Tethys, 3, 71–77, 2006
www.tethys.cat
ISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2006.3.09

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

Circulacions locals nocturnes a l'illa de Mallorca: simulació mesoescalar i verificació

M.A. Jiménez, J. Cuxart, A. Mira, and D. Martínez

Grup de Meteorologia, Dpt. Física, Universitat de les Illes Balears

Rebut: 18-X-2006 – Acceptat: 3-XII-2006 – **Versió Traduïda**

Correspondència a: mantonia.jimenez@uib.es

Resum

Per tal d'estudiar el sistema nocturn de vents sota gradients dèbils de pressió sinòptica s'utilitza una simulació de mesoescala per a l'illa de Mallorca, a la Mediterrània Occidental. Als primers 500 metres per sobre del nivell de terra s'utilitza una resolució vertical molt alta per a caracteritzar amb gran detall les circulacions de prop de terra, sobretot corrents de conca i catabàtics. Hem trobat que l'illa, la conca i els vessants interactuen fortament, especialment quan s'assoleix un estat de quasi-equilibri a la segona part de la nit. Una cadena d'alta muntanya crea una àrea d'alta pressió a sobrevent on els vents locals es poden desenvolupar. Els corrents catabàtics conflueixen a les valls, on interactuen amb una bossa d'aire fred, lentament arrossegada cap al mar per l'efecte de la brisa nocturna terra-mar combinat amb un forçament topogràfic. Per veure com n'és de realista aquesta simulació, es comparen les sortides amb observacions disponibles: dades de Estacions Meteorològiques Automàtiques i imatges de satèl·lit. Tot i que la verificació és una tasca difícil, els patrons simulats de vent i temperatura coincideixen amb els observats.

1 Introducció

Quan una regió es troba sota gradients fluixos de pressió d'escala sinòptica, la meteorologia local queda amplament condicionada per les heterogeneïtats de la superfície. L'estructura espacial nocturna i l'evolució temporal són lluny de ser estacionàries o homogènies, especialment en condicions d'estratificació tèrmica estable. En aquestes condicions, especialment amb vents sinòptics fluixos i cels serens, el paper de la topografia resulta extremadament important. Al centre de les conques es formen bosses d'aire fred, i circulacions cap a fora de les valls, corrents de pendent o altres tipus de corrents en jet de nivells baixos estan presents. Totes aquestes característiques afecten el clima local. Per tal de determinar llur estructura espacial i evolució temporal resulta crucial entendre les circulacions d'aire a dins d'una conca.

L'illa de Mallorca (Figura 1) té una mida característica de 100 km, una ampla cadena de muntanyes al seu costat nord-occidental (Serra de Tramuntana), amb una altura mitjana de 700 m per sobre del nivell del mar (SNM) i la part central té diversos pics entre 1000 i 1450 m. Al costat oposat (SE) hi ha una cadena discontínua de muntanyes baixes (Serra de Llevant), amb una altura mitjana de 300 m, que pertorba molt menys els corrents que la Serra de Tramuntana. El centre de l'illa és relativament pla, tot i que elevat a 200 m SNM i amb una petita muntanya central (Randa, 500 m). Aquesta configuració topogràfica té com a resultat tres conques principals: la conca de Palma a la banda sud-occidental, la conca de Campos al sud-est, la conca d'Alcúdia al nord, més dues conques a la costa entre les cadenes de muntanya i el mar al nord-oest i a l'est.

Per comprovar si les simulacions són realistes, comparem les sortides amb tres tipus de dades:

- Estació Meteorològica Automàtica (EMA): 10 EMA de l'Institut Nacional de Meteorologia (INM) que subministren vent i direcció a 10 m i temperatures i humitats a 2 m, més precipitació i pressió a la superfície.
- Imatges NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): De mitjana, hi ha dues imatges NOAA per nit, amb una resolució horitzontal de prop d'1 km al nadir. El camp utilitzat és la temperatura superficial radiativa, que s'obté després d'algunes correccions (radiomètriques, geomètriques i atmosfèriques -vapor d'aigua-).

2006 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

Taula 1. Resum de la configuració de la simulació.

Domini	2, niuats que interaccionen
Domini interior	125 km x 100 km
Domini exterior	480 km x 320 km
Resolució horitzontal	5 km (domini exterior), 1 km (domini interior)
Resolució vertical	prop del sòl: $\Delta z = 3$ m;
	a z = 500 m: Δ z = 7 m;
	cim del domini: Δ z = 600 m
Sistema d'equacions	Durran (1989)
Condicions de contorn laterals	Anàlisi de ECMWF cada 6 hores
Esquema de radiació	Morcrette (1990)
Esquema d'advecció	Centrat amb el flux corregit de segon ordre
Esquema de turbulència	TKE unidimensional: Cuxart et al. (2000)
	Longitud de barreja: Bougeault i Lacarrère (1989)
Esquema del sòl	ISBA Noilhan i Planton (1989)
	Tipus de coberta: CORINE (Heymann et al., 1994)
	Z_0 (aigües marítimes i d'interior): Charnock (1955)
	Z_0 (àrees artificials): Masson (2000)

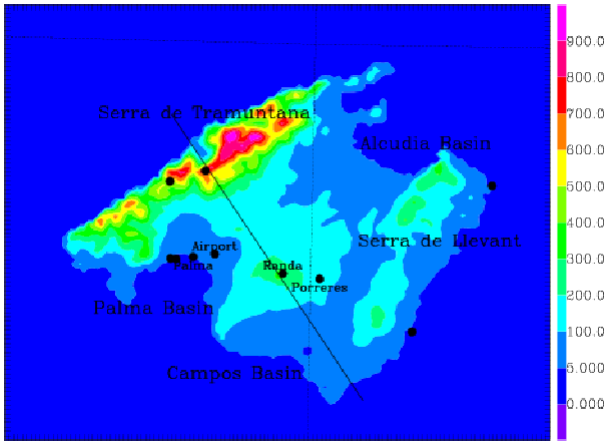

Figura 1. El domini intern (amb una llargada de 125 km x 100 km a les direccions x i y, respectivament) de la simulaci corresponent a l'illa de Mallorca, amb les tres conques ben definides: Palma, Alcúdia i Campos. La línia correspon a una secció de tall transversal d'una figura que trobarem més tard i els punts, a les Estacions Meteorològiques Automàtiques.

- Imatges del METEOSAT de Segona Generació (MSG-1): Aquest satèl·lit produeix una imatge cada 15 minuts, però la seva resolució horitzontal és d'uns 4 km per a Mallorca. S'utilitzen per produir sèries temporals per a uns píxels seleccionats per comparar-los amb les sèries de les EMA i les sortides del model a un punt donat.

2 Descripció del cas i configuració del model

Per tal de realitzar aquest estudi, hem utilitzat el model Meso-NH de la comunitat francesa (Lafore et al., 1998). El model pot ser utilitzat en una ampla varietat de configuracions (des de Simulacions Large-Eddy (LES) fins a escales sinòptiques). La seva eficàcia per a diversos règims de capes límit ha estat comprovada amb èxit (Cuxart et al., 2000) i la capa límit estable nocturna ha rebut últimament una atenció especial (Jiménez i Cuxart, 2005; Cuxart i Jiménez, 2007).

Es tria un cas amb un gradient fluix de pressió sinòptica; l'arxipèlag es troba molt a prop del centre d'un sistema d'altes pressions hivernals, amb el corrent provenint del sud-est (d'uns 4 m s^{-1} a 10 m SNM), en la direcció normal a la serralada principal de NW. Aquesta és una situació típica d'altes pressions hivernals amb vents fluixos de gran escala per a aquesta àrea. El cel estava serè i la humitat era baixa (per sota del 30% al principi de la nit). Aquesta situació sinòptica es va mantenir durant aquella nit.

S'han triat dos dominis niuats. El més gran cobreix les Balears amb una resolució de 5 km, i el de l'interior d'1 km només cobreix Mallorca. Les condicions de contorn laterals són proporcionades per les anàlisis del Centre Europeu de Previsions Meteorològiques de Mitjà Termini (ECMWF). La resolució d'1 km és considerada suficient per tal de copsar la major part del transport advectiu gairebé horitzontal a les capes més baixes, encaixant bé amb la resolució dels conjunts de dades fisiogràfiques disponibles i evitant l'ús del car esquema tridimensional de turbulència.

La simulació va de les 12 UTC (12 temps solar local) del 5 de gener de 1999 fins a l'alba del dia següent. La resolució vertical és molt fina prop del terra (3 m), per tal de poder captar tots els detalls dels corrents del nivell baix. Una resolució vertical tan fina implica passos temporals molt curts (per sota de 2 s), especialment als vessants de les muntanyes. Com que una simulació com aquesta depèn molt dels paquets fisiogràfics i físics, el seu realisme dependrà molt del bon treball de l'esquema de turbulència (Cuxart et al., 2000), de la radiació (Morcrette, 1990) i de la vegetació i els usos del sòl (Noilhan i Planton, 1989), així

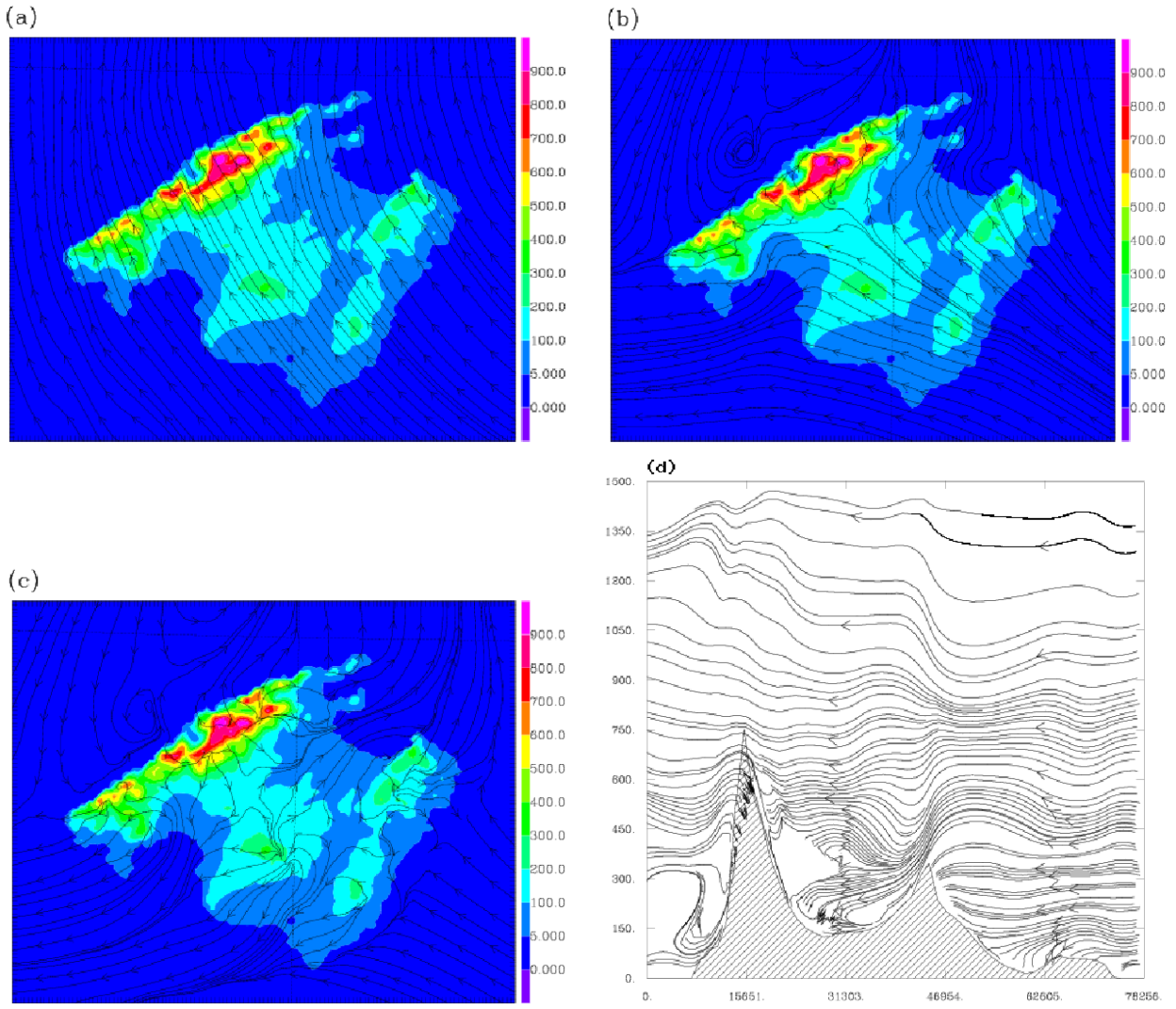

Figura 2. Línies de corrent a les 04 UTC a altures diferents: (a) 1000 m; (b) 100 m i (c) 10 m. A (d) hi ha línies de corrent verticals seguint la línia de la Figura 1.

com una bona representació de la fisiografia del terreny. Els detalls de la simulació es troben a la Taula 1.

3 La interacció de l'illa amb el corrent general

Aquí només es mostraran sortides del domini interior a les 04 UTC, considerat un temps representatiu de la situació gairebé estacionària de la segona part de la nit. Les línies de corrent a les 04 UTC mostren (Figura 2.a) que el corrent no està gaire pertorbat ja que flueix per sobre de l'illa a una altura de 1000 m per sobre del terra. Tanmateix, a 100 m (Figura 2.b), la cadena de muntanyes del nord-oest (Serra de Tramuntana) bloqueja i desvia clarament el corrent del seu voltant, amb un punt de bifurcació prop del centre de l'illa. Es troba una àrea de baixes pressions a sotavent de la cadena principal, marcada amb un remolí, mentre que a la zona de sobrevent hi ha una àrea d'altes pressions mesobeta (que no es mostra). Per tant, el centre de l'illa és una àrea de vents de poca velocitat i és capaç de desenvolupar vents locals determinats per la configuració topogràfica.

L'exploració de la secció del tall vertical en la direcció NO - SE (Figura 2.d) indica que els obstacles topogràfics pertorben el corrent per una altura de centenars de metres en el cas de la muntanya de Randa, i de milers de metres en el cas de la Serra de Tramuntana, desenvolupant ones estacionàries per sobre d'elles. La mateixa figura mostra que les àrees entre les muntanyes tenen estructures determinades per la forma de les conques, amb direccions de vent principalment determinades pels vessants de les muntanyes, i l'extensió vertical entre 100 i 250 m per sobre del sòl.

L'organització d'aquestes estructures de baix nivell és, principalment, per conques topogràfiques (Figura 2.c). Les línies de corrent a 10 m sobre el terreny mostren que l'aire

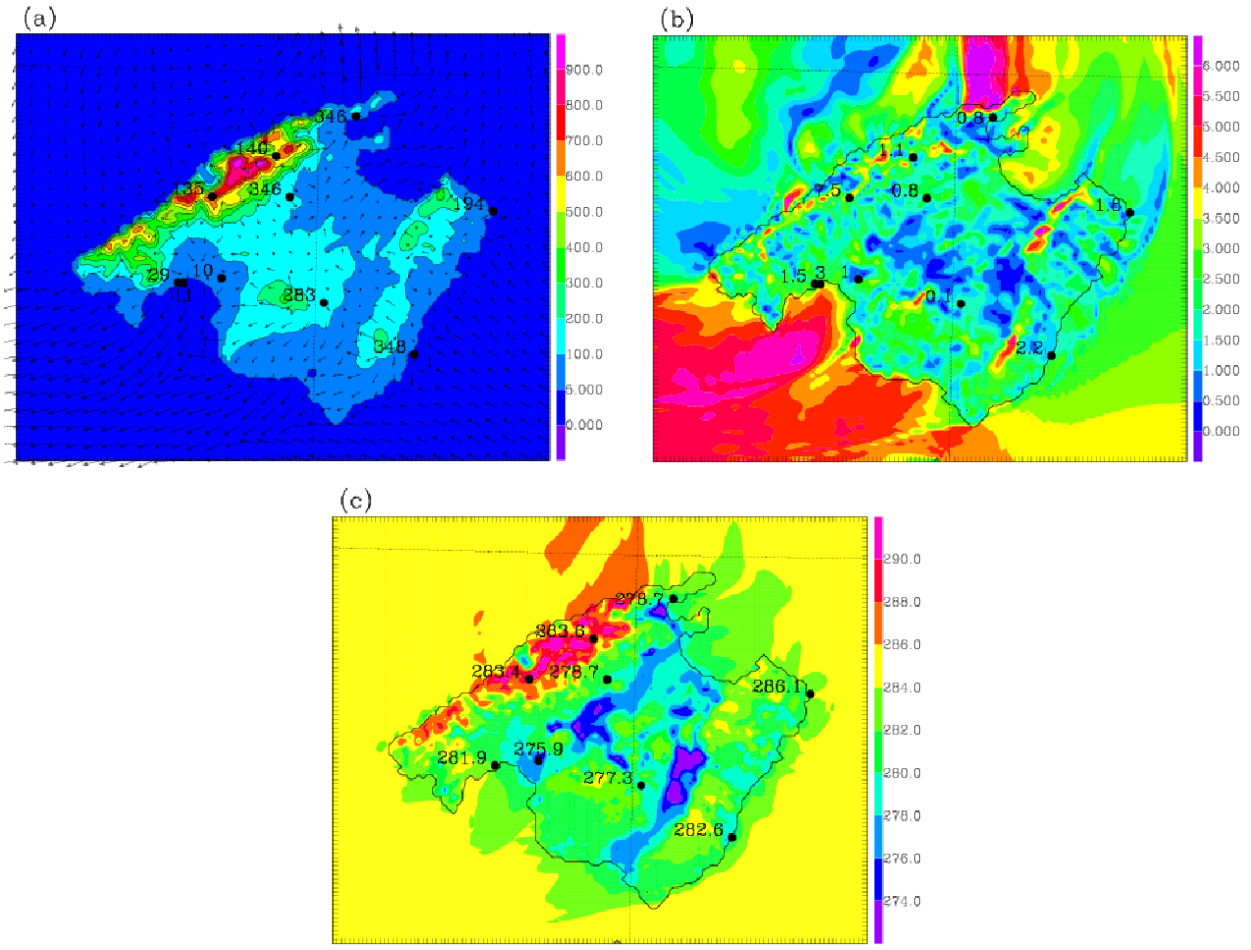

Figura 3. Talls horitzontals a les 04 UTC per a (a) direcció del vent (en graus) a 10 m, (b) velocitat del vent (en m s^{-1}) a 10 m i (c) temperatura potencial (en K) a 1.5 m. Les estacions meteorològiques automàtiques estan indicades amb un punt amb el valor observat al costat. A (a) només hi ha dibuixada una fletxa cada 3 punts de malla del domini.

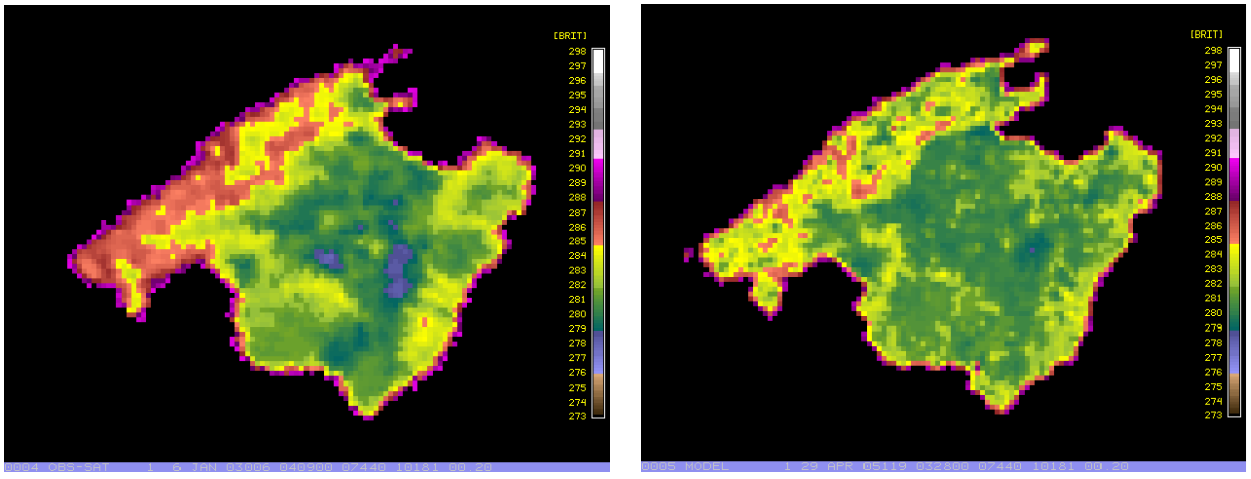

Figura 4. (a) (Fig. esquerra) Temperatura superficial radiativa calculada a partir de la imatge del satèl·lit NOAA a les 03:28 UTC el 29/04/05; (b) (fig. dreta) la mateixa calculada a partir del model a les 03:30 UTC. Més descripció d'aquest cas a Mira et al. (2006).

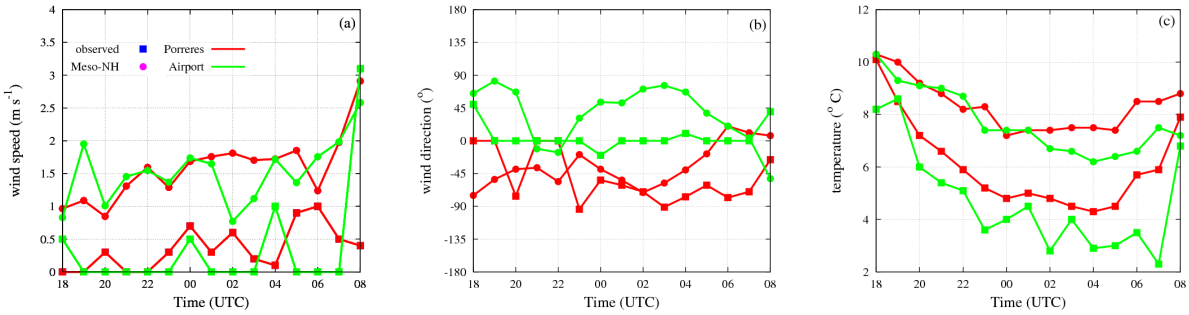

Figura 5. Sèries temporals simulades i observades per a (a) velocitat del vent (en m s^{-1}), (b) direcció del vent (en graus on el nord correspon a 0°) i (c) temperatura (en °C) a Porreres i a l'Aeroport (veure les localitzacions a la Figura 1), corresponents a ubicacions d'interior i de costa, respectivament.

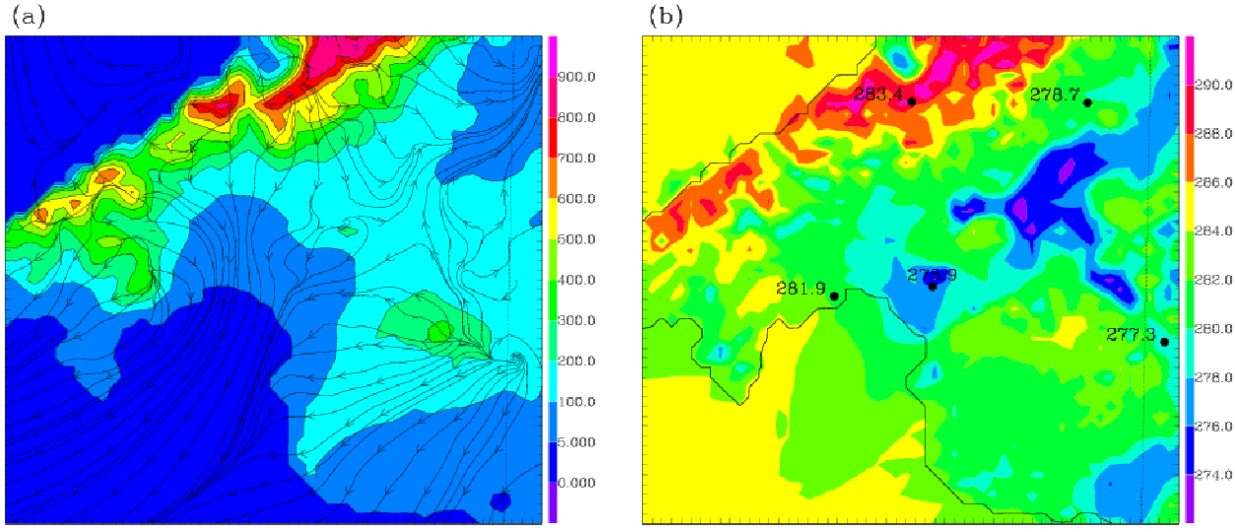

Figura 6. (a) Línies de corrent a 10 m i (b) temperatura potencial a 1.5 m a les 04 UTC a la conca de Palma. Als punts hi ha les observacions de les estacions meteorològiques automàtiques.

bufa des del centre de l'illa fins al mar en les tres conques principals (Palma, Alcúdia i Campos). La cadena de muntanyes de Llevant, malgrat la seva modesta altura vertical, pot produir vents de terra cap a mar prou forts com per aturar la progressió cap a l'interior del corrent general del SE i és un factor clau per protegir el centre de l'illa i permetre-hi del desenvolupament d'estructures locals. A l'interior de cada conca, hi ha convergència al centre i un màxim de velocitat dels vents terrals que flueixen cap al mar calent, on es tornen menys estables tèrmicament i finalment perden identitat.

Aquesta organització també es mostra a la Figura 3, on els valors observats per l'EMA es representen sobre els camps generats pel model. La direcció i velocitat del vent (Figures 3.a i 3.b) estan ben preses, tret d'una estació coberta al nord de l'illa. L'existència d'àrees amb vents molt dèbils a 10 m es confirma, encara que el nombre d'estacions interiors és molt baix. Les àrees de temperatura més baixa estan situades al centre de l'illa on el vent està gairebé en calma. El camp de temperatura a 1.5 m té patrons espacials semblants als mostrats per la imatge del NOAA (veure Figura 4, corresponent a un cas diferent amb condicions semblants -cel serè, vent fluix per a 29/04/05- descrit més endavant a Mira et al. (2006)).

Per tal d'avaluar si l'evolució del temps està ben captada, es comparen les sèries temporals observades i simulades d'algunes estacions (Figura 5). A Porreres, situat al turó oriental de la serra de Randa, a la part plana central de l'illa, les observacions mostren un vent gairebé en calma per la major part de la nit. L'EMA té un valor de llindar de, almenys, 0.5 m s^{-1}. El model genera vents més forts per a aquesta localitat, del voltant d'1 m s^{-1}, amb una bona aproximació a la direcció del vent. La baixada de la temperatura és més gran a les observacions. El vent real molt fluix observat permet a la superfície refredar-se radiativament pràcticament sense presència de turbulència generada per cisalla. Com que

el model té un vent més fort, té una cisalla i una barreja ampliada a la capa de la superfície, permetent per tant un refredament de la zona propera a la superfície menys intens.

4 Circulacions a la conca mesobeta de Palma

La conca de Palma té una forma semblant a un semicercle amb un radi d'uns 20 km, obrint-se al mar pel SSO a la Badia de Palma. Tres tipus diferents de terreny envolten la part central gairebé plana de la conca, amb un radi d'uns 10 km. A l'O i al NO, la molt abrupta Serra de Tramuntana està formada per un nombre de valls estretes on els cims es troben a 1000 m i les parts més baixes a 200 m SNM. Cada vall té les seves pròpies dinàmiques i genera corrents a fora de les valls durant la nit (Whiteman, 1990) cap al centre de la conca. El model suavitza aquestes característiques i per tant les circulacions generades, però el comportament global queda copsat, tal com mostra la comparació del vent amb les observacions.

Al costat nord de la conca, la Serra de Tramuntana és més aviat com un alt mur que cau de 1100 m a 250 m SNM en 4 km. El model topogràfic té una resolució d'1 km i subestima l'altura de la cadena. A la part E, la conca queda tancada per un vessant gairebé bidimensional d'una llargada d'uns 10 km que s'estén fins a uns 15 km cap a l'interior. Aquest vessant té, al cim, a la part central, la muntanya en forma circular anomenada Randa (500 m SNM). Aquest vessant està ben representat pel model topogràfic. Cadascuna d'aquests tres estructures ben definides genera vents catabàtics que convergeixen a la part plana de la conca (Figura 6.a).

El camp de temperatura d'1.5 m a les 04 UTC (Figura 6.b) té els valors mínims al centre de la conca, just a l'àrea on es troba l'aeroport. Les temperatures observades per l'EMA i indicades a la figura mostren que el patró està ben copsat. L'evolució del vent i la temperatura per a l'aeroport (Figura 5) indica que, una altra vegada, el model tendeix a sobreestimar lleugerament el vent de la part central de la conca. Els valors simulats es troben entre 1 i 2 m s^{-1} comparats amb els valors observats que hi ha entre la calma i 1 m s^{-1}, una diferència que pot explicar per què la baixada de les temperatures observada és 3°C més gran que la simulada.

Les parts O i el NO sembla que contribueixen com a corrents de fora de les valls, mentre que la resta de la topografia actua com a generador de corrents catabàtiques. El conjunt de corrents convergeix al centre de la conca, on l'aire fred s'acumula i és empès cap al mar, conduït per el gradient de pressió que resulta de l'aire més calent a sobre de l'aigua a la badia de Palma. Les sèries temporals de la Figura 7 mostren un bon acord entre el model i les dades.

5 Conclusions

Malgrat la seva mida relativament petita, Mallorca té un patró de corrents complicat durant la nit, sobretot relacionat amb les seves característiques topogràfiques. Quan el vent sinòptic és fluix, l'illa es converteix en una zona on predominen els vents generats localment. La simulació de mesoscalar, realitzada amb una resolució vertical molt alta, permet inspeccionar molts detalls dels corrents de nivell baix. S'ha trobat que les diferents escales rellevants (illa, conca i pendent) generen corrents que interactuen d'una manera complexa.

La Serra de Tramuntana permet la creació d'una zona de vents molt dèbils per sobre del centre de l'illa, i corrents de terra enfora en els seus costats. A l'interior, les zones de vent calmat en condicions de cel serè permeten el desenvolupament de corrents de vessant i de bosses d'aire fred a les valls, on interactuaran a mida que avanci la nit. L'efecte de la brisa terra-mar, degut al mar relativament calent que envolta l'illa, introdueix un component de terra enfora des de l'illa. Una vegada establertes aquestes característiques, a unes 5 hores després de la posta de sol, els patrons són gairebé estacionaris. La comparació amb dades disponibles i les imatges de satèl·lit dóna suport a la imatge obtinguda a partir de la simulació.

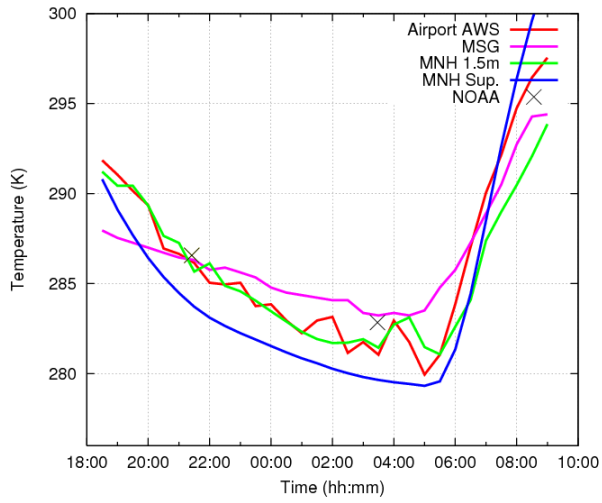

Figura 7. Sèries temporals durant la nit el 29/04/05 entre les 18 UTC i les 09 UTC a l'Aeroport de l'illa de Mallorca (veure situació a la Figura 1). La temperatura d'1.5 m obtinguda del model es compara a la mesurada per l'EMA i la temperatura radiativa obtinguda del MSG-1 i les imatges NOAA.

Agraïments. Aquest treball ha estat parcialment finançat pel projecte de recerca REN2003-09435 /CLI del Ministeri Espanyol de Recerca, i per un Projecte Especial del Govern de les Illes Balears. Agraïm al ECMWF el seu temps de càlcul i el suport dels usuaris.

Referències

Bougeault, P. i Lacarrère, P., 1989: *Parameterization of orographyinduced turbulence in a mesobeta scale model*, Mon. Weather Rev., **117**, 1872–1890.

Charnock, H., 1955: *Wind stress in a water surface*, Q. J. Roy. Meteorol. Society, **81**, 639–640.

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

Cuxart, J., Bougeault, P., i Redelsperger, J.-L., 2000: *A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations*, Q. J. Roy. Meteorol. Society, **126**, 1–30.

Durran, D. R., 1989: *Improving the anelastic approximation*, J. Atmos. Sci., **46**, 1453–1461.

Heymann, Y., Steenmans, C., Croissille, G., i Bossard, M., 1994: Corine land-cover - Technical guide, vol. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.

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.

Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fisher, C., Héreil, P., Mascart, P., Pinty, J. P., Redelsperger, J.-L., Richard, E., i de Arellano, J. V.-G., 1998: *The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulation*, Ann. Geophys., **16**, 90–109.

Masson, V., 2000: *A physically based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*, Bound.- Lay. Meteorol., **94**, 357–397.

Mira, A., Cuxart, J., Jiménez, M. A., Luque, A., Alonso, S., i Guijarro, J., 2006: *Verification of a clear-sky mesoscale simulation using satellite-derived surface temperatures*, J. Appl. Meteor. Clim., **Submitted**.

Morcrette, J.-J., 1990: *Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model*, Mon. Weather Rev., **118**, 847–873.

Noilhan, J. i Planton, S., 1989: *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*, Mon. Weather Rev., **117**, 536–549.

Whiteman, C. D., 1990: Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain, vol. 23, Atmospheric Processes over Complex Terrain, Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc.