

1. Classificação <i>INPE-COM.4/RPE</i> <i>C.D.U.: 551.509(81)</i>	2. Período	4. Distribuição
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor)  <i>PREVISÃO NUMÉRICA, MODELO BAROTRÓPICO DE EQUAÇÕES PRIMITIVAS</i>		interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
5. Relatório nº  <i>INPE-1670-RPE/108</i>	6. Data  <i>Janeiro, 1980</i>	7. Revisado por <i>Vernon E. Kousky</i> <i>Vernon Edgar Kousky</i>
8. Título e Sub-Título  <i>PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO E SUA PERSPECTIVA NO BRASIL</i>		9. Autorizado por  <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>
10. Setor <i>DME</i>	Código	11. Nº de cópias <i>11</i>
12. Autoria <i>Marco Antônio Maringolo Lemes</i> <i>Antônio Divino Moura</i>		14. Nº de páginas <i>39</i>
13. Assinatura Responsável <i>Marco Antônio Lemes</i>		15. Preço
16. Sumário/Notas  <i>Previsão Numérica de Tempo (PNT) é uma modalidade de previsão meteorológica de curto prazo altamente eficiente. Baseada na solução numérica das equações governantes do comportamento da atmosfera em escala sinótica, PNT hoje aparece como uma alternativa lógica para os países interessados em melhorar a qualidade de suas previsões meteorológicas. Nesse trabalho é apresentada, uma descrição em ordem cronológica dos principais eventos, que fizeram de PNT uma área de pesquisa e aplicação bastante fértil dentro da Meteorologia. Também são discutidos os problemas científicos de PNT, bem como as exigências básicas a serem atendidas na implantação operacional dessa técnica de previsão. Finalmente é apresentada uma breve descrição do estado d'arte de PNT no Brasil, em particular do CNPq/INPE, juntamente com um exemplo de previsão numérica obtida com um modelo barotrópico de equações primitivas desenvolvido no Departamento de Meteorologia do INPE.</i>		
17. Observações <i>Relatório preliminar, apresentado na 31ª reunião da SBPC, Fortaleza, julho-1979.</i>		

ÍNDICE

ABSTRACT .....	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS .....	<i>v</i>
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. SOBRE O PROBLEMA FÍSICO E OS MODELOS DE PNT .....	5
3. SISTEMA OBSERVACIONAL .....	10
3.1 - Satélites Meteorológicos .....	16
4. NECESSIDADE DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E COMPUTADORES .....	17
5. O ESTADO PRESENTE DA PNT NO INPE/CNPq .....	18
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	28
AGRADECIMENTOS .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	33

## ABSTRACT

*Numerical Weather Prediction (NWP) is a highly effective means of producing short-range weather forecasting. Based on the numerical solution of the equations governing the large-scale behavior of the atmosphere, this technique appears to be a logical alternative for countries which seek to increase the reliability of their meteorological forecasts. In this report, a chronological description of the major events, today considered milestones in the evolution of NWP is presented. The scientific problem of NWP is briefly discussed and the basic requirements that must be fulfilled in the implantation of NWP, on an operational basis, are pointed out. Finally, a survey of the "etat d'art" of NWP in Brazil, in particular at INPE is included, together with an example of a numerical forecast obtained with a primitive-equation barotropic model developed in the Departament of Meteorology, INPE.*

## LISTA DE FIGURAS

- 1 - Distribuição, nos fins da década de 60, das estações de ar superior onde medidas de temperatura, umidade, vento e pressão são feitas, para a maioria delas, às 00:00 e 12:00 Z, e recebidas pelo Centro Nacional de Meteorologia, EEUU ..... 12
- 2 - Percentagem do número total de dias do ano de 1975, nos quais, pelo menos uma observação de ar superior foi realizada ..... 13
- 3 - Número de observações (por bandas de  $10^{\circ}$  de latitude) necessário para preencher as exigências recomendadas pela WWW e o número de observações existentes em 1977 ..... 15
- 4 - Desempenho "skill" de vários modelos operacionais do Centro Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos, usando médias anuais das cartas de prognósticos de 36 horas para a circulação em 500 mb ..... 19
- 5 - Velocidade de processamento dos vários computadores usados no Centro Nacional de Meteorologia dos EEUU, relativos ao CDC-6600 20
- 6 - Linhas de corrente (observadas) em 500 mb para 27.01.79, 1200 TMG ..... 24
- 7 - Função de corrente observada em 500 mb para o dia 27 de janeiro de 1979, 1200 TMG ..... 25
- 8 - Campo da função de corrente após 24 horas, previsto para 28 de janeiro-1979, 1200 TMG ..... 26
- 9 - Linhas de corrente (observadas) em 500 mb para 28.01.79, 1200 TMG ..... 27
- 10 - Campo de vento em 500 mb, previsto nos pontos de grade do modelo, para 28 de janeiro de 1979; 1200 TMG. Algumas linhas de escoamento foram desenhadas para melhor visualizar os dois cavados ..... 29

## 1. INTRODUÇÃO

Previsão Numérica de Tempo (PNT) é uma modalidade de prever o tempo, em escala sinótica, em que se aplicam técnicas numéricas às equações termo-hidrodinâmicas governantes do comportamento da atmosfera.

Operacionalmente, PNT somente foi implantada em 1958, no Centro Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos, desfrutando desde então de grande prestígio, como uma área de pesquisa bastante ativa e de enorme importância prática. Os trabalhos pioneiros, em especial a queles em Meteorologia Dinâmica proporcionaram uma sólida base teórica para o desenvolvimento dos modelos atmosféricos, cerne de qualquer esquema de PNT.

O primeiro marco decisivo que permitiu o aparecimento de PNT foi o estudo teórico de Bjerknes (1904), "*O Problema de Previsão de Tempo considerado do ponto de vista da Matemática e Mecânica*", onde, pela primeira vez, a previsão meteorológica foi formulada como um problema de valor inicial para as equações hidrodinâmicas.

Richardson (1922), em seu livro "*Previsão de Tempo por Processo Numérico*", mostra como resolver o sistema completo dessas equações, utilizando métodos de diferenças finitas. Nesse livro, é relatado o primeiro experimento numérico, integrando manualmente as equações governantes para fornecer uma previsão errônea de 24 horas para o dia 20 de maio de 1910, na área de Nuremberg-Asburg. Seus cálculos previram distúrbios de escala sinótica que se propagaram com velocidades excessivas (até 30 vezes maiores que os valores típicos) e, ainda na direção errada!

Este insucesso desestimulou novas tentativas e praticamente nenhum outro esforço foi feito nessa área nas três décadas seguintes. As causas do fracasso de Richardson são hoje perfeitamente conhecidas; primeiro, a falta de observações meteorológicas adequadas, so

bretudo as de ar superior; e segundo, seu desconhecimento de que as equações termo-hidrodinâmicas, como por ele usadas, descrevem uma variedade de tipos de movimento, incluindo as ondas acústicas e de gravidade internas, que a despeito da pouca ou nenhuma importância meteorológica (na escala sinótica) impõem graves restrições aos métodos de solução dessas equações. Uma revisão excelente do trabalho de Richardson foi feita por Platzman (1967).

Felizmente, esse acontecimento não impediu o desenvolvimento de teorias dinâmicas fundamentais, que iriam permitir a abertura de novos caminhos na Meteorologia. Por exemplo, através dos estudos de Bjerknes entre 1917 - 1919 e de subsequentes estudos da chamada escola de Bergen, dois conceitos de capital importância foram apresentados, sendo eles o *de frente atmosférica* e o *de ciclôgenese*, hoje considerados a base de todos os métodos sinóticos (não-numéricos) de previsão de tempo de curto prazo.

Courant, Friedrichs e Lewy (1928) descobriram que os incrementos em espaço e tempo, que aparecem nos esquemas de diferenças finitas, usados na obtenção de soluções numéricas das equações termo-hidrodinâmicas devem satisfazer certo critério para a estabilidade da solução.

A exequibilidade da PNT só se evidenciaria após os meteorologistas aprenderem a simplificar os modelos atmosféricos, evitando assim a complexidade das equações termo-hidrodinâmicas, mas ao mesmo tempo retendo somente as soluções de interesse meteorológico. Essa dificuldade só seria superada quando Rossby (1939) e Kibel (1940), independentemente, propuseram um método básico para simplificar as equações completas, introduzindo a teoria *quase geostrófica* que permite a filtragem do chamado "ruído meteorológico" das observações.

O aparecimento dessa teoria, per se, não poderia explicar a fantástica expansão experimentada pela PNT, nos últimos 30 anos. A complexidade das equações de previsão é tal que, exceto em raríssimos

casos, elas não podem ser resolvidas analiticamente; então as soluções eram obtidas por métodos gráficos ou outros similares, no sentido de se empregar computação manual. Isso, por ser trabalhoso e bastante demorado, era um grande obstáculo à implantação operacional dessa nova modalidade de previsão.

Foi, sem dúvida alguma, o advento do computador eletrônico digital, no início da década dos 50 que marcou o começo de uma era em PNT que veio revolucionar a Meteorologia. Quando o primeiro computador eletrônico, o ENIAC, foi projetado e construído no Instituto de Estudos Avançados, em Princeton, N.J., nos Estados Unidos, o problema de previsão meteorológica foi um dos poucos problemas selecionados para testar a eficiência dessa tecnologia. É oportuno aqui mencionar que desde então, o progresso em PNT tem sido bastante paralelo ao avanço da tecnologia de computadores eletrônicos, e que é esse último que impõe limitações ao desenvolvimento de modelos atmosféricos mais sofisticados.

Em 1950, Charney, Fjortoft e Neumann, baseando-se na idéia de Rossby de que a rotação do planeta e o aquecimento diferencial entre os polos e o equador constituem o principal mecanismo responsável pelo comportamento da atmosfera em latitudes extratropicais, desenvolveram o primeiro modelo de PNT: um modelo barotrópico de equações filtradas, onde a atmosfera é representada por um único nível em altitude. Após alguns aperfeiçoamentos, tornou-se o primeiro modelo de PNT operacional nos Estados Unidos (Cressman, 1958).

Notou-se a partir de então, um crescimento rápido no desenvolvimento de modelos operacionais de PNT usados pelos centros previsores de diversos países do mundo, notadamente na Rússia, no Japão e na Inglaterra, para mencionar alguns. Comprovado por testes objetivos de verificação, os países que ingressaram na era de PNT experimentaram uma substancial melhoria na qualidade e confiabilidade das previsões meteorológicas com enormes benefícios para os setores econômico, militar, social e recreativo.

Por outro lado, o problema de PNT para o caso específico de latitudes tropicais, requer uma formulação diferente daquela para latitudes médias. Assim, os modelos numéricos de relativa simplicidade, como aqueles baseados nas equações filtradas, que se mostraram adequados para prever o movimento da atmosfera em latitudes extratropicais, tem seu emprego bastante questionável quando se considera sua aplicação em latitudes baixas.

Com o avanço na área de computadores eletrônicos, foi possível desenvolver modelos de PNT próprios para as latitudes tropicais e um grande progresso em modelagem numérica, pelo menos em nível experimental e de simulação, para essas latitudes tem sido observado nesses últimos anos. Isso porque os meteorologistas de latitudes médias entenderam que a circulação tropical é um componente principal da circulação global da atmosfera.

Esforços enormes vêm sendo feitos no sentido de observar, com resolução espacial e temporal jamais vista, a circulação nos trópicos numa tentativa de aumentar o prazo de previsões numéricas em latitudes *extratropicais*. Esses esforços são materializados na execução de programas internacionais como o GARP (Global Atmospheric Research Program) e seus subprogramas como o GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) e o FGGE (Global Weather Experiment).

O propósito desse trabalho é único: justificar a implantação de PNT, em caráter operacional, como uma alternativa lógica a ser tomada para melhor entender e conseqüentemente prever o comportamento da atmosfera. Um aprimoramento nas previsões de tempo em um país de tão grande área territorial como o Brasil é indispensável.

No que se segue, o problema de PNT será abordado de maneira a abranger todos os seus aspectos básicos. Alguns exemplos de experimentos em PNT já realizados no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE/CNPq) são aqui incluídos a título de ilustração.

## 2. SOBRE O PROBLEMA FÍSICO E OS MODELOS DE PNT

A atmosfera é basicamente uma mistura de gases, constantemente em movimento, devido, em última instância, ao "input" de radiação solar. O espectro de movimento estende-se desde os movimentos turbulentos, de escala milimétrica até aqueles de escala comparável à dimensão do planeta. A complexidade do estudo da atmosfera fica claramente evidenciada quando se nota uma grande gama de processos físicos atuando simultaneamente no sistema. Assim, a interação entre os movimentos de diferentes escalas (processo tipicamente não-linear), a presença da substância água, coexistindo em seus três estados (responsável pela maioria dos processos termodinâmicos de importância na baixa troposfera) e a não-homogeneidade da superfície do planeta (orografia, distribuição de continentes e oceanos, etc.) são apenas alguns exemplos que ilustram o grau de dificuldade envolvido no problema.

Mas não obstante essa complexidade, a atmosfera tem seu comportamento regido por leis físicas universais, bastante conhecidas, que exigem a conservação de massa, energia (equação da termodinâmica) e quantidade de movimento (equação de Navier-Stokes). A característica fundamental desse conjunto de equações é que, uma vez especificados convenientemente todos os termos fontes e sumidouros, se trata de um sistema fechado, *prognóstico*, i.e. que pode ser resolvido como um problema de valor inicial. Desse modo, conhecidos todos os parâmetros meteorológicos descritivos de um estado da atmosfera (estado inicial ou início da previsão) pode-se calcular suas taxas de variação temporal. Supondo que essas taxas permaneçam constantes durante um curto intervalo de tempo, pode-se determinar valores futuros desses parâmetros; o processo sendo repetido o número de vezes necessário para se atingir o período desejado da previsão.

Desse modo, a filosofia fundamental de técnicas de previsão objetiva, como já exposta por Bjerknes e Richardson é que se o estado da atmosfera fosse completamente conhecido, então seria possível

*vel prognosticar estados futuros, usando as equações básicas da hidrodinâmica e da termodinâmica.*

Problemas não-lineares de valor inicial em Geofísica, e em especial aqueles de previsão meteorológica, não são geralmente susceptíveis a tratamento analítico e, portanto, *métodos numéricos* devem ser utilizados na obtenção de suas soluções.

Desses, o método de *diferenças finitas* ou de *pontos de grade* é o mais prático e mais amplamente empregado. Consiste em introduzir um conjunto de pontos na região de interesse nos quais as variáveis dependentes são inicialmente especificadas e subsequentemente computadas, integrando, numericamente, as correspondentes equações de diferenças finitas sujeitas às condições de contorno e iniciais propriamente formuladas. Apesar de sua importância prática, o método apresenta certas desvantagens inerentes, como erros de truncamento e instabilidades computacionais (linear e não linear), que devem ser controladas para não acarretar o deterioramento das soluções numéricas. Uma segunda abordagem, consiste no uso de *métodos espectrais*, que elimina algumas das dificuldades acima mencionadas, em particular, a instabilidade numérica não linear. Em *modelos espectrais*, as derivadas espaciais são calculadas analiticamente, expressando a dependência espacial das variáveis dependentes em termos de séries de funções ortogonais. Por outro lado, os tempos de computação são comparativamente mais longos, mas esse fator limitante está sendo gradativamente eliminado à medida que computadores mais velozes tornam-se operacionalmente disponíveis.

Um enorme número de modelos numéricos já foram desenvolvidos dentro da área de modelagem atmosférica, quer para testar teorias, como para simular ou prever os mais diversos fenômenos, desde os de "pequena" escala (convecção em cúmulos, processos de camada limite, etc.) até os de escala planetária, como a própria circulação geral da atmosfera. No presente trabalho, no entanto, somente os modelos numéricos de *previsão de tempo em escala sinótica* são considerados.

Independente da metodologia com que são numericamente tratados, os modelos de PNT podem ser agrupados em duas categorias:

- a) *os de equações derivadas ou filtradas;*
- b) *os de equações primitivas.*

Nos primeiros, a formulação de suas equações objetiva a eliminação dos tipos de movimento atmosféricos de pouca importância meteorológica, permitindo a previsão para aqueles que carregam a maior parte das informações que consegue caracterizar o tempo, em escala ciclônica, como as conhecidas ondas de Rossby ou ondas planetárias. Exemplos notórios de modelos dessa categoria são os quase-geostróficos, que praticamente marcaram o início da era de previsão objetiva, no começo da década de 50.

Somente a partir da segunda metade da década seguinte, tornou-se operacionalmente viável o uso dos modelos baseados nas equações primitivas. Não obstante, as ondas acústicas (exceção à de onda de Lamb) serem filtradas pela aproximação hidrostática, esses modelos permitem a existência de ondas de gravidade inerciais, cujas velocidades de propagação de fase são bem superiores às aquelas das ondas planetárias. Uma das grandes vantagens advinda da implantação desses modelos foi o tratamento mais simples e direto de vários processos físicos, o que não era possível com os modelos do primeiro grupo, e a sua aplicação generalizada (modelos quase-geostróficos por exemplo tem sua validade questionada nos Trópicos).

O critério de Courant-Friedrichs-Lewy (1928), que assegura a estabilidade linear das soluções numéricas, impõe restrições no tamanho do intervalo de tempo  $\Delta t$  permissível dado matematicamente, por:

$$\Delta t_{\max} \leq \frac{d}{c \sqrt{2}} \quad (1)$$

onde  $d$  é o incremento espacial (assumido igual nas direções leste-oeste e norte-sul) e  $c$  a velocidade de propagação do distúrbio mais rápido permitido pelo modelo. Para valores de  $d$ , de algumas centenas de quilômetros, valores de  $\Delta t$  tipicamente "seguros" para os modelos de equações filtradas e primitivas são 40 e 10 minutos, respectivamente. Esse fato explica porque foram os modelos quase-geostróficos os primeiros a serem implantados operacionalmente em serviços meteorológicos de vários países.

Uma classificação final dos modelos de PNT pode ainda ser feita, considerando ou não a inclusão da estrutura vertical e termodinâmica da atmosfera. Nos chamados *modelos barotrópicos* (de equações filtradas ou primitivas), a atmosfera é representada por um único nível na vertical devido à hipótese que a densidade é função somente da pressão, o que implica que superfícies isopícnicas, isotérmicas e isóbaras sejam todas coincidentes. Não obstante à relativa simplicidade desses modelos, eles têm sido utilizados com considerável sucesso, na previsão dos campos de movimento e distribuição de massa do nível de 500 mb. Um modelo barotrópico de equações primitivas é brevemente apresentado, juntamente com um exemplo de previsão numérica com ele obtida.

Modelos barotrópicos são, no entanto, inadequados para prever situações de desenvolvimento de sistemas sinóticos, provocadas grandemente por advecções pronunciadas de temperatura. Portanto, uma extensão lógica dos modelos barotrópicos, é incluir a variabilidade vertical do vento de modo a permitir advecção térmica, de acordo com a relação do vento térmico. Esses são os chamados *modelos baroclínicos*, que também podem ser de equações filtradas ou primitivas.

Esquemas de PNT, exigem o conhecimento de variáveis de entrada nos pontos de grade de malha de integração. Como essas são medidas nas estações, torna-se necessário interpolá-las para os pontos de grade, o que pode ser feito manualmente (análise subjetiva) ou por computadores (análise objetiva), sendo obviamente o último procedimento, o mais recomendável, sobretudo quando o aspecto operacional é envolvido.

Essa operação inevitavelmente introduzirá erros nos campos que se somam àqueles instrumentais, inerentes à medição das variáveis. Também como parte dessa etapa de *inicialização*, é comum incluir a obtenção ou construção, usando equações apropriadas dos campos dos parâmetros, que apesar de não serem medidos diretamente, são necessários para especificar completamente o estado inicial da atmosfera, no modelo.

É também na fase de inicialização que se procura suprimir o chamado "ruído meteorológico", que se manifesta como ondas de gravidade de alta frequência. Existem vários meios para se proceder nesse sentido, sendo talvez o mais comum, forçar um ajustamento apropriado entre os campos de vento e pressão. Mesmo não inicialmente presente, "ruído meteorológico" pode ser excitado durante a integração numérica do modelo, como por exemplo, pela presença de montanhas ou outros processos "rápidos" (liberação de calor latente, resultante da condensação de vapor d'água). Isso certamente exige que outros cuidados adicionais sejam tomados a fim de evitar o mascaramento pelo "ruído" da onda meteorológica de interesse.

Dentre os muitos problemas que os meteorologistas têm tratado, um dos mais notáveis talvez seja o da *previsibilidade* dos movimentos atmosféricos, i.e. a determinação da extensão do período no qual a atmosfera é previsível.

Devido ao caráter aleatório das atividades humanas na biosfera, a atmosfera não pode ser tratada como um *sistema deterministico*, i.e. seus estados passado e presente não determinam *um único estado futuro*. Em adição, as deficiências da rede observacional (a atmosfera é amostrada discretamente em espaço e tempo), bem como as limitações das técnicas de previsão suportam o fato de não se poder prever, perfeitamente, o comportamento da atmosfera, para qualquer período de tempo. Não obstante, melhoramentos e implantações de técnicas de observação, paralelamente a um desenvolvimento de modelos mais completos e realistas, já comprovaram a importância prática de esquemas de PNT em produzir previsões de curto prazo, de excelente qualidade.

Longe de ser uma técnica perfeita de previsão, PNT apresenta-se como uma área bastante promissora dentro da Meteorologia e certamente os próximos anos verão uma grande taxa de retorno de benefícios para a humanidade.

### 3. SISTEMA OBSERVACIONAL

O rápido avanço em PNT se deve, em grande parte, ao advento e expansão da tecnologia de *computadores eletrônicos*. No entanto, outro fator importante, que criou as bases para esse desenvolvimento, foi a implantação gradativa de plataformas observacionais.

No começo do século, os previsores não contavam com um sistema observacional adequado para fins de previsão numérica (e também pouco convencional), *mesmo* se já dispusesse de computadores eletrônicos. Uma rede, em escala global, bastante precária, fornecia observações de superfície e as únicas informações de ar superior, feitas em um número ainda menor de estações, consistiam em medidas de pressão, temperatura e umidade, usando um *meteógrafo* atado a uma *pipa* (processo trabalhoso, possível somente em certas condições de tempo), e observações visuais de nuvens.

Em 1909, iniciou-se nos Estados Unidos, a medição de ventos superiores, empregando-se *balões-piloto* rastreados por teodolitos. Apesar das observações serem restritas aos 5 primeiros quilômetros da atmosfera e sofrerem a interferência de nuvens, elas eram rápidas e relativamente econômicas. Durante a Primeira Guerra Mundial, observações, *in situ*, eram feitas por instrumentos a bordo de aviões; a limitabilidade desse método é bastante óbvia.

Um grande avanço no sistema observacional mundial foi acarretado pela introdução da *radiossondagem*, que consiste na medição da temperatura, pressão e umidade por sensores carregados por balões e transmitidas por rádio às estações na superfície. Por ocasião da Segunda

Grande Guerra, a radiossondagem já se havia tornado uma técnica de observação meteorológica amplamente divulgada e implantada operacionalmente em diversos países do mundo.

A qualidade de qualquer previsão de tempo e, de modo especial, a previsão numérica, depende criticamente das informações meteorológicas que caracterizam o estado da atmosfera no início do período da previsão. É indispensável que essas observações possuam boa resolução espacial, no sentido de serem significativamente representativas para a área de previsão. Isso implica que não são o número de estações meteorológicas, mas também sua distribuição na área seja um fator decisivo na determinação da qualidade e por conseguinte na utilidade da previsão.

A inadequação da rede convencional de observações no Hemisfério Sul é claramente constatada na Figura 1\* e grandemente explicada por ser esse hemisfério, em contraposição com o Hemisfério Norte, predominantemente formado por áreas oceânicas e apresentar extensas áreas continentais de difícil acesso para permitir uma cobertura convencional. Em se tratando de resolução temporal nos dados meteorológicos de altitude, a situação também deixa muito a desejar. A Figura 2, baseada em informações fornecidas pelo National Climate Data Center, Asheville, NC, nos Estados Unidos, mostra, para cada estação que operou em 1975, a percentagem do número total de dias do ano nos quais, pelo menos uma observação de ar superior foi realizada.

---

\* Situação da rede aerológica (pressão, temperatura, umidade e ventos) nos fins da década de 1960. Informações mais recentes (WMO, Bulletin vol. XXVIII, nº 1, pp 8-12) reportam que a parte do Hemisfério Sul do Sistema Observacional Global de WWW consiste de a) cerca de 800 estações de superfície, b) cerca de 300 estações de ar superior; c) 800 navios que fazem voluntariamente observações de superfície e d) pequeno número de navios (<10) que fazem observações de ar superior. Essa rede representa 10% do sistema global.

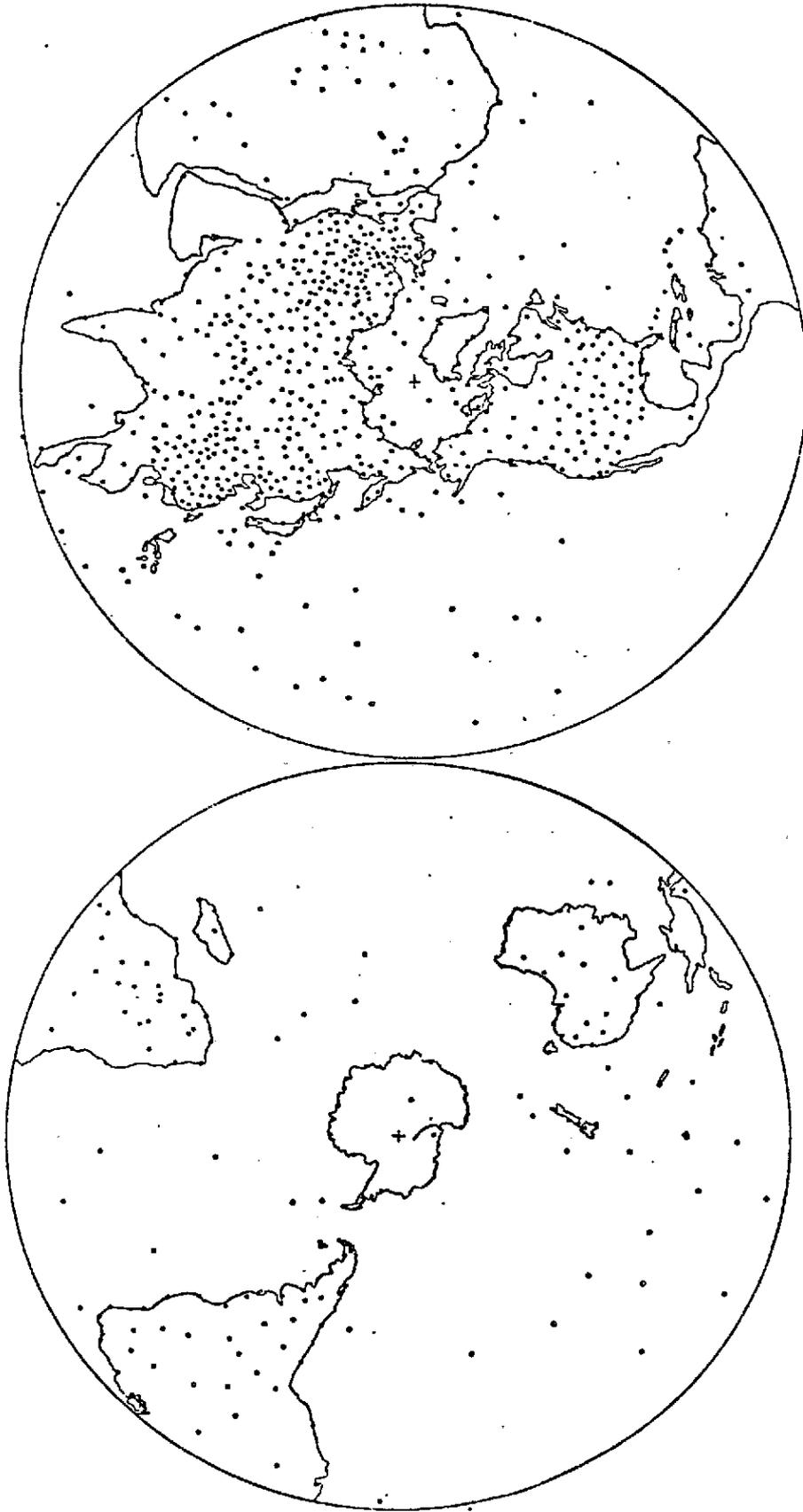


Fig. 1 - Distribuição, nos fins da década de 60, das estações de ar superior onde medidas de temperatura, umidade, vento e pressão são feitas, para a maioria delas, às 00:00 e 12:00 Z, e recebidas pelo Centro Nacional de Meteorologia, EEUU. (Fonte: Phillips, N.A. "Models for Weather Prediction", Annual Review of Fluid Mechanics, vol. 2, 1970).

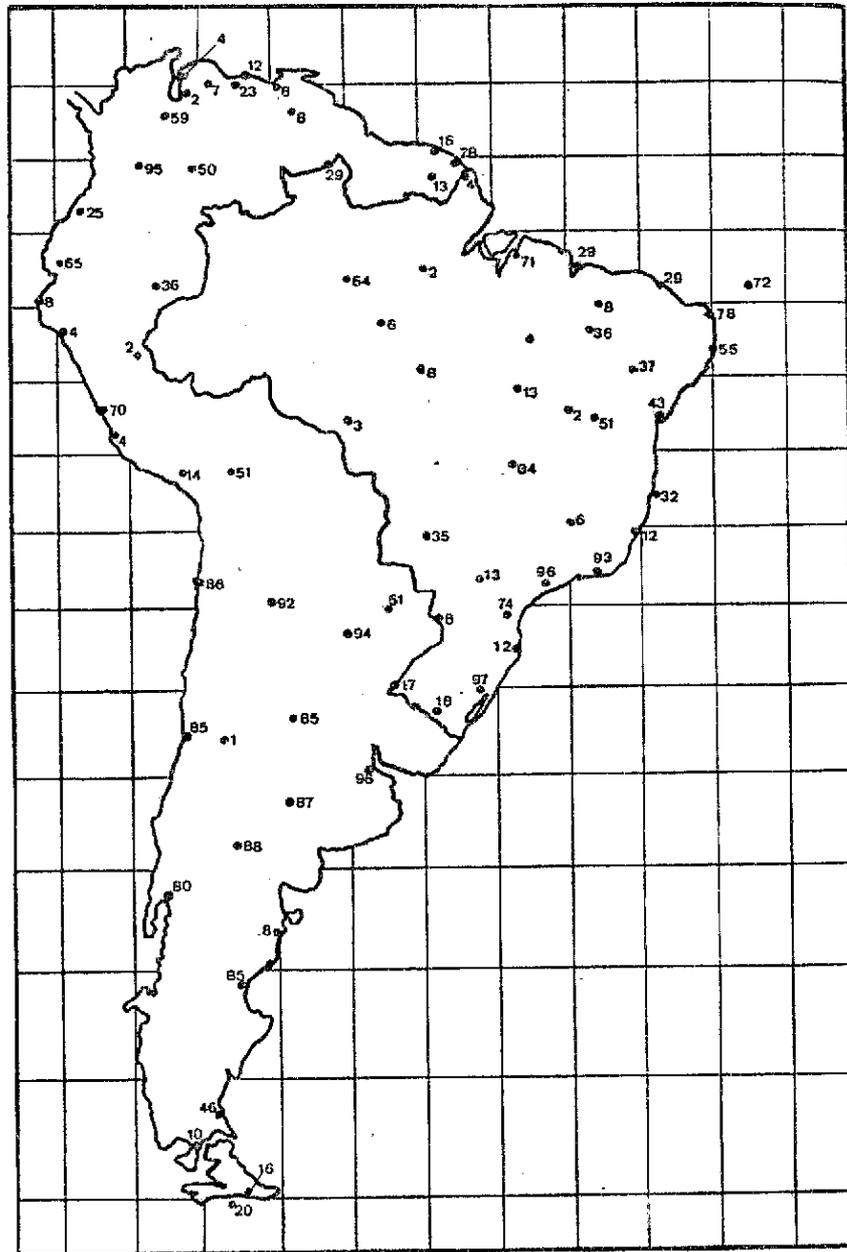


Fig. 2 - Percentagem do número total de dias do ano de 1975, nos quais, pelo menos uma observação de ar superior foi realizada.

Uma situação mais atual, porém não muito diferente que a de alguns anos atrás, é retratada na Figura 3, que compara o número de observações (por banda de  $10^{\circ}$  de latitude) necessário para preencher certas exigências recomendadas pela WWW (World Weather Watch) e o número de observações existentes em 1977.

Com o advento de novas técnicas de observações, notadamente aquelas com satélites meteorológicos, o problema de aquisição de dados meteorológicos no Hemisfério Sul e em especial na América do Sul está sendo solucionado. Hoje, os satélites meteorológicos são reconhecidos como parte essencial do sistema observacional global; no que diz respeito à cobertura espacial, os satélites não encontram competidores. Por exemplo, satélites heliossíncronos podem observar, ao completar uma órbita, aproximadamente 8% da superfície da terra e satélites geossíncronos podem cobrir continuamente quase a metade do globo terrestre.

Mais do que simples fotos de cobertura de nuvens, os satélites meteorológicos mais recentes fornecem uma variedade de tipos de informações quantificáveis como sondagens indiretas de temperatura e umidade relativa, campo de vento derivado dos movimentos de elementos de nuvens, etc. Em adição, o sistema observacional mundial inclui observações de temperatura e vento ao longo das rotas de vôos comerciais, observações de superfície ao longo das rotas marítimas e aquelas fornecidas por outras plataformas (balões de nível constante, bóias fixas e à deriva).

Dados meteorológicos com boa resolução espacial e temporal são indispensáveis à elaboração de previsões com certo grau de confiabilidade. Esquemas de PNT apresentam-se talvez, como a única maneira sistemática e objetiva de assimilar todos os tipos de informações meteorológicas, sobretudo as assinóticas. Portanto, ao problema observacional deve ser dada atenção especial, sobretudo no que diz respeito à potencialidade e uso das informações obtidas pelas plataformas observacionais, recentemente introduzidas em nível operacional.

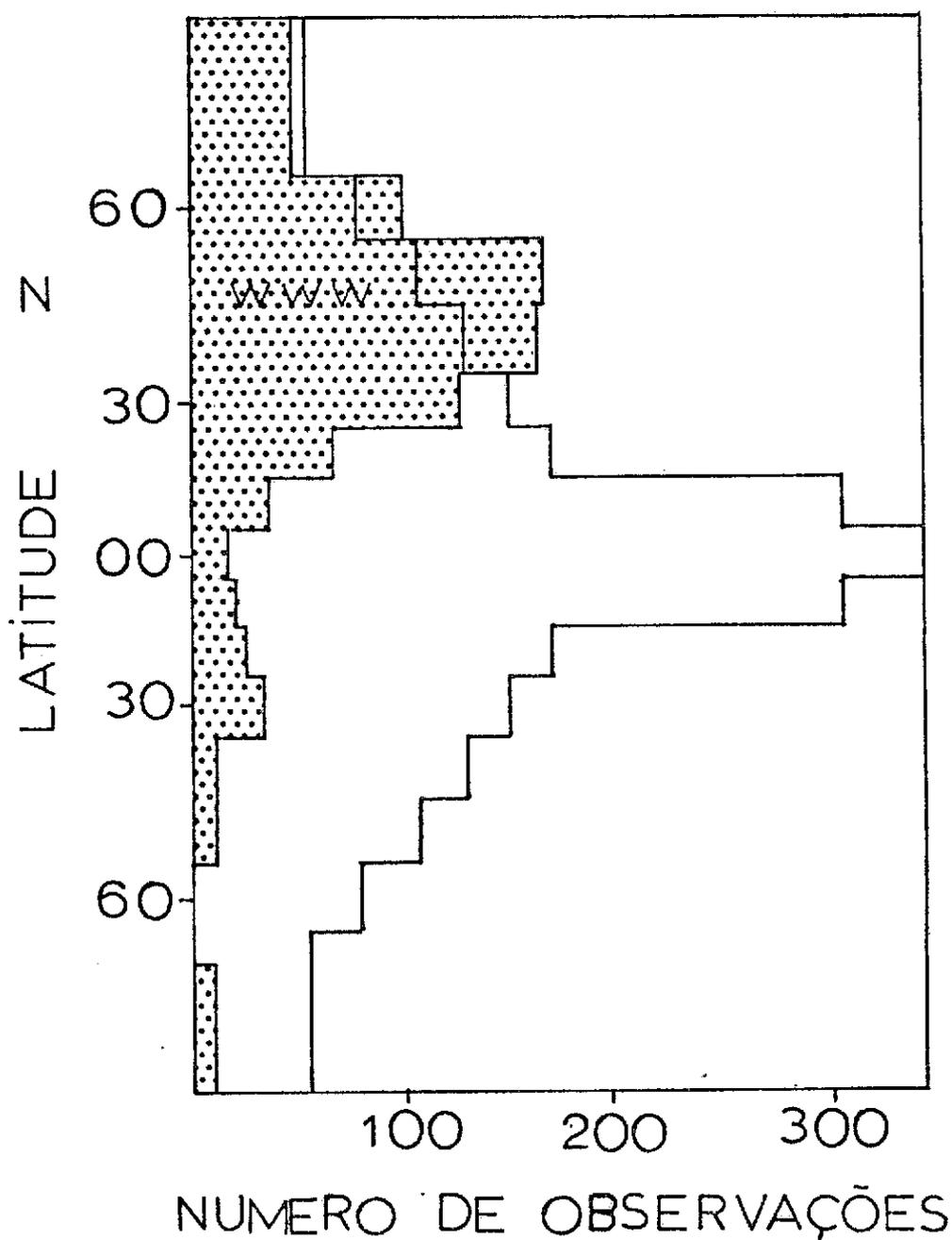


Fig. 3 - Número de observações (por bandas de  $10^{\circ}$  de latitude) necessário para preencher as exigências recomendadas pela WWW e o número de observações existentes em 1977 (Fonte: Zillman, J.W. "The First GARP Global Experiment" Aust. Met. Magazine 25, 1977).

Devido ao relevante papel que os satélites meteorológicos certamente desempenharão no futuro, no sentido de complementar a rede mundial de observações, a subsecção abaixo descreve, sucintamente o estado do progresso na implantação dessa tecnologia no país.

### 3.1 - SATÉLITES METEOROLÓGICOS

Os satélites artificiais, como plataformas de observação meteorológica, têm comprovadamente fornecido informações valiosas para a previsão do tempo. A grande cobertura espacial em áreas remotas e a frequência de observações (até a cada 30 minutos) têm colocado o satélite, não como um substituto da rede meteorológica convencional de superfície e altitude, mas sim como excelente meio complementar de dados, permitindo a extensão das análises e preenchimento de "vazios de dados".

Atualmente são disponíveis, via teletipo, dados de velocidade de vento, derivados do movimento de nuvens (SATWIND), espessura de camada entre superfícies isobáricas padrões, obtidas através de radiações medidas em vários canais do infravermelho (SATEM) e altura de topo de nuvens (SATOP). As imagens no espectro visível e infravermelho, indicando cobertura de nuvens, localização de frentes, corrente de jato, etc., são hoje uma rotina nos centros previsores.

No Brasil, já são fornecidos, operacionalmente, informações obtidas pelos satélites heliossíncronos (TIROS-N), imagens no infravermelho, dos satélites geoestacionários (GOES) e, até o início de 1980, imagens de alta resolução, no visível, do GOES e METEOSAT produzidas em tempo real até a cada 30 minutos.

Num futuro próximo, provavelmente dentro de 2 anos, de verá estar operacional no país, e fornecendo informações a todos os usuários, instalações que permitem a obtenção de ventos a partir do movimento de nuvens e perfil vertical de temperatura, obtida pela inversão das radiações medidas pelo sistema TOVS dos satélites TIROS-N. A isto,

adiciona-se a disponibilidade de plataformas de coleta de dados (PCD) para obtenção de informações específicas em áreas remotas ou de difícil acesso.

Pode-se chegar à conclusão que o sistema mundial de observação por satélites (5 satélites geoestacionários e 2 de órbita heliossíncrona) deverá propiciar meios para melhorar substancialmente a qualidade das previsões de tempo no país, inclusive fornecendo dados complementares para a inicialização de modelos de PNT.

#### 4. NECESSIDADE DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E COMPUTADORES

O sistema de comunicação, como o sistema observacional, é uma parte vital em qualquer serviço meteorológico. Observações feitas nas estações e outras localidades devem ser rapidamente coletados e canalizadas para o centro previsor. O fator rapidez é essencial, porque as informações meteorológicas, para fins de previsão, são produtos "altamente perecíveis" e também porque há necessidade de se elaborar as previsões em tempo hábil, para lhes conferir utilidade prática.

Também de igual importância é a disseminação das previsões para os subcentros meteorológicos (onde elas devem ser refinadas, considerando-se efeitos locais, como a presença de grandes massas de água, por exemplo) e para a população como um todo, através dos órgãos de divulgação. Ligações entre o centro previsor e outras agências governamentais devem existir para o trâmite de informações necessárias para a tomada de decisões para planejamento sócio-econômico e para eventuais situações de emergência.

O uso de computadores eletrônicos digitais em previsão meteorológica é justificado como se segue. Em primeiro lugar, essa automatização é a *única alternativa para solucionar o problema decorrente do enorme fluxo de dados que geralmente chega a um centro meteorológico*. Assim, grandes quantidades de informações podem ser rapidamente processadas (decodificadas e plotadas) e analisadas. Segundo, se a au

tomatização for estendida à previsão propriamente dita, i.e. emprego de modelos numéricos da atmosfera, o fator *subjetividade, nas previsões, pode ser eliminado ou grandemente minimizado*. Nessas circunstâncias, as previsões não mais dependeriam da experiência pessoal do previsor, que assumiria a função de assessor e não a de executor. Finalmente, técnicas de PNT possibilitariam o *aproveitamento quantitativo* de certos tipos de informações, notadamente aquelas obtidas com satélites meteorológicos que poderiam ser *incorporadas consistentemente* aos dados convencionais.

Com as considerações feitas acima, não é surpresa esperar que a implantação de esquemas de PNT acarrete uma melhoria na qualidade das previsões. Isso pode ser facilmente constatado na Figura 4, reproduzida de Shuman (1978) onde se mostra a evolução de desempenho ("skill") para vários modelos operacionais com o tempo, à medida que novos sistemas computadores foram sendo operacionalmente introduzidos. O que é notável observar nessa figura é que durante os primeiros vinte anos de PNT nos EUA o "skill" cresceu de 35 a 65%, ocorrendo o maior salto (de 35 a 50%) com a implantação em 1958, do primeiro modelo operacional - um modelo barotrópico de equações primitivas.

A velocidade operacional de processamento do computador IBM-7090, usado na integração desse modelo é de 0.250 MIPS (milhões de instruções por segundo), considerado um computador "lento" (veja Figura 5), quando comparado com o CDD 6600, de 2.5 MIPS, por exemplo.

##### 5. O ESTADO PRESENTE DA PNT NO INPE/CNPq

Desde 1972, o INPE vem adquirindo experiência no campo de PNT. A partir de 1976, o grupo de pesquisadores\* engajados nessa área aumentou e as atividades ligadas à mesma tiveram grande avanço.

---

\* Atualmente o grupo é composto de 3 PhDs, 5 mestres e 4 estudantes de pós-graduação.

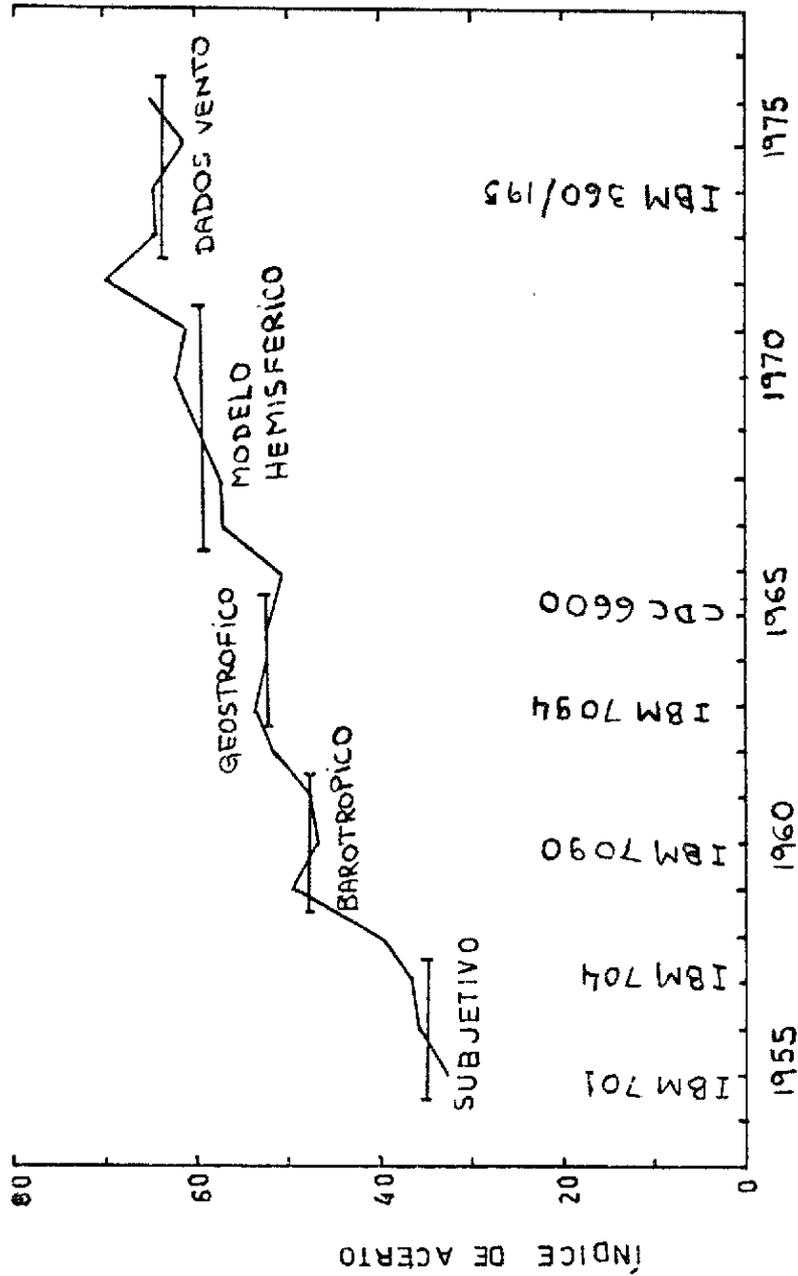


Fig. 4 - Desempenho "skill" de vários modelos operacionais do Centro Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos: usando médias anuais das cartas de prognósticos de 36 horas para a circulação em 500 mb. (Fonte: Shuman, F. G. "Numerical Weather Prediction", Bull. of the A.M.S., 59, pp 5-17, 1978).

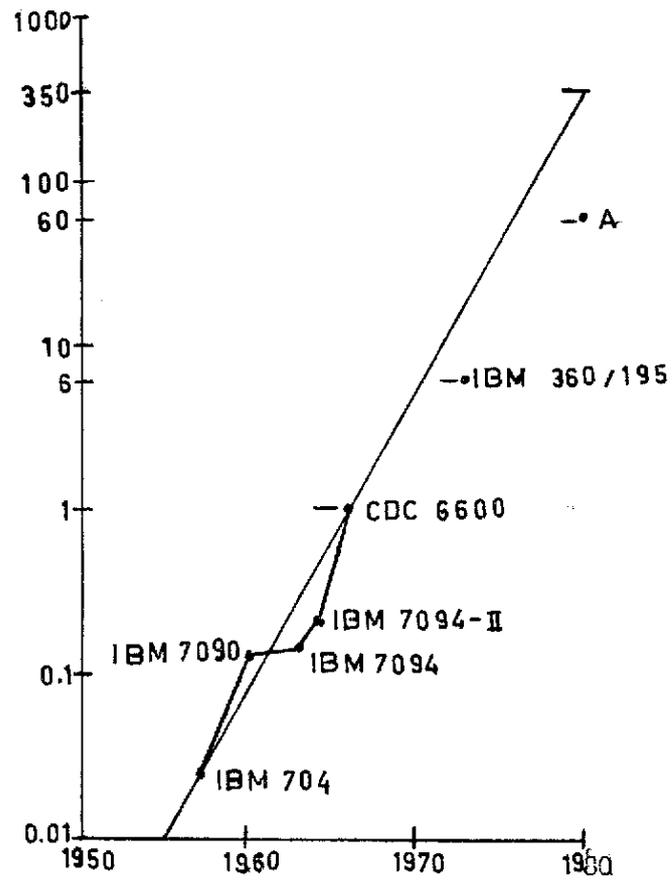


Fig. 5 - Velocidades de processamento dos vários computadores usados no Centro Nacional de Meteorologia dos EEUU, relativos ao CDC-6600. (Fonte: mesma que na Figura 4).

Todas essas atividades enquadram-se dentro de um programa de pesquisas mais geral cujo objetivo principal é realizar estudos sobre a dinâmica da atmosfera, com ênfase especial no desenvolvimento e uso de modelos numéricos. A curto prazo, o objetivo do programa é o desenvolvimento e a implantação experimental de modelos numéricos de previsão de tempo, que incluam os processos físicos atuantes na atmosfera. Paralelamente ao esforço na elaboração de modelos, atenção tem sido colocada em:

- a) *dificuldades inerentes à distribuição irregular das estações meteorológicas convencionais na América do Sul, e,*
- b) *potencialidade de dados obtidos por plataformas não-convencionais (satélites geoestacionários, bóias oceânicas, aviões) para fornecimento de difícil acesso.*

A médio e longo prazos objetiva-se a implantação, no país, de modelos de circulação geral para estudos de simulação de clima e suas variações.

É oportuno mencionar que a importância do programa é ressaltada no II PBDCT (cap. III, seção 2) e identifica-se, perfeitamente, com algumas das recomendações de âmbito nacional, feitas no "Seminário Internacional sobre Climatologia do Hemisfério Sul" (Campinas, setembro de 1977) como também algumas apresentadas na 7ª Reunião da Associação Regional III da OMM (Brasília, setembro de 1978).

O Departamento de Meteorologia do INPE/CNPq conta com um centro de facilidades de recepção/transmissão de mensagens meteorológicas e fac-simile e um terminal de multiplex ligado diretamente com o CINDACTA, em Brasília. Imagens de satélites meteorológicos recebidas nos equipamentos do Grupo de Observações Meteorológicas (GOM) são frequentemente empregadas na análise de cartas sinóticas. Um suporte precioso é fornecido pelo Departamento de Apoio Técnico (DAT) do INPE, o qual mantém as facilidades de computação (atualmente um computador B6700).

Dois modelos específicos de PNT já foram completados e outros dois encontram-se em fase de desenvolvimento. Esses últimos são de multiníveis e permitem a inclusão da estrutura termodinâmica da atmosfera, tornando-se possível prever parâmetros meteorológicos de importância fundamental, como os campos de pressão à superfície e os de movimento vertical.

Um desses modelos, mais exatamente um modelo barotrópico de equações primitivas (Lemes et al., 1978) é descrito sucintamente na Tabela 1, e um experimento de previsão é incluída a título de ilustração. Vale a pena mencionar que não obstante sua simplicidade, o modelo já mostrou ser uma ferramenta de grande utilidade em estudos de simulação numérica (Satyamurty et al., 1979) e em previsões de tempo de curto prazo.

O campo de vento de 500 mb, no dia 27 de janeiro de 1979, 1200 TMG (dentro do período de ocorrência das enchentes catastróficas no sudeste do país) foi utilizado para alimentar o modelo. Na Figura 6, tem-se a carta de 500 mb analisada para esse dia, podendo-se nela notar a presença de um cavado semipermanente, bastante intenso, sobre a vizinhança do litoral sudeste brasileiro. Esse cavado seria continuamente reforçado por cavados transientes de onda curta, um dos quais já evidente sobre o norte da Argentina. A posição desses dois cavados é indicada por linhas tracejadas na Figura 6.

A Figura 7 mostra esse mesmo campo de escoamento na forma de função de corrente, como gerado objetivamente no modelo. A previsão de 24 horas para a configuração do escoamento nesse nível é dada na Figura 8, a qual deve ser comparada (qualitativamente) com a carta de verificação (Figura 9) do dia 28 de Janeiro de 1979, 1200 TMG. Pode-se julgar satisfatório o desempenho do modelo em prever a propagação desses dois cavados, pois em outras palavras, o modelo conseguiu prever uma situação sinótica *tipicamente favorável para a continuação da precipitação na área.*

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DO MODELO NUMÉRICO

I. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

1. Área limitada do equador a  $55^{\circ}\text{S}$  e  $20^{\circ}\text{W}$  a  $90^{\circ}\text{W}$  com fronteiras laterais selecionadas através de cartões de entrada.
2. Grade esférica, com pontos distanciados de  $2,5^{\circ}$  em latitude e longitude

II. CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

1. Condições de contorno cíclicas na direção leste-oeste e "condições de Shuman" (vento zonal em equilíbrio geostrofico) nas fronteiras norte e sul.
2. Diferenças finitas em espaço do tipo "Semimomentum" de 9 pontos.
3. Diferenças finitas em tempo, do tipo "Matsuno" ou "Euler atrassada", com  $\Delta t = 10$  minutos.

III. CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

1. O modelo inclui uma fase de inicialização (equação de balanço não-linear) que constrói a partir de um campo vento, a correspondente distribuição de altura geopotencial.
2. A equação do modelo propriamente dito são as equações primitivas para uma atmosfera barotrópica (equação do movimento e da continuidade de massa).
3. Topografia do continente Sul-americano incluída na equação de conservação de massas.
4. Dados de entrada: vento (horizontal) especificados nos pontos de grade.
5. Dados de saída: campos de vento, função de corrente, altura geopotencial, divergência e vorticidade, nos pontos de grade a intervalos de tempos estabelecidos nos cartões de entrada.
6. Formas de visualização dos produtos de modelo: impressões pela "printer" e "plotter".

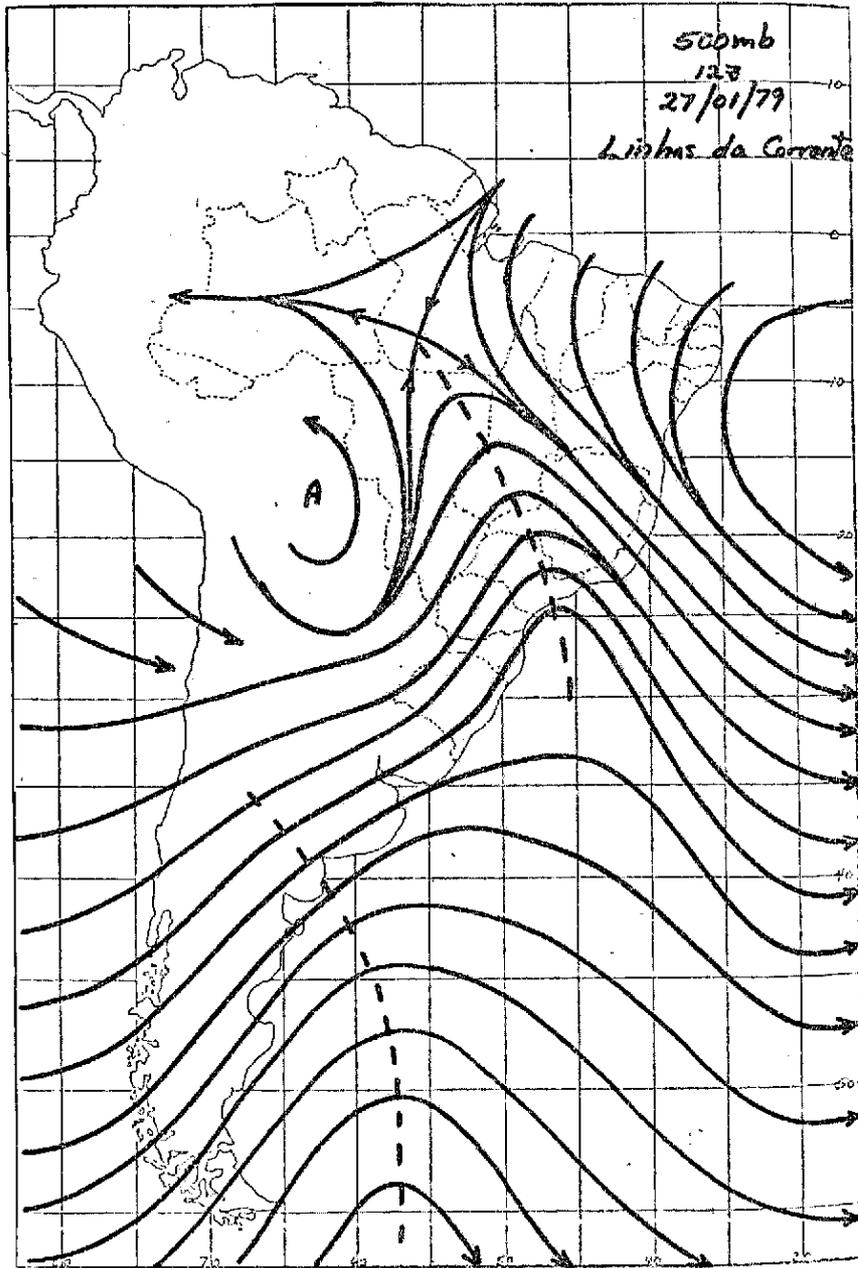


Fig. 6 - Linhas de corrente (observadas) em 500 mb para 27.01.79, 1200 TMG.



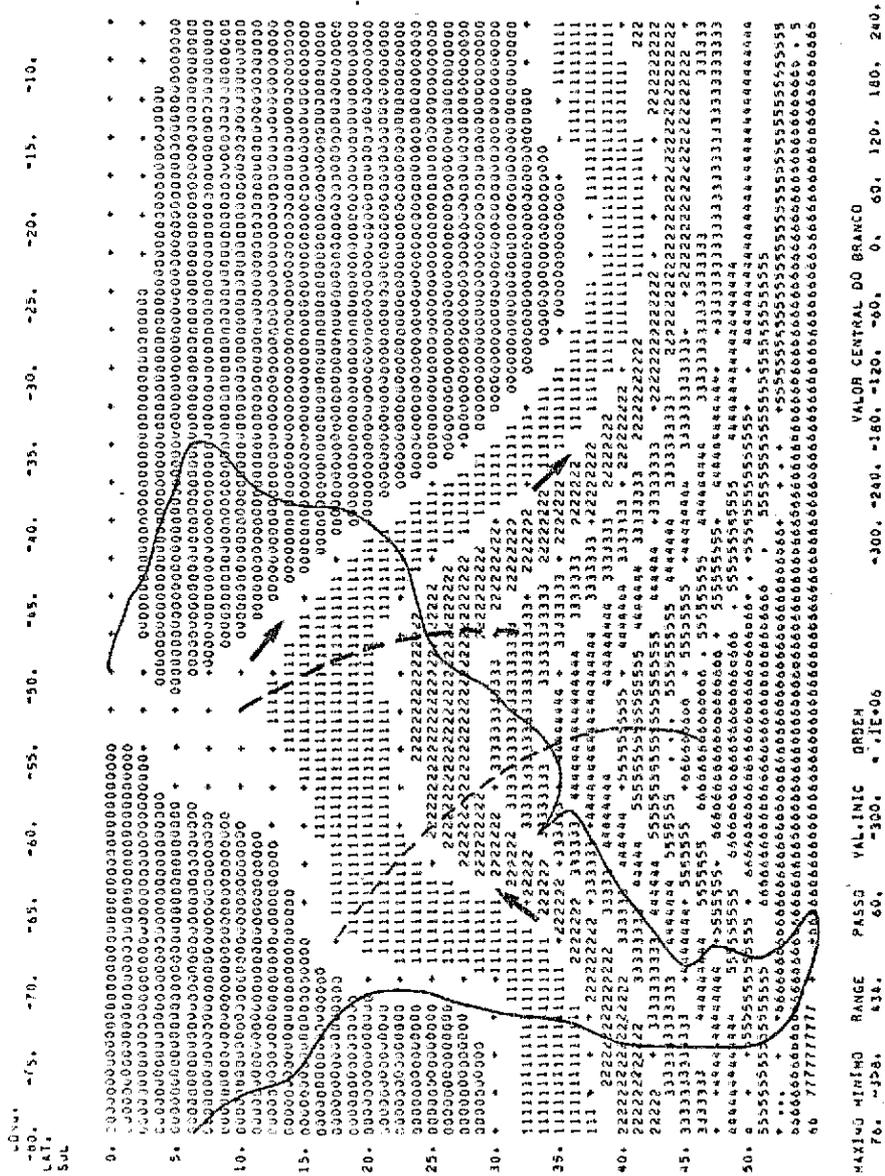


Fig. 8 - Campo da função de corrente após 24 horas. Previsto para 28 de janeiro 1979, 1200 TMG.

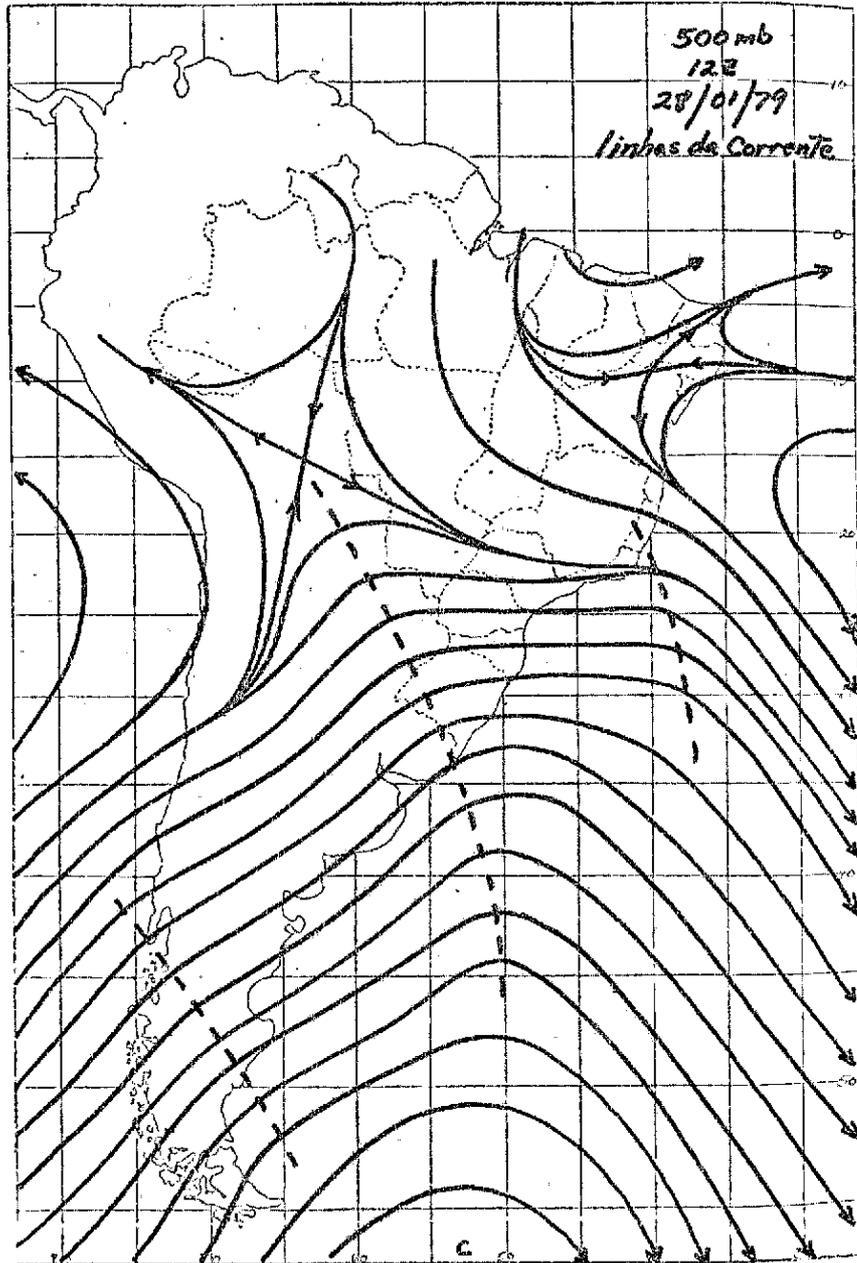


Fig. 9 - Linhas de corrente (observadas) em 500 mb para 28.01.79, 1200 TMG.

A Figura 10 apresenta a mesma previsão mostrada através do campo vetorial de ventos, nos pontos de grade desenhado pelo "plotter" periférico do B.6700.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho, a Previsão Numérica de Tempo foi apresentada não como uma área de aplicação de métodos numéricos, mas como uma modalidade de previsão que permite um uso mais sistemático do conjunto de equações termo-hidrodinâmicas que regem o comportamento da atmosfera.

A superioridade das técnicas numéricas de previsão de tempo sobre as convencionais já não é questionada, como demonstra a implantação operacional de PNT nos serviços meteorológicos dos Estados Unidos, Rússia, Japão, etc. No Hemisfério Sul, a Austrália e a Argentina também já aparecem no rol dos países que optaram por essa técnica de previsão.

Sobretudo para PNT, mas igualmente verdadeiro para qualquer método de previsão meteorológica, previsões de tempo rápidas e confiáveis só podem ser conseguidas se existir uma rede eficiente de observações e uma rede de comunicação para canalizar as informações ao centro previsor, em tempo útil. A inclusão de plataformas observacionais não convencionais (em especial, satélites geoestacionários), na rede mundial de observações, já é uma realidade e a América do Sul, devido à falta de continentalidade, pode grandemente se beneficiar dessas novas tecnologias.

Isso, por outro lado vem aumentar consideravelmente o fluxo, já enorme, de informações meteorológicas que chega a uma central previsor e aqui a única alternativa seria a automatização total nos estágios de recepção, pré-processamento (decodificação e plotagem) das mensagens e confecção de cartas analisadas.

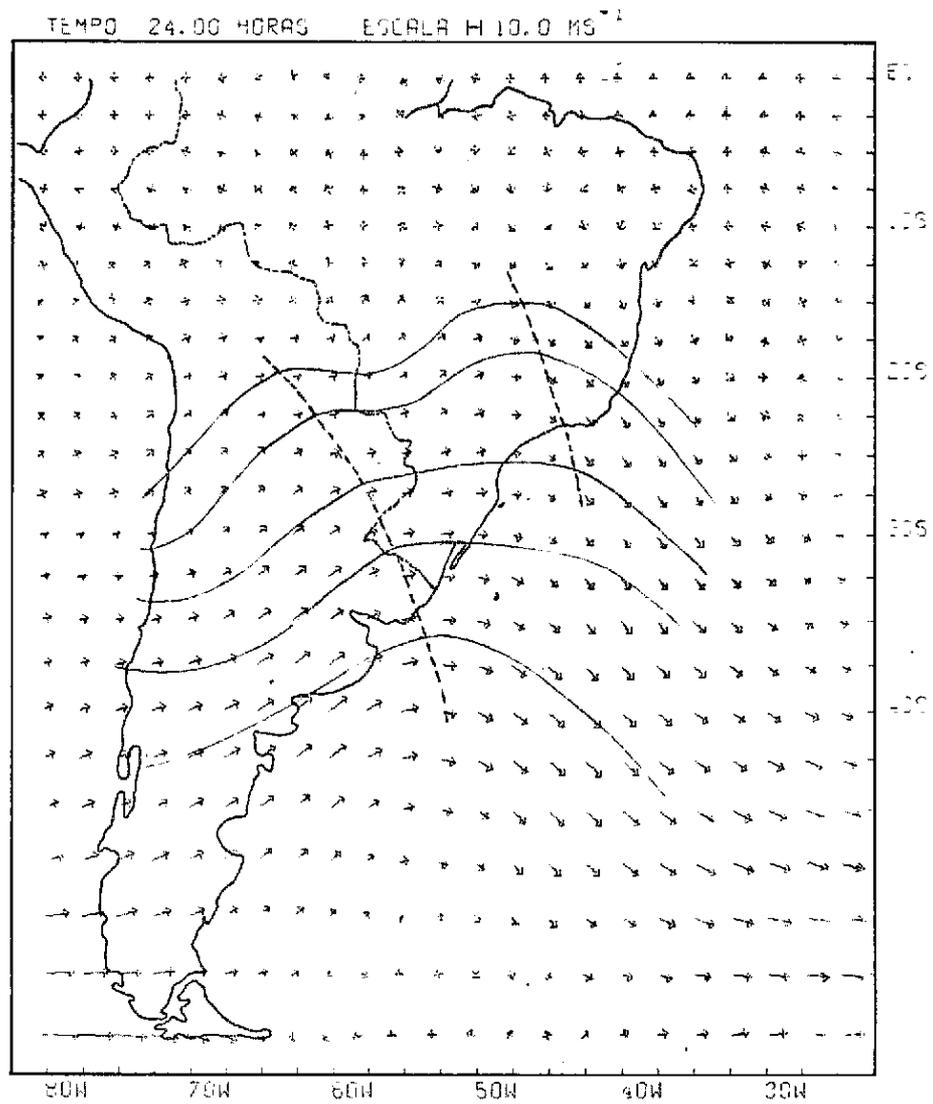


Fig. 10 - Campo de vento em 500 mb, previsto nos pontos de grade do modelo, para 28 de janeiro de 1979; 1200 TMG. Algumas linhas de escoamento foram desenhadas para melhor visualizar os dois cavados.

Enfim, a implantação de esquemas de PNT proporcionaria o aproveitamento máximo de todas as observações quantificáveis, reduzindo bastante o fator subjetivo tão desejável nas previsões de tempo.

A vulnerabilidade do planejamento sócio-econômico face aos fenômenos meteorológicos adversos, ressalta a importância e necesidade real em se contar com previsões de tempo confiáveis e rápidas. E assim, mesmo que venha se somar (e não substituir) aos métodos convencionais de previsão, PNT poderia acarretar um grande progresso na Meteorologia brasileira e, por essa simples razão, não deve ser relegada a uma posição secundária.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos a todos os participantes do Grupo de Dinâmica da Atmosfera do DME-INPE/CNPq que, de uma forma ou outra, tornaram possível a realização desse trabalho. Às Srtas. Fátima Ricco dos Santos e Sueli Aparecida Freire Valentim, o nosso obrigado por terem tão prontamente datilografado o texto.

## BIBLIOGRAFIA

- BJERKNES, V. Das problem von der wettervorhersage, betrachtet von standpunkt der mechanic und der physik. *Meteor.Z.* 54, 1-22. 1904.
- CHARNEY, J.G.; FJORTOF, R.; NEUMAN von J. Numerical integration of the vorticity equation. *Tellus* 2, 237-254, 1950.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. Ueber die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik. *Mathematischen Annalen* 100, 1928.
- CRESSMAN, G. Barotropic divergence and the very long atmospheric waves. *Monthly Weather Review*, 86 293-298, 1958.
- KIBEL, I.A. Application to Meteorology of the baroclinic mechanics equations. *Izvestia Akad Nauk SSSR. Ser. Geograp. Geofiz*, (5) 1940.
- LEMES, M.A.M.; SANTOS, R.P.; SATYAMURTY, P. *Experimentos de previsão numérica de tempo com um modelo barotrópico de equações primitivas usando dados teóricos*. São José dos Campos, INPE, agos., 1978 (INPE-1336-NTI/112).
- PLATZMAN, G.W. A retrospective view on Richardson's book on weather prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 48, 1967.
- RICHARDSON, F.F. *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, London 1922, 236 p.
- ROSSBY, C.G. Relations between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centres of action. *Journal of Marine Research* 2, Jun, 212-229, 1939.

SATYAMURTY, P.; SANTOS, R.P.; LEMES, M.A.M. *A note on the stationary trough generated by the Andes.* São José dos Campos, INPE, March 1979 (INPE-1429-RPE/008).

SHUMAN, F.G. Numerical Weather Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 59, pp 5-17, 1978.