



# Circulaciones locales nocturnas en la isla de Mallorca: Simulación mesoscalar y verificación

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

Grupo de Meteorología, Departamento Física, Universitat de les Illes Balears

Recibido: 18-X-2006 – Aceptado: 3-XII-2006 – **Versión Traducida**

Correspondencia a: mantonia.jimenez@uib.es

## Resumen

*Para estudiar el sistema nocturno de vientos bajo gradientes débiles de presión sinóptica se utiliza una simulación de mesoscala para la isla de Mallorca, en el Mediterráneo Occidental. En los primeros 500 metros por encima del nivel del suelo se utiliza una resolución vertical muy alta para caracterizar con gran detalle las circulaciones de cerca del suelo, sobre todo corrientes de cuenca y catabáticas. Hemos encontrado que la isla, la cuenca y las laderas interactúan fuertemente, especialmente cuando se alcanza un estado de casi-equilibrio en la segunda parte de la noche. Una cadena de alta montaña crea una área de alta presión a barlovento donde los vientos locales pueden desarrollarse. Las corrientes catabáticas confluyen en los valles, donde interactúan con una bolsa de aire frío, lentamente arrastrada hacia el mar por el efecto de la brisa nocturna tierra-mar combinado por un forzamiento topográfico. Para ver lo realista que es esta simulación, se comparan las salidas con observaciones disponibles: datos de Estaciones Meteorológicas Automáticas e imágenes de satélite. Aunque la verificación es una tarea difícil, los patrones simulados de viento y temperatura coinciden con los observados.*

## 1 Introducción

Cuando una región se encuentra bajo gradientes débiles de presión de escala sinóptica, la meteorología local queda ampliamente condicionada por las heterogeneidades de la superficie. La estructura espacial nocturna y la evolución temporal están lejos de ser estacionarias u homogéneas, especialmente en condiciones de estratificación estable. En estas condiciones, especialmente con vientos sinópticos débiles y cielos despejados, el papel de la topografía resulta extremadamente importante. En el centro de las cuencas se forman zonas frías, y circulaciones hacia fuera de los valles, corrientes de laderas u otros tipos de chorros de bajo nivel están presentes. Todas estas características afectan el clima local. Para determinar su estructura espacial y evolución temporal resulta crucial entender las circulaciones de aire dentro de una cuenca.

La isla de Mallorca (Figura 1) tiene una medida característica de 100 km, una ancha cadena de montañas en su lado norte-occidental (Serra de Tramuntana), con una altura media de 700 m sobre el nivel del mar (SNM) y la

parte central tiene varios picos entre 1000 y 1450 m. En el lado opuesto (SE) hay una cadena discontinua de montañas bajas (Serra de Llevant), con una altura media de 300 m, que perturba mucho menos las corrientes que la Serra de Tramuntana. El centro de la isla es relativamente llano, aunque elevado a 200 m SNM y con una pequeña montaña central (Randa, 500 m). Esta configuración topográfica tiene como resultado tres cuencas principales: la cuenca de Palma en el lado sur-occidental, la cuenca de Campos en el sur-este, la cuenca de Alcúdia en el norte, más dos cuencas en la costa entre las cadenas de montaña y el mar al noroeste y al este.

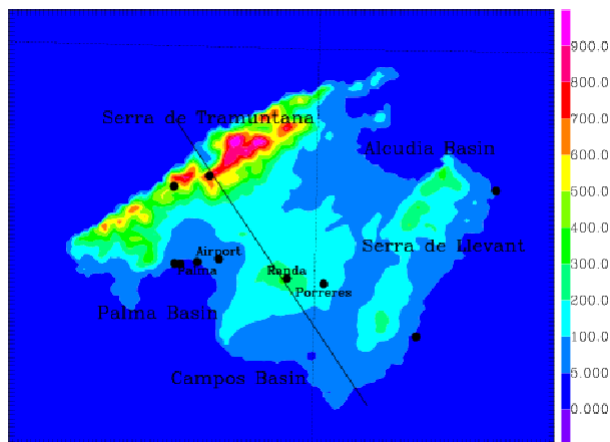
Para comprobar si las simulaciones son realistas, comparamos las potencias con tres tipos de datos:

- Estación Meteorológica Automática (EMA): 10 EMA del Instituto Nacional de Meteorología (INM) que suministran viento y dirección de 10 m y temperaturas y humedades de 2 m, más precipitación y presión en la superficie.



**Tabla 1.** Resumen de la configuración de la simulación.

Dominio	2, anidados que interaccionan
Dominio interior	125 km x 100 km
Dominio exterior	480 km x 320 km
Resolución horizontal	5 km (dominio exterior), 1 km (dominio interior)
Resolución vertical	cerca del suelo: $\Delta z = 3$ m; a $z = 500$ m: $\Delta z = 7$ m; cima del dominio: $\Delta z = 600$ m
Sistema de ecuaciones	Durrán (1989)
Condiciones de contorno laterales	Análisis de ECMWF cada 6 horas
Esquema de radiación	Morcrette (1990)
Esquema de advección	Centrado con el flujo corregido de segundo orden
Esquema de turbulencia	TKE unidimensional: Cuxart et al. (2000) Longitud de mezcla: Bougeault y Lacarrère (1989)
Esquema del suelo	ISBA (Noilhan y Planton, 1989) Tipo de cubierta: CORINE (Heymann et al., 1994) $Z_0$ (aguas marítimas y de interior): Charnock (1955) $Z_0$ (áreas artificiales): Masson (2000)



**Figura 1.** El dominio interno (con una longitud de 125 km x 100 km en las direcciones x e y, respectivamente) de la simulación correspondiente a la isla de Mallorca, con las tres cuencas bien definidas: Palma, Alcúdia y Campos. La línea corresponde a una sección de corte transversal de una figura que encontraremos más tarde y los puntos, a las Estaciones Meteorológicas Automáticas.

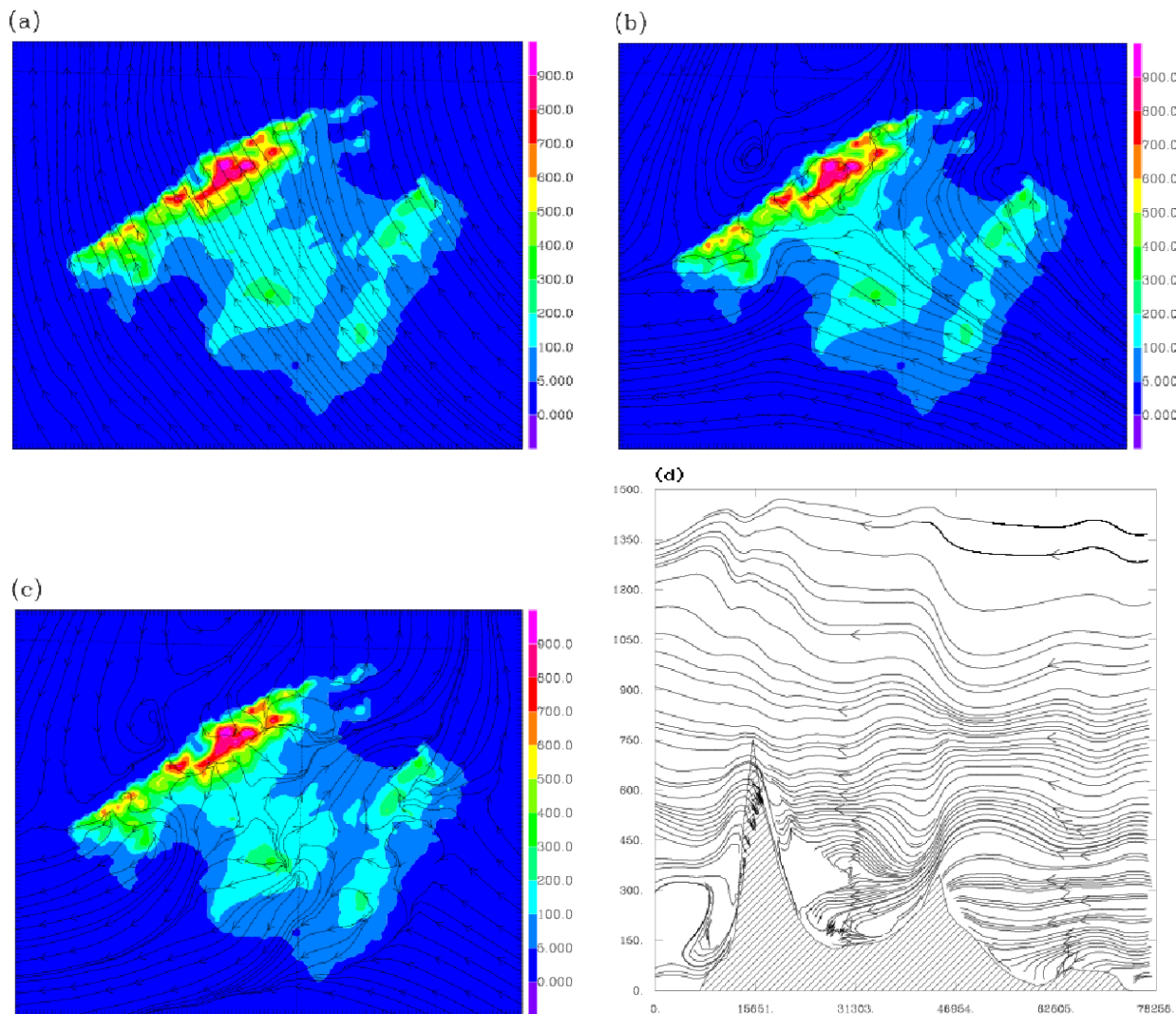
- Imágenes NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): De media, hay dos imágenes NOAA por noche, con una resolución horizontal de cerca de 1 km en el nadir. El campo utilizado es la temperatura de superficie radiante, que se obtiene después de algunas correcciones (radiométricas, geométricas y atmosféricas -vapor de agua-).
- Imágenes del METEOSAT de Segunda Generación (MSG-1): Este satélite produce una imagen cada 15 minutos, pero su resolución horizontal es de unos 4 km para Mallorca. Se utilizan para producir series temporales para unos píxeles seleccionados y compararlos con las series y salidas de modelos de puntos de gráficos.

## 2 Descripción del caso y configuración del modelo

Para realizar este estudio, hemos utilizado el modelo Meso-NH de la comunidad francesa (Lafore et al., 1998). El modelo puede ser utilizado en una amplia variedad de configuraciones (desde Simulaciones Large-Eddy (LES) hasta escalas sinópticas). Su eficiencia para varios regímenes de capas límite ha sido comprobada con éxito (Cuxart et al., 2000) y la capa límite estable nocturna ha recibido últimamente una atención especial (Jiménez y Cuxart, 2005; Cuxart y Jiménez, 2007).

Se escoge un caso con un gradiente débil de presión sinóptica; el archipiélago se encuentra muy cerca del centro de un sistema de altas presiones invernales, con la corriente procedente del sureste (de unos  $4 \text{ m s}^{-1}$  por encima del mar a 10 m SNM), cosa normal para la principal cadena de montañas del noroeste. Ésta es una situación típica de altas presiones invernales con vientos débiles de gran escala para este área. El cielo estaba sereno y la humedad era baja (por debajo del 30% al principio de la noche). Esta situación sinóptica se mantuvo durante esa noche.

Se han escogido dos dominios anidados. El más grande cubre las Baleares con una resolución de 5 km, y el interior de 1 km sólo cubre Mallorca. Las condiciones de contorno laterales son proporcionadas por los análisis del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas de Medio Alcance (ECMWF). Se considera que la resolución de 1 km es suficiente para captar la mayor parte del transporte advectivo casi horizontal en las capas más bajas, encajando bien con la resolución de los conjuntos de datos fisiográficos disponibles y evitando el uso del caro esquema tridimensional de turbulencia.

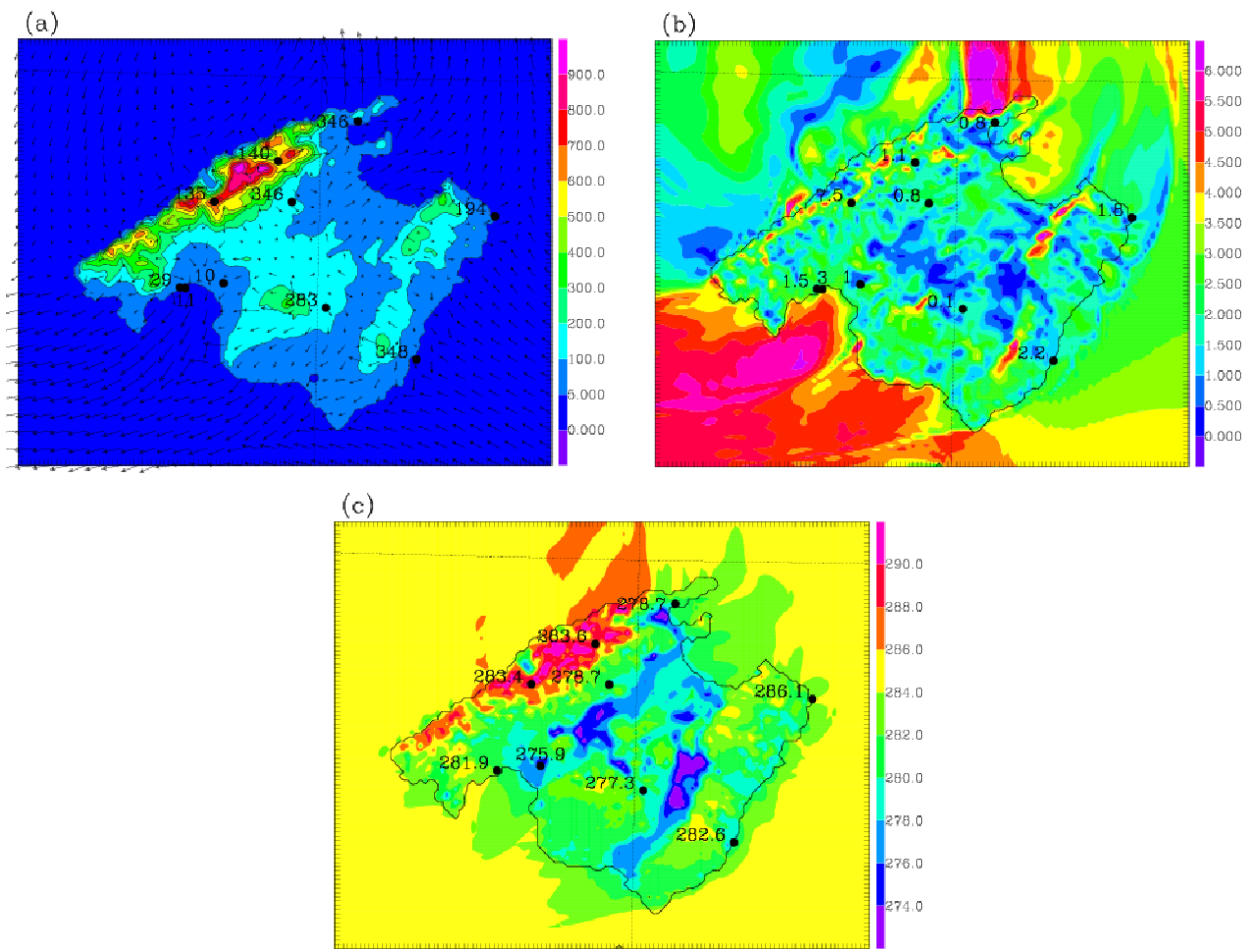


**Figura 2.** Líneas de corriente a las 04 UTC a alturas diferentes: (a) 1000 m; (b) 100 m y (c) 10 m. En (d) hay líneas de corriente verticales siguiendo la línea de la Figura 1.

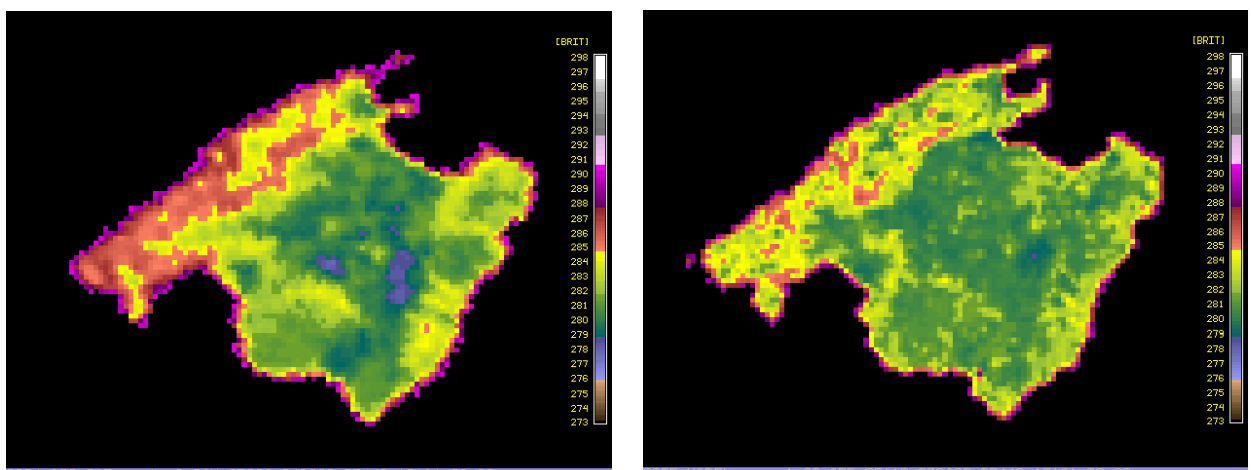
La simulación va de las 12 UTC (12 tiempo solar local) del 5 de enero de 1999 hasta el alba del día siguiente. La resolución vertical es muy fina cerca del suelo (3 m), para poder captar todos los detalles de las corrientes de nivel bajo. Una resolución vertical tan fina implica pasos temporales muy cortos (por debajo de 2 s), especialmente en las laderas de las montañas. Puesto que una simulación como ésta depende mucho de los paquetes fisiográficos y físicos, su realismo dependerá mucho del buen trabajo de los esquemas de turbulencia (Cuxart et al., 2000), de la radiación (Morcrette, 1990) y de la vegetación y los usos del suelo (Noilhan y Planton, 1989), así como una buena representación de la fisiografía del terreno. Los detalles de la instalación de la simulación se encuentran en la Tabla 1.

### 3 La interacción de la isla con la corriente general

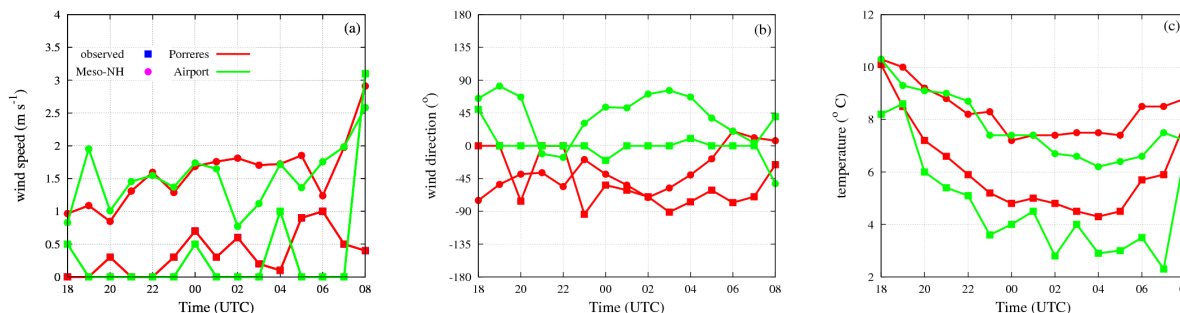
Aquí sólo mostraremos fragmentos del terreno interior a las 04 UTC, considerado un tiempo representativo de la situación casi estacionaria de la segunda parte de la noche. Las líneas de corriente a las 04 UTC muestran (Figura 2.a) que la corriente no está demasiado perturbada ya que fluye por encima de la isla a una altura de 1000 m sobre el suelo. Sin embargo, a 100 m (Figura 2.b), la cadena de montañas del noroeste (Serra de Tramuntana) bloquea y desvía claramente la corriente a su alrededor, con un punto de bifurcación cerca del centro de la isla. Se encuentra un área de bajas presiones en la zona en dirección del viento de la cadena principal, marcada con un remolino, mientras que en la zona contra el viento hay un área de altas presiones mesobeta (que no mostramos). Por lo tanto, el centro de la isla es un área de vientos de poca velocidad y es capaz de



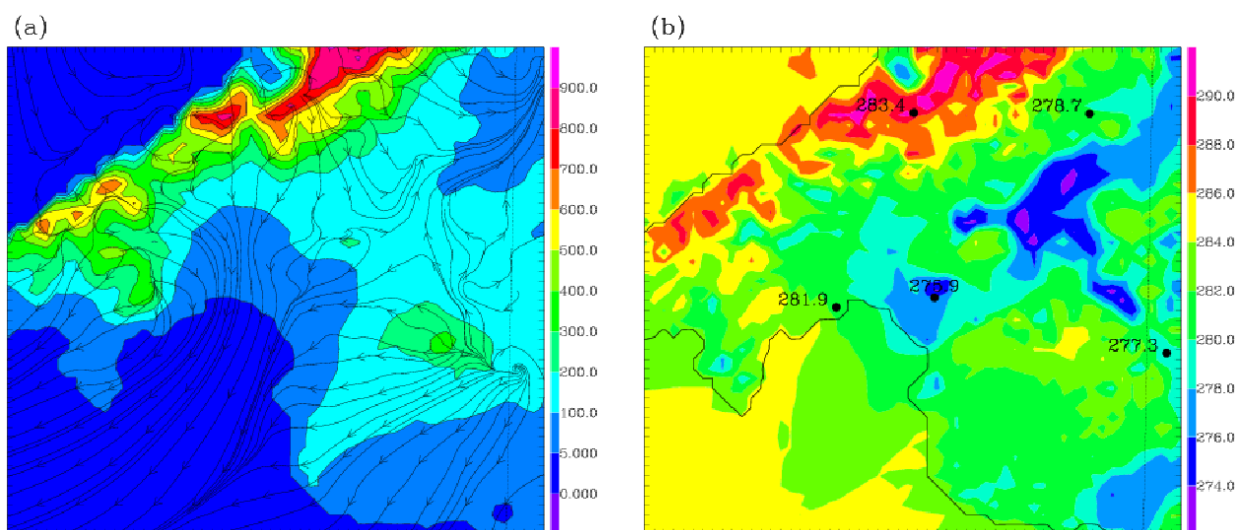
**Figura 3.** Cortes horizontales a las 04 UTC para (a) dirección del viento (en grados) a 10 m, (b) velocidad del viento (en  $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m y (c) temperatura potencial (en K) a 1.5 m. Las estaciones meteorológicas automáticas están indicadas con un punto con el valor observado al lado. En (a) sólo hay dibujada una flecha cada 3 puntos de malla del dominio.



**Figura 4.** (a) (Fig. izquierda) Temperatura superficial radiante calculada a partir de la imagen del satélite NOAA a las 03:28 UTC el 29/04/05; (b) (fig. derecha) la misma calculada a partir del modelo a las 03:30 UTC. Más descripción de este caso en Mira et al. (2006).



**Figura 5.** Series temporales simuladas y observadas para (a) velocidad del viento (en  $m s^{-1}$ ), (b) dirección del viento (en grados donde el norte corresponde a  $0^\circ$ ) y (c) temperatura (en  $^\circ C$ ) en Porreres y en el Aeropuerto (ver las localizaciones en la Figura 1), correspondientes a ubicaciones de interior y de costa, respectivamente.



**Figura 6.** (a) Líneas de corriente a 10 m y (b) temperatura potencial a 1.5 m a las 04 UTC en la cuenca de Palma. En los puntos están las observaciones de las estaciones meteorológicas automáticas.

desarrollar vientos locales determinados por la configuración topográfica.

La exploración del corte vertical en la dirección NO-SE (Figura 2.d) indica que los obstáculos topográficos perturban la corriente hasta una altura de centenares de metros en el caso de la montaña de Randa, y de miles de metros en el caso de la Serra de Tramuntana, desarrollando ondas estacionarias por encima de ellas. La misma figura muestra que las áreas entre las montañas tienen estructuras determinadas por la forma de las cuencas, con direcciones de viento principalmente determinadas por las laderas de las montañas, y la extensión vertical entre 100 y 250 m por encima del suelo.

La organización de estas estructuras de bajo nivel es, principalmente, por cuencas topográficas (Figura 2.c). Las líneas de corriente a 10 m sobre el terreno muestran que el aire sopla desde el centro de la isla hasta el mar en las tres cuencas principales (Palma, Alcudia y Campos). La

cadena de montañas de Llevant, a pesar de su modesta altura vertical, puede producir vientos de tierra hacia el mar lo bastante fuertes como para detener la progresión hacia el interior de la corriente general del SE y es un factor clave para proteger el centro de la isla y permitir el desarrollo de estructuras locales. En el interior de cada cuenca, hay convergencia en el centro y un máximo de velocidad de los vientos que soplan de tierra hacia el mar más caliente, donde se vuelven menos estables térmicamente y finalmente pierden identidad.

Esta organización también se muestra en la Figura 3, donde los valores observados por la EMA se representan sobre los campos generados por el modelo. La dirección y velocidad del viento (Figuras 3.a y 3.b) están bien tomadas, salvo una estación cubierta del norte de la isla. La existencia de áreas con vientos muy débiles a 10 m se confirma, aunque el número de estaciones interiores es muy bajo. Las áreas de temperatura más baja están situadas en el centro de la isla

donde el viento está casi en calma. El campo de temperatura a 1.5 m tiene patrones espaciales parecidos a los mostrados por la imagen del NOAA (ver Figura 4, correspondiente a un caso diferente con condiciones parecidas -cielo sereno, viento débil para 29/04/05- descrito más adelante en Mira et al. (2006)).

Para evaluar si la evolución del tiempo está bien captada, se comparan las series temporales observadas y simuladas de algunas estaciones (Figura 5). En Porreres, situado en la colina oriental de la sierra de Randa, en la parte llana central de la isla, las observaciones muestran un viento casi en calma durante la mayor parte de la noche. La EMA tiene un valor de umbral de, al menos,  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ . El modelo genera vientos más fuertes para esta localidad de acerca de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , con una buena aproximación a la dirección del viento. La bajada de la temperatura es mayor en las observaciones. El viento real muy débil observado permite a la superficie enfriarse radiativamente prácticamente sin presencia de turbulencias generadas por cizalla. Como el modelo tiene un viento más fuerte, tiene una cizalla y una mezcla ampliada en la capa de la superficie, permitiendo por lo tanto un enfriamiento de la zona cercana a la superficie menos intenso.

#### 4 Circulaciones en la cuenca mesobeta de Palma

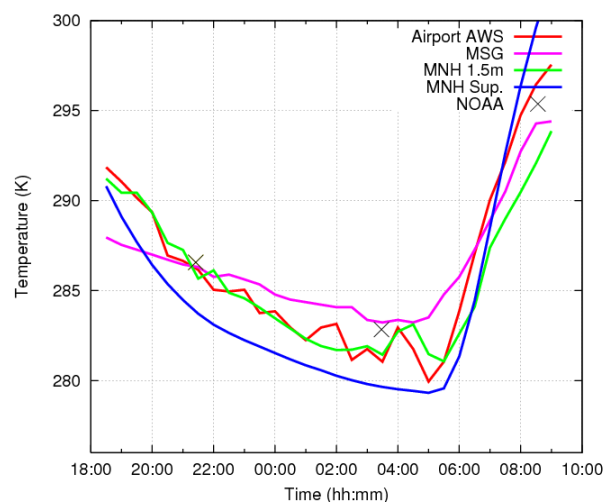
La cuenca de Palma tiene una forma parecida a un semicírculo con un radio de unos 20 km, abriéndose al mar por el SSO en la bahía de Palma. Tres tipos diferentes de terreno rodean la parte central casi llana de la cuenca, con un radio de unos 10 km. Al O y al NO, la muy abrupta Serra de Tramuntana está formada por un número de valles estrechos donde las cimas se encuentran a 1000 m y las partes más bajas a 200 m SNM. Cada valle tiene sus propias dinámicas y genera corrientes fuera de las valles durante la noche (Whiteman, 1990) hacia el centro de la cuenca. El modelo suaviza estas características y por lo tanto las circulaciones generadas, pero el comportamiento global queda captado, tal como muestra la comparación del viento con las observaciones.

Al lado norte de la cuenca, la Serra de Tramuntana es más bien como un muro alto que cae de 1100 m a 250 m SNM en 4 km. El modelo topográfico tiene una resolución de 1 km y subestima la altura de la cadena. En la parte E, la cuenca queda cerrada por una ladera casi bidimensional de una longitud de unos 10 km que se extiende hasta unos 15 km hacia el interior. Esta ladera tiene, en la cima, en la parte central, la montaña en forma circular llamada Randa (500 m SNM). Esta ladera está bien representada por el modelo topográfico. Cada una de estas tres estructuras bien definidas genera vientos catabáticos que convergen en la parte llana de la cuenca (Figura 6.a).

El campo de temperatura de 1.5 m a 04 UTC (Figura 6.b) tiene los valores mínimos en el centro de la cuenca, justo en el área donde se encuentra el aeropuerto. Las temperaturas observadas por la EMA e indicadas en la figura muestran que

el patrón está bien captado. La evolución del viento y la temperatura para el aeropuerto (Figura 5) indica que, otra vez, el modelo tiende a sobrestimar ligeramente el viento de la parte central de la cuenca. Los valores simulados se encuentran a  $1$  y  $2 \text{ m s}^{-1}$  comparados con los valores observados que hay entre la calma y  $1 \text{ m s}^{-1}$ , una diferencia que puede explicar por qué la observada bajada de las temperaturas es  $3^\circ\text{C}$  mayor que la simulada.

Las partes O y NO parece que contribuyen como corrientes de fuera de las valles, mientras que el resto de la topografía actúa como generador de corrientes catabáticas. El conjunto de corrientes converge en el centro de la cuenca, donde el aire frío se acumula y es empujado hacia el mar, conducido por el gradiente de presión que resulta del aire más caliente encima del agua de la bahía de Palma. Las series temporales mostradas en la Figura 7 muestran un buen acuerdo entre el modelo y los datos.



**Figura 7.** Series temporales durante la noche del 29/04/05 entre las 18 UTC y las 09 UTC en el Aeropuerto de la isla de Mallorca (ver situación en la Figura 1). La temperatura de 1.5 m obtenida del modelo se compara a la medida por la EMA y la temperatura radiativa obtenida del MSG-1 y las imágenes NOAA.

#### 5 Conclusiones

A pesar de su tamaño relativamente pequeño, Mallorca tiene un patrón de corrientes complicado durante la noche, sobre todo relacionado con sus características topográficas. Cuando el viento sinóptico es débil, la isla se convierte en una zona donde predominan los vientos generados localmente. La simulación mesoscalar, realizada con una resolución vertical muy alta, permite inspeccionar muchos detalles de las corrientes de nivel bajo. Se ha encontrado que las diferentes escalas relevantes (isla, cuenca y ladera) generan corrientes que interactúan de un modo complejo.

La Serra de Tramuntana permite la creación de una

zona de vientos muy débiles por encima del centro de la isla, y corrientes de tierra hacia fuera en sus lados. En el interior, las zonas de viento calmado en condiciones de cielo sereno permiten el desarrollo de corrientes de ladera y de zonas frías en los valles, donde interactúan a medida que avanza la noche. El efecto de la brisa tierra-mar, debido al mar relativamente caliente que rodea la isla, introduce un componente de tierra afuera desde la isla. Una vez establecidas estas características, a unas 5 horas después de la puesta de sol, los patrones son casi estacionarios. La comparación con datos disponibles y las imágenes da apoyo a la imagen obtenida a partir de la simulación.

**Agradecimientos.** Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto de investigación REN2003-09435/CLI del Ministerio Español de Investigación, y por un Proyecto Especial del Gobierno de las Islas Baleares. Agradecemos al ECMWF su tiempo de cálculo y el apoyo de los usuarios.

## Referencias

- Bougeault, P. y Lacarrère, P., 1989: *Parameterization of orography-induced 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. y Jiménez, M., 2007: *Mixing processes in a nocturnal Low-Level Jet: An LES study*, J. Atmos. Sci., **64**, 1666–1679.
- Cuxart, J., Bougeault, P., y Redelsperger, J.-L., 2000: *A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations*, Q. J. Roy. Meteorol. Society, **126**, 1–30.
- Durrán, D. R., 1989: *Improving the anelastic approximation*, J. Atmos. Sci., **46**, 1453–1461.
- Heymann, Y., Steenmans, C., Croissille, G., y Bossard, M., 1994: *Corine land-cover - Technical guide*, vol. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- Jiménez, M. A. y 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., Hérel, P., Mascart, P., Pinty, J. P., Redelsperger, J.-L., Richard, E., y 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., y 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. y 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.