Tethys, 4, 33–43, 2007
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2007.4.05

Revista editada per **ACAM**
(Associació Catalana de Meteorologia)

Estudi de tres períodes temporals ben diferenciats en una nit estable

M. Vich, M. A. Jiménez i J. Cuxart

Grup de Meteorologia, Departament de Física, Universitat de les Illes Balears. Cra. Valldemossa, km. 7.5, 07122, Palma de Mallorca

Rebut: 12-VI-2007 – Acceptat: 7-XII-2007 – **Versió Original**

Correspondència a: mar.vich@uib.es

Resum

L'estudi d'una nit establement estratificada de la campanya experimental SABLES-98 permet dividir-la en tres parts ben diferenciades: una primera de transició, amb canvis significatius en totes les variables fins a l'establiment d'un règim quasi-estacionari; una segona part dominada pel refredament radiatiu superficial i una tercera part sense canvis significatius. Cadascuna d'aquestes parts s'estudia per separat, avaluant les característiques dels perfils verticals, la turbulència, els espectres i les funcions de densitat de probabilitat.

1 Introducció

La Capa Límit Atmosfèrica (CLA) és la part de la troposfera directament influïda per la presència de la superfície terrestre en escales temporals relativament curtes -de l'ordre d'una hora-. Els factors que la governen són el tèrmic (escalfament o refredament de la superfície) i el dinàmic, donat per la interacció del vent i la superfície. De dia, ambdós factors són normalment productors de mescla turbulenta mentre que de nit l'estratificació tèrmica estable inhibeix la producció dinàmica de turbulència generada per cisalla de vent. En nits serenes amb poc vent d'origen sinòptic o mesoescalar, el refredament radiatiu superficial pot ser important i l'absència de vent general configura un règim sense turbulència sostinguda, amb importants gradients verticals de les variables meteorològiques i l'establiment de circulacions locals degudes a les diferències tèrmiques superficials.

Aquest règim, denominat CLA fortament Estratificada (CLE) presenta encara moltes dificultats de caracterització. La predominança dels efectes locals fa que sigui difícil de generar teories o expressions de caràcter general. A més, les observacions mostren que la CLE no es comporta de forma estacionària, sinó que hi ha uns certs patrons de comportament segons els moments de la nit (Cuxart et al., 2007, p.e.). En els casos estudiats pel nostre grup, el pas del règim diürn al nocturn implica un període de reajustament a primera hora de la nit, sovint amb establiment de circulacions locals a baixa altura, marcades per màxims de vent freqüentment corresponents a fluxos catabàtics. Després s'estableix un règim quasi-estacionari amb fort refredament superficial, que sol acabar amb un episodi de mescla intens i breu, seguit d'una evolució posterior amb canvis de menor magnitud en la temperatura i el vent, gairebé sense tendència.

Tot i que encara no podem justificar del tot el perquè d'aquest patró, ja que les suposicions que podem fer es basen en evidències indirectes o simulacions numèriques, sí que podem caracteritzar-ne les evolucions mitjançant l'anàlisi de les dades disponibles.

En aquest treball analitzarem una nit de SABLES-98, campanya que descriurem breument en l'apartat 2. En les seccions següents es comentaran les característiques de cada part de la nit, i s'extrauran finalment unes conclusions i unes guies per orientar les següents passes de recerca a fer sobre aquest tema.

2 Dades experimentals i tractament

La campanya experimental SABLES-98 (Stable Atmospheric Boundary Layer Experiment in Spain) es va dur a terme al CIBA (Centro de Investigación de Baja Atmósfera), prop de Valladolid, entre els dies 10 i 28 de setembre de 1998. El seu objectiu principal fou el d'estudiar i entendre els fenòmens que es desenvolupen a la CLE a latituds mitjanes. Per això es va disposar de dues torres meteorològiques (de 100 m i de 10 m d'alçada) densament instrumentades, amb 5 anemòmetres sònics i 15 termoparells entre d'altres aparells de mesura. També es va disposar

2007 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

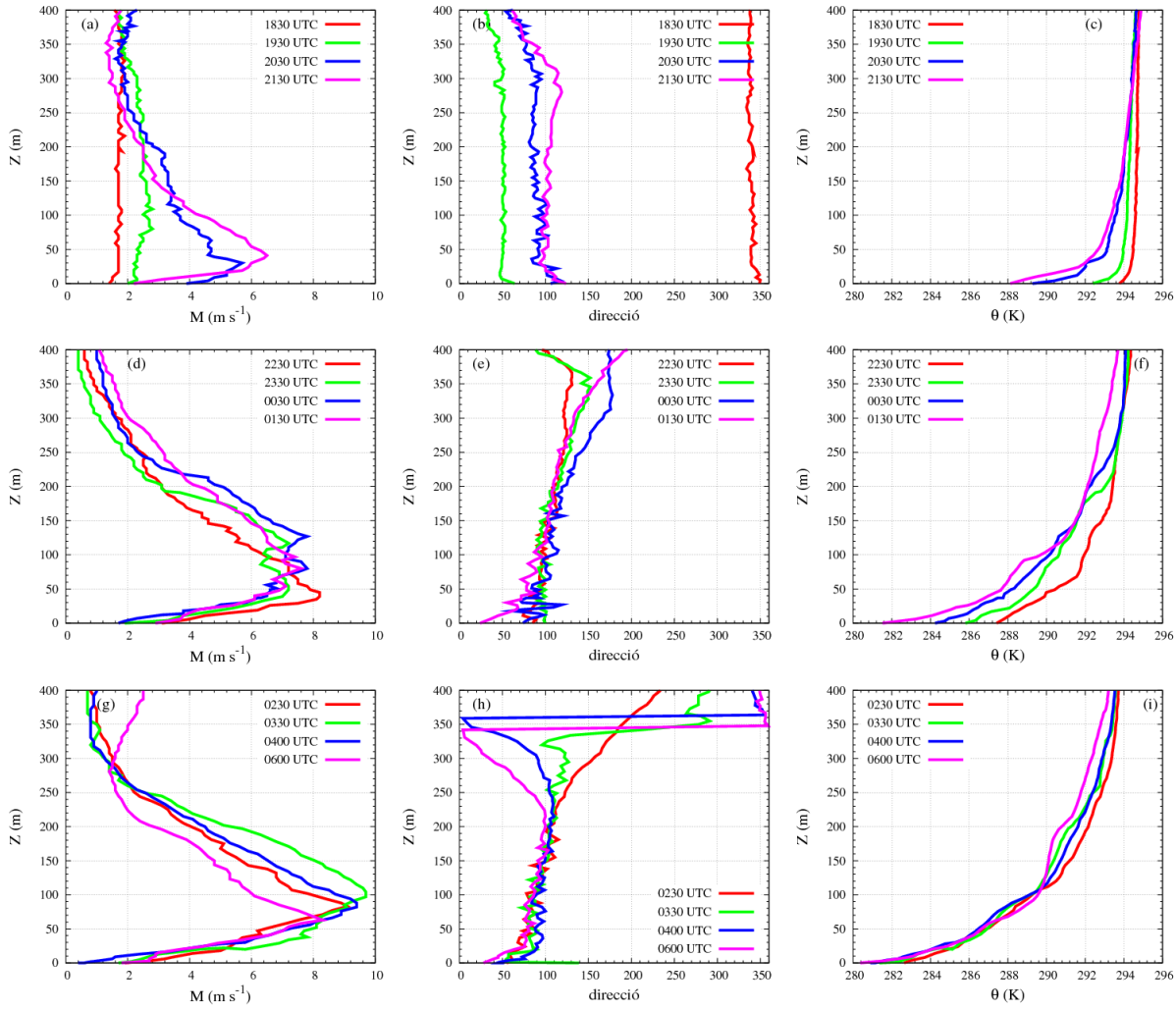

Figura 1. Radiosondatges de la nit 15-16 de setembre de 1998 mesurats durant la campanya SABLES-98. Els perfils estan separats per trams, tal i com es descriu al text. **TRAM 1**: (a) mòdul del vent (b) direcció i (c) temperatura potencial. El mateix però pel **TRAM 2** a (d), (e) i (f) i pel **TRAM 3** a (g), (h) i (i).

d'un sodar, així com d'un globus captiu, el qual es va poder llençar els dies centrals de la campanya quan les condicions meteorològiques ho varen permetre. Els detalls de la instrumentació utilitzada durant SABLES-98 i la descripció dels fenòmens observats es troben descrits a Cuxart et al. (2000).

Durant els primers dies de SABLES-98 (del 10 al 13 de setembre), els vents varen ser forts i es varen donar condicions idònies per estudiar les capes límits cisallades pel vent neutrals i feblement estables. Durant la setmana següent (del 14 al 21 de setembre), es varen donar condicions més favorables per mesurar la CLE. Durant els darrers dies de SABLES-98 (del 22 al 28 de setembre) el CIBA estava sota la influència d'un sistema de baixes pressions i els núvols varen fer acte de presència, donant precipitació en els darrers dies.

Algunes nits de SABLES-98 han estat intensament estudiades, especialment el període del 14 al 21 de setembre que es va caracteritzar per una situació anticiclònica i estacionària amb un gradient de pressió superficial dèbil que va permetre el desenvolupament dels efectes locals. Durant la nit, els vents eren del NE i les condicions eren fortament estables. Per exemple, les nits 14 - 15 i 20 - 21 de setembre han estat intensament estudiades, per tal de caracteritzar els fenòmens observats tant analitzant les mesures (Cuxart et al., 2000; Yagüe et al., 2006, Conangla et al., 2008), com fent simulacions unidimensionals (Conangla i Cuxart, 2006) i simulacions de grans remolins resolts explícitament - Large-Eddy Simulations, LES - (Jiménez i Cuxart, 2005; Cuxart i Jiménez, 2007). Recentment també s'han utilitzat les simulacions mesoescalars per tal d'entendre la configuració dels corrents en la conca allà on està situat el CIBA, semblant al que s'ha fet per analitzar les circulacions locals a l'illa de Mallorca (Cuxart et al., 2007).

Estudiarem aquí les dades de la nit del 15 al 16 de setembre, encara no estudiada prèviament amb detall, i que

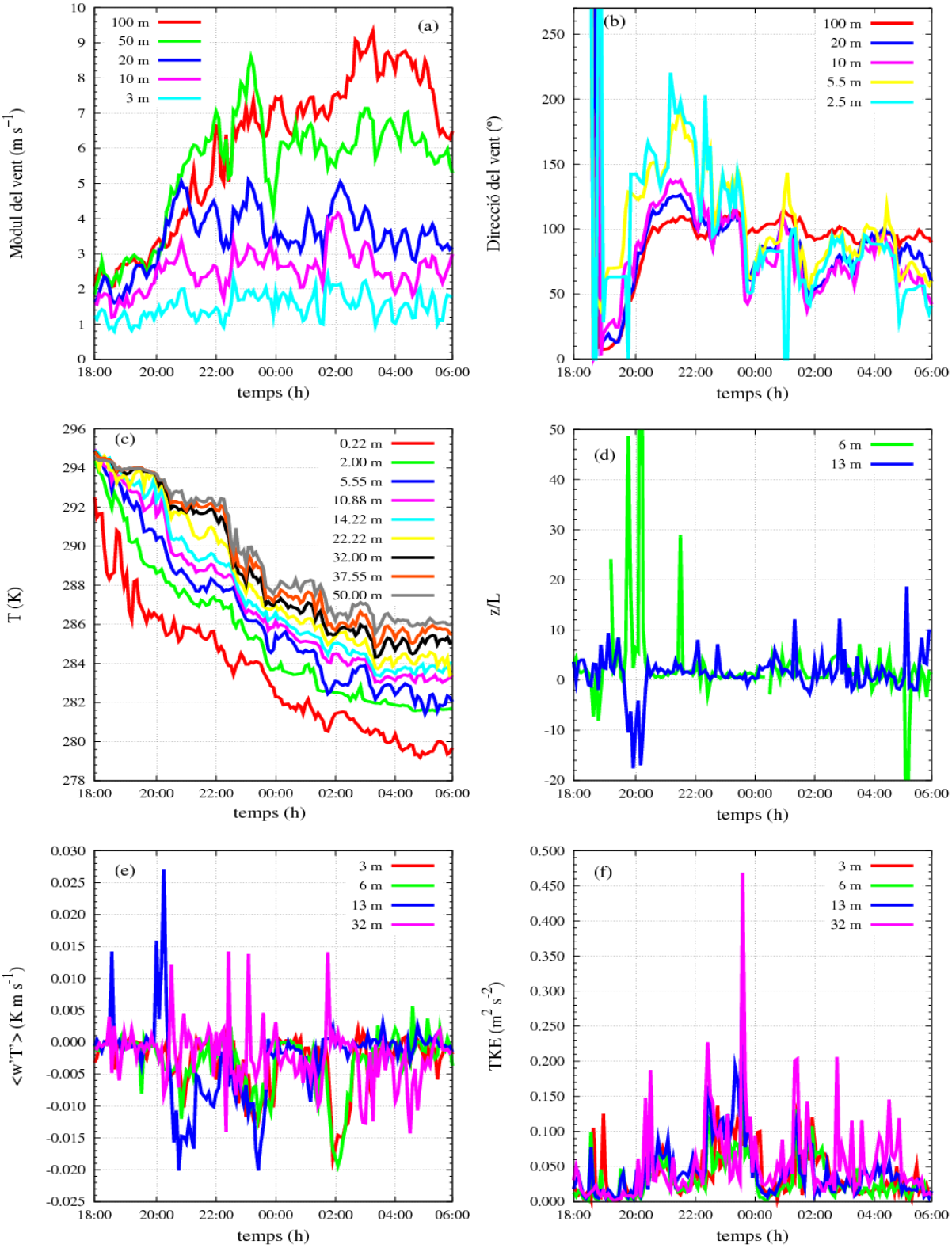

Figura 2. Sèries temporals (cinc-minutals) de les dades mesurades per les torres a 100 m i a 10 m entre les 18:00 UTC del 15 de setembre fins a les 06:00 UTC del 16 de setembre del 1998. (a) i (b) mòdul del vent i direcció, (c) temperatura, (d) paràmetre d'estabilitat, z/L, on z és altura i L és longitud de Monin-Obukhov, (e) flux vertical de temperatura i (f) energia cinètica turbulenta, $TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$, on $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ i $\overline{w'^2}$ són les variànces de les tres direccions del vent.

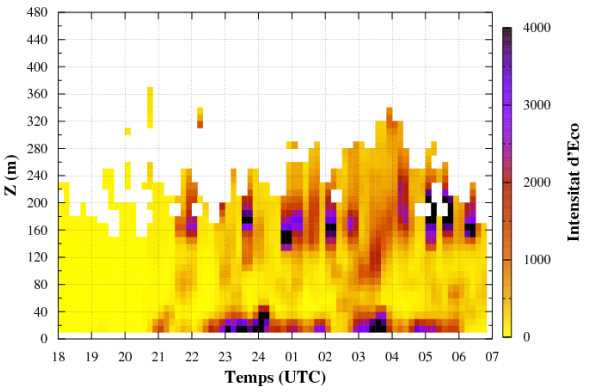

Figura 3. Ecos mesurats pel sodar durant la nit del 15 al 16 de setembre de 1998.

sembla ser un cas arquetípic de nit al CIBA. Com la resta de la setmana, la situació sinòptica estava caracteritzada per un feble gradient de pressió amb vent de component E degut a un anticicló amb centre sobre l'Atlàntic al NW de la península Ibèrica. Emprarem les dades de la torre de 100 m, els sondatges amb globus captiu (12 al llarg de la nit) i els ecos de sodar. A part de les anàlisis clàssiques de perfils, s'utilitzaran les funcions de densitat de probabilitat (sigles en anglès: PDF) car permeten calcular estadístics a partir de dades sense necessitar tenir una molt alta resolució temporal i no tenen associats problemes conceptuals a l'hora de definir els temps de mitjanat (no cal que existeixi forat espectral - Monin i Yaglom, 1971). Tanmateix, l'anàlisi es completarà amb la inspecció de les sèries de fluxos calculats de la manera clàssica i amb la inspecció dels espectres d'algunes variables seleccionades. En aquest cas, els fluxos es calculen a partir del les mitjanes de cinc minuts (ja que els espectres mostren un mínim d'intensitat espectral al voltant d'aquest període) calculades pel mètode de Reynolds a partir de les dades d'alta freqüència i extretes de la base de dades de SABLES-98, tot prenent com a la direcció x la del vent mitjà.

Les PDFs es poden calcular a partir de qualsevol conjunt de dades. En aquest treball ho farem a partir de les mesures dels anemòmetres sònics (en forma de sèries temporals per a tota la nit) per les variables del vent i temperatura virtual, que tractarem com "temperatura" en endavant. Si $B(x)$ és la PDF corresponent a un conjunt de dades, aquesta representa la probabilitat de trobar un valor x entre x i $x \pm \Delta x$, on Δx és el interval de discretització de la PDF. El valor de la PDF està normalitzat a 1 ($\int_{-\infty}^{\infty} B(x)dx = 1$) i normalment es representa gràficament com $\sigma_x B(x')$ on $x' = \frac{x-\overline{x}}{\sigma_x}$, $\overline{x}$ és el valor mig i σ_x és la desviació estàndard. D'altra banda, per estudiar el comportament als extrems (que corresponen a fenòmens lluny del valor mig i poc probables), l'escala de l'eix y es tria logarítmica. Una descripció més detallada del càlcul de les PDFs es troba a Tennekes i Lumley (1982).

Les PDFs han estat utilitzades per analitzar experiments de laboratori, mesures experimentals i també simulacions LES. Va ser el cas, per exemple, de les mesures de laboratori d'un tanc d'aigua que varen ser analitzades per Deardorff i Willis (1985), o de Mahrt i Paumier (1984) quan estudiaren la capa límit amb núvols. Més recentment, Jiménez i Cuxart (2006) analitzaren una simulació LES de la CLE mitjançant aquest mètode. Cal dir que Chu et al. (1996) també empraren les PDFs per tal d'analitzar observacions de la capa límit superficial, però agafaren un període de temps més curt (sèrie temporal de 15 minuts) que el que s'ha agafat en aquest treball (sèrie temporal de dotze hores que comprèn tota la nit).

3 Característiques generals de la nit

Durant la nit del 15 al de 16 de setembre es va desenvolupar un màxim de vent de capes baixes - Low-Level Jet, LLJ - molt prest (a partir de les 20:00 UTC). Aquest LLJ es va mantenir al llarg de la nit de forma gairebé estacionària, amb l'ocurrència d'episodis de barreja esporàdics que n'alteraraven les característiques temporalment. La situació és semblant a la nit del 20-21 de setembre però en aquell cas el LLJ va aparèixer més tard -quan les condicions nocturnes estaven completament desenvolupades (a partir de les 00:00 UTC)- i es va mantenir estacionari només fins a les 02:30 UTC, instant en el què es va produir una forta barreja.

La Figura 1 mostra l'evolució del mòdul de la velocitat del vent, la direcció i la temperatura mesurats pels radiosondatges dels globus captius al llarg de la nit. Estan agrupats en tres trams diferents, que és com considerem que es pot classificar la nit. Un primer tram (radiosondatges de 18:30 a 21:30 UTC, **TRAM 1**) durant el qual el vent gira en sentit horari des de NNW fins a E, a un ritme doble d'una oscil·lació inercial a partir del valor ben barrejat del final del dia. La velocitat del vent es manté constant per sobre dels 250 metres al damunt del sòl i experimenta un increment de velocitat en capes baixes en principi per l'oscil·lació inercial que és màxima pel damunt de la CLE i és frenat per la turbulència prop del sòl. La temperatura vora el terra refreda progressivament. Considerem que aquest tram s'acaba quan la direcció del vent deixa d'evolucionar.

El segon tram (radiosondatges de 22:30 a 01:30 UTC, **TRAM 2**) mostra constància de la direcció del vent amb el temps, que prové de l'est, i l'establiment d'un LLJ amb màxims de vent d'uns 8 m s^{-1} localitzats entre 50 i 120 m d'altura. La temperatura presenta un refredament continu en tota la capa per sota de 200 m a un ritme ràpid (fins a 1.5 K h^{-1} en a una altura de 2 m), en contrast amb l'aspecte estàtic del vent.

El darrer tram (radiosondatges de 02:30 a 06:00 UTC, **TRAM 3**) es caracteritza, en canvi, per una aturada total del refredament de la columna, sense canvis significatius en la

direcció del vent i una tendència del màxim de vent a elevar-se i ser més fort, tret de darrera hora de la nit, quan afluixa.

Les sèries temporals obtingudes pels sensors de la torre confirmen aquesta evolució (Figura 2), i il·lustren sobre la variabilitat temporal entre radiosondatges. Es veu com la direcció del vent oscil·la amb un període aproximat de dues hores per sota de 100 m i com la velocitat té unes variacions de l'ordre de 40 minuts, similars a les de la temperatura. Les variables turbulentes mostren que hi ha episodis de turbulència intermitent (ben visibles a l'energia cinètica turbulenta -TKE-) i canvis de signe del flux de calor. Pot observar-se que sovint la turbulència és més intensa en els nivells superiors de mesura que en els inferiors.

La Figura 3 mostra els ecos rebuts pel sodar durant la nit que indiquen la presència d'estructures reflectants vora el sòl (per sota de 50 m) i a la part superior del jet (cap als 150 m), dues zones on podem suposar doncs que hi ha turbulència. Destacar que a les 03:30 UTC hi ha un episodi on hi ha ecos (turbulència) en tota la columna, coincidint amb el inici del tercer tram definit.

4 Anàlisi per trams

4.1 Establiment del LLJ

Com s'ha descrit abans, a partir de la posta de sol, el vent gira en sentit horari fins que arriba a ser de l'est, refredant-se l'aire prop de la superfície i generant un LLJ a partir de les 20:30 UTC. La temperatura potencial presenta dos gradients ben diferenciats: un de fort prop del sòl i un altre, més feble, fins arribar a l'altura on hi ha el màxim de vent. Entre les 20:00 i les 20:30 UTC hi ha un fort episodi turbulent que coincideix amb l'establiment del LLJ, possiblement també relacionat amb l'important desacoblament tèrmic entre les capes vora la superfície i l'aire per sobre de 10 m ($(T_{10m} - T_{0.22m}) = 7$ K just abans de l'episodi turbulent, a les 20:00 UTC i, després, a les 20:30 UTC $(T_{10m} - T_{0.22m}) = 4$ K). El LLJ té l'origen en part probablement en una oscil·lació inercial (tot i que el període sigui més curt per motius encara sense explicar) i quan fixa la seva direcció possiblement estigui relacionat amb un flux de conca (catabàtic o mesoescalar), gairebé estacionari en direcció durant la resta de la nit (Cuxart, 2008).

El paràmetre d'estabilitat és z/L, on z és l'altura i $L = -\frac{\overline{\theta_v} {u_*}^3}{kg\overline{w'\theta'}}$ és la longitud de Monin-Obukhov essent ${u_*}^2 = (\overline{u'w'}^2 + \overline{u'w'}^2)^{0.5}$ la velocitat de fricció, calculada a partir dels fluxos de moment en superfície (agafats aquí a 6 m). Tal com es descriu a Mahrt et al. (1998), el paràmetre z/L, calculat a una altura de 10 m aproximadament, ens indica si les condicions són dèbilment estables ($z/L < 0.1$), fortament estables ($z/L > 1$) o de transició (entremig). La Figura 2d mostra la sèrie temporal d'aquest paràmetre calculat a 2 nivells: a 6 m i a 13 m, donat que no tenim mesures de turbulència a 10 m. Es veu que per aquest tram de la nit $z/L \approx 1$ indicant que el règim és fortament estable

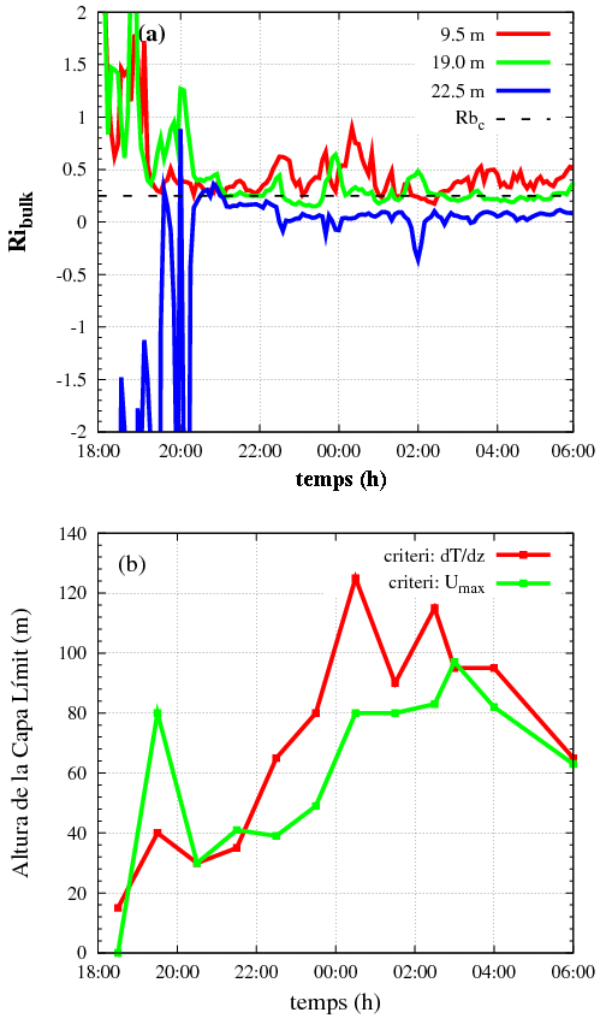

Figura 4. (a) Nombre de Richardson Bulk calculat a partir de Ri_B (b) Altura de la CLE tenint en compte dos criteris diferents (allà on gradient de temperatura és màxim i altura on hi ha el màxim de vent).

i fins i tot a certs instants $z/L >> 1$. En canvi, en el càlcul a 13 m hi ha certs instants on z/L és negatiu, indicant períodes on les condicions són inestables. Això està d'acord amb la sèrie temporal de $<w'\theta'>$ que en aquest nivell pren valors positius i grans. Els moments de major inestabilitat a aquest nivell són al voltant de les 20:30 UTC on hi ha una capa ben barrejada pel damunt de la inversió superficial de refredament que es veu be al radiosondatge i a la sèrie temporal de temperatures.

La Figura 4a mostra l'evolució del nombre de Richardson de capa, calculat entre diferents nivells de mesura com $Ri_B = -\frac{g\Delta\overline{\theta_v}\Delta z}{\overline{\theta_v}(\Delta\overline{U})^2+(\Delta\overline{V})^2}$. Per a aquest tram, i coherentment amb el descrit suara, els valors són majors que el crític (0.25 o 1 segons el mètode de càlcul) prop de la superfície mostrant estabilitat, mentre que tornen negatius pel damunt de la inversió de refredament indicant possibilitat de turbulència en aquests nivells.

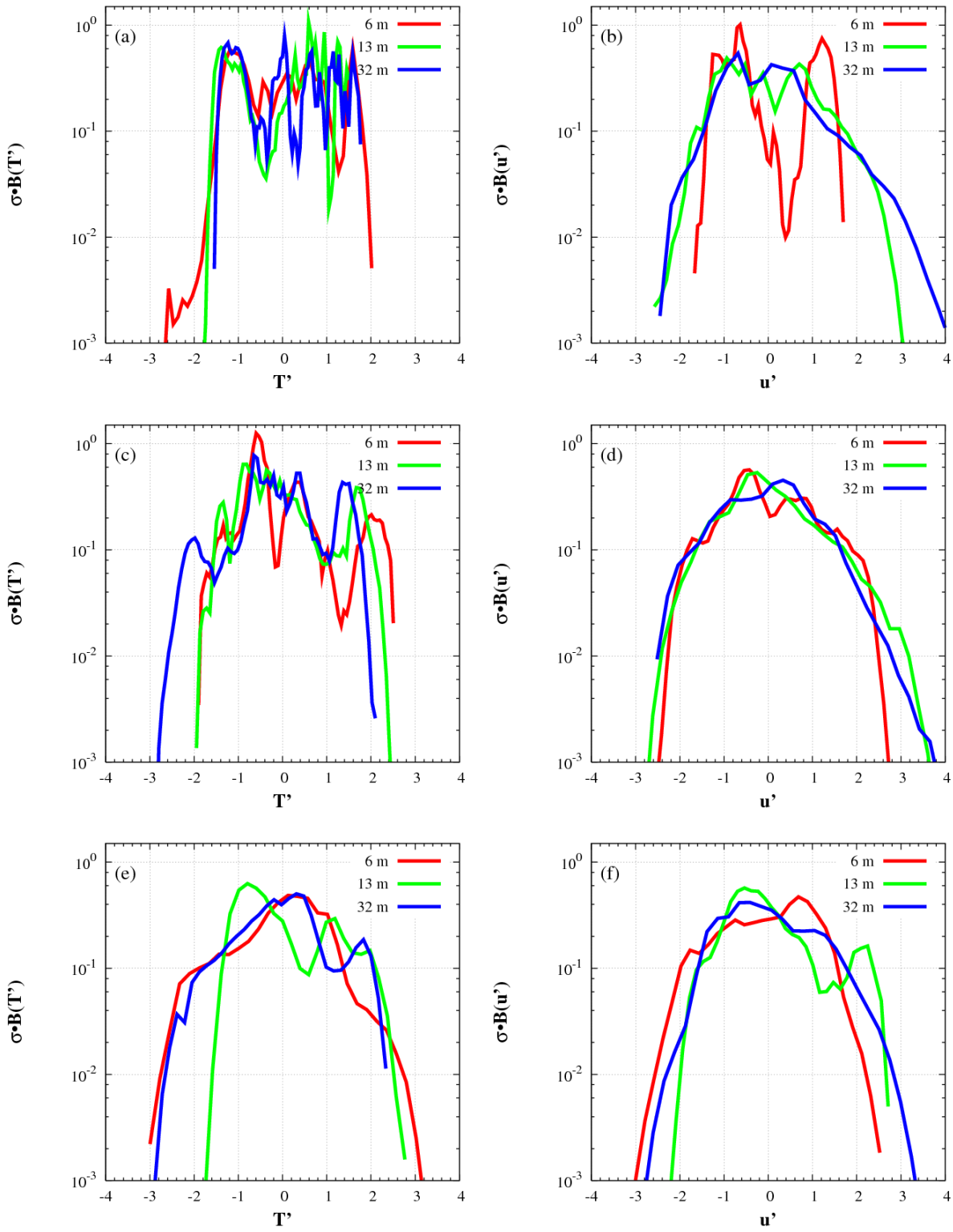

Figura 5. PDFs calculades pels trams definits en el text. (a) i (b) PDFs de la temperatura i el vent pel **TRAM 1**, respectivament; (c) i (d) el mateix però pel **TRAM 2**; (e) i (f) el mateix però pel **TRAM 3**. Les PDFs estan normalitzades per $T' = \frac{T-\overline{T}}{\sigma_T}$ i $u' = \frac{T-\overline{u}}{\sigma_u}$ on $\overline{T}$ i $\overline{u}$ són el valor mig i σ_T i σ_u són la desviació estàndard.

Les PDFs es mostren a les Figures 5a i 5b. En ser un període d'ajustament, no es pot considerar en equilibri. La PDF de la temperatura (Figura 5a), a qualsevol dels nivells considerats, és molt fluctuant, donat que refreda però no a un ritme constant. Per exemple, a les 20:30 UTC hi ha un refredament molt brusc (Figura 2c), sobretot per damunt dels 10 m, que fa inestabilitzar tota la columna de sobre. D'aquesta manera la PDF corresponent en aquest tram té molts pics prop del valor mig, mentre que la PDF a 6 m no és tan fluctuant, ja que el ritme de refredament és més regular. Pel que fa a la PDF del vent (Figura 5b), es veu que a 6 m és bimodal amb 2 pics de probabilitat semblant amb valors menors i majors que el valor mig. En canvi, a nivells superiors, la forma és més gaussiana, essent els valors més probables menors que el valor mig però havent-hi fluctuacions més grans que el valor mig i més separades d'ell. Aquest comportament està correlacionat amb l'evolució del vent en aquests nivells (Figura 2a). Prop del terra (3 m) el vent fluctua mentre que a nivells superiors la tendència és a augmentar.

Els espectres de l'energia (calculada a partir de $E = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$) es mostren a la Figura 6 per cada un dels trams considerats. Han estat calculats per FFT amb una finestra de Kaiser-Bessel d'amplada 14, sobre les sèries produïdes pel sònic a 20 Hz agafant totes les dades per cada un dels trams considerats, i als quals s'ha aplicat un filtre variable, de forma que les altes freqüències s'han suavitzat més que les baixes.

Es pot veure com en la zona de fort refredament superficial (a 6 m a la Figura 6a) l'espectre acaba amb un augment d'energia per a les altes freqüències. Això indica que les estructures que condueixen a la dissipació turbulenta són massa petites per ser ben resoltes a aquesta freqüència de mostreig i per tant no veiem el subrang inercial explícitament (pendent de -2/3). Per damunt d'aquesta zona si que sembla existir un subrang inercial ben definit per a estructures amb temps característics iguals o menors a 10 s, un forat energètic al voltant dels 100 s i indicis del subrang de flotabilitat (pendent de -2), on dominen els moviments quasi-bidimensionals (Stull, 1988).

4.2 Refredament superficial intens

El sodar (Figura 3) mostra les dues àrees on hi ha fort eco entre les 21:30 i les 02:30 UTC, vora el sòl i a la part superior del jet, amb indicacions d'algun episodi esporàdic de mescla. L'intens refredament superficial sembla provocar un desacoblament entre la Capa Límit Superficial (CLS) i l'aire pel damunt, que gairebé no experimenta fricció turbulenta, mentre sembla que el corrent és alimentat per un factor no-local, vista la persistència de la seva direcció. L'origen del refredament superficial és probablement radiatiu i la transmissió d'aquest refredament amunt es fa per barreja turbulenta d'origen mecànic, més intensa que en el primer tram.

L'altura on hi ha el màxim gradient de temperatura deixa de coincidir amb l'altura del màxim del LLJ (Figura 4b) (tot sovint el màxim de vent és dins la zona de refredament superficial). Situacions semblants es varen observar durant la campanya CASES-99 (the Cooperative Atmosphere-Surface Exchange Study-1999, CASES-99; Poulos et al., 2002) a les grans planures dels Estats Units, encara que el LLJ estava més amunt. En el cas del LLJ sobre el Mar Bàltic (Smedman et al., 1995) també es va trobar una forta inversió en superfície i que el màxim de vent del LLJ estava per davall de la inversió (veure Figura 5 a Smedman et al., 1995). La turbulència elevada que mostra el sodar és similar a la que s'obtingué amb simulacions amb el model 1D (Conangla i Cuxart, 2006) i amb el model LES (Cuxart i Jiménez, 2007).

Les oscil·lacions en capes baixes de la direcció del vent resten per explicar. D'una banda hom voldria atribuir-les a corrents de gravetat, però també podrien ser desacoblaments locals que incrementessin la cisalla en direcció fins a provocar l'episodi de barreja amb la capa superior. Cal més recerca sobre la variabilitat de la direcció del vent a la CLS, molt fluix d'altra banda.

Les inestabilitzacions que tenen lloc causen valors grans i de signe canviant en el flux de calor i el paràmetre d'estabilitat, similar als que es varen mesurar durant alguna de les nits estables de CASES-99. Coulter i Doran (2002) trobaren que el flux superficial de temperatura durant les nits de CASES-99 era al voltant del $<w\theta>$ = -0.010 K m s^{-1} però a certs instants podia ser fortament més gran i en d'altres més petit. Mesures a diferents localitzacions mostraren que aquestes intermitències no estaven correlacionades sinó que eren fortament influenciades pels efectes locals (més detalls a Cuxart et al., 2002).

El paràmetre d'estabilitat z/L mostra com, en general, aquest tram és menys estable que l'anterior i experimenta menys variacions brusques. L'acceleració del vent genera cisalla i fa que es produeixi més TKE que a la vegada destrueix l'estabilitat. Segons la classificació de Mahrt et al. (1998), aquest tram correspon a un règim d'estabilitat entre dèbil i forta ($0.1 < z/L < 1$). El nombre de Richardson de capa (Figura 4b) coincideix a mostrar estabilitat sostinguda no molt forta, amb valors per sota de crític just per sobre la inversió de refredament superficial.

La PDF de la temperatura d'aquest tram té diversos màxims ben definits, que corresponen al règim de fons i als diferents episodis de barreja. Aquest comportament és semblant als 3 nivells ja que aquestes entrades d'aire calent de dalt (o d'aire fred cap amunt) es noten a tota la columna d'aire, encara que amb un cert desfasament (veure Figura 2c). La PDF del vent (Figura 5d) a 6 m i a 13 m és semblant, amb un màxim de probabilitat a valors inferiors al valor mig. En canvi, la PDF a 32 m mostra un comportament oposat (el màxim de probabilitat és a valors majors que el valor mig). Aquest fet es podria explicar degut a que quan el LLJ es desenvolupa, el vent a 32 m

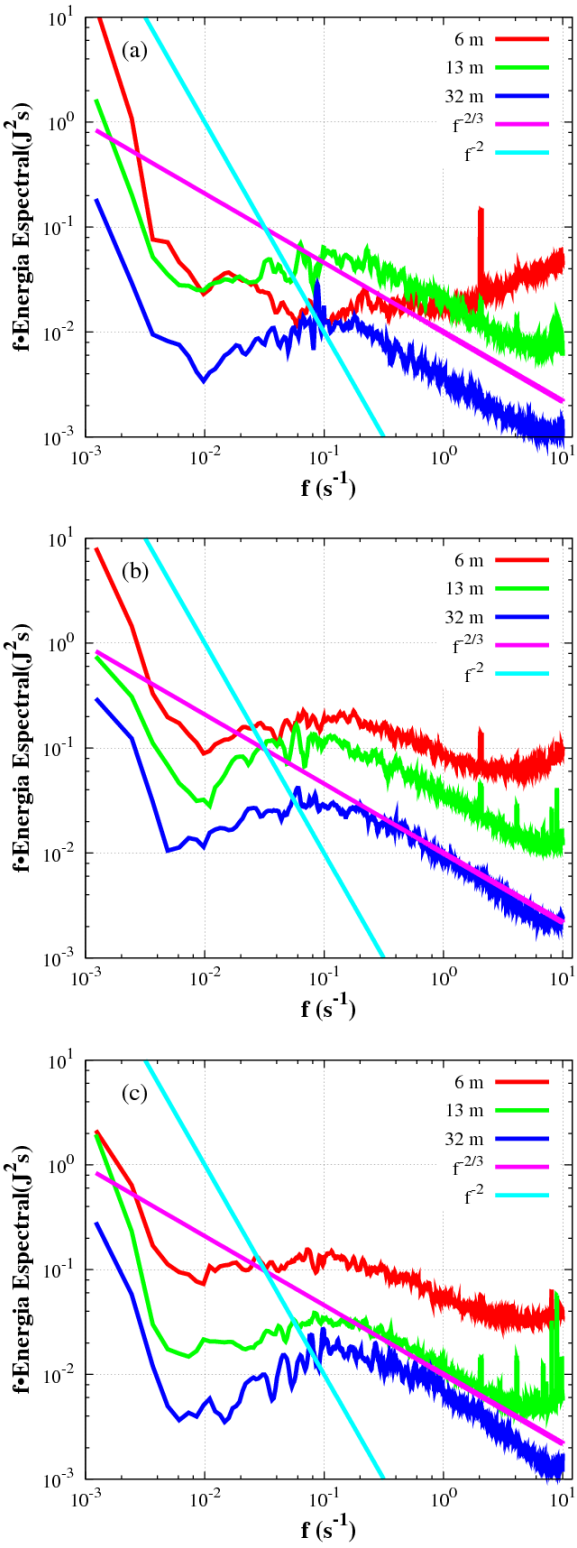

Figura 6. Espectres de l'energia calculada a partir de $E = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ on u, v i w són les tres components del vent mesurades pels sònics. També hi ha indicats el pendent del subrang inercial ($f^{-2/3}$) i el del subrang de flotabilitat (f^{-2}). (a) **TRAM 1**, (b) **TRAM 2** i (c) **TRAM 3**.

tendeix a accelerar-se més que el vent prop del sòl (veure Figures 1d i 2a).

L'espectre és similar al del primer tram, però més energètic i el primer nivell, en presència de més turbulència, és capaç de generar també un subrang inercial.

4.3 Estacionarietat

Aquest tram manté el LLJ ben format, lleugerament més intens en velocitat al màxim. La major intensitat de la cisalla de vent pot explicar els forts valors del flux de calor i de TKE a 32 m, però sense arribar a afectar clarament la CLS. Destaca fortament l'estacionarietat del perfil de temperatura, tot i que el refredament superficial segueix, ara a un ritme molt més moderat (1K/4h). En aquest tram l'altura del màxim del LLJ i la del màxim gradient de temperatura són propers (Figura 4b). El fet que l'altura del màxim del LLJ i la de la inversió de temperatura coincideixen podria explicar l'absència d'episodis clars de barreja en tota la columna, com sembla clar en el sodar (Figura 3), en comportar-se aquest nivell com una barrera pels intercanvis de matèria i energia (veure Cuxart i Jiménez, 2007). Sota el jet, sembla que en el perfil de temperatura es poden identificar diferents capes, corresponents a inversions a 50 m, 100 m i 200 m. Aquest fenomen es coneix com a "layering" i també va ser observat durant les nits de la campanya CASES-99 (Poulos et al., 2002).

La temperatura augmenta amb l'altura, mantenint-se un gradient de temperatura més gran per sota del nivell de 10.88 m que pel damunt. Això explica que els moviments verticals estiguin inhibits dins aquesta capa per la forta estabilitat d'estratificació i que hi hagi valors més grans del flux de calor i de TKE pel damunt, contràriament al que la teoria (Garratt, 1992) espera per a un perfil de temperatura que augmenta amb l'altura. El mateix Garratt admet que la seva teoria pot no ser vàlida dins la CLS com sembla ser el cas aquí.

L'estacionarietat del règim queda reflectida en les PDFs. Les PDFs de temperatura (Figura 5e) tenen menys pics a la part central però són més amples. Les PDFs del vent (Figura 5f) a 13 m i 32 m són semblants, amb el màxim de probabilitat a valors inferiors al valor mig. En canvi, la PDF del vent a 6 m té un comportament oposat. Aquest fet es podria explicar a partir de que el LLJ es debilita a mesura que s'acosta la sortida del Sol fins a desaparèixer completament més tard. Aquest efecte es nota sobretot prop del LLJ mentre que el vent prop de la superfície no varia gaire. Els espectres són molt similars als del segon tram, amb un cert desplaçament del forat espectral cap a estructures majors (5 minuts de temps característic) i una certa acumulació d'energia espectral a petites escales a 13 m, just al límit superior de la inversió superficial de temperatura.

Per qualsevol dels trams considerats, si es comparen les PDFs calculades aquí amb les de Chu et al. (1996) es veu que en aquest darrer cas les PDFs són més gaussianes. El mateix passa quan es calculen les PDFs a partir de simula-

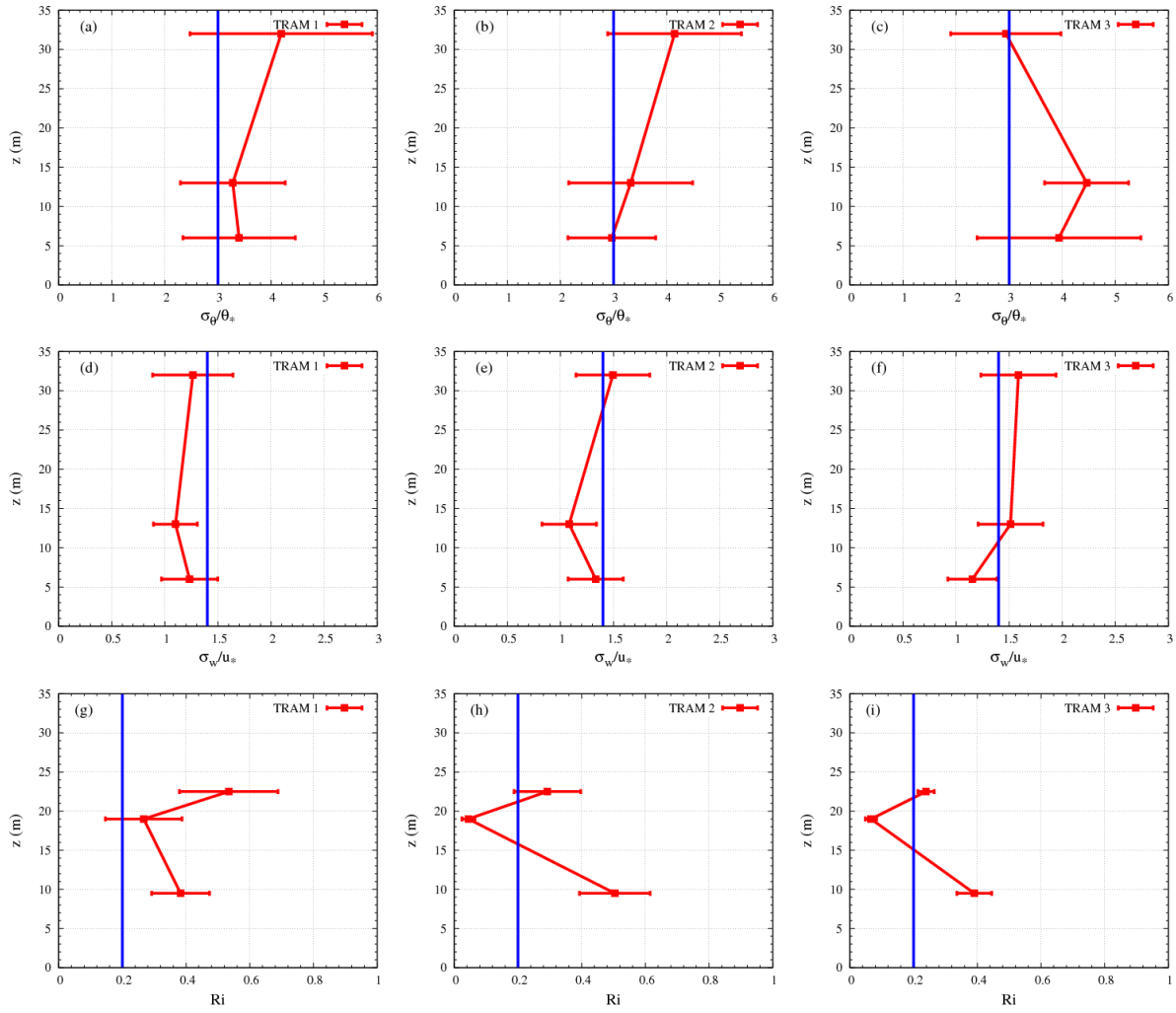

Figura 7. Teoria de semblança (Nieuwstadt, 1984) aplicada a cada un dels trams de la nit. (a), (b) i (c) σ_θ/θ_*; (d), (e) i (f) el mateix per σ_w/u_* i (g), (h) i (i) el nombre de Richardson de capa. Les línies mostren el comportament per cada un dels paràmetres que prediu Nieuwstadt (1984).

cions LES (Jiménez i Cuxart, 2006). El fet que en aquest treball les PDFs estiguin tan enfora de la gaussianitat es podria explicar a partir de les escales de moviment que hi ha presents en les sèries i en la poca estacionarietat d'aquestes, excepte pel darrer tram.

5 Comparació dels tres trams

Habitualment s'utilitzen un cert nombre de paràmetres per a caracteritzar l'estat del règim turbulent. Farem en aquest apartat una anàlisi descriptiva pel conjunt de la nit per alguns d'ells. Una possible definició de la CLE és la d'aquella capa on hi ha turbulència mesurable per sobre d'un determinat valor llindar (sovint s'agafa TKE més gran que 0.001 m^2s^{-2}). En aquest estudi no disposem de perfils d'aquesta variable, però la Figura 2f mostra com en els tres nivells de mesura de variables a alta freqüència (6, 13 i 32 m) els valors de TKE estan normalment per sobre d'aquest valor i es pot considerar que la CLE arriba almenys fins a 32 m. El paràmetre d'estabilitat z/L és positiu durant tota la nit, indicant estratificació estable per sota de 32 m, excepte durant un curt període del primer tram, quan z/L és molt gran entre 6 m i 13 m i en canvi és gran i negatiu per damunt, indicant desacoblament entre la capa vora el terra, establement estratificada, i la de sobre, inestable.

La Figura 4a mostra que a les capes a prop del sòl el nombre de Richardson està per sobre del crític teòric, mentre que més amunt agafa valors més baixos, amb major possibilitat de turbulència en aquest nivell. El límit superior de la CLE pot venir donat per l'altura de la inversió o el màxim de vent. A la Figura 4b es veu com els diferents trams presenten diferents comportaments. El primer període, el menys turbulent en capes baixes i amb inestabilitat per sobre de 13 m té el màxim de vent (mal definit) lleugerament per sobre de la inversió de temperatura, mostra que pot haver-hi fàcilment mescla pel damunt de la inversió car hi ha una

zona amb cisalla de vent i gairebé sense inhibició per estratificació tèrmica. El segon període té el màxim de vent per davall de la inversió i això indica que en tota la capa hi ha simultàniament producció per cisalla i inhibició per estratificació, diferent segons s'estigui dins o fora de la CLS. El darrer tram es caracteritza per una superposició gairebé perfecta del màxim de vent i la inversió que, com a Cuxart i Jiménez (2007), actuen com una barrera a la barreja a través d'aquest nivell, trencada només esporàdicament, com indica el sodar (Figura 3).

La Figura 7 mostra, per cada tram, els perfils d'alguns paràmetres de l'escalatge local sota condicions d'estratificació estable (Nieuwstadt, 1984) per als tres nivells disponibles. En concret són les variances de les fluctuacions de velocitat vertical i de temperatura, normalitzades respectivament pels paràmetres u_* -la velocitat de fricció-, $\theta_* = \overline{w'\theta'_s}/u_*$, $\overline{w'\theta'_s}$ és el flux de calor en superfície i Λ és la longitud de Monin-Obukhov local. Tal com es mostra a Nieuwstadt (1984) o a Garratt (1992, Figura 3.24), en el límit de z/Λ no massa petits, $\sigma_w/u_* \approx 1.4$, $\sigma_\theta/\theta_* \approx 3$ i $Ri \approx 0.2$.

Es pot destacar que Ri pren valors prop o per sota del crític teòric al segon nivell, que sol estar just per sobre de la forta inversió de temperatura de la CLS, indicant que s'hi donen condicions favorables a la turbulència, possiblement perquè el vent hi experimenta una forta cisalla just quan la intensitat de l'estratificació decreix sobtadament amb l'altura.

El paràmetre σ_θ/θ_* mostra un comportament semblant al que prediu Nieuwstadt pels primers dos nivells i trams, indicant que l'escalatge local pot ser una bona aproximació en capes baixes i en canvi se'n separa a 32 m, segurament perquè l'estratificació no és tan forta a aquest nivell. En canvi, pel tercer tram, que té la inversió de refredament més amunt aquest nivell també és estable i es comporta com la teoria indica. Tanmateix a 13 m sembla haver-hi més turbulència que en els altres trams. En canvi per σ_w/u_*, els valors sempre s'acosten als teòrics, indicant que, en tots els casos, les velocitats verticals són petites.

6 Conclusions

La nit analitzada mostra que és possible de dividir-la en tres trams que tenen característiques ben diferenciades: un tram que fa la transició dia-nit, un segon tram de refredament sostingut i un darrer tram estacionari. Amb aquesta anàlisi no es pretén generalitzar i dir que un comportament d'aquesta mena és probablement comú en aquest tipus de règim, sinó que només s'ha volgut estudiar-lo com a possible cas prototípic.

El primer tram, dominat pel refredament radiatiu superficial, permet el desacoblament de la capa residual de la de superfície i l'establiment d'una oscil·lació similar a la inercial -però amb període més curt- que acaba generant un LLJ. El segon tram presenta un LLJ on el cim de la inversió de temperatura i el màxim de vent no coincideixen i permet que hi hagi episodis forts de barreja i refredament sostingut de tota la capa. En canvi el tercer tram està caracteritzat per una coincidència en la posició vertical de la inversió i el jet, que actua com a barrera i desacobla les parts superior i inferior del jet. El refredament queda confinat a la CLS, amb mínims de turbulència en aquesta capa.

Els fenòmens locals durant la nit són importants i introdueixen variabilitat a la sèrie temporal. En aquest cas, les PDFs corresponents tendeixen a separar-se de la gaussianitat. Cal fer més estudis de nits estables, especialment des d'un punt de vista climatològic, per confirmar si aquest patró de tres trams pot ser generalitzable o és un factor purament local del lloc d'estudi, el CIBA. Encara que és molt difícil trobar una teoria de semblança sota condicions d'estratificació estable, cada un dels trams presenten comportaments diferents, depenent de la altura on es calculin els paràmetres.

Agraïments. Volem agrair a en D. Martínez de la UIB per la seva ajuda en el tractament de les dades. Treball parcialment finançat pel projecte del MEC CGL2006-12474-C01.

Referències

Chu, C. R., Parlange, M. B., Katul, G. G., i Albertson, J. D., 1996: *Probability density functions of turbulent velocity and temperature in the atmospheric surface layer*, Water Resour Res, **32**, 1681–1688.

Conangla, L. i Cuxart, J., 2006: *On the turbulence at the upper part of the low-level jet: an experimental and numerical study*, Bound-Lay Meteorol, **118**, 379–400.

Conangla, L., Cuxart, J., i Soler, M. R., 2008: *Characterisation of the nocturnal boundary layer at a site in Northern Spain*, Bound-Lay Meteorol, **In press**.

Coulter, R. L. i Doran, J. C., 2002: *Spatial and temporal occurences of intermittent turbulence during CASES-99*, Bound-Lay Meteorol, **105**, 329–349.

Cuxart, J., 2008: *Nocturnal basin Low-Level Jets: An integrated study*, Acta Geophys, **56**, 100–113.

Cuxart, J. i Jiménez, M. A., 2007: *Mixing processes in a nocturnal Low-Level Jet: An LES study*, J Atmos Sci, **64**, 1666–1679.

Cuxart, J., Yagüe, C., Morales, G., Terradellas, E., Orbe, J., Calvo, J., Fernández, A., Soler, M. R., Infante, C., Buenestado, P., Espinalt, A., Joergensen, H. E., Rees, J. M., Vilà, J., Redondo, J. M., Cantalapiedra, I. R., i Conangla, L., 2000: *Stable Atmospheric Boundary-Layer Experiment in Spain (SABLES-98): A report*, Bound-Lay Meteorol, **96**, 337–370.

Cuxart, J., Morales, G., Terradellas, E., i Yagüe, C., 2002: *Study of Coherent Structures and Estimation of the Pressure Transport Terms for the Nocturnal Stable Boundary Layer*, Bound-Lay Meteorol, **105**, 305–328.

Cuxart, J., Jiménez, M. A., i Martínez, D., 2007: *Nocturnal meso-beta basin and katabatic flows on a midlatitude island*, Mon Weather Rev, **135**, 918–932.

Deardorff, J. W. i Willis, G. E., 1985: *Further results from a laboratory model of the convective planetary boundary layer*, Bound-Lay Meteorol, **32**, 205–236.

Garratt, J. R., 1992: The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge University Press, Cambridge, 316 pp.

Jiménez, M. A. i Cuxart, J., 2005: *Large-eddy Simulations of the Stable Boundary Layer using the standard Kolmogorov theory: range of applicability*, Bound-Lay Meteorol, **115**, 241–261.

Jiménez, M. A. i Cuxart, J., 2006: *Study of the probability density functions from a Large-Eddy simulation of a stably stratified case*, Bound-Lay Meteorol, **118**, 401–420.

Jiménez, M. A., Mira, A., Cuxart, J., Luque, A., Alonso, S., i Guijarro, J. A., 2008: *Verification of a clear-sky mesoscale simulation using satellite-derived surface temperatures*, Mon Weather Rev, **In press**.

Mahrt, L. i Paumier, J., 1984: *Heat transport in the atmospheric boundary layer*, J Atmos Sci, **41**, 3061–3075.

Mahrt, L., Sun, J., Blumen, W., Delany, T., i Oncley, S., 1998: *Nocturnal Boundarylayer regimes*, Bound-Lay Meteorol, **88**, 255–278.

Monin, A. S. i Yaglom, A. M., 1971: Statistical Fluid Mechanics. Vol. I, The Massachusetts Institute of Technology, 769 pp.

Nieuwstadt, F. T. M., 1984: *The turbulent structure of the stable, nocturnal boundary layer*, J Atmos Sci, **41**, 2202–2216.

Poulos, G. S., Blumen, W., Fritts, D. C., Sun, J. K., Burns, S. P., Nappo, C., Banta, R., Newson, R., Cuxart, J., Terradellas, E., Balsley, B., i Jensen, M., 2002: *CASES-99: A comprehensive investigation of the stable nocturnal boundary layer*, B Am Meteorol Soc, **83**, 555–581.

Smedman, A. S., Bergström, H., i Högström, U., 1995: *Spectra, variances and length scales in a Marine Stable Boundary Layer dominated by a Low-Level Jet*, Bound-Lay Meteorol, **76**, 211–232.

Stull, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordretch, 666 pp.

Tennekes, H. i Lumley, J. L., 1982: A First Course in Turbulence, The Massachusetts Institute of Technology, 300 pp.

Yagüe, C., Viana, S., Maqueda, G., i Redondo, J. M., 2006: *Influence of stability on the flux-profile relationships for wind speed and temperature for the stable atmospheric boundary layer*, Nonlinear Proc Geoph, **13**, 185–203.