs eram usados em todos os tipos de coisas — frigoríficos, espuma de poliestireno, e aerossóis (como laca ou produtos de limpeza), para citar alguns. Em vez de [assumir](#), como outros tinham feito, que os CFCs não têm nenhum efeito sobre o meio ambiente, Rowland e Molina decidiram analisar cientificamente a questão do que acontece com os CFCs lançados na atmosfera. O que eles descobriram não só alterou a fórmula do spray de cabelo, mas também os fez ganhar um Prémio Nobel e mudar a política ambiental em todo o mundo.



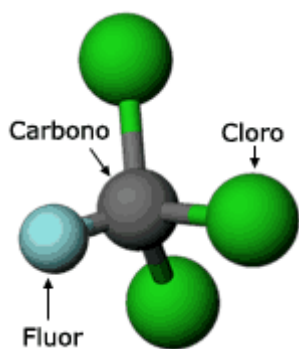
Exemplos de itens domésticos que costumavam conter CFCs.

Este estudo de caso destaca estes aspetos da natureza da [ciência](#):

- A ciência é um empreendimento comunitário que beneficia de uma gama diversificada e ampla de perspetivas, práticas e [tecnologias](#).
- A ciência ajuda-nos a entender como as nossas ações hoje são suscetíveis de afetar acontecimentos futuros.
- A ciência afeta o nosso dia-a-dia.
- [Os dados](#) requerem análise e interpretação. Diferentes cientistas podem interpretar os mesmos dados de diferentes maneiras.
- Ideias científicas evoluem com nova [evidência](#); no entanto, ideias científicas bem suportadas não são frágeis.

A ponta do iceberg

A descoberta do impacto ambiental dos CFCs começou em 1970, no cenário improvável de uma casa de férias na costa oeste da bucólica Irlanda. James Lovelock, um investigador médico, queria saber se a neblina que obscurecia a visão da sua casa, era natural ou de origem humana. Ele formulou a [hipótese](#) que se a poluição fosse a causa da névoa, então a sua fonte seria uma área urbana que conteria grandes concentrações de produtos químicos sintéticos. Como os CFC não ocorrem naturalmente, Lovelock achava que procurar estes produtos químicos no ar seria um bom [teste](#). Usando um instrumento que ele mesmo projetou, ele detetou CFCs na neblina, confirmando as suas origens causadas pelo homem.



A estrutura molecular do triclorofluorometano (CCl₃F), um CFC proibido, antes amplamente usado como refrigerante.

No entanto, o que realmente despertou a sua curiosidade foram os resultados em dias claros. Segundo a sua hipótese, em dias claros, quando o ar vinha do Atlântico, por milhares de quilómetros, sem ter passado por uma área urbana, os CFCs deveriam ser indetetáveis. Surpreendentemente, ele foi facilmente capaz de detetar CFCs mesmo em dias cristalinos. Querendo saber se os CFCs se acumulavam na atmosfera em todos os lugares, Lovelock levou o seu instrumento numa viagem marítima da Inglaterra para a Antártica, fazendo medições ao longo de toda a viagem. Para onde quer que ele viajasse, encontrou CFCs.

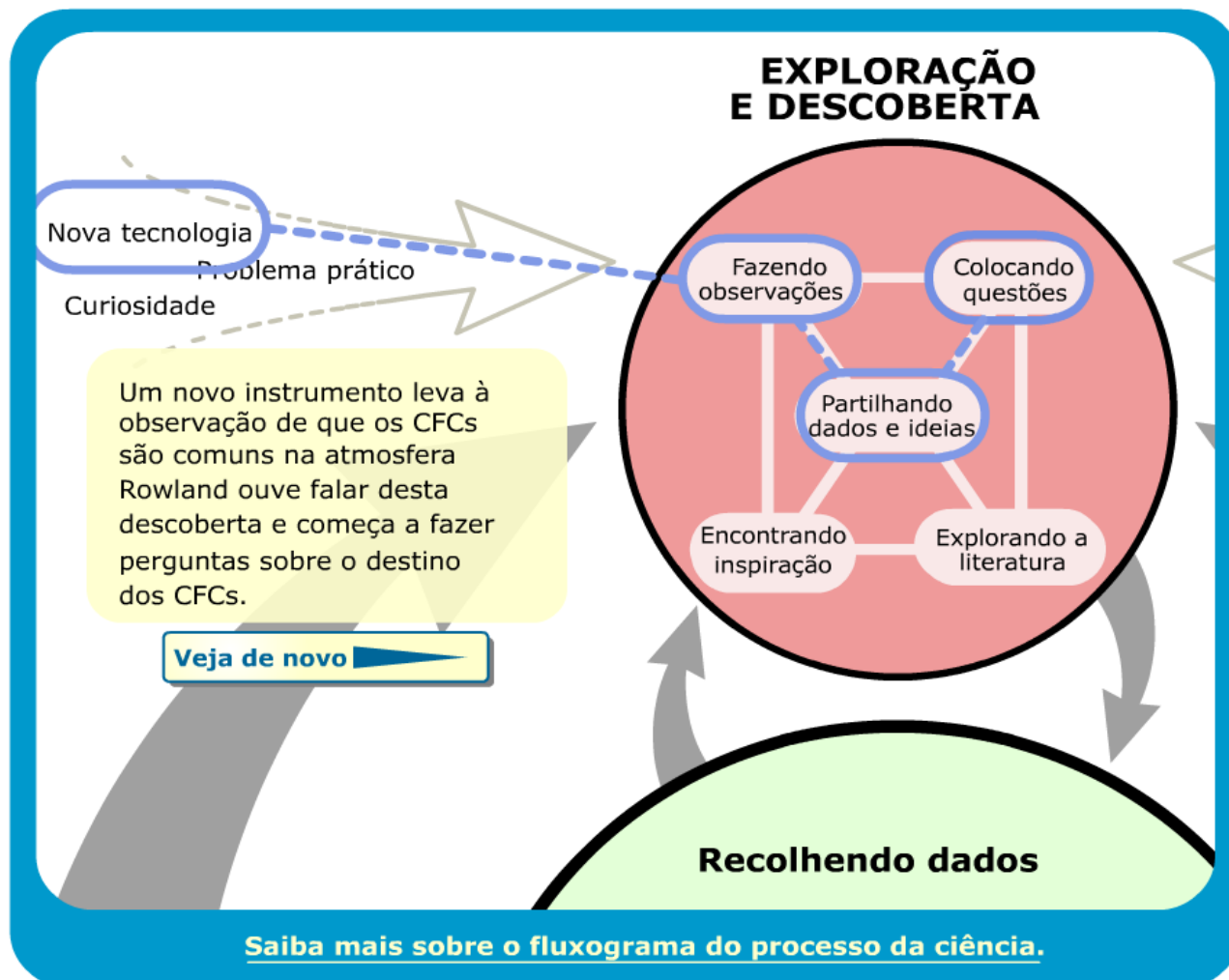


Uma foto de 2005 de James Lovelock a segurar um componente-chave do dispositivo que construiu para detetar CFCs no ar.

Lovelock apresentou as suas descobertas em 1972 num [encontro científico](#) que teve como objetivo reunir meteorologistas e químicos — dois conjuntos de investigadores que,

até este ponto, se tinham misturado muito pouco. Lá, as suas [observações](#) chamaram a atenção de Sherwood Rowland, um químico da Universidade da Califórnia, em Irvine. Rowland estava curioso sobre o que acontece a esses produtos químicos quando são libertados na atmosfera. Mesmo produtos químicos muito estáveis podem reagir sob as condições certas, por exemplo, até mesmo aço inoxidável pode reagir quando é exposto à água salgada a altas temperaturas. Rowland queria saber quais são as condições ideais para os CFCs reagirem e quais os efeitos que isso poderia ter.

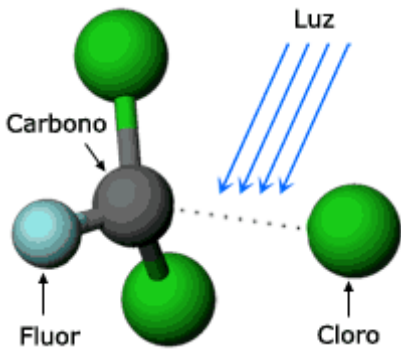
Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



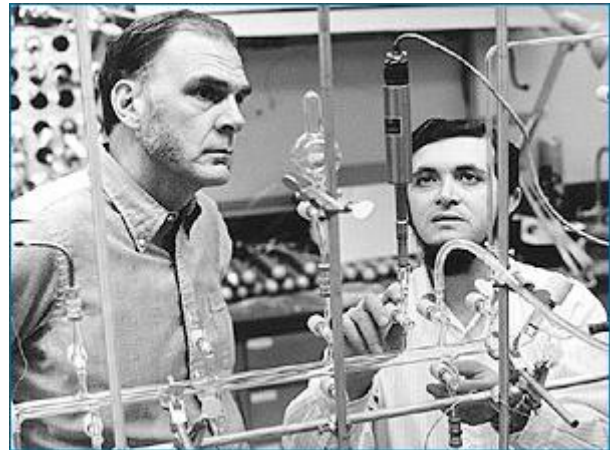
Juntando as peças

Rowland foi acompanhado pelo mais novo membro do seu grupo de pesquisa — Mario Molina, um químico recém-licenciado. Rowland tinha sugerido alguns tópicos diferentes para um primeiro projeto, e Molina pensava que investigar o destino dos CFCs libertados no meio ambiente era o mais interessante de todos. Desejoso por aprender sobre um novo assunto — química atmosférica — Molina atirou-se ao trabalho. Como é esperado de um cientista, ele começou com uma revisão profunda da [literatura científica](#) sobre o assunto, uma vez que talvez alguém já tivesse investigado uma reação química que afetasse os CFCs. Ele descobriu que muitos produtos químicos são decompostos na atmosfera mais baixa, perto de onde eles são libertados — mas não os CFCs. Nenhum

processo químico conhecido parecia ser capaz de afetar os CFCs na baixa atmosfera.



CFCs como o triclorofluorometano (CCl₃F) decompõem-se quando expostos à radiação solar na alta atmosfera, libertando átomos de cloro.



Uma foto de 1970 de F. Sherwood Rowland (esquerda) e de Mario Molina no laboratório.

Ele quis saber o que poderia acontecer com os CFCs quando sobem. A baixas altitudes, a radiação solar é muito filtrada pela atmosfera, mas a grandes altitudes, a radiação solar é muito mais intensa. Com base na sua compreensão da química, Molina sabia que qualquer molécula que atingisse uma altura suficientemente elevada iria ser decomposta em pedaços pela forte radiação solar. Usando as descobertas dos cientistas atmosféricos sobre o movimento do ar, Molina calculou que seriam necessários algo entre 40 e 150 anos para que uma molécula de CFC subisse aleatoriamente até à altura onde seria decomposta por radiação solar, libertando um átomo de cloro nesse processo.

Para descobrir o que aconteceria depois com este átomo de cloro, Molina procurou, em publicações de outros cientistas, saber quais as moléculas atmosféricas que estariam perto deste átomo de cloro que se separou. Entre as muitas possibilidades, uma molécula se destacou: o ozono — três átomos de oxigénio ligados entre si. Molina ficou a saber que o cloro iria reagir cataliticamente com ozono — o que significa que o átomo de cloro pode atuar como um machado, incentivando uma reação que decompõe o ozono, sem afetar o cloro. Na verdade, um único átomo de cloro pode destruir cerca de 100.000 moléculas de ozono! Molina não tinha certezas se isso faria diferença na atmosfera, por isso comparou os efeitos de CFCs com

Como é que um único cloro destrói tanto ozono?

A camada de ozono está cheia de O₃ (moléculas de ozono) e átomos de oxigénio soltos.

Um único átomo de cloro reage com O₃ produzindo um ClO e um O₂ ...

A molécula de ClO então reage com um único átomo de oxigénio produzindo Cl e O₂.

Isto deixa o átomo de cloro (Cl) livre para recomençar o processo desde o início e destruir outra molécula de ozono.

O resultado final destas duas reações:

$$\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$$

$$\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$$

... é que um único átomo de Cl pode transformar muitas moléculas de ozono (O₃) em O₂.

os mecanismos naturais de destruição do ozono investigados por outros cientistas. Descobriu que os CFCs podem conduzir a ainda mais destruição de ozono do que os mecanismos naturais!



A camada de ozono protege a superfície da Terra da radiação UV.

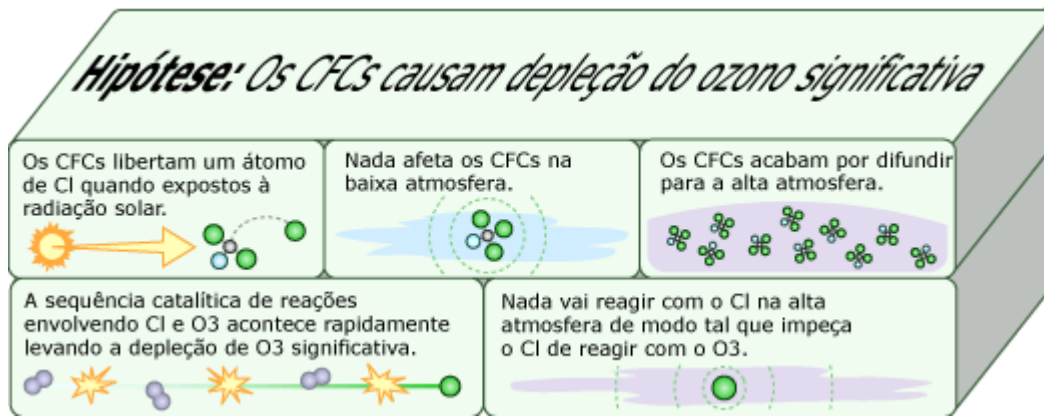
Soar o alarme

A camada de ozono protege a Terra da perigosa radiação ultravioleta — que pode causar mutações. Nos seres humanos, uma camada de ozono reduzida ou empobrecida provavelmente levaria a taxas mais altas de cancro da pele, cataratas e problemas no sistema imunológico. Além disso, um aumento da radiação UV pode afetar as plantas e os ecossistemas marinhos de forma imprevisível — o que poderia, por sua vez, desencadear outras mudanças ecológicas. Porque parecia que os CFCs poderiam destruir o nosso escudo protetor de ozono, Molina e Rowland ficaram alarmados! Mas eles também estavam céticos: se a destruição do ozono estava realmente a acontecer, porque não tinha sido já descoberta por cientistas atmosféricos? Depois de verificarem os seus cálculos, eles decidiram

consultar um colega em química atmosférica e ficaram a saber que, apenas alguns meses antes, os investigadores tinham encontrado a mesma interação de cloro-ozono na exaustão de gases de escape dos vaivéns espaciais — em comparação com os CFCs, uma pequena causa da destruição do ozono. Depois de se terem assegurado que as suas descobertas justificavam preocupação, Molina e Rowland publicaram o seu trabalho.¹ Então, para aumentar a probabilidade de que algo seria feito quanto a esses resultados perturbadores, mostraram-nos aos média e aos políticos, pedindo a proibição da produção e do uso de CFCs. Mas eles não se ficaram por aí ...

O diabo mora nos detalhes

Embora o estereótipo do progresso científico é que ele é impulsionado por [evidência](#) crítica nova, a descoberta de Molina, como muitos esforços em [ciência](#), foi um pouco diferente. Ele não efetuou qualquer [experiência](#) ou recolheu novos [dados](#). Em vez disso, ele assumiu a difícil tarefa de reunir uma grande quantidade de [factos](#) já existentes e [hipóteses](#) sobre reações químicas, os processos atmosféricos e os níveis de CFC, para mostrar que, se todos os factos individuais e hipóteses eram exatos, o resultado seria uma ameaça ambiental grave. Foi a soma desta evidência científica que lhe forneceu quase todas as informações que ele e Rowland usaram para formar a sua hipótese sobre como os CFCs poderiam afetar o ozono atmosférico. Tudo o que precisava fazer era usar teorias químicas conhecidas para calcular uma estimativa para os efeitos a longo prazo dos CFCs no ozono.



A hipótese de Molina e Rowland (que a libertação de CFC na atmosfera iria causar destruição significativa de ozono) baseou-se em muitas hipóteses de apoio (por vezes chamadas *hipóteses auxiliares* ou [suposições](#)). Por exemplo, uma das sub-hipóteses contidas dentro da hipótese de Molina-Rowland foi sobre a rapidez da reação entre o cloro e o ozono. Estas sub-hipóteses foram apoiadas pelas suas próprias [linhas de evidência](#), mas também vieram com as suas próprias incertezas. Se uma sub-hipótese chave se revelasse falsa, isso poderia significar que a hipótese de Molina e Rowland mais abrangente sobre a destruição do ozono também era falsa. Na verdade, alguns cientistas eram céticos sobre a importância da destruição do ozono devido a CFCs, não porque duvidavam do trabalho de Molina e Rowland, mas porque eram céticos acerca de algumas das sub-hipóteses. Por exemplo, no momento em que o documento foi publicado, ainda não havia qualquer evidência experimental a apoiar a ideia que os CFC iriam libertar um átomo de cloro quando expostos à radiação solar. Não demorou muito para que esta hipótese fosse verificada numa experiência de laboratório e confirmada. No entanto, algumas das outras hipóteses não eram tão fáceis de testar, e muito trabalho duro seria necessário para convencer os céticos.

Fazendo modelos

Para superar o ceticismo e convencer outros cientistas e decisores políticos da importância da [hipótese](#) de Molina-Rowland, eles tiveram que [testar](#) as suas ideias com [evidência](#) atmosférica real. No entanto, descobrir exatamente qual a evidência a procurar era complicado. Por vezes, a [expectativa](#) gerada por uma determinada hipótese é evidente (por exemplo, se a hipótese for que o fumo causa cancro do pulmão, você esperaria que fumadores tenham maiores taxas de cancro do pulmão do que não-fumadores) — mas, neste caso, era muito mais complicado. Na verdade, as interações atmosféricas são *tão* complexas que as implicações da hipótese não poderiam ser trabalhadas à mão. Em vez disso, os cientistas basearam-se em [modelos](#) matemáticos da atmosfera que podem ser estudados utilizando computadores.



O QUE É UM MODELO MATEMÁTICO?

"Modelo" pode significar várias coisas diferentes em [ciência](#), mas como método de pesquisa, a modelagem muitas vezes significa a criação de um modelo matemático — um conjunto de equações que representa um sistema real. Esse sistema poderia ser qualquer aspeto do [mundo natural](#) — do movimento das moléculas num balão, às conexões entre os neurónios no seu cérebro, às interações entre espécies de um ecossistema. Por exemplo, um modelo matemático simples de uma interação entre espécies pode descrever a forma como o número de coelhos está relacionada com a taxa de nascimento dos coelhos e com o número de lobos presentes. Um modelo mais complexo do mesmo sistema poderia incluir mais informações, tais como os efeitos da caça, como o número de coelhos afeta a taxa de natalidade dos lobos, e como a pastagem dos coelhos afeta a sua oferta de alimentos. Embora os cientistas tentem limitar os elementos representados em modelos ao que é essencial para os seus propósitos, estes conjuntos de equações são muitas vezes tão complexos que necessitam de um computador para as resolver.

Modelando a relação coelho/lobo:

$$x' = (b - py)x \quad y' = (rx - d)y$$

$x =$



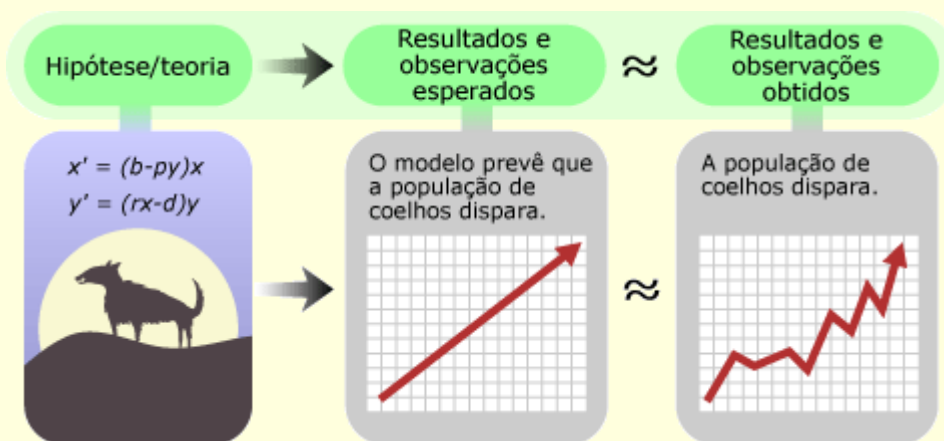
$y =$



Para criar um modelo matemático, os cientistas precisam primeiro de reunir todas as informações relevantes sobre o sistema. No

caso do modelo do ecossistema, isso pode significar conhecimento de como os coelhos e os lobos interagem. Modelos atmosféricos relativos a CFC, por outro lado, foram baseados na informação sobre a forma como as moléculas se movem através da atmosfera, as reações químicas que ocorrem, as concentrações de componentes químicos na atmosfera, etc Esta informação foi combinada com princípios básicos, como a conservação de energia, para criar um conjunto de equações que representa o comportamento do sistema real — a atmosfera.

Os modelos são baseados em conjuntos de hipóteses sobre como o sistema funciona. O modelo lobo-coelho é essencialmente uma hipótese sobre como as duas espécies interagem e como essas interações afetam as suas quantidades. Os modelos CFC-atmosfera representam um conjunto de hipóteses sobre como as moléculas interagem umas com as outras quando se movem através da atmosfera. Os modelos, e as hipóteses que os compõem, são apoiados quando o modelo gera expectativas que correspondem ao comportamento observado do mundo real — por exemplo, se a remoção da caça do modelo tem um efeito semelhante ao observado no mundo real quando os lobos são protegidos da caça. Se um modelo é apoiado e parece ser uma boa representação do mundo real, podemos usá-lo para responder a perguntas: O que aconteceria com as populações de coelhos se permitíssemos a caça ao lobo em certas áreas — ou mais pertinente para Molina e Rowland, o que aconteceria daqui a 50 anos, se continuássemos a produzir CFC à taxa de 1974?

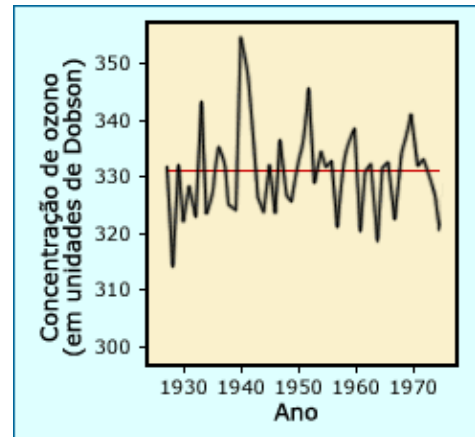


Vários grupos de cientistas acrescentaram o conjunto de reações proposto por Molina e Rowland aos seus modelos da atmosfera, e usaram os modelos para gerar expectativas sobre o que deveria acontecer na atmosfera se o modelo e as reações estivessem corretos. Agora, eles só precisavam de descobrir se as [observações](#) correspondiam às previsões dos modelos ...

Finalmente evidência

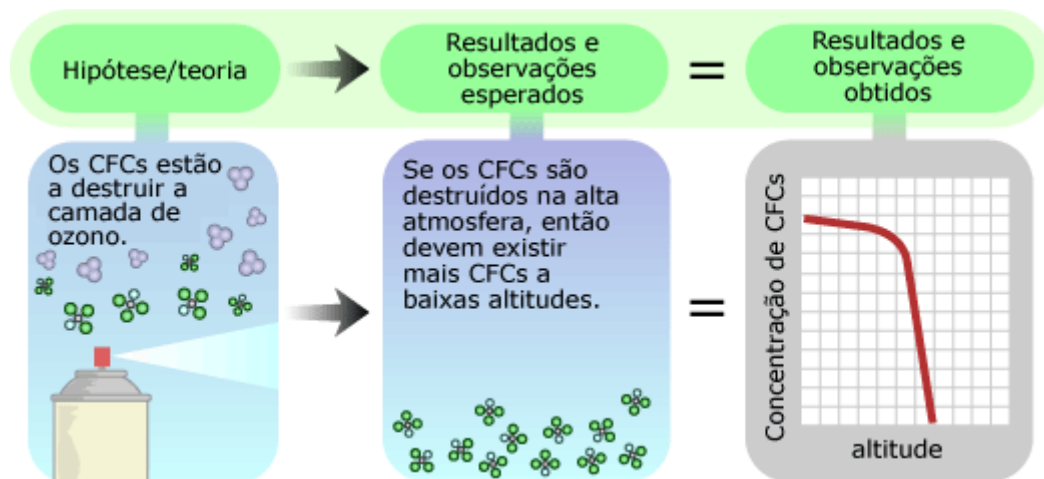
Uma das vantagens de haver uma comunidade científica grande e diversificada é que muitos cientistas podem trabalhar simultaneamente no mesmo problema, sob diferentes ângulos. Alguns cientistas trabalharam em laboratórios refinando as sub-hipóteses contidas nos [modelos](#) e na [hipótese](#) de Molina-Rowland. Alguns trabalharam no desenvolvimento de modelos mais sofisticados que podem determinar com mais precisão os resultados [esperados](#). E outros trabalharam na obtenção de medições atmosféricas para [testar](#) a hipótese.

O teste final da hipótese Molina-Rowland seria encontrar destruição real do ozono, mas, em 1975, essa [evidência](#) não era fácil de encontrar. Primeiro que tudo, de acordo com os modelos, seria necessário um longo tempo com os CFC a subir suficientemente na atmosfera para serem decompostos — e isso significa que devemos esperar um espaço de tempo entre o momento em que CFCs são libertados e o momento em que a camada de ozono é danificada. Em segundo lugar, os níveis de ozono flutuam naturalmente - até 10%, dependendo da estação do ano, hora do dia, e emissão de energia pelo sol — e toda esta variação faz com que seja mais difícil detetar mudanças subtis no nível médio de ozono. A hipótese de Molina-Rowland previa que, mesmo com a reação retardada, alguma destruição do ozono já teria ocorrido por volta de 1975, mas teria sido impossível de separar de todas as flutuações naturais nos níveis de ozono.



Os níveis de ozono oscilam tão amplamente que é difícil de detetar as tendências subtis ao longo de um período de curto prazo, como mostrado por estas medições do ozono para a atmosfera sobre a Suíça tomadas entre 1926 e 1975.

Em vez disso, os cientistas viraram-se para uma expectativa diferente gerada pelos modelos: os níveis de CFC que deveriam ser encontrados a diferentes altitudes. De acordo com os modelos, os CFCs devem ficar completamente inalterados na baixa atmosfera mas destruídos pela radiação solar a altas altitudes. Em 1975, utilizando aviões e instrumentos em balões, dois grupos independentes de cientistas mediram as concentrações de CFC em diferentes altitudes. Os seus resultados confirmaram que os CFCs chegavam à camada superior da atmosfera em quantidades compatíveis com a ideia de que a passagem através da baixa atmosfera deixa os CFCs incólumes. Os resultados também mostraram que, ao passarem através da atmosfera superior, os CFCs estavam a ser destruídos às taxas previstas pela hipótese de Molina-Rowland.



Apesar desta evidência, alguns não estavam convencidos de que a proibição de CFCs fosse a ação correta. Dado o grande impacto económico de uma proibição — estimou-se que as indústrias que dependiam da produção de CFC gerassem 8000 milhões de dólares em negócios e empregassem 200 mil pessoas em 1974 — vários cientistas da área defendiam esperar alguns anos para que a [ciência](#) fizesse mais progressos na questão antes de se tomarem decisões políticas. Eles não duvidavam da validade científica das hipóteses, apenas da sabedoria de uma proibição. Os fabricantes de CFC, por outro lado, estavam a tentar lançar dúvidas sobre a hipótese de Molina-Rowland de qualquer maneira que pudessem. Os porta-vozes da indústria minimizaram repetidamente a ideia como "apenas uma hipótese", sem mencionar os elementos de evidência que a apoiava. A indústria também trouxe o seu próprio "especialista", Richard Scorer, para desafiar as ideias de Molina e Rowland, patrocinando uma ronda de um mês de palestras — Richard Scorer é um professor conhecido pelas suas pesquisas sobre a poluição, um fenómeno de baixa atmosfera. Apesar de toda a propaganda da indústria dos CFCs, o facto que Scorer não tinha publicado um único artigo científico sobre a química da atmosfera superior ou realizado qualquer investigação neste campo fizeram dele uma fonte não confiável de informações sobre a hipótese de Molina-Rowland.

Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:

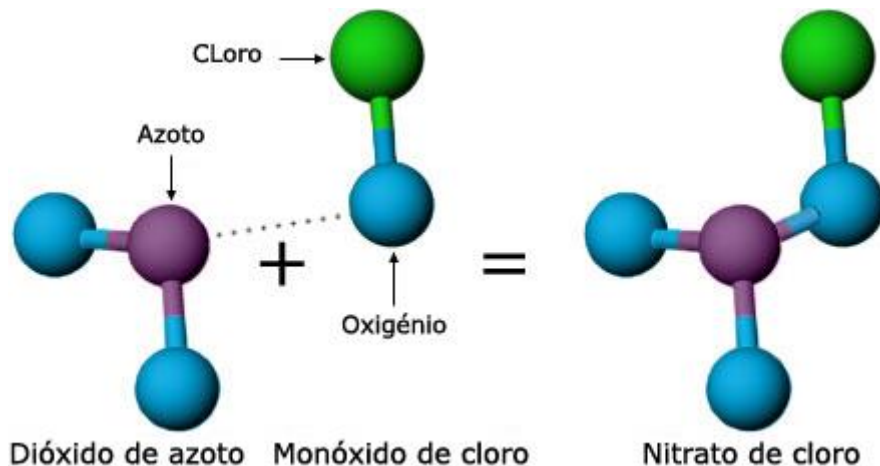


Uma pedra na engrenagem

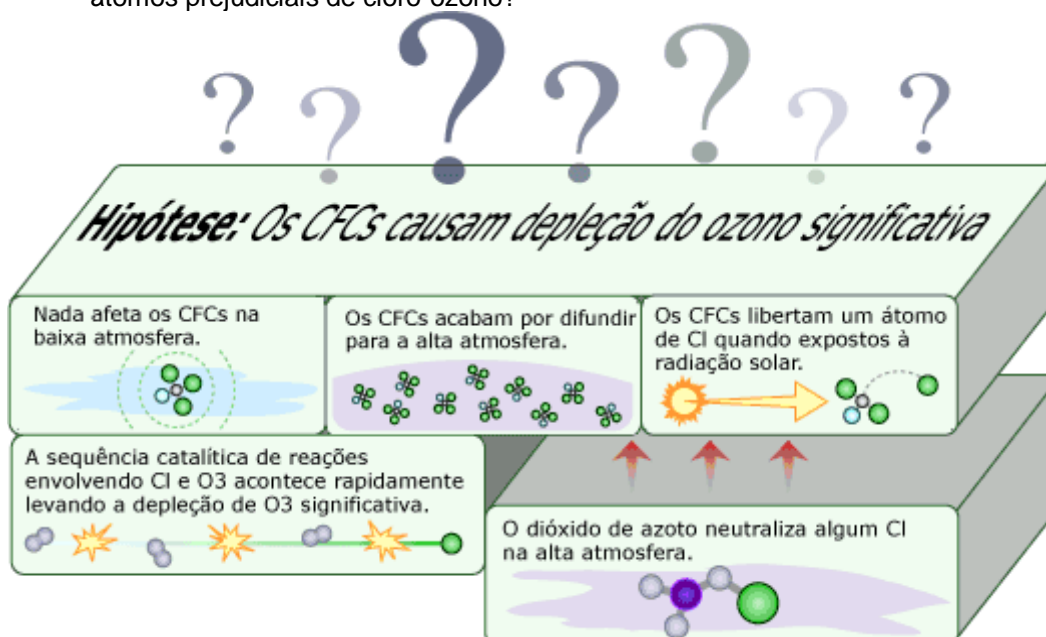
As coisas estavam boas para a [hipótese](#) de Molina e Rowland — mas más para a camada de ozono. As ideias deles tinham apoio de [evidência](#) atmosférica e estavam a ganhar [aceitação](#) na comunidade científica. No entanto, uma característica marcante do pensamento científico é o ceticismo — mesmo relativamente às suas próprias hipóteses. Apesar de a sua hipótese ter sido apoiada por muitas [linhas de evidência](#), Molina e Rowland não [assumiram](#) que estava correta, mas continuaram a olhar para os processos na atmosfera que podem compensar os efeitos dos CFCs.

Uma possibilidade foi o dióxido de azoto. Os cientistas sabiam que o dióxido de azoto pode reagir com o cloro — o átomo dos CFCs que realmente destrói o ozono — e poderia potencialmente reagir com a molécula destrutiva de uma forma inofensiva, formando nitrato de cloro. No entanto, Molina e Rowland não tinham tido essa reação em conta porque na década de 1950 as medições indicavam que o nitrato de cloro é de curta duração — isto é, um pouco depois de ser formado, ele seria desagregado pela luz solar, libertando o cloro nocivo na atmosfera. Agora, Molina e Rowland decidiram verificar essas

medidas antigas, com mais [experiências](#) de laboratório. Eles descobriram que o nitrato de cloro resistia por muito mais tempo do que se pensava anteriormente e poderia ser capaz de colocar as moléculas de cloro fora de combate. Esta reação devia ser considerada nos [modelos](#) atmosféricos. Apesar de estes resultados lançarem dúvidas sobre a sua hipótese, rapidamente puseram essa informação ao dispor da comunidade científica, com a elaboração de relatórios e publicação dos seus resultados.



Na presença de uma outra molécula para servir como um catalisador (não representado), o dióxido de azoto (NO_2) e o monóxido de cloro (ClO), um subproduto da separação de moléculas de ozono por CFCs, reagem para formar nitrato de cloro (ClONO_2). Sherwood e Molina descobriram que o nitrato de cloro não se divide na atmosfera tão rapidamente como tinham pensado — poderia a formação desta molécula efetivamente desactivar os átomos prejudiciais de cloro-ozono?



Os pesquisadores precisavam de incorporar o dióxido de azoto na hipótese — mas não tinham certeza de como isso afetaria as expectativas geradas pela hipótese. Será que ainda esperaríamos ver destruição do ozono significativa?

Quando incorporaram o nitrato de cloro nos seus modelos, os investigadores encontraram algumas surpresas. Vários grupos estavam envolvidos em [testar](#) a hipótese de Molina-Rowland, e até este ponto, todos concordaram sobre o que deveria ser observado na atmosfera se Molina e Rowland estivessem certos. Mas assim que os modeladores

acrescentaram as reações de nitrato de cloro aos seus modelos, diferentes grupos obtiveram resultados contraditórios. Alguns modelos até previam um *acréscimo* no ozono!

O que poderia estar a acontecer? O problema foi devido a uma aproximação usada como um meio de simplificação de alguns modelos. Os cientistas tentam limitar os fatores representados em modelos aos que são essenciais para as suas finalidades. Muitas vezes, isso acontece porque os modelos excessivamente complexos podem exigir cálculos que levariam anos para serem concluídos num computador, até mesmo num supercomputador. Os cientistas usam o seu conhecimento do problema para tentar descobrir que simplificações podem ser apropriadas para um determinado modelo e, em seguida, tentam verificar a sua validade. Estas simplificações formam um outro conjunto de sub-hipóteses. Se um modelo é impreciso, talvez seja porque uma das ideias centrais do modelo está errada, ou talvez seja porque uma das suas aproximações dá um resultado simplificado de mais.

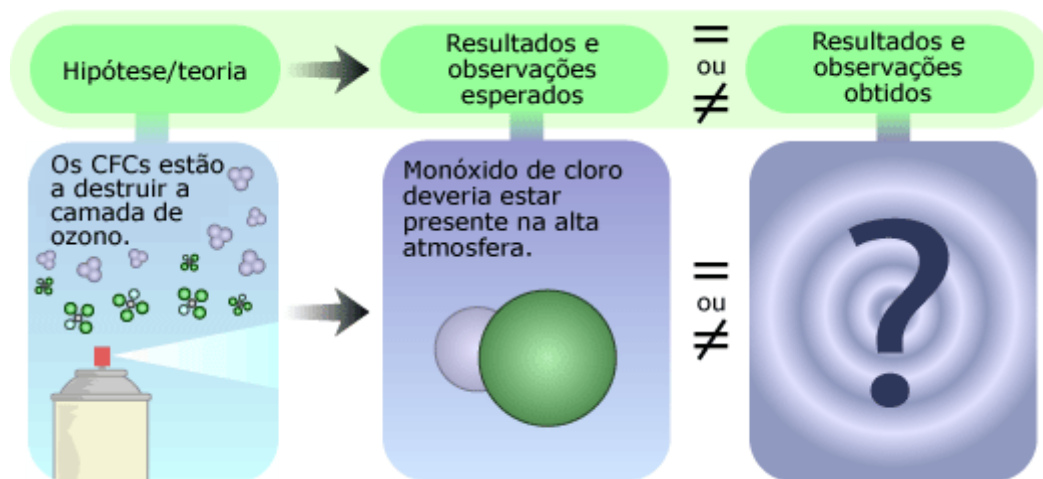
No caso dos modelos atmosféricos, os cientistas descobriram que os modelos que preveem um aumento do ozono total tinham uma coisa em comum: todos eles usaram a aproximação que o sol brilha com a sua intensidade média o dia inteiro, em vez de variar ao longo do dia. Esta simplificação revelou-se excessiva — uma sub-hipótese incorreta. A remoção desta aproximação pôs esses modelos de acordo com os outros modelos e com as medições atmosféricas reais de nitrato de cloro. Mesmo com as reações de nitrato de cloro incorporadas nos modelos, a hipótese de Molina-Rowland previu níveis de destruição do ozono significativos (apesar de baixos).

Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



A evidência cresce

Com um grande sobressalto resolvido e uma melhor compreensão da atmosfera, Molina e Rowland estavam prontos para o próximo [teste](#) da sua [hipótese](#). O objeto de atenção era o monóxido de cloro — um dos produtos da destruição do ozono. Uma vez que não há outra fonte conhecida de monóxido de cloro, encontrar este produto químico na atmosfera superior apoiaria fortemente a ideia de que o cloro está a destruir o ozono. No entanto, a quantidade de monóxido de cloro que os cientistas estavam à procura era minúscula — seria como tentar detetar uma única gota de corante numa piscina olímpica cheia de água.



A tarefa era ainda mais difícil, porque os instrumentos sensíveis necessários para detetar as moléculas tinham de ser levados em balão para a atmosfera, tomar medidas rapidamente, e sobreviver a viagem de pára-quedas de volta à terra. Apesar destas dificuldades, o cientista atmosférico James Anderson conseguiu obter a [evidência](#) crítica. Anunciados no final de 1976, os resultados mostraram uma proporção de cloro para monóxido de cloro muito próxima do valor esperado se a hipótese de Molina-Rowland fosse exata.

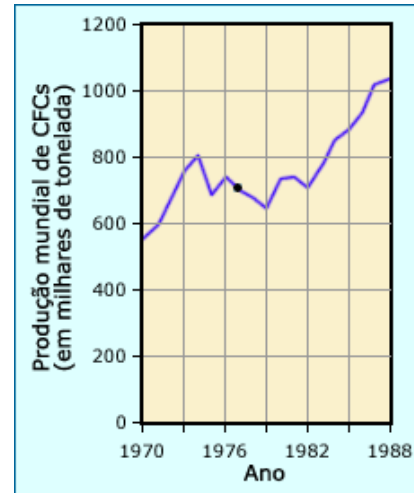
Essa evidência foi resumida num relatório sobre CFCs solicitado pelo governo federal americano — o resultado terrível previsto pela hipótese Molina-Rowland tinha atraído mais interesse além do meramente científico. Dado o crescente conjunto de evidência científica em apoio à hipótese de Molina-Rowland, o governo sentiu que era hora de agir.

No dia 11 de maio de 1977, o governo dos EUA anunciou um cronograma para a eliminação gradual dos CFCs em aerossóis.



Balões de alta altitude transportam aparelhos de medição sensíveis até à atmosfera superior para verificar os níveis de ozono.

Logo depois seguiram-se o Canadá, a Noruega, e a Suécia. Com a eliminação de aerossóis a ter lugar e uma maior monitorização do nível de ozono do mundo, as coisas pareciam estar a caminhar na direção certa. Mas o ímpeto logo se dissipou e não conseguiu inspirar novas mudanças políticas. De facto, a produção mundial de CFC baixou apenas ligeiramente antes de começar a crescer rapidamente outra vez no início de 1980. Molina e Rowland defenderam uma proibição total de todas as fontes de produção de CFC (não apenas aerossóis), mas os políticos não estavam a reagir. Apesar de avanços e recuos na ação ambiental, os dois continuaram os seus esforços



Um gráfico que mostra a produção mundial de três tipos principais de CFC entre 1970 e 1988. O ponto marca o ano (1977) em que a eliminação dos CFCs nos EUA foi anunciada.

para compreender totalmente a destruição do ozono, motivados tanto pelo interesse científico como por um desejo de evitar uma possível catástrofe ambiental. Entretanto, uma peça-chave da evidência foi-se revelar num lugar improvável ...

Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



Um problema inegável na Antártica

O investigador Joseph Farman tinha vindo a recolher [dados](#) atmosféricos em Halley Bay, Antárctica desde 1957. Todos os anos ele enviava uma equipa de assistentes de investigação para medir os níveis de ozono e as concentrações de gases como os CFCs. Em 1982, as suas leituras do ozono, apresentaram uma queda dramática — cerca de 40%. Em vez de ficar alarmado, ele ficou cético quanto aos dados e pensou que deveria ser devido a um mau funcionamento dos instrumentos. A máquina era notoriamente difícil de manter a trabalhar no frio antártico, e este instrumento em particular era velho. Além disso, pensou, os cientistas da NASA tinham satélites a recolher dados atmosféricos em todo o mundo, e eles não tinham relatado quaisquer [anomalias](#). O instrumento de Farman estava em terra e só recolhia um único dado — correspondendo à parte da atmosfera diretamente acima dele. Certamente que milhares de pontos de dados da NASA teriam revelado um decréscimo no ozono se tivesse havido uma descida. Farman encomendou um novo instrumento para a medição do ano seguinte.



Joseph Farman (à esquerda) com os seus co-autores de 1985, Brian Gardiner e Jonathan Shanklin, e um espectrofotómetro utilizado para medir as concentrações de ozono estratosférico.

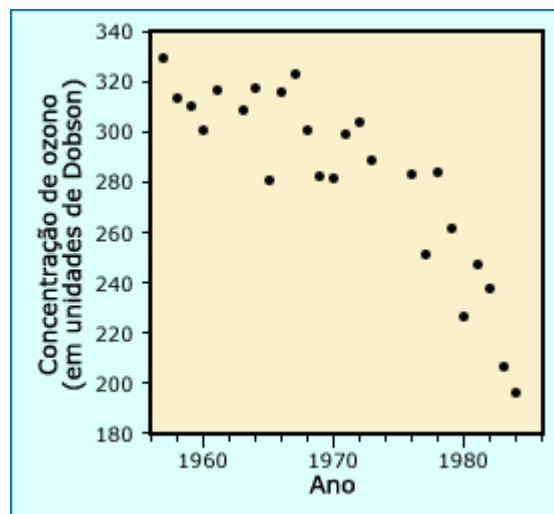
Mas no ano seguinte, Farman ainda encontrou um declínio drástico. Ele foi rever os seus dados antigos e descobriu que o declínio tinha começado em 1977. Agora Farman suspeitava de que algo estranho estava a acontecer estritamente sobre Halley Bay, que não afetaria outras áreas. Então, no ano seguinte, a sua equipa tomou medidas de um local a 1.000 milhas a noroeste de Halley Bay. E também aí ocorreu uma grande diminuição do ozono. A [evidência](#) crescente era inegável. Farman decidiu que era altura de publicar os seus dados.

Por que não tinha o satélite da NASA capturado esta diminuição nos níveis de ozono? Para seu desgosto, os cientistas da NASA perceberam que tinham dados indicando a perda de ozono, mas que tinham passado despercebidos. Uma vez que o seu satélite produzia dados 24 horas por dia, fornecia aos cientistas informações muito mais rapidamente do que eles os conseguiam analisar. Para lidar com esse excesso, um programa de processamento de dados tinha sido criado para filtrar todas as medidas

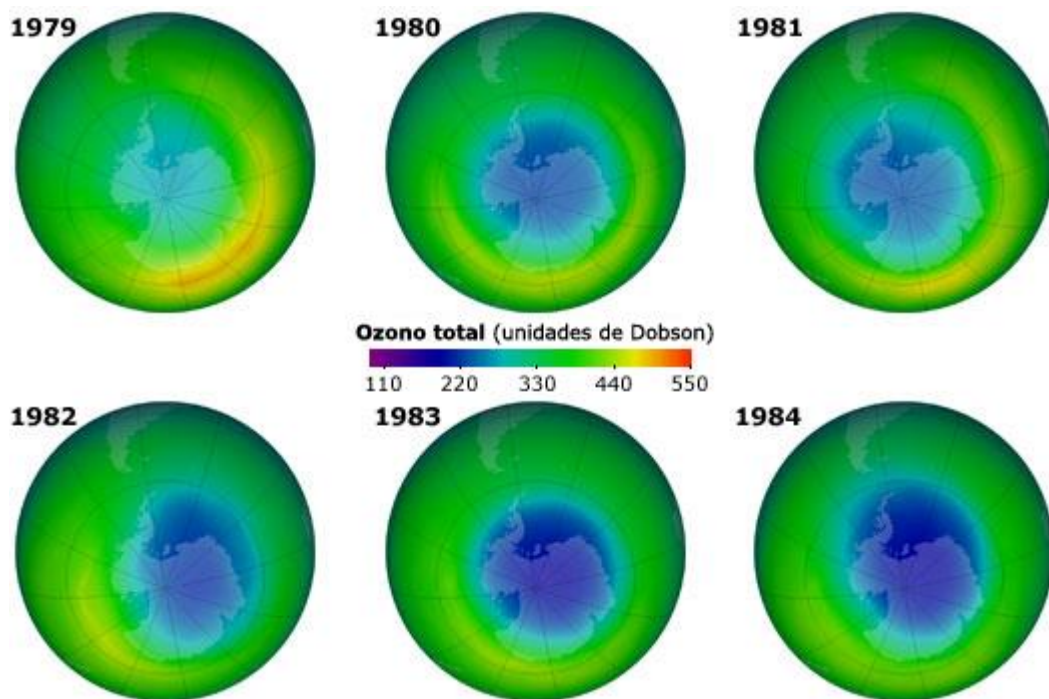
abaixo ou acima dos valores que foram considerados medidas efetivas de ozono impossíveis. Este programa foi baseado na suposição que estas medidas "impossíveis" eram devidas a avarias dos instrumentos.

Os dois grupos de cientistas (o grupo de Farman e o grupo da NASA) olharam para os mesmos dados, mas interpretaram-nos de forma diferente por causa das suas técnicas de análise de dados. O grupo de Farman concluiu que os dados refletiam mudanças reais no ozono, enquanto que o grupo da NASA concluiu que os dados refletiam um problema dos instrumentos.

A evidência de Farman mostrou ao grupo da NASA o problema com o seu processo de análise de dados. Quando os cientistas da NASA reanalisaram as suas medições da Antártica, descobriram um buraco gigantesco na camada de ozono — uma região de ozono destruído do tamanho dos Estados Unidos! O nosso escudo protetor da radiação solar já tinha sido danificado ainda mais do que os cientistas acreditavam ser possível. A destruição do ozono na Antártica era real, mas porque é que era muito maior do que qualquer um dos modelos tinha previsto?



Níveis médios de outubro de ozono registados pelo grupo de Farman em Halley Bay, Antártica, de 1957 a 1984.



Estes mapas, gerados a partir de dados de satélite da NASA, mostram o buraco crescente na camada de ozono sobre a Antártica a cada mês de outubro de 1979 a 1984. Estes correspondem bem com as medições de Farman que mostram um declínio significativo no ozono para este período.

Dinamite num pacote fofo

As perdas chocantes de ozono da Antártica deixaram muitos cientistas intrigados, inclusive a química atmosférica Susan Solomon. Com base na sua experiência em [modelação](#) de química atmosférica e movimentos do ar, Solomon suspeitava que alguns processos químicos desconhecidos envolvendo CFCs ou produtos com CFC estavam a causar essas perdas. Ao procurar no seu cérebro algo que pudesse estar a faltar nos modelos, Solomon lembrou-se de um fenómeno raro que ocorre na Antártica: nuvens de alta altitude de partículas de gelo, chamadas nuvens estratosféricas polares, que se formam na camada de ozono. Curiosa, ela e o seu colega Rolando Garcia, um colega cientista atmosférico, construíram um modelo atmosférico que incluiu estas nuvens polares, com as partículas de gelo que proporcionam uma superfície sólida sobre a qual podem ocorrer reações.



Os investigadores Susan Solomon, à esquerda, e Rolando Garcia, à direita, examinaram como as partículas de gelo em nuvens estratosféricas polares podem afetar a destruição do ozono.

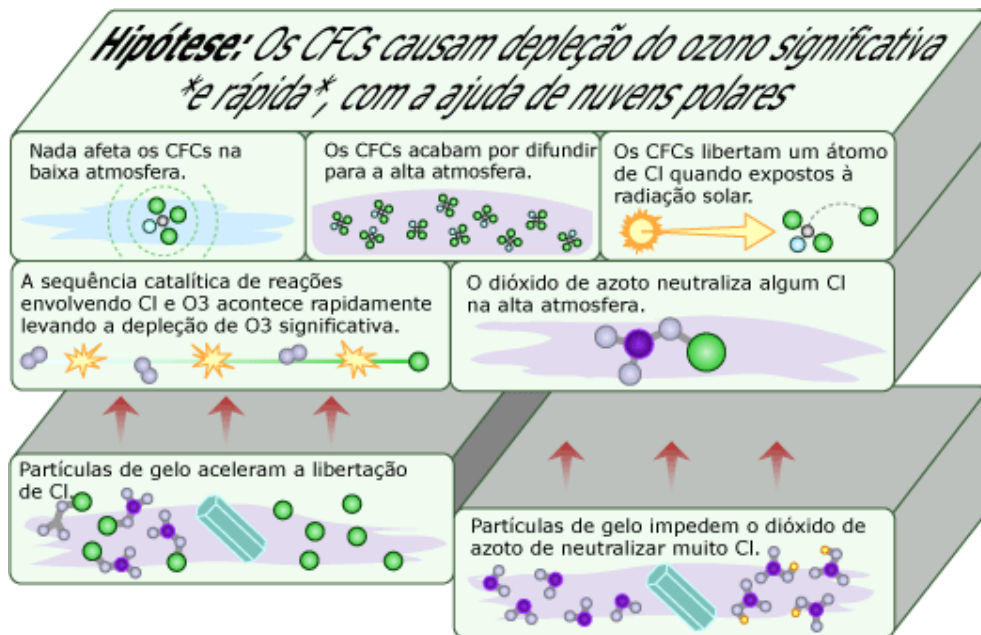
Esta mudança aparentemente pequena na [hipótese](#) levou a grandes alterações nos resultados — o modelo previa agora uma grande perda de ozono. Parecia que a presença destes pequenos cristais de gelo fazia a destruição do ozono pelos CFC muito mais eficiente. Com alguns resultados preliminares em mãos, Solomon contactou Rowland. Acontece que Rowland também queria saber o que aconteceria se superfícies sólidas fossem adicionados aos modelos atmosféricos. Por meio de [experiências](#) de laboratório, ele já tinha descoberto que algumas reações-chave (por exemplo, a libertação de cloro destrutivo do nitrato de cloro) ocorriam mais rapidamente na superfície de sólidos como vidro e Teflon — e, por extensão, talvez também de gelo das nuvens polares.



Nuvens estratosféricas polares sobre o norte da Suécia.

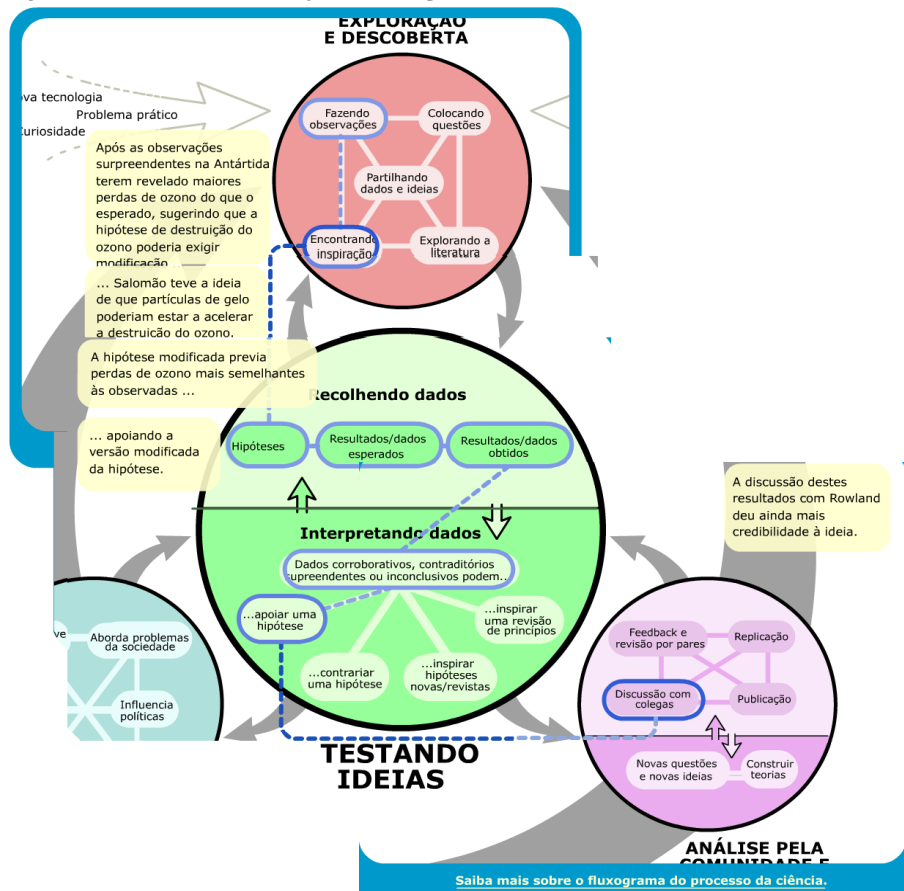
Uma vez que Rowland estava a fazer algo semelhante a Solomon e Garcia, decidiram colaborar. Com as suas reações propostas, eles explicaram como é que partículas aparentemente inofensivas de gelo das nuvens podem não só libertar cloro destruidor de ozono, mas também neutralizar os produtos químicos que poderiam tornar o cloro inofensivo, como o dióxido de nitrogénio. O modelo que eles criaram com essas reações

foi capaz de explicar as [observações](#) do ozono da Antártica, mas era precisa mais [evidência](#) para determinar se as nuvens de gelo eram realmente as responsáveis pela extensão da destruição do ozono na Antártica.



O trabalho de Rowland, Salomão e Garcia sugeriu uma modificação para a hipótese original: os CFCs causam destruição significativa do ozono — e fazem-no muito mais rapidamente com a ajuda de nuvens polares.

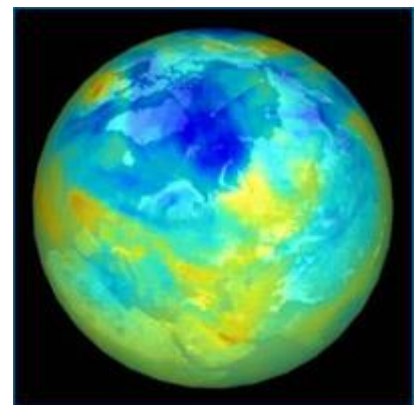
Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



Evidência atmosférica

A [hipótese](#) modificada de Molina-Rowland (que as reações relacionadas com CFCs, aceleradas por nuvens polares, estavam a provocar perdas de ozono) ajudou a inspirar uma onda de [experiências](#) e estudos atmosféricos. Estas investigações produziram várias [linhas de evidência](#) diferentes, o que acabou por apoiar a hipótese atualizada:

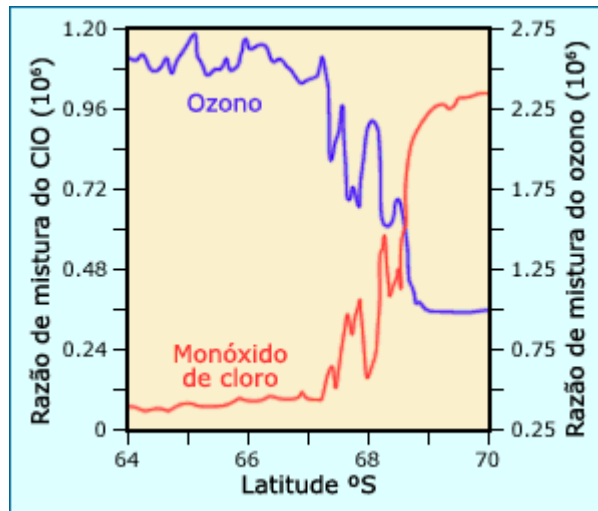
- **Evidência de que as reações propostas efetivamente acontecem no gelo:** Molina criou uma fina camada de gelo num tubo de vidro estreito e soprou produtos químicos contendo cloro para dentro dele. E tal como esperado, as reações propostas verificaram-se. Molina, em seguida, passou a mostrar que estas reações ocorrem muito mais rapidamente do que se pensava.
- **Evidência de que reações em partículas de gelo realmente ocorrem na atmosfera:** Se a hipótese revista fosse correta, os cientistas esperariam que a abundância de monóxido de cloro e dióxido de azoto (entre outras substâncias químicas) seria afetada por reações no gelo. As medições de monóxido de cloro atmosférico mostraram valores que seriam cerca de 100 vezes demasiado grandes, a não ser que partículas de gelo desempenhassem um papel importante. As medições de dióxido de azoto forneceram [evidência](#) semelhante em suporte às reações em partículas de gelo.
- **Evidência de que um aumento da perda de ozono ocorre sempre que as nuvens polares geladas estão presentes:** Estas nuvens também se formam no Ártico. Se reações em partículas de gelo nessas nuvens realmente são as responsáveis, então também esperaríamos ver destruição do ozono no Ártico — embora menos grave do que na Antártica, já que as nuvens são menos comuns em torno do Pólo Norte. Observações revelaram exatamente o que a hipótese atualizada previu: um menor grau de destruição do ozono no Ártico.
- **Evidência de que o cloro está a causar a destruição do ozono:** De acordo com a hipótese, quando os CFCs se decompõem produzem cloro, que destrói o ozono e gera monóxido de cloro. Assim, os cientistas argumentaram que, se estas reações estavam a ocorrer, os níveis de ozono devem ser baixos onde os níveis de monóxido de cloro são altos e vice-versa. James Anderson foi capaz de obter estes [dados](#) críticos situando o seu instrumento de medição na asa de um avião voando através do buraco de ozono da Antártica. Tal como previsto, o ozono era baixo, onde o monóxido de cloro era elevado, reforçando a ligação entre o cloro e a destruição do ozono.



Nesta imagem da NASA do Ártico, as regiões azuis representam a diminuição nos níveis de ozono observados entre o início de 1980 e o inverno de 1999-2000.



A aeronave de pesquisa especialmente equipada da NASA que reuniu grande parte dos dados usados no estudo de James Anderson sobre o buraco de ozono da Antártica. A caixa na asa ao centro contém o instrumento para medir as concentrações de monóxido de cloro na atmosfera superior.



Um gráfico de monóxido de cloro e as concentrações de ozono a partir de dados recolhidos pela aeronave. Fora do buraco (lado esquerdo do gráfico), os níveis de ozono são altos e os níveis de monóxido de cloro são baixos, enquanto o inverso é verdadeiro dentro do buraco (lado direito do gráfico) — tal como a hipótese de Molina-Rowland nos levaria a esperar.

A evidências recolhida a partir dessas e de outras investigações, recolhida por diferentes pessoas ao longo de uma década, em última análise apoiam a hipótese de que o cloro, predominantemente proveniente de CFCs, foi a principal causa da perda de ozono da Antártica, que as reações sobre as partículas de gelo das nuvens polares aceleraram este processo, e que o mesmo tipo de reações químicas ocorreram no Ártico.

Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



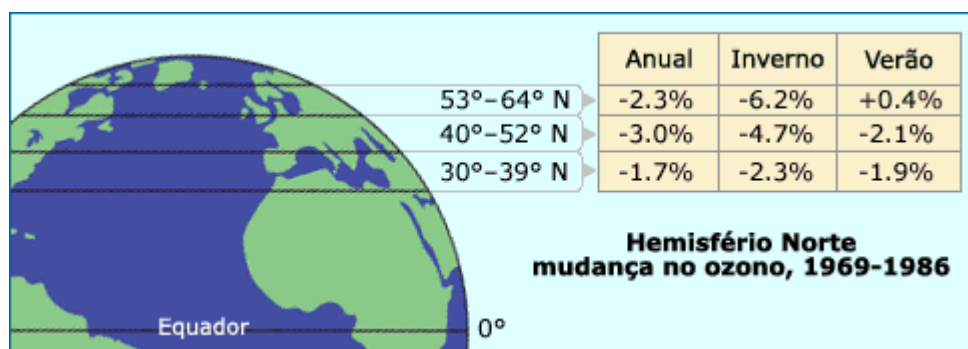
Mais do que um problema Polar

Evidência para a destruição do ozono sobre os Polos estava a acumular-se — mas o que dizer sobre o resto do planeta? Aqui, os cientistas encontraram um aparente paradoxo. Na década de 1950, as estações de medição em vários locais ao redor do mundo começaram a acompanhar os níveis de ozono locais. Antes da descoberta do buraco da Antártica, os investigadores analisaram os dados dessas estações muitas vezes e não encontraram nenhuma evidência de destruição do ozono — o que não parecia condizer com evidências recentes da destruição do ozono da Antártica. Poderiam estas análises dos níveis de ozono globais ser de confiança? Para responder a essa pergunta, a NASA organizou o Painel de Tendências de Ozono em 1987. Composto por 150 cientistas de todo o mundo, o painel reanalisou esses dados de ozono utilizando um novo procedimento e encontrou uma perda de ozono anual de 1,7–3% no Hemisfério Norte.



Dados de instrumentos baseados em terra, como este espectrofotómetro Dobson em Arosa, na Suíça, não pareciam mostrar qualquer diminuição nos níveis de ozono. O que se passava?

Como poderiam duas interpretações dos mesmos dados terem dado resultados diferentes — sem perda de ozono contra 1,7–3% de perda de ozono? Tal como com os modelos atmosféricos discutidos anteriormente, a explicação está nos detalhes — as suposições que os analistas usaram para combinar os dados. A análise original (que não tinha detetado problemas com a camada de ozono) assumiu que a destruição do ozono era a mesma ao longo do ano, aglomerou todas as medições do ozono num conjunto e usou as médias anuais. A nova análise levou em conta a evidência adicional que sugere que a perda de ozono varia sazonalmente, e assim considerou dados de diferentes latitudes separadamente e os dados de médias para cada mês separadamente. Como o novo processo incorporou muito mais da variação induzida por CFC nos níveis de ozono, foi capaz de detetar uma perda ozono que o procedimento original não poderia detetar.

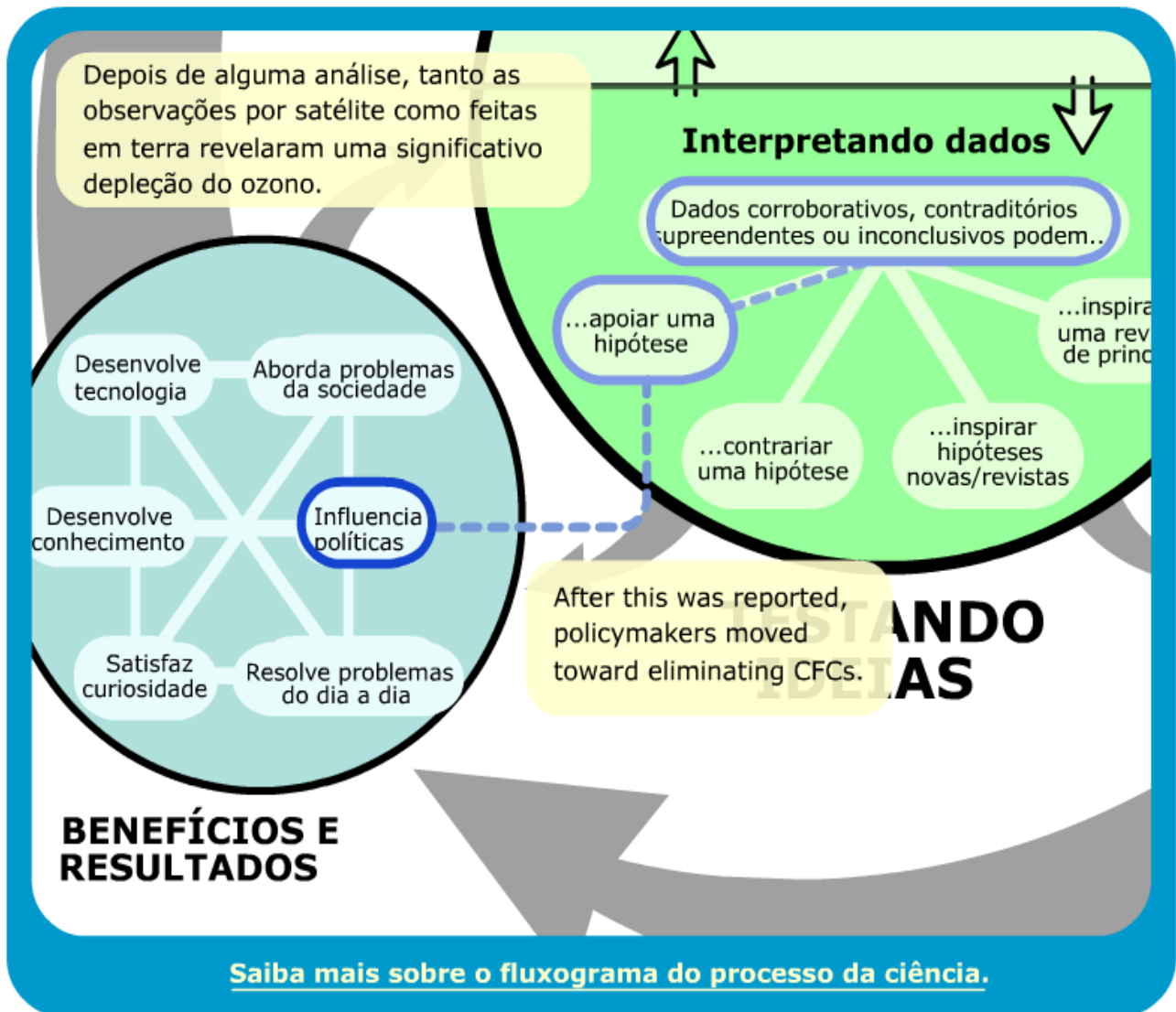


Mudança na quantidade de ozono no Hemisfério Norte durante um período de 17 anos. Observe o grande declínio no ozono durante os meses de inverno e como o declínio de inverno é maior em latitudes mais altas.

O relatório do Painel de Tendências de Ozono, lançado em 1988, foi o último prego no caixão dos CFCs. Verificou que a destruição de ozono existia no mundo inteiro e que a

causa parecia ser os produtos químicos de cloro, principalmente CFC. Finalmente, a comunidade internacional sentiu-se obrigada a legislar a proibição de CFCs. Em 1990, os decisores políticos de 93 países reuniram-se em Londres para assinar um tratado, concordando em abolir os CFCs até 2000 (dando aos países mais pobres mais tempo para encontrar alternativas). Nos dois anos seguintes, como mais resultados de estudos científicos indicaram um aumento da destruição do ozono, a data da abolição foi adiada para 1996.

Veja como a história do ozono corresponde ao fluxograma da ciência:



Conclusões

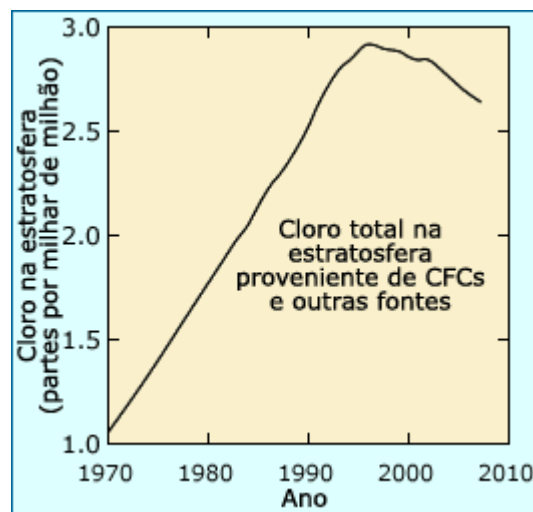
Revedo a investigação científica da destruição do ozono, podemos ver como a [hipótese](#) de Molina-Rowland evoluiu com novos [dados](#). Quando o nitrato de cloro, um produto químico que amarra o cloro de uma forma segura para o ozono, passou a fazer parte da hipótese, a quantidade esperada de perda de ozono diminuiu. Então, quando as nuvens polares foram consideradas, a perda de ozono [esperada](#) aumentou. Através de todas estas pequenas revisões, o núcleo da hipótese, a ideia de que os CFCs levam à

destruição do ozono, nunca mudou. Retiradas do seu contexto científico, estas flutuações nas expectativas sobre a perda de ozono podem ter parecido indicar que os cientistas estavam confusos ou em desacordo uns com os outros, mas numa inspeção mais próxima, vimos que as flutuações eram uma parte normal do processo científico de como os cientistas chegaram a uma compreensão mais completa de um sistema extremamente complexo, a atmosfera.



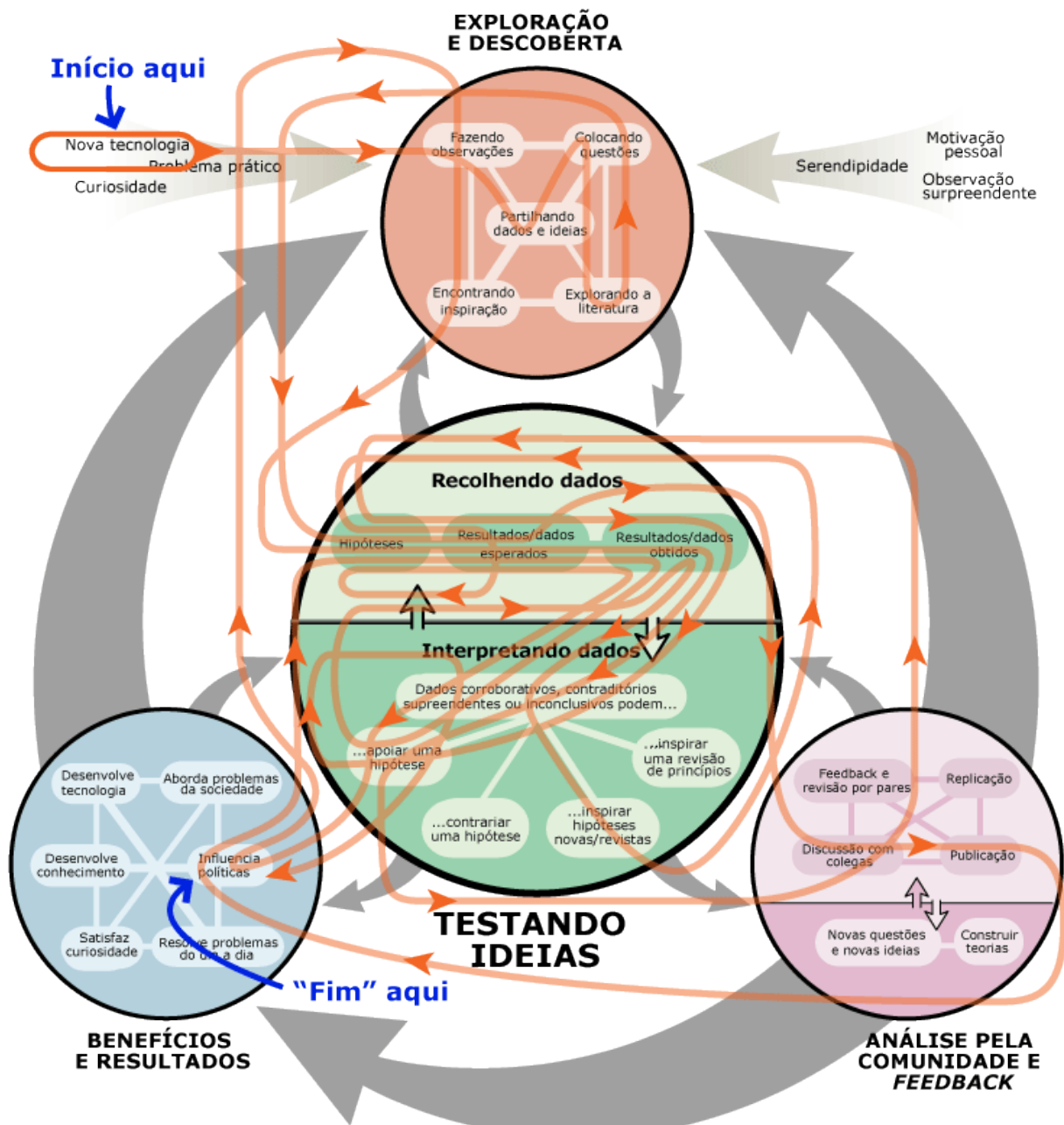
Muitas linhas de investigação reforçaram a hipótese de que os CFCs estavam a causar a destruição do ozono.

Agora, o spray de cabelo que você vê hoje em dia nas prateleiras dos supermercados não tem CFC, assim como os frigoríficos em lojas de eletrodomésticos, e os aparelhos de ar condicionado novos em carros e casas. A modificação de políticas regulatórias para fazer essas mudanças foi uma batalha duramente conquistada por políticos e cidadãos preocupados com o meio ambiente — e por Molina, Rowland, e muitos outros cientistas. Não só recolheram [evidência](#) científica; eles também investiram uma quantidade considerável de tempo e energia em transmitir os seus resultados e as implicações aos legisladores e ao público. Molina e Rowland tiveram que persistir nesses esforços durante mais de uma década antes que a proibição a que tinham apelado fosse finalmente alcançada! Com a proibição de CFC, os níveis atmosféricos de cloro estão a declinar e a camada de ozono está, esperamos, no seu caminho para a recuperação. Se a nossa compreensão científica atual da situação está correta, o buraco de ozono começará a diminuir significativamente por volta de 2018, com recuperação completa não esperada antes de 2070.



Embora Molina e Rowland recebam a maior parte do crédito — o seu trabalho deu-lhes muitos prémios e honrarias, incluindo o prémio de maior prestígio em química, o Prémio Nobel — evitar com sucesso um desastre ambiental exigiu mais do que apenas os seus esforços. Foi o conhecimento acumulado da comunidade científica que permitiu a Molina

e Rowland fundir uma grande quantidade de pedaços de informação aparentemente desconexos numa nova hipótese sobre os efeitos dos CFCs na atmosfera. Os resultados terríveis previstos pelas suas ideias — a destruição da camada de ozono e a perspectiva de aumento dos problemas ambientais e de saúde — levaram muitos cientistas a se envolverem em testar e afinar a hipótese, com químicos, cientistas atmosféricos e modeladores matemáticos todos a contribuírem com peças do quebra-cabeça. Estas diversas perspetivas desempenharam um papel crucial no processo científico, permitindo à ciência construir uma compreensão muito mais completa do fenómeno que se Molina e Rowland tivessem trabalhado sozinhos. Tal como acontece com muitos triunfos científicos, este sucesso não pertence a um indivíduo, mas à comunidade científica como um todo — e à comunidade em geral, que teve a iniciativa de agir sob pressão de descobertas científicas.



saberciencia.tecnico.ulisboa.pt

© 2012 The University of California Museum of Paleontology, Berkeley, and the Regents of the University of California