



**Atmosfera Versus Previsão do Tempo**  
Atmosphere Versus Weather Prediction

Isimar de Azevedo Santos & Julio Buchmann

*Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Instituto de Geociências - Departamento de Meteorologia  
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, bloco G  
21941-916 Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mails: isimar@acd.ufrj.br; juliobuch@globo.com  
Recebido em: 03/09/2011    Aprovado em: 04/11/2011*

**Resumo**

O presente trabalho aborda a dicotomia entre o entendimento do comportamento da real atmosfera por parte do homem e a resposta em termos de previsão do tempo proveniente de modelos numéricos. A Teoria do Caos, modelos Eulerianos e Lagrangeanos e ondas atmosféricas são temas abordados, revisados e criticados.

**Palavras-chave:** previsão do tempo; Teoria do Caos; modelos dinâmicos; ondas atmosféricas

**Abstract**

The present work deals with the controversy between the human understanding of the behavior of real atmosphere and the weather prediction in response to numerical models. Themes like the Chaos Theory, Eulerian and Lagrangian models, and atmospheric waves are considered, reviewed and criticized.

**Keywords:** weather prediction; Chaos Theory; dynamic models; atmospheric waves

## 1 Introdução

A atmosfera tem sido muitas vezes considerada “caótica” sempre que as respostas dos nossos modelos não correspondem à realidade, quando de fato a causa é que estes modelos não incluem todos os mecanismos físicos existentes na atmosfera. A culpa dos rios serem muitas vezes violentos é nossa, quando lhes impomos margens restritivas. Os erros na previsão ou na simulação da atmosfera pelos modelos numéricos se devem apenas à nossa incapacidade em incluir nestes modelos todas as leis da natureza envolvidas.

É preciso cautela ao tentar explicar fenômenos atmosféricos baseando-se nas equações da hidrodinâmica, uma vez que estas podem não incluir todos os processos físicos envolvidos. Por exemplo, o “*caos atmosférico*” se explica pela não linearidade das equações dos modelos usados e não pela própria física da atmosfera. Do mesmo modo, quando se sugere que a atmosfera possui ondas, o que realmente fazemos é usar modelos cuja solução é ondulatória para simular a atmosfera real e perceber que, em muitos casos, a simulação feita é aceitável.

A previsão ou simulação do comportamento do ar atmosférico é comumente feita usando modelos numéricos que seguem as proposições de Richardson feitas há mais de 90 anos e que continuam conduzindo a respostas não totalmente perfeitas, não por culpa da natureza, mas porque ainda não conseguimos incluir nesses modelos todos os mecanismos físicos que a atmosfera dispõe.

## 2 Atmosfera Caótica ou Modelos Incompletos?

O sistema de equações não lineares de Lorenz é um modelo matemático clássico que apresenta comportamento caótico. Sua aparição ocorreu no trabalho de Lorenz (1963), relacionado com as equações não lineares da hidrodinâmica para a descrição de fenômenos de convecção. Em 1961 o meteorologista Lorenz, criador da Teoria do Caos, decidiu considerar as diferenças que a resposta de um modelo poderia sofrer, a partir de discrepâncias de décimos nos dados de entrada. Assim, a partir de estados iniciais ligeiramente diferentes, o sistema de equações diferenciais não lineares representando o ar atmosférico, resultava em soluções eventualmente diferentes entre si. Obviamente as diferentes soluções

tinham origem na natureza intrínseca do sistema de equações diferenciais não lineares utilizadas e que são extremamente sensíveis a pequenas variações no estado inicial.

Um sistema não linear de equações diferenciais parciais pode levar a resultados instáveis, mesmo em sistemas determinísticos que apresentem uma grande sensibilidade a perturbações, levando a soluções que são imprevisíveis ou caóticas. A não linearidade, ou pelo menos um grande número de interações entre as componentes do modelo, pode levar a um resultado aleatório. Nos sistemas lineares, sejam as soluções analíticas ou numéricas, pequenas variações impostas à condição inicial resultam em pequenas variações na solução final e, assim, as respostas diferem muito pouco, o que não acontece nos sistemas não lineares.

As equações não lineares da hidrodinâmica, ou linearizadas a partir das equações primitivas, são determinísticas do ponto de vista da mecânica clássica. Todavia, as equações na forma primitiva é que conduzem ao *caos determinístico* segundo Lorenz (1963). Em função de suas constatações, Lorenz chegou à conclusão de que as previsões de fenômenos climáticos só poderiam adquirir certo grau de acerto utilizando-se equações matemáticas que levassem em conta o alto grau de incerteza dos eventos. Uma das idéias centrais desta teoria é que a aleatoriedade ou o comportamento casual é governado por leis não físicas, e que estas podem produzir resultados diferentes a partir de dados de entrada ligeiramente diferentes. Com isto, asseverou-se que “*even with perfect models and perfect observations, the chaotic nature of the atmosphere would impose a finite limit of about two weeks to the predictability of the weather*” (Kalnay, 2003).

Em confronto à consideração de Kalnay (2003) relacionada ao problema da previsibilidade de apenas duas semanas, esta limitação não estaria na natureza supostamente caótica da atmosfera, mas adviria sim, muito mais do sistema de equações não lineares da hidrodinâmica, portanto um problema de ordem matemática, que conduziria sempre as respostas a valores discrepantes para pequenas diferenças nos dados iniciais de entrada do modelo de Lorenz (1963). Nos atuais modelos, a carência no equacionamento de mecanismos físicos relevantes, ou ainda por uma limitação de nossa parte quanto ao conhecimento do estado real da atmosfera, pode parecer que nada possa ser feito para se alcançar melhores respostas em horizontes de simulação

mais longos. Todavia, talvez possamos sim, ver mais longe, outros caminhos, subindo nos ombros de gigantes, parafraseando Isaac Newton em torno de 1676, em uma carta para Robert Hooke.

Na atmosfera real, são os diversos processos físicos a ela inerentes que atuam de modo a conduzir seu comportamento, comportamento este que nós diagnosticamos através dos parâmetros meteorológicos observados. Estes processos físicos se conjugam de forma extremamente complexa, fazendo parecer que a atmosférica seja caótica, mas não necessariamente isto é verdade. A inabilidade dos nossos modelos se deve a uma compreensão muito limitada do que está realmente ocorrendo na natureza. Os modelos atmosféricos não lineares apresentam resultados mais realísticos que os modelos lineares e, mesmo assim, as respostas nos parecem caóticas, mas este é um comportamento matemático, não físico.

Uma borboleta ao bater as asas em alguma parte do mundo não conduz a atmosfera a um estado caótico, haja vista, por exemplo, que tornados e furacões que poderiam ser supostamente considerados um estado de caos atmosférico, possuem causa determinada e somente ocorrem em estações e localidades relativamente bem definidas. Assim, o comportamento da atmosfera terrestre não depende da capacidade humana em representá-la por belas e pomposas equações matemáticas, nem tampouco se consideramos que ela seja caótica ou não.

Buchmann *et al.* (1990) indicaram que a existência de baixa energia associada às baixas frequências no ambiente atmosférico, advém da interação, dispersão e dissipação da alta energia ligada às altas frequências geradas na atmosfera por fenômenos meteorológicos impactantes e não pela presença exclusiva das ondas de gravidade. Isto, todavia, não explicaria a presença do caos permanentemente, mas apenas uma perturbação temporária.

### **3 Modelos Eulerinos e Lagrangeanos**

Richardson (1922) publicou um importante livro intitulado *Previsão do Tempo por Métodos Numéricos*, onde mostrou que a previsão numérica da atmosfera poderia ser efetuada com sucesso a partir do conhecimento e da definição precisa do estado inicial da atmosfera. O caminho seguido

posteriormente pela comunidade de meteorologistas foi primeiramente filtrar as variáveis do estado inicial de forma a remover fontes de perturbações de alta frequência tais como as ondas de gravidade e as ondas sonoras.

As equações básicas da mecânica dos fluidos que supostamente regem fisicamente o movimento do ar atmosférico são baseadas na hipótese de uma atmosfera diabática, compressível, não hidrostática, úmida, com atrito e viscosidade turbulenta. Este é um conjunto de equações primitivas não lineares e por isso uma solução analítica não é possível. Duas alternativas se apresentam para a solução deste conjunto: (1) solução por métodos numéricos ou (2) solução com restrições do ponto de vista físico e uso da teoria da perturbação. Esta última proposição resulta em um sistema hidrodinâmico de equações lineares que tem como solução uma função analítica conhecida ou estimada, geralmente do tipo onda.

O método numérico usado para integração das equações não lineares tem a desvantagem de não levar em conta as interações físicas de pequena escala que ocorrem entre dois pontos de grade, e que representam fenômenos que podem estar ocorrendo na atmosfera real. Por outro lado, na solução analítica há uma perda de qualidade da resposta física da atmosfera devido à ausência das interações de pequena escala. É preciso ter-se em conta que os termos não lineares das equações primitivas podem ter um papel importante na explicação física do que ocorre na atmosfera real.

Pela linearização das equações primitivas e usando-se a teoria da perturbação para um estado básico em repouso e ainda o método de separação de variáveis, obtêm-se um sistema constituído pelas equações das estruturas horizontal e vertical levando-se em conta as condições de contorno (Matsuno, 1966; Kasahara & Puri, 1981). Os modos atmosféricos horizontais e verticais podem assim ser evidenciados, lembrando que as equações da estrutura horizontal são iguais às equações linearizadas da água rasa, resultando finalmente em soluções do tipo onda.

A utilização de modelos lineares ou não lineares para o entendimento físico da atmosfera traz em si vantagens e desvantagens físicas. Nos modelos linearizados, o cancelamento da interação dos produtos de perturbação representa perda de informação realística correspondente à interação de fenômenos de pequena escala. Ainda mais, a imposição de muitas restrições resulta na perda de conteúdo fisi-

co, embora haja mais possibilidade de se encontrar uma solução analítica conhecida como solução do tipo onda. Menos restrições representam mais física considerada, mas haverá dificuldades por vezes intrinsecamente de se encontrarem soluções analíticas. As vantagens e desvantagens se somam e acabam acarretando perda na física da resposta do modelo.

Já no caso dos modelos não linearizados, não existe a preocupação em obterem-se soluções analíticas, até porque elas provavelmente não existem. Obviamente a busca de solução por métodos numéricos acarreta perda de qualidade nas respostas dos modelos. Portanto as respostas de modelos lineares ou não lineares estão muitas vezes longe de serem realísticas pela ausência de física nos modelos.

Finalmente, a atmosfera em sua evolução diária não está engessada às equações matemáticas. Ao contrário, as equações são o meio que a meteorologia utiliza na tentativa de representar ou compreender e por fim prever o comportamento do ar atmosférico.

#### **4 Ondas Atmosféricas**

Não existem ondas nas equações hidrodinâmicas, mas sim soluções do tipo ondulatório. No espectro das soluções ondulatórias destacamos as chamadas ondas de Rossby, de Kelvin, mistas Rossby-gravidade e ondas de gravidade para oeste e para leste, mas existem outros modos de oscilação com amplitudes, frequências, comprimento e números de ondas diferentes das aqui mencionadas (Matsuno, 1966; Kasahara & Puri, 1981). Estas ondas podem ou não estar presentes na atmosfera real. O que tem sido feito com sucesso é associar determinados comportamentos atmosféricos a alguns tipos de ondas e obter uma previsibilidade razoável. Isto é feito por associação de eventos meteorológicos com as frequências das soluções ondulatórias obtidas a partir das equações linearizadas.

Na atmosfera, se todas estas ondas existem, então devem estar presentes concomitantemente, possivelmente em forma de energia, interagindo fisicamente e tendo como resposta a atmosfera real. Caso contrário, a atmosfera não seria capaz de reconhecer por si mesma estas ondas.

Kasahara & Puri (1981) chegaram a um conjunto de equações linearizadas que continha a estrutura vertical e horizontal. A estrutura vertical

tem a função Sturm-Liouville como autofunção e a altura equivalente (modo vertical) como autovalor desta equação, com as condições de contorno que são utilizadas para sua obtenção. As equações da estrutura horizontal são idênticas às equações linearizadas da água rasa, discutidas por Loguet-Higgins (1968), tendo a função de Hough como autofunção e a frequência como autovalor, inferindo-se assim os modos de inércia-gravidade e de Rossby. A solução da função de Hough é dada por uma série aproximada de polinômios associados de Legendre.

Mais tarde, Kasahara & Qian (2000) usaram um conjunto de equações primitivas linearizadas em torno de um estado básico em repouso para a sua partição em modos de inércia-gravidade, de Rossby, acústico e de Lamb. Eles consideraram, para este propósito, hipóteses menos restritivas quando comparadas com as de Kasahara & Puri (1981).

As considerações das hipóteses referentes aos dois trabalhos acima mencionados podem ser direcionadas para soluções diferentes. Neste caso, diminuir as restrições físicas implica em aumentar o grau de dificuldades matemáticas para obtenção uma solução do tipo ondulatório, como já mencionado anteriormente.

As ondas existentes nas soluções dos modelos de equações linearizadas, não são identificadas na atmosfera, pois não existe uma etiqueta, um identificador ou uma relação biunívoca entre os modos contidos na função resposta da integração do modelo e o que realmente ocorre na atmosfera.

#### **5 Conclusões e Sugestões**

O objetivo deste trabalho não é desmistificar os modelos existentes, mas sim estimular o pensamento científico dos pesquisadores das ciências meteorológicas, incluindo as novas gerações, a buscarem novas formas de abordagem dos processos físicos nos modelos com o intuito de melhorar suas respostas. Certamente, uma maior inserção de física nos modelos aumentaria a qualidade das previsões do tempo.

Para o propalado “**caos atmosférico**” não existe nenhuma explicação física, pois seria considerar a atmosfera em desordem. De fato não é possível comprovar que a atmosfera é caótica por ausência de experimentos para tal. Mesmo a



explicação física de Lorenz (1963), ao dizer que o bater das asas da borboleta poderia gerar o caos na atmosfera, seria de difícil comprovação científica do ponto de vista observacional.

A atmosfera real não está subordinada às ondas solução que os modelos preconizam. Não há como identificar a existência de ondas na atmosfera. O que tem sido feito é associar as soluções do tipo ondulatório, oriundas dos modelos linearizados, ao comportamento meteorológico observado. Sendo assim, a energia da atmosfera proveniente das ondas atmosféricas ficaria comprometida, até porque provavelmente não existem ondas na real atmosfera.

Uma possível alternativa para uma melhor compreensão do que ocorre à nossa volta, no meio ambiente atmosférico do planeta Terra, seria considerar que a energia da atmosfera fosse transferida da matéria para o meio ambiente. Por exemplo, a radiação solar incidente nos continentes e nos oceanos volta para a atmosfera na forma de radiação infravermelha, estabelecendo-se assim um desequilíbrio do balanço energético que inicia os movimentos do ar atmosférico. De certa forma esta idéia é perseguida pelas parametrizações, mas não são contempladas explicitamente nas equações dos modelos tradicionais. Possivelmente a solução deste impasse seria inserir mecanismos físicos existentes na real atmosfera nas equações dos modelos atmosféricos, de maneira a melhorar a sua performance.

Outro exemplo é a característica sistêmica da atmosfera que não é levada em conta nos modelos atuais. Uma partícula de ar que faça parte de um ciclone terá seus movimentos regidos não apenas pela advecção de momento das partículas ao redor, mas também pelo fato de estar inserida no sistema ciclônico.

Nos grandes centros meteorológicos de previsão do tempo são utilizados modelos não lineares que levam mais realisticamente em conta a física da atmosfera. Numa tentativa de aumentar a fidelidade dos modelos à atmosfera real, acrescentam-se parametrizações físicas que, contudo não são dependentes do tempo.

A modelagem por conjuntos tem sido usada com sucesso no intuito de melhorar e aumentar a confiabilidade nas respostas das previsões numéricas do tempo e do clima. Mais ainda, as condições

de contorno, oceanográficas ou meteorológicas, usadas na modelagem climática são prescritas através de fórmulas matemáticas baseadas em observações da natureza, e que muito mais não fazem do que descrever o comportamento do fenômeno existente, em detrimento de indicar a evolução física do mesmo.

A continuar a atual maneira de se modelar a atmosfera, haverá um momento à frente quando, após muitos esforços no sentido de adequar a atuação dos modelos, quase nada mais se poderá acrescentar na melhoria da sua **performance**. É preciso repensar as equações matemáticas e, principalmente, a física que simula a atmosfera nos modelos, procurando entender e compreender melhor as relações físicas de causa e efeito que regem o comportamento da atmosfera real.

Muito embora os modelos possam responder razoavelmente bem, do ponto de vista dinâmico, e ainda assim não muito perto do observado, isto já não ocorre pelo lado físico da atmosfera, uma vez que os mesmos são baseados nas equações matemáticas da hidrodinâmica.

Uma pergunta que fica no ar é: em que se baseiam pesquisadores tais como Lorenz (1963), Kalnay (2003) e outros, para afirmar que a natureza se comporta de modo caótico? Seria no comportamento físico da atmosfera ou na matemática das equações dos modelos utilizados?

A percepção de pesquisadores como Jerome Namias é a de que metade do que se preve da evolução diária da atmosfera era baseado no conhecimento científico (o que hoje está registrado nos modelos numéricos), sendo que a outra metade enfocada sobre o comportamento atmosférico estava assentada no *feeling*. Obviamente, ao se referir ao *feeling*, Namias não estava se reportando especificamente ou explicitamente a modelos numéricos de previsão do tempo à época, mas sim à experiência de toda sua vida acadêmica e profissional como meteorologista sinótico (Jerome Namias, Comunicação Verbal, 1986).

Além disso Jonh Horel (comunicação verbal, 1992, Departamento de Meteorologia da Universidade de Utah), argumenta que as idéias de Lorenz sobre caos não eram totalmente adequadas ao comportamento do ar atmosférico.

O que se pretendeu neste trabalho foi discutir alguns conceitos, procurando melhorar o

entendimento da atmosfera, a partir da dicotomia sugerida pelo título “Atmosfera” versus “Previsão do Tempo”.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores Antonio da Costa Malheiros e Miguel Ballester, respectivamente das áreas de Meteorologia Sinótica e Meteorologia Dinâmica, sendo ambos peritos da Organização Meteorológica Mundial (WMO), os quais trouxeram as primeiras idéias da física atmosférica à UFRJ. O primeiro autor agradece ao professor Dr. Jonh Horel do Departamento de Meteorologia da Universidade de Utah. O segundo autor agradece ao Dr. Jerome Namias do Instituto de Oceanografia SCRIPPS da Universidade da Califórnia e à United Nations University (UNU) pelo apoio em seu Post-Doctoral naquela instituição quando foi recebido como Visiting Scholar. Os autores reconhecem também os apoios advindos do CNPq, da National Science Foundation (NSF) e da United Nations University em suas visitas ao (National Center for Atmospheric Research) NCAR e à Universidade de Utah.

## 7 Referências

- Buchmann, J.; Buja, L.E.; Paegle, J.N. & Paegle, J. 1995. The dynamical basis of regional vertical fields surrounding localized tropical heating. *Journal of Climate*, 8: 1217-1234.
- Kalnay, E. 2003. *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge University Press. UK. 276 p.
- Kasahara, A. & Puri, K. 1981. Spectral representation of the three-dimensional global data by expansion in normal mode functions. *Monthly Weather Review*, 109: 37-61.
- Kasahara, A. & Qian, J.H. 2000. Normal modes of a global nonhydrostatic atmospheric model. *Monthly Weather Review*, 128: 3357- 3375.
- Longuet-Higgins, M.S. 1968. The eigenfunctions of Laplace’s tidal equations over a sphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 262A: 511-607.
- Lorenz, E.N. 1963. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20: 130-141.
- Matsuno, T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 44: 25-42.
- Richardson, L.F. 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*, University Press. London. 236 p.