



MODELOS CLIMÁTICOS LIMITES DE UM INSTRUMENTO INDISPENSÁVEL

Hervé Le Treut

O caráter inelutável de uma mudança climática associada ao aumento dos gases de efeito estufa constitui hoje um risco cuja realidade é amplamente aceita. As transformações da própria modificação química do planeta estão claras e demonstradas. A unanimidade do mundo científico sobre os perigos que essa evolução continuada poderia acarretar, foi constatada por grupos internacionais, tais como o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), ou por numerosas academias nacionais. Apesar disso, vários dados alimentam desconfianças mais ou menos explícitas, que vêm à tona periodicamente, em debates ou questionamentos públicos. Um desses dados é, por óbvio, a dimensão das conseqüências de tal diagnóstico: o problema do efeito estufa coloca em cheque nosso modo de produção de energia e, portanto, o conjunto de nossos modelos de transporte, de habitação e de consumo. Não é de surpreender que uma questão dessa magnitude suscite suspeitas de toda sorte, e que seja discutida por muitos, sob o prisma de inquietações muito diferentes: temor de uma progressão nuclear, preocupação de se manter a atividade industrial nos setores que consomem energia – por exemplo os transportes. Mas a tudo isso junta-se uma insegurança sobre o conteúdo do dossiê científico que está ligado ao lugar preponderante que representam, no prognóstico das mudanças, os modelos numéricos, os quais nem sempre compreendemos o que são, nem o que trazem em seu bojo.

Modelos climáticos

Os modelos numéricos são indispensáveis, porque o ambiente global de nosso planeta constitui um sistema de grande complexidade, ligando elementos de comportamentos muito diferentes: fluidos atmosféricos e oceânicos, geleiras, solos continentais. Esses diferentes componentes permutam continuamente matéria, energia ou quantidade de movimento, através de processos que podem ser físicos, químicos ou biológicos.

A utilização de modelos numéricos que descrevem esse sistema (que chamaremos a partir de agora de sistema climático) tornou-se imprescindível para um grande número de aplicações e, em particular, para prever a curto prazo o comportamento das mesmas. Mas a modelização numérica representa também instrumento obrigatório para a estimativa das variações climáticas futuras. Tal instrumento é necessariamente imperfeito, contendo numerosas incertezas ou imprecisões. Não obstante esses limites, os modelos permitiram à comunidade científica tomar posição quase unânime sobre a realidade do perigo que representam as transformações climáticas, porque, a despeito de sua incapacidade de realizar previsões quantitativas precisas, constituem um meio excepcional que possibilita organizar a produção científica e conduzir um debate bem argumentado. Apesar do seu uso amplamente partilhado e de sua grande visibilidade na mídia, os procedimentos subentendidos na concepção dos modelos nem sempre são bem compreendidos fora do mundo científico, o que nutre uma desconfiança difusa e leva a questionar periodicamente o justo fundamento dos alertas da comunidade científica.

Uma pergunta freqüentemente dirigida aos autores de modelos climáticos ilustra em parte essa incompreensão: “que tipo de dados vocês consideram em seus modelos?” A idéia amplamente difundida é que os modelos climáticos têm a função de armazenar em computador um inventário de dados do passado para deles obter uma extrapolação futura; daí os debates apaixonados e muitas vezes fora do assunto para saber qual é o papel possível das variações da radiação solar nas recentes mudanças do clima – debates que deixam subentender erroneamente que, da resposta a essa questão, depende a qualidade da previsão dos modelos para o clima futuro.

De fato, se a observação da Terra representou um papel importante para o estabelecimento dos modelos, estes não se baseiam em dados, mas sim em princípios físicos.

Tem-se um método que caminha de certa forma na contracorrente do método científico tradicional, o qual consiste, na maioria das vezes, em reduzir a complexidade do mundo real para isolar dele as leis mais universais possíveis. A constituição dos modelos, ao contrário, baseia-se numa tentativa de recriar a complexidade do mundo real a partir das equações da física, e daí criar um planeta numérico – tão próximo quanto possível de nosso “verdadeiro” planeta – sobre o qual é mais fácil ou mais rápido conduzir experimentações variadas. Assim, os “dados” principais que integram um modelo climático – além de uma descrição do planeta (relevo, distribuição dos tipos de solo, velocidade de rotação...) e das forças às quais ele é submetido (insolação) – são as constantes da física: aceleração do campo gravitacional, constante dos gases perfeitos etc.. É claro que isso não é o bastante; outras informações são também necessárias, como veremos, porque a resolução espacial dos modelos é ainda insuficiente e porque seu desenvolvimento não está concluído: a composição química da atmosfera, por exemplo, permanece freqüentemente especificada, porém não calculada. Mas o procedimento requer a criação de um instrumento que se apóie em leis fundamentais, e possa ser utilizado sem modificação para descrever climas diferentes uns dos outros: período atual, máximo glaciário, período quente de 6.000 anos atrás. Logo, os modelos não são facilmente “ajustáveis”; melhorá-los demanda afinar ou completar a representação de processos físicos muitas vezes complexos.

Por outro lado, seria falso e perigoso pensar que a climatologia dinâmica, ou numérica, consiste em integrar leis e equações de toda sorte, em poderosos computadores, confiando cegamente no resultado. As ocorrências atmosféricas e oceânicas são caracterizadas por um grande número de processos que se situam com freqüência em grande escala: organização das circulações tropicais em “células” gigantes de vários milhares de quilômetros, depressão das latitudes médias, monções, grande “correia de transmissão oceânica” que transporta águas quentes e salgadas desde o hemisfério sul até o Atlântico norte, anéis da Corrente do Golfo (*Gulf Stream*), ou oscilações tropicais do tipo El Niño ligando a atmosfera e o oceano. É a existência de circulações organizadas em grande escala que torna a previsão numérica possível. É também a compreensão desses processos que permite consolidar a qualidade e a pertinência dos modelos.

Mas em que consistem precisamente os modelos?

Os modelos levam em conta duas grandes categorias de processos: os intercâmbios de energia, em particular sob forma de radiação eletromagnética, entre a terra, o oceano, a atmosfera e o espaço; e a dinâmica das ocorrências atmosférica e oceânica. As equações correspondentes adquirem caráter discreto a partir dos nós da malha que cobre o conjunto do globo, isto é, são resolvidas tendo como referência cada um dos milhares de pontos dessa malha.

O componente atmosférico, por exemplo, calcula para cada conjunto de centenas de quilômetros, a evolução de parâmetros como o vento, a temperatura, a umidade, a nebulosidade, as precipitações, a água do solo – para citar somente as variáveis principais. O componente oceânico opera cálculos semelhantes numa grade frequentemente mais fina. A escolha dessas grades de resolução depende, em primeiro lugar, da capacidade de cálculo, e portanto da potência dos computadores utilizados, que constituem, assim, o primeiro fator de progresso no campo da modelização numérica. Mesmo que esta se baseie em princípios físicos testados já há muitas décadas, a multiplicação da potência dos computadores por um fator considerável (da ordem do milhão em 15 ou 20 anos) permitiu um progresso contínuo em qualidade e uma abertura considerável dos campos de aplicação dos modelos.

Concretamente, um primeiro conjunto de equações descreve como a energia recebida do sol é compensada por uma energia emitida pelo sistema terra-oceano-atmosfera. A temperatura de superfície do sol é de aproximadamente 6.000°C , e o comprimento de onda dos raios solares estende-se do ultravioleta ao infravermelho próximo, isto é, cerca de 0,3 a 5 micrômetros. O valor da insolação no ponto mais alto da atmosfera (por volta de 1.370 W/m^2) foi estimado no último século a partir dos observatórios localizados em grandes altitudes; hoje ela é medida por satélite. Essa energia solar não é absorvida na sua totalidade pela Terra: cerca de 30% são refletidos para o espaço, 50% atravessam a atmosfera e esquentam o solo ou os oceanos, 20% aquecem diretamente a atmosfera. Para devolver ao espaço a energia que recebe do Sol, também a Terra emite radiação eletromagnética, no campo infravermelho, ou seja, numa gama espectral que vai de 5 a 100 micrômetros. A emissão provém da superfície do planeta, mas também de certos gases minoritários da atmosfera – ditos “gases de efeito estufa” – e das nuvens.

O estudo da transferência radioativa na atmosfera constitui um problema físico bem conhecido, mesmo que incertezas ainda subsistam – por exemplo, na presença de nuvens, para as geometrias complexas. O cálculo das equações de transferência radioativa é feito por meio de sistemas de equações simplificadas, os quais se baseiam em cálculos detalhados levando em conta todos os raios espectrais dos diferentes componentes da atmosfera. Essas equações também desempenham um papel central na observação do planeta a partir dos satélites, e são por conseguinte testadas também nesse quadro.

A segunda classe de processos descrita explicitamente pelos modelos diz respeito à circulação em grande escala da atmosfera e do oceano, que decorre sobretudo da rotação do planeta. Apóia-se nas equações da dinâmica dos fluidos, em particular as equações de Navier-Stokes, que descrevem a aceleração de um elemento de fluido submetido a pressões diversas, internas ou externas.

Já há vários anos a combinação dos modelos atmosféricos e oceânicos, que permitem descrever as interações entre a evolução desses dois fluidos, tornou-se uma realidade relativamente bem administrada em grande número de laboratórios. Completar os modelos significa também integrar os outros componentes do sistema climático: granizo, geada, neve, gelo do mar, solos continentais – com a vegetação que estes apresentam e a sua hidrologia associada –, além dos ciclos de elementos que condicionam a composição química da atmosfera, como o carbono ou o nitrogênio. Aproximamo-nos assim de modelos cada vez mais complexos, que se denominam “modelos do sistema Terra”.

Os modelos são utilizados em múltiplos contextos, em que são testados para comprovar sua pertinência. A previsão meteorológica – e agora a previsão oceânica, praticada mais recentemente na França, no quadro do projeto Mercator – experimentou progressos contínuos desde o início dos anos 70, ganhando muitos dias de prazo. A modelização climática consiste em ultrapassar este prazo, deixando o modelo evoluir por um período muito mais longo: o valor do modelo não está agora no seu caráter de previsão, mas na sua capacidade de construir pouco a pouco uma climatologia, ou seja, uma estatística de ocorrências meteorológicas ou oceânicas simuladas. A qualidade dos modelos é o reflexo da qualidade dessa climatologia, que se foi ampliando no correr dos anos: os modelos de hoje representam com muita fidelidade as grandes características das ocorrências atmosféricas e oceânicas, como também

suas flutuações sazonais ou interanuais (o que constitui um primeiro teste importante para os modelos – de todas as mudanças climáticas, as estações são as mais rápidas e as que podem ser melhor observadas). Os modelos numéricos são também utilizados com sucesso para simular condições climáticas passadas, ou ainda ocorrências atmosféricas em outros planetas, tais que Marte ou Vênus.

Enfim, dispomos de modelos que apresentam forte base física e que concentram um considerável conjunto de conhecimentos. Entretanto, é preciso ter em mente certo número de limitações e incertezas que vamos detalhar a seguir.

Pode-se identificar três famílias de problemas

A primeira é intrínseca ao próprio sistema climático e não se apresenta simplesmente como um sistema inteiramente previsível. Essa característica está associada a uma propriedade matemática das equações, que não são lineares, e misturam as escalas de tempo e espaço. É, aliás, por isso que não podem ser resolvidas de maneira analítica, e que o recurso ao computador é indispensável. Há assim um limite de previsão particularmente curto para o componente atmosférico: ao cabo de um prazo de dez dias aproximadamente, a evolução meteorológica não pode mais ser prognosticada, porque o caráter instável das ocorrências já fez repercutir no conjunto do globo um pequeno erro inicial. Trata-se de efeito muito conhecido, descoberto por Edward Lorenz em 1963, popularizado pelo nome de “efeito das asas de borboleta” e significando que toda perturbação, por mínima que seja, modifica irreversivelmente a história da atmosfera. Certos componentes do sistema climático, tais como a vegetação, apresentam igualmente uma complexidade intrínseca que resulta sobretudo da diversidade dos processos que entram em competição; assim, é impossível prever com segurança a evolução de todas as essências de um maciço florestal e seu conseqüente impacto climático. Mas tais incertezas não significam que nenhuma informação sobre a evolução do clima possa ser obtida. Diversos processos guiam também os movimentos da atmosfera ou da vegetação, e organizam seu comportamento. Alguns são externos ao sistema climático, como as flutuações da radiação solar que incidem, por exemplo, em escala sazonal, ou as emissões de gases de efeito estufa pelas atividades humanas. Outros são internos e correspondem aos componentes lentos do sistema climático, como o oceano ou as grandes

geleiras, que organizam sua evolução em escalas que vão de alguns anos (para as combinações do oceano tropical com a atmosfera) a alguns milhares de anos.

Esse comportamento parcialmente caótico do sistema climático é inteiramente assumido pela comunidade científica como uma limitação que afeta a maneira pela qual são conduzidas e interpretadas as experimentações numéricas. Menos do que uma tentativa de previsão, o que a modelização propõe é mais um estudo de risco, que consiste em submeter o pequeno planeta numérico ao mesmo aumento de gases de efeito estufa que começa a afetar o planeta real, e prosseguindo ou repetindo a experiência pelo tempo que for necessário, chegar a estabelecer uma estatística dos efeitos induzidos. Tal experiência exige que seja repetida numerosas vezes para se conseguir vislumbrar o leque das consequências possíveis. Essa variabilidade do sistema climático, que faz com que se apreenda a sua evolução apenas de maneira estatística, complica a relação entre modelos e dados ou a própria interpretação dos dados. Se é cada vez mais difícil explicar o aquecimento global das últimas décadas de outra forma que não seja a de uma resposta à ação dos gases de efeito estufa, o nível de certeza em relação a este diagnóstico aumenta regularmente, mas jamais será total. Do mesmo modo, é ainda impossível associar por relação causal acontecimentos que permanecem isolados, como a canícula do verão de 2003 à mudança climática em curso. Porém, inversamente, a variabilidade interna de nosso sistema climático apresenta uma tal amplitude que, no dia em que estivermos aptos a fornecer uma prova estatística da realidade da mudança climática, os efeitos desta já serão consideráveis.

Uma segunda fonte de incertezas corresponde às simplificações inevitáveis que ocorrem na construção dos modelos, particularmente por causa do espaçamento muito grande dos nós da já referida malha. A dificuldade de representação das nuvens é um exemplo: elas são originadas de movimentos do ar de pequena escala, que vão de algumas centenas de metros a alguns quilômetros, movimentos cuja representação explícita nos modelos está fora de cogitação; elas constituem o lugar de um desprendimento de calor latente intenso, que resulta da condensação da água, perturbando a radiação solar e a radiação infravermelha de uma forma que depende muito do tamanho das gotas de água ou dos cristais de gelo. Diante de tanta complexidade – haveria outros exemplos, relativos aos gelos do mar, à vegetação ou à hidrologia continental – a modelização é necessariamente

simplificadora. Isso não quer dizer que ela seja simplista, mesmo porque a representação das nuvens nos modelos foi objeto de muito trabalho (incluindo medições por avião ou satélite) para servir de base a uma descrição estatística dos processos de formação das gotas de água, dos movimentos do ar úmido, ou da precipitação. Porém, as nuvens representam um dos fatores capazes de acelerar ou refrear a evolução do clima, e da complexidade desses processos resulta uma certeza cuja importância pode ser avaliada comparando-se o desempenho dos modelos que foram implementados de maneira independente em diferentes instituições científicas do mundo inteiro. Os resultados, em resposta a um desdobramento do CO₂ atmosférico, por exemplo, situam-se numa faixa que vai de 1,5 a 5°C de aquecimento global, por razões que remetem exclusivamente à construção dos modelos, e que não são minoradas com o passar dos anos, apesar do aperfeiçoamento do seu conteúdo físico. Do mesmo modo, apesar de grandes tendências bem estabelecidas – como o fato de o aquecimento de superfície ser mais intenso nas altas latitudes e no inverno, ou o fato de as variações do ciclo hidrológico serem mais intensas nas regiões tropicais –, os modelos não chegam a fornecer uma informação local coerente. No presente caso, a complexidade dos mesmos remete à do mundo real, e suas fraquezas persistentes são o reflexo dessa imprevisibilidade parcial do mundo real assinalada acima. Vários indícios mostram contudo que a gama dos modelos desenvolvidos em nível mundial permite, sem dúvida, que se obtenha de modo conveniente uma amostragem do conjunto dos climas possíveis, e em particular o fato de que em todos os exercícios verificáveis a média dos modelos seja o melhor dos modelos. Por outro lado, se nossa capacidade de validá-los ao término de um processo sensível não é ainda completamente utilizada, essa capacidade aumenta sem cessar com a disponibilidade de novos dados obtidos por satélites.

Um terceiro fator vem limitar o alcance prático dos modelos: foi só recentemente que permitiram uma descrição do sistema climático completo. Os modelos, com frequência, são ainda físicos, negligenciando os componentes biológicos ou químicos do sistema, cujo papel essencial aparece cada vez mais claramente. Os aerossóis sulfurosos, por exemplo, foram reconhecidos como um dos fatores importantes capazes de mascarar, ao menos no hemisfério norte, as manifestações iniciais do efeito estufa. O teor atmosférico em CO₂ depende também de um ciclo complexo no qual

intervêm ao mesmo tempo a formação do fitoplâncton ou do zooplâncton nos oceanos, e a fotossíntese ou a respiração da vegetação continental. Sabe-se que apenas a metade do CO₂ emitido pelas atividades humanas permanece na atmosfera, sendo o resto retomado pelos oceanos ou pela biosfera continental. Os primeiros ensaios sobre o modelo do IPSL (*Institut Pierre-Simon Laplace*) na França ou do *Hadley Center*, na Grã-Bretanha, mostraram que essa parte podia evoluir com o clima. A consideração desse fator (potencialmente agravante para o aquecimento do planeta) requer o emprego de modelos muito mais complexos, combinando representação do clima e do ciclo do carbono. A química do metano, do ozônio, constitui também um conjunto de processos complexos que integra pouco a pouco os modelos, para formar o que se chamou de modelos do sistema Terra.

A acumulação desses fatores de incerteza torna sem dúvida ilusória, no momento, a previsão detalhada de uma evolução do clima futuro. Poder-se-ia mesmo dizer, forçando a expressão, que quanto mais a pesquisa avança, tanto mais se revela a enorme complexidade dos processos que participam da evolução do nosso meio ambiente, e mais se afasta a possibilidade de prever em detalhe a evolução futura do clima. Mas, ao mesmo tempo e de maneira aparentemente contraditória, a capacidade de conhecimento face a esse sistema aumentou consideravelmente, e o nível de certeza quanto à realidade do aquecimento futuro tornou-se muito maior. Em todos os debates em curso, os modelos serviram como um instrumento que permitiu estudar as propostas de mecanismos estabilizadores no seio do sistema climático, e apreciar a eventual importância das mesmas. A variedade dos processos cujo papel foi avaliado qualitativamente, é hoje ainda maior. Assim, constitui uma indicação poderosa o fato de que os modelos sempre mais numerosos e sofisticados informam sem exceção sobre um aumento importante de temperatura no futuro. A despeito da complexidade do sistema estudado, da diversidade dos países e instituições engajadas na pesquisa do clima, da diversidade dos modelos, do efeito da enorme publicidade vinculada a um trabalho de tal monta, ninguém conseguiu realizar uma experiência numérica confiável, capaz de levar o sistema climático a não se aquecer como resposta ao aumento dos gases de efeito estufa. Isso não tem valor de prova absoluta, mas faz recair o ônus da prova sobre aqueles que afirmam que o clima não pode mudar por causa das atividades humanas.

O papel da modelização climática também se deslocou. Apesar das limitações de sua capacidade de previsão, os modelos constituem instrumentos muito especializados que permitem aumentar o debate público, e fazer face a novas questões. Como se pode comparar o papel dos diferentes gases e das diferentes emissões dos mesmos? Em que velocidade a observação das modificações em curso poderá reduzir as incertezas? Nesse contexto, é muito importante preservar uma diversidade suficiente de modelos construídos e gerenciados de maneira independente, isso porque, em nível científico, a dispersão dos resultados obtidos representa uma das poucas medidas da incerteza dos resultados, e também porque o fato de se dispor de modelos confiáveis torna-se um trunfo estratégico em todas as negociações internacionais.

O painel que acabamos de esboçar apresenta-se cheio de contrastes. A unanimidade qualitativa dos resultados obtidos pelos modelos relativamente ao aquecimento futuro é real, convincente, mas continua acompanhada de dificuldades para traçar um perfil preciso das mudanças que estão por vir, dificuldades que poderão ser reduzidas, mas jamais eliminadas, pois refletem a grande complexidade do mundo real. Devemos tirar as conclusões justas dessa situação. Por um lado, os modelos numéricos constituem o único instrumento capaz de organizar toda a informação disponível, e portanto os debates científicos e políticos, num quadro rigoroso, que leve em conta as pressões das leis da física (assim como o conjunto dos processos químicos ou biológicos que participam das evoluções em curso). Por outro lado, é preciso reconhecer e admitir que estamos confrontados com um problema de gestão global de nosso ambiente, onde o fator climático não pode ser isolado de outros problemas que são também planetários: recursos hídricos, acesso às diferentes formas de energia, especialmente nuclear, proteção da biodiversidade, contrastes Norte-Sul, preocupação de se equilibrar uma solidariedade imediata com uma solidariedade entre gerações. Todos esses problemas estão intrinsecamente ligados e sua avaliação é, em cada caso, tributária de formas de incerteza ou de desconhecimento freqüentemente muito diferentes. A ciência sozinha, sem o auxílio de uma reflexão ética, filosófica, política, sem um verdadeiro debate cidadão sobre essas questões, não poderá arbitrar entre as diversas escolhas possíveis que dizem respeito ao nosso futuro.

Hervé Le Treut é doutor em Ciências e pesquisador do Laboratoire de Météorologie Dynamique do Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), França.

Herve.LeTreut@imd.jussieu.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.