



Características de Dutos Atmosféricos de Superfície no Semiárido Brasileiro
Characteristics of Atmospheric Surface Ducts in the Brazilian Semiarid

Magaly de Fatima Correia; Maria Regina da Silva Aragão;
André Gomes Penaforte & Rodolpho Luiz Barros de Medeiros

*Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas,
Avenida Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, Brasil*
E-mails: magaly_correia@yahoo.com.br;

silva_aragao@yahoo.com.br; andrepenafortee@gmail.com; rodolpholuz42@gmail.com

Recebido em: 15/08/2018 Aprovado em: 23/10/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_375_381

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar como a atuação de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) pode influenciar a estrutura da camada limite atmosférica, e gerar condições favoráveis à formação de duto de superfície (DS). O cálculo do gradiente da refratividade, espessura e intensidade dos DS foi realizado com base em dados de sondagens atmosféricas realizadas no mês de janeiro, às 12 UTC, na estação de altitude de Petrolina-PE, no período de 2000 a 2014. Os resultados indicam que o número de DS é consideravelmente maior em meses com escassez de chuva. No mês de janeiro de 2004, extremamente chuvoso, os DS são menos intensos em comparação com aqueles observados em 2001 e 2007, dois anos caracterizados por uma grande redução no volume de chuva tipicamente observado no mês de janeiro. Na ausência de atividade convectiva intensa, a influência das condições atmosféricas locais torna-se dominante na formação de DS. A persistência e a posição geográfica de VCAN são fatores predominantes na formação de DS. Não foram encontradas evidências de uma relação entre a frequência de VCAN na região de estudo e mudanças significativas na espessura e/ou intensidade dos DS.

Palavras-chave: Gradiente de refratividade; Dutos de superfície; Vórtices ciclônicos de altos níveis; Semiárido brasileiro

Abstract

The objective in this work was to evaluate the influence of Upper Level Cyclonic Vortices (ULCV) upon the atmospheric boundary layer structure and the establishment of favorable conditions for surface duct (SD) formation. Refractivity gradient and SD thickness and intensity values were obtained with a basis on data of atmospheric soundings made in the month of January, at 12 UTC, at the altitude station of Petrolina-PE, in the period from 2000 to 2014. The results indicate that the number of SD is considerably higher in months with rainfall deficiency. In January 2004, an extremely rainy month, the SD are less intense in comparison with those observed in 2001 and 2007, two years characterized by a large reduction in the rainfall volume typically observed in the month of January. In the absence of intense convective activity, the influence of local atmospheric conditions becomes dominant in SD formation. The persistence and geographic position of ULCV are predominant factors in SD formation. No evidences were found of a relationship between the frequency of ULCV in the region of study and significant changes in the thickness and/or intensity of the SD.

Keywords: refractivity gradient; surface duct; Upper level cyclonic vortices; Brazilian semiarid

1 Introdução

Os avanços vivenciados no setor das telecomunicações motivaram um interesse desmedido pela utilização de sistemas de transmissão de dados e de produtos que incorporam a tecnologia sem fio. Comunicação por satélites, monitoramento com radares meteorológicos e auxílio à navegação por radar são exemplos de tecnologias utilizadas na geração de produtos usados no monitoramento ambiental que permitem a transmissão de dados e de outras informações sem a necessidade de cabos ou fios. No entanto, a qualidade das transmissões via rádio depende de características atmosféricas muitas vezes não consideradas em modelos de propagação teóricos e/ou empíricos. Condições de propagação anômala resultam de variações na refratividade atmosférica (N) decorrentes de mudanças no gradiente vertical da temperatura e/ou da pressão de vapor d'água. Esse comportamento é particularmente observado na camada limite atmosférica (CLA) cujas condições climáticas são constantemente influenciadas por mudanças ambientais decorrentes de processos de troca de energia entre a superfície e a atmosfera e/ou mudanças no padrão de circulação atmosférica.

Influências da circulação de grande escala na formação de dutos atmosféricos foram investigadas por vários autores (Rosenthal & Helvey, 1979; Helvey *et al.*, 1995; Von Engel & Teixeira, 2004; Chaves Filho *et al.*, 2013). Os resultados indicam um aumento na frequência desse fenômeno, principalmente associado com inversões de subsidência.

O objetivo deste trabalho é apresentar resultados de uma investigação sobre a ocorrência de dutos de superfície na região de Petrolina-PE em condições atmosféricas predominantemente caracterizadas pela atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN). O VCAN é um dos sistemas atmosféricos transientes em escala sinótica que atua no período úmido da Região Norte e Região Nordeste do Brasil, causando grande variabilidade nas características e distribuição espacial da nebulosidade e precipitação. Nem todas as áreas sob a influência de VCAN são impactadas com aumento no teor de umidade e ocorrência de chuvas intensas. Movimentos descendentes no centro do vórtice inibem o desenvolvi-

mento de nuvens precipitantes (Correia *et al.*, 2012; Loureiro *et al.*, 2006; Barbosa & Correia, 2005). Apesar da importância do conhecimento acerca de fatores associados com a formação de dutos atmosféricos de superfície, poucos trabalhos abordam esse tipo de fenômeno. Particularmente no caso da área semiárida da Região Nordeste, a maioria dos estudos realizados tem como foco principal a investigação de mecanismos associados com a formação de dutos elevados, muito comuns no período de estiagem. Uma das exceções é o trabalho desenvolvido por Sousa *et al.* (2016). Os autores investigaram a relação entre a estrutura da CLA e a formação de DS em casos extremos de precipitação em Petrolina-PE. Os resultados indicaram forte correlação entre os DS e o grau de instabilidade convectiva.

2 Material e Métodos

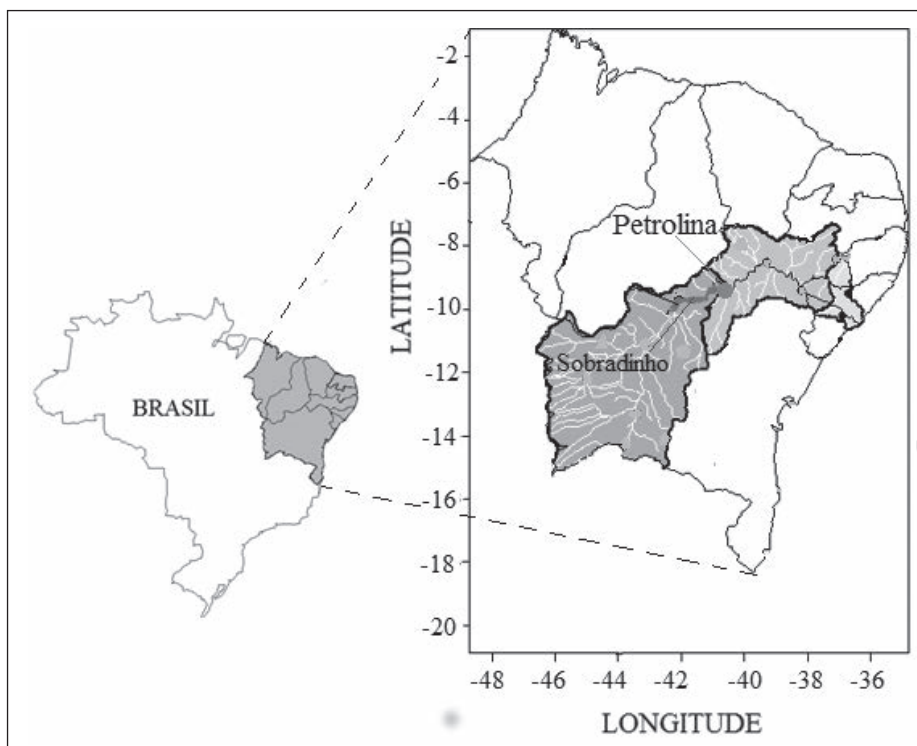
2.1 Área de Estudo

A cidade de Petrolina-PE (9°24'S, 40°29'W; 372m) está situada no Vale do Rio São Francisco, em área de clima tipicamente semiárido (Figura 1). Do ponto de vista climatológico, a atmosfera se caracteriza pelo domínio dos ventos alísios de sudeste e de inversões de subsidência decorrentes do domínio da alta subtropical do Atlântico Sul. No período úmido da região (novembro a abril) o regime dos ventos de sudeste é interrompido ou enfraquecido quando atuam sistemas atmosféricos que favorecem o desenvolvimento de sistemas convectivos e precipitação. Do ponto de vista local, o crescimento urbano e a expansão agrícola em áreas do bioma caatinga (vegetação nativa) estão entre as principais mudanças ambientais e com impacto no clima regional. O surgimento de vários perímetros de irrigação e a expansão agrícola no entorno do reservatório da Usina Hidrelétrica de Sobradinho alteraram substancialmente os processos de troca de água e energia entre a superfície e a atmosfera (Correia, 2001; Correia *et al.*, 2006; Santos & Buchmamm, 2010).

2.2 Dados e Procedimentos de Análises

O principal conjunto de dados utilizados nesta pesquisa foi obtido de 371 sondagens de ar superior realizadas no mês de janeiro, em Petrolina, no perí-

Figura 1. Localização geográfica e divisão política da Região Nordeste, destacando a porção nordestina da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (cinza), a cidade de Petrolina-PE (círculo vermelho) e o Lago de Sobradinho (azul). O Brasil e a Região Nordeste (cinza) estão representados no canto inferior esquerdo.



do de 2000 a 2014. Imagens de satélite GOES nos canais do infravermelho térmico e do vapor d'água, disponíveis na página eletrônica do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) foram utilizadas com o objetivo de analisar mudanças no padrão de nebulosidade. A relação entre a atuação de VCAN e a formação de dutos de superfície foi avaliada com base na utilização conjunta de imagens de satélite, dados de ar superior e registros pluviométricos.

Condições anômalas de propagação estão associadas com mudanças físicas na atmosfera. As características foram determinadas em função da variação vertical do índice de refração modificado, M , obtido pela equação 1,

$$M = N + \frac{Z}{R} \times 10^6 \quad \rightarrow \quad \frac{dM}{dZ} = \frac{dN}{dZ} + 0,157 \quad (1)$$

em que Z é a altura acima do nível médio do mar em (m), R é o raio médio da Terra em (m), e N é a refatividade dada pela equação 2 abaixo,

$$N = \frac{77,6}{T} \left(p + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (2)$$

em que T é a temperatura do ar em (K), p é pressão do ar em (hPa) e e é a pressão de vapor d'água

em (hPa). As ondas eletromagnéticas (EM) podem ser desviadas para baixo (para cima) se M decresce (aumenta) com a altura. Se o desvio em direção à superfície é muito grande, pode ocorrer o bloqueio do sinal ou propagação em dutos. Segundo Zhu & Atkinson (2004), o tipo de CLA mais favorável à formação de dutos atmosféricos é a camada limite marinha, particularmente quando há inversões térmicas em superfície.

Nas análises estatísticas foram considerados os quatro regimes de refração: sub-refração, refração normal, super-refração e confinamento (dutos). No entanto, enfoque especial foi dado à detecção de dutos, ou confinamento das EM, que ocorrem para $dM/dZ < 0$. De acordo com Turton *et al.* (1988), as camadas de confinamento ou aprisionamento das EM estão localizadas dentro e no topo de um duto. O duto é identificado facilmente pelo perfil de M , sendo definido como a camada em que essa variável é maior do que o valor mínimo no topo da camada de confinamento (CC). Os principais tipos de dutos são ilustrados no esquema apresentado na Figura 2.

A frequência e intensidade de DS foram determinadas para todos os anos com número signifi-

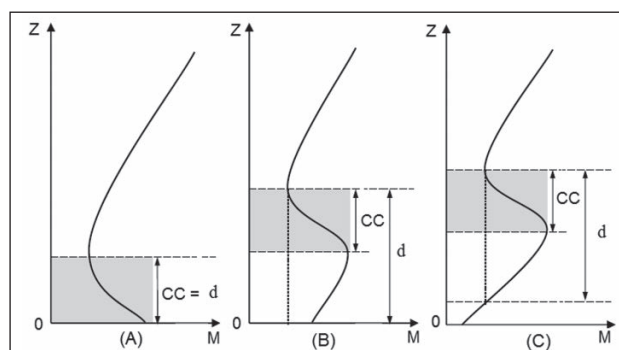


Figura 2. Tipos de duto classificados com base no perfil vertical do índice de refração modificado (M): (a) e (b) dutos de superfície (DS), (c) duto elevado. As áreas sombreadas na cor cinza indicam as camadas de confinamento (CC) ou aprisionamento das ondas eletromagnéticas. A espessura do DS é indicada por (d). Fonte: modificado de Lopez, 2009.

cativo de dias com sondagens atmosféricas ($\geq 60\%$) e registros simultâneos de precipitação. Com base nesse critério, os anos de 2002 e 2006 não foram incluídos nas análises estatísticas apresentadas neste trabalho. A intensidade dos dutos foi determinada através do quociente ($\Delta M/d$) em que (ΔM) é a diferença entre os valores de M na base e no topo da camada de confinamento e a espessura (d) do duto definida como a diferença entre a altura da base e do topo da camada de duto conforme indicado na Figura 2. O cálculo dessa variável permitiu avaliar variações no gradiente vertical de refratividade e sua relação com mudanças na estrutura da CLA.

3 Resultados

Num total de 371 sondagens realizadas no mês de janeiro, às 12 UTC, no período de 2000 a 2014, foram detectados 71 dutos de superfície (DS), dos quais 42% ocorreram nos anos de 2001 e 2007 (Tabela 1). O número de DS foi substancialmente mais elevado em meses caracterizados pela escassez de chuvas, a exemplo de janeiro de 2001 (14 DS), com apenas 9,6 mm acumulados em três dias, e janeiro de 2007 (15 DS), com 0,2 mm em um dia. Resultados semelhantes foram obtidos por Correia & Penaforte (2017).

A persistência e a posição geográfica do VCAN, principal sistema indutor de chuvas na *pré-estação chuvosa da Região Nordeste*, parecem representar fatores preponderantes na caracterização das mudanças no padrão de refração atmosférica e formação de DS. No entanto, não foram encontradas evidências de correlação entre

Ano	(DS) / (NS)	Episódios de VCAN	Dias com Chuva	Total mensal (mm)
2000	2/29	4	10	76,6
2001	14/23	3	3	9,6
2002	0/10	4	19	256,4
2003	5/31	4	10	134,4
2004	9/21	7	18	416,8
2005	6/31	4	9	35,5
2006	3/6	4	0	0
2007	15/29	6	1	0,2
2008	2/31	5	2	74,6
2009	3/28	6	4	40,4
2010	1/19	1	7	28,3
2011	1/20	5	6	62,2
2012	6/24	4	2	28,9
2013	3/30	3	4	30
2014	2/30	3	4	28,6

Tabela 1 Distribuição anual para o mês de janeiro do número de dutos de superfície (DS), de sondagens (NS), de episódios de VCAN, de dias com chuva e total mensal de chuva (mm).

a frequência de DS e o número de episódios de VCAN no período analisado.

A variação interanual, do percentual de ocorrências dos DS e da sua espessura média com os respectivos valores máximo e mínimo, observados no mês de janeiro, é apresentada na Figura 3. O percentual de ocorrências de DS foi calculado através do quociente entre o número de DS e o número de sondagens (NS) em cada mês. Esse percentual é visivelmente mais alto em meses com déficit de precipitação. Resultados semelhantes foram encontrados por Craig & Hayton (1995) e Mentis & Kaymaz (2007). Os autores mostram que os valores extremos observados nas variações sazonais do gradiente vertical do índice de refração modificado correspondem às estações seca e chuvosa das regiões analisadas. Portanto, convecção intensa e precipitação podem representar fatores inibidores da formação de DS.

Os anos de 2001 e 2007 se destacam, não apenas pelo alto percentual de ocorrência de DS, mas também pelos valores mais elevados de espessura de DS. Contudo, não foram encontradas evidências que indiquem uma relação entre a frequência de VCAN na região de estudo e mudanças significativas na espessura e/ou intensidade dos DS.

No mês de janeiro de 2001, a persistência dos VCAN sobre o continente inibiu o desenvolvimento de nuvens precipitantes no semiárido brasileiro. Características análogas foram observadas em janeiro

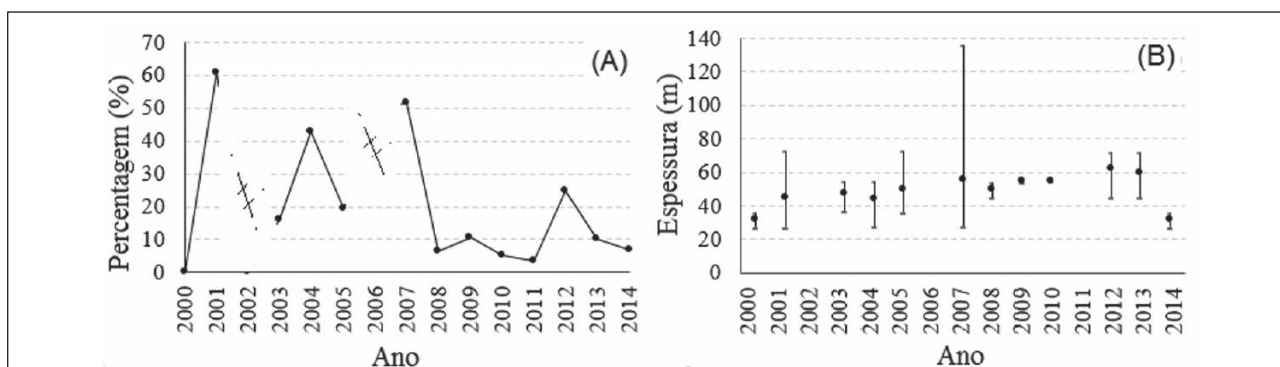


Figura 3 Variação interanual às 12 UTC no mês de janeiro, em Petrolina-PE: (a) do percentual de ocorrências de dutos de superfície (DS) e (b) da espessura média (m) dos DS. As barras indicam valores extremos (máximos e mínimos) da espessura média. Note a ausência de dados em 2002 e 2006.

de 2007. Apesar da ocorrência de chuvas intensas isoladas, os VCAN ocasionaram subsidência e redução da precipitação devido a sua posição geográfica na região de estudo (Gurjão *et al.*, 2012). No entanto, é importante ressaltar que, apesar do aumento substancial na frequência de DS verificado em períodos secos, o fenômeno também ocorre em condições de instabilidade convectiva e precipitação (Sousa *et al.*, 2016). Este resultado indica que mecanismos locais podem contribuir para o desenvolvimento dos DS.

A variabilidade diária na intensidade dos DS observada nos meses de janeiro de 2001, 2003, 2004, e 2007 é apresentada na Figura 4. Verifica-se que em janeiro de 2004, mês extremamente chuvoso e caracterizado por vários episódios de VCAN, os DS são menos intensos em comparação com aqueles observados nos anos de 2001 e 2007. A influência conjunta do posicionamento de VCAN sobre o Oceano Atlântico e da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) foi determinante no aumento da atividade convectiva, principalmente a partir do dia 10 de janeiro. Segundo Correia *et al.* (2012), as chuvas abundantes e inundações registradas em janeiro de 2004 resultaram da atuação conjunta de circulações atmosféricas locais e de escala sinótica.

Os DS identificados nos dias 19 de janeiro de 2004 e 26 de janeiro de 2007 (Figura 5b) se desenvolveram numa atmosfera potencialmente instável próximo à superfície ($\partial\theta_e/\partial z < 0$, $\partial\theta_{es}/\partial z < 0$) como pode ser visto na Figura 5c, d. A queda acentuada da umidade com a altura nos dois casos (chuvoso e seco) consistiu no fator preponderante para o desenvolvimento dos DS (Figura 5a).

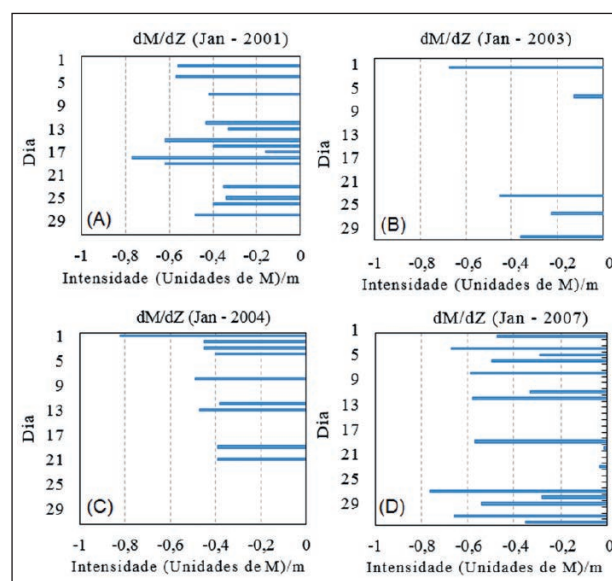


Figura 4 Variação diária da intensidade em (unidades de M) / (m) de dutos de superfície (DS) em Petrolina-PE, às 12 UTC no mês de janeiro de: (a) 2001, (b) 2003, (c) 2004 e (d) 2007.

A diferença significativa na profundidade da camada de mistura (CM), observada nos perfis verticais da temperatura potencial (θ) dos dias 19 de janeiro de 2004 e 26 de janeiro de 2007 (Figura 5c, d), reflete a existência de estruturas convectivas distintas na CLA quando considerados episódios chuvosos e secos. Nota-se que, independentemente do posicionamento do VCAN e, por conseguinte, das mudanças na atividade convectiva e percentual de nuvens, é possível a ocorrência de DS no mês de janeiro. No entanto, conforme mencionado anteriormente, a frequência de DS aumenta substancialmente em casos de redução da nebulosidade associada com movimentos descendentes no centro de VCAN.

Nesses casos há maior incidência de radiação solar e maior evaporação em superfície, o que produz uma queda acentuada da umidade com a altura, causando variações anômalas na refratividade.

O aquecimento da superfície e o transporte de umidade pelo campo turbulento do vento são importantes na caracterização da estrutura termodinâmica da atmosfera na CLA e, conseqüentemente, na estratificação vertical do vapor d'água e formação dos DS. Gradientes horizontais de temperatura associados com descontinuidades em superfície intensificados por ações antrópicas amplificam efeitos locais na região de estudo. Correia *et al.* (2013), através de simulações numéricas com o modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), investigaram mudanças no padrão de refratividade decorrentes de intervenções no regime hidrológico do Rio São Francisco. Os autores mostram que descontinuidades na cobertura vegetal e na umidade do solo na área da Usina Hidrelétrica de Sobradinho representam fatores importantes para a variabilidade das condições atmosféricas em escala local e podem causar distorções na propagação e intensidade de sinais radioelétricos.

Num estudo recente sobre a influência da brisa lacustre na refração atmosférica, Correia *et al.* (2015) verificaram que a interação da brisa lacustre na região do Lago de Sobradinho com movimentos convectivos gerados pelo aquecimento diurno favorece o transporte horizontal e vertical de umidade

dos níveis próximos à superfície, variações no gradiente vertical de refratividade e formação de DS.

Esses resultados indicam que, na ausência de atividade convectiva intensa e desenvolvimento de nuvens profundas, a influência das condições atmosféricas locais torna-se dominante. Portanto, em períodos nos quais o regime de precipitação e o padrão de nebulosidade são modulados pela atuação de vórtices ciclônicos de altos níveis, a influência local varia conforme a posição geográfica dos VCAN. Resultados análogos foram encontrados por Kaissassou *et al.* (2014) em estudo sobre a formação de dutos de superfície durante o verão na região de Istanbul. Os autores mencionam a importância relativa da sazonalidade e de fatores locais no desenvolvimento de DS.

4 Considerações Finais e Conclusões

A comprovação da ocorrência de dutos de superfície na região de estudo indica a possibilidade de interferências significativas na estimativa do campo de precipitação feita através de dados obtidos com o radar meteorológico de Petrolina e, conseqüentemente, decisões incorretas no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos da região, já que o princípio de funcionamento dos radares se baseia na propagação de ondas eletromagnéticas (EM) na faixa de micro-ondas.

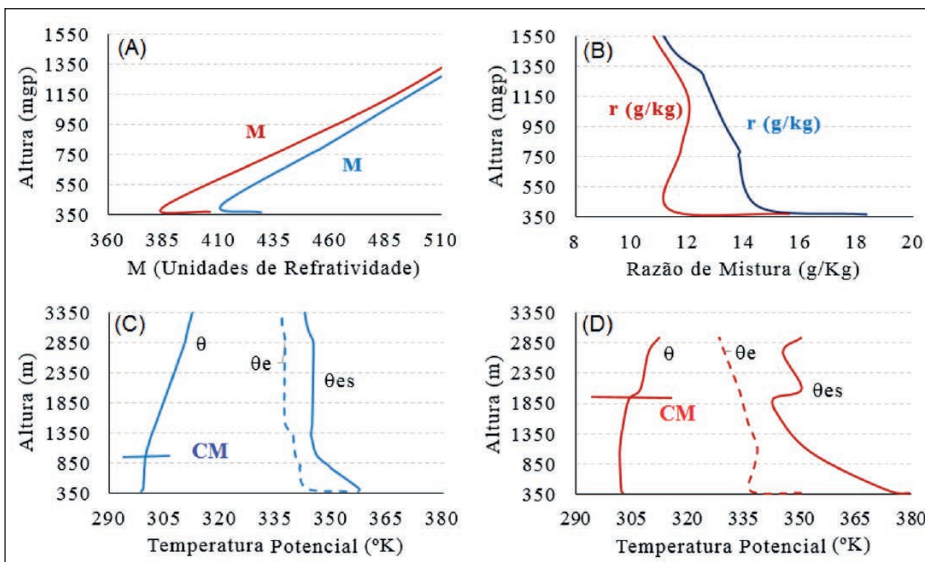


Figura 5 Perfis verticais em Petrolina-PE às 12 UTC de 19 de janeiro de 2004 (azul) e 26 de janeiro de 2007 (vermelho): (a) índice de refração modificado (M) em (unidades de refratividade), (a) razão de mistura (r) em (g/kg), (c,d) temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e) e temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es}) em (K). O topo da camada de mistura (CM) é indicado pela linha horizontal em (c) e (d).

Os resultados de maior relevância encontrados no desenvolvimento deste estudo são:

O número de dutos de superfície foi substancialmente mais elevado em meses de janeiro caracterizados pela escassez de chuvas;

Num total de 371 sondagens realizadas no mês de janeiro, às 12 UTC, no período de 2000 a 2014, foram detectados 71 dutos de superfície (DS), dos quais 42% ocorreram nos anos de 2001 e 2007;

No mês de janeiro de 2004, extremamente chuvoso, os DS são menos intensos em comparação com aqueles observados em 2001 e 2007, dois anos caracterizados por uma grande redução no volume de chuva tipicamente observado no mês de janeiro.

Não foram encontradas evidências de uma relação entre a frequência de VCAN na região de estudo e mudanças significativas na espessura e/ou intensidade dos DS;

A persistência e a posição geográfica de VCAN representam fatores predominantes na caracterização das mudanças no padrão de refração atmosférica e formação de dutos em superfície no período analisado;

Nos meses em que o regime de precipitação e o padrão de nebulosidade na região de estudo são modulados pela atuação de VCAN, a influência de fatores locais na ocorrência de DS pode ser dominante, porém varia com a posição geográfica dos vórtices.

5 Referências

Barbosa, T.F. & Correia, M.F. 2005. Sistemas Convectivos Intensos no Semiárido Brasileiro: O Controle da Grande Escala. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(3): 273-285.

Bezerra, J.C. 2007. *Mudanças Ambientais e Alterações no Padrão de Refratividade Atmosférica: Uma Análise Numérica da Influência Antrópica na Baía do Rio São Francisco*. Curso de Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Trabalho de Conclusão de Curso, 36p.

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: 932-994.

Correia, M.F. 2001. *Impacto das Ações Antrópicas no Clima do Submédio do Rio São Francisco: Um Estudo Numérico e Observacional*. Programa de Pós-graduação em Meteorolo-

gia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 181p.

Correia, M.F.; Silva Dias, M.A.F. & Silva Aragão, M.R. 2006. Soil Occupation and Atmospheric Variations over Sobradinho Lake Area. Part Two: A Regional Modeling Study. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 94: 115-128. DOI: 10.1007/s00703-005-0174-3.

Correia, M.F.; Penaforte, A.G.; Medeiros, R.L.B.; Silva Aragão, M.R. 2015. Influência da Brisa Lacustre na Refração Atmosférica: Uma Análise Numérica de Cenários Hidrológicos Extremos na Região da Hidrelétrica de Sobradinho – BA. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 2, Campina Grande, 2015. n.p.

Correia, M.F.; Bezerra, J.C.; Barbieri, L.F.P.; Gonçalves, W.A. & Silva Aragão, M.R. 2012. 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: 919-931.

Gurjão, C.D.S.; Correia, M.F.; Chaves Filho, J.B. & Silva Aragão, M.R. 2012. Influência do ENOS (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: Uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4: 774-790.

Helvey, R.; Rosenthal, J.; Eddington, L.; Greiman, P. & Fisk, C. 1995. Use of Satellite Imagery and other Indicators to Assess Variability and Climatology of Oceanic Elevated Ducts. In: AGARD/NATO CONFERENCE 567 ON PROPAGATION ASSESSMENT IN COASTAL ENVIRONMENTS, Bremerhaven, 1995. *Proceedings*, Bremerhaven, NATO, 33: p. 1-14.

Kaissassou, S.; Lenou, A.; Tchawoua, T.; Lopez, P. & Gaye, A.T. 2015. Climatology of Radar Anomalous Propagation Over West Africa. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 123: 1–12. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.11.009.

Lopez, P. 2009. A 5-yr 40-km-Resolution Global Climatology of Superrefraction for Ground-Based Weather Radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48: 89-110.

Loureiro, R.S.; Gomes, R.G. & Rocha, E.J.P. 2006. Análise de uma Linha de Instabilidade Costeira na Região Leste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21(3): 258-270.

Penaforte, A.G. & Correia, M.F. 2017. Uma Análise da Relação entre Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis e Formação de Dutos Atmosféricos de Superfície na Área do Aeroporto de Petrolina-PE. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFCG, Campina Grande, 2017. n.p.

Rosenthal, J. & Helvey, R. 1979. Some Synoptic Considerations Relative to the Refractive Effects Guidebook (REG). Naval Ocean Systems Center Tech. Doc. 260, San Diego, California. 167 p.

Santos, I.A. & Buchmann, J. 2010. Uma Revisão Qualitativa Enfatizando Aspectos Climáticos da Amazônia e da Região Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 33: 09-23.

Silva Aragão, M.R.; Mendes, M.C.D.; Cavalcanti, I.F.A. & Correia, M.F. 2007. Observational Study of a Rainy January Day in the Northeast Brazil Semi-arid Region: Synoptic and Mesoscale Characteristics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133: 1127–1141.

Sousa, L.F.; Correia, M.F.; Silva Aragão, M.R. & Ribeiro, R.E.P. 2016. Dutos Troposféricos e a Estrutura da Camada Limite Planetária na Região de Petrolina. *Revista Ciência e Natura*, 38: 318-325.

Turton, J.D.; Bennets, D.A. & Farmer, S.F.G. 1988. An Introduction to Radio Ducting. *Meteorological Magazine*, 117: 245-254.

Von Engeln, A. & Teixeira, J. 2004. A Ducting Climatology Derived from the European Centre Medium-Range Weather Forecasts Global Analysis Fields. *Journal of Geophysical Research*. 109: 1703-1713.