

Meteorologia, as perspectivas de plena capacitação

A implantação do Centro Avançado de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos poderá oferecer resultados com até três meses de antecedência em relação ao tempo real

Por Antonio Divino Moura e Marlene Elias Ferreira



Imagem obtida pelo satélite meteorológico geostacionário Goes recebida no Inpe

O estágio atual da meteorologia reflete a acumulação de conhecimentos desde os tempos primitivos – quando o homem, ignorante e indefeso, buscava proteger-se em seu meio ambiente – até os dias de hoje, época em que se reconhece a influência dos fenômenos atmosféricos nas mais diversas atividades da sociedade e se utilizam metodologias científicas, supercomputadores e sofisticadas plataformas espaciais de observação para

a previsão do tempo e do clima.

Observações meteorológicas e previsão já eram realizadas na antiga Babilônia e datam de 4000 AC. No entanto, foram os filósofos naturalistas gregos os primeiros a desenvolver teorias sobre os fenômenos atmosféricos. Cabe a Aristóteles (350 AC) o mérito de ter escrito *Meteorologia* (daí o nome meteorologia – o estudo das coisas acima da superfície terrestre), o primeiro tratado meteorológico de que se tem notí-

cia, cuja influência perdurou por cerca de dois mil anos.

O período, que se iniciou na antiguidade e se estendeu até o século XVI, foi eminentemente especulativo, e os fenômenos atmosféricos eram, em última instância, atribuídos a causas sobrenaturais. Porém, com a invenção do termômetro e do anemômetro por Galileu, em 1607, e do barômetro por Torricelli, em 1643, as observações meteorológicas começaram a ter ca-

ráter mais quantitativo e regular. A partir daí, a explicação dos fenômenos passou a ter como base os trabalhos científicos de, por exemplo, Boyle (1659), sobre a relação entre volume e pressão do ar; Hadley (1735), sobre a influência da rotação da Terra nos ventos alísios; Franklin (1752), em eletricidade atmosférica; Lavoisier (1783), sobre a composição do ar.

Em 1860, começaram a ser estabelecidos os serviços de meteorologia em vários países europeus e depois nos EUA, com a observação sistemática de variáveis que caracterizam o tempo (temperatura, pressão, umidade, vento etc).

Nessa ocasião, teve início a divulgação da previsão de tempo, possibilitada pela invenção do telégrafo em 1845, que permitiu a rápida transmissão de informações meteorológicas necessárias para a preparação de cartas sinóticas, com caráter empírico.

A invenção do rádio em 1896 permitiu que os dados coletados a bordo de navios pudessem ser transmitidos para os serviços de meteorologia, enquanto a radiossonda e o radar, surgidos em 1927 e 1941, mostraram-se importantes para as observações regulares da estrutura vertical da atmosfera e tornaram possível o acompanhamento de fenômenos catastróficos, como os furacões.

As bases científicas para a previsão, entretanto, foram lançadas pela Escola Norueguesa de Meteorologia, liderada por Vilhelm Bjerknes, com o estabelecimento, em 1918-1921, da teoria das frentes frias e quentes e da teoria das ondas na atmosfera de latitudes temperadas e polares.

A previsão de tempo como um problema da física de fluidos foi discutida por Bjerknes, em 1905. No entanto, coube ao inglês Richardson, em 1922, a formulação de um método sistemático de previsão, a partir de leis básicas, baseado tão-somente em cálculos numéricos. Em virtude da inexistência, naquela época, de dados sobre as camadas de ar superiores e de computadores eletrônicos, esse método não se mostrou aplicável, e somente foi retomado mais tarde, em 1950.

Os trabalhos teóricos de Rossby (1937), Cherney e Eady (1947), sobre a estrutura e propagação de ondas na atmosfera, sedimentaram as bases da moderna técnica de previsão numérica de tempo, então utilizando o computador eletrônico Eniac-IV, desenvolvido por Von Neumann em Princeton, EUA, em 1947. O último grande evento da meteorologia moderna foi a colocação de satélites em órbita da Terra, plataformas essenciais do atual sistema de observações meteoroló-

gicas.

No Brasil, com o estabelecimento da Repartição Central de Meteorologia da Marinha, em 1888, iniciou-se a organização das atividades meteorológicas, a exemplo do que ocorreu na Europa e nos EUA. A implantação de uma rede de estações de superfície forneceu os elementos para os primeiros estudos sobre o tempo e o clima do País.

Até 1930, a meteorologia brasileira teve uma atuação marcante a nível internacional, graças aos trabalhos de Morize (1891) e de Sampaio Ferraz, à frente da Diretoria de Meteorologia (hoje Inmet). A partir dessa época, verifica-se um declínio acentuado. Contribuíram para isso a falta de uma escola, no País, que desenvolvesse conhecimentos fundamentais sobre a meteorologia tropical e se preocupasse com a formação de pessoal. Além disso, a rede de sondagem das camadas superiores da atmosfera, implantada após a Segunda Guerra Mundial, nunca atendeu plenamente às necessidades da previsão de tempo, por não funcionar com regularidade e apresentar deficiências.

Um novo impulso foi dado à meteorologia brasileira na década de 60, com a criação do primeiro curso de graduação em Meteorologia na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e com o início da atuação decisiva do Inpe na área de satélites meteorológicos e na formação de pesquisadores em nível de pós-graduação.

Linhas de pesquisa

Reconhecendo a grande potencialidade dos satélites para o Brasil – país de dimensões continentais situado num hemisfério constituído em 80% por oceanos –, o Inpe iniciou suas atividades na área de meteorologia na década de 60, quando foi desenvolvida uma Estação APT para a recepção de imagens de cobertura de nuvens, sobre a América do Sul e adja-



Imagem obtida pelo satélite Meteosat

cências, transmitidas, em tempo real, pelos satélites da série Essa.

O desenvolvimento da Estação APT desencadeou uma série de atividades nos últimos 20 anos, que abrangem a capacitação de pessoal a nível de pós-graduação, o desenvolvimento tecnológico no setor de instrumentação moderna, a cooperação com instituições nacionais e internacionais e, mais importante, o início de pesquisas fundamentais a respeito das causas das secas nordestinas, do papel da Floresta Amazônica no clima, além das variações do tempo e do clima nos cerrados e no sul do País. O trabalho foi então organizado em termos de programas e linhas de pesquisa e desenvolvimento, a saber:

- Meteorologia por Satélites: iniciada no Inpe em 1966, tem por objetivo a extração de informações a partir de dados transmitidos por satélites, tais como a identificação e localização do fenômeno, via nefanálise e, na fase digital, campos de temperatura das superfícies oceânicas e das massas de ar frio, precipitação pluviométrica, perfis verticais de temperatura e de umidade de vento. Atualmente, as estações de trabalho, que utilizam computadores de pequeno porte e técnicas iterativas de tratamento digital de imagens, propiciam o monitoramento contínuo de fenômenos, como a geada e as tempestades severas;

- Previsão Numérica de Tempo: desde 1972, o Inpe desenvolve modelos visando a futuras aplicações operacionais. Essa linha de pesquisa estimulou significativamente a formação de pesquisadores;

- Climatologia Dinâmica e Meteorologia Tropical: como decorrência do volume e da qualidade das pesquisas realizadas pelo Inpe sobre os climas do Nordeste e da Amazônia, o Brasil talvez seja hoje um dos países que mais detêm conhecimentos meteorológicos sobre regiões tropicais úmidas e semi-áridas. Os estudos do clima, da micrometeorologia e do ciclo hidrológico no trópico úmido muito têm se beneficiado de campanhas convencionais de caráter internacional. Destacam-se: a cooperação com o Instituto de Hidrologia da Inglaterra e com o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa/MCT) sobre micrometeorologia da Floresta Amazônica; a cooperação com a Nasa e instituições nacionais na condução do experimento GTE/Able, propiciando a coleta de dados para importantes estudos físicos, químicos e dinâmicos de atmosfera sobre a Amazônia;

- Meteorologia Sinótica: os estudos realizados conduziram a gradual e sedi-

mentado acervo de conhecimentos, trazendo uma nova percepção da dinâmica dos sistemas de tempo atuantes sobre a América do Sul, graças à capacitação do pessoal existente e à observação sistemática dos fenômenos, propiciada pela disponibilidade de imagens de satélites no Inpe. Destacam-se as pesquisas sobre fenômenos atmosféricos, vórtices tropicais na alta troposfera e interações de fenômenos tropicais e extratropicais;

- **Oceanografia Física:** estabelecida em 1982, essa linha de pesquisa visa ao estudo da interação entre os fenômenos atmosféricos e oceânicos, de particular importância para o desenvolvimento de modelos climáticos que acoplam a atmosfera e o oceano. O engajamento desse grupo nas atividades do projeto de cooperação internacional denominado Toga (Estudo da Variabilidade dos Oceanos Tropicais e seu Impacto na Atmosfera Global) deverá contribuir para as pesquisas sobre a influência dos oceanos Atlântico e Pacífico (El Niño, por exemplo) no clima da América do Sul;

- **Micrometeorologia e outros estudos:** diversas pesquisas têm sido realizadas no Inpe sobre fenômeno de transporte de massa e energia na camada-limite atmosférica, bem como sobre dispersão de poluentes. Em adição a isso, o interesse em estudos de aplicação resultou em importantes trabalhos de pesquisa em agrometeorologia e hidrometeorologia, e contribui para a formação de pesquisadores nessas áreas.

Instrumentação meteorológica e PCDs

Na década de 60, o Inpe estabeleceu a política de criar tecnologia no setor de instrumentação e satélites meteorológicos, com o objetivo de dotar o País de técnicas modernas de observação, processamento e disseminação de dados meteorológicos.

Em decorrência, acompanhou-se a evolução dos satélites meteorológicos através dos tempos por meio do desenvolvimento de estações receptoras no Instituto, que atualmente operam com os satélites Goes (em 75° W), Tiros-N e Meteosat, integrantes do sistema mundial de observações. Especificamente, dispõe-se no Inpe das seguintes facilidades:

- **Estação Tiros-N/Noaa:** concluída em 1980, está apta a receber e processar imagens de alta resolução obtidas nos cinco canais do AVHRR, dados de sondagem remota do TDVS (ainda em caráter experimental) e dados de PCD retransmitidos

pelo sistema Argos;

- **Estação Goes:** inaugurada em 1978, no momento está sendo preparada para operar com o novo satélite Goes, lançado em 26 de fevereiro de 1987. Tem capacidade de receber e processar imagens multiespectrais de alta resolução obtidas pelo VAS e dados de PCDs retransmitidos pelo Serviço de Coleta de Dados Goes. É comercializada pela Engespaco Comércio e Indústria Ltda.

- **Estação Meteosat:** começou a operar em 1986, recebendo e processando imagens de alta resolução em caráter experimental.

- **Estação Wefax/Goes:** esta estação, de baixo custo, cujo desenvolvimento foi concluído em 1978, é hoje comercializada pela indústria Amplimatic.

Uma vez dominada a tecnologia relativa a estações receptoras de satélites meteorológicos, a ênfase tem sido no desenvolvimento de sistemas para a transmissão e processamento automático de imagens com o objetivo de extrair informações nelas contidas. Um dos principais frutos desse esforço é o Sistema de Tratamento de Imagens (Sitim).

O Sitim começou a ser projetado em 1979 para atender a área de meteorologia, tendo por base a Unidade de Análise de Imagens (UAI), e hoje encontra aplicações em outras áreas, como, por exemplo, no campo de recursos naturais, utilizando imagens de sensoriamento remoto (Landsat e outras). Sua configuração conta com monitores de vídeo em cores, UAI, microprocessadores e periféricos, entre outros dispositivos, que permitem receber, armazenar, exibir e processar (realçar, animar etc.) imagens de satélites.

A versão remota do Sitim meteorológico capacita usuários em qualquer ponto do Brasil a receber imagens captadas pela Estação Goes do Inpe. Cerca de dez dessas unidades, fabricadas pela Engespaco, encontram-se, hoje, instaladas em diversas instituições do País, além de outras quatro estações Goes e UAIs, em operação no Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e na Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Os serviços de retransmissão de informações disponíveis nos satélites meteorológicos estimularam outra linha de desenvolvimento tecnológico, de importância para as atividades ambientais, conduzindo à capacitação do Inpe na área de transmissão, recepção e processamento de observações feitas por Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) dos tipos Argos e Goes.

Foram desenvolvidos os seguintes protótipos:

- **PCD/Argos:** homologada pelo sistema Argos em 1983, essa plataforma é hoje industrializada pela Engespaco. A PCD/Argos do tipo móvel (bóia oceano-gráfica) foi testada com sucesso no âmbito do Programa Antártico Brasileiro (Proantar). Uma rede piloto com 20 PCDs fixas está sendo implantada, mediante convênio entre o Inpe e instituições interessadas, como, por exemplo, a Fundação Cearense de Meteorologia (Funceme), que já opera cinco unidades. As PCDs Argos são compatíveis com o sistema de coleta de dados programado para o primeiro satélite da Missão Espacial Completa Brasileira, ora sendo desenvolvido pelo Inpe, com lançamento previsto para 1989;



Plataforma de Coleta de Dados (PCD)

- **PCD/Goes:** o protótipo desse tipo de PCD encontra-se em fase de homologação. Além disso, o Inpe recebe, processa e transmite aos usuários, os dados coletados por uma rede hidrológica constituída por dez PCDs/Goes de origem norte-americana, implantada na Bacia Tocantins - Araguaia, cujo objetivo é monitorar a Barragem de Tucuruí. Essa rede foi instalada e é operada mediante convênio celebrado entre a Eletronorte, a Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (Sudam), o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e o Inpe;

- **Estação de Recepção PCD/Argos:** esta estação de baixo custo, concebida para receber e processar dados coletados pelas PCDs/Argos, encontra-se em fase de testes.

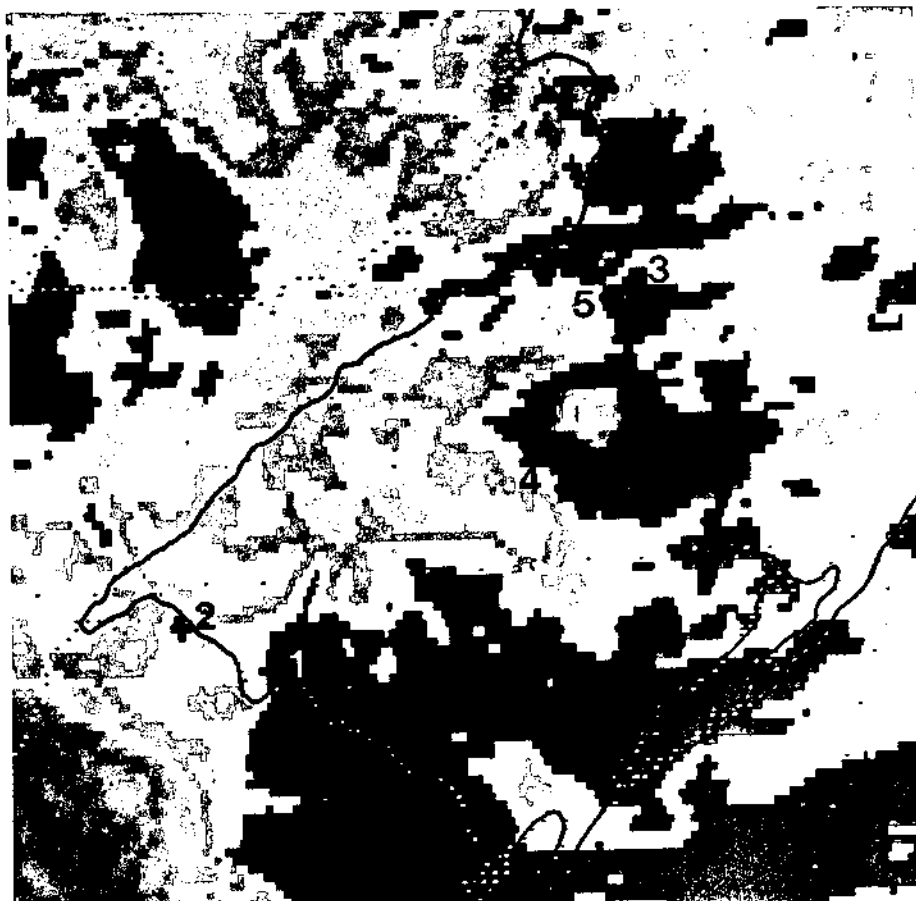
Meteorologia por satélites

O caráter contínuo e progressivo do Programa de Instrumentação Meteorológica e PCDs do Inpe possibilitou o estabelecimento de várias linhas de pesquisa aplicada no campo da meteorologia por satélites, cujos resultados, apesar de ex-



Estimativas de precipitação pluviométrica por satélites para o Rio Grande do Sul

Cidades	Calculado (mm)	Observado (mm)
Livramento	93,5	88,9
Quaraí	50,0	56,3
C. Alto	32,9	37,0
J. Castellois	36,5	59,2
S. Augusto	44,0	51,7



Estimativas de precipitação para cinco localidades do RS, utilizando imagens do satélite Goes de meia em meia hora, entre 11:00 TMG e 19:30 TMG do dia 22/11/80. A imagem Goes correspondente ao horário das 18:30 (A) foi setORIZADA e REALÇADA (B) para destacar as informações essenciais para a estimativa na região de interesse (RS). Os dados pluviométricos observados (C) foram fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Agropecuárias do RS

pressivos, ainda são limitados, em virtude do reduzido quadro de pessoal especializado e da disponibilidade de equipamentos computacionais de porte adequado para gerenciar com eficiência as grandes massas de dados fornecidos pelos satélites.

É nesse contexto que o advento do Centro de Aplicações de Satélites Ambientais reveste-se de importância, por trazer perspectivas concretas para o avanço da meteorologia por satélites em seus aspectos operacionais e de pesquisa.

São inúmeras as aplicações que podem ser concebidas utilizando-se satélites meteorológicos. A interpretação de imagens para fins sinóticos é a mais tradicional, tendo muito contribuído para aumentar a compreensão dos fenômenos responsáveis pelo tempo na América do Sul e adjacências. Outras, tais como a estimativa de precipitação pluviométrica, a recuperação de perfis verticais de temperatura e de umidade a partir de dados de sondagem remota da atmosfera, o acompanhamento de geadas, o mapeamento térmico das su-

perfícies oceânicas, a extração de ventos troposféricos a partir de imagens sequenciais e a estimativa de radiação, de caráter mais quantitativo, são embasadas no tratamento digital dos dados do satélite e descritas a seguir.

1. Estimativa de precipitação

A estimativa de precipitação a partir de informações obtidas por satélites é importante numa variedade de aplicações que incluem sua utilização na agricultura, previsão de enchentes e operação de barragens.

As técnicas mais tradicionais para se estimar precipitação empregam, unicamente, imagens de cobertura de nuvens. Nesse caso, vários fatores associados às características das nuvens são utilizados no esquema de estimativa, tais como:

- nuvens brilhantes na imagem do canal visível, em geral, produzem mais precipitação do que as nuvens opacas;
- nuvens com topos frios na imagem do canal infravermelho produzem mais

precipitação do que aquelas cujos topos são mais quentes;

- a fusão de nuvens do tipo cumulonimbos contribui para o aumento da precipitação etc.

Pesquisas recentes nessa área demonstram a vantagem de também serem empregados os dados de água precipitável obtidos por meio de radiossondagens com balões ou sondagens por satélites.

Os algoritmos de estimativa de precipitação, atualmente desenvolvidos no Inpe, encontram-se em fase de aperfeiçoamento e calibração.

Resultados de estimativa de precipitação para cinco localidades do Rio Grande do Sul, fornecidos pela técnica de Scofield/Oliver, a qual utiliza imagens Goes, são mostrados na figura acima.

2. Perfis verticais de temperatura e umidade

A sondagem remota da atmosfera provê dados radiométricos, que refletem as condições termodinâmicas de camadas

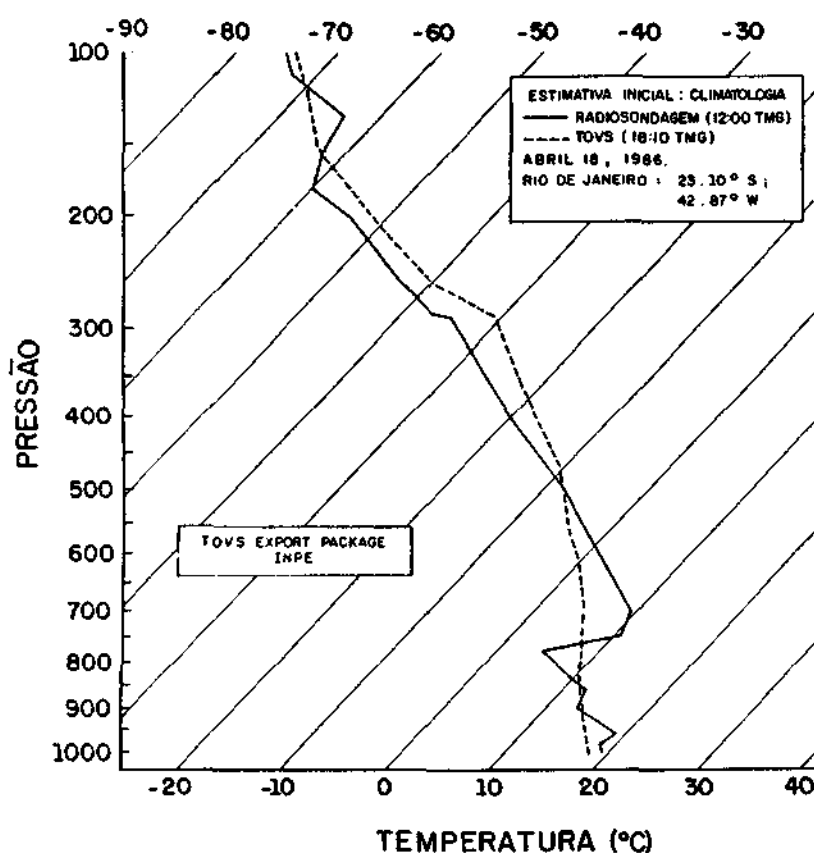


Gráfico 1
Perfis verticais de temperatura inferido no Inpe, a partir dos dados fornecidos pelo sondador TOVS

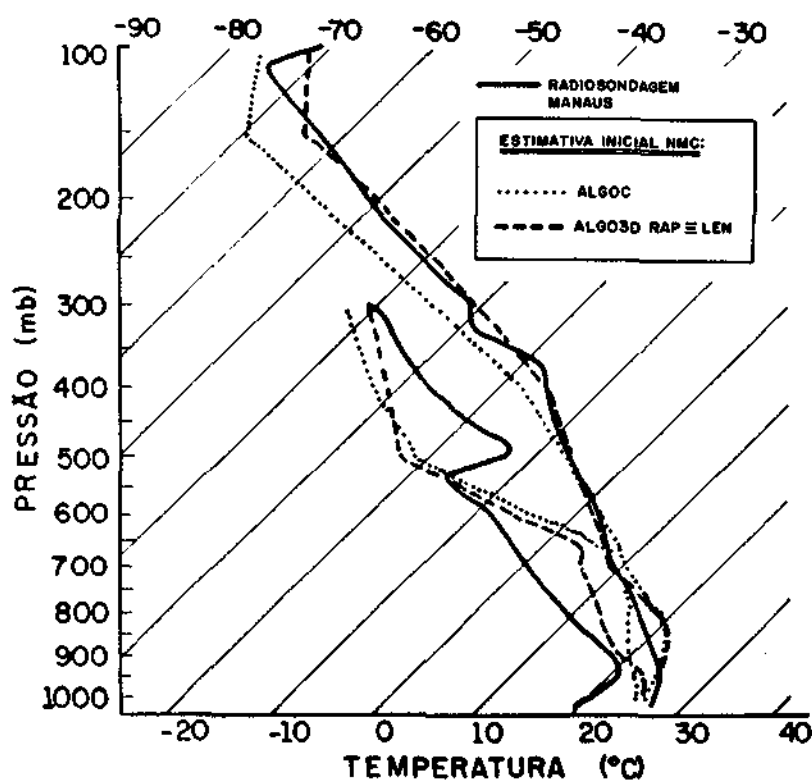


Gráfico 2
Perfis verticais de temperatura e de umidade inferidos a partir de dados do VAS (sondador vertical que opera a bordo dos satélites geoestacionários Goes)

atmosféricas sucessivas entre a superfície da Terra e o satélite. A partir desses dados é então possível inferir perfis verticais de temperatura e de umidade, além de uma série de subprodutos de importância meteorológica, tais como, a altura geopotencial, os índices de estabilidade atmosférica e a água precipitável. Portanto, essa técnica de medição indireta e à distância é particularmente útil sobre regiões desprovidas de dados superiores convencionalmente obtidos por meio de radiossondagem com balões.

Nos satélites Tiros-N/Noaa, a sondagem remota é realizada rotineiramente pelo sistema TDVS. Os dados do TDVS são processados pela NOAA por meio de algoritmos estatísticos, e os perfis de temperatura e de umidade recuperados são colocados à disposição da comunidade meteorológica pelo Sistema Global de Telecomunicações.

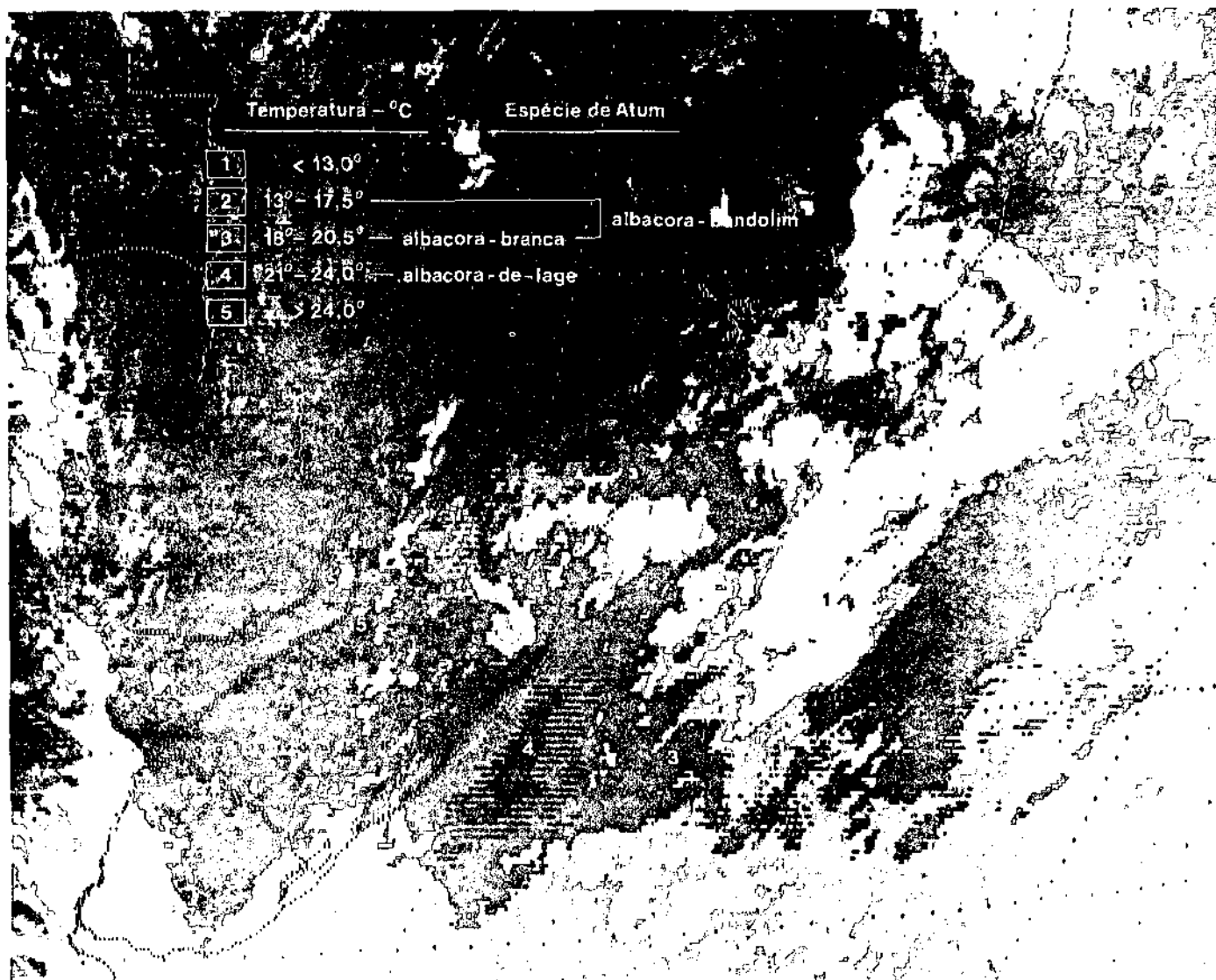
No Inpe, os dados do TDVS para a América do Sul e adjacências são recebidos e processados em caráter experimental, empregando-se algoritmos do TDVS Export Package, desenvolvido na Universidade de Wisconsin, EUA (gráfico 1).

Por sua vez, o satélite Goes realiza serviços de sondagem remota em caráter experimental por meio do sondador atmosférico VAS. Dados de sondagem do VAS foram obtidos pela primeira vez sobre a Amazônia em julho de 1985, por ocasião do experimento GTE/Able. Esses dados foram recebidos e processados na Universidade de Wisconsin, utilizando-se algoritmos que recuperam, simultaneamente, perfis de temperatura e de umidade

3. Acompanhamento de geadas

O Inpe desenvolve, em colaboração com o Instituto de Pesquisas Agrônomicas do Rio Grande do Sul (Ipagro), um projeto cuja finalidade é o estudo de sistemas meteorológicos, que provocam geadas no sul do País, e o estabelecimento de esquemas de alerta em caso de ocorrência desse fenômeno (gráfico 2).

Para isso são utilizadas as imagens do satélite Goes no infravermelho, recebidas de três em três horas, que permitem realizar o mapeamento térmico do setor em observação e, assim, acompanhar a incursão do ar frio. Os dados de temperatura coletados pela rede de estações agrometeorológicas do Ipagro são empregados na calibração desse mapeamento térmico.



Áreas favoráveis à pesca de atuns baseada em intervalos ideais de temperatura da superfície do mar

4. Temperatura da superfície do mar

O mapeamento térmico das superfícies oceânicas é importante para a oceanografia e para a meteorologia. Anomalias de temperatura verificadas nos oceanos Atlântico e Pacífico podem estar de alguma forma ligadas à ocorrência de fenômenos meteorológicos de importância para o País, como as enchentes do Nordeste.

As imagens fornecidas pelos satélites meteorológicos constituem hoje a principal fonte de informações sobre os oceanos. Em razão disso, o Inpe vem desenvolvendo algoritmos para a temperatura da superfície do mar, com dados radiométricos de alta resolução espacial obtidos pelo AVHRR/Tiros-N, radiômetro concebido para fornecer precisão de $\pm 1^\circ \text{C}$.

O mapeamento térmico da superfície dos oceanos pode também ser utilizado com o intuito de aumentar a captura de peixes. Nesse sentido, o Inpe vem elabo-

rando, em caráter experimental, cartas de pesca com imagens AVHRR e Goes. Esse projeto, denominado Satpes, é financiado pela Comissão Interministerial de Recursos do Mar (CIRM) e dela também participam a DHN e a Sudepe.

5. Extração de ventos

A extração de ventos pelas imagens de satélites sobre os oceanos e regiões tropicais é particularmente útil. No primeiro caso, dada a quase inexistência de observações convencionais, e, no segundo, pelas particularidades da dinâmica atmosférica.

Numa sequência de imagens obtidas por um satélite geoestacionário, as nuvens deslocam-se em virtude dos ventos predominantes num determinado nível. Os deslocamentos vetoriais dessas nuvens fornecem, então, uma descrição dos movimentos atmosféricos para uma vasta região do globo. Para suprir as deficiências

decorrentes da inexistência de nuvens, encontram-se em desenvolvimento certas técnicas experimentais, que fazem uso das imagens obtidas pelo Goes no canal do vapor d'água.

Os métodos atualmente utilizados para a extração de ventos são de diversos tipos, desde os manuais, que empregam filmes de seqüências de imagens, até os automatizados, que se baseiam na análise de correlação entre segmentos de imagens em computadores. Seja qual for o caso, a maior dificuldade é determinar a altura das nuvens com precisão adequada.

No momento, a extração de ventos para todo o globo, a partir de imagens transmitidas pelos cinco satélites geoestacionários do sistema mundial de observações, é realizada pelo menos duas vezes por dia, e os dados, em geral divulgados pelo Sistema Global de Telecomunicações, são

objetivo para melhorar os modelos de previsão numérica de tempo.

Recentemente, foi desenvolvido e implantado no sistema Sisco/Sitim do Inpe um algoritmo automatizado para a extração de ventos em baixos níveis sobre os oceanos, o qual está sendo objeto de aperfeiçoamento, visando a melhorias na qualidade dos resultados e diminuição do esforço computacional.

6. Balanço radiativo

Além da rotação da Terra, a radiação solar é a principal causadora dos movimentos atmosféricos. Estudos de balanço da radiação solar com satélites meteorológicos empregam imagens do canal no visível na determinação da radiação em ondas curtas – radiação que chega ao planeta oriunda do Sol e é refletida de volta para o espaço – e imagens do canal no infra-vermelho em 10,5 microns para estimar a radiação em ondas largas – radiação que deixa o planeta.

Estudos dessa natureza vêm sendo conduzidos no Inpe com o objetivo de se levantar informações que são úteis para diversas áreas da meteorologia, entre elas a modelagem climática.

7. Outras aplicações

Os satélites meteorológicos podem também complementar estudos ambientais, fornecendo dados para modelos de previsão de safra, acompanhamento do stress vegetativo para indicar a deficiência de recursos hídricos, estudos de desertificação, detecção de queimadas, monitoramento da qualidade da água dos oceanos e do ozônio atmosférico, determinação do albedo planetário e para diversas outras aplicações.

Previsão numérica de tempo

Desde 1972, o Inpe desenvolve modelos de previsão numérica de tempo (PNT), com vistas à sua implantação em órgãos operacionais, como o Inmet, a Diretoria de Eletrônica e Orientação ao Voo (DEPV/M. Aero.) e a DHN. Essa atividade, a nível acadêmico, tem contribuído para a formação de pessoal e a aplicação de modelos simples, físico-conceituais, para estudos climáticos do Nordeste e da Amazônia. Em 1980, foi realizado no Inpe um Workshop internacional sobre previsão de secas, cujas conclusões ressaltam a importância de tais aplicações. O Inpe e a USP mantêm hoje um grupo de alto nível em PNT, que servirá de núcleos para a

implantação de um centro avançado de previsão, a serviço de toda a meteorologia nacional.

1. O problema físico da previsão

A atmosfera é basicamente uma mistura de gases, constantemente em movimento, devido ao aquecimento solar e à rotação da Terra.

Esses movimentos cobrem uma enorme faixa do espectro, desde os movimentos turbulentos de escala milimétrica até aqueles de escalas comparáveis às dimensões do Planeta. Em adição à complexidade resultante da interação de movimentos de escalas diferentes, deve-se mencionar a presença da substância água, cujas mudanças de fase são responsáveis pela liberação ou absorção de grandes quantidades de calor, processo esse intimamente relacionado ao que se denomina "tempo". A distribuição de continentes e oceanos bem como os processos de fricção, radiação e evaporação nessas superfícies fazem com que o estudo dos movimentos atmosféricos e de seus efeitos sobre as atividades humanas seja uma tarefa formidável e estimulante, porém difícil e altamente complexa.

As equações governantes dos movimentos atmosféricos são representações

matemáticas de princípios físicos fundamentais, que exigem a conservação de massa, energia e quantidade de movimento. Essas equações, associadas com as relações constitutivas e com a lei do gás ideal, formam um sistema fechado, que, em princípio, pode ser resolvido para as derivadas temporais de cada variável, como função das variáveis dependentes e de suas derivadas espaciais.

O conhecimento da derivada temporal de uma variável e de seu valor inicial permite a determinação de seu valor futuro, mediante a integração das equações, com passos de tempo da ordem de cinco minutos. Essa é a essência de qualquer técnica de PNT, que pode ser definida como a área da meteorologia que se ocupa da obtenção de soluções numéricas das equações que governam o comportamento da atmosfera.

A solução dessas equações, para uma previsão de tempo com alguns dias de antecedência, requer a execução de um elevadíssimo número de cálculos complexos. É por esse motivo que o problema da previsão do tempo é exigente em termos computacionais. Nesse aspecto, a meteorologia é uma das ciências que mais se beneficiaram com o advento dessa tecnologia, desde o aparecimento do Eniac-IV, na Universidade de Princeton (figura 1).

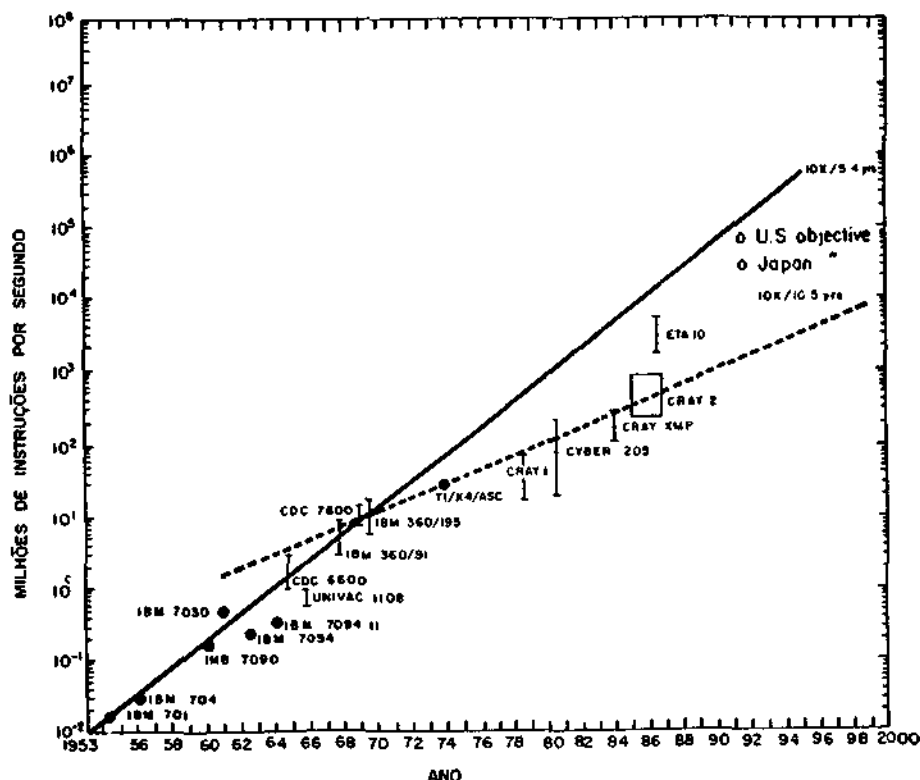


Gráfico 3
Comparação de performance de computadores avançados, utilizados em aplicações da meteorologia

As previsões assim feitas são denominadas objetivas, por se basearem em princípios físicos bem-definidos e isentos da subjetividade do previsor, característica dos métodos até hoje empregados no Brasil. A propósito, é importante ressaltar que a máquina não substitui o meteorologista. Ele passa a ter funções mais nobres, como detalhar as previsões por regiões, preparar a sua divulgação, acompanhar o desempenho do modelo previsor, assim como subsidiar os pesquisadores para o desenvolvimento de melhores modelos.

2. Necessidade computacional

Satélites meteorológicos

Após o sucesso do Sputnik I, lançado pela União Soviética, em 1957, os EUA aceleraram seu programa espacial e, em 1 de abril de 1960, colocaram em órbita heliossíncrona o Tiros I – primeiro satélite meteorológico destinado a obter imagens de cobertura de nuvens. A partir daí, verificou-se uma notável evolução no programa de satélites meteorológicos, caracterizada pela mudança de ênfase, no sentido de se obter informações de caráter quantitativo, cada vez mais sofisticadas, e pela diversificação dos serviços e dos tipos de órbita.

Além da órbita circular polar heliossíncrona, cuja característica é a obtenção de imagens sempre no mesmo horário local e, portanto, com a mesma iluminação solar, tem sido utilizada a órbita geoestacionária, para a qual a velocidade angular do satélite coincide com a rotação da Terra, possibilitando vigilância permanente de cerca de um terço do globo terrestre. Tipicamente, a altitude dos satélites heliossíncronos varia entre 600 a 1.600km, enquanto os geoestacionários encontram-se a cerca de 36.000km de altura.

De grande importância para a meteorologia moderna é o sistema mundial de observação, efetuado por satélites meteorológicos. Dela fazem parte dois satélites heliossíncronos da série Tiros-N/Noaa, norte-americanos, e cinco satélites geoestacionários convenientemente espaçados, de modo a garantir cobertura global, quais sejam: dois da série Goes, norte-americanos; o Meteosat, da comunidade européia; o Insat, indiano; e o GMS, japonês (ver figura).

Os primeiros modelos numéricos, empregados com alto grau de simplificação física e matemática, eram aplicáveis tão-somente à atmosfera de latitudes temperadas e apresentavam elevado índice de erro quando estendidos à região tropical.

Atualmente, porém, vários modelos de previsão, para todo o globo, com resolução espacial de até 150km na horizontal e quinze níveis na vertical, estão em uso rotineiro em alguns centros mundiais. A característica principal desses modelos, aplicáveis a todas as regiões da Terra e para todas as estações do ano, é a utilização das chamadas equações primitivas e a formulação adequada das parametriza-

ções dos processos físicos. O grande sucesso das previsões realizadas a partir desses modelos aumenta ainda mais a confiança na adoção da formulação da dinâmica básica para a solução do problema da previsão de tempo a curto (até 72 horas), médio (três a dez dias) e longo prazo (superior a dez dias) por métodos determinísticos (gráfico 3).

A resolução espacial de um modelo é altamente dependente da capacidade computacional instalada. Assim, para dobrar a resolução horizontal e vertical, para melhor detalhamento das informações, é necessário aumentar 16 vezes mais a velocidade de processamento. O dimensio-

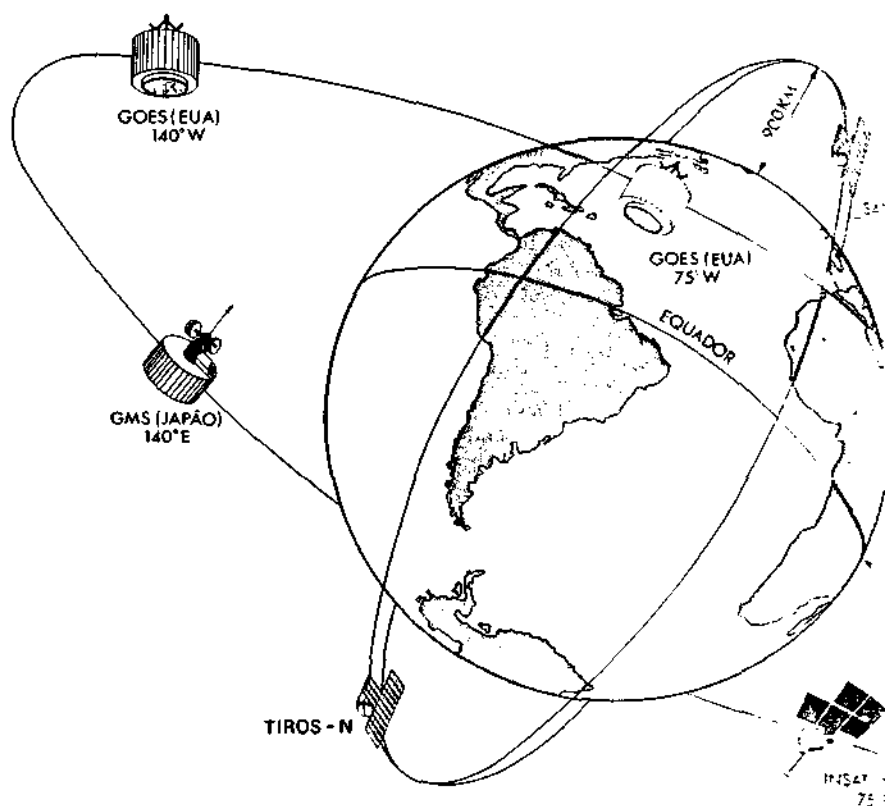
Além desses, existem os satélites heliossíncronos da série Meteor, da União Soviética, e satélites norte-americanos destinados à pesquisa (série Nimbus) e a programas de defesa (DMSP).

Os satélites da atual série Tiros-N/Noaa, que operam em pares com órbitas em quadratura para garantir cobertura de uma mesma região geográfica a cada seis horas, levam a bordo os seguintes sistemas de aplicação meteorológica:

- Radiômetro Avançado de Muito Alta Resolução (AVHRR), que obtém imagens

no canal no visível e em quatro canais no infravermelho, com 1km de resolução espacial, cuja finalidade é observar nuvens, limites continente-oceano, gelo e neve, vapor d'água e temperatura, tanto do topo das nuvens como das superfícies oceânicas e continentais;

- Sondador Operacional Vertical Tiros-N (TDVS), que fornece dados de sondagem atmosférica em 27 canais espectrais (visível, infravermelho e microondas), com resolução espacial que varia entre 30 e 110km, cujo objetivo é inferir o conteúdo total de ozônio e perfis verticais de tempe-



Órbitas dos satélites meteorológicos geoestacionários e dos satélites de órbita polar

namento do sistema computacional adequado para a previsão numérica depende diretamente da resolução horizontal e vertical adotadas e do modelo físico-matemático empregado. Por exemplo, um modelo com resolução de 80km (mesoescala) na horizontal, dezesseis níveis na vertical, para efetuar uma previsão de 48 horas para uma área que encerre a América do Sul, em uma hora de processamento, necessita de computador capaz de realizar cálculos à velocidade superior a 100mips (milhões de instruções por segundo), além de memória central adequada. Atualmente, computadores desse porte fabricados são o CDC Cyber 205, o ETA

10, o CRAY-1 e o CRAY-XMP, por exemplo.

3. Dados e telecomunicações

A previsão do tempo demanda a coleta de dados numa área normalmente superior àquela para a qual a previsão é válida, desde a superfície até cerca de 30km de altitude em certos horários (ditos sinóticos) e a sua transmissão imediata ao centro previsor. A qualidade da previsão depende fundamentalmente da qualidade das informações coletadas, bem como da sua densidade espacial e frequência de coleta. Em áreas continentais de fácil acesso não há

desafio na instalação e manutenção de estações, ao contrário das áreas de difícil acesso e das regiões oceânicas, onde é necessário recorrer ao uso de navios, aeronaves e levantamento efetuados por satélites.

As condições iniciais, necessárias para alimentar um modelo de previsão numérica, principalmente num país como o Brasil, com baixa densidade de estações de sondagem de ar superior e com enormes áreas oceânicas adjacentes, que têm uma influência direta no tempo, não podem prescindir da complementaridade de informações que somente os satélites são

capazes de fornecer, como temperatura e de umidade, mesmo em presença de nuvens;

- Sistema de Coleta de Dados e de Localização de Plataformas (Sistema Argos), com capacidade para operar com cerca de quatro mil Plataformas de Coleta de Dados (PCDs), móveis ou fixas, tais como bóias, balões e estações remotas, e determinar sua posição com precisão aproximada de 5km.

Os satélites Tiros-N/Noaa também fornecem imagens APT (Automatic Picture Transmission) nos canais no visível e no infravermelho, com resolução espacial de

4km, obtidas por meio da degradação das imagens AVHRR correspondentes.

Satélites geoestacionários

Em virtude de seu potencial de vigilância permanente de vastas extensões da Terra, a principal missão dos satélites geossíncronos é monitorar a rápida evolução de fenômenos meteorológicos intensos, como, por exemplo, furacões, registrar os deslocamentos das nuvens, visando estimar campos de ventos para a iniciação de modelos numéricos de escala global e estimar a precipitação pluviométrica.

De particular relevância para o Brasil são os satélites da série Goes (Satélite Geossíncrono Operacional do Meio Ambiente), mantida pelos EUA desde 1974, e da série Meteosat, da Agência Espacial Européia (ESA), iniciada em 1977.

Por sua vez, o Serviço de Coleta de Dados Goes foi concebido para receber informações ambientais transmitidas por uma rede com até cerca de dez mil PCDs, incluindo-se as interrogáveis pelo satélite e as de transmissão contínua. Embora possa também operar com plataformas móveis, esse sistema não dispõe, ao contrário do Argos, de meios para localizá-las.

Série Meteosat

O Meteosat obtém imagens de alta resolução do disco completo, a cada meia hora, nos canais no visível e no infravermelho (11,5 microns), bem como na banda do vapor d'água em 6,3 microns.

Analogamente ao caso do Goes, a missão de telecomunicações do Meteosat inclui o Wefax e o Sistema Coleta de Dados.

Um novo programa, o Meteosat Operacional, resultado de dez anos de experiên-

cia com satélites do mesmo tipo, deverá ter início ainda em 1987. Quatro satélites estão programados para garantir a continuidade dos serviços meteorológicos até o final dos anos 90.

Série Goes

O principal instrumento a bordo dos atuais satélites da série Goes é o sondaador atmosférico VAS, que, de acordo com o modo de operação, obtém diferentes conjuntos de observações, entre eles:

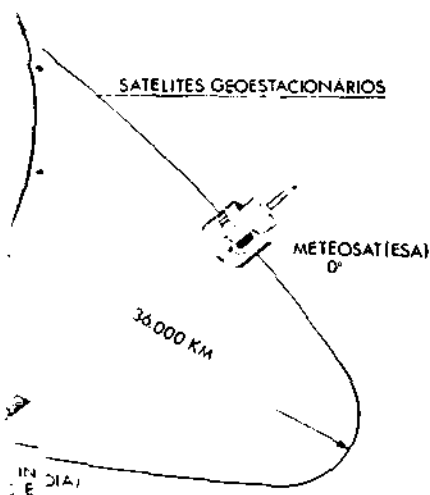
- imagens de cobertura de nuvens nos canais no visível (1km de resolução) e no infravermelho, em 10,5 microns (8km de resolução), para o disco completo, a cada meia hora (ver figura). É também possível obter imagens nos outros onze canais do VAS no infravermelho, como, por exemplo, na banda do vapor d'água em 6,3 microns (imageamento multiespectral).

- Dados de sondagem remota, com 7 ou 14km de resolução, em doze canais espectrais no infravermelho, destinados à inferência de perfis verticais de temperatura e de umidade na troposfera. Nesse modo de operação (sondagem remota), o VAS tem sido utilizado apenas em caráter experimental, principalmente atendendo programas de pesquisa dos EUA.

Além disso, o Goes também atua como um satélite de retransmissão de dados, oferecendo os serviços Wefax (fac-símile do tempo) e o Coleta de Dados.

Por meio do Serviço Wefax, o Goes retransmite, para uma estação de baixo custo ao seu alcance, diversos tipos de produtos, tais como: imagens obtidas pelo próprio satélite e por outros satélites (Tiros-N/Noaa, por exemplo), previsões numéricas de tempo geradas pelas agências norte-americanas de meteorologia, boletins informativos sobre satélites etc.

FIG. 1 - SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR



estudos de modelagem climática, por meio de modelos globais de circulação atmosférica.

Esse Centro deverá contar com um sistema de computação com capacidade de processamento superior a 100 mflops (ver figura 10), além de uma capacidade de armazenamento rápido (discos magnéticos, por exemplo) superior a terabytes. Funcionará ininterruptamente 24 horas por dia e terá um quadro com cerca de 150 técnicos em várias áreas, incluindo meteorologistas, engenheiros eletrônicos e de telecomunicações, analistas de sistemas, matemáticos, oceanógrafos físicos etc.

O exemplo de excelência estabelecido pelo ECMWF indica que o caráter "dual" operação-pesquisa é fundamental para a incorporação dinâmica de resultados de pesquisas aos métodos de previsão operacional.

No nosso Centro de Previsão deveremos garantir esse caráter dual e incentivar a pesquisa em alto nível, que atenda ao aperfeiçoamento permanente dos modelos de previsão.

Para seu funcionamento, o Centro receberá, dos órgãos setoriais operacionais da meteorologia, os dados coletados necessários para alimentar os modelos de previsão. A seguir, a previsão numérica será transmitida aos órgãos setoriais que elaborarão e disseminarão as previsões detalhadas, de acordo com o perfil dos usuários de cada setor.

2. Centro de Aplicação de Satélites Ambientais

Todo o esforço empregado pelo Inpe nos últimos 20 anos na área de aplicação de satélites ambientais (meteorológicos, oceanográficos e meio ambiente) deverá cristalizar-se num projeto de grande envergadura e impacto em termos operacionais e de desenvolvimento tecnológico na área.

O Centro deverá ter a capacidade de receber, tratar e disseminar informações de todos os satélites ambientais, a nível operacional, bem como realizar o desenvolvimento tecnológico e a implantação de estações terrenas de recepção, estações de trabalho para tratamento digital de imagens, utilização de plataformas de coleta de dados ambientais, entre outros. Deverá desenvolver e transferir aos órgãos operacionais de meteorologia e hidrologia sistemas de monitoramento e de previsão imediata (*now casting*) de fenômenos intensos e de certa duração, com o uso de satélites e radares.

O Centro de Aplicação de Satélites

Ambientais terá papel importante no suprimento de dados para o Centro de Previsão, aumentando a densidade dos dados convencionais e preenchendo vazios de informação (por exemplo, Região Amazônica e oceanos Atlântico e Pacífico, adjacentes à América do Sul), onde tais dados inexistem.

Deverá, também, buscar estreita cooperação com o Nesdis (Serviço Nacional de Satélites, Dados e Informações Ambientais - NOAA - EUA), acompanhar a evolução dos satélites e preparar-se para a recepção de todos os satélites a ser lançados no futuro. Dentre esses, dada a importância para a nossa oceanografia, os satélites da série Noss (Sistema Nacional de Satélites Oceânicos, EUA) e o ERS-1, europeu, deverão ter atenção especial.

As informações básicas a ser fornecidas pelo Centro são: perfis verticais de temperatura e umidade, utilizando os sondadores a bordo dos satélites Tiros-N/NOAA e, no futuro, o VAS, a bordo dos satélites Goes; campos de vento, extraídos do movimento das nuvens como observadas pelos satélites Goes; estimativas de precipitação, a partir de imagens de cobertura de nuvens; mapeamento térmico da superfície do mar etc.

O Centro deverá dar subsídios ao programa espacial brasileiro quanto à especificação de uma futura missão que contemple a colocação em órbita de um satélite meteorológico nacional, com capacidade de fazer imagem e sondagem remotas. Deverá também ocupar-se com a criação de uma base de dados de origem espacial para estudos de estabelecimento de climatologias que auxiliem o monitoramento e a previsão de variações climáticas, como, por exemplo, as variações de ROL (Radiação infravermelha emitida para o espaço exterior).

Formação de pessoal

A grande deficiência de recursos humanos na área da meteorologia, tanto em qualidade como em número, levou o Inpe a investir na formação de pessoal a nível de pós-graduação, seja para a pesquisa ou para auxiliar as universidades em suas atividades nessa área. Esse programa, que se iniciou no final dos anos 60, prossegue até os dias atuais e muito tem colaborado para a modernização e o desenvolvimento da meteorologia brasileira.

Para a formação de recursos humanos no exterior, com ênfase nos programas de doutorado, escolheram-se diferentes centros de treinamento de renome internacio-

nal, tais como a Universidade de Chicago, o Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), a Universidade de Wisconsin, a Universidade Estadual da Flórida, entre outros. Os primeiros pesquisadores formados começaram a regressar ao Brasil em 1973.

O Inpe vem mantendo o curso de pós-graduação em meteorologia, o primeiro criado no País, com a contribuição, no início, de professores estrangeiros e, posteriormente, de docentes formados no exterior e no Brasil. Seu reconhecimento a nível nacional e internacional pode ser constatado pelos bons conceitos atribuídos pela Capes e pelo fato de a Organização Meteorológica Mundial ter solicitado a abertura desse programa para estudantes da América Latina.

Os programas de mestrado (início em 1970) e doutorado (início em 1975) foram credenciados pelo Conselho Federal de Educação em 9 de novembro de 1977 e em 17 de fevereiro de 1984, respectivamente, e já formaram 44 mestres e seis doutores, que atualmente trabalham em universidades, em instituições de pesquisa etc. O programa nuclear também foi beneficiado com a formação de cinco mestres especializados em dispersão de poluentes, por solicitação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A formação desses pesquisadores contribuiu significativamente para a implantação e o desenvolvimento de cursos de graduação e pós-graduação e de suas linhas de pesquisa no País.

Atualmente, o quadro de pessoal do Inpe, na área, conta com 14 doutores e 23 mestres em meteorologia, três doutores e seis mestres em oceanografia, além de um grupo de apoio de 17 pessoas, que inclui engenheiros, técnicos e pessoal administrativo.

No momento atual há uma grande preocupação em aumentar o quadro de pessoal qualificado para atender às necessidades de implantação do Centro Avançado de Previsão de Tempo e do Centro de Aplicação de Satélites Ambientais. Nesse contexto, busca-se uma cooperação internacional, com os Estados Unidos, Japão e países europeus, para agilizar a formação de novos quadros, desde o nível técnico até o nível de pós-graduação. Esse programa de formação de recursos humanos deverá ser abrangente e aberto à participação de toda a comunidade acadêmica do País.

É óbvio, mas sempre deve-se ressaltar, que o maior recurso que o setor pode ter está na qualidade e na massa crítica de seus pesquisadores.