

5 Análisis de cúmulos de retro-trayectorias con llegada a Barcelona para el período 1997-2002

En este capítulo se presenta el análisis de cúmulos (*clustering analysis* en inglés) de cinco años de retro-trayectorias con destino en Barcelona para el período 1997-2002. Gran parte del contenido de este capítulo se ha publicado en Jorba et al. (2004b). En el último apartado se presentan las situaciones meteorológicas a simular con el modelo mesoscalar. Éstas se han escogido por ser representativas de los resultados obtenidos con el análisis de cúmulos.

5.1 Introducción

Varios son los estudios de climatología sinóptica que se han desarrollado durante los últimos 30 años que intentan caracterizar las situaciones sinópticas típicas que afectan a la Península Ibérica y los tipos de tiempo asociados. En el **Capítulo 4** se han revisado distintos trabajos donde se proponen clasificaciones de los tipos de tiempo y de las situaciones sinópticas para la Península Ibérica (p.e., Albentosa 1973; Font-Tulot 1983; Martín-Vide 1987; Martín-Vide 1991; Sánchez 1993; Clavero et al. 1996; Capel-Molina 2000). La mayoría de estos trabajos se basaban en el conocimiento y la experiencia de los autores sobre la meteorología local y regional para desarrollar las distintas clasificaciones subjetivas. Martín-Vide (1991) propone 16 situaciones sinópticas típicas para la Península a partir del análisis de series de 30 años de mapas del tiempo en superficie y topografías de 500 hPa. Para aquel entonces, los recursos informáticos y su potencia de cálculo estaban muy limitados en comparación a hoy en día. De aquí que se demanden estudios con un enfoque más objetivo (Martín-Vide, 2002).

Con el fin de reducir el subjetivismo de este tipo de estudios, y para mejorar el análisis de series extensas de datos meteorológicos, a mediados de los años 80 aparece el análisis de cúmulos como una herramienta muy valiosa (Kalkstein et al., 1987). Los primeros trabajos aplicando el análisis de cúmulos con trayectorias atmosféricas fueron Moody (1986) y Moody y Galloway (1988). En ellos se aplicaron las técnicas de cúmulos para interpretar datos químicos de la precipitación a partir de trayectorias. Del mismo modo, varios autores han analizado la influencia de los patrones de transporte atmosférico en los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos a partir de análisis de cúmulos de trayectorias (p.e., Moody y Samson 1989; Moody et al. 1995; Dorling et al. 1992a,b; Dorling y Davis 1995; Brankov et al. 1998; Avila y Alarcón 1999; Cape et al. 2000). En principio, los resultados de un análisis de cúmulos son similares a aquellos obtenidos en estudios de climatología sinóptica, pero la técnica de cúmulos es más objetiva y tiene en cuenta las variaciones en la velocidad y dirección de transporte simultáneamente, obteniéndose cúmulos de trayectorias que tienen una longitud y curvatura similar (Stohl 1998). Algunos ejemplos de estudios de climatología sinóptica son los de Harris y Kahl (1990) y Harris (1992). Éstos desarrollaron una climatología de los flujos que afectan al observatorio de Mauna Loa (Hawai) y al Polo Sur respectivamente a partir de la agrupación de un número extenso de retro-trayectorias con técnicas de cúmulos. Para la Península Ibérica se han desarrollado algunos trabajos de climatología sinóptica con un enfoque más objetivo. Algunos de ellos aplican el análisis de cúmulos a mapas de presión en superficie y topografías de geopotencial de modelos numéricos (Calvo 1993; Petisco y Martín 1995), otros agrupan con técnicas de cúmulos los patrones de precipitación para obtener una clasificación de

situaciones sinópticas (Ribalaygua y Borén 1995), y algunos han aplicado la técnica automática de clasificación sinóptica de Jenkinson y Collison (1977) sobre la Península Ibérica (Spellman 2000), aunque se han detectado algunos puntos débiles en la metodología (Martín-Vide 2001). Comentar por último el trabajo de Avila y Alarcón (1999), uno de los pocos trabajos para la Península Ibérica que aplica técnicas de cúmulos a trayectorias atmosféricas para analizar las características químicas de la precipitación en el Montseny (Catalunya), aunque solo se centra en situaciones asociadas a episodios de precipitación en el área de estudio.

La aplicación de técnicas por cúmulos a bases de trayectorias atmosféricas ha resultado ser un enfoque valioso para la descripción del transporte de largo recorrido de masas de aire y de contaminantes atmosféricos. Recientemente, Stohl et al. (2002) propone para estudios futuros sobre interpretación de medidas de trazadores atmosféricos la sustitución de las trayectorias atmosféricas clásicas por simulaciones hacia atrás en el tiempo con modelos de dispersión de partículas lagrangianos y análisis de cúmulos de la posición de las partículas con el fin de obtener patrones de transporte más representativos. Los autores argumentan que la utilización de trayectorias clásicas para la interpretación de trazas de contaminantes atmosféricos normalmente no tiene en consideración que las medidas de las trazas de contaminantes representan muestras de volúmenes de aire finitos, mientras que una trayectoria marca el trazado de una pequeña partícula infinitesimal, y la turbulencia y la convección generalmente no están consideradas. Este nuevo método parece más preciso que la computación de trayectorias simples, pero la utilización de las trayectorias clásicas es aún útil para estudios que combinan el uso de una base de datos muy extensa y la aplicación de técnicas por cúmulos. Los costes computacionales necesarios con la nueva metodología propuesta parecen aún demasiado elevados, así como el número de datos que se generarían.

El propósito del presente trabajo es el de describir los patrones de transporte troposférico para el área geográfica de Barcelona y Catalunya por extensión a partir de la aplicación de una técnica por cúmulos sobre una base de cinco años de retrotrayectorias atmosféricas (Julio de 1997 a Junio de 2002). Representa un enfoque extendido de esta técnica para la Península Ibérica. El análisis de cúmulos permite agrupar las trayectorias atmosféricas según su velocidad y dirección para describir los flujos básicos que afectan a la región de estudio, y así identificar por una parte el origen de las masas de aire y las situaciones sinópticas que afectan a la zona y cuantificar la ocurrencia durante un período de estudio de cinco años. El objeto del trabajo no es el de realizar una descripción climatológica de los flujos que afectan a Barcelona, sino sintetizar y cuantificar las características de los mismos a partir de la aplicación de técnicas estadísticas multivariantes, y ser así un complemento de los distintos estudios de climatología sinóptica desarrollados para la Península Ibérica.

5.2 Análisis de cúmulos

El análisis de cúmulos es una técnica estadística multivariante diseñada para explorar estructuras dentro de un conjunto de datos (Anderberg 1973; Everitt 1980). Usualmente se presenta como un método de clasificación objetivo, pero esto no es del todo correcto, ya que, la selección del algoritmo de clasificación por cúmulos, la definición de la medida de la distancia entre pares de muestras, y el número de cúmulos o grupos a utilizar son decisiones subjetivas a tomar (Stohl 1998). Mientras que existe un elevado

número de algoritmos de clasificación por cúmulos (p.e., Anderberg 1973), los requisitos computacionales necesarios para la interpretación de los datos varían significativamente de uno a otro. El algoritmo no-jerárquico de clasificación por cúmulos utilizado para el presente trabajo, basado en Dorling et al. (1992a) y Mattis (2001), está especialmente diseñado para aplicarse a bases de datos extensas por su relativo bajo coste computacional. Entre sus características particulares destaca la capacidad del algoritmo para proponer un número óptimo de cúmulos sin la necesidad de imponer éste como parámetro inicial del análisis, como sucede en otros algoritmos (p.e., Harris y Kahl 1990; Moody et al. 1995).

Se ha desarrollado un programario que implementa el algoritmo en un entorno computacional PC. El algoritmo se basa en la metodología *k*-means, y ha sido planteado por Dorling et al. (1992a). El algoritmo se estructura en nueve pasos:

- Paso 1: Generar un número elevado de trayectorias de inicialización (n) que cubra toda la región de las trayectorias reales. Cada trayectoria de inicialización es representativa de un cúmulo.
- Paso 2: Asignar cada trayectoria al cúmulo más cercano, comparándola con la trayectoria de inicialización. Una vez asignadas todas las trayectorias, recalculan las trayectorias de inicialización, denominadas centroides, como la media de todos los miembros del cúmulo que representa.
- Paso 3: Comprobar que todas las trayectorias están en el cúmulo correcto después del cálculo de los nuevos centroides, y reasignar si es necesario las que deban cambiar de grupo.
- Paso 4: Calcular la desviación media cuadrática (RMSD) de cada trayectoria real respecto a su centroide y sumar todos los RMSD para obtener un RMSD total del cúmulo.
- Paso 5: Unir los dos cúmulos más cercanos y recalculan los nuevos centroides. Realizar la comprobación del Paso 3.
- Paso 6: Repetir el Paso 4 para obtener el RMSD total para los $n-1$ clusters.
- Paso 7: Repetir el Paso 5 hasta obtener el RMSD total para $1-n$ clusters.
- Paso 8: Repetir varias veces el proceso (Pasos 1 a 7) con distintas trayectorias de inicialización (p.e., $n-1$, $n-2$, $n-3$, ..., trayectorias de inicialización) para comprobar la convergencia de la solución.
- Paso 9: Representar el cambio porcentual en el RMSD total con el número de cúmulos.

Las modificaciones que se han introducido respecto a la metodología propuesta por Dorling et al. (1992a) se centran en el modo de inicializar el proceso de clasificación. Mientras que Dorling et al. (1992a) genera un número extenso de trayectorias de inicialización (*seed trajectories*) que cubran el abanico que comprenden las trayectorias reales a clasificar en el análisis a partir de las mismas, la metodología utilizada en el algoritmo implementado sigue a Mattis (2001), generando un número extenso de trayectorias de inicialización sintéticas en vez de trayectorias reales. La ventaja de optar por este método reside en la mejora en la convergencia de la solución en cuanto a tiempo de cálculo. Las trayectorias sintéticas cubren todo el abanico de trayectorias reales uniformemente, y permiten que el algoritmo agrupe a las trayectorias con mayor celeridad. Así, el proceso de agrupación por cúmulos se aplica para todas las trayectorias sintéticas de inicialización obteniendo n cúmulos, a continuación cada seis trayectorias sintéticas se van eliminando una cada vez, reduciendo el número de

trayectorias de inicialización sucesivamente y se van aplicando los pasos descritos por Dorling et al (1992a). Otra particularidad del algoritmo implementado es la medida de la distancia utilizada para el cálculo de la desviación media cuadrática (RMSD) de las trayectorias respecto a su cúmulo. Ésta se basa en la fórmula de Haversine de la distancia sobre una esfera (*great-circle distance*) entre dos puntos (Sinnott 1984) utilizando como variables la longitud y la latitud, detallada en la **Ecuación 5.1**.

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2} \quad (5.1)$$

donde D_i es la distancia absoluta entre pares de trayectorias calculada como la suma de las distancias entre las coordenadas 6-horarias según la fórmula de Haversine. N es el número de retro-trayectorias analizadas.

El número óptimo de cúmulos se obtiene representando el incremento del RMSD-total frente al número de cúmulos. Por RMSD-total se entiende la suma de los RMSD de cada trayectoria respecto a su centroide, y el incremento del RMSD-total se refiere al porcentaje en que incrementa este estadístico al pasar de n cúmulos a $n-1$ por la unión de los dos cúmulos más similares. Esta gráfica presenta un crecimiento monótono con saltos repentinos evidentes en varios puntos del proceso de agrupación de cúmulos. Estos saltos se interpretan como la unión de dos cúmulos de trayectorias que difieren significativamente en términos de dirección y velocidad del viento (Dorling et al. 1992a). Para obtener un número de cúmulos o grupos de trayectorias manejable para las descripciones posteriores, se ha asumido que un cambio del 5% en el RMSD-total es suficientemente significativo y indica el número de cúmulos a retener. Este umbral ha sido adoptado también en otros trabajos como Dorling et al. (1992a) o Brankov et al. (1998). La **Figura 5.1** presenta un ejemplo del aspecto de esta gráfica para el caso de agrupación de las retrotrayectorias con destino en Barcelona a una altitud de 5500 m s.n.m.

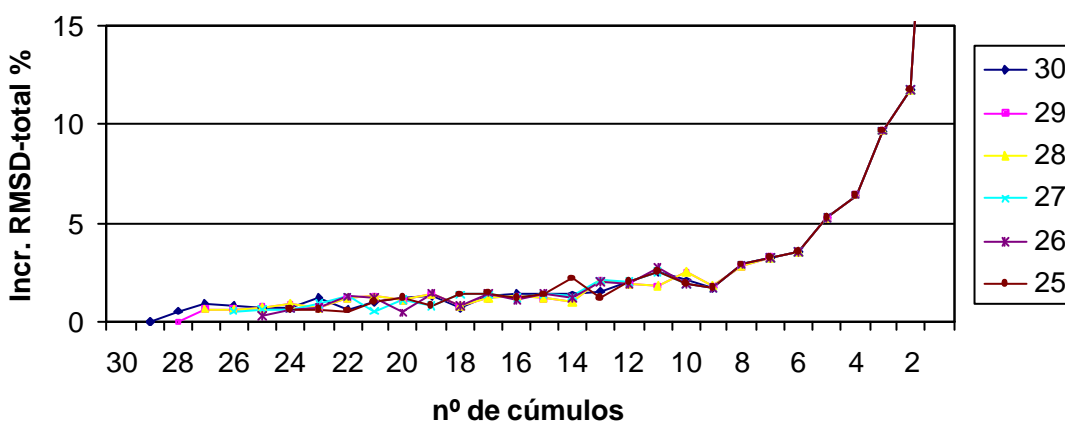


Figura 5.1 Evolución del RMSD-total en función del número de cúmulos utilizado. Caso particular de la clasificación de las retrotrayectorias con destino en Barcelona a una altitud de 5500 m s.n.m.

La **Figura 5.1** muestra como converge la solución a un número óptimo de seis cúmulos. El algoritmo se ha aplicado en primer lugar con 30 trayectorias sintéticas de inicialización obteniendo la solución a 6 cúmulos, después se vuelve a aplicar el algoritmo de nuevo pero con 29 trayectorias sintéticas y así sucesivamente. Como se ve, todo el proceso converge a una solución de seis cúmulos.

5.3 Base de datos: retro-trayectorias de cuatro días

Con el objetivo de describir los flujos que llegan a la troposfera media, baja troposfera libre, y límite superior de la capa fronteriza sobre Barcelona, se han calculado las retro-trayectorias cinemáticas de cuatro días de longitud llegando a 5500, 3000, y 1500 m s.n.m para el período Julio 1997 a Junio 2002 dos veces al día (00 y 12 UTC). Debido a que una trayectoria tiene un uso más correcto como indicador de la circulación general en lugar de un trazado exacto de una parcela de aire, se considera que el análisis de un número extenso de trayectorias en una aproximación climática reducirá los errores individuales de cada trayectoria (Harris y Kahl 1990).

Las retro-trayectorias cinemáticas se calcularon con el modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT) versión 4 desarrollado por el Air Resources Laboratory (ARL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Draxler y Hess 1998; Draxler y Rolph 2003; Rolph 2003). La información meteorológica utilizada para el cálculo de las trayectorias proviene del archivo FNL gestionado por el ARL accesible vía Internet (<http://www.arl.noaa.gov/ss/transport/archives.html>). El archivo de datos meteorológicos 6-horarios FNL procede del sistema de asimilación de datos del National Centres for Environmental Prediction (NCEP) (GDAS, Kanamitsu 1989), que utiliza los datos del modelo espectral global Medium Range Forecast (MRF). En la **Tabla 5.1** se presenta un resumen de las retro-trayectorias utilizadas en el estudio.

Tabla 5.1 Número de retro-trayectorias utilizadas y porcentaje disponible por período.

Período	N	% Available
Jul 1997- Dec 1997	328	89.1
1998	711	97.4
1999	730	100
2000	714	97.5
2001	720	98.6
Jan 2002- Jun 2002	362	100
TOTAL	3565	97.6

Se han utilizado trayectorias cinemáticas 3D siguiendo las recomendaciones de varios autores sobre la mayor precisión de estas trayectorias en comparación a otros enfoques (p.e., trayectorias isentrópicas, isobáricas) cuando se dispone de campos detallados y de calidad de la componente vertical del viento (e.g., Martin et al. 1990; Draxler 1996; Stohl y Seibert 1998; Stohl 1998). Una completa revisión sobre el cálculo y aplicaciones de trayectorias atmosféricas se presenta en Stohl (1998), discutiendo los distintos enfoques.

La longitud de la retro-trayectoria, duración temporal, se restringe en gran medida por las distancias entre regiones de origen de las masas de aire y la región de destino. Se ha optado por calcular trayectorias de cuatro días de longitud, ya que, se considera que son suficientemente representativas del transporte de largo recorrido a la Península Ibérica, y su error se mantiene acotado. Stohl (1998) afirma que errores del 20% de la distancia recorrida son los típicos para trayectorias calculadas a partir de análisis de campos de vientos, como es el caso.

A continuación se presentan los resultados del análisis de cúmulos a la base de retro-trayectorias atmosféricas de cuatro días con destino en Barcelona para tres niveles distintos.

5.4 Resultados y discusión

5.4.1 Características sinópticas que afectan a los flujos en Barcelona

A modo de recordatorio de lo descrito en el **Capítulo 2** se presentan las características principales que modulan los flujos sobre Barcelona (BCN). BCN se localiza en la costa este de la Península Ibérica dentro de la cuenca aérea del Mediterráneo occidental (WMB, *Western Mediterranean Basin*), ver la **Figura 5.2**. La cuenca Mediterránea se encuentra balanceada entre dos grandes sistemas sinópticos. Durante el invierno, el anticiclón de las Azores se encuentra encima del océano Atlántico y el anticiclón de Siberia se centra en Europa del este y Asia. En cambio, en verano el anticiclón de las Azores se refuerza y se mantiene centrado sobre el Atlántico, mientras que el anticiclón siberiano deja paso a la influencia a la potente baja térmica estival del suroeste de Asia. Ésta se convierte en el mecanismo que rige el desarrollo del intenso monzón sobre el Mar Árabe. Dentro de este marco, el invierno en la Península Ibérica se caracteriza por un aumento de la actividad ciclónica extratropical, y es la estación húmeda con vientos fuertes. Por otra parte, en verano la influencia de las altas presiones subtropicales se acentúa, y debido a la subsidencia generalizada y a la resultante estratificación estable se producen los típicos veranos secos y cálidos. El patrón de vientos en verano es similar al de invierno pero con velocidades mucho menores (Elms 1987).

Las cordilleras montañosas que rodean al mar Mediterráneo actúan como una barrera climática acentuada, protegiendo la cuenca Mediterránea de las severas condiciones climáticas continentales. Varios vientos locales del área mediterránea se desarrollan y están influenciados por la compleja orografía que rodea el mar Mediterráneo. Estas montañas canalizan los flujos hacia la cuenca, induciendo vientos intensos que pueden llegar a intensidades muy fuertes. Los accidentes geográficos principales que influyen en gran medida a los flujos que afectan BCN son los Pirineos y el valle del Ebro. Vientos locales típicos de la región son la Tramontana (viento del norte que afecta el noreste peninsular desde el golfo de León hasta las Islas Baleares), y el Cierzo (viento del noroeste canalizado por el valle del Ebro). Las brisas de mar, los vientos de valle y montaña, y el desarrollo de la típica baja térmica ibérica son los fenómenos mesoscales más característicos que se desarrollan en la región durante el verano. Aquí cabe señalar una cuestión sobre las trayectorias utilizadas en el estudio. Aunque los fenómenos mesoscales pueden no estar capturados por los análisis con los que se

calculan las trayectorias del estudio, las retro-trayectorias ayudan a identificar las situaciones en que es de esperar el desarrollo de estos fenómenos.

A continuación se presentan los resultados del análisis de cúmulos.

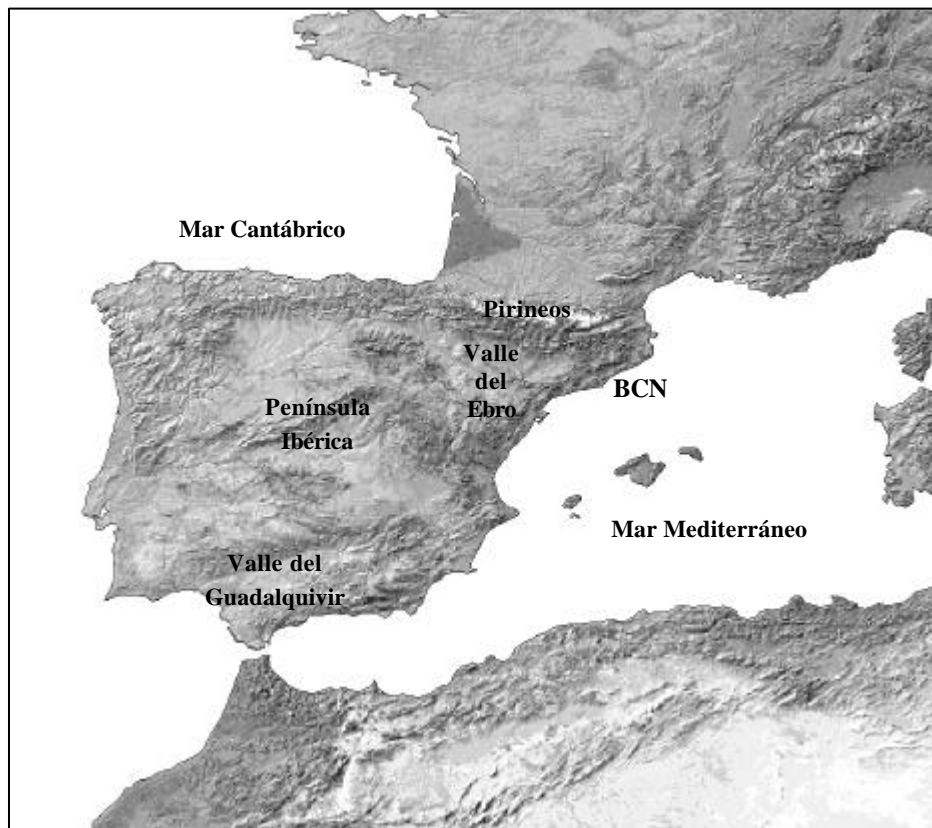


Figura 5.2 La Península Ibérica y la cuenca aérea Mediterránea.

5.4.2 Patrones de transporte a 5500 m

El análisis de cúmulos ha establecido seis grupos principales de trayectorias llegando a 5500 m sobre BCN. Las trayectorias medias de cada cúmulo, de aquí en adelante denominadas centroides, se muestran en la **Figura 5.3a**. Los regímenes de transporte dominantes a 5500 m durante julio de 1997 hasta junio de 2002 se componen de flujos del noroeste (cúmulo 1), flujos zonales (cúmulos 2, 3, y 4), flujos del suroeste (cúmulo 5), y recirculaciones regionales sobre Europa (cúmulo 6). La **Figura 5.4** muestra el conjunto de todas las trayectorias del período de estudio agrupadas por los cúmulos resultantes. La variabilidad dentro de un mismo cúmulo es evidente. Esta representación permite tener una idea de la variabilidad dentro de un cúmulo como apuntan Harris y Kahl (1990).

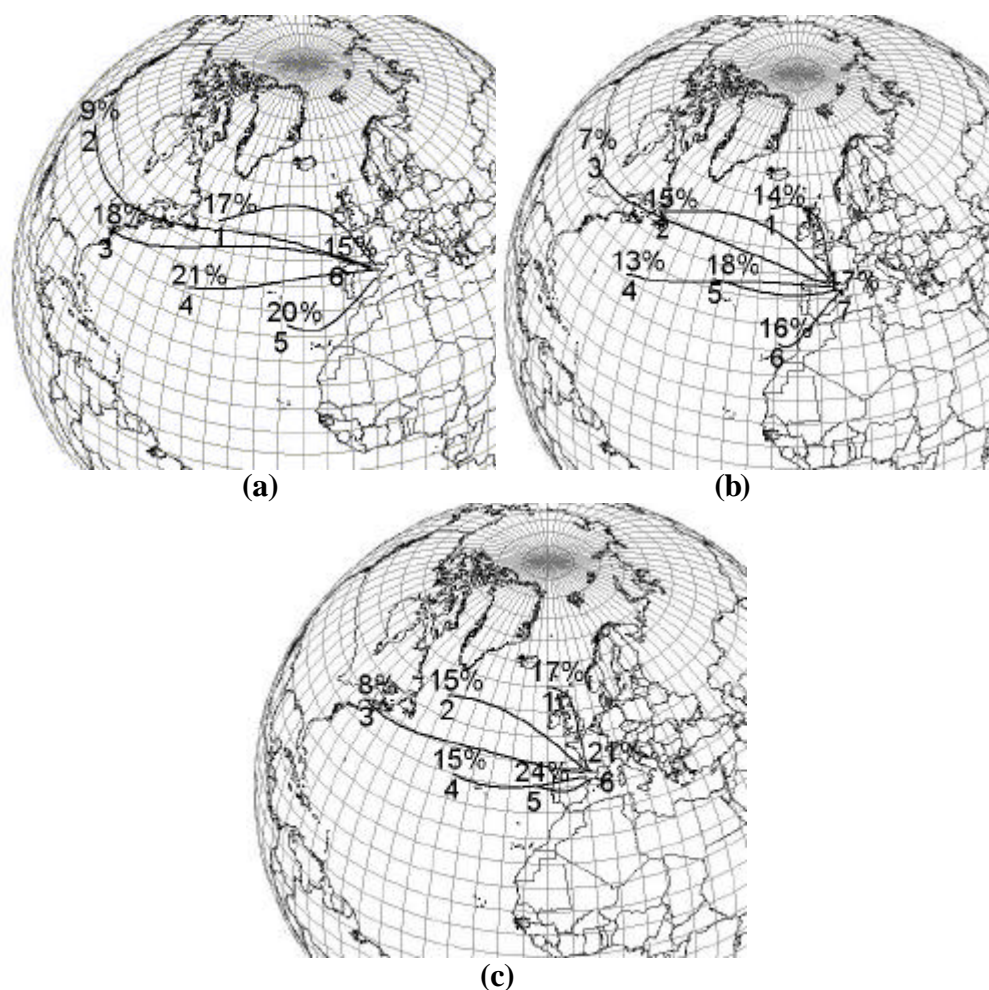


Figura 5.3 Los centroides del análisis de cúmulos a (a) 5500m, (b) 3000 m, y (c) 1500 m. Los números de los centroides indican el porcentaje de retro-trayectorias incluidas en ese cúmulo (arriba) y un número de identificación del centroide (abajo).

Los centroides representan el flujo medio del conjunto de retro-trayectorias comprendidas en cada grupo. De ahí que se pueda realizar una descripción general de las características básicas de los patrones de transporte de cada cúmulo a partir de su centroide. Para tener una estimación de la representatividad de los centroides respecto a sus trayectorias se ha calculado la desviación del transporte horizontal relativo (RHTD, *relative horizontal transport deviation*) de cada cluster. La **Tabla 5.1** presenta los valores de RHTD para cada centroide. El RHTD se ha calculado como la desviación del transporte horizontal absoluta (p.e., Stohl 1998) dividida por la longitud del centroide (la longitud de la trayectoria curva, no de la línea recta entre las coordenadas iniciales y finales del centroide) para el intervalo de tiempo de 1, 2, 3 y 4 días antes de la llegada de la trayectoria. De los resultados se tiene que tomar precauciones con los centroides lentos (p.e., **Figura 5.4f**). Este centroide puede conducir a interpretaciones erróneas, ya que, la variabilidad dentro de su cúmulo puede llegar a ser mucho mayor que la propia longitud del centroide, con RHTD superiores al 150%. Así, la interpretación de centroides lentos demanda un análisis de la representación del cúmulo (Harris y Kahl 1990). Estos flujos corresponden generalmente a recirculaciones regionales sobre una región relativamente limitada. Como ejemplo se puede citar que las masas de aire pueden recircular sobre el WMB durante varios días en condiciones sinópticas de altas

presiones, especialmente durante el verano (Millán et al. 1992; Millán et al. 1997). Cuando el flujo presenta una marcada componente advectiva el RHTD presenta valores bajos. El RHTD se mantiene por debajo del 50 %, sugiriendo que los centroides son representativos de su cúmulo como un patrón medio de transporte.

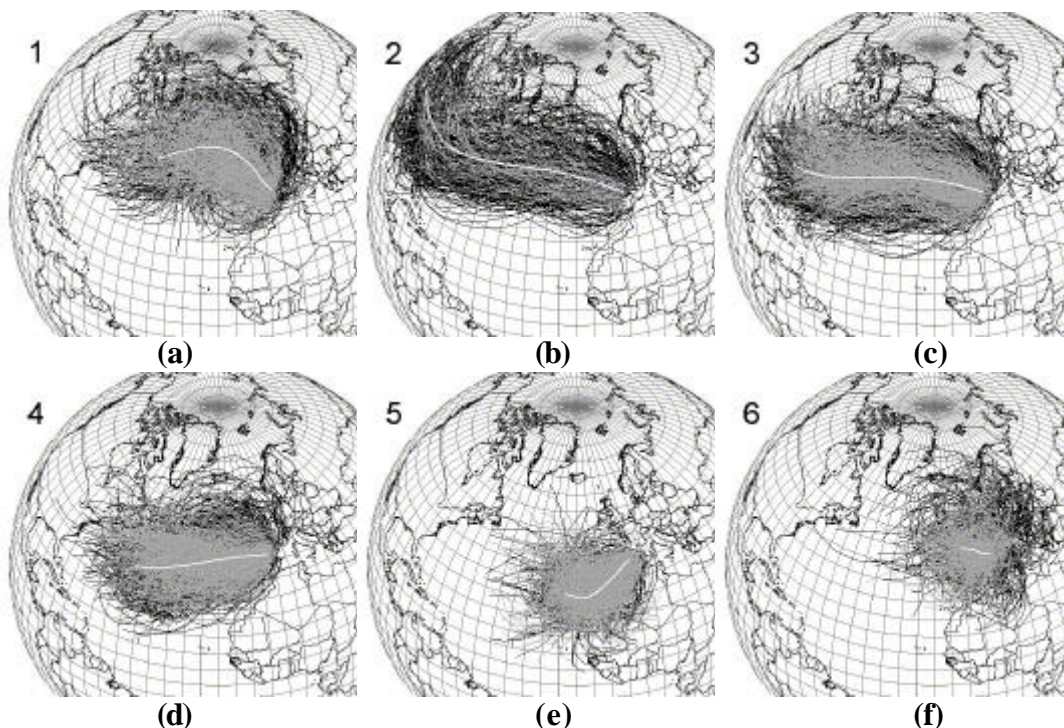


Figura 5.4 (a)-(f) Representaciones de los seis cúmulos para las retro-trayectorias de cuatro días a 5500 m del período Julio 1997 a junio 2002 (Líneas negras: retro-trayectorias de invierno; líneas grises: retro-trayectorias de verano; línea blanca: centroide).

La **Tabla 5.3** resume los resultados del análisis de cúmulos aplicado a los cinco años de retro-trayectorias. Los flujos zonales representan el 48% de los datos. Estos flujos se agrupan en advecciones rápidas del oeste (cúmulo 2) con un 9% de ocurrencia, flujos del oeste moderados (cúmulo 3) representando el 18%, y flujos lentos zonales (cúmulo 4) que comprende un total de 21% de las trayectorias analizadas a 5500 m. Como se aprecia en las **Figura 5.4b,c** el transporte de masas de aire desde América del Norte se produce en este régimen de flujos. El cúmulo 2 es destacable, ya que, incluye trayectorias de muy largo recorrido que presentan su origen cuatro días antes sobre el océano Pacífico. También el cúmulo 3, que agrupa los flujos moderados del oeste, puede ser responsable del transporte de largo alcance de masas de aire desde el continente americano hasta la WMB. Los flujos lentos del oeste presentan una dirección más marcada del sur, advectando masas de aire desde el centro del océano Atlántico.

Otro patrón de transporte que representa el 17% de las trayectorias es el de flujos del noroeste, cúmulo 1. Este grupo está formado por flujos del noroeste, norte y algunos flujos del noreste, estos últimos ocurriendo especialmente en invierno. La longitud de las trayectorias es suficiente para transportar masas desde Canadá. La forma del cúmulo presenta una curvatura anticiclónica, advectando masas de aire polar marítimo, ártico marítimo, y en algunos casos polar continental hacia BCN.

Tabla 5.2 Desviación relativa del transporte horizontal (RHTD) respecto al patrón medio a 1, 2, 3, y 4 días antes de la llegada de la retro-trayectoria, en porcentaje, para los resultados de los 5 años de trayectorias.

Cúmulos		RHTD	RHTD	RHTD	RHTD
		T = -1 día (%)	T = -2 días (%)	T = -3 días (%)	T = -4 días (%)
5500 m	1	97	55	39	38
	2	47	24	17	18
	3	57	29	18	20
	4	64	34	25	28
	5	53	39	39	46
	6	253	231	196	139
3000 m	1	95	64	48	50
	2	75	38	24	30
	3	49	27	21	22
	4	51	28	20	24
	5	65	45	34	38
	6	56	41	40	48
	7	484	400	375	260
1500 m	1	86	60	48	51
	2	69	41	28	34
	3	49	30	24	27
	4	57	39	31	35
	5	100	80	70	71
	6	287	173	154	150

Los flujos del suroeste representan el 20% de los casos (cúmulo 5). Vientos débiles soplando desde latitudes medias advectan aire cálido con posibilidad de transportar polvo Sahariano a la cuenca Mediterránea y centro de Europa. Estas situaciones ocurren predominantemente durante el verano, con una frecuencia del 13% entre los meses de abril a septiembre. Las intrusiones de polvo Sahariano afectan a la Península Ibérica en general por la localización de depresiones al oeste o suroeste de la Península, o cuando el anticiclón norte africano se desplaza hacia el este o sureste de la Península, o por combinación de los dos sistemas (Querol et al. 2001; Rodríguez et al. 2001). La corta longitud de las trayectorias es indicativo de la posibilidad de recirculaciones sobre el suroeste de Europa, o circulaciones alrededor de zonas depresionarias o centros de altas presiones.

Por último, el 15% de los casos se agrupan en un cúmulo de recirculaciones regionales. Durante el verano, la influencia casi persistente del anticiclón de las Azores sobre la región, y en invierno la disposición del anticiclón continental Europeo y su acción sobre la cuenca Mediterránea se puede llegar a reflejar en la troposfera media con situaciones de bajo gradiente bórico.

Tabla 5.3 Resumen de los resultados del análisis de cúmulos aplicado a los cinco años de retro-trayectorias con destino en Barcelona y llegadas a 5500, 3000, y 1500 m (Verano: Abril a Septiembre; Invierno: Octubre a Marzo. Los porcentajes se han calculado en base a las 3565 retro-trayectorias de los cinco años utilizadas en el análisis).

Altitud de llegada	5500 m														
Cúmulo	Total (%)	Verano (%)	Invierno (%)	Ene (%)	Feb (%)	Mar (%)	Abr (%)	May (%)	Jun (%)	Jul (%)	Ago (%)	Sep (%)	Oct (%)	Nov (%)	Dec (%)
1.Noroeste (NW)	17	8	9	1.3	1.4	1.3	1.8	1.0	1.1	1.5	1.4	1.7	0.9	1.9	1.7
2.Oeste rápida (W)	9	2	7	1.4	0.9	0.8	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	0.4	1.1	1.5	1.3
3.Oeste (W)	18	8	10	1.8	1.5	1.8	2.0	1.0	1.2	1.4	1.1	1.2	1.4	1.5	1.8
4.Oeste lenta (W)	21	11	10	1.7	1.6	1.8	2.0	1.7	2.1	1.9	1.5	1.4	1.9	1.3	2.1
5.Sudoeste (SW)	20	13	7	1.1	0.9	1.8	1.0	2.4	2.2	2.4	2.9	1.9	1.7	0.9	0.8
6.Recirculaciones regionales (R)	15	8	7	1.4	1.3	1.0	0.8	2.0	1.3	0.9	1.4	1.3	1.4	1.2	1.0
Altitud de llegada	3000 m														
Cúmulo	Total (%)	Verano (%)	Invierno (%)	Ene (%)	Feb (%)	Mar (%)	Abr (%)	May (%)	Jun (%)	Jul (%)	Ago (%)	Sep (%)	Oct (%)	Nov (%)	Dec (%)
1.Norte (N)	14	7	7	1.1	0.9	1.3	1.4	0.9	0.7	1.3	1.0	1.2	0.9	1.7	1.6
2.Noroeste (NW)	15	7	8	1.2	1.3	1.6	1.6	0.6	1.1	1.2	0.8	1.3	1.1	1.8	1.4
3.Oeste rápida (W)	7	1	6	1.2	0.8	0.9	0.6	0.2	0.2	0.1	0.0	0.2	1.0	1.2	0.8
4.Oeste (W)	13	5	8	1.3	1.5	1.2	1.7	1.1	0.7	0.7	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0
5.Oeste lenta (W)	18	11	7	1.1	1.3	1.4	1.8	1.3	2.1	2.0	2.2	1.5	0.9	1.0	1.4
6.Sudoeste (SW)	16	10	6	1.0	0.7	1.3	0.5	2.0	1.9	1.7	2.3	1.7	1.4	0.8	0.7
7.Recirculaciones regionales (R)	17	10	7	1.8	1.3	1.0	1.0	2.4	1.6	1.2	1.7	1.5	1.2	1.3	1.0
Altitud de llegada	1500 m														
Cúmulo	Total (%)	Verano (%)	Invierno (%)	Ene (%)	Feb (%)	Mar (%)	Abr (%)	May (%)	Jun (%)	Jul (%)	Ago (%)	Sep (%)	Oct (%)	Nov (%)	Dec (%)
1.Norte (N)	17	7	9	1.0	1.6	1.9	2.0	1.4	0.8	1.6	0.6	1.1	1.3	1.9	1.8
2.Noroeste (NW)	15	6	9	1.1	1.5	1.5	1.6	0.6	1.0	0.9	0.4	1.3	1.3	2.4	1.4
3.Oeste rápida (W)	8	2	6	1.5	1.0	1.1	0.9	0.3	0.1	0.2	0.1	0.2	0.8	0.7	1.1
4.Oeste (W)	15	6	9	1.4	1.5	1.6	1.5	1.2	1.0	0.7	0.7	0.8	1.4	1.1	2.1
5.Recirculaciones occidentales (wR)	24	16	8	1.5	1.1	1.3	1.5	2.4	2.8	2.7	3.8	2.2	2.2	1.3	1.2
6.Recirculaciones orientales (eR)	21	13	8	2.2	1.1	1.3	0.9	2.7	2.4	2.2	2.6	2.1	1.2	1.1	1.2

5.4.3 Patrones de transporte a 3000 y 1500 m

Se ha aplicado el algoritmo de análisis de cúmulos a los cinco años de retro-trayectorias con llegadas a 3000 y 1500 m. Las trayectorias a 3000 m se han agrupado en siete cúmulos, y en seis las de 1500 m. La **Figura 5.3b,c** muestra los centroides para ambos niveles, y las **Figura 5.5** y **Figura 5.6** presentan los cúmulos resultantes con las trayectorias respectivas. En la **Tabla 5.3** se presenta un resumen de los resultados para estos niveles.

Se aprecian varias diferencias cuando se comparan los resultados obtenidos. Los flujos del suroeste quedan claramente definidos y agrupados en los resultados a 3000 m por el cúmulo 6 (**Figura 5.5f**), pero presentan una ocurrencia menor a 1500 m sin un grupo específico para éstos. A 1500 m están incluidos en el cúmulo 5 (**Figura 5.6e**). Los flujos del sur representan uno de los grupos más numerosos a 3000 m.

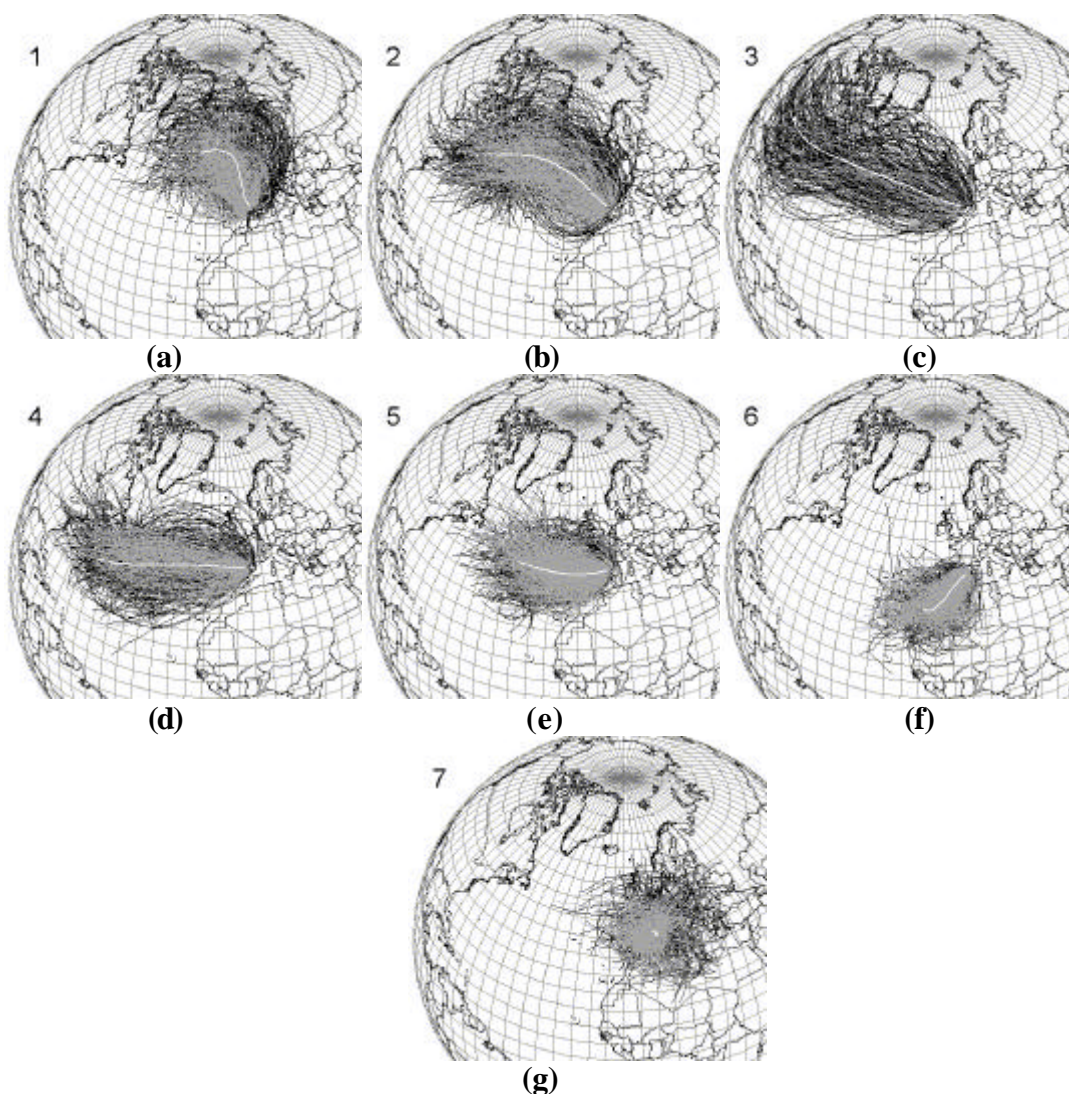


Figura 5.5 Ídem Figura 5.4 pero para los siete cúmulos a 3000 m (a)-(g).

Los resultados a 1500 m ponen de manifiesto la elevada ocurrencia de situaciones con bajo gradiente bórico en la región, que produce recirculaciones de masas de aire por la zona durante varios días. Esto se observa claramente en el cúmulo 5 (recirculaciones

occidentales) y el cúmulo 6 (recirculaciones orientales) presentados en la **Figura 5.6e,f**. Representan el 45% de las trayectorias a 1500 m. Las recirculaciones occidentales incluyen flujos muy lentos del oeste, algunas recirculaciones sobre la Península Ibérica, y algunos flujos del sur advectando aire cálido del norte de África hacia BCN. El cúmulo de recirculaciones orientales agrupa trayectorias que recirculan por el mar Mediterráneo y el este de Europa.

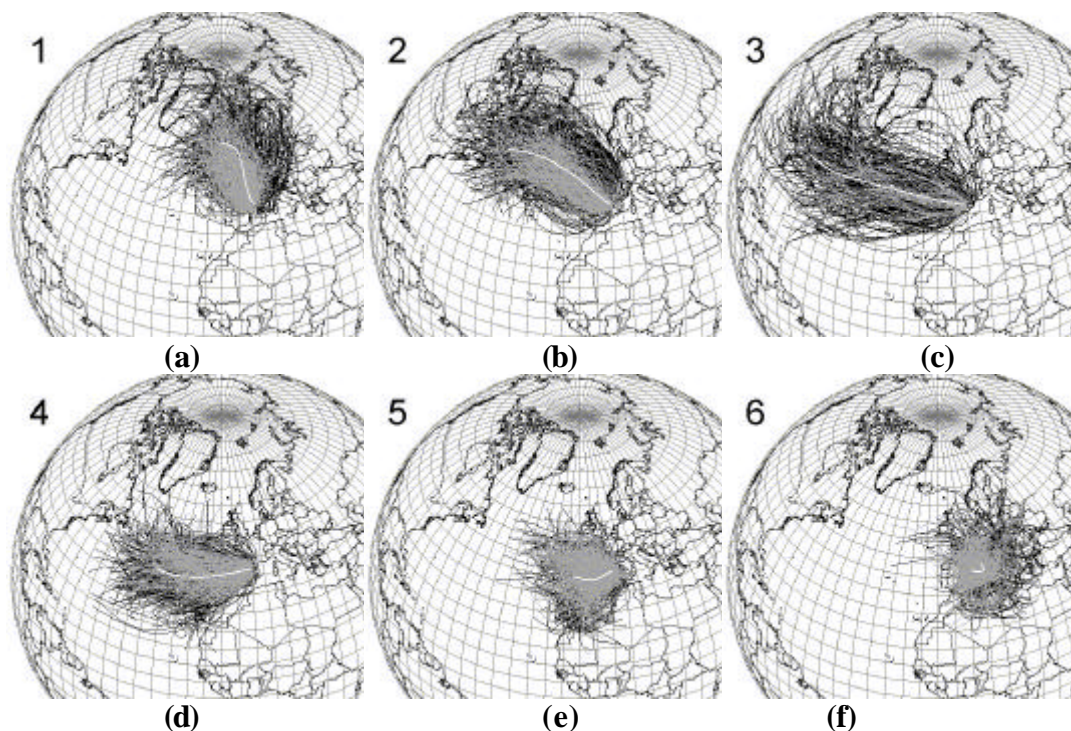


Figura 5.6 Ídem Figura 5.4 pero para los seis cúmulos a 1500 m (a)-(f).

En verano, las recirculaciones regionales son frecuentes en niveles bajos de la troposfera (las recirculaciones occidentales y orientales representan un 16% y 13% respectivamente) debido a la influencia de las altas presiones del anticiclón de las Azores, que produce varios días de situaciones con bajo gradiente bórico en niveles bajos, mientras que en la troposfera media son usuales las circulaciones zonales o del noroeste débiles. De ahí que domine el desarrollo de fenómenos mesoscalares inducidos por la orografía de la región. Estos fenómenos son brisas de mar, vientos de ladera y de valle, canalizaciones orográficas, y el desarrollo de una extensa circulación mesoscalar con un marcado ciclo diurno como es la baja térmica Ibérica con sus flujos de retorno compensatorios sobre el mar (Millán et al. 1997). El fuerte calentamiento del aire superficial sobre la Meseta Ibérica, y el valle del Guadalquivir provocan una convergencia de flujos en niveles bajos con ascensiones de masas de aire, contribuyendo al desarrollo de la baja térmica. Algunas de estas situaciones están asociadas con episodios locales de contaminación del aire en la región de estudio, que resultan con niveles de concentración de ozono elevados y un aumento en los niveles de material particulado en suspensión dentro de la capa fronteriza durante el verano (p.e., Millán et al. 1997; Toll y Baldasano 2000; Barros et al. 2003). También se asocian estas recirculaciones con estructuras multicapas de aerosoles observadas sobre BCN en situaciones típicas de verano con ausencia de forzamientos sinópticos (p.e., Soriano et al. 2001; Pérez et al. 2004). Durante el invierno, la influencia del anticiclón continental europeo puede producir también varios días de estancamiento de altas presiones sobre

BCN con un pobre desarrollo de la capa de mezcla, con espesores inferiores a 500 m s.n.m en algunos casos (Sicard et al. 2003). Con estas condiciones, las recirculaciones de masas de aire sobre BCN son usuales, pero con menor frecuencia que en verano.

El cúmulo que agrupa a las advecciones del norte, algunas circulaciones rápidas sobre la región central de Europa occidental, y varias entradas de masas de aire del noreste (**Figura 5.5a** y **Figura 5.6a**) representa el 14% y el 17% de las trayectorias a 3000 y 1500 m respectivamente. Estos flujos presentan una ocurrencia mayor durante el invierno, especialmente en niveles bajos.

Otro cúmulo importante agrupa los flujos del noroeste, representando el 15% de las situaciones tanto a 3000 como a 1500 m. Engloba a flujos rápidos de masas de aire polar marítimas; algunas de las cuales tienen su origen en el este de Canadá, y durante los últimos días viajan por Europa occidental.

Las circulaciones zonales se agrupan en tres cúmulos a 3000 m (**Figura 5.5c,e**): flujos rápidos del oeste, flujos del oeste, y circulaciones zonales lentas. En estas situaciones se pueden producir transportes de masas de aire de largo alcance desde Estados Unidos y Canadá hacia BCN, la WMB, y el sur de Europa. A 1500 m los flujos del oeste están agrupados en circulaciones rápidas del oeste, y flujos zonales (**Figura 5.6c-d**). Estos regímenes son más frecuentes durante el invierno, representando el 6% y el 9 % respectivamente.

5.4.4 Combinación de los cúmulos a 5500 m y 1500 m

Los resultados del análisis de cúmulos presentados permiten cuantificar una característica importante de las situaciones que afectan a la Península Ibérica como es el desacoplamiento entre la troposfera media y baja.

Para ello, se ha considerado que una situación sinóptica se puede caracterizar a partir de una retro-trayectoria a 5500 m y la correspondiente a 1500 m. En función de donde se han agrupado ambas retro-trayectorias en el análisis de cúmulos, la situación se identifica por el cúmulo a 5500 m y el de 1500 m (p.e., W-NW representa una situación con flujos del oeste a 5500 m y del noroeste a 1500 m). Para reducir el número de situaciones que se generan al combinar ambos niveles se han agrupado los cúmulos de los flujos del oeste a 5500 m y a 1500 m. Así, los flujos del oeste rápidos, moderados y lentos a 5500 m se han unido en un único cúmulo de flujos zonales, y de la mismo modo para los flujos del oeste rápidos y zonales a 1500 m. Con esto, se han considerado cuatro grupos a 5500 m y cinco a 1500 m. La **Tabla 5.4** presenta las frecuencias de las situaciones medias formadas al combinar los dos niveles. Estos resultados ponen de manifiesto características importantes de los flujos que afectan a la Península Ibérica.

Los flujos del oeste o zonales acoplados en la troposfera media y baja representan un 20% de las situaciones durante el período de cinco años analizado. Una frecuencia baja en comparación con regiones más septentrionales. El segundo grupo con mayor frecuencia corresponde a las situaciones W-NW, representando el 10% de los casos. La mayoría de las situaciones que presenta la **Tabla 5.4** se caracterizan por presentar un desacoplamiento de la troposfera baja respecto a la troposfera media. Las situaciones con circulaciones zonales en niveles medios y recirculaciones occidentales en niveles

bajos representan un 9%. Las situaciones con un bajo gradiente bórico en niveles bajos y medios se acontecen un 8% (R-eR) y un 3% (R-wR) durante los cinco años analizados. Estos resultados ponen de manifiesto como un gran número de situaciones afectando la Península Ibérica presentan un desacoplamiento entre la baja y media troposfera, con una frecuencia importante de situaciones con bajo gradiente bórico.

Tabla 5.4 Frecuencias de las situaciones combinando los resultados del análisis de cúmulos de 5500 m y 1500 m para los cinco años de trayectorias (Las frecuencias están calculadas en base a las 3565 retro-trayectorias utilizadas en el análisis de cúmulos; la nomenclatura de las situaciones se detalla en la Tabla 5.3: p.e., NW: flujos del noroeste).

Situación 5500-1500 m	Nº de días	Frecuencia (%)	Situación 5500-1500 m	Nº de días	Frecuencia (%)
W-W	697	20	R-N	124	3
W-NW	366	10	R-wR	117	3
W-wR	323	9	SW-W	84	2
SW-wR	319	9	NW-eR	83	2
R-eR	283	8	NW-wR	78	2
SW-eR	260	7	NW-W	52	1
NW-N	251	7	SW-N	28	1
W-N	180	5	SW-NW	22	1
W-eR	139	4	R-NW	15	<1
NW-NW	133	4	R-W	11	<1

5.4.5 Variabilidad anual y distribución mensual

Los resultados del análisis de cúmulos pueden presentar una variabilidad anual significativa debido a la variabilidad inherente de las situaciones meteorológicas que se acontecen alrededor de un comportamiento climático. Para profundizar en los resultados obtenidos se ha analizado este aspecto. El análisis de cúmulos se ha aplicado a los años 1998, 1999, 2000 y 2001 por separado. La **Figura 5.7** presenta los centroides obtenidos para los distintos años por separado para mostrar la variabilidad inter-anual en los patrones de transporte a 5500 m.

Se observa una variabilidad baja entre los resultados de los años 1998 y 1999. Sólo el cúmulo 3 presenta flujos más rápidos con una llegada a BCN más marcada del noroeste para el año 1998. El año 2000 presenta un cúmulo más que los otros casos, pero mantiene un comportamiento similar al de los años 1998 y 1999. Por otro lado, los resultados del año 2001 presentan flujos del oeste más directos, con una marcada dirección oeste-este hacia BCN en comparación con los otros años. Los centroides del norte para los años 1998, 1999 y 2000 presentan una componente del norte más suavizada que el del año 2001, pero los flujos del sur son más marcados. Las circulaciones regionales sobre BCN, la Península Ibérica y la WMB se agrupan en un cúmulo específico con una ocurrencia entre 17-20%. Las recirculaciones análogas para el 2001 se presentan en el cúmulo 1, con un centroide más extenso y una distribución desplazada hacia el noroeste.

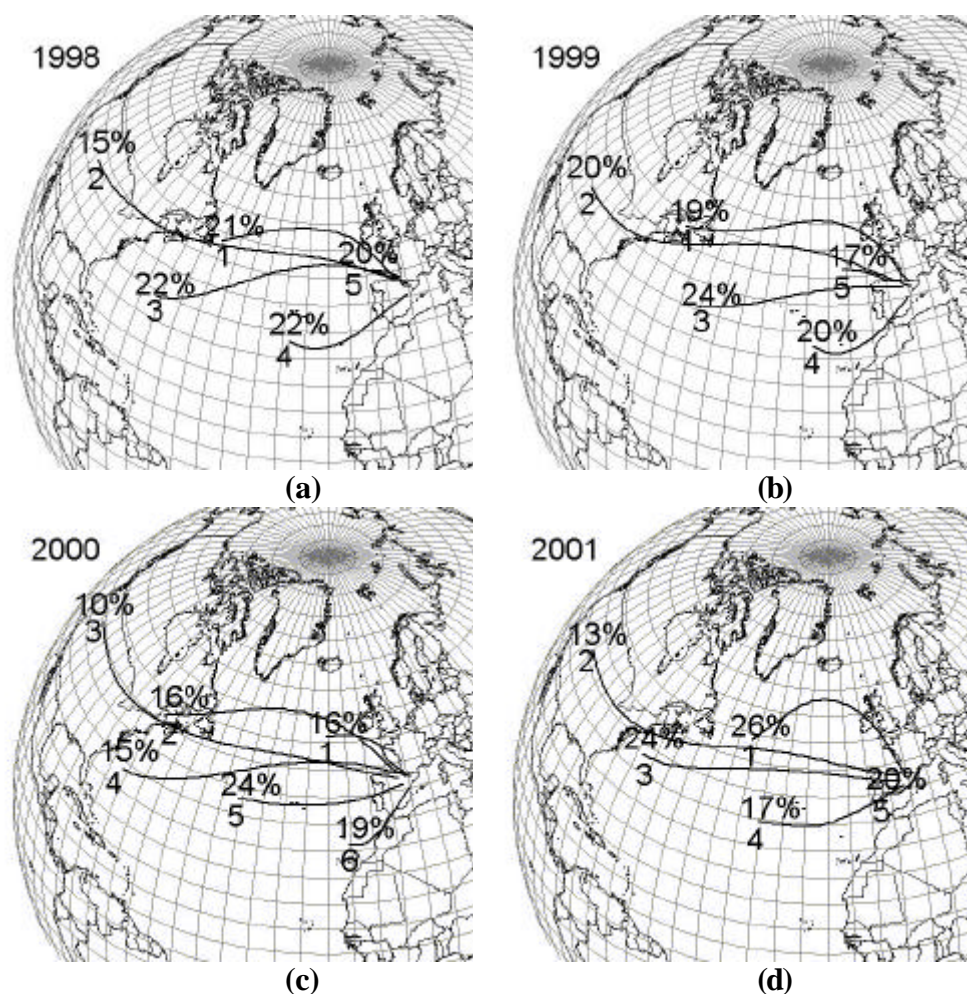


Figura 5.7 Centroides resultants del análisis de cúmulos de las retro-trayectorias de 5500 m para los años (a) 1998, (b) 1999, (c) 2000, y (d) 2001. Los números de los centroides indican el porcentaje de retro-trayectorias incluidas en ese cúmulo (arriba) y un número de identificación del centroide (abajo).

Algunas de las diferencias observadas se pueden explicar en parte por la influencia de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, *North Atlantic Oscillation*). La NAO consiste en un dipolo norte-sur de anomalías de presión con un centro localizado sobre Islandia y otro de signo opuesto extendiéndose por las latitudes centrales del Atlántico norte entre 35°N y 40°N. Los años 1997, 1998, 1999 y 2000 se caracterizaron por una fase positiva de la NAO con una tendencia a fases más positivas, el 2001 se produjo un cambio a una fase negativa, y otra vez el 2002 presentó una fase positiva (Hurrell et al. 2003). La fase positiva se asocia con flujos del oeste más intensos que los habituales cruzando el océano Atlántico con un trazado más septentrional, y la fase negativa se asocia con flujos zonales más débiles cruzando el Atlántico con un trazado más marcado oeste-este. Los patrones anuales presentados en la **Figura 5.7** no responden claramente al cambio de fase de la NAO, pero si se analizan los patrones sólo para el período invernal este fenómeno queda bien capturado. Así, se ha aplicado el análisis a los inviernos de la base de datos de cinco años por separado. La **Figura 5.8** muestra los centroides de las retro-trayectorias de invierno (diciembre a marzo) a 1500 m para los períodos 1997-1998, 1998-1999, 1999-2000, 2000-2001, y 2001-2002. Durante el cambio de fase de la

NAO (invierno 2000-2001) el patrón medio de flujos zonales circula por latitudes más bajas, y presenta velocidades más bajas en comparación con los otros inviernos. También se observa como los flujos del norte presentan una llegada a BCN más del este.

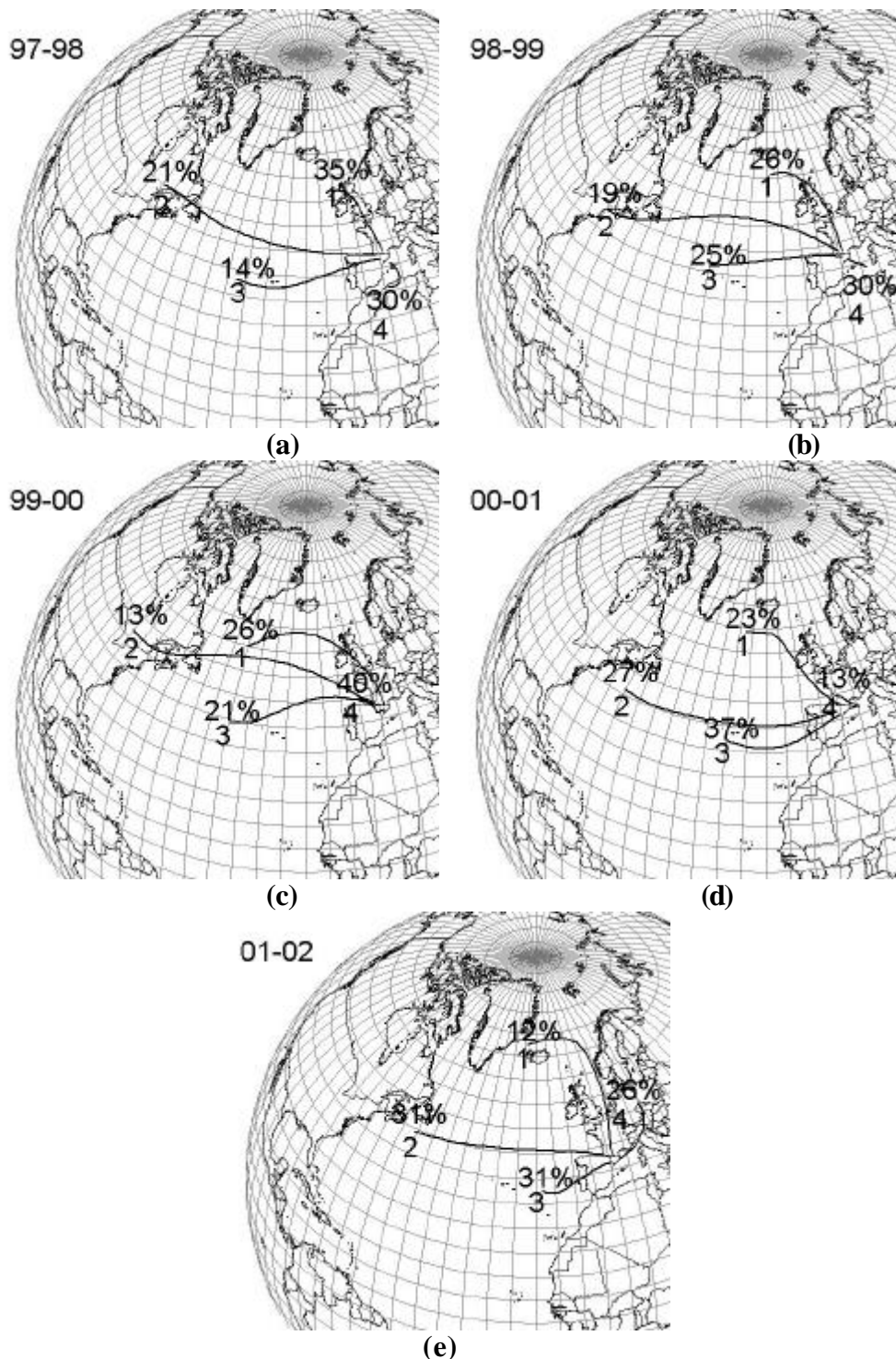
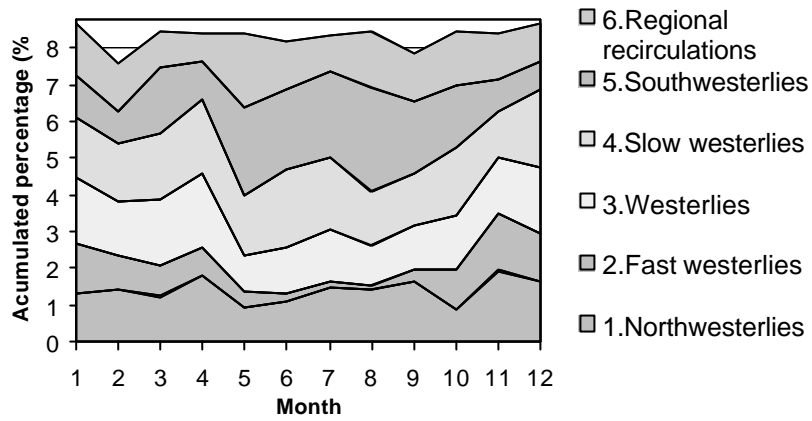
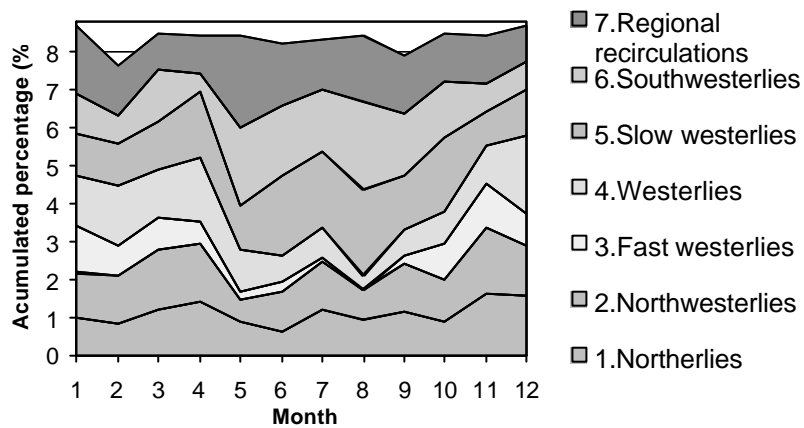


Figura 5.8 Centroides a 1500 m de las retro-trayectorias invernales (diciembre a marzo) de (a) 1997-1998, (b) 1998-1999, (c) 1999-2000, (d) 2000-2001, y (e) 2001-2002. Los números de los centroides indican el porcentaje de retro-trayectorias incluidas en ese cúmulo (arriba) y un número de identificación del centroide (abajo).

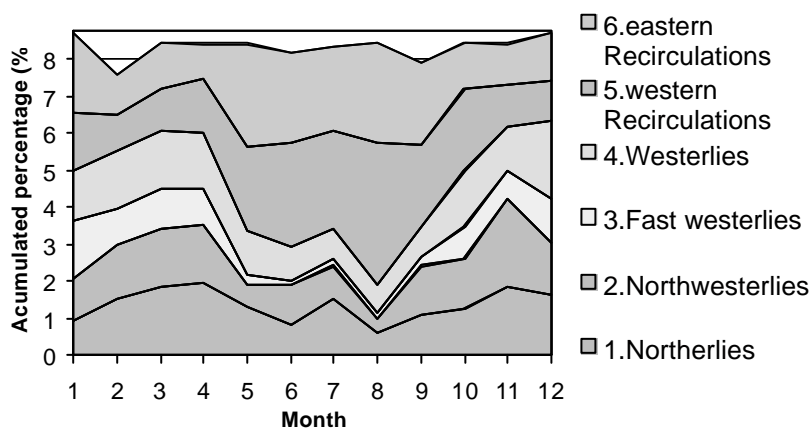
Para acabar de describir con detalle las características de los patrones de transporte anual, la **Figura 5.9** y la **Tabla 5.3** presentan la distribución mensual de los resultados del análisis de cúmulos aplicado a los cinco años de retro-trayectorias. Todos los porcentajes mensuales están calculados con relación a las 3565 retro-trayectorias utilizadas en el análisis.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 Distribución mensual de los cúmulos a (a) 5500 m, (b) 3000 m, y (c) 1500 m s.n.m en porcentaje (Los valores de porcentaje están calculados con relación a las 3565 retro-trayectorias utilizadas en el análisis de cúmulos).

Se observa un marcado patrón estacional, con regímenes acusados del oeste y norte durante el invierno, una transición en primavera hacia situaciones más estancadas típicas de verano, y finalmente un retorno al patrón invernal durante el otoño. Esta evolución se observa en los tres niveles, pero en verano las situaciones de estancamiento son más usuales en niveles bajos. Otra vez, el desacoplamiento entre la media y baja troposfera queda bien reflejado en la distribución mensual, con una descompensación de los grupos entre niveles bajos y medios. Las recirculaciones regionales a 1500 m se presentan con elevada frecuencia en verano, representando más de la mitad de las situaciones (recirculaciones occidentales y orientales, wR y eR). En la troposfera media estas situaciones son menos habituales, y presentan una distribución anual regular. Esta baja ocurrencia se compensa por los flujos zonales, que son los más frecuentes a 5500 m. Los flujos rápidos del oeste presentan un peso mayor en niveles medios que en los bajos, siendo más usuales en invierno; los meses de noviembre presentan el 1.5% de estas situaciones. Los flujos del norte a 3000 m ocurren durante todo el año en un 1% por mes. Noviembre y diciembre son los meses con mayor número de intrusiones de masas de aire del norte, seguidos por abril. Por otro lado, en verano destacan los flujos del sudoeste en la troposfera media. Los meses de agosto presentan el 2.9% de estas situaciones. Estos flujos son también significativos a 3000 m, con una menor ocurrencia comparado con 5500 m, pero representa alrededor del 1.5% por mes, especialmente durante verano.

5.5 Conclusiones del análisis de cúmulos

A partir de una base de cinco años de retro-trayectorias de cuatro días (julio de 1997 – junio de 2002) con destino a BCN a 5500, 3000 y 1500 m se han descrito los patrones de transporte generales hacia BCN con la aplicación de un análisis de cúmulos. Los resultados del análisis de cúmulos han mostrado una componente zonal marcada en los patrones medios de transporte de largo alcance a BCN, con tres grupos distintos de flujos del oeste (rápidos, moderados y lentos) representando el 48% del total de situaciones analizadas a 5500 m, el 38% a 3000 m, y el 23 % a 1500 m. Sin embargo, se ha observado también una elevada ocurrencia de recirculaciones regionales, especialmente en niveles bajos, representando el 45% de las situaciones a 1500 m (wR y eR). Se ha puesto de manifiesto el importante desacoplamiento entre la baja y media troposfera, sobretodo en verano, como una característica particular de la región en comparación con zonas más septentrionales.

Combinando los resultados a 5500 m y a 1500 m se han obtenido 20 situaciones distintas. Un 20% de estas situaciones se caracterizan por presentar flujos zonales a 5500 m y a 1500 m. Es relevante la elevada ocurrencia de situaciones con desacoplamiento, y especialmente con bajo gradiente bórico en 1500 m con una circulación más marcada en altitud (p.e., W-wR, SW-wR, W-eR).

Se ha analizado también la variabilidad anual de los resultados al aplicar un análisis de cúmulos. Se observa una variabilidad anual baja entre 1998 y 1999, con mayores diferencias para los años 2000 y 2001. Parte de esta variabilidad anual se ha atribuido a la influencia de la NAO. El cambio de fase de la NAO (2000-2001) no se ha capturado claramente con los patrones medios anuales, pero sí con los patrones invernales. Éstos reflejan el cambio de fase de la NAO con flujos del oeste llegando a BCN con una componente oeste-este marcada durante la fase negativa.

El trabajo presentado en este capítulo resume las características generales de los flujos que afectan a BCN a partir de la aplicación de una técnica estadística multivariante con el objetivo de complementar los numerosos estudios de climatología sinóptica y estudios de transporte de largo-alcance desarrollados para la Península Ibérica. Contribuye con una aproximación cuantitativa a la descripción de los patrones de transporte para la Península, y resulta en un enfoque hacia la climatología dinámica de la Península Ibérica con un grado de objetividad elevado.

Algunas aplicaciones de los resultados se pueden orientar a describir la influencia de los transportes atmosféricos en niveles de contaminantes en BCN. Como se ha comentado, son varias las situaciones de bajo gradiente bórico en la región asociadas con un empeoramiento de la calidad del aire, no sólo en BCN, sino extendiéndose por Catalunya. Casos específicos son los episodios de contaminación fotoquímica. También, algunos autores han analizado el transporte de largo-alcance de contaminantes desde norte América hacia Europa (p.e., Stohl y Trickl 1999). Del mismo modo, las intrusiones de polvo Sahariano presentan unos patrones de transporte bien definidos del sur, ocurriendo en mayor frecuencia durante los meses de verano.

5.6 Selección de los días a simular con el modelo mesoscalar

Uno de los objetivos planteados en la presente Tesis es la simulación con un modelo mesoscalar de distintas situaciones sinópticas típicas. La revisión bibliográfica realizada sobre las distintas clasificaciones de las situaciones sinópticas que afectan a la Península Ibérica ha puesto de manifiesto la diversidad de propuestas y la dificultad de uniformar las mismas para escoger las situaciones que se consideren más características. Los resultados obtenidos del análisis de cúmulos se han utilizado como herramienta para seleccionar los días a simular.

Así, de los grupos presentados en la **Tabla 5.4** se han escogido una serie de días que fuesen representativos de las distintas situaciones. Debido al elevado número de conjuntos obtenidos de la combinación de los flujos a 1500 y 5500 m, se ha optado por centrarse en los que presentan una frecuencia mayor. La complejidad de las simulaciones que se obtienen con el modelo mesoscalar a elevada resolución es un factor que ha obligado a limitar el número de situaciones a analizar. Así, se ha optado por escoger un conjunto de días que fuesen representativos de los siete primeros conjuntos (W-W, W-NW, W-wR, SW-wR, R-eR, SW-eR, NW-N), que son representativos del 70% de las situaciones analizadas durante el período de cinco años.

Otro factor limitante ha sido la disponibilidad de la información necesaria para realizar las simulaciones con el modelo mesoscalar. Como se describirá en el **Capítulo 6** estos modelos requieren los análisis de modelos globales que no son de fácil obtención. Por eso, se ha tenido un número limitado de días para escoger. De entre los días disponibles, se han clasificado siguiendo la metodología desarrollada en este capítulo, y se han seleccionado los que se han clasificado en los siete grupos primeros de la **Tabla 5.4**. Con todo, los días escogidos para realizar las simulaciones se presentan en la **Tabla 5.5**.

Tabla 5.5 Días seleccionados para simular con el modelo mesoscalar.

Grupo	Día
W-W	25 de diciembre de 2002
W-NW	10 de octubre de 2000
W-wR	14 de agosto de 2000
SW-wR	28 de abril de 2003
R-eR	12 de agosto de 2003
SW-eR	20 de diciembre de 2002
NW-N	31 de enero de 2003

La descripción sinóptica y meteorológica de los días a simular se presenta en el **Capítulo 7**. Las retro-trayectorias de cada uno de los días escogidos permite ver el grado de representatividad del día respecto al grupo que pertenece. Así, la **Figura 5.10** presenta para cada día las retro-trayectorias de cuatro días con destino en BCN a las 00, 12 y 24 UTC a 1500, 3000 y 5500 m s.n.m.

W-W: 25 de diciembre de 2002

La situación del W-W se caracteriza por una clara advección zonal o del W. Son situaciones donde el forzamiento sinóptico sobre los flujos es dominante, y no se espera que se desarrollen fenómenos mesoscalares. Corresponde al grupo más frecuente de situaciones sinópticas.

W-NW: 10 de octubre de 2000

Esta situación muestra una advección del W que al llegar a la Península Ibérica penetra con componente NW. Los análisis del día muestran con claridad la advección del NW que evoluciona a W. Es de esperar un dominio de la situación sinóptica frente al desarrollo de fenómenos mesoscalares.

W-wR: 14 de agosto de 2000

Se caracteriza por una trayectoria a 1500 m que está recirculando durante cuatro días por la Península Ibérica. Esto es indicativo de una situación en superficie con un bajo gradiente bórico, donde las masas de aire recirculan por la Península Ibérica y el Mediterráneo occidental. Se caracteriza por un estancamiento de las mismas durante varios días. En altitud se observan flujos zonales moderados. La situación se puede clasificar como un pantano barométrico, aunque estrictamente en altitud no responda a este comportamiento. Estas situaciones de bajo gradiente bórico son muy frecuentes durante el período estival, como se ha comentado en este capítulo, y se asocian con un estancamiento de las masas de aire en la región y un dominio de los fenómenos mesoscalares. Desde el 10 hasta el 19 de agosto de 2000 se produjo un episodio de contaminación fotoquímica por ozono en Catalunya (Jiménez et al., 2004). Siendo los días centrales del episodio los más intensos fotoquímicamente. La descripción de esta situación permitirá profundizar en las condiciones meteorológicas que contribuyen al desarrollo de episodios de contaminación fotoquímica. Los pantanos barométricos son situaciones donde domina el desarrollo de fenómenos mesoscalares debido al débil forzamiento sinóptico. Para la región estos son las brisas de mar y tierra, y los vientos

de montaña. Si la insolación es suficiente se puede llegar a desarrollar la baja térmica ibérica, muy característica del período estival.

SW-wR: 28 de abril de 2003

Las trayectorias del día 28 de abril de 2003 muestran una advección clara del SW en la troposfera media. En niveles bajos se aprecia como durante los últimos días las masas presentan unas velocidades menores sobre la Península y el Mediterráneo, indicativo de posibles recirculaciones. Con estas condiciones es de esperar un dominio de los forzamientos sinópticos en niveles bajos, aunque no se descarta el desarrollo de fenómenos mesoscalares. Debido a la época del año, con una insolación ya significativa, se pueden desarrollar circulaciones térmicas por la zona de estudio.

R-eR: 12 de agosto de 2003

La situación del 12 de agosto de 2003 presenta unas trayectorias de cuatro días muy lentas, con una circulación ciclónica en todos los niveles, y una subsidencia generalizada muy importante (ver el perfil de las trayectorias). Esto es indicativo de una situación de anticiclón cálido sobre la Península. La fuerte insolación del mes de agosto hace que el desarrollo de fenómenos mesoscalares sea dominante, y que se observe la presencia de la baja térmica. Este día presentó también niveles de ozono troposférico elevados en Catalunya, con un máximo de $243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Vilanova i la Geltrú (DMA, 2003).

SW-eR: 20 de diciembre de 2002

Las trayectorias para esta situación presentan una advección clara del SW en niveles altos mientras que en la baja troposfera se observa un transporte lento. Se caracteriza por la presencia del anticiclón invernal europeo al este de Italia. Representa una situación con fuerte influencia de la subsidencia anticiclónica durante el invierno.

NW-N: 31 de diciembre de 2003

Las trayectorias de este día muestran una advección del N marcada en todos los niveles. Se trata de una situación con una ciclogénesis en el golfo de León que evoluciona con celeridad induciendo fuertes flujos de componente N sobre la Península Ibérica. Es una situación característica del período invernal. El forzamiento sinóptico fuerte domina los flujos de la región, y no se desarrollan fenómenos mesoscalares.

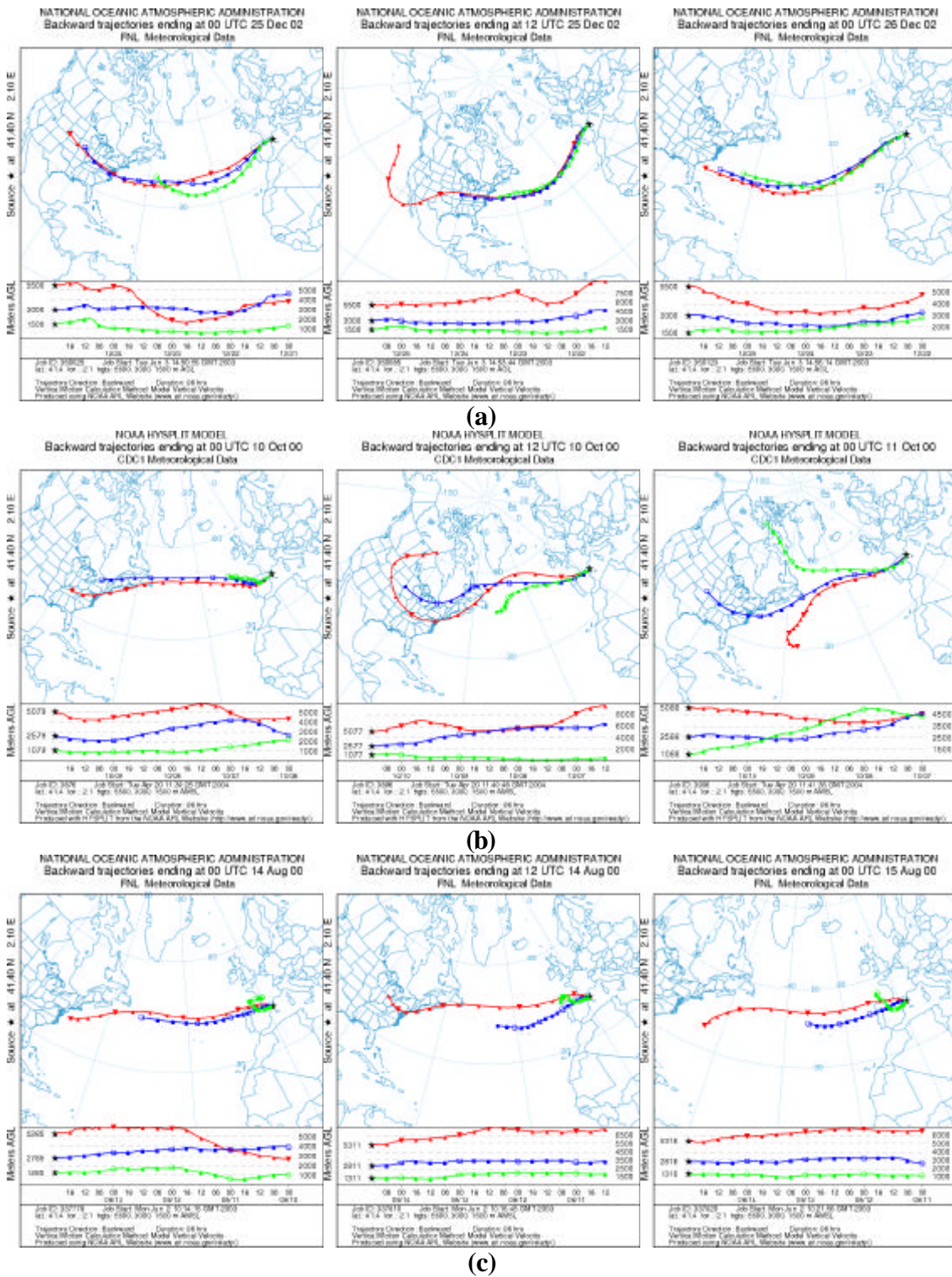


Figura 5.10 Retro-trayectorias FNL de cuatro días con destino en Barcelona a las 0, 12 y 24 UTC de los días (a) 25 de diciembre de 2002, (b) 10 de noviembre de 2000, (c) 14 de agosto de 2000, (d) 28 de abril de 2003, (e) 12 de agosto de 2003, (f) 20 de diciembre de 2002, (g) 31 de enero de 2003 correspondientes a las situaciones meteorológicas a simular con el modelo mesoscalar.

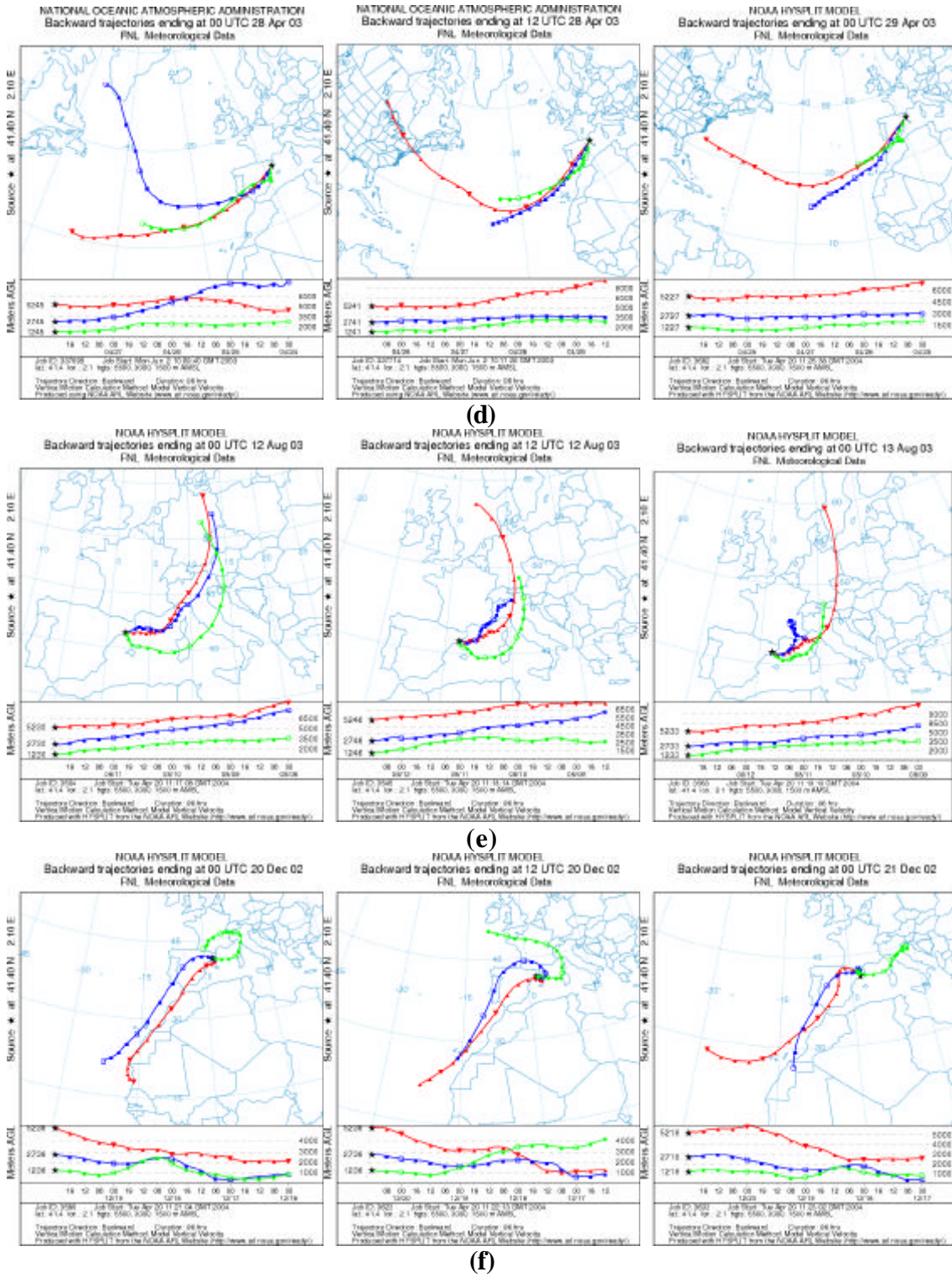
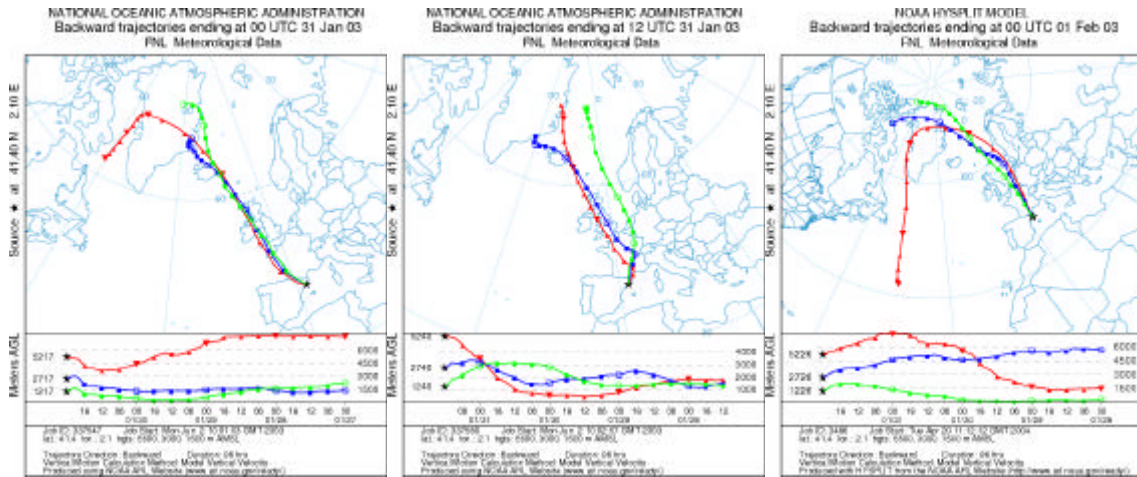


Figura 5.10 Cont.



(g)

Figura 5.10 Cont.

