



Estudo das estruturas coerentes na CLA clara por radar Doppler

Paulo Roberto Pelufo Foster

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

ABSTRACT

The evaluation of the respective role played by the coherent structures and the turbulence in the vertical transport within the atmospheric boundary layer was the scientific objective of the TRAC experiment, the experimental framework of this study, that made use in June 1993 of coordinated aircraft-radar measurements. The analyzed cases of ABL showed that the radar was able to provide a coherent and continuous representation of the meteorological fields over a horizontal range of several tens of kilometers and vertically up to 2.5 km, i.e., well beyond the top of ABL. Coherent structures appeared as a common feature of the ABL under study and not as an exception. From radar measurements we found in particular that turbulent scales of the inertial sub-range were modulated by the coherent structures. The capability of the detection of weather cumulus located at the top of the ABL show that the radar is able to provide a description of the entire ABL including the processes in the entrainment zone.

INTRODUÇÃO

A camada limite atmosférica (CLA) é de extrema importância na compreensão da circulação geral da atmosfera e dos processos de formação das precipitações. É nesta fina camada que se estende da superfície até aproximadamente 2 km de extensão que se efetua a maior parte das transferências de calor, de quantidade de movimento e de umidade que alimentam a máquina térmica da atmosfera.

No plano experimental, o estudo da CLA foi beneficiado de uma instrumentação muito variada e que foi adaptada à análise dos diversos processos físicos. Na maioria dos estudos de CLA, os instrumentos utilizados foram as *torres instrumentadas* (LeMone, 1973; Kaimal et al., 1976; Smedman, 1991), *balões cativos* (Kitchen e Caughey, 1981), *aviões instrumentados* (LeMone, 1973; Pennell e LeMone, 1974; Druilhet et al., 1985) e *radar* (Rabin e Zrnica, 1980; Rabin et al., 1982; Kropfli, 1983; Frisch, 1990; Foster, 1996), ou então, a utilização em conjunto de dois ou mais instrumentos (Kaimal et al., 1982; Campistron et al., 1995; Lohou et al., 1995).

No entanto, a aproximação estatística tradicional da CLA considera que as transferências verticais resultam de um processo turbulento de pequena escala (< 1 km) e em consequência ignora implicitamente o impacto das circulações coerentes tais como as células térmicas e os rolos dinâmicos que alimentam os movimentos turbulentos e participam numa escala maior (> 1 km) da transferência vertical global. A utilização do radar Doppler em estudos da camada limite atmosférica (CLA) proporciona a observação simultânea de fenômenos sobre uma superfície de 100 à 200 km² no interior da camada. Este interesse de utilizar as observações obtidas por radar meteorológico para descrever os elementos da CLA tem sido demonstrado pelos trabalhos de Hardy e Ottersen (1969), Konrad (1970) e Kuettner (1971).

O EXPERIMENTO TRAC

O estudo da turbulência e das estruturas coerentes na CLA foram o tema do experimento de campo TRAC (Turbulência-Radar-Avião-Células) realizado na planície de Beauce, França, durante o mês de junho de 1993. Esta região, distante aproximadamente 80 km à sudoeste de Paris, tem um relevo particularmente plano e homogêneo, com uma altitude média de 140 m, e está distante algumas centenas de quilômetros de grandes maciços montanhosos e de zonas marítimas. Num raio de uma cinquentena de quilômetros ao redor da instalação do radar, a região é destinada a cultura de cereais e não contém aglomerações urbanas ou florestas. O baixo desnível do solo (ao redor de 30 metros sobre uma distância horizontal de 25 km) permitiu que fossem realizadas observações de radar em baixos níveis (≈ 100 m) com um mínimo de perturbações ou ecos de solo.

O dispositivo instrumental do experimento TRAC foi baseado sobre as observações simultâneas de um radar meteorológico Doppler de banda-C (comprimento de onda de 5,4 cm) e um avião instrumentado (dinâmica, termodinâmica, fluxos radiativos, microfísica e índice de refração do ar), complementados por uma estação meteorológica automática de superfície. O radar coletava dados continuamente, em seqüências repetitivas de 5 minutos, consistindo de 15-30 varreduras do tipo PPI (Plan Position Indicator) feitas em diferentes ângulos de elevação de 0,5° até 50° com resolução em azimute de 0,9° e amostragem radial de 400 metros. O primeiro passo no processamento de dados foi o de remover os ecos de superfície e outras medidas errôneas. Então para cada seqüência radar, parâmetros do fluxo de mesoescala foram derivadas usando o método VVP (Waldteufel e Corbin, 1979) e o método TVP adaptado para atmosfera clara (Foster, 1996), considerando a hipótese de linearidade local do campo médio de vento e a homogeneidade horizontal da turbulência.

METODOLOGIA DE RESTITUIÇÃO DOS PARÂMETROS TURBULENTOS

Da definição de velocidade radial Doppler V_r , para cada ponto localizado em relação ao radar pelo azimute β , pela elevação θ e a distância radial r , a velocidade do ar tem por componentes (u,v,w) num sistema cartesiano (x,y,z) tendo como origem o radar, podemos escrever para cada ponto :

$$V_r(r,\theta,\beta) = u(x,y,z) \sin \beta \cos \theta + v(x,y,z) \cos \beta \cos \theta + w(x,y,z) \sin \theta \quad (1)$$

onde as componentes do vento bem como a velocidade radial são implicitamente funções do tempo. A convenção utilizada aqui é de que a velocidade radial é positiva para movimentos que se afastam do radar. Numa primeira etapa, em cada ponto de medida radar, é calculado a velocidade radial média.

A diferença entre a velocidade radial média calculada e a velocidade radial efetivamente medida (equação (1)) no mesmo ponto, fornece o desvio V'_r que está ligado a flutuações turbulentas do campo de velocidade (u', v', w') . Finalmente, elevando ao quadrado a equação de V'_r e tomando a média, obtém-se:

$$\begin{aligned} \overline{V_r'^2}(x,y,z) = & \left(\overline{u'^2} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial z} \Delta z \right) \sin^2 \beta \cos^2 \theta + \left(\overline{v'^2} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial z} \Delta z \right) \cos^2 \beta \cos^2 \theta \\ & + \left(\overline{w'^2} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \Delta z \right) \sin^2 \theta + \left(\overline{u'v'} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial z} \Delta z \right) \sin 2\beta \cos^2 \theta \\ & + \left(\overline{u'w'} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \Delta z \right) \sin \beta \sin 2\theta + \left(\overline{v'w'} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \Delta z \right) \cos \beta \sin 2\theta + \eta_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Da mesma maneira, calculando a refletividade média \overline{Z} e subtraindo em cada ponto a refletividade medida Z obtém-se:

$$\begin{aligned} \overline{Z'V'_r}(x,y,z) = & \left(\overline{Z'u'} + \frac{\partial \overline{Z'u'}}{\partial z} \Delta z \right) \sin \beta \cos \theta + \left(\overline{Z'v'} + \frac{\partial \overline{Z'v'}}{\partial z} \Delta z \right) \cos \beta \cos \theta \\ & + \left(\overline{Z'w'} + \frac{\partial \overline{Z'w'}}{\partial z} \Delta z \right) \sin \theta + \eta_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Nestas equações, é suposto que os parâmetros médios da turbulência tenham uma variação linear ao longo da vertical em cada volume de tratamento elementar. Por outro lado, os valores das variâncias e das covariâncias (supostas independentes em x, y) foram tomadas no centro destes volumes elementares. Do mesmo modo que para o VVP, estas duas equações são resolvidas por ajustamento dos mínimos quadrados, o que permite obter os perfis verticais dos seguintes parâmetros turbulentos:

$$\begin{bmatrix} \overline{u'^2}, \overline{v'^2}, \overline{w'^2} \\ \overline{u'v'}, \overline{u'w'}, \overline{v'w'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial \overline{u'^2} / \partial z, \partial \overline{v'^2} / \partial z, \partial \overline{w'^2} / \partial z \\ \partial \overline{u'v'} / \partial z, \partial \overline{u'w'} / \partial z, \partial \overline{v'w'} / \partial z \end{bmatrix} \quad (4)$$

ou seja, do tensor de Reynolds e suas derivadas verticais, equação (4), e os fluxos turbulentos de refletividade e suas derivadas verticais, equação (5).

$$\begin{bmatrix} \overline{Z'u'}, \overline{Z'v'}, \overline{Z'w'} \\ \partial \overline{Z'u'} / \partial z, \partial \overline{Z'v'} / \partial z, \partial \overline{Z'w'} / \partial z \end{bmatrix} \quad (5)$$

Nas equações (8) e (9) são utilizadas os valores $\overline{V_r'^2}$ e $\overline{Z'V'_r}$ enquanto que o radar, nos dá, em cada ponto, somente os valores de $V_r'^2$ e $Z'V'_r$. De fato, é o ajustamento aos mínimos quadrados que realiza o processo de média. Foi possível verificar, utilizando um valor médio de $V_r'^2$ calculado sobre uma dezena de pontos contíguos em azimute (mesmas distâncias e mesmas elevações). O resultado foi quase idêntico que $V_r'^2$ ou $Z'V'_r$ diretamente.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O conjunto de seqüências volumétricas observadas pelo radar durante o experimento foram sistematicamente objeto de estudos em planos horizontais e planos verticais. A análise deste conjunto de campos de refletividade mostraram que a organização dos ecos na baixa atmosfera poderiam ser reduzidos a um pequeno número de estruturas.

As três principais estruturas de refletividade observadas em ar claro no interior da CLA são:

- *bandas de nuvens*: as bandas são alinhadas ao longo do vento e tendo espaçamento médio de 4 km. Foram detectadas, principalmente, no fim da manhã antes do início da convecção térmica, com uma persistência não excedendo mais do que uma hora;
- *células fechadas*: se apresentavam como um amontoado de nuvens sem orientação privilegiada e de uma dimensão compreendida entre 5 e 10 km, com o máximo de refletividade aparecendo ao centro das células. Geralmente apareciam no início da tarde, durante o período de desenvolvimento da convecção térmica;

• *células abertas*: estruturas intermediárias entre bandas e células fechadas, formam um mosaico de anéis com maiores valores de refletividade nas bordas. Este tipo de organização se assemelha as células térmicas de Bénard. A Figura 1, apresenta planos horizontais (a, b) e planos verticais (c, d) de refletividade. A Figura 1 (a) mostra três ruas de nuvens paralelas ao vento médio, que são características das organizações em banda da CLA. As células de nuvens isoladas da Figura 1 (b) são equivalentes as células fechadas encontradas na CLA. Os planos verticais associados colocam em evidência a ligação entre a camada de nuvens e a organização adjacente da CLA (Figura 1 (c, d)), através das térmicas, visualizadas por chaminés verticais que se elevam a partir da superfície. Esta organização em células ou rolos, introduz nos campos atmosféricos uma inhomogeneidade de escala interna de alguns quilômetros.

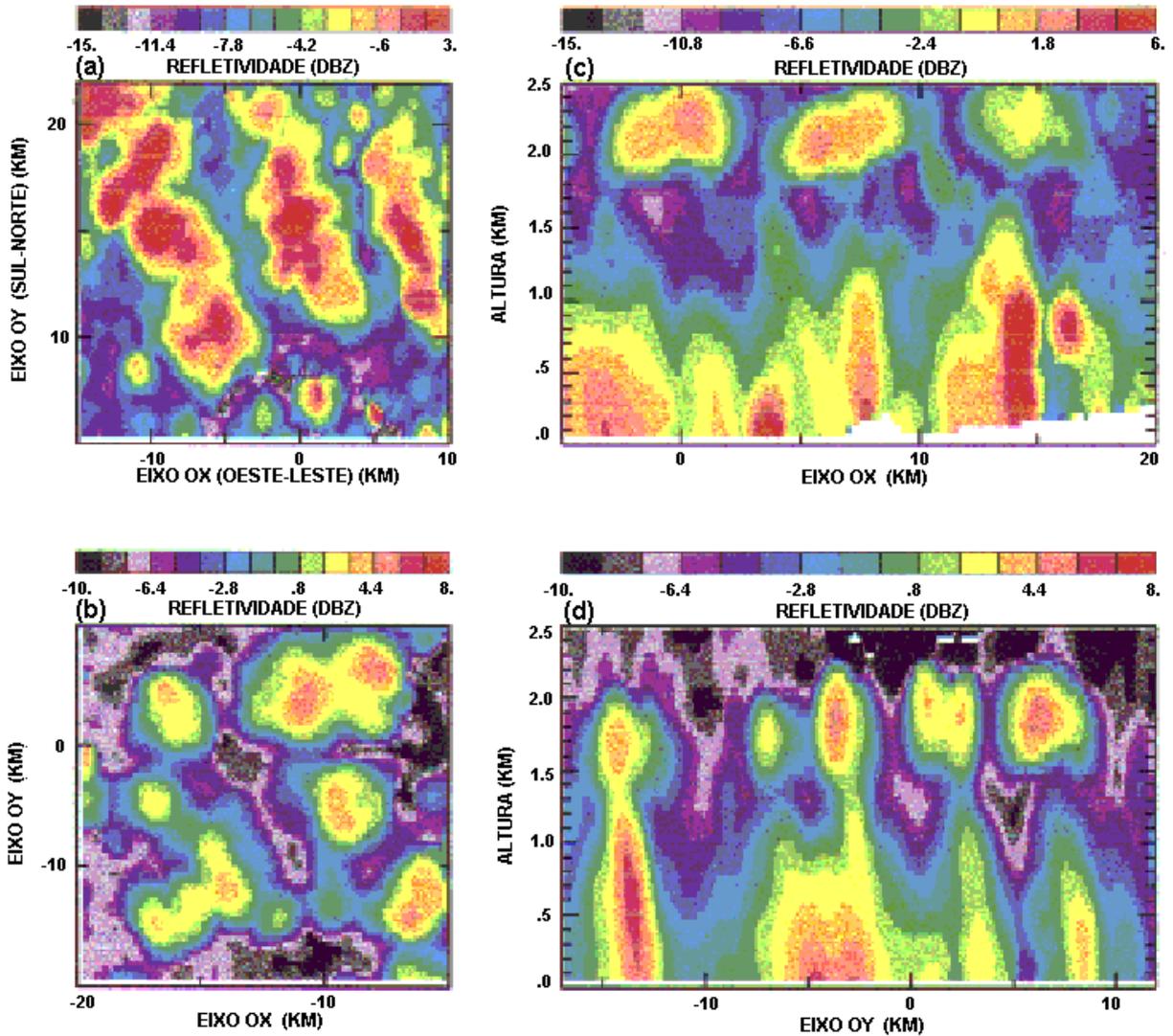


Figura 1 – Planos horizontais de refletividade obtidos ao nível da camada de nuvens à 2,2 km de altura (24 de junho – 14h38) (a) e à 1,8 km de altura (23 de junho – 12h52) (b). Para cada plano horizontal é associado um corte vertical, obtido na mesma situação (c, d).

Analisando os campos de refletividade, podemos constatar que as perturbações induzidas pelas estruturas coerentes são relativamente importantes com uma amplitude variando entre -2 e 2 ms^{-1} . Entretanto, nenhuma organização estava aparente na cinemática dos campos. Isto acontece porque a velocidade radial é uma quantidade difícil de interpretar, e, porque ela não representa que uma componente da velocidade do vento, função ela mesma da direção de visada.

CONCLUSÕES

Um dos mais importantes resultados obtidos durante o experimento TRAC, é que as organizações coerentes foram observadas como uma ocorrência comum na CLA e não como uma exceção. Conclui-se também, que as escalas turbulentas no sub-domínio inercial são moduladas pelas estruturas coerentes. Durante o dia, as organizações evoluíram rapidamente como alinhamentos em forma de rolos ao longo do vento ou como campos de células de escala interna de 3 à 5 km.

Verticalmente, estas estruturas apareciam como plumas verticais de forte refletividade associadas com os pequenos

cumulos formados no topo da camada limite atmosférica. A possibilidade de detectar este tipo de nuvens é uma aquisição muito importante para descrever a CLA através das observações realizadas por radar. À partir das medidas obtidas, foi possível mostrar que as escalas turbulentas do domínio inercial são moduladas pela presença de estruturas coerentes (anisotropia das variâncias).

REFERÊNCIAS

- Campistron, B., F. Lohou, A. Druilhet and P. Foster, 1995, *Investigation on the dynamics of organized clear air planetary boundary layer with Doppler radar and aircraft measurements*. 27th Conference on Radar Meteorology, 9-13 Octobre, Vail, CO, USA. Preprints, American Meteorological Society, 826-828.
- Lohou, F., A. Druilhet, P. Foster and B. Campistron, 1995, *Measurements of C in the lower atmosphere with an airborne refractometer. Comparison with simultaneous Doppler radar observations*. 27th Conference on Radar Meteorology, 9-13 Octobre, Vail, CO, USA. Preprints, American Meteorological Society, 290-292.
- Druilhet, A., D. Guédalia and J. Noilhan and C. Charpentier, 1985, *Applications de moyens aéroportés à l'étude d'un panache*. *J. Rech. Atmos.*, 19, 369-398.
- Foster, P.R.P., 1996, *L'étude des couches limites organisées en air clair par radar Doppler*. Tese de Doutorado, Université Paul Sabatier.
- Frisch, A.S., 1990, *On the measurement of second moments of turbulent wind velocity with a single Doppler radar over non-homogeneous terrain*. *Bound.-Layer Meteor.*, 54, 29-39.
- Hardy, K.R. and H. Ottersen, 1969, *Radar investigation of convective patterns in the clear atmosphere*. *J. Atmos. Sci.*, 26, 666-672.
- LeMone, M.A., 1973, *The structure and dynamics of horizontal roll vortices in the planetary boundary layer*. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1077-1091.
- Kaimal, J.C., J.C. Wingaard, D.A. Haugen, O.R. Cote, Y. Izumi, S.J. Caughey and C.J. Readings, 1976, *Turbulence structure in the convective boundary layer*. *J. Atmos. Sci.*, 32, 2152-2163.
- Kitchen, M. and S.J. Caughey, 1981, *Thetered ballon observations of the structure of small cumulus cloud*. *Quart. J.R. Soc.*, 27, 282-308.
- Konrad, T.G., 1970, *The dynamics of the convective process in the clear air as seen by radar*. *J. Atmos. Sci.*, 27, 1138-1147.
- Kropfli, R.A., 1983, *A review of microwave radar observations in the dry convective planetary boundary layer*. *Bound.-Layer Meteor.*, 26, 51-67.
- Kuettner, J.P., 1971, *Cloud band in the earth's atmosphere*. *Tellus*, 23, 404-425.
- Pennell, W.T., and M.A. LeMone, 1974, *An experimental study of turbulence structure in the fair-weather trade wind boundary layer*. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1308-1323.
- Rabin, R. and D. Zrníc, 1980, *Subsynoptic-scale vertical wind revealed by dual Doppler radar and VAD analysis*. *J. Atmos. Sci.*, 37, 644-654.
- Rabin, R.H., R.J. Doviak and A. Sundara-Rajan, 1982, *Doppler radar observations of momentum flux in a cloudless convective layer with rolls*. *J. Atmos. Sci.*, 39, 851-863.
- Smedam, A.-S., 1991, *Ocurrence of rolls circulations in a shallow boundary layer*. *Bound.-Layer Meteor.*, 57, 343-358.
- Waldteufel, P. and H. Corbin, 1979, *On the analysis of single Doppler data*. *J. Appl. Meteor.*, 18, 532-542.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo financiamento desta pesquisa (Projeto 97-0800.7).