

EXPERIMENTO DE INTERCOMPARAÇÃO: SONDAGENS TOVS E RADIOSSONDAGENS

Yoshihiro Yamazaki
Yukitaka Nakamura
Maria Roseli Cabral Ho
Carlos Ho Shih Ning

Instituto de Pesquisas Espaciais
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

São apresentados resultados do Experimento TOVS/RADIOSSONDA conduzido para a realização de intercomparação entre observações convencionais de radiossondagem e dados obtidos a partir das informações de sondagem remota pelo satélite NOAA-9. Os lançamentos das radiossondas foram feitos da Estação do Radar Meteorológico do Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Baurú, em horários simultâneos com a passagem do satélite sobre a região da cidade de Bauru, Estado de São Paulo. Apesar da intercomparação ter sido feita considerando apenas 4 radiossondagens, os resultados obtidos foram de excelente qualidade em termos de temperatura. Pelas análises concluiu-se que os perfis de temperatura TOVS substituem, sem dúvida alguma, as sondagens convencionais pelo menos até o nível de 100mb. Quanto ao perfil de temperatura do ponto de orvalho determinado por satélite, as características gerais são semelhantes ao da radiossondagem, porém os desvios são maiores, e resultados mais conclusivos sobre a confiabilidade, a ponto de substituir os dados convencionais, é ainda um aspecto a ser pesquisado. As análises comparativas entre as cartas sinóticas de ar superior preparadas com dados convencionais e dados TOVS, revelam a grande importância dos dados de satélite na previsão subjetiva.

ABSTRACT

TOVS/RADIOSONDE Experiment results are presented for intercomparison between upper air data derived from NOAA-9 satellite atmospheric sounding and radiosonde observations. Radiosondes were launched from Meteorological Radar Station of Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru, SP, simultaneous with satellite passages over Bauru region. For the intercomparison were launched only four radiosondes but the results are excellent in terms of temperature profiles. Analysis show that satellite temperature profile can perfectly replace the temperature from radiosonde soundings. Satellite dew point temperature profiles have general characteristics similar to the radiosonde soundings, but since the deviations are greater, conclusive results require more research. Comparative analysis between synoptic chart based on conventional data and TOVS data, show the great importance of satellite data in the forecasting analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os satélites meteorológicos de órbita quasi-polar heliossíncronos da série TIROS-N/NOAA, cuja sequência é também conhecida como Série Avançada TIROS-N (ATN), encontra-se em operação contínua desde outubro de 1978. Para garantir cobertura de uma mesma região geográfica a cada seis horas, tais satélites operam em pares com órbitas em quadratura. De acordo com a convenção adotada, a cobertura matutina é realizada pelo satélite de número par (atualmente, NOAA-10) e a cobertura vespertina pelo de número ímpar (atualmente, NOAA-9), cujos horários de cruzamento com o equador geográfico verificam-se, aproximada e respectivamente, às 07:30/19:30 h e 14:30/02:30 h (hora solar local). Na Tabela 1 são apresentados os satélites TIROS-N/NOAA já lançados, com seus respectivos períodos aproximados de operação. As aproximações são consequência da degradação do sinal de transmis-

são ou de interrupções na operação por problemas de natureza técnica, na fase da vida útil do satélite. A continuidade dessa série assegurada pelo lançamento já programado de mais quatro satélites (NOAA-H,D,I,J). Após 1991, novos instrumentos deverão compor a carga útil dos satélites ATN/NOAA (NOAA-K,L,M).

TABELA 1

PERÍODO APROXIMADO DE OPERAÇÃO DOS SATÉLITES
LANÇADOS DA SÉRIE TIROS-N/NOAA

SATÉLITE	DATA DE LANÇAMENTO	PERÍODO APROXIMADO DE OPERAÇÃO
TIROS-N	13.10.1978	19.10.1978-30.01.1980
NOAA-6	27.06.1979	27.06.1979-30.06.1986
NOAA-7	23.06.1981	24.08.1981-18.02.1985
NOAA-8	28.03.1983	03.05.1983-12.06.1984
NOAA-9	12.12.1984	10.01.1985-presente
NOAA-10	17.09.1986	11.1986-presente

O Sondador Vertical Operacional TIROS-N (TOVS-TIROS-N Operational Vertical Sounder) é um dos principais sistemas que integram a carga útil dos satélites TIROS-N/NOAA. O TOVS é composto por três instrumentos: (1) Sondador de Radiação Infravermelha de Alta Resolução-2 (HIRS-2/High Resolution Infrared Radiation Sounder-2), sondador de alta resolução espacial com 20 canais espectrais (19 no infravermelho e 1 no visível); (2) Unidade de Sondagem em Microondas (MSU - Microwave Sounding Unit), com 4 canais espectrais em microondas; e, (3) Unidade de Sondagem Estratosférica (SSU - Stratospheric Sounding Unit), modulada à pressão, com 3 canais espectrais no infravermelho. As características detalhadas destes sondadores são descritas por Schwalb (1978) e Smith et al. (1979). Desde 1979, é o sistema TOVS que provê rotineiramente os dados de sondagem atmosféricas por satélite para as várias organizações internacionais da meteorologia operacional.

No Brasil, o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) vem, desde a sua fundação, acompanhando a evolução tecnológica na área de satélites meteorológicos. Esforços mais recentes, especificamente voltados à utilização dos dados TOVS, resultaram na implantação experimental de algoritmos que permitem inferir, entre outros parâmetros de interesse meteorológicos, perfis verticais de temperatura e de umidade desde a superfície até a estratopausa (Yamazaki et al., 1987; Ho et al., 1987).

A implantação de algoritmos em caráter rotineiro no Centro de Aplicação de Satélites Ambientais (CSA), será um requisito para a operacionalização do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT), não apenas pela deficiente cobertura espacial de sondagens aerológicas do País, como também, entre outros motivos, pelo tempo que leva para receber os dados TOVS globais processados no exterior e divulgados pelo Sistema Global de Telecomunicações. Assim sendo, torna-se necessária a realização de estudos que permitam avaliar a qualidade das sondagens TOVS, seu impacto em modelos de previsão numérica de tempo, incluindo análise objetiva e iniciação, bem como a obtenção de detalhes sobre as deficiências do estado atual dessa tecnologia. Para este estudo de intercomparação foi promovido o Experimento TOVS/RADIOSSONDA, por meio do qual foram realizadas radiossondagens coincidentes e simultâneas com sondagens TOVS. A necessidade de experimentos desta natureza decorre da dificuldade de se obter dados de radiossondagens convencionais em horários e locais adequados para as avaliações TOVS.

2. EXPERIMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

O experimento de campo foi conduzido em colaboração com o Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru (IPMet/FEB). Os lançamentos foram feitos junto às instalações do radar meteorológico da cidade de Bauru/SP (22°S, 49°W), utilizando os equipamentos de rastreamento automático GMD-1A e radiossondas VIZ-1680MHz. Os quatro lançamentos, realizados entre 16 e 19 de dezembro de 1986, foram devidamente programados para aquisição de dados de ar superior nos mesmos horários das passa-

gens do satélite NOAA-9, com base nas previsões produzidas mensalmente pelo INPE.

Para a caracterização espacial da intercomparação, ou seja, para a definição da área representativa das radiossondagens, foram elaboradas as projeções horizontais das trajetórias dos balões, conforme ilustra a Figura 1, para o lançamento do dia 18. Como se observa, a distância máxima de deslocamento em relação ao ponto de lançamento, identificada pelas coordenadas (0,0), é da ordem de 10km. Como os demais lançamentos apresentaram características de deslocamento semelhantes ao apresentado na Figura 1, as intercomparações foram feitas considerando a validade das informações convencionais dentro desta resolução espacial.

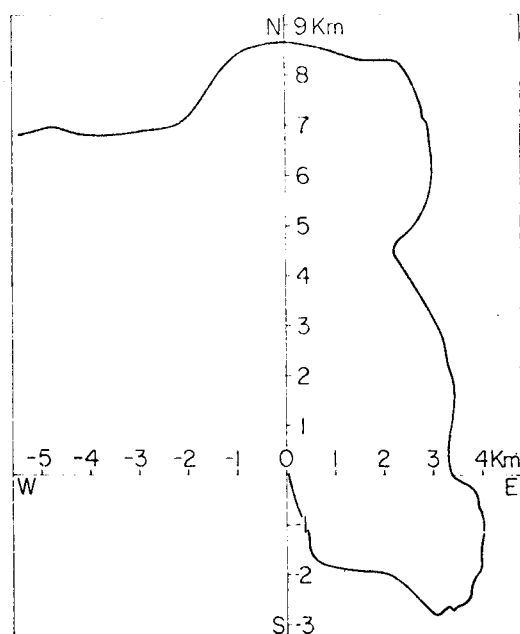


Fig. 1 - Projeção horizontal da trajetória do balão de radiossondagem em Bauru no dia 18/12/86.

Os dados de satélite foram recebidos e pré-processados pela Estação de Recepção de Satélites TIROS-N/NOAA do INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais) instalada em Cachoeira Paulista (22,7°S, 46,0°O). No processamento dos dados TOVS foi utilizado o "International TOVS Export Package", desenvolvido pelo Instituto de Cooperação para Estudos de Satélites Meteorológicos do NESDIS (CIMSS - Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies of NESDIS, Madison, WI (EUA)), para a inferência de perfis verticais de temperatura e de vapor d'água e de outros parâmetros como a água precipitável e a concentração total de ozônio, a partir das radiancias medidas pelo instrumento TOVS (Smith et al., 1983).

Esse processamento foi feito no computador B-6800 do INPE com as alterações descritas por Ho et al., (1987). Os perfis de temperatura foram determinados a partir das radiancias limpas, na ausência de nuvens, ou devidamente corrigidas, quando na presença delas. O programa implantado identifica alvos livres da presença de nuvens, parcialmente coberto ou totalmente coberto tratando-se de forma diferenciada

no processamento. No caso de cobertura total, em particular, a temperatura é inferida a partir das informações dos quatro canais em microondas, que são menos afetados pelas nuvens. O procedimento acima encontra-se descrito no trabalho realizado, por McMillin e Dean (1982). Os perfis de temperatura foram determinados para cada malha de 3 X 3 dados HIRS, ou seja, em média a cada 60km de distância. Para a determinação do perfil de temperatura atmosférica a partir da equação de transferência radiativa foi utilizado o método iterativo proposto por Smith (1970). Basicamente, este método resolve a equação da transferência radiativa, iterativamente, até encontrar uma concordância suficientemente boa entre as radiancias observadas e as calculadas. A água precipitável é calculada utilizando a solução inversa da equação de transferência radiativa descrita por Smith e Zhou (1982). A concentração total de ozônio é obtida pela medida de radiação infravermelha em 9.6 μ m e utilizando o método descrito por Ma, Smith e Woolf (1984). Além destas variáveis são também determinados o geopotencial e o vento geostrófico. Para o processamento de 500 sondagens a partir dos dados gravados, foram gastos cerca de duas horas de CPU do computador Burroughs 6800.

3. RESULTADOS

Tendo em vista que os gráficos preparados para a análise das intercomparações entre sondagens TOVS e radiossondagens apresentam grande semelhança, a discussão será feita baseada nos resultados das sondagens apresentando sempre que possível, apenas as figuras referentes ao dia 18/12 por reunir um conjunto mais completo de dados.

Na Figura 2 estão indicados por "x" alguns pontos onde foram obtidos os perfis verticais e a área varrida pelo satélite; os círculos cheios representam as principais estações de radiossondagem do Brasil e o quadrado cheio indica a cidade de Bauru. Nem todos os pontos das sondagens constam da figura para não saturá-la visivelmente. Na Figura 3a são apresentados os perfis de temperatura obtidos a partir das medições feitas por radiossondagem (R) e satélite (S). Quanto ao perfil obtido por satélite, foi escolhido aquele mais próximo da estação de lançamento do balão de radiossondagem, que neste caso é de cerca de 85km. Observa-se que há uma boa concordância entre os perfis, desde a superfície até aproximadamente 100mb. Acima desta altura o erro torna-se maior. Na Figura 3b é apresentado o desvio padrão da temperatura obtida por satélite, considerando os perfis dentro de um raio de 110km (R1) e outro de 220km (R2), e considerando o perfil de radiossondagem como referência. O número de perfis utilizados para o cálculo do desvio padrão estão indicados nesta figura. Em geral, como se observa, o desvio é menor que 3°C, abaixo de 100mb. Este resultado é comparável aos encontrados por outros autores como Wark (1983), Susskind et al. (1984) e Smith et al. (1983). Aumentando o raio para 330km, o número de perfis torna-se maior, porém o desvio torna-se maior também, provavelmente devido à perda na confiabilidade da temperatura com a distância. O raio R1 é uma distância satisfató-

ria, entretanto como o número de perfis é pequeno, acredita-se que seja mais correto considerar o desvio utilizando o raio R2. Os diversos fatores que contribuem para o erro são:

- as medidas de radiossondagens são essencialmente pontuais enquanto as medidas TOVS são volumétricas;
- as observações de radiossondagem, utilizadas como referência, são contaminadas por erros, especialmente devido ao alto teor de umidade quando as sondas atravessam as nuvens;
- os desvios mais acentuados próximo à superfície e na região da tropopausa são principalmente causados pelas frequentes discontinuidades no campo de temperatura, que estão além do poder de resolução vertical do TOVS (Smith et al, 1979);
- próximo à superfície os erros são também causados por contaminações pelas nuvens baixas (McMillin e Dean, 1982), por contribições significativas de radiancias da própria superfície, bem como pela heterogeneidade da superfície (Wark, 1983);
- na média estratosfera, os grandes desvios podem ser atribuídos à grande espessura da camada que dá origem à radiação (inabilidade de resolver a estrutura fina) e aos maiores erros nas medidas de radiossondagem nessa região (Wark, 1983).

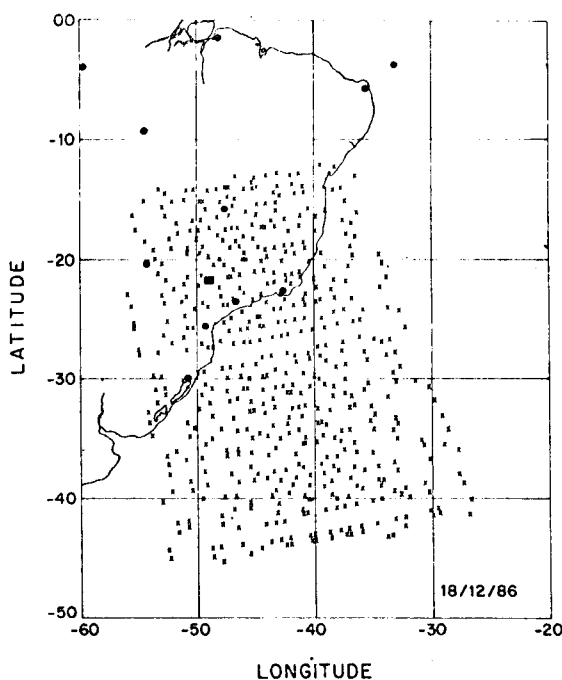


Fig. 2 - Pontos selecionados (x) de sondagens TOVS do dia 18/12/86, principais estações de radiossondagem do Brasil (●) e localização da cidade de Bauru (■).

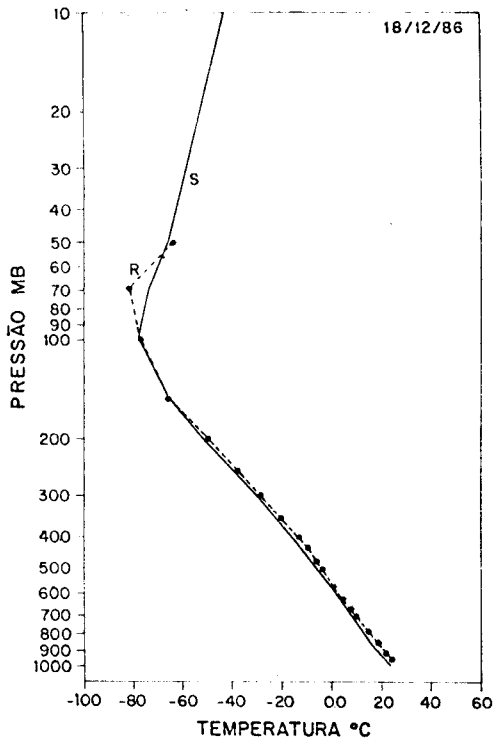


Fig. 3a - Perfil vertical da temperatura determinada por satélite (S) e radiossonda (R) no dia 18/12/86 em Bauru.

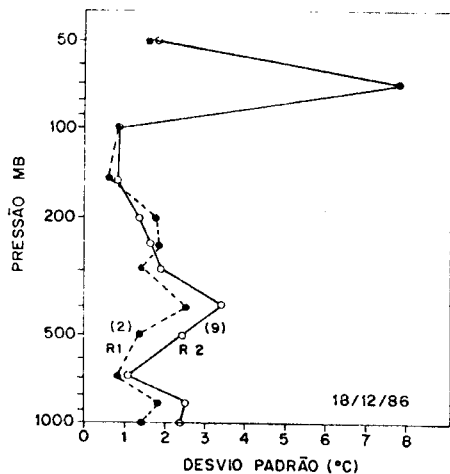


Fig. 3b - Desvio padrão da temperatura em função do nível atmosférico para o dia 18/12/86, considerando raio R1 de 110km e raio R2 de 220km; entre parênteses encontra-se o número de perfis utilizados para o cálculo do desvio padrão.

Os perfis de temperatura do ponto de orvalho determinados por satélite (S) e radiossonda (R) para os dias 18/12/86 e 17/12/86, são apresentados, respectivamente, nas Figuras 4a e 4b. As Figuras 4c e 4d mostram o desvio padrão das temperaturas do ponto de orvalho dos dias 18 e 17, respectivamente, considerando os perfis TOVS dentro dos raios R1 e R2. Observa-se que o desvio padrão da Figura 4c é bem acentuado, porém o da Figura 4d é comparável ao encon-

trado por Eyre (1983). De maneira que, torna-se difícil saber se o maior desvio da Figura 4c é somente devido ao erro nas medidas por satélite.

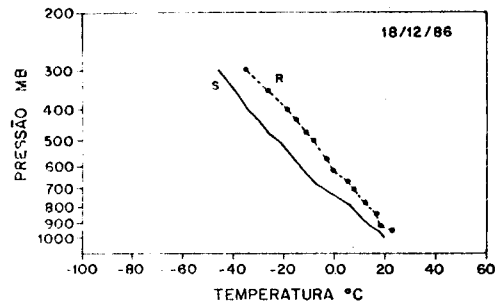


Fig. 4a - Perfil vertical da temperatura do ponto de orvalho determinado por satélite (S) e radiossonda (R) no dia 18/12/86 em Bauru.

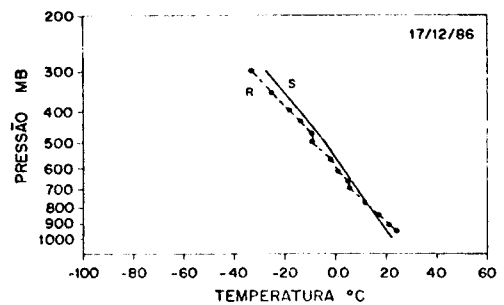


Fig. 4b - Idem à Figura 4a, porém para o dia 17/12/86.

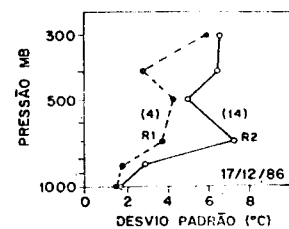


Fig. 4c - Desvio padrão da temperatura do ponto de orvalho do dia 18/12/86, considerando os raios R1 e R2.

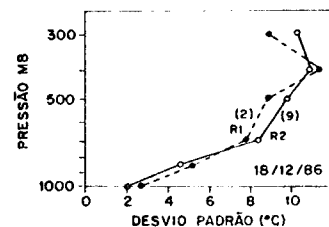


Fig. 4d - Idem à Figura 4c, porém para o dia 17/12/86.

Na Figura 5a são mostrados os perfis de temperatura do Rio de Janeiro (22°S, 43°W) para o dia 17/12/86 obtidos com satélite (S) e radiossonda (R) e na Figura 5b o desvio padrão considerando o perfil de radiossonda como referência. Note-se que na Figura 5a os perfis de temperatura foram obtidos com diferença de 6 ho

ras, enquanto que na Figura 3a, os perfis são simultâneos. Pelas Figuras 3b e 5b observa-se que os desvios são da mesma ordem de magnitude. Quanto maior a diferença no tempo entre os perfis de satélite e radiossondagem, maior deveria ser o desvio. Entretanto, algumas comparações com defasagem de 6 horas, indicam que essa diferença não é apreciável. Geralmente, comparações desta natureza são feitas com defasagem de até 3 horas, embora em certos estudos tenham sido utilizadas até 6 horas de defasagem (Philips et al., 1979), como no caso discutido acima.

Os mapeamentos térmicos do dia 18/12 para os níveis de 1000, 850, 500, 300 e 250mb, são apresentados nas Figuras 6 (a,b,c,d,e), e as alturas geopotenciais para os níveis de 850, 500, 300 e 250mb podem ser vistos nas Figuras 7(a,b,c,d). Nas Figuras 8 (a e b) são apresentados o mapeamento do vento geostrofico em 500 e 300mb, e na Figura 9, a carta sinótica de 500mb, traçada manualmente, com dados convencionais e imagens do satélite GOES-W. Pode-se observar das Figuras 8 e 9 que a circulação geral no nível de 500mb obtida com sondagens TOVS é coerente com a da carta sinótica. Outro parâmetro importante derivado dos dados TOVS é a água precipitável e o seu mapeamento é mostrado na Figura 10. A imagem do satélite METEOSAT é mostrada na Figura 11 onde se observa que a região onde foi realizado o experimento de radiossondagem estava coberta por núvens (Estado de São Paulo). A análise qualitativa das Figuras 10 e 11 revelam que as regiões de máxima umidade concordam em algumas regiões, porém discordam em outras, de maneira que será necessário futuras comparações para uma conclusão significativa.

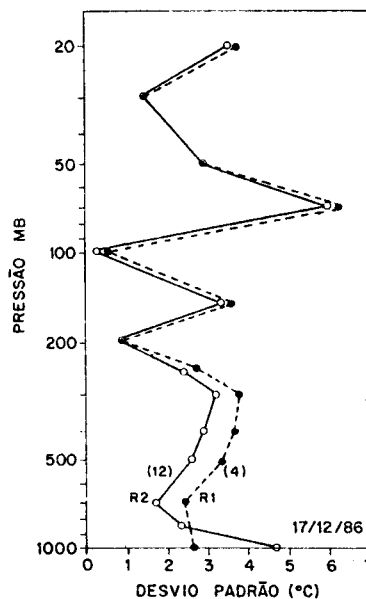


Fig. 5b - Desvio padrão da temperatura em função do nível atmosférico para o dia 17/12/86, considerando raio R1 de 110km e raio R2 de 220km; entre parênteses encontra-se o número de perfis utilizados para o cálculo do desvio padrão.

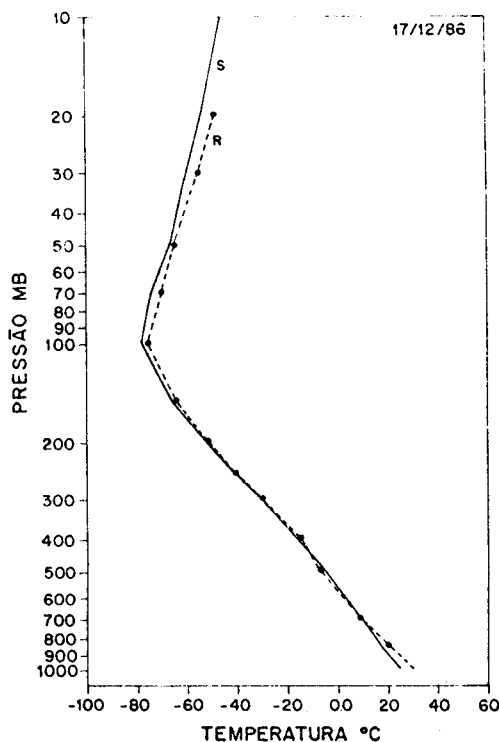


Fig. 5a - Perfil vertical da temperatura do ponto de orvalho determinado por satélite (S) e radiossondagem (R) no dia 17/12/86 no Rio de Janeiro.

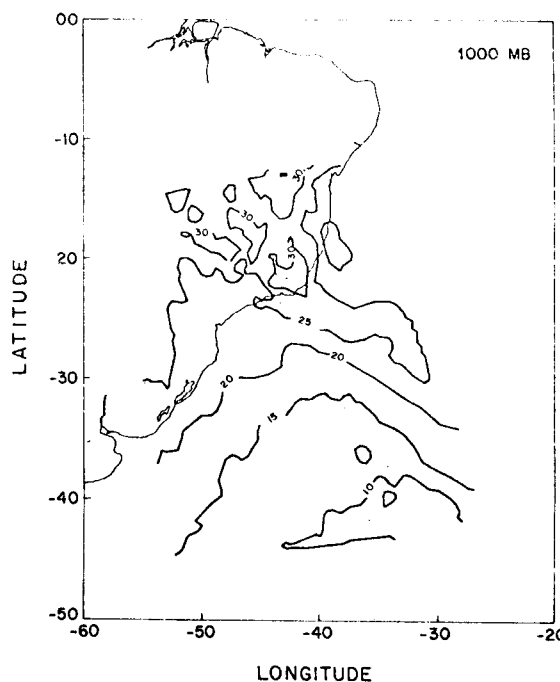
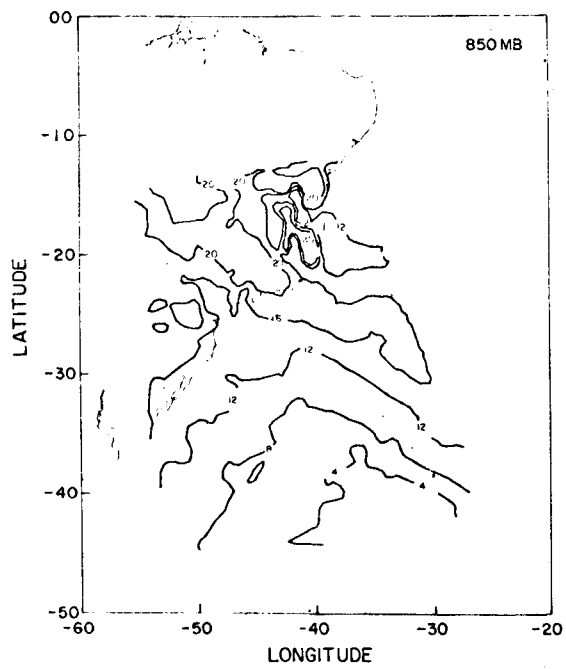
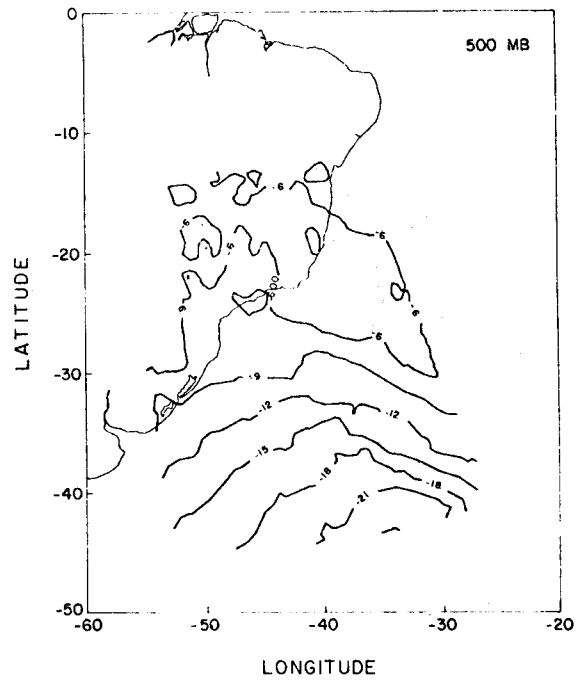


Fig. 6a - Mapeamento térmico em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86.

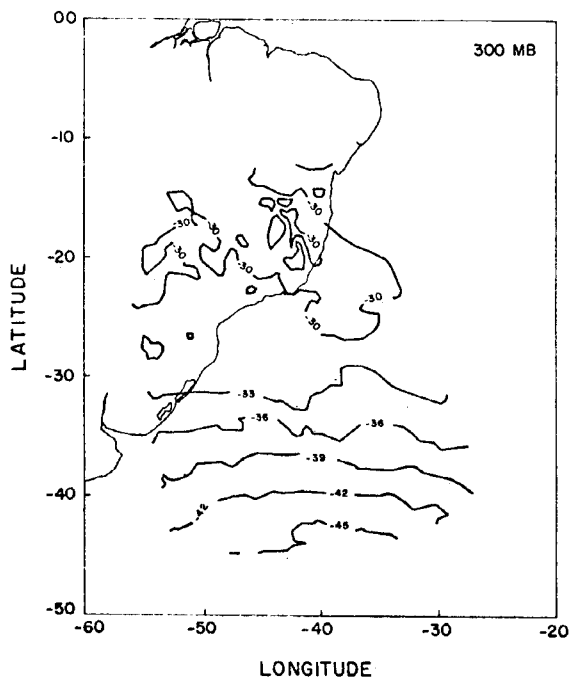
(continua)



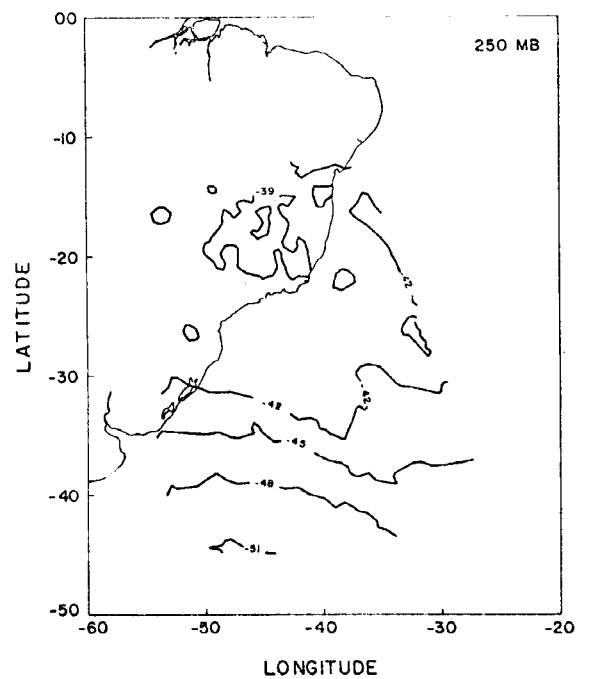
(b)



(c)

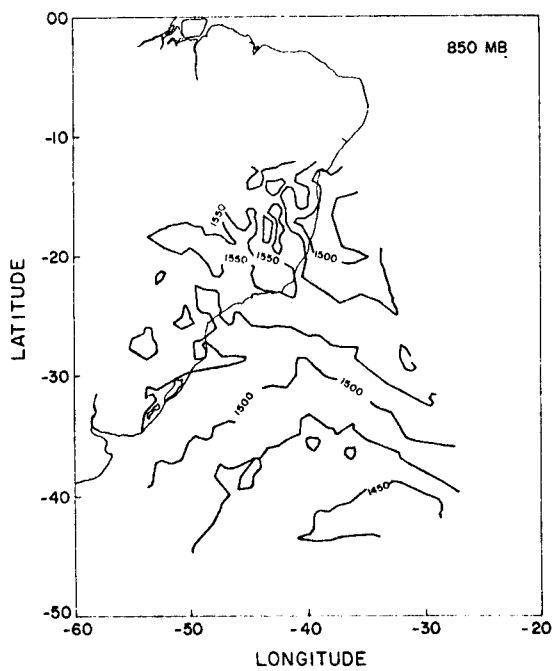


(d)

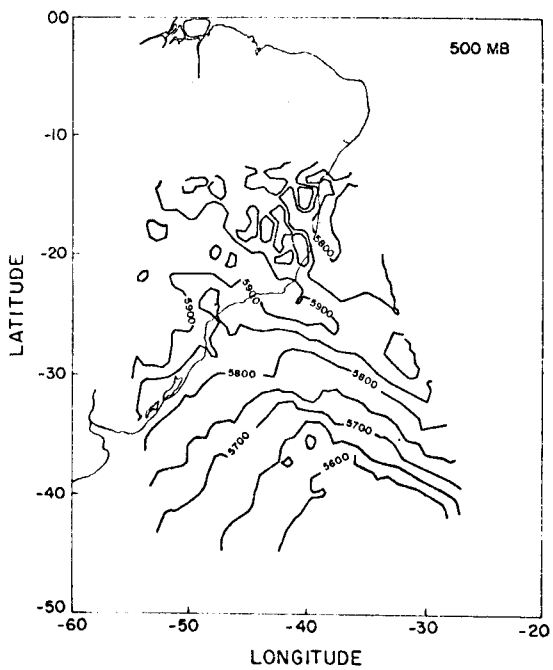


(e)

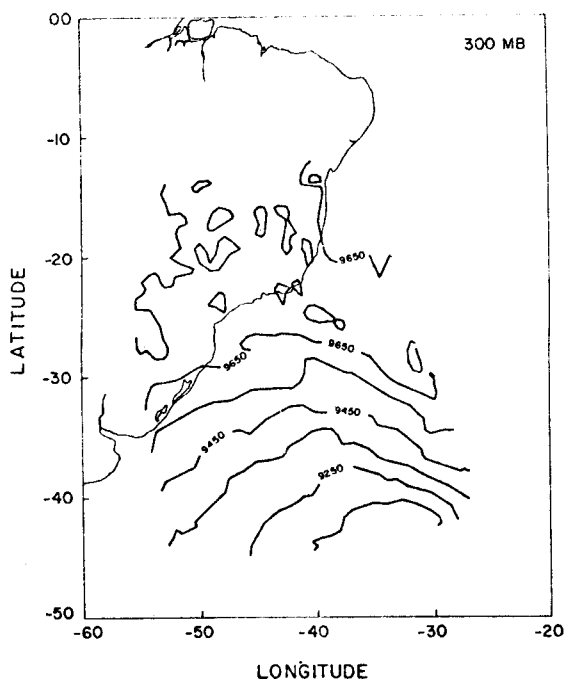
Fig. 6 - Mapeamento térmico em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86.



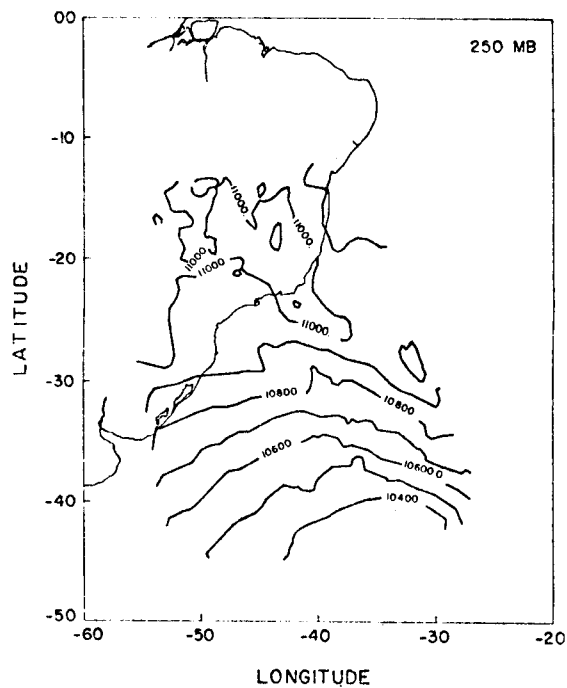
(a)



(b)

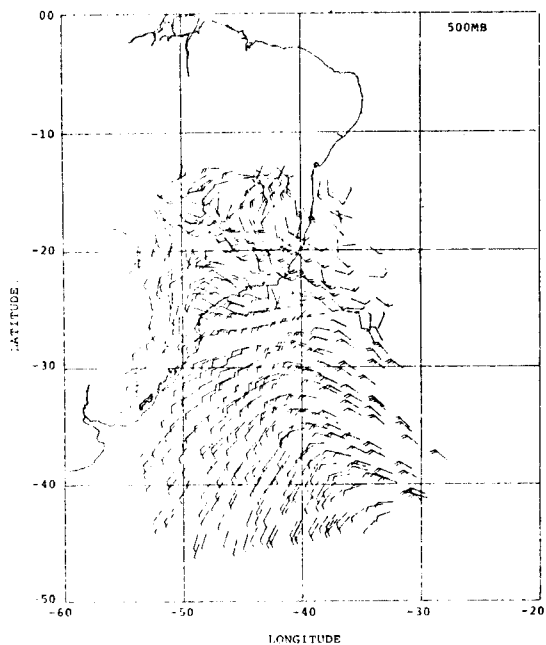


(c)

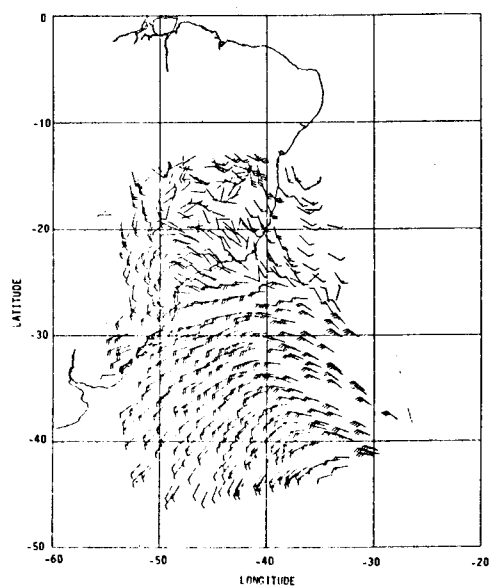


(d)

Fig. 7 - Altura geopotencial (m) em diferentes níveis de pressão para o dia 18/12/86.



(a)



(b)

Fig. 8 - Vento geostrófico nos nı́veis de 500 e 300mb para o dia 18/12/86.

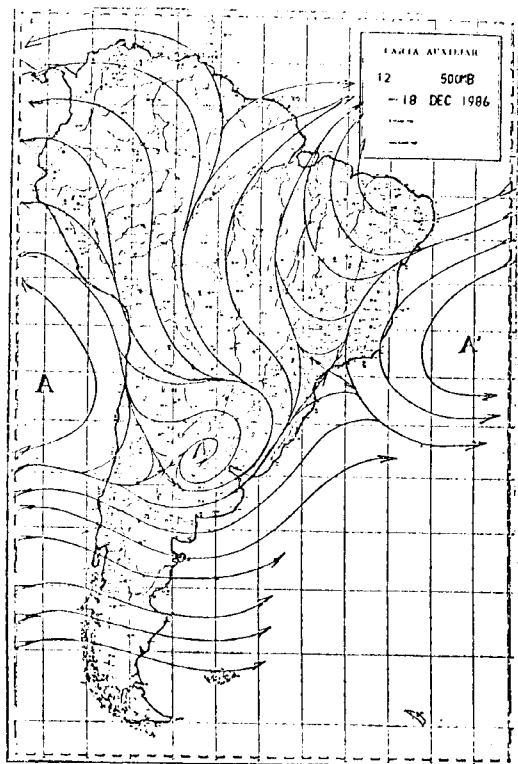


Fig. 9 - Carta sinótica do nı́vel de 500mb para o dia 18/12/86.

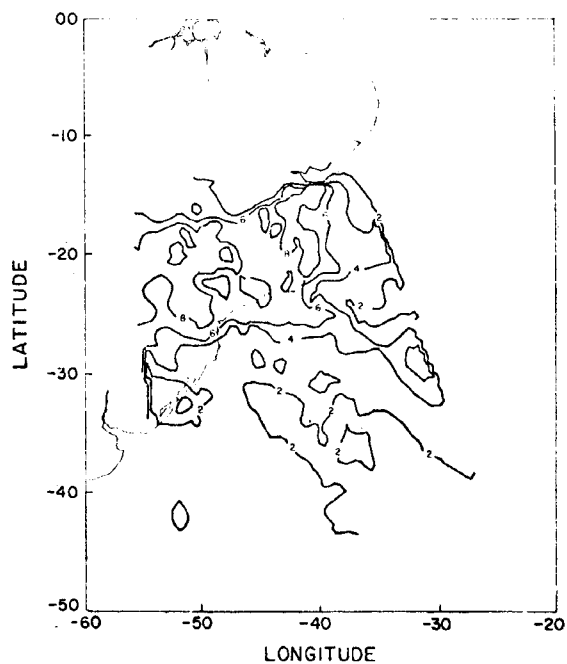


Fig. 10 - Mapeamento de água precipitável total em cm para o dia 18/12/86.



Fig. 11 - Imagem do satélite METEOSAT do dia 18/12/86.

Outra grandeza que pode ser derivada dos dados TOVS é o conteúdo total de ozônio, mostra do na Figura 12 em unidades Dobson (1UD = 0,001 atm cm). A medida do instrumento Dobson em Cachoeira Paulista (CP) fornece para esse dia 272 UD e a medida do satélite nessa região é de 229 UD, portanto cerca de 15% menor. Nesse caso também será necessário um número maior de comparações para a validação dos dados.

Finalmente, ressalta-se a importância de se conduzir um estudo de análise objetiva englobando os dados TOVS, para se comprovar o impacto dessas sondagens na previsão numérica de tempo para a América do Sul.

4. CONCLUSÕES

Os resultados são preliminares, porém como são comparáveis aos publicados na literatura (Philips et al., 1979; Smith et al., 1983; Wark, 1983; Susskind et al., 1984), tudo indica a viabilidade da utilização destes produtos de satélite para fins de pesquisa e previsões meteorológicas na região brasileira. Atualmente, centros meteorológicos operacionais de vários países (Menzel, 1983) estão processando os dados de satélite da série TIROS-N/NOAA para fins de previsão numérica de tempo. Assim, a operacionalização desse sistema apresenta grande potencial e importância devido à escassez de dados de ar superior, particularmente sobre o Hemisfério Sul.

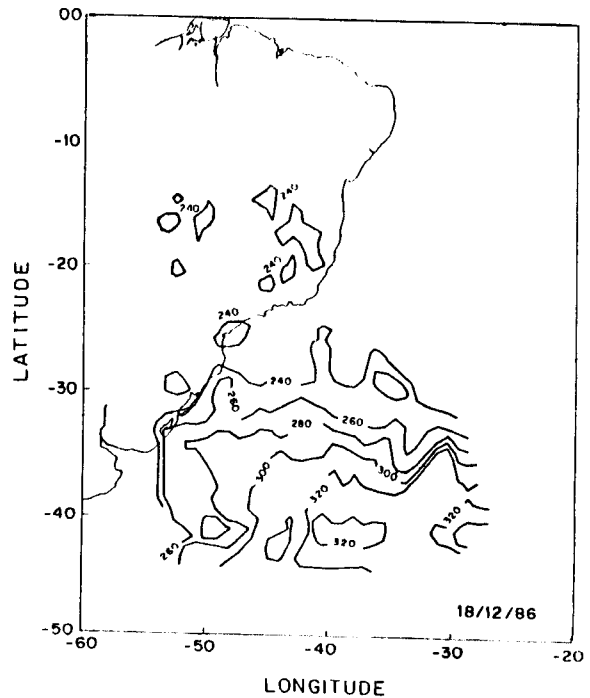


Fig. 12 - Mapeamento de concentração total de ozônio em unidades Dobson do dia 18/12/86.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Fundação Educacional de Bauru pelo apoio recebido à realização do Experimento TOVS/RADIOSSONDA, ao Sr. Nelson Arai pela revisão do texto e a todos aqueles que de uma forma ou outra colaboraram à apresentação do trabalho.

À FINEP/PNAE por ter possibilitado a realização do presente trabalho dentro da atividade de pesquisa do Projeto PROSAT.

6. REFERÊNCIAS

- EYRE, J.R. High resolution temperature retrievals at the U.K. meteorological office. *The technical Proceedings of the First International TOVS Study Conference*, Igl's, Austria, W.P. Menzel, Ed. 94-100, 1983.
- HO, C.S.N.; CABRAL, M.R.; YAMAZAKI, Y.; NAKAMURA, Y.; TANAKA, K. Processamento dos dados HRPT dos satélites da série NOAA. INPE-4372-PRE/1195, set. 1987.
- MA, X.L.; SMITH, W.L.; WOOLF, H.M. Total ozone from NOAA satellites - a physical model for obtaining measurements with high spatial resolution. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23: 1309-1314, Sept. 1984.
- McMILLIN, L.M.; DEAN, C. Evaluation of a new operational technique for producing clear radiances. *J. Appl. Met.*, 21:1005-1014, Jul. 1982.
- MENZEL, W.P. *The Technical Proceedings of the First International TOVS Study Conference*, Igl's, Austria, W.P. Menzel, Ed., 352 pp, 1983.

PHILIPS, N.; McMILLIN, L.; GRUBER, A.; WARK, D.
An evaluation of early operational
temperature sounding from TIROS-N. *Bull.*
Amer. Meteorol. Soc., 60(10):1188-1197, Oct.
1979.

SCHWALB, A. The TIROS-N/NOAA, A-G Satellite
series NOAA, *Tech. Memo. NESS 95*, 1978.

SMITH, W.L. Iterative solution of the
radiative transfer equation for the
temperature and absorbing gas profile of an
atmosphere. *Applied Optics*, 9(9):1993-1999,
Sept. 1970.

SMITH, W.L.; WOOLF, H.M.; HAYDEN, C.M.; WARK,
D.Q.; McMILLIN, L.M. The TIROS-N
Operational Vertical Sounder. *Bull. Am.*
Meteorol. Soc., 58:1177-1187, Oct., 1979.

SMITH, W.L.; ZHOU, F.T. Rapid extraction on
layer relative humidity, geopotential
thickness, and atmospheric stability from
satellite sounding radiometer data.
Applied Optics, 21:924-928, Mar., 1982.

SMITH, W.L.; WOOLF, H.M.; HAYDEN, C.M.;
SCHREINER, A.J.; LE MARSHALL, J.M. The
physical retrieval TOVS export package.
The Technical Proceeding of the First
International TOVS Study Conference, Igl's,
Austria, W.P. Menzel, Ed., 227-278, 1983.

SUSSKIND, J.; ROSENFELD, J.; REUTER, D.;
CHAHINE, M.T. Remote sensing of weather
and climate parameters from HIRS2/MSU on
TIROS-N. *J. Geophys. Res.*, 89(D3):4677-
4697, Jun. 1984.

YAMAZAKI, Y.; NAKAMURA, Y.; HO, C.S.N.; CABRAL,
M.R.; TANAKA, K. Sondagem vertical da
atmosfera. INPE-4370-PRE/1195, set. 1987.

WARK, D.R. Validation of satellite derived
atmospheric temperature and water vapor
concentration using radiosonde and
rocketsond measurements. *Adv. Space Res.*,
Vol. 2, n^o 6, 49-58, 1983.