

Dutos troposféricos e a estrutura da camada limite planetária na região de Petrolina

Tropospheric ducts and planetary boundary layer structure in the Petrolina region

Leandro Fontes de Sousa, Magaly de Fatima Correia, Maria Regina da Silva Aragão e Roberta Everllyn Pereira Ribeiro

Universidade Federal de Campina Grande

l.f.sousa@hotmail.com; magaly@dca.ufcg.edu.br; regina@dca.ufcg.edu.br; robertaeverllyn@hotmail.com

Resumo

A estrutura da camada limite planetária (CLP) é investigada com foco nos dias com ocorrência de dutos na baixa troposfera na região de Petrolina-PE, no período de 1 a 29 de abril de 2014. A identificação dos dutos e a estimativa do topo/altura da CLP e sua caracterização dinâmica e termodinâmica está fundamentada em dados de sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Petrolina. Os dutos de superfície estão associados com alta instabilidade e aumento da intensidade do vento na camada superficial. Os dutos no topo da CLP (dutos elevados) estão associados com uma redução do teor de umidade do ar e um máximo da intensidade do vento, acima da camada, na baixa troposfera.

Palavras-chave: Refratividade. CLP. Dutos de superfície. Dutos elevados. Petrolina.

Abstract

The planetary boundary layer (PBL) structure is investigated focusing on days with low-tropospheric ducts occurrence in the Petrolina-PE region, in the period from 1 to 29 April 2014. Ducts identification and the estimative of the PBL top/height and its dynamic and thermodynamic characterization is based on 12 UTC upper-air soundings launched at the altitude station of Petrolina. Surface ducts are associated with high instability and wind speed intensification in the surface layer. Ducts at the PBL top (elevated ducts) are associated with a decrease in the moisture content of the air and a wind speed maximum, above the PBL, in the low-troposphere.

Keywords: Refractivity. PBL. Surface ducts. Elevated ducts. Petrolina.

1 Introdução

A Meteorologia é uma das ciências que mais se beneficia com o avanço tecnológico das telecomunicações, já que seu desenvolvimento depende diretamente da observação da atmosfera e da transmissão das informações meteorológicas a nível global, em horários padronizados. Dessa forma, esse avanço contribui para acelerar a compreensão do funcionamento da atmosfera e para melhorar os serviços prestados à sociedade, facilitando a tomada de decisão pelos órgãos competentes, ajudando a salvar vidas.

A radiotransmissão tem um amplo espectro de aplicação em Meteorologia que inclui a troca de informações entre centros de processamento de dados situados na superfície terrestre e plataformas de coleta de dados localizadas em superfície e altitude, inclusive satélites meteorológicos. Entretanto, as ondas eletromagnéticas podem sofrer interferências do meio de propagação (a atmosfera), dependendo das condições atmosféricas ao longo da trajetória a ser percorrida pelo feixe de onda. Nesse contexto, um dos fenômenos mais importantes é denominado duto troposférico, que pode interferir no sinal em radiopropagação, inclusive impedindo que ele chegue ao destino. Dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a compreensão desse fenômeno é fundamental na busca de meios que garantam a segurança e eficácia no processo de transmissão das informações meteorológicas.

Vários estudos têm sido desenvolvidos para ampliar o conhecimento sobre os sistemas meteorológicos que influenciam o tempo e o clima na região semiárida do Nordeste, porém a quantidade de estudos que visam a determinação de mecanismos de formação de dutos troposféricos ainda é pequena. Uma das principais áreas foco de pesquisas tem sido o município de Petrolina situado no extremo sudoeste de Pernambuco, na porção submédica do vale do Rio São Francisco (Figura 1). Petrolina ocupa uma área de 4.561,872 km² e está inserido na mesorregião do São Francisco, onde o bioma nativo predominante é a Caatinga, um dos mais

afetados pelas mudanças decorrentes da ocupação humana.

Recentemente, Correia et al. (2013) realizaram um estudo sobre a região da represa de Sobradinho para avaliar o impacto de mudanças antrópicas nas condições atmosféricas capazes de afetar a qualidade e desempenho de transmissões sem fio. Eles concluíram que alterações na cobertura e uso do solo resultantes da expansão agrícola e da substituição do bioma Caatinga por culturas irrigadas no entorno do reservatório são responsáveis por mudanças significativas no padrão de rádiorrefratividade, não apenas na área do reservatório, mas principalmente no entorno da represa. Assim, variações temporais no índice de refração atmosférica podem afetar a propagação do sinal em sistemas móveis. Paralelamente, Chaves Filho et al. (2013) estudaram a influência de condições atmosféricas anômalas na refração e formação de dutos troposféricos na região de Petrolina. Eles observaram que mudanças significativas no padrão da circulação atmosférica afetaram substancialmente a estrutura termodinâmica e a distribuição vertical do vapor d'água na área de estudo. Eles concluíram ainda que a alta frequência de inversões de subsidência explica o grande número de dutos elevados no período de estiagem da região, enquanto que no período chuvoso processos de evapotranspiração e transportes convectivos podem ser responsáveis pela alta incidência de dutos de superfície.

Neste trabalho o mês de abril de 2014, estudado por Sousa (2015) com foco principal em um evento extremo de precipitação na região de Petrolina, é analisado com o objetivo de investigar características dinâmicas e termodinâmicas da camada limite planetária em situações de dutos na baixa troposfera no município de Petrolina.

2 Material e Métodos

2.1 Dados

Dados diários de sondagens de ar superior realizadas no mês de abril de 2014 na estação de altitude de Petrolina (9°24'S, 40°30'W, 370m) foram usados neste estudo, com exceção do dia 30, sem sondagem. As sondagens, realizadas às 12 UTC, fornecem dados de: pressão, altitude, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, umidade relativa, direção e velocidade

do vento. Esses dados possibilitaram determinar a componente zonal (u) e meridional (v) do vento e as seguintes variáveis termodinâmicas: pressão de vapor (e), temperatura potencial (θ), potencial equivalente (θ_e) e potencial equivalente de saturação (θ_{es}), calculadas conforme Bolton (1980).



Figura 1 – Regiões geográficas do Brasil com destaque para a Região Nordeste e seus estados. A bacia hidrográfica do Rio São Francisco com suas subdivisões é apresentada na cor branca. A subdivisão 1 é o Alto São Francisco, a 2 o Médio São Francisco, a 3 o Submédio São Francisco (com destaque para a localização da estação de altitude de Petrolina) e a 4 o Baixo São Francisco. (Fonte: SOUSA, 2015)

2.2 Metodologia

Segundo Thayer (1974) a refratividade depende principalmente dos gradientes verticais de temperatura e de umidade na baixa troposfera. O cálculo da refratividade em função dessas variáveis obtidas de sondagens de ar superior é feito conforme a expressão (1).

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77,6 \frac{p}{T} + 3,73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

na qual N é a refratividade, n é o índice de refração, p é a pressão atmosférica em hPa, e é a pressão de vapor em hPa e T a temperatura do ar em graus Kelvin. Os dutos troposféricos são definidos como uma camada na qual há a possibilidade de canalização da energia em propagação (DHEIN, 1975). Essa condição ocorre quando $dN/dZ < -157$. Dessa forma, os dutos troposféricos são identificados com base na análise do gradiente vertical da refratividade (dN/dZ). Por outro lado, nas situações com

intensa atividade convectiva e trocas de energia entre a superfície e a atmosfera é difícil a detecção de dutos com base em (dN/dZ). Portanto, para facilitar a visualização dos dutos foi utilizado o índice de refração modificado (M) como critério de análise. Há formação de dutos troposféricos sempre que $dM/dZ < 0$.

Neste trabalho os dutos identificados na baixa troposfera são ilustrados através de perfis verticais do índice de refração modificado, determinado conforme a expressão (2),

$$M = N + 0,157 \times Z \quad (2)$$

na qual Z é a altura em metros. Descontinuidades no índice de refração atmosférica tem forte relação com a intensidade dos transportes turbulentos.

A Camada Limite Planetária (CLP) é a camada atmosférica mais próxima da superfície

terrestre, caracterizada pelas trocas de momentum e energia entre a superfície e a atmosfera. Sob condições ideais, a CLP diurna se divide da seguinte maneira: camada superficial, camada limite convectiva e zona de entranhamento (STULL, 1991). A eficiência das trocas de momentum e energia está fortemente relacionada com a turbulência, principal característica dessa camada. A turbulência é favorecida pelo atrito com a superfície, devido ao escoamento induzido pela topografia e cobertura do solo, fatores importantes que influenciam no processo de mistura e, conseqüentemente, na profundidade da CLP. Neste trabalho a espessura e/ou topo (altura) da CLP foram estimados com base em perfis verticais da temperatura potencial, considerando como topo da CLP o nível mais baixo da atmosfera no qual o gradiente vertical de θ é máximo (SEIDEL et al., 2010). Características dinâmicas e termodinâmicas da CLP nos dias com ocorrência de dutos na baixa troposfera são investigadas usando perfis do vento e das temperaturas θ , θ_e e θ_{es} .

3 Resultados e discussões

Os resultados discutidos a seguir enfocam a estrutura da camada limite planetária nas situações de dutos de superfície, e de dutos elevados, na baixa troposfera, observados no mês de abril de 2014 em Petrolina-PE. Dutos de superfície são identificados nos dias 3, 5, 14 e 19.

Tabela 1 - Profundidade da CLP e altura de dutos na baixa troposfera em abril de 2014 em Petrolina

Dia	Profundidade da CLP (m)	Altura do duto (m)
3	1107	0
5	741	0
8	274	274
14	841	0
17	529	529
18	712	712
19	671	0
24	702	702

A profundidade da CLP é superior a 1 km no dia 3, e está entre 671 m e 841 m nos dias 5, 14 e 19 (Tabela 1). Nos dias 8, 17, 18 e 24 os dutos elevados, na baixa troposfera, ocorrem no topo da CLP, cuja altura varia entre 274 m e 712 m nesses dias (Tabela 1).

Os dutos na camada superficial identificados nos dias 3, 5 e 19 (Figura 2 c,f,l) ocorrem em uma atmosfera com condição de alta instabilidade condicional e convectiva na camada superficial, ($\partial\theta/\partial z < 0$, $\partial\theta_e/\partial z < 0$, $\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) (Figura 2 a,d,j) e com o aumento da intensidade do vento na camada próximo à superfície (Figura 2 b,e,k). Nos dias 3 e 5, o topo da CLP coincide com o nível do máximo da intensidade do vento. No dia 14 o topo da CLP, que é de 841m, está abaixo de um máximo da intensidade do vento situado em torno de 1040 m de altura (Figura 2 g,h). O duto próximo à superfície (Figura 2i) está associado com uma atmosfera convectivamente instável ($\partial\theta_e/\partial z < 0$) e também com o aumento da intensidade do vento na camada superficial (Figura 2 g,h). No dia 19, o máximo da intensidade do vento na baixa troposfera também ocorre acima do topo da CLP.

No dia 8, um evento extremo de precipitação associado com sistemas convectivos do tipo multicelular (observados na área de cobertura do Radar de Petrolina) resultou num total pluviométrico diário de 114,6 mm em Petrolina (SOUSA 2015). O duto formado no topo da CLP está associado com a queda acentuada no teor de umidade da atmosfera acima da CLP (Figura 3 a,c). A concentração de vapor próximo à superfície é decorrente do grande volume de chuva precipitado na região. Um jato de baixos níveis acima da CLP, na baixa troposfera, pode ter favorecido a eficiência da mistura da umidade ao longo da vertical na CLP (Figura 3 a,b). No dia 17 (Figura 3 d,e,f) o duto situado no topo da CLP está associado com a redução do teor de umidade da atmosfera acima da CLP, evidenciado pelo afastamento das curvas de θ_e e θ_{es} . Um máximo da intensidade do vento também é evidente acima da CLP (Figura 3e). No dia 18 (Figura 3 g,h,i) o duto ocorre em condições atmosféricas semelhantes às do dia 17, ou seja, com a presença de máximo da intensidade do vento acima do topo da CLP e a redução do teor de umidade acima dessa camada.

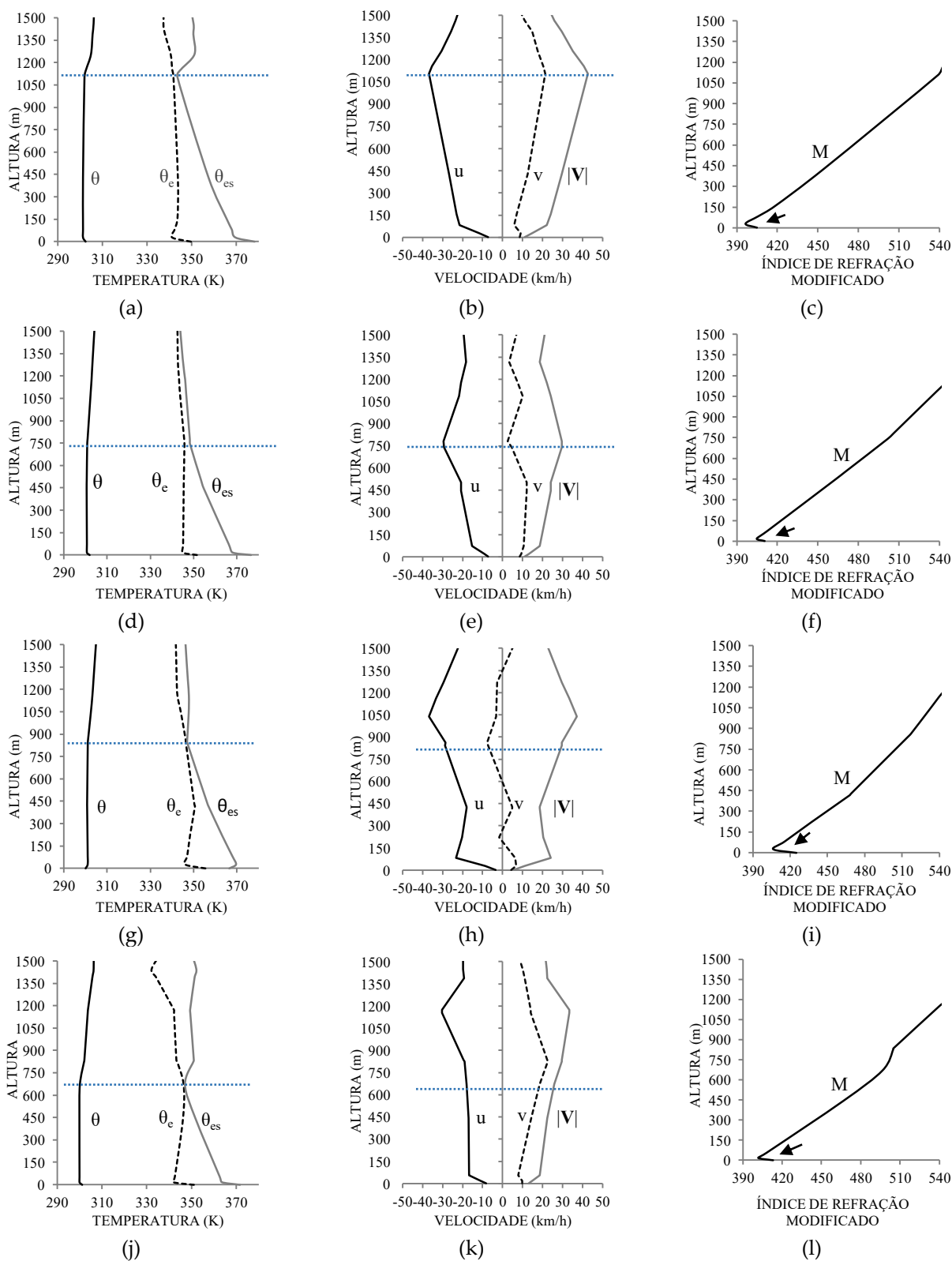


Figura 2 – Perfis verticais em situações de dutos de superfície registrados em Petrolina-PE às 12 UTC dos dias 3 (a,b,c), 5 (d,e,f), 14 (g,h,i), 19 (j,k,l) de abril de 2014: (a,d,g,j) temperaturas potenciais, (b,e,h,k) componentes e intensidade do vento, e (c,f,i,l) índice de refração modificado. A linha pontilhada azul nos gráficos (a,b,d,e,g,h,j,k) indica o topo da CLP. A seta nos gráficos (c,f,i,l) assinala a camada de ducto. A altura zero nos perfis está na altitude de Petrolina (370 m). A simbologia utilizada é vista em cada perfil.

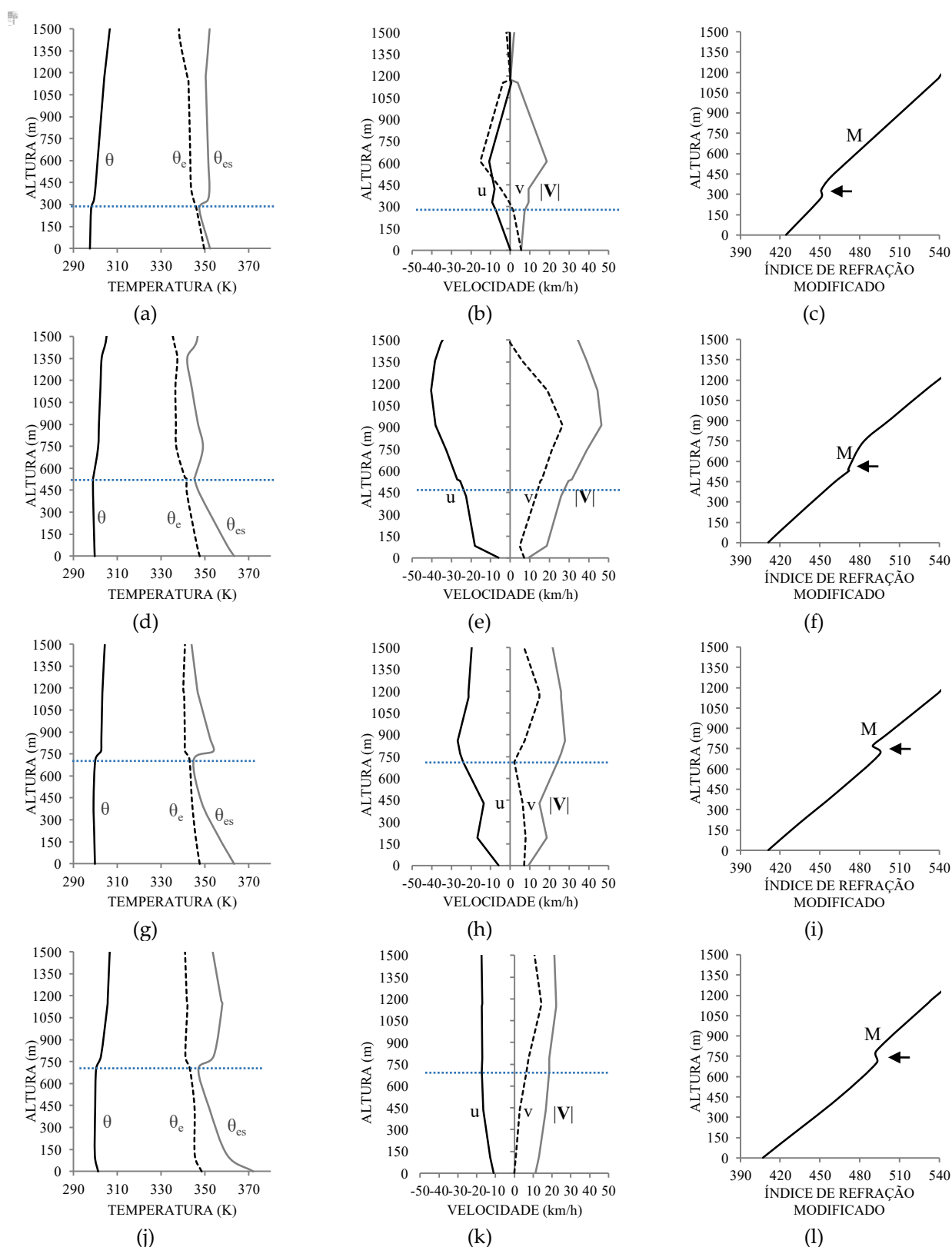


Figura 3 – Perfis verticais em situações de dutos elevados, na baixa troposfera, registrados em Petrolina-PE às 12 UTC dos dias 8 (a,b,c), 17 (d,e,f), 18 (g,h,i), 24 (j,k,l) de abril de 2014: (a,d,g,j) temperaturas potenciais, (b,e,h,k) componentes e intensidade do vento, e (c,f,i,l) índice de refração modificado. A linha pontilhada azul nos gráficos (a,b,d,e,g,h,j,k) indica o topo da CLP. A seta nos gráficos (c,f,i,l) assinala a camada de duto. A altura zero nos perfis está na altitude de Petrolina (370 m). A simbologia utilizada é vista em cada perfil.

No dia 24 (Figura 3 j,k,l) o duto ocorre associado a secagem da atmosfera acima do topo da CLP e com cisalhamento fraco do vento. Nesse dia, o teor de umidade na camada superficial é menor em comparação com os outros dias que apresentaram dutos no topo da CLP, e a atmosfera apresenta condições de neutralidade ($\partial\theta/\partial z \sim 0$, $\partial\theta_e/\partial z \sim 0$).

4 Conclusões

Neste estudo a estrutura da CLP é analisada para os dias com ocorrência de dutos na baixa troposfera no período de 1 a 29 de abril de 2014, na região de Petrolina-PE.

Na análise termodinâmica, foi encontrado que a ocorrência de dutos de superfície está associada com uma camada superficial com condição de alta instabilidade, enquanto que a ocorrência de dutos no topo da CLP (dutos elevados) está relacionada com redução do teor de umidade acima dessa camada.

Na análise de fatores dinâmicos foi constatado que a ocorrência de dutos de superfície está relacionada com aumento da intensidade do vento na camada superficial, enquanto que dutos no topo da CLP (dutos elevados) podem estar associados com máximos da intensidade do vento acima dessa camada, na baixa troposfera.

5 Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes), e a quarta autora ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos.

A segunda autora agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de Produtividade em Pesquisa – PQ (Processo Número 305029/2012-6).

Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGMet) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela possibilidade de realização desta pesquisa.

Referências

- BOLTON, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053.
- CHAVES FILHO, J. B.; CORREIA, M. F.; GURJÃO, C. D. S.; BARBIERI, L. F. P.; SILVA ARAGÃO, M. R. (2013). Formação de dutos troposféricos no semiárido brasileiro: Um estudo de caso em condições meteorológicas extremas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(4), 932-944.
- CORREIA, M. F.; BEZERRA, J. C.; BARBIERI, L. F. P.; SILVA ARAGÃO, M. R.; GONÇALVES, W. A. (2013). Mudanças no uso do solo e variações no padrão de refratividade atmosférica: Uma análise numérica e observacional na área do polo de irrigação Petrolina/Juazeiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(4), 919-931.
- DHEIN, R. N. (1975). Influências de dutos troposféricos nas ligações em visibilidade. 1975. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SOUSA, L. F. (2015). Análise multivariada das condições atmosféricas em mês chuvoso extremo na área de Petrolina, semiárido do Nordeste do Brasil. 2015. 88f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- SEIDEL, D. J.; AO, C. O.; LI, K. (2010). Estimating climatological planetary boundary layer heights from radiosonde observations: Comparison of methods and uncertainty analysis. *Journal of Geophysical Research*, 115(D16), D16113.
- STULL, R. B. (1991). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- THAYER, G. G. (1974). An improved equation for radio refractive index of air. *Radio Science*, 9(10), 803-807.

Dutos troposféricos e a estrutura da camada limite planetária na região de Petrolina

Tropospheric ducts and planetary boundary layer structure in the Petrolina region

Leandro Fontes de Sousa, Magaly de Fatima Correia, Maria Regina da Silva Aragão e Roberta Everllyn Pereira Ribeiro

Universidade Federal de Campina Grande

l.f.sousa@hotmail.com; magaly@dca.ufcg.edu.br; regina@dca.ufcg.edu.br; robertaeverllyn@hotmail.com

Resumo

A estrutura da camada limite planetária (CLP) é investigada com foco nos dias com ocorrência de dutos na baixa troposfera na região de Petrolina-PE, no período de 1 a 29 de abril de 2014. A identificação dos dutos e a estimativa do topo/altura da CLP e sua caracterização dinâmica e termodinâmica está fundamentada em dados de sondagens de ar superior realizadas às 12 UTC na estação de altitude de Petrolina. Os dutos de superfície estão associados com alta instabilidade e aumento da intensidade do vento na camada superficial. Os dutos no topo da CLP (dutos elevados) estão associados com uma redução do teor de umidade do ar e um máximo da intensidade do vento, acima da camada, na baixa troposfera.

Palavras-chave: Refratividade. CLP. Dutos de superfície. Dutos elevados. Petrolina.

Abstract

The planetary boundary layer (PBL) structure is investigated focusing on days with low-tropospheric ducts occurrence in the Petrolina-PE region, in the period from 1 to 29 April 2014. Ducts identification and the estimative of the PBL top/height and its dynamic and thermodynamic characterization is based on 12 UTC upper-air soundings launched at the altitude station of Petrolina. Surface ducts are associated with high instability and wind speed intensification in the surface layer. Ducts at the PBL top (elevated ducts) are associated with a decrease in the moisture content of the air and a wind speed maximum, above the PBL, in the low-troposphere.

Keywords: Refractivity. PBL. Surface ducts. Elevated ducts. Petrolina.