

ANÁLISE PRELIMINAR DOS DADOS DE SODAR RELATIVOS À CAMADA LIMITE DO PANTANAL SUL MATOGROSSENSE

Jorge, M. P. P. M*., Manzi, A. O., Alvalá, R. C. S., Prasad, G. S. S. D., Sá, L. D. A., Gielow, R., Arlino, P. R. A. (CPTEC/INPE); Dias, M. A. F. S., Freitas, E. D. (IAG/USP); Souza, A. (UFMS).

*Maria Paulete Pereira Martins Jorge, e-mail: paulete@met.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Avenida dos Astronautas – 1758 – CEP: 12201-970 - São José dos Campos – São Paulo – Brasil

Palavras-chave: Camada Limite Atmosférica, Sodar, Pantanal

Grupo Temático: Atmosfera e Meio Ambiente

RESUMO

O Pantanal é um dos mais importantes ecossistemas do planeta, representando a maior área continental úmida, com aproximadamente 140 mil km² em território brasileiro. Nele habitam milhares de espécies vegetais e animais, incluindo uma variedade de aves, tanto nativas como provenientes de outras áreas das Américas. Seu território ocupa uma imensa planície cortada pelo Rio Paraguai e afluentes, como o Taquari e o Miranda, que na época das chuvas, início das cheias, fica parcialmente inundada, principalmente nas baías e lagoas que margeiam esses rios.

O INPE, juntamente com a UFMS, vem desenvolvendo um experimento micrometeorológico no Pantanal, o IPE- Experimento Integrado do Pantanal, cujo objetivo é investigar e compreender a estrutura da Camada Limite Atmosférica (CLA), de forma a caracterizar o tempo e o clima da região. Para isto, são efetuadas medidas meteorológicas em torre e na superfície, sondagens verticais, monitoramentos com sodar e desenvolvimentos de simulação numérica.

A região escolhida para os experimentos dista 1,5 km da Base de Estudos do Pantanal da UFMS, em Passo do Lontra, Município de Corumbá, Mato Grosso do Sul (19°33'48,2"S e 57°00'53,8"O).

SODAR (SOund Detection and Ranging), é um radar acústico, que mede a energia acústica retrorefletida pelas inhomogeneidades na densidade da atmosfera, provocadas pelos movimentos turbulentos. Ele é um instrumento conveniente para investigar a CLA, pois a altura máxima desta camada está dentro de seu alcance e inversões de temperatura e vento ocasionam sinais de retorno mais fortes.

Um sodar esteve no Pantanal entre os dias 09/09/99 e 28/09/99, e forneceu dados de C_T^2 , u , v , w , σ_u , σ_v , σ_w , altura de inversão e estabilidade atmosférica, de 15 em 15 minutos, para as alturas entre 50 e 1500m, com resolução de 50m. Com os dados de sodar foi possível acompanhar a evolução da camada limite ao longo do dia, durante o referido período, obter os perfis verticais e horizontais do vento, inferir a estratificação da temperatura na CLA e os mecanismos de dispersão de poluentes.

INTRODUÇÃO

O Pantanal, uma das maiores planícies de sedimentação do globo, ocupa grande parte do centro oeste brasileiro e se estende pela Argentina, Bolívia e Paraguai, onde recebe outras denominações (Vila da Silva, 1991; Magalhães, 1992) (Figura 1).



Figura 1: Mapa do Pantanal

O Pantanal é um dos mais importantes ecossistemas do planeta, representando a maior área continental úmida, com aproximadamente 140 mil km² no Brasil. O Pantanal brasileiro está localizado em parte dos Estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul, entre os paralelos de 15° e 22° de latitude sul e os meridianos de 55° e 58° de longitude oeste. A Depressão Pantaneira abrange 12 municípios, dos quais Corumbá, Coxim, Aquidauana, Miranda e Porto Murtinho, são tradicionalmente os mais conhecidos.

O Pantanal faz parte da bacia do rio Paraguai, que possui 1.400 km de extensão em território brasileiro. Esse rio e seus afluentes: São Lourenço (670 km) e Cuiabá (650 km) ao norte; Miranda (490 km), Taquari (480 km), Coxim (280 km) e Aquidauana (565 km) ao sul, assim como rios de menores extensões - Nabileque, Apa e Negro - formam a trama hidrográfica de todo complexo pantaneiro. Mas o Pantanal não é constituído apenas de rios, ele é uma imensa planície de áreas alagáveis. A declividade, quase nula, de 1 a 3 cm/km no sentido norte-sul e de 6 a 12 cm/km no sentido leste-oeste, favorece as inundações que se propagam de norte para o sul e de leste para o oeste, ao longo do Rio Paraguai, único escoadouro do Pantanal.

Nas enchentes dos rios ou da chuva ocorre uma extraordinária interligação entre os rios, braços e baías, formando o lendário Mar de Xaraés. Na vazante, a região enriquecida pelo húmus transforma-se na maior e mais rica concentração de alimentos naturais que irá sustentar toda a flora e a fauna. A vegetação do Pantanal é um mosaico de matas, cerradões, savanas com espécies como cambará, lixeira, canjiqueira, carandá, etc., campos inundáveis de diversos tipos, brejos e lagoas com plantas típicas como camalotes.

A flora pantaneira tem alto potencial econômico, com pastagens nativas, plantas apícolas, comestíveis, taníferas e medicinais. A fauna é bastante rica e diversificada. Muitas espécies ameaçadas de extinção em outras regiões do País ainda apresentam populações vigorosas no Pantanal, como é o caso da capivara, tamanduá-bandeira, tamanduá-mirim, lobinho, veado-mateiro, entre outros. Existem cerca de 230 espécies de peixes, destacando-se a piranha, o pintado, o pacú, o curimatá e o dourado; e cerca de 650 espécies de aves que povoam a região. Existem ainda cerca de 80 espécies de mamíferos e 50 de répteis, dos quais os mais famosos são as cobras (sucuri, jararaca, boca-de-sapo, etc.) e os jacarés, que vivem ao redor das baías e lagoas.

O clima é quente e úmido no verão, com temperatura média em torno de 32°C e frio e seco no inverno, com média em torno de 21°C, ocorrendo ocasionalmente, geadas nos meses de julho e

agosto. Nessa região tipicamente tropical, a chuva controla o regime dos rios, e conseqüentemente o ciclo das cheias. Entre outubro e março estão os meses chuvosos, responsáveis por mais de 80% das precipitações anuais, que em média situam-se entre 1.000 e 1.200 mm.

Diferentes instituições de pesquisa nacionais e internacionais têm desenvolvido experimentos no Pantanal, para melhor compreender esta região singular. O INPE, juntamente com a UFMS, vem liderando um importante experimento meteorológico no Pantanal, o projeto **IPE** (Experimento Integrado do Pantanal) visando uma melhor compreensão da camada limite atmosférica, de forma a caracterizar o tempo e o clima da região.

Os estudos sobre a dinâmica da circulação atmosférica acima da região centro-oeste do Brasil em geral, e sobre o Pantanal em particular são poucos, certamente constituindo-se esta região uma das menos estudada do ponto de vista meteorológico. Uma questão particularmente importante e pouco compreendida sobre a climatologia da região central do Brasil, refere-se à origem da água que precipita sobre a região e ao destino que a mesma terá após ser evaporada. Fatores estes que permitem explicar por quais processos a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZACS) é provida de água nos períodos em que ela permanece estacionária sobre áreas da região sudeste do Brasil (Figuroa et al., 1995), durante o verão austral. Estes problemas importantes ainda permanecem mal compreendidos e poucos são os dados disponíveis para seus estudos.

As características da dispersão dos aerossóis no Pantanal também despertam muito interesse científico (Freitas e Silva Dias, 1995) e o conhecimento de seu regime é de grande aplicação prática. Elas proporcionam uma clara descrição da circulação geral na região e indicam como o escoamento troposférico, proveniente da Amazônia e defletido pela Cordilheira dos Andes (James e Anderson, 1984), influencia a estrutura da atmosfera na região central do Brasil (Guedes, 1985; Figuroa et al., 1995) e determina algumas das características básicas de seu clima (Nishizawa e Tanaka, 1983; Figuroa e Nobre, 1990; Rao et al., 1996).

Qualquer elemento de impacto maior, como é o caso dos incêndios na região central do Brasil, também pode introduzir aerossóis na atmosfera, aumentando sua concentração local. Isto influi na física das nuvens e na fotoquímica da atmosfera acima da região em questão, fatores de considerável relevância na determinação de mudanças climáticas de longo prazo, de alterações nos padrões de precipitação e, conseqüentemente, nas características da cobertura vegetal da região.

Portanto, torna-se necessário obter um conjunto de dados micrometeorológicos que permitam melhor conhecer as variações do tempo e do clima, além de desenvolver metodologias que possam medir e identificar, tão rápido quanto possível, os efeitos que as atividades antrópicas, ou fatores naturais, possam ter sobre as diferentes questões ambientais da região. No que se refere à meteorologia aplicada, as informações servem para melhorar os modelos numéricos, além de contribuírem com subsídios para uma política de previsão e prevenção de secas e incêndios na região.

O sítio experimental a ser estudado, está situado na fazenda São Bento (19°33'48,2"S, 57°00'53,8"O), próximo 1,5 km da Base de Estudos do Pantanal da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (BEP-UFMS), em Passo do Lontra, município de Corumbá, distante 315 km de Campo Grande, 100 km de Corumbá e 100 km de Miranda. Neste local foi instalada no final de 1997, uma torre micrometeorológica de alumínio, com 22 metros de altura, a qual suporta sensores de resposta rápida, para medidas de turbulência em quatro alturas diferentes, e instrumentos meteorológicos convencionais.

Entre as grandezas atmosféricas medidas estão a temperatura, a umidade, a pressão, a direção e a velocidade do vento, os fluxos de calor do solo, o albedo, a radiação incidente e difusa, e também a concentração de metano para análise do potencial de emissão deste gás no Pantanal. Na campanha de setembro de 1999, IPE2, além das medidas acima citadas, também ocorreram sondagens verticais da atmosfera com radiossondas e com um sodar da Universidade de São Paulo.

METODOLOGIA E MATERIAIS

Em qualquer estudo ambiental, para se compreender a estrutura da Camada Limite Atmosférica, é importante se conhecer o campo de vento e a estrutura térmica. As medidas desses parâmetros podem ser feitas diretamente, por torres meteorológicas, radiossondas ou aviões instrumentados, ou indiretamente por sensores remotos, tais como radar, lidar e sodar. A vantagem dos sensores remotos é que eles cobrem volumes maiores na CLA.

Nos últimos 25 anos o SODAR (SOund Detection And Ranging) tem trazido avanços significativos na compreensão da Camada Limite Atmosférica (CLA) (Crescenti, 1997). Ele tem sido muito utilizado na caracterização da circulação da brisa marítima/terrestre e de sistemas frontais (Ralph et al, 1993), da poluição atmosférica (U.S. EPA, 1993), de parâmetros turbulentos em terrenos complexos (Kalogiros et al, 1999) e de jatos de baixos níveis (Patra et al, 1998).

Um sodar opera com base no princípio do retroespalhamento acústico, onde uma antena transmissora/receptora, envia para a atmosfera, pulsos acústicos com frequência entre 1 e 5 kHz e duração de 50 a 300 ms. Conforme a onda sonora se propaga pela atmosfera, uma pequena porção de sua energia é retroespalhada para a superfície, principalmente pelas inhomogeneidades de densidade (associadas às flutuações de temperatura) e de umidade.

Essas irregularidades, com escala de ~10-30 cm, da mesma ordem do comprimento de onda do pulso acústico, são produzidas pela turbulência em regiões com acentuados gradientes na temperatura potencial, camadas de inversão, cisalhamento do vento ou termas produzidas pelo aquecimento da superfície. Através do intervalo de tempo entre o sinal emitido e o eco medido, e da velocidade do som, é possível se determinar a altura da turbulência, assim como da intensidade do eco, a intensidade da turbulência.

O sodar é um instrumento conveniente para investigar a CLA, pois a altura máxima desta camada está dentro de seu alcance e inversões de temperatura e vento ocasionam sinais de retorno mais fortes. Assim, um sodar fornece uma estimativa da altura da camada de mistura e das dimensões verticais das inversões dentro da CLA. Em um Sodar Doppler, pequenas diferenças entre a frequência do sinal transmitido e recebido fornecem informações sobre a velocidade dos alvos (inhomogeneidades). Um Sodar Doppler emite três sinais acústicos, um dirigido verticalmente, outro inclinado na direção norte e outro inclinado na direção leste. Com esses três feixes são determinadas a direção e a velocidade do vento horizontal, e se o ar está subindo ou descendo (vento vertical).

Um sodar fornece dados da estrutura vertical do vento, do vento horizontal, de suas variâncias, da constante estrutura de temperatura C_T^2 , das condições de estabilidade da atmosfera e da altura da camada de mistura, parâmetros que permitem estudar os processos turbulentos próximos da superfície e caracterizar as condições de dispersão na CLA.

A primeira informação extraída dos dados de sodar é a intensidade do sinal retroespalhado. A potência do sinal recebido é proporcional a função estrutura de temperatura C_T^2 que é uma medida da intensidade das flutuações de pequena escala na temperatura do ar. A relação entre a potência do sinal acústico transmitido P_T e recebido P_R é dada pela equação do sodar (Neff, 1978).

$$\frac{P_R}{E_R} = P_T E_T e^{-2(a_c + a_m)R} \frac{ct}{2} \frac{AG}{R^2} s a_e \quad (1)$$

Onde: E_T e E_R são as eficiências das potências transmitida e recebida, respectivamente;
 c é a velocidade do som (m/s);
 t é a duração do pulso transmitido (s);
 A é a área da antena (m²);
 G é o fator de abertura efetivo;
 R é a distância entre o alvo e a antena (m);

a_c , a_m e a_e são os coeficientes de atenuação clássico, molecular e excessivo, respectivamente (m^{-1});

s é a seção de choque de espalhamento (m^{-1}).

Para um sodar monoestático, isto é, transmissor e receptor posicionados coaxialmente, a seção de choque de espalhamento é dada por:

$$s = 0,0039 k^{1/3} \frac{C_T^2}{T^2} (2)$$

Onde: k é o número de onda acústico ($k=2\pi/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda acústico) (m^{-1});

T é a temperatura da atmosfera ($^{\circ}C$);

$C_T^2 = [T(z)-T(z+Dz)]^2/[Dz]^{2/3}$ é a função estrutura de temperatura ($^{\circ}C^2/m^{2/3}$).

A função estrutura de temperatura C_T^2 tem valores grandes e padrões repetidos especialmente durante as inversões de radiação, nas camadas de inversão e na interface de colunas convectivas ou térmicas, nas superfícies frontais das brisas terrestre/marítima e de uma maneira geral, nas interfaces entre massas de ar de diferentes temperaturas. Assim, este é um parâmetro de fundamental importância para a compreensão da CLA.

RESULTADOS

Entre os dias 9 e 28 de setembro de 1999, estive no Pantanal um Sodar Doppler da Remtech, com 10 W de potência, frequência de ~2kHz, monoestático, e uma antena transmissora/receptora de 1,4m x 1,4 m, formada por 196 transdutores cerâmicos piezoelétricos (“tweeters” da Motorola tipo 1025). O sodar gera eletronicamente cinco feixes, um na vertical e quatro inclinados de 30° nas direções norte, sul, leste e oeste. A partir de uma transformação de coordenadas, o sodar fornece a velocidade do vento horizontal (u , v), a direção (ϕ) e o desvio padrão ($\sigma\phi$) da direção do vento horizontal, o vento vertical (w), o desvio padrão das componentes do vento (σu , σv , σw), a altura da camada de mistura/inversão (z_i) e a estabilidade da CLA (1 e 2 – estável; 3 – neutra; 4 e 5 – instável). Os pulsos acústicos são emitidos a cada 5 segundos e os dados são fornecidos de 15 em 15 minutos, entre 50 m e 1500 m de altitude, com resolução de 50 m.

A seguir são apresentados os resultados preliminares de um dos dias da campanha IPE2, dia 16/09/1999, os quais representam um ponto de partida para trabalhos futuros. Segundo observações visuais, as condições meteorológicas do dia 16/09/1999 podem ser descritas como um dia inicialmente nublado, com ventos fortes, que foram dispersando as nuvens ao longo do dia, até que no final da tarde o céu apresentava nuvens cirrus bem altas e no início da noite, estava límpido e estrelado. Durante a manhã a transmissividade era de 37% e a tarde de 65%.

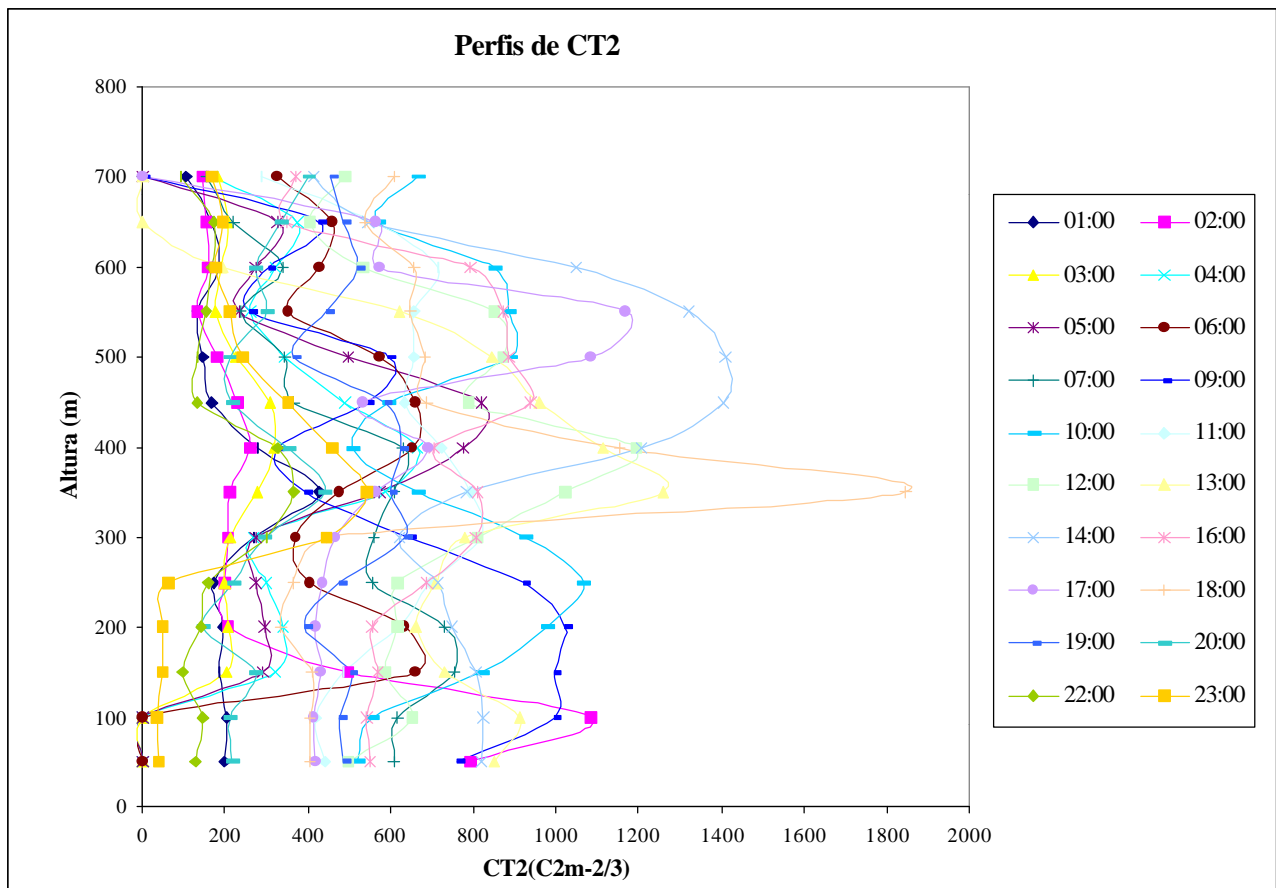


Figura 2: Perfis Horários da Função Estrutura de Temperatura no dia 16/09/99.

O valor de C_T^2 é esperado diminuir com $z^{-4/3}$ na camada limite sob condições instáveis (Wyngaard et al, 1971). Esta tendência pode ser observada na Figura 2, com base nos dados da estabilidade que mostram uma atmosfera instável até esta altura de 500m, a partir das 12:00. Os valores máximos de C_T^2 , que geralmente são indicativos do topo da camada de mistura (Sorbjan et al, 1991), estavam em torno de 500 metros de altura.

A Figura 3 mostra a variação da altura de inversão para o mesmo dia 16/09/99, com tendência de aumento até às 20:00, passando posteriormente para alturas menores, como pode ser visto também nos valores máximos de C_T^2 .

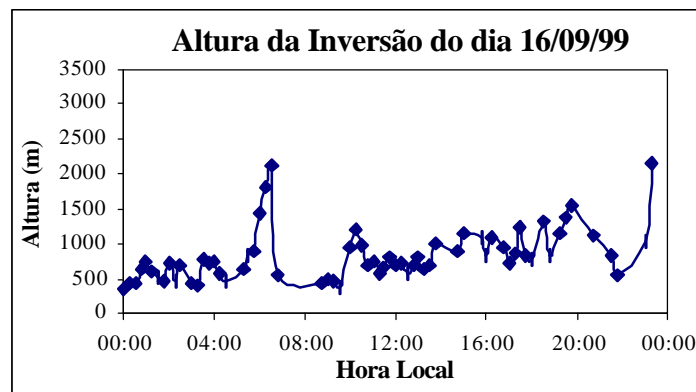


Figura 3: Variação Temporal da Altura de Inversão.

A Figura 4 mostra as médias horárias da direção e velocidade do vento horizontal, para o dia 16/09/99. O vento foi predominantemente de oeste até às 16:00, quando ocorreram mudanças bruscas de direção principalmente em torno de 500m. Para a mesma altura e horário, a intensidade do vento apresentou comportamento oscilatório, com período de ~4 horas, o que indica possivelmente a presença de ondas de gravidade. Na altura de 50 m, o vento aumentou de quatro vezes sua intensidade no início da manhã, indicando a presença de Jato de Baixos Níveis.

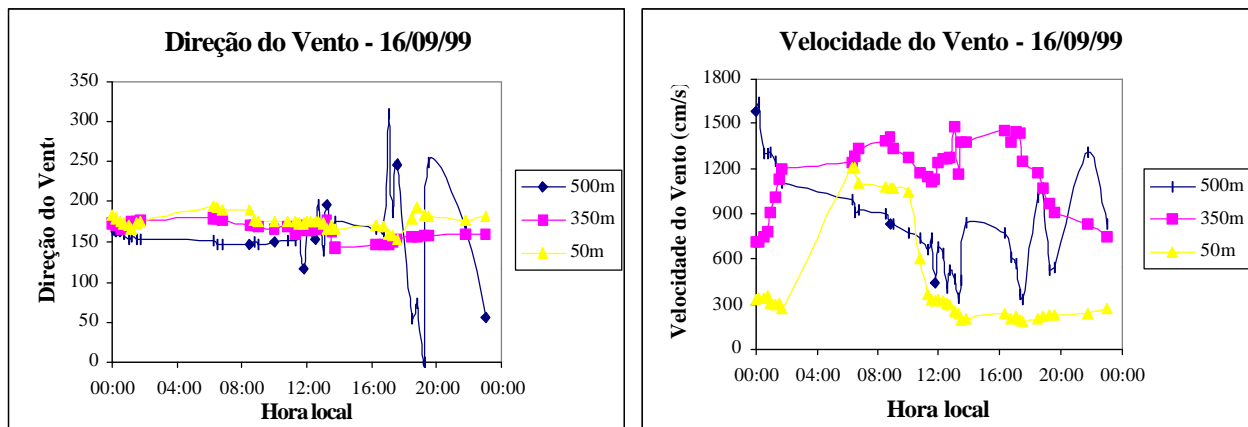


Figura 4: Médias Horárias da Direção e Velocidade do Vento Horizontal.

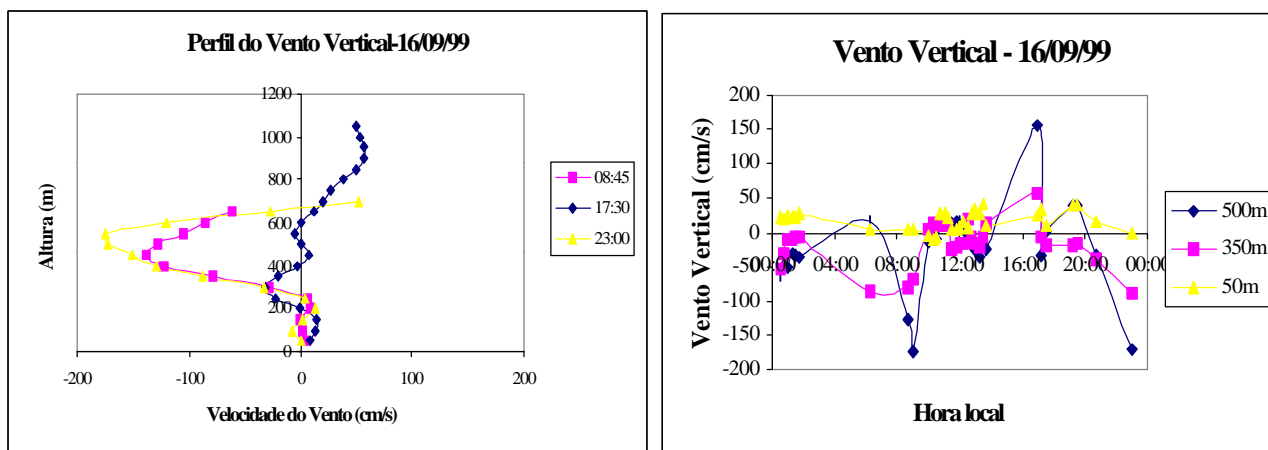


Figura 5: Perfil do Vento Vertical em Três Horários.

Figura 6: Médias Horárias do Vento Vertical em Três Alturas.

Na Figura 5 pode ser observada uma intensa mudança na direção e na velocidade do vento vertical entre 300 e 600 m de altura, principalmente no início da manhã e no final da noite. Nas médias horárias (Figura 6), ocorreram mudanças mais acentuadas na intensidade e direção do vento vertical, em alturas mais elevadas e em torno dos horários de 8:00, 16:00 e 23:00.

Analisando os perfis de C_T^2 nesses três horários, verifica-se que o máximo do perfil, correspondente a altura da camada de mistura está mais alto (~500-600m) quando o vento vertical é positivo (~16:00), e mais baixo (~200-300m) quando este é negativo (8:00 e 23:00), consistente com o fato que os ventos verticais positivos estão relacionados com as plumas convectivas, enquanto que os ventos negativos com as regiões de subsidência.

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Em virtude do Pantanal ser uma região peculiar e pouco compreendida no que se refere a sua climatologia, a realização de experimentos micrometeorológicos é de grande valia. Os parâmetros meteorológicos em geral são medidos por instrumentos convencionais alocados na superfície, em torres meteorológicas ou em aviões instrumentalizados. Mas os sensores remotos, radar, lidar, sodar, satélites, têm a vantagem de cobrir um volume maior da atmosfera, e vêm sendo utilizados cada vez mais na caracterização da Camada Limite Atmosférica. O uso desses instrumentos já está bem estabelecido e seus dados podem ser empregados na determinação direta dos parâmetros atmosféricos, na comparação e calibração de outros instrumentos e na validação de modelos numéricos.

A presença de um sodar no Pantanal traz possibilidades de atuação em todos esses setores. Neste trabalho preliminar foram apresentados os dados fornecidos pelo sodar os quais irão facilitar a compreensão da estrutura da Camada Limite e a determinação de parâmetros meteorológicos num volume maior da atmosfera, completando os dados já existentes obtidos por torre e superfície.

Esse conjunto de informações visa contribuir para a compreensão dos fenômenos de acoplamento entre a camada limite e eventos tais como ondas de gravidade, jatos de baixos níveis, frentes frias e brisas marítimas/terrestres, além de determinar a estabilidade e a estratificação da atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Crescenti, Gennaro H., *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**(4), 651-673, 1997.
- Figueroa, S. N. and Nobre, C. A., "Precipitation Distribution over Central and Western Tropical South America", *Climanálise*, **5**(6), 36-45, 1990.
- Figueiroa, S. N., Satyamurty, P. and Siva Dias, P. L., "Simulations of the Summer Circulation over the South America Region with na Eta Coordinate Model", *Journal of the Atmospheric Sciences*, **52**(10), 1573-1584, 1995.
- Freitas, S. R. and Silva Dias, "Numerical Modelling of Trajectories from Biomass Burning Areas of Central Brazil and Amazonia", **4**(6), 131-132, 1995.
- Guedes, R. L., "Condições de Grande Escala Associadas a Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre a Região Central da América do Sul", *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Meteorologia, IAG/USP, 89 pp., 1985.
- James, I. N. and Anderson, T. L., "The Seasonal Mean Flow and Distribution of Large-scale Weather Systems in the Southern Hemisphere: The Effects of Moisture Transports", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **110**(466), 943-966, 1984.
- Kalogiros, J. A., Helmis, C. G., Asimakopoulos, D. N. and Papageorgas, P. G., "Estimation to ABL Parameters Using the Vertical Velocity Measurements of na Acoustic Soudner", *Boundary-Layer Meteorology*, **91**, 413-499, 1999.
- Magalhães, N. W., "Conheça o Pantanal", *Terragraph*, 400 pp., São Paulo, 1992.
- Neff, W. D., "Beamwidth Effects on Acoustic Backscatter in the Planetary Boundary Layer", *Journal of Applied Meteorology*, **17**, 1514-1520, 1978.
- Nishigawa, T. and Tanaka, M., "The Annual Change in the Tropospheric Circulation and the Rainfall in South America", *Archives for Meteorology, Geophysics and Bioclimatology*, **33**(1-2), Series B, 107-116, 1983.
- Patra, A. K., De, U. K. and Lohar, D., "Existence of Low level Jet during Premonsoon Period over Eastern India and its Role in the Iniciation of Nocturnal Thunderstorms", *Atmósfera*, **12**, 15-26, 1998.
- Ralph, F. M., Mazaudier, C., Crochet, M. and Venkateswaran, S. V., "Doppler Sodar and radar Wind-Profiler Observations of Gravity-Wave Activity Associated with a Gravity Current", *Monthly Weather Review*, **121**, 444-463, 1993.
- Rao, V. B., Cavalcanti, F. A. and Hada, K., "Annual Variation of Rainfall over Brazil and water Vapor Characteristics over South America", *Journal of Geophysical Research*, **101**(D21), 26539-26551, 1996.

- Sorbjan, Z., Coulter, R. L. and Wesley, M. L., "Similarity Scaling Applied to Sodar Observations of the Convective Boundary Layer above an Irregular Hill", *Boundary-Layer Meteorology*, **56**, 33-50, 1991.
- U. S. Environmental Protection Agency (1993) Code of Federal regulations. Title 40, Part 58. Ambient Air Quality Surveillance. Final Rule. Office of the Federal Register, Washington, DC.
- Vila da Silva, J. S., "Aplicações de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informações Geográficas na Avaliação da Dinâmica de Inundação no Pantanal", *Dissertação de Mestrado*, INPE, 1991.
- Wyngaard, J. C., Izumi, J. and Collins Jr., S.A., "Behavior of the Refractive-Index-Structure Parameter Near the Ground", *J. Opt. Soc. Amer.*, **61**, 1646-1650, 1971.

Agradecimentos: À FAPESP, pelo apoio ao Projeto de Pesquisa "Estudo da Camada Limite Superficial do Pantanal Sul Matogrossense", nº 98/00105-5.