



FABIO CHALUB
Universidade Nova
de Lisboa
chalub@fct.unl.pt

EM VENTOS TURBULENTOS

Quem já passou de avião pelo equador sabe que esta é uma região de turbulência. Fortes ventos ascendentes dificultam a navegação aérea naquilo que se chama “zona de convergência intertropical”. Agora um novo modelo para a circulação atmosférica na zona tropical da Terra vem explicar este e outros fenómenos, gerando luz sobre os possíveis efeitos do aquecimento global.

A Terra roda. Sabemos isto, pelo menos, desde Galileu; na verdade, sabemos isto há muito mais tempo. Mas foi Galileu, no seu livro “Diálogo sobre Duas Novas Ciências”, quem mostrou que a rotação da Terra não necessariamente gera ventos na direcção oposta ao movimento. Este foi um dos primeiros passos na criação de um conceito central da física, até então desconhecido: a inércia, a tendência dos corpos para manterem o seu estado de repouso ou movimento na ausência de forças externas. Assim, quando a Terra gira, a atmosfera que a circunda acompanha-a.

Newton conseguiu formular de forma precisa esta ideia alguns anos mais tarde, no que é hoje conhecido como a primeira lei da dinâmica. No entanto, ela não é válida para todos os referenciais, como sabe qualquer um que já fez uma curva a alta velocidade num carro. A força aparente (conhecida como centrífuga) que nos atira para fora não tem uma causa clara quando o problema é analisado no interior do veículo. É a nossa tendência inercial para ir em frente enquanto o carro vira para o lado que gera este efeito.

No caso do carro, tudo é transparente, seja a explicação ou os seus vidros. Vemos o que está do lado de fora e isto simplifica a análise. No entanto, existe um outro referencial que gira e neste é mais difícil perceber o que está a acontecer: a Terra. A rotação do nosso planeta não é facilmente sentida no dia-a-dia. De facto, mesmo o mais óbvio dos efeitos, a “força” centrífuga, que nos puxa para fora de um referencial em rotação, não é perceptível na superfície da Terra, porque ela se mistura com a gravidade. Ambas são proporcionais à massa e não dependem do movimento do corpo.

Existe um outro efeito, no entanto, em geral muito mais fraco, mas que dadas as enormes massas e as longas distâncias envolvidas nos fenómenos atmosféricos, acaba por se tornar proeminente: o efeito de Coriolis. Este nome deve-se ao físico francês Gaspard-Gustave Coriolis, apesar de o tratamento matemático dos referenciais em rotação (um caso particular dos referenciais não inerciais – aqueles onde não vale a lei da inércia de Newton) ter aparecido antes.

Poderíamos estudar a circulação dos ventos como vista do espaço, naquele que é por excelência o referencial preferido dos físicos, o das estrelas distantes. No entanto, é muito mais conveniente estudá-la na superfície da Terra. Para termos em conta os efeitos não inerciais da rotação da Terra, é necessário incluir então a força de Coriolis. Veja a figura 1.

Os raios de Sol atingem as latitudes elevadas de forma tangencial, enquanto no equador a insolação é directa. Isto faz com que a temperatura média nas várias latitudes seja distinta, e assim surge um mecanismo de transferência de calor de um lado para o outro. Os meteorologistas costumam dividir a atmosfera em três partes para o estudo da circulação global dos ventos: as células de Hadley, na região tropical, entre 30 graus de latitude sul e norte; a célula Polar, acima dos 60 graus em cada um dos hemisférios; e a célula de Ferrel, na região intermédia entre as outras duas. Cada uma possui o seu mecanismo próprio de circulação do vento. Veja a figura 2.

O artigo [1], da autoria dos matemáticos Paul Milewski, que trabalha na Universidade de Wisconsin, e Esteban Tabak, do Instituto Courant, em Nova Iorque, aplica as equações da dinâmica dos fluidos para uma melhor compreensão da célula de Hadley.

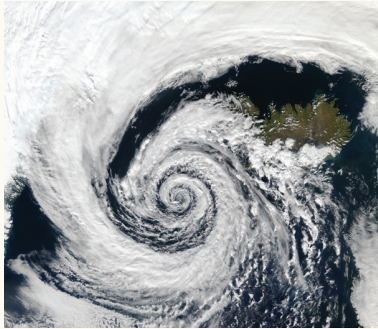
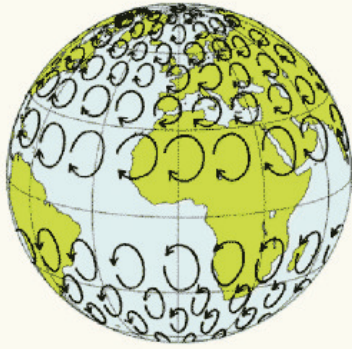


Figura 1: Cima: diagrama de como seria a circulação dos ventos se o único efeito a levar em consideração fosse o da força de Coriolis. Baixo: um ciclone no hemisfério norte. Veja que a direção de circulação dos ventos é contrária à que seria de esperar apenas pela rotação da Terra. Isto deve-se a mudanças locais nos sistemas de altas e baixas pressões.

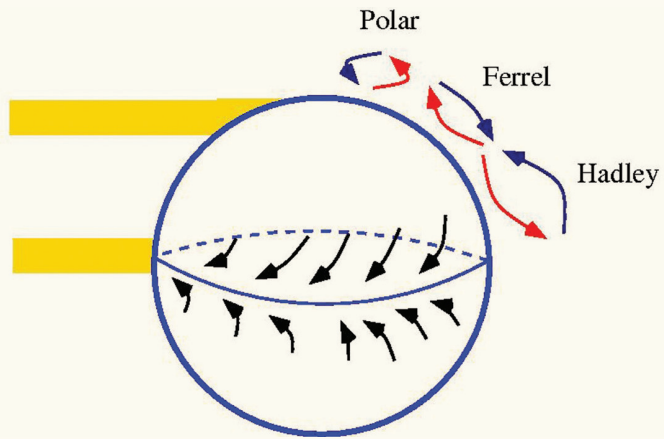


Figura 2: Diagrama geral de circulação de ventos: as setas vermelhas indicam os ventos quentes nas células de Hadley, Ferrel e Polar, e as azuis, os ventos frios nas mesmas células. A preto estão marcados os ventos alísios. À esquerda, vemos os raios de sol. Duas seções idênticas iluminam porções diferentes da Terra. A seção que chega à região polar é responsável por aquecer uma região significativamente maior da Terra. (A figura acima representa um dia de equinócio.)

A equação básica da dinâmica dos fluidos é a chamada equação de Navier-Stokes, tão complicada que algumas das suas propriedades, ao serem demonstradas, valem um milhão de dólares (e um dos problemas do milênio). Os autores, ao considerá-la, fizeram uma simplificação típica nesta área: consideraram que os efeitos não-lineares (sempre os mais complicados) são pouco intensos e que os perfis que aparecem nas soluções são muito mais longos do que profundos. Esta última aproximação é natural, dado que a atmosfera é uma camada muito fina quando comparada com qualquer outra dimensão de interesse, como o raio da Terra.

Ao escrever as equações de movimento, os autores tiveram um cuidado inédito: o de considerar as flutuações diárias da temperatura, de dia mais quente, à noite mais frio. Isto dá origem a ciclos de 24 horas, consistentes com o que se encontra nos ventos tropicais e distintos do regime das regiões temperada e polar.

A atmosfera é transparente para os raios solares, fazendo com que o Sol não aqueça directamente o ar, mas sim o solo, que reemite a radiação. Durante o dia, quando o chão está mais quente do que o ar, são causadas correntes ascendentes; durante a noite, o efeito é suspenso, não invertido.

Escrevendo as equações em todos os detalhes e usando as aproximações que nos permitem tratá-las com cuidado sem perder a precisão, um termo sobressai: a diferença entre a velocidade angular da Terra (2π radianos por dia) e a força de Coriolis no local (duas vezes a velocidade angular multiplicada pelo seno da latitude). Quando este termo é positivo,

há oscilações; quando é negativo, há decaimento (dissipação), um fenómeno que não é estranho para quem já estudou o oscilador harmónico amortecido.

O ponto importante é que a alteração entre ser positivo e negativo ocorre quando o seno da latitude é igual a meio, ou seja, aos 30 graus, seja para sul ou para norte. Desta forma, os autores dão um embasamento matemático à percepção empírica de que a célula de Hadley está confinada a uma região específica. Na verdade, fazem muito mais do que isso, pois concluem que este confinamento se deve a um conjunto de primeiros princípios e não a fenómenos ambientais, atmosféricos ou geofísicos específicos. Negam, portanto, a expectativa comum sobre como se comportará a célula de Hadley com o progressivo aumento das temperaturas médias na Terra. Muitos investigadores acreditam que ela deve expandir-se, aumentando a região terrestre varrida pelos ventos alísios, uma característica da circulação atmosférica na região tropical. Com os presentes argumentos, a largura longitudinal da célula não deve crescer; o que o aquecimento global deve causar é uma maior altitude da célula de Hadley – apesar de isto não poder ser rigorosamente provado pelo modelo, dado que ele não vale para grandes altitudes.

Esperemos que o futuro não prove quem está correcto!

REFERÊNCIAS

- [1] Paul Milewski and Esteban Tabak, "The Diurnal Cycle and the Meridional Extent of the Tropics", *Physica D* 240 (2011) 233-240