

Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias

Silvia Alonso Pérez



Departamento de Física Básica

Universidad de La Laguna

La Laguna, Tenerife

2007

**MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO
DE DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS POR LA
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA**

CARACTERIZACIÓN DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS

Silvia Alonso Pérez

La Laguna, 2007



Directores:

Emilio Cuevas Agulló

Xavier Querol Carceller



Juan Carlos Guerra García



A mis padres

AGRADECIMIENTOS

La historia de esta Memoria es la de cuatro años de intenso trabajo en compañía de buenas personas. Ha sido duro el camino desde el estudio de objetos muy grandes (galaxias, estrellas, asteroides...) a partículas muy pequeñas (polvo atmosférico), pero fácilmente llevadero gracias a la ayuda y camaradería de mis compañeros y de mis directores. Gracias a todos ellos, durante este tiempo no solo he aprendido mucho desde el punto de vista académico, sino también desde el humano.

Quisiera mostrar mi más sincero agradecimiento a los directores de este trabajo, Dr. Emilio Cuevas, Dr. Xavier Querol y Dr. Juan Carlos Guerra, por darme la oportunidad de hacer ciencia útil para la sociedad, por su confianza y por sus enseñanzas.

Este estudio ha sido financiado en el marco de un convenio de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente, el Instituto Nacional de Meteorología y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas mediante una beca de formación en el proyecto "Realización de trabajos relacionados con el estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España". Muchas gracias a estas instituciones por su apoyo económico.

Quisiera mostrar mi gratitud aquellas instituciones que, de una u otra manera, han colaborado desinteresadamente cediendo información indispensable para llevar a cabo esta investigación. A UNELCO-ENDESA por la cesión de los datos de concentración de partículas en la estación de El Río, a la Consejería de Salud del Gobierno de Canarias por los datos de la estación de Los Gladiolos. Al Naval Research Laboratory, al Weather Forecasting Group de la Universidad de Atenas, al Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics y al Barcelona Supercomputer Center, al Instituto Nacional de Meteorología y a NOAA Air Resources Laboratory por la disponibilidad pública de los datos de los modelos NAAPS, Skiron, ICoD-BSC/DREAM, HIRLAM y HYSPLIT, respectivamente. A METEOSAT, NASA/Goddard Space Center y SeaWIFS Project (NASA) por sus

datos de teledetección de MSG, TOMS, MODIS y SeaWifs, respectivamente. Al NCEP Diagnostic Climate Center por sus datos de reanálisis de campos de geopotencial. A Librería Anticuaria Astrolabio por facilitar información sobre crónicas antiguas de episodios africanos en Canarias.

Gracias a la Dra. Mar Viana (CSIC) por su ayuda, que fue de vital importancia para comenzar esta Tesis. A M^a Concepción Parrondo (INTA) y a la Dra. Encarna Serrano (Universidad Complutense de Madrid) por su ayuda con el software de análisis de componentes principales y por todas sus explicaciones sobre esta técnica. Al Dr. Miguel Escudero (CSIC) y a Achim J.Latz por sus explicaciones sobre la utilización y la adquisición de datos del modelo HYSPLIT 4.0. A José Rodríguez por realizar la complicadísima tarea de adaptación del servidor secundario McIDAS de MSG al entorno Linux, a Miguel Ángel Martínez (INM) por proporcionarme tanta información sobre MSG. A Alberto Redondas (INM) por su ayuda con la programación en entorno MATLAB. Al Dr. Sergio Rodríguez (Universidad de Huelva) por sus consejos y por compartir conmigo muchos de sus conocimientos. Al Dr. Francisco Hernández (FIMERALL, Universidad de La Laguna) por abrirme las puertas de una nueva línea de investigación y ayudarme a llegar a ese mágico momento del primer artículo publicado.

Muchísimas gracias a mis colegas Jorge Pey (CSIC) y Pedro Salvador (CIEMAT) por su ayuda en la elaboración de las predicciones de episodios africanos y de los análisis de eventos ocurridos.

Estoy muy agradecida a todos mis compañeros del Observatorio Atmosférico de Izaña por la ayuda prestada durante la elaboración de esta Tesis, por el “buen rollo” que transmiten y por las risas en el “desayuning”. Especialmente agradezco su ayuda a aquellos con los que durante más tiempo he compartido despacho en la sexta planta (Alberto, Virgilio, Carlos Torres y Carlos Marrero) y en el ático (Sara, Yenni y Sergio). Gracias también a mis compañeras Carmen, Rosa y Cristina por su complicidad y por, al igual que mis compañeros de despacho, soportar mi ya clásico discurso del “yo tendría que haber estudiado peluquería” ☺ Vaya por delante mi reconocimiento al gran trabajo de todos los becarios en el Observatorio.

A los demás miembros de la parte científica de la familia Izaña-La Marina, tanto a los que actualmente allí permanecen (Juanjo, Celia, Sergio Afonso, Angel, Pedro Miguel, Mathias) como a los que ahora trabajan en otros centros (Chema, Víctor Quintero, Sergio Chueca, Miguel), gracias por la ayuda y por la compañía.

Gracias a Pili, Concha, Julieta, Marcos, Ramón, Marco, César y Víctor por estar siempre ahí ayudando en los pequeños imprevistos del día a día. Sin ustedes el Observatorio no sería el mismo.

Espero compartir muchas más risas y conocimientos con todos ustedes.

El apoyo moral, tan importante sobre todo en las últimas fases de la Tesis, no solo proviene del centro de trabajo. Sin los ánimos de mi familia y amigos todo esto no habría sido posible.

Agradezco mucho las muestras de apoyo de mis amigos, en especial a Laura y a todo el equipo habitual del programa Sektor4. Les prometo que retomaré mi música con muchas ganas.

Por último, pero por encima de todo, quisiera dar las gracias a mis padres y a Javi por apoyarme en esta aventura. A mis padres, gracias por la educación que me han dado, por trabajar duro por Fran y por mí, y por animarme y cuidarme tanto. Se los debo todo. El apoyo de Javi también ha sido fundamental, desde el comienzo hasta la finalización de esta Tesis. Gracias por ser como eres. YSD.

Ah, y a tí, lector de esta Tesis, gracias por interesarte por mi trabajo.

RESUMEN

En numerosas zonas desérticas, y bajo determinadas condiciones meteorológicas, partículas crustales de polvo son emitidas hacia capas medias y altas de la troposfera pudiendo llegar a viajar durante días y alcanzar zonas muy alejadas de la región fuente. En la región subtropical oriental del Atlántico Norte el estudio de la contaminación natural es especialmente importante, ya que los episodios de intrusión de material particulado africano son muy frecuentes y en ocasiones muy intensos. Altas concentraciones de estos aerosoles afectan a la salud de las personas, el clima, las comunicaciones (debido al descenso de la visibilidad) y a las actividades agrícolas y ganaderas. De entre los diferentes tipos de aerosoles presentes en la atmósfera son precisamente los aerosoles minerales los que tienen una mayor repercusión en la contaminación en Canarias. Las islas Canarias constituyen un escenario excelente para el estudio del impacto de este fenómeno en la calidad del aire ambiente en dicha región.

Por otro lado, los aerosoles juegan un papel muy importante en el balance radiativo terrestre. Canarias es un lugar excepcional para realizar estudios focalizados en este tema, tanto por su localización geográfica como por la disponibilidad de un amplio despliegue de instrumentación (LIDAR, fotómetros solares, captadores de alto volumen y analizadores ópticos) en la capa de mezcla marina y en la troposfera libre.

En este trabajo multidisciplinar se caracterizan los episodios de intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano en Canarias desde el punto de vista de su impacto en niveles de partículas, origen del material particulado y escenarios meteorológicos a escala sinóptica que favorecen estos episodios. Asimismo, se aborda el estudio de la relación de estos episodios con índices de teleconexión, evaluación de tendencias temporales de los episodios de polvo y utilización de los isótopos ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be como trazadores de estos episodios. Además, se presentan los resultados de la validación para Canarias del sistema de predicción y alerta de episodios de polvo africano que desde 2003 se encuentra operativo para toda España.

Es importante conocer el impacto que las intrusiones de masas de aire con elevada carga de polvo africano ejercen en los niveles de fondo regional de partículas en suspensión en aire ambiente en Canarias, tanto por su impacto socioeconómico y sanitario como por razones de calidad del aire, para evaluar el grado de cumplimiento de la normativa ambiental y proponer mejoras de las normativas referentes a límites de concentración de material particulado en aire ambiente. En este trabajo se aborda este problema a partir de los datos de concentración de PST (Partículas en Suspensión Totales) obtenidos en una estación de control y vigilancia de la calidad del aire de fondo rural situada dentro de la capa de mezcla marina (El Río). Del análisis de la serie temporal de PST estudiada se concluye que existe una marcada estacionalidad en los promedios mensuales de las concentraciones de partículas en Canarias, encontrándose un patrón bimodal con un máximo principal en invierno y un máximo secundario en verano.

Se propone un método objetivo para el cálculo del nivel del fondo regional de partículas, que resultó ser en promedio de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST. Se determinó, también de manera objetiva, que cuando en esta estación la media diaria de PST sobrepasa el umbral de los $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ podemos considerar que nos encontramos ante un episodio africano. La duración media de estos episodios es de 3 días.

Se realizó además el cálculo de la contribución por deposición gravitacional de polvo desde capas superiores de la troposfera a dicho nivel, basado en una nueva herramienta denominada "índices de permanencia". La deposición gravitacional incrementa las concentraciones mensuales de PST entre 5 y $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este fenómeno más intenso durante el mes de Marzo, cuando los episodios de deposición gravitacional son esporádicos pero muy intensos, y en verano.

La relación $\text{PM}_{10}/\text{PST} = 0.42 \pm 0.1$ calculada indica que la fracción de material particulado grueso es mayor en la región subtropical Nororiental del Atlántico que en el continente europeo.

Con el fin de mejorar los sistemas de predicción y alerta de episodios africanos, es fundamental conocer los procesos que dan lugar al transporte natural de material particulado desde zonas áridas de África hacia las islas, así como el origen de este material. Se han identificado de forma objetiva los escenarios meteorológicos a escala sinóptica que favorecen la intrusión de polvo africano a Canarias a partir del cálculo de componentes principales y la técnica de agrupamiento de las K-medias.

El escenario meteorológico más habitual en días de episodio africano en Canarias consiste en un alta centrada en Europa, que llega a afectar el Norte de África, dando lugar frecuentemente a una dorsal. En general las islas Canarias se encuentran en el flanco SW de esta dorsal. Para los meses de Diciembre y Enero se encuentran además un segundo escenario en el que se combinan una alta que afecta al Norte de África y una baja al Noroeste y Suroeste de Canarias, respectivamente, que favorece la entrada de polvo africano a las islas mediante “episodios de retorno”. Estos episodios son los que ocurren cuando una pluma de polvo africano ha viajado hacia el Oeste sobre el océano durante los días previos y luego retorna hacia las islas Canarias con un flujo del Oeste. Otro tipo de episodios indirectos que se han identificado y descrito en la presente Tesis son los “episodios de transición”, que ocurren justo después de una intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano, cuando una masa de aire “limpia” comienza a reemplazar a la masa de aire africano, que previamente afectó a la zona de estudio, sin que la atmósfera se haya limpiado completamente de aerosoles minerales.

El problema de la identificación de las regiones fuente de polvo que afecta a Canarias también se abordó desde un punto de vista objetivo, utilizando tres métodos que constituyen tres aproximaciones diferentes al problema: estudio de la variabilidad de la permanencia de las masas de aire en las regiones de Sahara y Sahel (a través de los “índices de africanidad”), análisis de los mapas promedio de retrotrayectorias e índice AI del TOMS, y mediante la determinación de los tiempos de residencia de las masas de aire. Todos los métodos utilizados dan lugar a resultados consistentes entre sí.

Para niveles bajos, en invierno el origen del polvo se sitúa principalmente sobre la región que se extiende desde el Gran Erg Occidental hasta el Gran Erg Oriental en Argelia, mientras que no se encuentran fuentes de material crustal con llegada a nivel de superficie en verano.

El origen del material particulado que llega a zonas de medianías de Canarias en invierno se encuentra en el Gran Erg Oriental y en la frontera entre Mali y Argelia, mientras que en verano se sitúa en el centro de Argelia, en la frontera entre Mauritania, Senegal y Mali, en el Sureste de Mauritania, en los flancos de las montañas del Parque Nacional de Nikolo-Koba, en zonas de lagos en Senegal y en la frontera entre Mali y Argelia.

En las escasas intrusiones que tienen lugar en altura en invierno se pueden identificar cinco áreas fuente principales, tres de ellas en Argelia, otra al Este de Mali y una quinta en Niger. En verano se encuentra en una extensa fuente principal de polvo en el Sureste de Argelia.

Se encuentra que las principales zonas fuente de polvo africano para Canarias están asociadas a bajas topográficas o a flancos de montañas y zonas elevadas. Las regiones fuente de polvo para episodios que afectan a cumbres de las islas (verano) están situadas más al Sur que las regiones que emiten el material particulado que es transportado directamente a nivel de superficie (invierno).

El estudio de la relación entre las intrusiones de polvo africano en Canarias y los patrones de teleconexión que explican los “enlaces” entre diferentes climas de la Tierra puede ayudar a mejorar las predicciones estacionales de estos episodios. En este trabajo se estudió la relación entre el índice NAO (North Atlantic Oscillation) y los niveles de PST en El Río, así como entre la NAO y los índices de africanidad, encontrándose correlaciones moderadas de $r = 0.56$ y $r = 0.58$, respectivamente. Además, se buscó el patrón de teleconexión que mejor modula las intrusiones de polvo africano en Canarias, que resultó estar definido como la diferencia de anomalías (referidas a los valores promedio del período 1961-1990) de altura de geopotencial a nivel de 1000 hPa entre Tenerife y Madrid. La correlación entre los promedios de inviernos de este índice climático y del índice $AFINL_{200}$, para el periodo 1948-2005 es $r = 0.81$. Por último se estudió, a partir de la correlación entre PST y Sahel Rainfall Index, el efecto que las condiciones de sequía en la región del Sahel tiene sobre los niveles de partículas en Canarias, encontrándose que no existe una relación estadísticamente significativa entre ellas.

Durante los últimos años hemos asistido a un progresivo aumento de la importancia que los distintos medios de comunicación dan a los episodios de intrusión de polvo africano en Canarias. Habitualmente nos encontramos con que el mensaje transmitido a la sociedad sugiere que estos episodios son cada vez más frecuentes e intensos. De hecho, esta creencia parece claramente instaurada en la opinión pública canaria. Sin embargo, no existen estudios publicados que confirmen si realmente existe una tendencia creciente en la frecuencia e intensidad de estos episodios en Canarias y si, en el caso de que existiera, está relacionada con

variaciones climáticas temporales. En este trabajo se presenta un estudio estadístico de la tendencia de los índices de africanidad y de algunos índices de no africanidad (NATL, SATL, SEUL) calculados para Canarias para el periodo 1948-2005, y su relación con la tendencia de determinadas variables climáticas. Se encuentra que desde la segunda mitad de la década de 1970, coincidiendo con el cambio de sentido en las tendencias de altura de geopotencial, temperatura del aire, componentes meridional y zonal del viento, humedad relativa y humedad específica del aire, que indican el inicio del fenómeno ampliamente conocido como cambio climático, existe una tendencia al aumento en frecuencia e intensidad de los episodios africanos en Canarias.

Recientemente se ha abierto una nueva línea de investigación referente al papel que juega el material particulado crustal en el aumento de concentración de ciertos isótopos radioactivos. Así, estos isótopos son utilizados como trazadores de intrusiones de polvo. En este trabajo se ha estudiado la relación entre la llegada de polvo africano a Canarias y los incrementos en las concentraciones de los isótopos ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be en las islas. Se encuentra una buena correlación entre las variaciones de la concentración de PM10 y de los isótopos ^{137}Cs y ^{40}K , incluso cuando tienen lugar pequeños incrementos de concentración de PM10. Esta buena correlación permite el uso de estos isótopos como trazadores para identificar el carácter africano de una intrusión de polvo en las islas Canarias. En cuanto al ^7Be , se pone de manifiesto la importancia del efecto de arrastre que las partículas de polvo africano tienen sobre este isótopo, ya que se encuentra que incrementa su concentración en Canarias cuando ocurren episodios africanos de retorno o de transición en los que además las masas de aire experimentan subsidencia desde niveles altos de la atmósfera.

Por último, en esta Memoria de Tesis se presenta una validación para Canarias del sistema de predicción y alertas sobre intrusiones de polvo africano que desde el año 2003 existe para toda España, del que la autora de esta Tesis es predictora habitual. Este sistema se ha implementado gracias a un convenio de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, el Instituto Nacional de Meteorología (ambos del Ministerio de Medio Ambiente) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (a través del Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume

Almera”). Durante el periodo comprendido entre Febrero de 2004 y Junio de 2007, el grado de acierto fue del 88.02%. En el 5.2% de las predicciones se cometió un error positivo (sobreestimación) mientras que en un 6.8% se cometió un error negativo (subestimación). El porcentaje de aciertos es mayor en verano que en invierno.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTERÉS CIENTÍFICO Y SOCIAL	1
1.1.1 Breve reseña histórica	1
1.1.2 Efectos del material particulado atmosférico sobre la salud	2
1.1.3 Otros efectos de las intrusiones de masas de aire africano sobre la salud	5
1.1.4 Efectos de los aerosoles sobre el clima	6
1.1.5 Otros efectos	9
1.2 MARCO NORMATIVO	12
1.3 CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO	15
1.3.1 Clasificación por tamaño de partícula	16
1.3.2 Origen natural y antropogénico	18
1.4 PROCESOS DE LAVADO	23
1.4.1 Deposición húmeda	25
1.4.2 Deposición seca	26
1.5 INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO	26
2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	29
2.1 OBJETIVO	29
2.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS ESPECÍFICOS Y TAREAS ASOCIADAS	29
2.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	31

3. IMPACTO EN LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS Y VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS	33
3.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	33
3.2 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA	35
3.2.1 Interpretación de la variabilidad de los niveles de PST en una estación de fondo regional en Canarias	35
3.2.1.1 Estaciones de muestreo	35
3.2.1.1.1 La estación de El Río	35
3.2.1.1.2 Estación de muestreo de Santa Cruz de Tenerife, Observatorio Atmosférico de Izaña	39
3.2.1.2 Cálculo de la relación PM10/PST	40
3.2.2 Identificación de días de intrusión de masas de aire africano	41
3.2.2.1 Método subjetivo de identificación de intrusiones de polvo africano. Cálculo subjetivo del umbral de PST	42
3.2.3 Método objetivo de identificación de intrusiones de polvo africano	49
3.2.3.1 Índices de africanidad	49
3.2.3.2 Cálculo objetivo del umbral de PST	54
3.2.4 Niveles de fondo regional de PST en la estación de El Río	54
3.3 RESULTADOS	56
3.3.1 Ocurrencia de episodios africanos en Canarias. Interpretación de la serie temporal de PST 1998-2003 en la estación de El Río	56
3.3.2 Relación PM10/PST	58
3.3.3 Variación interanual	59
3.3.4 Variación estacional	64
3.3.5 Caracterización de los niveles de fondo e impacto del aporte de polvo africano en los niveles de PST registrados en una estación de fondo regional de Canarias	66
3.3.5.1 Niveles de fondo regional de PST: métodos subjetivo y objetivo	67
3.3.5.2 Niveles de PST en una estación de fondo regional de Canarias durante episodios de intrusión de masas de aire africano	70
3.3.5.3 Variabilidad de los niveles de fondo regional	72

3.3.6	Contribución de la deposición gravitacional en episodios africanos en altura en los niveles de PST en una estación de fondo regional de Canarias	75
-------	--	----

4.	IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS FUENTE DE POLVO AFRICANO PARA CANARIAS	79
4.1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	79
4.1.1	Mecanismos de inyección de polvo mineral en la atmósfera y áreas fuente a escala global	79
4.1.2	Identificación de zonas fuente de polvo africano para Canarias	85
4.2	METODOLOGÍA	86
4.2.1	Estudio del origen del material particulado basado en los índices de africanidad	88
4.2.2	Cálculo de retrotrayectorias promedio y promedio mensual de índice AI del TOMS	88
4.2.3	Método de los tiempos de residencia	89
4.3	RESULTADOS	95
4.3.1	Los índices de africanidad como indicadores de episodios africanos de material particulado sobre Canarias	95
4.3.2	Series de índices de africanidad AFINL y AFISL: variación interanual y estacional del origen de polvo africano con llegada a Canarias	105
4.3.3	Anomalías de los índices de africanidad	109
4.3.4	Determinación de zonas fuente del material particulado a partir de retrotrayectorias medias y promedio mensual del índice AI del TOMS	111
4.3.4.1	El índice AI del TOMS como indicador de la presencia de polvo africano en Canarias	126
4.3.5	Áreas fuente del material particulado identificadas a partir del método de los tiempos de residencia	128
4.3.6	Tipos de suelo en las regiones fuente	132

5. DETERMINACIÓN DE PATRONES METEOROLÓGICOS FAVORECEDORES DE EPISODIOS AFRICANOS EN CANARIAS	
5.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	133
5.1.1 Mecanismos de transporte de polvo africano hacia Canarias: escenarios meteorológicos	133
5.2 METODOLOGÍA	137
5.2.1 Análisis de componentes principales	139
5.2.2 K-medias	140
5.3 RESULTADOS	142
5.3.1 Patrones de anomalías de geopotencial que favorecen episodios africanos en Canarias	142
5.3.2 Validación del reconocimiento de patrones	148
6. RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO EN CANARIAS Y LA DE ÍNDICES DE TELECONEXIÓN	153
6.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	153
6.1.1 Patrones de teleconexión	153
6.1.2 Paleoclimatología de los episodios africanos en Canarias	157
6.2 METODOLOGÍA	158
6.2.1 Relación entre intrusiones africanas en Canarias y el patrón de la NAO	158
6.2.2 Relación entre las intrusiones africanas en Canarias y las condiciones de sequía en Sahel	159
6.2.3 Búsqueda del patrón de teleconexión que mejor modula las intrusiones de masas de aire africano en Canarias	160
6.3 RESULTADOS	161
6.3.1 Relación entre episodios africanos y la NAO	161
6.3.1.1 Relación entre el impacto de las intrusiones de masas de aire africano en los niveles de PST de Canarias y el índice NAO	161
6.3.1.2 Relación entre AFINL ₂₀₀ en El Río y NAO	163
6.3.2 Definición del nuevo índice de teleconexión Madrid-Tenerife (índice MTI)	164

6.3.2.1	Mapas de correlación entre campos de altura de geopotencial y la serie temporal de AFINL ₂₀₀ a partir de promedios anuales	164
6.3.2.2	Mapas de correlación entre campos de altura de geopotencial y la serie temporal de AFINL ₂₀₀ a partir de promedios estacionales	166
6.3.3	Relación entre los episodios de polvo africano en Canarias y el Sahel Rainfall Index	172
7.	TENDENCIA DE LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO EN CANARIAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO	175
7.1	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	175
7.2	METODOLOGÍA: MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL ESTUDIO DE SERIES TEMPORALES	176
7.2.1	Prueba de normalidad de Anderson-Darling	179
7.2.2	Cálculo de tendencias	181
7.2.2.1	Test de regresión lineal	182
7.2.2.2	Test de Mann-Kendall	183
7.2.3	Cálculo de años de cambio de tendencia	184
7.2.3.1	Prueba de la suma cumulativa de residuos (CUSUM, Cumulative Sum of Residuals)	184
7.2.3.2	Prueba de las desviaciones acumulativas (Cumulative Deviation)	185
7.2.3.3	Prueba de la razón de probabilidad de Worsley (Worsley Likelihood Ratio)	186
7.3	RESULTADOS	187
7.3.1	Tendencias de las series de índices de africanidad	187
7.3.2	Tendencias de las series de índices de no-africanidad	190
7.3.3	Tendencias de algunos parámetros climáticos	192
7.3.3.1	Tendencias anuales	192
7.3.3.2	Tendencias estacionales	195
7.3.4	Enlace entre las tendencias de los episodios de polvo africano en Canarias y las de diferentes parámetros climáticos	204

8. INFLUENCIA DE LAS INTRUSIONES DE POLVO	
AFRICANO EN LOS NIVELES DE ^{137}Cs, ^{40}K y ^7Be EN AIRE	
AMBIENTE	207
8.1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	207
8.1.1 Origen de los isótopos ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be	208
8.2 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA	209
8.2.1 Zonas de estudio	209
8.2.2 Estaciones de muestreo	210
8.2.2.1 Estación del Hospital Universitario de Canarias	210
8.2.2.2 Estación de Los Gladiolos	211
8.2.2.3 Estación de Santa Cruz de Tenerife	211
8.2.3 Medidas radiométricas	212
8.2.4 Determinación de la región fuente de los radionúclidos	213
8.3 RESULTADOS	214
8.3.1 Influencia de las intrusiones de polvo africano en las	
concentraciones de ^{137}Cs y ^{40}K en aire ambiente	214
8.3.1.1 Análisis de los episodios de intrusión de polvo africano	214
8.3.1.1.1 Episodio del 6 al 7 de Enero de 2002	215
8.3.1.1.2 Episodio del 3 al 4 de Marzo de 2004	217
8.3.1.2 Relación entre la variabilidad de las concentraciones de	
PM10, ^{137}Cs y ^{40}K	218
8.3.2 Influencia de la resuspensión y transporte de aerosoles de	
origen africano en las concentraciones de ^7Be	223
9. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTAS SOBRE	
INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS	231
9.1 INTRODUCCIÓN	231
9.2 HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA	232
9.3 DISTRIBUCIÓN DE ALERTAS	235
9.4 NIVEL DE CONFIANZA DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN	
PARA CANARIAS	237
9.5 PROPUESTAS PARA LA MEJORA DEL SISTEMA	
DE PREDICCIÓN	239

10. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	243
10.1 RESUMEN DE CONCLUSIONES	243
10.2 FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	250
10.3 PUBLICACIÓN DE RESULTADOS	252

REFERENCIAS

ANEXO A

ANEXO B

CAPÍTULO 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTERÉS CIENTÍFICO Y SOCIAL

Llamamos material particulado atmosférico, también denominado aerosol atmosférico, a todas aquellas partículas sólidas y/o líquidas (excepto partículas de agua) que puedan estar presentes en la atmósfera, ya sean de origen natural o antropogénico. La contaminación atmosférica debida a este material es un área de estudio de gran interés debido a sus efectos sobre el clima, la salud de los seres vivos, los ecosistemas, la visibilidad, la degradación de materiales de construcción, etc.

En el caso de las islas Canarias es importante conocer los procesos que dan lugar al transporte natural de material particulado desde zonas áridas de África, que habitualmente causan episodios de alta concentración de polvo en suspensión, localmente denominados “calima”, y que pueden presentar efectos en la salud de las personas, en la agricultura y en las condiciones de visibilidad. Estos efectos suponen además un elevado coste económico a la sociedad (Consejo Económico y Social de Canarias, 1999).

El conocimiento de los patrones meteorológicos que dan lugar a estos episodios y los mecanismos naturales de transporte, así como la determinación de las zonas fuente del material particulado, es de vital importancia a la hora de poder prever estos episodios y alertar a los organismo responsables de áreas de calidad del aire y sanidad con el fin de que puedan minimizar el impacto ambiental y sobre la salud.

1.1.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA

Las primeras crónicas que tratan sobre episodios de contaminación por aerosoles atmosféricos, concretamente debidos a polvo desértico, se encuentran en China y datan de hace más de 2000 años (Zhang, 1984; Liu *et al.*, 1985). En Corea existen registros históricos de eventos de intrusión de polvo ocurridos desde hace dos siglos (Wada, 1917; Tamura, 1983; Chun, 2001). En lo que a Europa se refiere,

desde antiguo se conocen intensos episodios de deposición húmeda (lluvias y nevadas rojas) en multitud de zonas del viejo continente. Ya en el siglo XIX el propio Charles Darwin contribuyó al estudio del polvo africano, cuando en 1845 estudió el polvo depositado sobre las velas de diversos barcos, mientras permanecía en una expedición en el Beagle, a bordo del cual viajaba frente a las costas de África, determinando además el origen de este material particulado (Darwin, 1846). En la misma época, otros autores identificaron las intrusiones de aire africano como causantes de grandes reducciones de la visibilidad en amplias zonas del atlántico ecuatorial, conocidas como “mar oscuro” (Ehrenberg, 1862). Es por ello que desde hace algunos siglos se viene observando y estudiando el efecto de estos fenómenos, si bien es cierto que no es hasta la década de 1970 cuando se hacen estudios detallados sobre transporte y efectos del polvo en varias zonas del planeta.

En relación con los episodios de intrusiones de masas de aire africano ocurridos en Canarias, han sido documentados desde 1883, año del que data una muestra de “tierra llovida en la noche del 22 de Febrero de 1883 en Tenerife”, donada a D. Francisco Quiroga por el farmacéutico de Santa Cruz, Sr. Serra. Posteriormente se describieron importantes episodios como el de enero de 1902, o el que tuvo lugar entre el 7 de febrero y el 10 de Marzo de 1908, acompañado de una intensa deposición húmeda y en el que la visibilidad disminuyó tanto que el buque francés Flachet se perdió en un acantilado de la costa de Anaga. (Fernández-Navarro, L., 1921).

1.1.2. EFECTOS DEL MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO SOBRE LA SALUD

Los efectos del material particulado atmosférico sobre la salud humana han sido evaluados mediante estudios epidemiológicos realizados a partir de la década de 1980, demostrándose que existe una clara relación entre los niveles de partículas registradas y el número de muertes y hospitalizaciones diarias debidas principalmente a afecciones respiratorias y cardiovasculares (Dockery *et al.*, 1993; Schwartz, 1994 ; Bascom *et al.*, 1996; Dockery y Pope, 1996; Schwartz *et al.*, 1996; Brunekreef *et al.*, 1997; Künzli *et al.*, 2000) y mayoritariamente causadas por la fracción particulada PM_{2.5} (diámetro inferior a 2.5 µm).

Las afecciones más comunes debidas a la contaminación atmosférica son las arritmias cardíacas, infartos de miocardio, infartos cerebrales, fibrilación ventricular, brotes de asma, neumonía, descenso de la función respiratoria y trombosis (Schwartz, 1996; Lippmann, 1999; Pope *et al.*, 1999 y 2002; Dockery, 2001; Nemmar *et al.*, 2002).

La Organización Mundial de la Salud, mediante estudios epidemiológicos (WHO, 2003), concluye que se encuentra correlación entre los niveles de PM10 (partículas con diámetro inferior a 10 μm), que son la asociadas a los episodios de intrusiones de masas de aire africano, y el número de muertes y hospitalizaciones diarias debidas a afecciones pulmonares y cardiacas. A la misma conclusión llegó el estudio epidemiológico realizado por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (http://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/689/report/F). Sin embargo, a pesar de que estos estudios tienden a relacionar las tasas de PM10 con las tasas de mortalidad, todavía no está del todo clara esta relación, o la que pueda haber entre mortalidad y partículas en suspensión totales (Pope, 2002), ya que solo las partículas con diámetros inferiores a 2.5 μm pueden alcanzar los alveolos pulmonares (Figura 1.1), con lo que causarían afecciones más graves que las provocadas por las partículas de entre 2.5 y 10 μm de diámetro, que solo pueden llegar hasta la región traqueobronquial (Dockery *et al.*, 1993).

En cuanto a partículas con diámetro menor que 10 μm pero mayor que 2.5 μm , hay ciertas evidencias de su relación con la tasa de mortalidad en zonas áridas donde la concentración de estas partículas es alta, aunque generalmente en otras zonas no se encuentra esta relación. Sin embargo, en regiones donde no se ha encontrado una clara asociación de este tipo de partículas con la mortalidad sí que se encuentran evidencias de sus efectos en el sistema respiratorio. Parece claro que son necesarios estudios con series más largas para poder derivar estas posibles relaciones.

En todo caso, los efectos que los aerosoles puedan tener sobre la salud dependen mucho de la composición química de estas partículas, de su tamaño y composición, y de la sensibilidad de cada individuo.

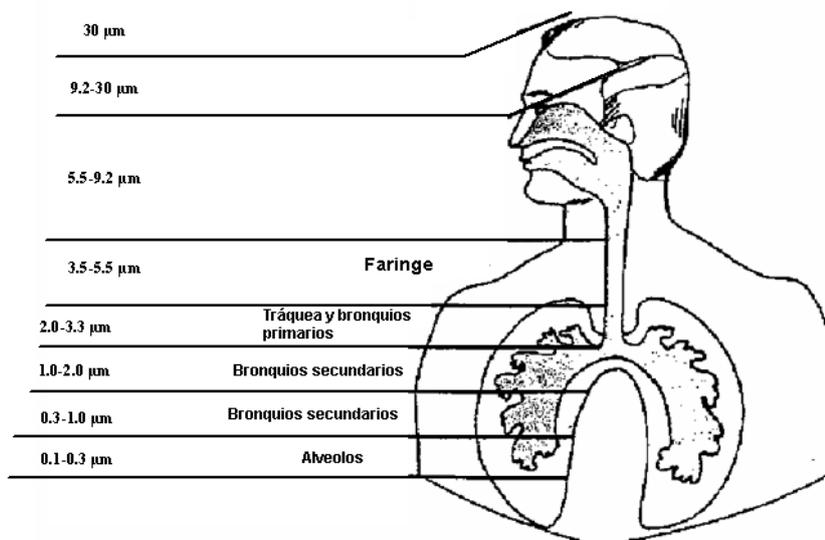


Figura 1.1. Esquema del aparato respiratorio humano y tamaños de partículas capaces de afectar a cada una de sus partes. (<http://www.epa.gov>)

En España, en el marco del proyecto EMECAS (Estudio Multicéntrico Español de los Efectos a Corto Plazo de la Contaminación Atmosférica en la Salud), se evaluó el impacto a corto plazo de la contaminación atmosférica urbana sobre la salud en 16 ciudades españolas. Entre estas ciudades se encontraban Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife. Una de las variables de exposición evaluadas fue el promedio diario de PST. Se encontró una asociación estadísticamente significativa entre los niveles de PST y la mortalidad por enfermedades circulatorias en Las Palmas de Gran Canaria, así como entre niveles de PST y número de ingresos hospitalarios urgentes por asma en la misma ciudad. Para Santa Cruz de Tenerife, se encontró una asociación estadísticamente significativa entre los niveles de PST y el número de ingresos hospitalarios urgentes debidos al conjunto de enfermedades respiratorias que se consideraron en este estudio (Ballester *et al.*, 2005; Ballester *et al.*, 2006).

Otro proyecto similar focalizado en Canarias, denominado CAPAS (Canarias, Partículas Atmosféricas y Salud), estudia el impacto de las partículas en suspensión (PM₁₀ y PM_{2.5}) sobre los ingresos hospitalarios urgentes por enfermedades cardiovasculares, respiratorias, EPOC y asma, y sobre la mortalidad diaria en mayores de 70 años por causas respiratorias y cardiovasculares, especialmente durante episodios de intrusión de masas de aire africano. Este estudio se centra en las ciudades de Las Palmas de Gran Canaria, Santa Cruz de Tenerife y La Laguna. En el proyecto CAPAS participan la Dirección General de Salud Pública del

Gobierno de Canarias, la Escuela Valenciana de Estudios en Salud (EVES) de la Generalitat Valenciana, el Instituto Nacional de Meteorología y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Cuevas, comunicación personal)

1.1.3. OTROS EFECTOS DE LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO SOBRE LA SALUD

Además de partículas minerales, las intrusiones de masas de aire africano podrían transportar hongos, esporas y microbios que también pueden afectar a la salud humana (Griffin *et al.*, 2001, Griffin *et al.*, 2002). La identificación de esporas patógenas en muestras tomadas en el Caribe (Smit *et al.*, 1999) y la evidencia de que existe transporte de microbios a larga distancia (Pedgley, 1986), abre un campo de investigación para determinar si en una región dada el número de microbios en la atmósfera se incrementa cuando es afectada por una intrusión de masas de aire africano. En 2005 comenzó en España un proyecto de investigación denominado EOLO-PAT, para la observación y predicción aerobiológica, en el que se realiza un exhaustivo análisis de filtros para identificar qué tipos de pólenes y esporas de hongos se encuentran en Santa Cruz de Tenerife. En el marco de este proyecto se trata de identificar, teniendo en cuenta la dificultad de separar el aporte exterior del aporte de la propia ciudad, cómo afectan las intrusiones de masas de aire africano a los niveles de pólenes y esporas. Posteriormente se inició el proyecto TORNASOL, en el marco del cual se realizan muestreos aerobiológicos en la estación del Observatorio Atmosférico de Izaña (28°18'32"N, 16°29'58"W, 2373 m.s.n.m.) durante los meses de verano. Así, se tratan de identificar agentes potencialmente patógenos que puedan llegar a Canarias durante episodios de calima.

Se ha especulado con la posibilidad de que las masas de aire africanas puedan transportar virus tales como el de la enfermedad de pié-boca (Gloster *et al.*, 1982), que es endémica de la región Subsahariana y afecta al ganado.

También se han encontrado correlaciones moderadamente significativas entre la incidencia de la meningitis en el denominado "cinturón africano de la meningitis", en la región del Sahel, e indicadores de la presencia de polvo africano (Molesworth *et*

al., 2002; Sultan *et al.*, 2005; Thomson *et al.*, 2006). En este caso no se trata de que las partículas de polvo transporten el virus, sino de que éstas irritan las membranas mucosas del sistema respiratorio, produciendo las condiciones más propicias para la transmisión de la bacteria Meningococcal a través del torrente sanguíneo, dando lugar a epidemias de meningitis (Sultan *et al.*, 2005). En el marco del proyecto Sand and Dust Storm Warning System (Cuevas, E., comunicación personal) se estudiará la relación entre los episodios de polvo africano y la ocurrencia de meningitis en el Sahel. Para ello se realizará un análisis retrospectivo de esta relación a partir del modelo BSC/DREAM (Barcelona Supercomputer Center/Dust Regional Atmospheric Model) y observaciones de satélites y se investigará el enlace a gran escala entre el polvo africano y la meningitis con índices climáticos, para estudiar la posibilidad de realizar predicciones estacionales. El objetivo final es el desarrollo de un servicio operativo de predicción a corto plazo que alerte a la comunidad sanitaria, y especialmente a los encargados de las campañas de vacunación, de la posibilidad de brotes de meningitis en el Sahel.

1.1.4. EFECTOS DE LOS AEROSOLLES SOBRE EL CLIMA

Los aerosoles afectan al clima de nuestro planeta tanto de manera directa como indirecta. Los efectos directos están relacionados con la interacción del material particulado con la radiación solar y terrestre que se produce mediante dos mecanismos diferenciados: dispersión y absorción de la radiación de onda larga y corta. Los efectos indirectos son la consecuencia del forzamiento radiativo que los aerosoles ejercen en el sistema Tierra-atmósfera, modificando el albedo y la densidad de las nubes (IPCC, 2001).

Además, los aerosoles juegan un papel importante en la formación de nubes en la atmósfera, ya que el material particulado actúa como núcleo de condensación, desempeñando así un importante papel en la regulación del ciclo del agua (Aitken, 1880).

Recientemente se ha demostrado que incluso puede ejercer como núcleo de hielo en las nubes, como en el caso del polvo sahariano capaz de dar lugar a la formación de hielo en nubes del tipo altocúmulo (DeMott *et al.*, 2003).

Por otra parte, las nubes también representan una fuente importante de material particulado, ya que en ellas se dan las condiciones propicias para la transformación gas-partícula (Würzler *et al.*, 2000). Las partículas allí formadas pueden quedar en suspensión en la atmósfera al evaporarse el agua. Si se llega a producir precipitación, el material particulado será lavado de la atmósfera por el proceso denominado “in-cloud scavenging” (barrido dentro de la nube). En el caso en que las partículas que ya se encuentran en suspensión en la atmósfera son eliminadas de ella debido a precipitación hablamos de “below-cloud scavenging” (barrido bajo la nube) (Slinn, 1984).

Expuestos los efectos del material particulado sobre el clima y la influencia que el clima a su vez tiene en la formación de estos, podemos observar que existe un proceso de retroalimentación (Arimoto, 2001) que se resume en la Figura 1.2.

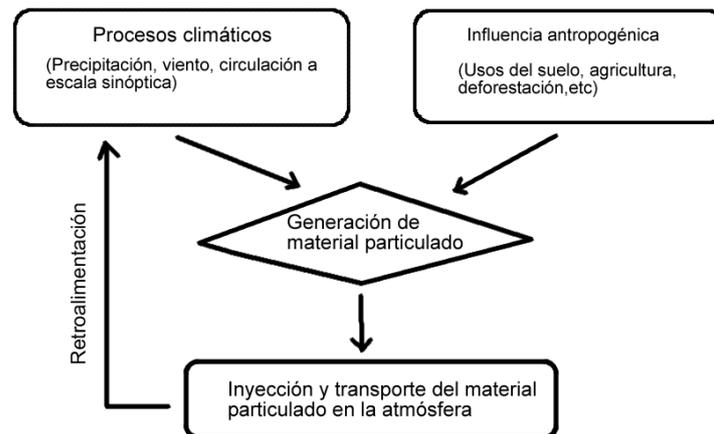


Figura 1.2. Relación de realimentación entre el clima y el polvo. Adaptado de Arimoto (2001).

Cualitativamente se conoce que los diferentes tipos de material particulado ejercen un efecto de enfriamiento en el balance radiativo de la atmósfera, con un forzamiento radiativo directo total promedio de -0.5 Wm^{-2} (Figura 1.3) (IPPC, 2007). En los últimos años se ha avanzado en el conocimiento de estos efectos, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, gracias a la mejora de las medidas *in situ* y satelitales y al desarrollo de modelos numéricos más completos, aunque la

incertidumbre sobre el papel de los aerosoles en el forzamiento radiativo todavía es importante.

En general, los aerosoles tienen influencia en el tiempo de vida de las nubes y en la precipitación (IPPC, 2007). En el caso de las partículas de polvo mineral no está claro que puedan actuar como núcleos de condensación, aunque algunas investigaciones apuntan hacia esa posibilidad (Levin *et al.*, 1996).

Se sabe que el polvo mineral afecta de manera diferente al forzamiento radiativo de la atmósfera según se encuentren sobre superficie brillante, como la superficie de los desiertos, o sobre superficie oscura, como es el caso de los océanos (Tegen and Lacis, 1996). Además, el efecto sobre el balance radiativo también es diferente en los casos de longitud de onda larga o corta. La interacción del polvo tanto en longitudes de onda largas como cortas es importante debido al amplio rango de tamaños que presentan las partículas y al hecho de que puedan estar presentes en niveles altos de la atmósfera.

Sobre superficies oscuras el polvo ejerce un efecto de enfriamiento porque el efecto de absorción incrementa el albedo planetario y así llega menos radiación a la superficie. Por el contrario, sobre superficies brillantes domina el forzamiento radiativo sobre longitudes de onda térmicas, forzamiento que es siempre positivo, por lo que se produce un efecto de calentamiento (Arimoto, 2001).

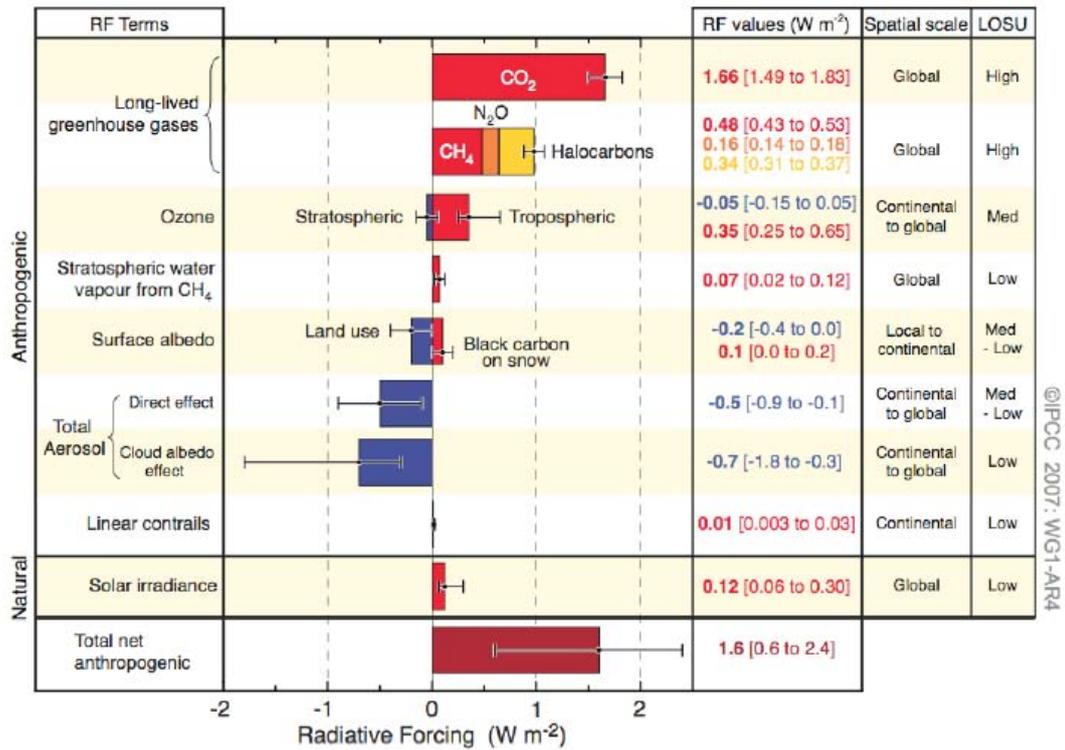


Figura 1.3. Media anual del forzamiento radiativo (Wm^{-2}) a escala global de los diferentes agentes atmosféricos (IPCC, 2007).

Las partículas atmosféricas, como se ha discutido con anterioridad, pueden jugar un papel importante en la formación de las nubes, influyendo en su estructura, en su vida media y en su capacidad de producir agua precipitable. Su influencia en la cantidad y volumen de las nubes repercute en la cantidad de superficie terrestre cubierta por éstas y, por lo tanto, en el albedo (Würzler *et al.*, 2000). Este efecto indirecto es difícil de cuantificar.

1.1.5. OTROS EFECTOS

El material particulado no solo afecta al clima o a la salud de las personas, sino que las consecuencias de su presencia se hacen notar en ámbitos tan variados como la agricultura, los transportes, la pesca, etc. Las partículas atmosféricas pueden ser las causantes directas de estos efectos (descenso de visibilidad, deposición de polvo en las hojas de las plantas, modificación del contenido en minerales del agua del mar, etc.), o causarlos indirectamente cuando actúan como portadoras de otros

contaminantes atmosféricos. Para ello, pueden depositarse sobre la superficie terrestre o sobre los océanos mediante deposición seca o húmeda.

La deposición de partículas atmosféricas debida a precipitaciones, cuando a las gotas de lluvia se han incorporado especies ácidas, da lugar al fenómeno conocido como lluvia ácida. La lluvia ácida ha sido estudiada desde la década de 1970 (Cogbill and Likens, 1974; Likens and Bormann, 1974), demostrándose que la acidificación de los ecosistemas perturba el funcionamiento de éstos. Los aerosoles y contaminantes gaseosos causantes de la lluvia ácida pueden ser naturales (como el SO₂ derivado de erupciones volcánicas o CO₂ emitido por incendios forestales) o antropogénicos debidos a la emisión de contaminantes derivados del consumo de combustibles fósiles.

En los lagos y el océano, esta acidificación del medio puede provocar la modificación de las condiciones de vida de las especies y en algunas ocasiones incluso su muerte. En tierra, la lluvia ácida reacciona con los nutrientes del suelo evitando que las plantas los absorban, disuelve metales tóxicos y facilita su absorción ocasionando daños que incluso son perceptibles en su superficie.

El polvo mineral puede actuar como neutralizante de la lluvia ácida, como se ha demostrado en estudios centrados en zonas del Sur de Europa (Löye-Pilot, 1986; Losno *et al.*, 1991; Rodà *et al.*, 1993; Alastuey *et al.*, 1999; Ávila and Alarcón, 1999).

En zonas urbanas, la deposición de partículas atmosféricas implica degradación de los materiales de construcción expuestos al aire libre, como el cemento y estructuras metálicas de edificios, obras públicas y monumentos (Alastuey, 1994), debido a la interacción con las partículas de su superficie. Esta degradación de materiales también puede estar ligada a gases asociados al material particulado, como el SO₂ y el NO_x (Alastuey, 1994).

La deposición de partículas atmosféricas en la superficie terrestre y en aguas superficiales, además, puede dar lugar a la alteración de la composición de las aguas subterráneas.

Sobre las plantas, el material particulado ocasiona daños en sus hojas, ya que las partículas más gruesas se depositan sobre ellas, afectando a su capacidad para

realizar la fotosíntesis. Esto da lugar a importantes pérdidas económicas por la merma de cultivos. Un ejemplo es el de las pérdidas económicas que el sector agrario tuvo en Canarias durante el año 1998 y que se relacionaron directamente con episodios de calima. Según el informe anual sobre la situación económica, social y laboral de Canarias en 1998 (Consejo Económico y Social de Canarias, 1999), estas pérdidas repercutieron en el comportamiento del mercado laboral agrícola y ganadero de las islas.

Sin embargo, el polvo africano es también una fuente importante de nutrientes para ecosistemas terrestres.

El polvo africano tiene una notable repercusión en la bio-geo-química de los océanos, ya que representa una fuente muy importante de nutrientes primarios, como el calcio, hierro y fósforo. De hecho, el 50% del fósforo transportado por la atmósfera y que llega a los océanos es debido a deposición de polvo africano (Graham y Duce, 1979; ; Savoie, 1980; Henriksson *et al.*, 2000). Este tipo de material particulado atmosférico ha sido identificado como sustrato de transporte de microorganismos (principalmente hongos) implicados en la enfermedad de colonias de corales y esponjas en el mar Caribe (Smith *et al.*, 1996; Shinn *et al.*, 2000; Weir *et al.*, 2000). El Fe depositado en los océanos debido al transporte de polvo mineral es un nutriente importante para el fitoplancton de algunas regiones oceánicas en el mundo (Falkowski *et al.*, 1998; Fung *et al.*, 2000; Jickells *et al.*, 2005), por lo que los aportes de polvo pueden así influir indirectamente en el ciclo global del carbono. Algunas especies de cianobacterias que utilizan el Fe en su metabolismo pueden jugar un papel importante en la química del nitrógeno de los océanos; la tasa de producción de nitrato y amonio de estos organismos puede estar fuertemente controlada por la tasa de aporte de polvo mineral en los océanos (Michaels *et al.*, 1996; Falkowski *et al.*, 1998).

El impacto del polvo africano en el ecosistema marino de las islas Canarias ha sido investigado por diferentes autores (Gelado-Caballero *et al.*, 1996; Neuer *et al.*, 2004; González-Ramos *et al.*, 2005), poniendo de relieve la importancia del polvo en suspensión como principal aporte de ciertos nutrientes, como es el caso de el hierro y el aluminio, en las aguas superficiales oceánicas que rodean al archipiélago.

La contaminación atmosférica debida a material particulado en muchas ocasiones da lugar a bruscos descensos de la visibilidad, que puede llegar a reducirse a unos pocos metros. En zonas urbanas la reducción de la visibilidad ocurre de forma sistemática, ya que de los 337 km de visibilidad media que debería existir por dispersión de la radiación solar por moléculas de aire (Horvath, 1992) se pasa a tener rangos de visibilidad de entre 100 y 10 km (WHO, 2002), debido a que la atmósfera está contaminada por partículas atmosféricas de origen antropogénico.

Durante los episodios más intensos de contaminación natural debida a material particulado mineral la visibilidad se reduce hasta el punto de imposibilitar las comunicaciones aéreas y dificultar las marítimas. Tal es el caso que ocurrió durante el día 6 de Enero de 2002, cuando un episodio de intrusión de masas de aire africano provocó que en Santa Cruz de Tenerife la visibilidad se redujera a apenas 300 m (Romero y Cuevas, 2002), o el día 17 de Enero de 2005 con un episodio de similares características (Fig.1.4).



Figura 1.4. Santa Cruz de Tenerife. 17 Enero 2005 (izquierda) y 28 Marzo 2005 (derecha). Fotografías de Antonio M. Sánchez Pérez.

1.2. MARCO NORMATIVO

Teniendo en cuenta todos los efectos adversos sobre los que se ha hablado anteriormente, pero sobre todo los que afectan a la salud humana, en el año 1999 la Comisión Europea programó planes de reducción de emisiones de material particulado en suspensión, así como de sus precursores gaseosos, y estableció

estándares de calidad del aire para el material particulado, mediante la Directiva Europea 1999/30/CE. Estos estándares se establecieron para dos períodos de tiempo diferente (del año 2005 al 2009, ambos inclusive y del 2010 en adelante), siendo los límites cada vez más restrictivos (Tabla 1.1). El parámetro de medida propuesto es la fracción PM10, que da buena cuenta de la fracción de material particulado natural si lo comparamos con el parámetro PST (partículas totales) que se utilizaba con la antigua normativa, pero no parece muy útil si tenemos en cuenta que, como vimos en el punto 1.1.1, todo apunta a que las partículas más perjudiciales para la salud son las de diámetro inferior a 2.5 μm . Esta es la razón por la que en otros países, como EEUU, Canadá o Australia, han elegido el parámetro PM2.5 como referencia para establecer sus límites.

Los planes de reducción de emisiones de aerosoles y sus precursores gaseosos establecidos en EE.UU se realizaron a raíz de los estudios efectuados por la US-EPA.

Tabla 1.1. Valores límite anuales y diarios, así como número de días límite de superación del valor límite diario propuestos por la directiva europea 1999/30/CE

Directiva 1999/30/CE	Fase I	Fase II
	2005	2010
Valor límite anual de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40	20
Valor límite diario de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50	50
Máximo nº de días con superación de valor límite diario	35	7

En la segunda fase propuesta para la aplicación de la normativa 1999/30/CE, que finalmente no se aplicará, el valor límite anual de PM10 se reducía a la mitad, mientras que el valor límite diario se mantendría en 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las dos fases, pero reduciendo a la quinta parte en la fase II el número de días en los que puede superarse ese valor límite diario. La evaluación preliminar de dicha directiva, que la Comunidad Europea está llevando a cabo actualmente, parece descartar definitivamente los valores indicados para 2010, quedando como definitivos los de 2005 (fase I).

Los límites que se propusieron para la fase II, tan restrictivos, son claramente imposibles de cumplir en algunas regiones de Europa, como es el caso de Canarias

(Figura 1.5). Debido a fenómenos naturales, como por ejemplo las intrusiones de masas de aire africanas, los valores límites diarios y anuales, así como el número de días de superación del límite diario establecido, se sobrepasan sistemáticamente. Ante esta situación de desventaja para el cumplimiento de la norma, el artículo 5.4 de la directiva 1999/30/CE tiene en cuenta las particularidades de estas regiones y establece que el grado de cumplimiento de la Normativa para estas regiones pueda adaptarse a cada una de ellas si se justifica debidamente el origen natural de la contaminación:

“Cuando se superen los valores límite de PM10 a que se refiere la sección I del anexo III debido a concentraciones de PM10 en el aire ambiente producidas por fenómenos naturales, que supongan concentraciones considerablemente superiores a los niveles de fondo procedentes de fuentes naturales, los Estados miembros informarán de ello a la Comisión de conformidad con el apartado 1 del artículo 11 de la Directiva 96/62/CE y facilitarán la justificación necesaria para demostrar que dichos rebasamientos se deben a fenómenos naturales. En estos casos, los Estados miembros tendrán la obligación de ejecutar planes de actuación con arreglo al apartado 3 del artículo 8 de la Directiva 96/62/CE sólo cuando se rebasen los valores límite a que se refiere la sección I del anexo III por causas que no sean tales fenómenos naturales.”

En cuanto a los fenómenos que la Directiva considera como fenómenos naturales, según su artículo 2.15, son los siguientes:

“[...] las erupciones volcánicas, las actividades sísmicas, actividades geotérmicas, o los incendios de zonas silvestres, los fuertes vientos o la resuspensión atmosférica o el transporte de partículas naturales procedentes de regiones áridas [...]”

Por lo tanto, los Estados Miembros que puedan justificar las superaciones de los valores límite debidos a fenómenos naturales podrán descontar estas superaciones del cómputo final. En el caso de España, el fenómeno natural que más episodios de superación de los límites ocasiona es el transporte de material particulado desde zonas áridas del continente africano. Por ello es importante disponer de las redes de control adecuadas y de una metodología eficaz para predecir, medir, analizar y justificar estos episodios, tratando así de adaptar la Directiva a nuestro caso particular y no tener así que sufrir las consecuencias de su incumplimiento.

En Escudero *et al.*, (2007), artículo que la autora de esta Tesis firma como co-autora, se propone un método objetivo para la cuantificación del impacto de los

episodios de intrusión de polvo africano en los niveles de PM10 registrados en una red de estaciones de fondo regional situada en la Península Ibérica. Esta metodología se validó mediante datos de especiación química en tres de las estaciones de la red. Este método es actualmente el utilizado en España y Portugal para identificar y proponer para su descuento los días en los que la superación del límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es debida a intrusiones de polvo africano.

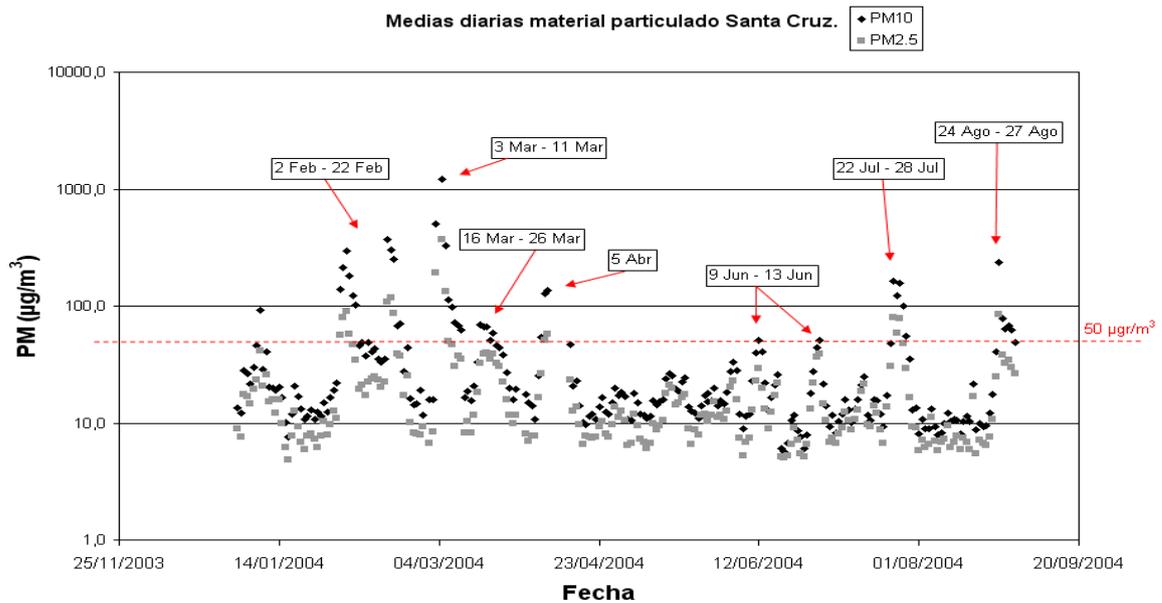


Figura.1.5. Serie de medias diarias de PM10 y PM 2.5 para el período Enero-Agosto 2004 en Santa Cruz de Tenerife. Puede apreciarse que en estos 8 meses se supera el umbral de número de días de superación del límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ permitido por la Directiva 1999/30/EC. Todas las superaciones del límite diario coincidieron con intrusiones de material particulado africano.

1.3. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

Los mecanismos que dan lugar a la formación de estas partículas pueden ser diversos. Podemos referirnos como primarias a las partículas que son emitidas como tales, directamente desde la zona fuente hacia la atmósfera, mientras que llamamos secundarias a las que se generan después de que ocurran ciertas reacciones químicas, tales como la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar nuevas partículas por condensación, o entre gases y partículas atmosféricas dando lugar a nuevas partículas por adsorción o coagulación (Warneck, 1988).

Según sea su origen, podemos clasificar también a las partículas como naturales o antropogénicas. Asimismo, existe una clasificación que atiende al tamaño de las partículas.

1.3.1. CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULA

Atendiendo al tamaño de las partículas, los aerosoles atmosféricos se clasifican según rangos de tamaños, o “modas”, generalmente relacionados con sus mecanismos de formación. El diámetro de estas partículas varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm) de diámetro.

Ordenándolas en orden creciente de diámetro de partícula, se distinguen cuatro modas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Warneck, 1988; Hidy, 1994; EPA, 1996, Seinfeld y Pandis, 1998).

La moda de nucleación comprende a las partículas con diámetros inferiores a 20 nm. El origen de estas partículas, con vidas medias del orden de horas, es la condensación de precursores gaseosos cuando la presión de vapor de los gases en condensación es suficientemente alta. La nucleación depende de factores tales como la concentración del gas precursor, la temperatura y la humedad relativa, viéndose favorecida ante descensos de temperatura y/o incrementos de humedad relativa (Eastern y Meter, 1994).

En la moda Aitken se incluye a las partículas con diámetros comprendidos entre 20 y 100 nm. El origen de estas partículas puede ser tanto primario como secundario. En el caso de las primarias, su origen puede ser natural o antropogénico, mientras que las secundarias se forman a partir de partículas de la anteriormente citada moda de nucleación.

Las partículas de las modas de nucleación y Aitken que aumentan de tamaño debido a coagulación, así como por condensación de vapor en sus superficies, pasan a formar parte de la moda de acumulación. Sus tamaños están comprendidos entre 0.1 μm y 1 μm de diámetro. Estas partículas tienen el mayor

tiempo de residencia en la atmósfera de entre todos los tipos de aerosol atmosférico.

En el ámbito del estudio de aerosoles atmosféricos, la moda gruesa engloba a las partículas cuyo diámetro es mayor que 1 μm . El origen de la mayoría de estas partículas es debido a procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre (por procesos naturales o antropogénicos) que da lugar a materia mineral, o de otros materiales, así como por la explosión de burbujas en la superficie de mares y océanos que da lugar a partículas de aerosol marino (gran parte de las cuales, según Mårtensson *et al.*, (2002), pertenecen a la moda de Aitken con diámetros mínimos de hasta 20 nm).

Es la moda gruesa la que contribuye más a la masa total debida a material particulado presente en la atmósfera, aunque su concentración en número de partículas es baja.

Una cuestión importante a tener en cuenta es que los rangos de tamaños de las partículas incluidas en la moda gruesa varían en función del ámbito de estudio. En epidemiología se habla de partículas gruesa cuando presentan diámetros mayores que 2.5 μm mientras que, como hemos visto, en ciencias atmosféricas el límite inferior es de 1 μm . Asimismo, en estudios epidemiológicos se consideran “partículas finas” a las que tienen diámetros inferiores a 2.5 μm , mientras que en ciencias atmosféricas estas son las de diámetros inferiores a 1 μm . Por otro lado, el término “partículas ultrafinas” es el utilizado en medicina y en ciencias ambientales para referirse a las partículas con diámetros menores a 0.1 μm , incluidas por tanto en la moda de nucleación y en la mayor parte de la moda Aitken, aunque en algunas ocasiones con este término nos referimos únicamente a partículas pertenecientes a la moda de nucleación.

Entre los diferentes modos se establece, de forma natural, una barrera en el valor de 1 μm de diámetro. Una proporción muy baja de las partículas de diámetro menor a 1 μm pueden crecer hasta dar lugar a partículas de diámetro mayor a 1 μm . Por otra parte, debido a limitaciones energéticas, las partículas primarias generadas a partir de procesos mecánicos presentan una proporción muy reducida de partículas

de diámetro inferior a 1 μm . Se establece así un límite natural, entorno a 1 μm de diámetro, a la transferencia de partículas entre diferentes modos.

La clasificación por tamaños que utilizaremos de una manera sistemática en este trabajo es la que atiende al tamaño de corte de los sistemas de captación de partículas, clasificación muy utilizada en el ámbito de los estudios de calidad del aire y definida por cuatro parámetros: PST, PM10, PM2.5 y PM1. El término PST se refiere a Partículas en Suspensión Totales, mientras que los términos PM10, PM2.5 y PM1 se definen como la masa de partículas que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de 10 μm , 2.5 μm y 1 μm respectivamente, con una eficiencia de corte del 50%. Por ejemplo, cuando hablemos de un valor de PM10 de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ estaremos refiriéndonos a la concentración de polvo registrada por un equipo de medida para partículas de diámetro menor a 10 μm .

En nuestro estudio utilizaremos fundamentalmente medidas expresadas en PST.

1.3.2. ORIGEN NATURAL Y ANTROPOGÉNICO

Otro método de clasificación común es el que se refiere al origen del material particulado, clasificándolo como natural o antropogénico dependiendo de si es producto de emisiones naturales o de emisiones causadas por el ser humano.

Los aerosoles de origen natural, tales como el aerosol marino, material crustal, emisiones volcánicas, quema de biomasa debida a causas naturales, emisiones biogénicas, aerosoles secundarios generados a partir de precursores gaseosos de tipo natural (como SO_2 , NO_x , COVs (Componentes Orgánicos Volátiles)) emitidos por volcanes, tormentas, suelos y plantas), esporas o polen son una fuente muy importante del material particulado en la troposfera terrestre.

Las fuentes antropogénicas de aerosoles son principalmente debidas al tráfico rodado (emisión de gases precursores y partículas carbonáceas ultrafinas, abrasión de frenos y neumáticos, así como erosión del pavimento), plantas de producción de energía por combustión de combustibles fósiles, actividades industriales

(principalmente fabricación de cemento, cerámica y ladrillos) (EC 2004), partículas primarias biológicas generadas por reciclado de residuos, plantas de producción de abono (Marchand *et al.*, 1995) y partículas producidas fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos. Cabe destacar que a las fuentes antropogénicas podemos añadir la quema de biomasa orientada a la obtención de nuevas tierras para su uso agrícola, que representa un aporte antropogénico muy importante, de 500-1000 Tg·año⁻¹ (Crutzen and Andreae, 1990; Levine, 1990).

Existen también aportes de material mineral antropogénico, aunque de mucha menor importancia en el cómputo global (Tabla 1.2), debidos a la construcción, la minería, agricultura y manipulación y transporte de materias primas para fabricación de cerámicas y cemento (Querol *et al.*, 2001).

En la Tabla 1.2 se encuentran resumidas las emisiones de material particulado a escala global para el año 2000 (IPPC, 2001), divididas en partículas primarias y secundarias. Con la posible excepción de la sal marina, la carga de polvo en la atmósfera es la más abundante de entre todas los tipos de aerosoles.

Las estimaciones de la emisión de polvo mineral a la atmósfera a escala global muestran un amplio rango de valores. Estas incertidumbres son debidas al hecho de que el ciclo de polvo se estima usando modelos que están limitados por las observaciones disponibles. En la Tabla 1.3 se muestran los valores estimados mediante diferentes modelos globales.

Tabla 1.2. Emisiones a escala global de material particulado atmosférico para el año 2000 en Tg.año⁻¹ (modificado de IPCC., 2001)

Tipo de aerosol	Mejor estimación	Menor estimación	Mayor estimación
PRIMARIOS			
Aerosoles carbonosos			
Materia orgánica			
Combustión de biomasa	54	45	80
Combustible fósil	28	10	30
Biogénico	56	0	90
Black carbón			
Biomass burning	5.7	5	9
Combustible Fósil	6.6	6	8
Aviación	0.006		
Polvo industrial (> 1 µm)	100	40	130
Sal marina	3340	1000	6000
Polvo mineral	2150	1000	3000
SECUNDARIOS			
Sulfato			
Antropogénico	122	69	214
Biogénico	57	28	118
Volcánico	21	9	48
Nitrato			
Antropogénico	14.2	9.6	19.2
Natural	3.9	1.9	7.6
Componentes orgánicos			
Antropogénico	0.6	0.3	1.8
COVs			
COVs Biogénicos	16	8	40

Tabla 1.3. Estimaciones de emisión global de polvo (modificado de Goudie y Middleton, 2006)

Autor	Cantidad anual (Tg)
Peterson and Junge (1971)	500
Schütz (1980)	<500
D'Almeida (1986)	1800-2000
Tegen and Fung (1994)	3000
Andreae (1995)	1500
Duce (1995)	1000-2000
Mahowald et al. (1999)	3000
Luo <i>et al.</i> (2003)	1654
Zender <i>et al.</i> (2003a)	1490
Ginoux <i>et al.</i> (2004)	1950-2400
Liao <i>et al.</i> (2004)	1784
Miller <i>et al.</i> (2004)	1019

De entre todos los posibles aportes de material crustal, el proveniente de zonas áridas o semiáridas (un tercio de la tierra firme de nuestro planeta) situadas en latitudes entre 10°N y 35°N en el Norte de África, Oriente Medio y Asia Central representa el 71% del aporte a la masa total de aerosol atmosférico en nuestro planeta, mientras que la región comprendida por las zonas Sahara y Sahel podría ser la responsable de hasta el 50.7% (Miller *et al.*, 2004) En la Tabla 1.4 se resumen los resultados de las estimaciones de emisión global y regional de polvo más recientes.

Las fuentes de polvo situadas en el desierto del Sahara se consideran las más activas del mundo. Las estimaciones más recientes proporcionan valores de entre 1000 y 1600 Tg·año⁻¹ (Ozer *et al.*, 2001; Luo *et al.*, 2003; Ginoux *et al.*, 2004).

Tabla 1.4. Estimaciones de emisiones globales y regionales de polvo (modificado de Goudie y Middleton, 2006)

Región	Tg·año ⁻¹	% de la emisión total
Emisión global (datos de Miller <i>et al.</i>, 2004)		
Sahara/Sahel	-	50.7
Asia Central	-	16.0
Australia	-	14.5
Norteamérica	-	5.2
Asia Oriental	-	4.9
Arabia	-	4.2
Otros	-	4.5
Emisión global (datos de Ginoux <i>et al.</i>, 2001)		
Norte de África	1430	69.0
Sur de África	22	1.1
Norteamérica	9	0.4
Suramérica	55	2.7
Asia	496	23.9
Australia	61	2.9
Emisiones totales	2073	100
Emisión global en 1998 (datos de Luo <i>et al.</i>, 2003)		
Norte de África	1114	67.4
Península Arábiga	119	7.2
Asia	54	3.3
Australia	132	8.0
Otros	235	14.2
Emisión total	1654	100

Las regiones de Chad, desierto del Sahara y Sahel se encuentran situadas en cuencas topográficas en las que la erosión producida en las épocas de mayor precipitación da lugar a acumulación de material particulado. Este material es susceptible de ser inyectado en la atmósfera cuando se presentan elevadas temperaturas y ciertas condiciones de vientos durante épocas de sequía. En esas condiciones, el viento es el responsable principal en la generación de este tipo de aerosol mineral que el suelo es incapaz de retener. El proceso mediante el cual se genera este material crustal consta de dos fases:

A partir de mecanismos como la lixiviación de elementos solubles, congelación de agua en el interior de los poros de las rocas y erosión, el material crustal se divide en partículas más pequeñas. Las partículas de diámetro menor de 1000 μm sufren impactos de partículas de mayor diámetro, de manera que se da lugar a partículas con diámetro menor que 100 μm que pueden permanecer suspendidas en el aire (Warneck, 1988).

Cuando el viento alcanza la velocidad mínima necesaria para que la elevación del polvo mineral sea posible (que depende de las características del suelo), las partículas de polvo crustal ascienden desde el suelo hacia la atmósfera. Así, mediante mecanismos de convección y circulación atmosférica un aerosol generado en un desierto es capaz de llegar a capas altas de la troposfera e incluso la estratosfera, e iniciar un largo viaje de miles de kilómetros.

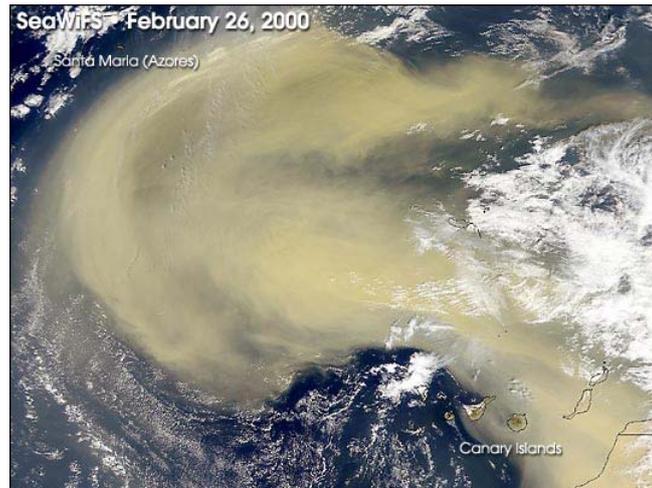


Figura 1.6. Intrusión de material particulado africano en Canarias. 26 de Febrero de 2000. Imagen tomada por el instrumento SeaWiFS (NASA).

En cuanto a los componentes secundarios, algunos son generados a partir de precursores gaseosos de origen natural como el NO_x , emisiones de volcanes, tormentas, suelos o zonas forestales.

1.4. PROCESOS DE LAVADO

La vida media de las partículas de aerosoles presentes en la atmósfera puede variar entre horas y semanas, y depende tanto del tamaño de la partícula como de sus propiedades termodinámicas y su composición química .

La relación de la vida media con el tamaño de las partículas es inversa en el caso de partículas con diámetro menor que $0.05 \mu\text{m}$. Las partículas con menor tiempo de residencia (del orden de horas) en la atmósfera son las que pertenecen a la moda de nucleación, ya que rápidamente se transforman en partículas de la moda de Aitken. En el caso de la moda gruesa la vida media aumenta al disminuir el

diámetro de las partículas, desde varias horas para las partículas de diámetro mayor a 20 μm a varios días (de 2 a 4) para partículas de entre 2 y 3 μm de diámetro. Las partículas que sobrepasan los 4 días de permanencia en la atmósfera son las pertenecientes a la moda de acumulación y las situadas en el límite superior de la moda de Aitken (Mészáros, 1999).

Para el caso de las partículas crustales africanas hay que considerar que su transporte tienen lugar normalmente en la troposfera libre, excepto en algunas épocas del año cerca de la zona fuente, por lo que las características del régimen de vientos en altura y la menor probabilidad de que se den los procesos de lavado que se explicarán en las secciones 1.3.1 y 1.3.2 favorecen que el transporte pueda tener lugar hasta lugares situados a 4000 km de la zona fuente, llegando incluso a América (Carlson y Prospero, 1972; Prospero 1999a).

Las capacidades higroscópicas de las partículas también determinan su vida media. Las partículas hidrofóbicas, como las de carbono elemental, tienen tiempos de residencia mayores debido a que debe transcurrir un tiempo (el necesario para que ocurra la oxidación de su superficie) para que puedan ser retiradas de la atmósfera mediante deposición húmeda (Gaffney *et al.*, 2002). Por el contrario, las partículas de las modas de acumulación y gruesas, debido a que pueden actuar como núcleos de condensación debido a su marcado carácter higroscópico (como las partículas de carbono orgánico o los sulfatos), pueden ser lavadas mediante deposición húmeda con mayor facilidad que las carbonosas, teniendo así vidas medias de alrededor de 10 días para las que tienen diámetro entre 0.1 μm y 1 μm (Pósfai y Molnár, 2000).

El material particulado presente en la atmósfera puede alcanzar el nivel de superficie mediante dos procesos de lavado atmosférico: deposición húmeda y deposición seca. La eficacia de estos mecanismos depende del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas (Jaenicke, 1978).

1.4.1. DEPOSICIÓN HÚMEDA

Como ya se comentó en la 1.1.4, la deposición húmeda del material particulado puede ocurrir por dos procesos diferentes. En la Figura 1.7 encontramos explicados estos dos procesos. Por un lado, las partículas contenidas en las nubes, que actúan como núcleos de condensación, pueden ser lavadas debido a la precipitación de las nubes que las contienen. Este proceso es el denominado “in-cloud scavenging” (Seinfeld y Pandis, 1998; Mészáros, 1999).

Por otro lado encontramos a las partículas que, estando en suspensión en la atmósfera, son simplemente arrastradas por precipitación, proceso denominado “below-cloud scavenging”. En este segundo mecanismo se distinguen dos procesos diferentes según el tamaño de las partículas: las partículas con diámetros menores a $0.5\text{-}1\ \mu\text{m}$ caen por difusión debido a su movimiento browniano. En el caso de las partículas mayores a estas, es la propia gravedad la que hace que se depositen en gotas de lluvia o cristales de hielo (Seinfeld y Pandis, 1998; Mészáros, 1999).

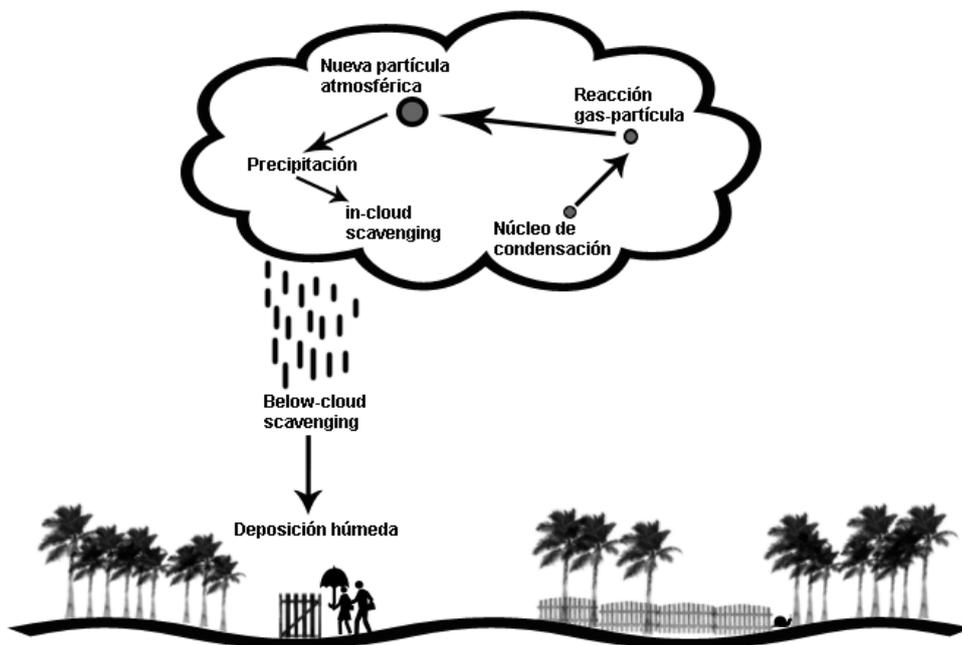


Figura 1.7. Formación de partículas atmosféricas secundarias a partir de núcleos de condensación en las nubes (adaptado de Viana, 2004)

1.4.2. DEPOSICIÓN SECA

La deposición seca es el proceso mediante el cual el material particulado cae debido a la acción de la gravedad hasta depositarse sobre la superficie terrestre (ver Figura 1.8). Dependiendo del diámetro y densidad de las partículas estas tendrán una velocidad de sedimentación definida por la Ecuación 1.1 (Seinfeld y Pandis, 1998);

$$v_s = (d_p^2 \rho_p g) / 18\eta \quad (\text{Ec. 1.1})$$

donde d_p es el diámetro de la partícula, ρ_p su densidad, g es la aceleración de la gravedad y η es la viscosidad dinámica. Vemos que la velocidad de sedimentación será mayor cuanto mayor sea el diámetro y viscosidad dinámica. La deposición seca comienza a ser importante cuando las partículas tienen diámetros superiores a $10 \mu\text{m}$.



Figura 1.8. Izquierda: Deposición seca sobre la nieve. Observatorio Atmosférico de Izaña (IZO) a 2373 m de altitud. 13 de Febrero de 2005. Se observa color rojizo en una cara de la garita meteorológica que estuvo expuesta al viento durante el episodio de intrusión de masas de aire africano que tuvo lugar desde el día 11 de Febrero de 2005, justo después de un intensa nevada y cencellada. Derecha: Detalle de la nieve enrojecida por la deposición seca de polvo mineral africano.

1.5. INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO

Las intrusiones de masas de aire africano son las responsables de aumentar el nivel de material particulado mineral en zonas que pueden estar muy alejadas del continente fuente de este material. Se han estudiado intrusiones de este tipo

ocurridas incluso en zonas del Caribe, América central y Norte de América (Prospero et. al, 1970; Carlson y Prospero, 1972; Prospero 1999), que tienen lugar mayoritariamente entre los meses de junio y octubre (Graham y Duce, 1979) y principalmente en la troposfera libre.

Como se indicó en la sección 1.3.2., aunque otras zonas áridas del planeta también son fuente de material particulado, son las africanas las que más material mineral aportan al total de material particulado existente en la atmósfera de nuestro planeta, con una tasa anual de alrededor de $1500 \text{ Tg}\cdot\text{año}^{-1}$, muy importante si consideramos que la tasa anual total, considerando todas las posibles zonas fuente del planeta, está estimada que sea de aproximadamente $2000 \text{ Tg}\cdot\text{año}^{-1}$ (Ginoux *et al.*, 2001)

El material particulado que es transportado mediante estas intrusiones es mayoritariamente de composición mineral: silicatos (cuarzo, minerales de arcilla y feldespato), carbonatos (calcita y dolomita) y en menor cantidad sulfato de calcio y óxido de hierro (EC, 2004). Su tamaño puede variar situándolo desde la moda de acumulación hasta la fracción gruesa. Las partículas más finas son las que viajan hasta zonas más alejadas del foco emisor, como por ejemplo hasta el continente americano. En todo caso, en las series de PM10 pueden siempre distinguirse los episodios africanos frente a los niveles de fondo.

CAPÍTULO 2

Objetivos y estructura de la Tesis

2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

2.1. OBJETIVO

El objetivo de la presente Tesis es la caracterización objetiva de las intrusiones de masas de aire africanas con elevada carga de polvo que llegan a la región subtropical del Atlántico nororiental, así como de su impacto en los niveles de partículas atmosféricas en suspensión en la baja troposfera de esta región.

Este objetivo se trata de conseguir a través de dos aproximaciones paralelas y complementarias. La primera utiliza el punto de vista de la calidad del aire y la segunda el de la investigación atmosférica. Estas dos perspectivas, utilizadas tradicionalmente por comunidades científicas bien diferenciadas, van poco a poco aproximándose e interactuando en los últimos años. Se espera que esta Tesis haya podido, también, contribuir a esta aproximación.

2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS ESPECÍFICOS Y TAREAS ASOCIADAS

Con el fin de alcanzar el objetivo general propuesto en esta Tesis se propusieron y desarrollaron los objetivos específicos y las tareas en cada uno de ellos que se relacionan a continuación:

Objetivo específico 1: Evaluar el impacto de las intrusiones de masas de aire africano en la calidad del aire de la región subtropical del Atlántico nororiental.

Tareas asociadas:

- Evaluar el impacto que los episodios de intrusión de polvo africano tienen en los niveles de partículas en suspensión en aire ambiente en la baja troposfera en Canarias.

- Describir la variabilidad temporal de los episodios de polvo africano en Canarias.
- Estudiar el papel de las intrusiones de polvo africano en el aumento de la concentración de los isótopos ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be a nivel de superficie en Canarias.
- Validar para Canarias el sistema de predicción y alerta de episodios africanos que desde 2003 se encuentra operativo para toda España, y en el que se hace uso de buena parte de los conocimientos adquiridos para completar los objetivos anteriores.

Objetivo específico 2: Entender el origen y los procesos de transporte de las intrusiones africanas que afectan a la región subtropical oriental del Atlántico Norte.

Tareas asociadas:

- Identificar las áreas fuente del material particulado que llega a Canarias durante los episodios africanos.
- Determinar de una manera objetiva los escenarios meteorológicos a escala sinóptica que favorecen estos episodios en Canarias.

Objetivo específico 3: Conocer la relación existente entre las intrusiones africanas con las variaciones espacio-temporales de índices y variables climáticas.

Tareas asociadas:

- Encontrar posibles relaciones entre el impacto y frecuencia de las intrusiones de polvo africano en Canarias con el patrón de teleconexión NAO (“North Atlantic Oscillation”) y con el “Sahel Rainfall Index”.
- Buscar el índice de teleconexión que mejor se correlacione con la ocurrencia de episodios africanos en Canarias y que permitiera realizar predicciones estacionales de éstas.
- Conocer la relación existente entre la tendencia de la intensidad y frecuencia de los episodios africanos en Canarias con tendencias temporales de índices y variables climáticas.

2.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta Memoria de Tesis consta de diez capítulos, además de un resumen, una sección de referencias bibliográficas y dos anexos.

En el capítulo 1 se incluye una revisión bibliográfica sobre aspectos generales de los aerosoles atmosféricos, tales como el interés científico y social de su estudio, el marco normativo vigente y una clasificación del material particulado por tamaño y por origen. La última parte del capítulo se centra en los aerosoles desérticos, haciendo hincapié en los mecanismos de emisión del polvo y fuentes a gran escala.

En el capítulo 2 se enumeran los objetivos principales y se detalla la estructura de esta Memoria de Tesis.

En los capítulos 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 se exponen los resultados de la investigación, que son de diferente naturaleza debido al carácter multidisciplinar de esta Tesis. Los temas de los que trata cada uno de estos capítulos son:

- Capítulo 3: Impacto en la concentración de partículas en suspensión en aire ambiente y variabilidad temporal de las intrusiones de polvo africano en Canarias.
- Capítulo 4: Identificación de áreas fuente de polvo africano para Canarias.
- Capítulo 5: Determinación de patrones meteorológicos favorecedores de episodios africanos en Canarias.
- Capítulo 6: Relación entre la variabilidad de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias y la de índices de teleconexión.
- Capítulo 7: Tendencia de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias y su relación con el cambio climático.
- Capítulo 8: Influencia de las intrusiones de polvo africano en los niveles de ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be en aire ambiente.
- Capítulo 9: Validación del sistema de alertas sobre intrusiones de polvo africano en Canarias.

Cada uno de estos siete capítulos incluye una introducción teórica y una revisión de los antecedentes del tema tratado, así como una exposición de la metodología utilizada para abordar el problema.

En el capítulo 10 se exponen las conclusiones alcanzadas a partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, las líneas futuras de investigación, las aplicaciones prácticas que hasta ahora han tenido los resultados de esta investigación, y las publicaciones a las que éstos han dado lugar.

En el anexo A se incluyen los mapas que resultaron del cálculo de componentes principales y agrupamiento por el método de las K-medias para la determinación de los patrones meteorológicos que favorecedores de episodios africanos en Canarias, a los que se hace referencia en el capítulo 5.

En el anexo B se incluye el trabajo titulado “Sistema de información sobre intrusiones de masas de aire africano en España”, presentado en el IX Congreso de Ingeniería Ambiental PROMA 2004, al que se hace referencia en el capítulo 9.

CAPÍTULO 3

**Impacto en la concentración de
partículas y variabilidad temporal
de las intrusiones de polvo africano
en Canarias**

3. IMPACTO EN LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS Y VARIABILIDAD TEMPORAL DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS

3.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Debido a su cercanía a África, en el archipiélago canario las intrusiones de masas de aire africano constituyen la fuente más importante de material particulado. Bajo determinadas condiciones meteorológicas se producen episodios de calima que pueden elevar el nivel de partículas hasta varios órdenes de magnitud. A grandes rasgos, podemos diferenciar entre episodios de invierno (que afectan a nivel de superficie) y episodios de verano (que afectan a medianías y zonas altas). Los escenarios climatológicos que dan lugar a estas intrusiones están básicamente dominados por un alta al Norte de África (para una mejor descripción de estos eventos según épocas del año, ver el capítulo 5 de esta Tesis).

La intensidad y frecuencia de estos eventos causa que los límites impuestos por la Directiva europea 1999/30/EC sean fácilmente rebasados en las islas, por lo que se hace necesario un sistema de justificación de episodios de contaminación natural por partículas. Esto implica un mejor conocimiento de las intrusiones de masas de aire africano.

La caracterización de estaciones de las distintas redes de control de calidad del aire situadas en diferentes puntos de la geografía canaria (Torres-Padrón *et al.*, 2002; Viana, 2003; Dorta *et al.*, 2005; Castillo, 2006) ha demostrado, mediante análisis de series de valores de concentración de polvo, que en Canarias los episodios de calima son más intensos en invierno que en cualquier otra época del año, con concentraciones que llegan a sobrepasar los 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 en casos puntuales. En el análisis de la serie temporal 1998-2000 de concentración de PM10 y PST para varias estaciones de Tenerife y Gran Canaria situadas en la capa de mezcla se encuentra que no hay una tendencia definida en la variación interanual, si bien existe una clara variabilidad estacional en los niveles de partículas. Existe un

fuerte incremento de estos niveles en los meses de Febrero y Marzo, seguida de incrementos más leves en Agosto y Noviembre. Los máximos principales están claramente relacionados con aportes de material particulado natural, mientras que en los secundarios se encuentra también cierta influencia de material antropogénico (Viana, 2003).

Según Arimoto *et al.* (1995), las concentraciones mínimas y máximas registradas anualmente en Canarias son de 1 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente para la estación de Izaña, mientras que Gelado-Caballero *et al.* (1996) dan valores mayores, de 20 y 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, para una estación situada en la isla de Gran Canaria. Las grandes diferencias orográficas en Canarias parecen ser una causa de estas diferencias en las concentraciones máximas y mínimas en las islas.

Durante los años 1997 y 1998 se calcularon los niveles medios de PM10 registrados en la estación de Pico de la Gorra (Gran Canaria, 1980 m.s.n.m.) (Torres-Padrón *et al.*, 2002) encontrando que en 1998 se llegó a registrar un máximo de concentración de 1300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la mayor concentración registrada en 1997 fue de 340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que indica la gran variabilidad interanual que existe en el registro de niveles de concentración de partículas en Canarias. En este mismo estudio se encontró que la variabilidad de las concentraciones durante días de no intrusión es muy baja, mientras que es importante en días de intrusión.

En cuanto a la frecuencia de ocurrencia de estos eventos, se encuentran mayores frecuencias en invierno y en verano (Torres-Padrón *et al.*, 2002; Dorta *et al.*, 2005).

Podemos además encontrar publicados algunos estudios detallados sobre episodios muy concretos, como el de la fuerte deposición húmeda acaecida en enero de 1999 sobre Canarias (Criado. y Dorta, P., 2003).

3.2. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

3.2.1. INTERPRETACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LOS NIVELES DE PST EN UNA ESTACIÓN DE FONDO REGIONAL EN CANARIAS

3.2.1.1. Estaciones de muestreo

3.2.1.1.1. La estación de El Río

Los datos de medidas de niveles de concentración de partículas atmosféricas en suspensión (Partículas Totales en Suspensión o PST, en nuestro caso) utilizados en esta investigación para caracterizar la región subtropical Noreste del Atlántico Norte en la capa de mezcla marina han sido obtenidos en la estación de El Río, situada en el municipio de Arico, al Sureste de la isla de Tenerife, a 28°08'35"N, 16°39'20"W y 500 m de altura sobre el nivel del mar (Figura 3.1). Los niveles de PST se registraron diariamente desde el mes de Marzo de 1997 al mes de Diciembre de 2003. La disponibilidad de datos en esta serie de seis años es del 95%.

Esta estación, de tipo fondo rural, pertenece a la red de control de la Central Térmica de Granadilla (Santa Cruz de Tenerife) de la compañía eléctrica UNELCO-ENDESA. Los datos han sido suministrados por la Dirección General de Industria y Energía del Gobierno de Canarias, cuyo Centro de Control de Emisiones Industriales (CEI) controla la instrumentación de esta estación en tiempo real.

De entre todas las estaciones de las diferentes redes para la vigilancia de la calidad del aire en Canarias, para las tareas de identificación de intrusiones de polvo africano se ha elegido la de El Río por su situación y sus bajos niveles de fondo, lo que indica que la contribución antropogénica a las concentraciones medidas es baja y, por lo tanto, nos asegura que los "picos" de concentración que se registran en las series de PST corresponden a episodios africanos.

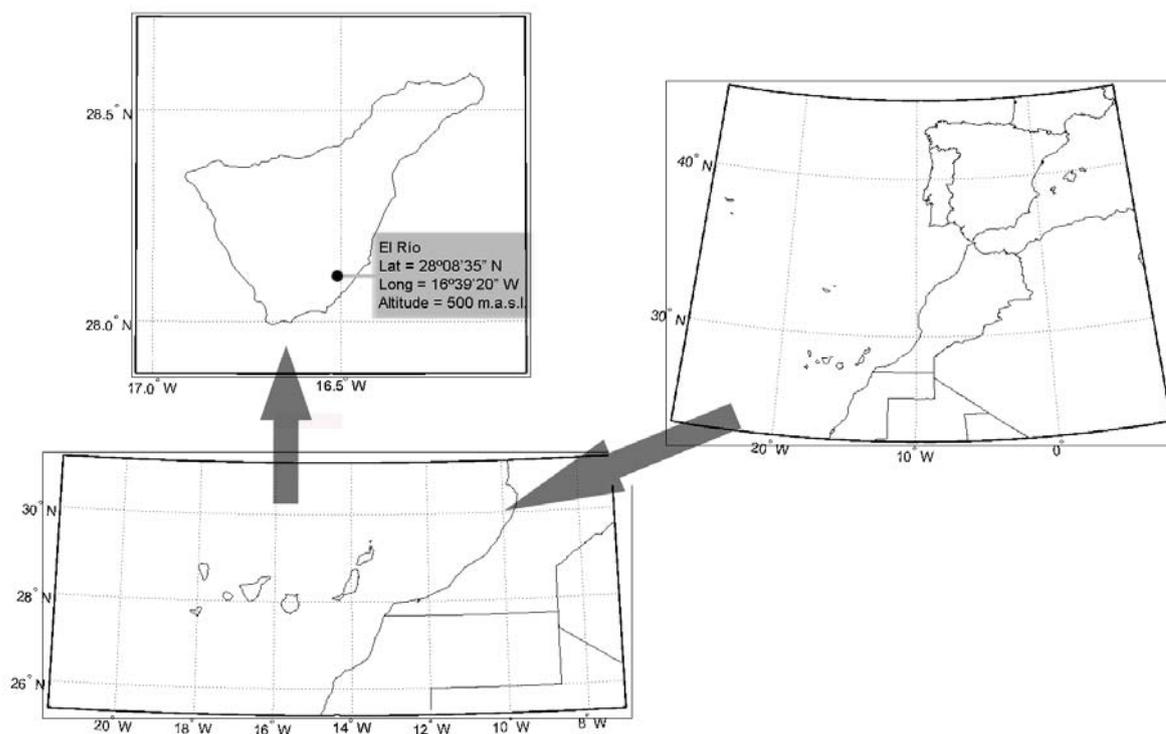


Figura 3.1. Localización de la estación de El Río.

La estación de El Río está situada relativamente cerca de una carretera muy poco transitada y con el firme de la calzada en buenas condiciones. En cuanto al suelo que circunda la cabina, se puede confirmar que está relativamente cubierto por vegetación y por lo tanto es de esperar que no afecte en gran medida a incrementar los niveles de PST por resuspensión. La influencia del aerosol marino, aunque es importante en Canarias (Viana *et al.*, 2002), es minimizada por la distancia de la estación al mar, que se encuentra a unos 10 km de distancia (Figura 3.2). Según la información disponible, no se han llevado a cabo obras ni han existido otras fuentes antropogénicas de aerosoles que hayan influenciado significativamente en las concentraciones de PST medidas durante la serie de seis años estudiada.



Figura 3.2. Estación de El Río (arriba) y vista panorámica (360°) de sus alrededores desde la propia estación (abajo).

La instrumentación de medida de aerosoles de la estación de El Río consiste en un equipo automático TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance), concretamente el modelo TEOM-1400A (Figura 3.3), que mide de manera indirecta y continua la masa de las partículas captadas en un filtro y proporciona, por tanto también de manera continua, la concentración de partículas en la fracción PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ ó PST, según el cabezal de muestreo utilizado. En el caso de la estación de El Río, se utiliza un cabezal de tipo PST.

El procedimiento de medida está basado en la determinación de la frecuencia propia de vibración de un dispositivo de vidrio de forma tubular anclado en uno de sus extremos. En el extremo libre se sitúa un pequeño filtro que retiene las partículas existentes en la muestra de aire aspirada de modo continuo por el interior del elemento vibrante; conforme aumenta la cantidad de materia recogida en el filtro, aumenta la masa del elemento vibrante y aumenta progresivamente la frecuencia propia de vibración, de manera que la medida de esa frecuencia es una medida directa de la masa total depositada en el filtro. Una vez utilizado, el filtro puede ser analizado mediante técnicas estándar de laboratorio para la detección de metales pesados.

La resolución de este instrumento es de 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, su precisión es de $\pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedios diarios y su rango de medidas es de 0 a 5 g/m^3 . En cuanto a la

resolución temporal, el TEOM-1400A de la estación de El Río está configurado para proporcionar una medida cada 10 minutos, que es la configuración por defecto del instrumento.

La comunicación entre el TEOM-1400A y un ordenador, para el posterior almacenamiento de la información, se realiza a través de puerto serie RS-232C. El equipo permite almacenar datos en su memoria interna con una capacidad de hasta 40 semanas para promedios horarios de una variable.

Este sistema es ampliamente utilizado en EU y EEUU para la medida de los niveles de aerosoles en las redes de vigilancia y control de calidad del aire debido a la gran fiabilidad de los datos. Sin embargo, es ampliamente conocido (Allen *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 2005;) que el sistema puede infravalorar las medidas de aerosoles si la proporción de componentes semi-volátiles es elevada. No es el caso del polvo mineral africano.

Las labores de calibrado gravimétrico en El Río se realizan cada dos años, mientras que el caudalímetro del equipo se calibra cada tres meses.

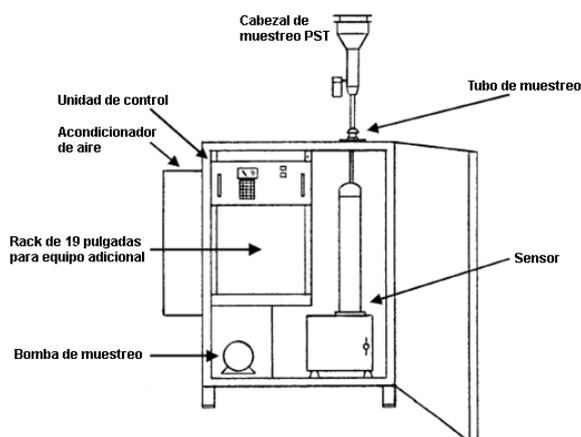


Figura 3.3. Esquema de configuración de equipo TEOM 1400-A para medidas en exterior. (Adaptado de Rupprecht & Patashnick Co., Inc. <http://www.rpco.com>)

3.2.1.1.2. Estación de muestreo de Santa Cruz de Tenerife, Observatorio Atmosférico de Izaña

El Observatorio Atmosférico de Izaña (INM) posee, en sus dependencias de Santa Cruz de Tenerife (28°28'21", 16°14'50", 52 m.s.n.m.) y situada frente al puerto, una estación en la que se realiza la medida de los niveles de material particulado (Figura 3.4). Esta estación cuenta además con diferentes analizadores remotos e in-situ para la medida de gases reactivos, así como con una estación meteorológica automática. La estación de Santa Cruz de Tenerife (SCO) pertenece al Proyecto de Investigación sobre el Medio Ambiente Urbano (GURME; Urban Research Meteorology and Environment), comprendido dentro del Programa de Vigilancia Atmosférica Global (GAW; Global Atmosphere Watch) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La instrumentación dedicada al estudio de aerosoles en esta estación de fondo urbano consiste en un muestreador de alto volumen (30 m³/h) MCV con cabezal PM10, otro idéntico a éste pero con cabezal PM2.5, un equipo LIDAR y un espectrómetro láser GRIMM 1108 para la medida en tiempo real de los niveles de PST, PM10, PM2.5 y PM1. Serán estas últimas medidas de concentración de partículas las que utilizaremos en esta investigación.

En el espectrómetro láser GRIMM 1108, dos sensores ópticos proporcionan medidas de concentración de número de partículas en tiempo quasi-real a una frecuencia máxima de 0.17 Hz (6 segundos). La resolución temporal puede reducirse hasta un periodo de muestreo de una hora. El intervalo de diámetros d_p cubierto por este instrumento es de entre 0.3 y 20 μm en 15 canales. Una característica importante del diseño del GRIMM 1108 es su fácil portabilidad: puede operar durante 2 horas con una batería recargable de ion-Li y dispone de una memoria interna donde pueden almacenarse 56 KB de información. Los datos pueden ser transferidos a un PC o un data logger mediante un modem PCMCIA, tras su previo registro en una tarjeta de memoria PCMCIA, o directamente, vía interface serie RS-232. En esta estación la transferencia de datos se realiza por puerto serie.

Es importante resaltar que las medidas de PM10 y PM2.5 obtenidos a lo largo del estudio mediante el espectrómetro GRIMM han sido corregidos con factores derivados de la comparación de dichas medidas con las de los captadores de alto volumen, que son considerados equipos de referencia, lo que asegura la calidad de las medidas a lo largo de la serie de datos obtenida.

Los captadores de alto volumen son sistemas que cuentan con una bomba centrífuga que pueden aspirar un caudal de aire de entre 20 y 80 m³/h y permiten la instalación de cabezales portafiltros de PM10, PM2.5 o PST. Las partículas se retienen en filtros de microfibras de cuarzo que previamente se han acondicionado, con el fin de controlar su contenido en agua, manteniéndolos durante 48 horas a 20°C y a 50% de humedad relativa. El filtro limpio es pesado con una balanza de precisión de 5 dígitos. Una vez que el filtro contiene la muestra de polvo, se vuelve a someter al mismo procedimiento de acondicionamiento que se utilizó para el filtro limpio. Por último, se determina la concentración de partículas restándole al peso del filtro con muestra el del filtro limpio.



Figura 3.4. Instalaciones de la estación de Santa Cruz de Tenerife, Observatorio Atmosférico de Izaña (izquierda) y espectrómetro laser GRIMM 1108 (derecha).

3.2.1.2. Cálculo de la relación PM10/PST

En el apartado de esta investigación que se refiere al estudio del grado de cumplimiento de la normativa europea 1999/30/CE, referente a los valores límite de concentración anual y número de días límite de superación de un límite diario, necesitaremos contar con valores de concentración de PM10. La propia Directiva europea sugiere que la conversión entre PST y PM10 debe realizarse en el territorio europeo utilizando el cociente $PM10/PST=0.8$. Sin embargo, debido a las características del polvo que llega a Canarias procedente de África con alto

contenido en partículas minerales gruesas, este cociente podría ser diferente en las islas. Debido a que la instrumentación de la estación de El Río mide únicamente la fracción PST no podemos realizar el cálculo para esta estación, por lo que utilizaremos el cociente hallado en otra estación próxima. Los datos que hemos utilizado son concentraciones de PST y PM10 medidas simultáneamente en SCO entre el 17 de Marzo de 2003 y el 22 de Junio de 2005 a intervalos de una hora (Figura 3.5).

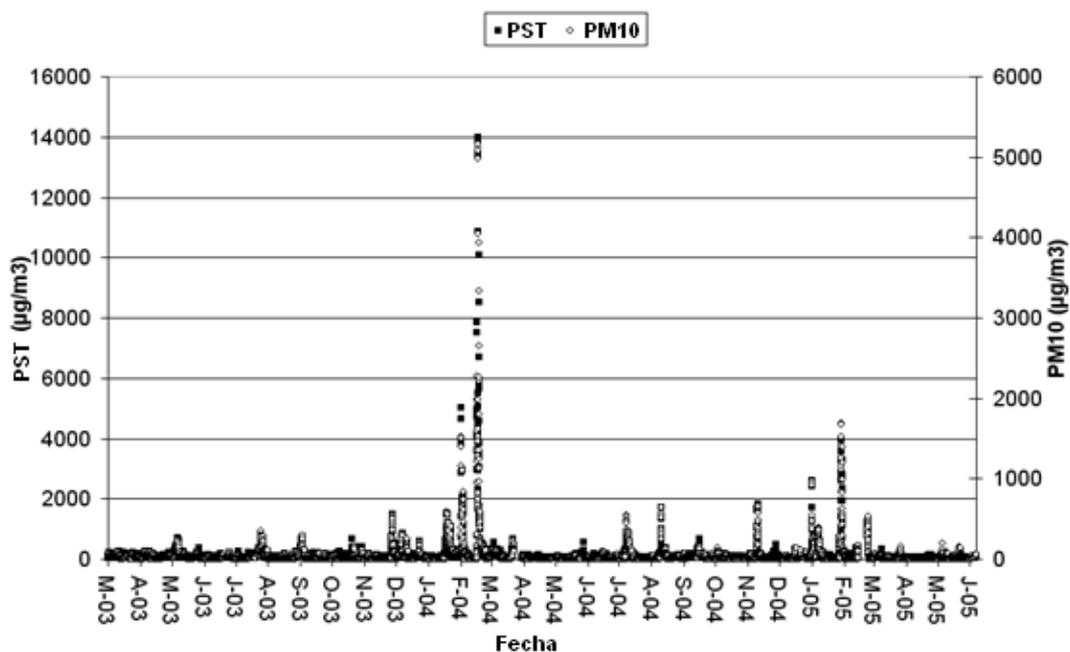


Figura 3.5. Series de concentraciones de PM10 (círculo) y PST (cuadrados) registrados en la estación de Santa Cruz de Tenerife (Observatorio Atmosférico de Izaña, INM). Los datos representados son medias horarias registradas entre el 17 de Marzo de 2003 y el 22 de Junio de 2005.

3.2.2. IDENTIFICACIÓN DE DÍAS DE INTRUSIÓN DE MASAS DE AIRE AFRICANO

Una de las principales tareas de investigación del presente estudio consistió en la identificación de los días de intrusión de polvo africano en Canarias. Para esta tarea se eligió analizar una serie de valores de medias diarias de PST registrada durante 6 años en la estación de El Río ya que, como se ha explicado en la sección 3.1.1, esta estación de fondo rural o regional nos garantiza de que todos los días en los

que se registraron en ella altos niveles de material particulado fueron días de intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano.

Nuestra serie de concentraciones de partículas comprende medidas de promedios diarios de PST registrados desde el 24 de Marzo de 1997 al 30 de Diciembre de 2003, con una disponibilidad de datos del 96%. De esta serie extraemos los datos comprendidos entre los años 1998 y 2003, ambos inclusive.

Podría ocurrir que en algunas fechas hayan llegado masas de aire de origen africano a la estación de estudio pero no se hayan registrado concentraciones de polvo notablemente superiores a los valores típicos de fondo, por no producirse emisiones de polvo importantes en el origen. Por otro lado, también podría ocurrir el caso en que los niveles de partículas son altos pero las masas de aire no provienen del continente africano. Los escenarios que dan lugar a este segundo caso se identifican y explican tras analizar la serie de concentraciones de fondo.

Por todo lo anterior, para la identificación de los escenarios meteorológicos que dan lugar a las intrusiones de masas de aire africano en Canarias no nos interesa tanto seleccionar todos los días de intrusión de masas de aire con origen en África, como asegurarnos de que los días seleccionados ciertamente corresponden a episodios africanos con alto contenido en partículas. Una vez hecho esto, calculamos un umbral de concentración de partículas a partir del cual podremos caracterizar a un episodio de alto nivel de material particulado como de origen africano.

3.2.2.1 Método subjetivo de identificación de intrusiones de polvo africano. Cálculo subjetivo del umbral de PST

Partimos del trabajo previamente elaborado por la Dra. M^a del Mar Viana Rodríguez (CSIC; IJA) en el que, como parte de su Tesis Doctoral (2003), identificó la procedencia de las masas de aire que llegaron a la misma estación de medida que nosotros estamos considerando, para todos los días de los años 1998 a 2000. Viana encontró que el 25% de estos días corresponden a casos en los que las masas de aire que alcanzan las islas son de origen africano. Este resultado es la conclusión de un análisis muy detallado sobre la procedencia de las masas de aire que cada día llegaron a El Río, para el que utilizó análisis de retrotrayectorias HYSPLIT 4.0. Además contamos con el mismo estudio, realizado también por Viana pero no incluido en su Tesis Doctoral, en el que esta vez utilizó una combinación de

datos procedentes de herramientas tales como mapas de índice AI del TOMS, imágenes SeaWIFS y cálculo de retrotrayectorias, para los años 2001 y 2002.

Todas las herramientas utilizadas están disponibles en páginas web publicadas en Internet y a través del sistema McIDAS. McIDAS (Man Computer Interactive Data Access System) es un software que aglutina una serie de herramientas para la extracción de datos meteorológicos e imágenes de satélites desde bases de datos, visualización de estos datos, análisis y manipulación de los mismos.

La información utilizada en la presente investigación para la confirmación de los episodios africanos fueron las siguientes:

- NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System): Es el modelo de predicción de aerosoles de NRL/Monterrey (Naval Research Observatory, U.S.Navy, EEUU). De este modelo se extraen predicciones de concentración de polvo a nivel de superficie y de espesor óptico de aerosoles. Los mapas de espesor óptico de aerosoles previstos proporcionan información sobre la intrusión de masas de aire con alto contenido de partículas en todo el espesor de la atmósfera. En general se observa que los mapas previstos por NAAPS para la concentración de polvo en superficie suelen subestimar ligeramente las intrusiones. La página web de la que se obtiene esta información es la siguiente:

<http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/>

En esta web se actualizan las predicciones de manera que las del día anterior son predicciones a 0h, con lo que podemos tomarlas prácticamente como campos de análisis y, por lo tanto, nos sirven para confirmar episodios africanos.

- ICoD/DREAM: Este modelo del Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics nos proporciona información de la concentración de polvo previsto a nivel de superficie (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, carga total de polvo, deposición húmeda y seca, estos tres últimos productos en mg/m^2). Si se compara la predicción de ICoD/DREAM con los episodios finalmente ocurridos, obtenemos que este modelo es más fiable en su predicción que el modelo NAAPS para este mismo nivel debido, entre otras razones, a la mejor

resolución utilizada. La predicción a 0h para las 12z es la que utilizamos como herramienta para confirmar episodios en superficie.

Actualmente este modelo se ejecuta en las instalaciones del Barcelona Supercomputer Center (BSC), Centro Nacional de Supercomputación (CNS). La página web desde la que se puede acceder a los productos del modelo DREAM es <http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM>

- SKIRON: La Universidad de Atenas, con este modelo de predicción de polvo, proporciona varios productos útiles para elaborar nuestro estudio. Uno de ellos es el mapa de carga total de polvo previsto. El hecho de que se trate de predicción de carga total, y no de carga a nivel de superficie, implica una limitación importante a la hora de comparar con los mapas de los modelos anteriormente citados. En todo caso estos mapas de carga total son útiles a la hora de verificar cuáles son las zonas afectadas por carga de polvo en suspensión a todos los niveles y además permiten ver cómo se desplaza la capa de polvo.

No fue hasta mayo de 2007 cuando se incorporó a Skiron un nuevo producto operativo de predicción de niveles de polvo a nivel de superficie. El rendimiento de este producto en lo referente a la detección de episodios es similar al del modelo DREAM, debido a que los dos tienen una base teórica similar.

Los productos de Skiron están disponibles a través de la web: <http://forecast.uoa.gr>. La predicción a 0h, para las 12 UTC de cada día, es la que tomamos como referencia para confirmar los episodios de intrusión de partículas africanas.

- HIRLAM (High Resolution Limited Area Model): Este modelo es el producto de un proyecto de colaboración entre ocho institutos meteorológicos europeos, entre ellos el INM. HIRLAM ofrece predicciones de diversos campos meteorológicos, algunos de los cuales (como los de viento o los de líneas de flujo) son muy útiles para nuestra investigación. Este modelo se ejecuta específicamente para predicciones y validaciones. Tenemos acceso a él a través del sistema McIDAS.

- Cálculo de retro-trayectorias HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory): Las retro-trayectorias se calcularon específicamente para el centro de la isla de Tenerife (coordenadas 28.31°N, 16.5°W) con la versión 4 del modelo de dispersión HYSPLIT. El cálculo de retrotrayectorias es de gran utilidad para determinar la zona de partida de las masas de aire que llegan, en una fecha determinada, a un lugar concreto, pudiendo considerar hasta tres alturas diferentes de llegada. Los niveles de llegada que hemos elegido son 200, 1500 y 2400 m.s.n.m. En el cálculo de nuestro conjunto de retrotrayectorias se tuvo en cuenta la velocidad vertical de las masas de aire calculada por el modelo. Las retrotrayectorias pueden calcularse on-line en la página web: www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html. Los campos de viento para generar las retrotrayectorias se obtuvieron de la base de datos meteorológicos del Final Global Data Assimilation System (FNL/GDAS) que pertenece al National Center for Environmental Prediction (NCEP) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Los datos tienen una resolución temporal de 6 horas y una resolución espacial de 191 km en todo el globo terráqueo. Es por ello que las retrotrayectorias calculadas para el punto elegido en el centro de Tenerife sirven también para nuestro estudio sobre la estación de El Río.

Por otro lado se utilizaron imágenes de satélite tanto para validar episodios como para localizar zonas fuente. Para ello se han utilizado las siguientes herramientas:

- METEOSAT (Meteorological Satellite): En el Observatorio Atmosférico de Izaña almacenamos diariamente las imágenes en canales visible, infrarrojo y vapor de agua tomadas por este satélite de EUMETSAT. Para procesarlas y tratarlas usamos el sistema McIDAS, pudiendo analizarlas detalladamente dentro de este entorno, que además permite aplicar filtros y transformarlos numéricamente.
- MSG (Meteosat de Segunda Generación): Satélite europeo (EUMETSAT) que proporciona imágenes de la Tierra en 12 canales de diferente longitud de onda y resolución de hasta 1 Km, con una resolución temporal de 15 minutos. Se tiene acceso a los datos de MSG a través del sistema McIDAS. Este sensor permite una óptima monitorización de aerosoles para detectar

polvo proveniente de África, haciendo uso de los canales VIS 0.6/0.8 μm . Pueden realizarse operaciones entre canales para hacer uso de imágenes RGB. Las imágenes de MSG tienen tal resolución espacial ($3 \times 3 \text{ km}^2$, siendo $1 \times 1 \text{ km}^2$ en el canal de alta resolución) y temporal (una imagen cada 15 minutos) que nos permiten identificar intrusiones de masas de aire africano en Canarias diferenciando la entrada en cada isla, así como observar pequeñas plumas de polvo partiendo del continente africano y de tamaño incluso menor que cualquiera de las islas.

- SeaWIFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor): instrumento a bordo del satélite SeaStar (NASA). Proporciona imágenes diarias de diferentes zonas geográficas. Con estas imágenes son fácilmente detectables las intrusiones de polvo cuando se producen sobre el mar. Esta información se encuentra disponible a través de la web <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/banner.html>.
- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer): Las imágenes proporcionadas por los instrumentos MODIS, que se encuentran a bordo de los satélites Terra y Aqua, tienen una resolución espacial de hasta 250 km en dos de sus 36 canales. Son de especial utilidad a la hora de identificar el polvo africano en suspensión cuando todavía se encuentra sobre territorio continental. Debido a las particularidades de la órbita de estos satélites, no tenemos imágenes útiles del archipiélago canario todos los días. El conjunto de productos derivados de las observaciones de MODIS puede encontrarse en la web <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>
- Índice AI del TOMS: es un producto derivado de las observaciones del satélite TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). El AI (Aerosol Index) es un índice semi-cuantitativo de la absorción en la columna atmosférica por aerosoles a 0.34 μm y proporciona una indicación de la carga de aerosoles en la atmósfera. Se calcula como el contraste espectral entre los canales de 340 y 380 nm, y depende del espesor óptico de aerosoles, la altura de la capa de aerosoles, las propiedades ópticas de estos y el ángulo de visión del instrumento. Hay que tener en cuenta que cuando la capa de aerosoles se encuentra por debajo de un kilómetro de altura (aproximadamente), el

índice AI no es capaz de indicarnos su presencia (Torres *et al.*, 2002). Además, cuando se presentan aerosoles de diferentes orígenes, como polvo mineral y aerosoles carbonosos procedentes de la quema de biomasa, el AI no distingue entre ellos. Esta información se encuentra disponible a través del FTP <ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/meduse>.

En algunas ocasiones (ver sección 4.3.1) se estudiaron los pronunciados descensos de los niveles de partículas registrado en días en los que, según el análisis de retrotrayectorias HYSPLIT y mapas de AI del TOMS, las intrusiones deberían ser importantes. En este estudio se usaron los datos de pluviometría de la estación de El Río, extraídos de la base de datos climatológica del Instituto Nacional de Meteorología, y los mapas de tasa de precipitación proporcionados por el Global Precipitation Climatology Project / NCEP para la región [5°N, 50°N], [40°W, 30°E].

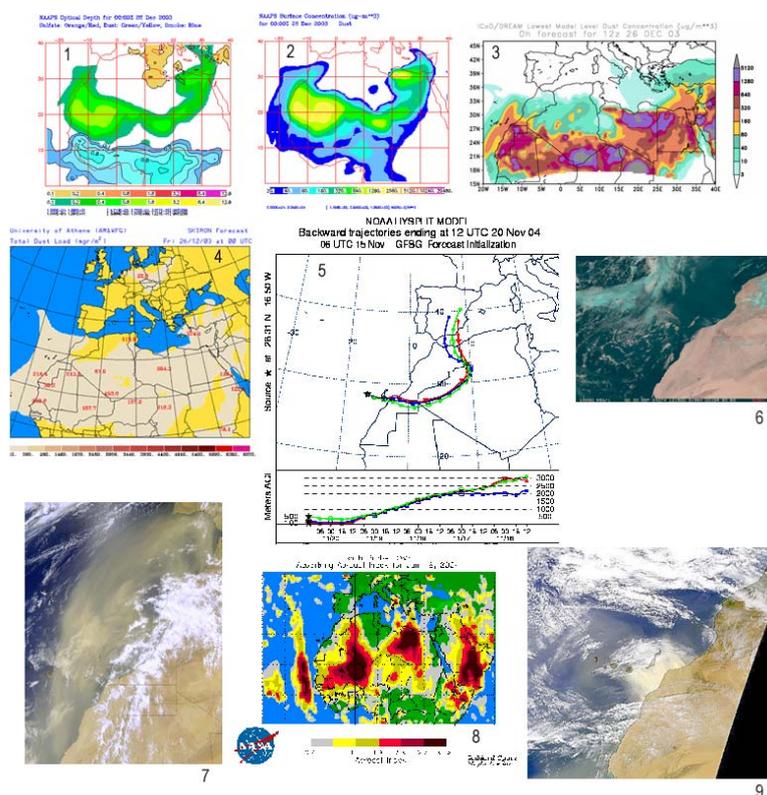


Figura 3.6. Algunas de las herramientas que utilizamos para identificar episodios africanos. Las figuras se encuentran numeradas: 1) Espesor óptico de aerosoles del modelo NAAPS. 2) Concentración de polvo en superficie del modelo NAAPS. 3) Concentración de polvo en superficie del modelo ICoD/DREAM. 4) Carga total de polvo del modelo Skiron. 5) Retrotrayectorias HYSPLIT. 6) Composición RGB de imágenes proporcionadas por MSG. 7) Imagen proporcionada por MODIS. 8) Mapa de AI del TOMS. 9) Imagen proporcionada por SeaWiFS.

Ya que la técnica empleada por Viana en la identificación de días de intrusión para los años 2001 y 2002 (comunicación personal) es más completa respecto a la utilizada por la misma autora en años anteriores (algunas de las citadas herramientas fueron accesibles a partir de 2001), suponemos que la identificación es más exacta. Partimos de los datos de esos dos últimos años para calcular un primer umbral de PST. Como primera aproximación, consideramos que un día con PST superior a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y previamente seleccionado como día de intrusión de masas de aire africano es un día de episodio de intrusión de partículas africanas. Esta aproximación es debida a que, como ya se ha comentado anteriormente, consideramos representativos de los episodios que queremos caracterizar los días en los que se constata que existe intrusión de masas de aire africano y en los que, además, existe una elevada concentración de partículas PST en algún momento en nuestra estación de fondo.

Una vez eliminados los días de $\text{PST} < 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los años 2001 y 2002, calculamos el promedio de PST de todos los días que han cumplido las condiciones impuestas en la primera aproximación. El promedio resultante es de $28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Teniendo en cuenta solo los días de verano, el promedio de PST para días de intrusión es de $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para los días de intrusión de invierno, el promedio de PST resultó ser de $35.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Teniendo en cuenta este primer umbral de $\sim 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, se procedió a identificar el número de días de intrusión de polvo africano en el año 2003. El número de días con $\text{PST} > 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para este año resultó ser de 83 días, y el promedio anual de PST resultó ser de $25.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Analizando las retrotrayectorias HYSPLIT y los mapas de AI del TOMS de días anteriores para esos 83 días se encuentra que en 33 de ellos, a pesar de que el nivel de partículas fue elevado, las masas de aire no procedieron de África. Esto podría ser debido a procesos de resuspensión local, recirculación de polvo acumulado en el Atlántico o incluso a problemas en los equipos de medida. En todo caso, solo nos interesa identificar los días en los que con total seguridad la intrusión de polvo procede directamente de África, por lo que estos días fueron eliminados del conteo final.

A la vista de los valores promedio de PST obtenidos hasta ahora, y teniendo en cuenta que necesitamos asegurarnos de que las fechas que tomamos corresponden sin lugar a dudas a episodios de intrusión de masas de aire africano

con elevado contenido de material particulado mineral, aplicamos un umbral de 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a toda la serie de datos de la estación de fondo regional. Para los 6 años considerados en la estación de fondo regional de El Río, el número de días de intrusión de masas de aire africano con $\text{PST} > 28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es de 256 días.

3.2.3. MÉTODO OBJETIVO DE IDENTIFICACIÓN DE INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO

3.2.3.1. Índices de africanidad

El método objetivo para la identificación de días de intrusión de masas de aire africano que se explica a continuación se basa en la determinación de unos nuevos índices, que además han sido útiles para otros objetivos de esta investigación, a la que hemos llamado “índices de permanencia”. De entre ellos, los que hemos utilizado en este caso son los “índices de africanidad”. Los índices de permanencia se calculan a partir de retrotrayectorias de 5 días generadas con el modelo de dispersión HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 4.0 (Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003).

Como se ha mencionado anteriormente en 3.2.1, las retrotrayectorias HYSPLIT pueden generarse desde la página web <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. Rellenando el formulario que aparece en dicha web podemos extraer un fichero de texto y una representación gráfica de hasta tres retrotrayectorias con altura de llegada diferente para una misma fecha. Rellenar un formulario para cada día de la serie de estudio no parece factible si tenemos en cuenta que en ese caso necesitaríamos repetir la operación 2617 veces. Para facilitar y acelerar este proceso de cálculo y extracción de datos hemos adaptado a nuestro caso un código php de extracción directa de datos desde el servidor web de HYSPLIT. Este código fue facilitado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Los programas, en lenguaje php, se instalaron en un servidor web junto a una base de datos sql necesaria para su funcionamiento. La actualización consistió en la modificación de los campos de las tablas de la base de datos que hacían referencia a las alturas de llegada y coordenadas del punto de destino.

El inicio de estas retrotrayectorias se fijó en Tenerife (28.31° N; 16.5° W) y se calcularon para tres alturas de llegada (200, 1500 y 2400 m.s.n.m.) y para cada uno de los días comprendidos entre el 1 de enero de 1998 y el 30 de diciembre de 2003. Estas retrotrayectorias fueron calculadas usando datos meteorológicos de FNL (Final Global Data Assimilation System) y teniendo en cuenta la modelización de la velocidad vertical.

El transporte de las masas de aire hacia Tenerife ha sido caracterizado usando los sectores geográficos predefinidos que se muestran en la Figura 3.7. Éstos fueron elegidos bajo la consideración de resultados previos a este estudio, donde se caracterizaron gases traza y aerosoles sobre la región de Canarias (Sancho *et al.*, 1992; Cuevas, 1995; Rodríguez, 1999; Torres *et al.*, 2001; Viana *et al.*, 2002). Para su elección básicamente se tuvo en cuenta la distribución latitudinal de los componentes atmosféricos, así como la influencia que el océano y los continentes ejercen sobre la composición de las masas de aire. Estas ocho regiones, algunas de las cuales están compuestas por diferentes sub-regiones rectangulares, son las que se definen con los intervalos de latitudes y longitudes expuestos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Límites de los sectores geográficos para los que se han calculado los índices de permanencia de masa de aire.

Sector	Latitud max.	Latitud min.	Longitud max.	Longitud min.
1	90°N	30°N	50°W	135°W
2	90°N	30°N	10.5°W	70°W
3	90°N	50°N	50°E	10.5°W
4	50°N	36°N	50°E	10.5°W
5	36°N	20°N	50°E	18°W
6	20°N	0°	50°E	18°W
7	30°N	0°	18°W	135°W
8	31.9°N	24.7°N	12.4°W	20.6°W

La técnica de identificación de la procedencia de masas de aire utilizada en este trabajo no es subjetiva, por lo que finalmente no realizamos una clasificación de las trayectorias como las que habían sido elaboradas en estudios previos (Viana *et al.*, 2002; Escudero *et al.*, 2005).

Una trayectoria puede viajar sobre diferentes regiones geográficas y a diferentes intervalos de altura, por lo que es difícil identificar una sola región de procedencia de las masas de aire de forma subjetiva. La aproximación en este estudio es diferente. Se calcularon un total de 24 índices, correspondientes a 8 sectores geográficos (Figura 3.7) x 3 intervalos de altitud, para cada altitud de llegada sobre Tenerife (200, 1500 y 2400 m.s.n.m) para cada una de las retrotrayectorias. Para cada retrotrayectoria se calcula un valor normalizado (adimensional) o índice (Ecuación 3.1) que da cuenta del porcentaje de tiempo que una trayectoria permanece en uno de los sectores geográficos y en uno de los intervalos de altura predefinidos. Llamamos intervalo de baja altitud a altitudes inferiores a 1500 m, medias a altitudes entre 1500 m y 3000 m, y altas a las que son superiores a 3000 m.

$$\text{Índice de Permanencia} = \frac{\text{horas de tránsito}_{s,a}}{120} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde *horas de tránsito* = número de horas que una retrotrayectoria de 120 h (5 días) para una altura de llegada *a* invierte en el sector *s* (figura 3.7), en un intervalo de altitud *i* (entre 0 y 1500 m, entre 1500 y 3000 m o superior a 3000 m).

De entre los diferentes índices de permanencia distinguimos el índice Sahara (AFIN, del inglés “AAfrican Index North Africa”) calculado para el área [20°N, 36°N], [18°W, 50°E] y el índice Sahel (AFIS, del inglés “AAfrican Index Sahel”) que fue calculado para el área [0°, 20°N], [18°W, 50°E], correspondientes a las áreas 5 y 6 de la Figura 3.7 respectivamente y a los que llamamos índices de africanidad (AFI, del inglés “AAfrican Index”).

De esta manera, por ejemplo, calculamos el índice Sahara bajo (AFNIL)_a (donde “a” es la altitud final) como la fracción de 120 horas que una masa de aire que llega a la

altitud “a” sobre el punto de estudio viaja sobre la región Sahara manteniéndose por debajo de los 1500 m de altitud. Por ejemplo, para la retrotrayectoria de 120 horas idealizada que se muestra en la Figura 3.7, suponiendo que su altura de llegada a Tenerife es 200 m y que a lo largo del sector señalado en color rojo el transporte de la masa de aire tenga lugar entre el nivel de superficie y 1500 m de altitud, el índice $AFINL_{200}$ es el número de horas que la masa de aire tarda en recorrer el sector rojo dividido por 120 h.

De la misma manera llamamos, por ejemplo, índice Sahel medio $(AFISM)_a$ a la fracción de tiempo que una parcela de aire que llega a una altura “a” sobre el punto de estudio permanece sobre la región Sahel a una altura entre 1500 m y 3000 m. Como se verá más adelante, los Índices de Africanidad nos ayudarán a distinguir entre los episodios de contribución directa de polvo en la estación de El Río y los episodios de contribución indirecta por deposición gravitacional.

Con el conjunto de las tres retrotrayectorias diarias para toda la serie se han podido calcular los índices para las tres alturas de llegada y tres intervalos de alturas de viaje: entre superficie y 1500 m, entre 1500 y 3000 m y superiores a 3000 m. Además, no solo se calcularon los índices para las regiones Sahara y Sahel, sino que en total se calcularon para ocho regiones diferentes (Figura 3.7). Además de los sectores Sahara y Sahel, otra de las regiones que puede ser relevante para nuestro estudio es la del sector 8, definido como un cuadrado de 400 Km de lado centrado en Tenerife, que puede servirnos para identificar los episodios ocurridos en ausencia de condiciones advectivas.

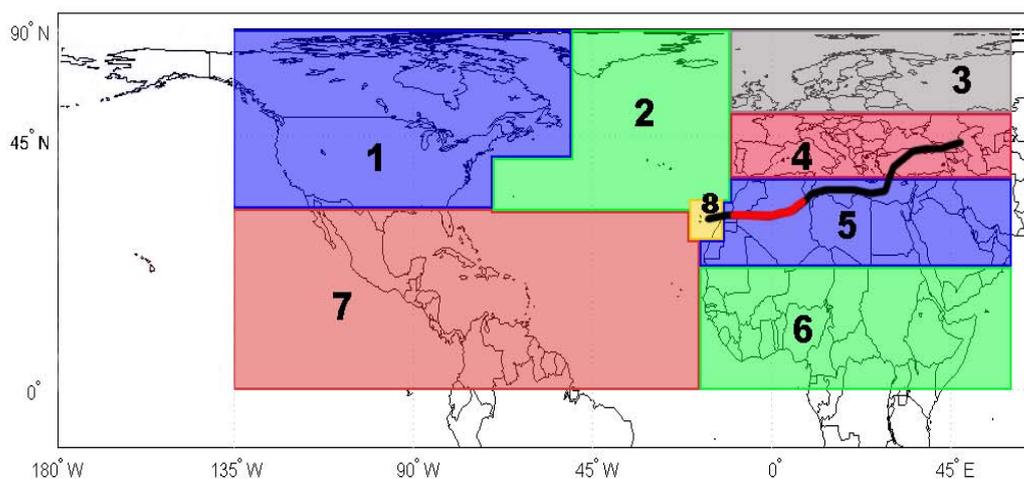


Figura 3.7. Regiones geográficas consideradas en el cálculo de los índices de permanencia de masa de aire. El trazo negro es la representación de una retrotrayectoria idealizada. En rojo se señala la porción de esta retrotrayectoria correspondiente a un Índice de Africanidad AFIN.

El cálculo de índices para todas las regiones, rango de altura de viaje y alturas de llegada se realizó mediante una rutina programada en el entorno MATLAB. Los datos de entrada para esa rutina son las retrotrayectorias HYSPLIT de 120 horas hacia atrás calculadas para un punto de llegada en las coordenadas geográficas 28.31°N, 16.5°W (centro de la isla de Tenerife) y alturas de llegada a 200, 1500 y 2400 m sobre ese punto. Estas retrotrayectorias fueron calculadas para las 12 h de cada uno de los días comprendidos entre el 1 de Septiembre de 1997 y el 31 de Mayo de 2004.

El resultado final para cada día es un conjunto de 72 índices (8 sectores x 3 alturas de llegada x 3 intervalos de altura = 72 índices de permanencia). La nomenclatura que seguimos en los algoritmos es de la forma *sector_rango de altura_altura de llegada*, donde el sector puede ser Sahara, Sahel, etc. El rango de altura puede ser BT (entre superficie y 1500 m), MT (entre 1500 y 3000 m), ó AT (alturas superiores a 3000 m) y la altura de llegada puede tomar valores de 200, 1500 o 2400 m. Por ejemplo, el índice de permanencia para masas de aire que provienen de la región de Sahel, viajan entre 1500 y 3000 m y llegan a una altura de 200 m sobre Tenerife es el Sahel_MT_200.

La representación de las series de índices nos indica la variabilidad temporal del tiempo de permanencia en diferentes intervalos de altura en las zonas de Sahara y Sahel para las masas de aire con llegada a Canarias a diferentes alturas. Por lo tanto, nos indica la variabilidad de la procedencia de estas masas de aire. En particular, nos interesa conocer si existen épocas del año en las que el transporte de polvo tiene su origen preferentemente en las zonas Sahara y Sahel y la relación de esta variabilidad con la altura de llegada, por lo que representaremos las series de índices $(AFINL)_{200}$, $(AFISL)_{200}$, $(AFINL)_{1500}$, $(AFISL)_{1500}$, $(AFINL)_{2400}$ y $(AFISL)_{2400}$ por ser los que representan el transporte de masas de aire que viajan en niveles bajos, es decir, las que con mayor probabilidad tienen de interactuar con la superficie o con la capa de mezcla continental africana y transportar polvo.

3.2.3.2. Cálculo objetivo del umbral de PST

Una vez calculada la serie de índices de africanidad, estos nos sirvieron para calcular de manera objetiva el umbral de concentración de PST a partir del cual podemos hablar de episodio africano. Realizando el cálculo con este método totalmente independiente del método subjetivo, y comparando con el valor que se obtenga del primero, podemos comprobar hasta qué punto este umbral es un indicativo fiable de que, cuando la media diaria de PST supera este valor, podemos hablar de episodio africano.

Se usaron los valores de índices de africanidad para identificar todos y cada uno de los días en los que existió aporte de masas de aire africano desde cualquier nivel y con llegada a cualquiera de las tres alturas que hemos venido considerando, esto es, todos los casos en los que $AFI \neq 0$. De esta manera tenemos en cuenta absolutamente todos los casos en los que el transporte de masas de aire desde las zonas de Sahara y Sahel podría llevar a un incremento de los niveles de PST en la estación de El Río, ya sea por aporte directo en niveles bajos o por deposición gravitacional desde niveles más altos. El resultado de este análisis es la identificación de todos los días de intrusión de masas de aire africano, independientemente del nivel de PST registrado, de manera totalmente objetiva. Para estos días calculamos los valores medios mensuales y totales de PST y comprobamos si el resultado es compatible con el umbral de concentración de PST mínima obtenido con el método que implicaba un análisis objetivo de las retrotrayectorias. Si el resultado del cálculo del umbral con el nuevo método objetivo fuese similar, confirmaríamos que a partir de ese nivel de PST podemos considerar siempre que la alta concentración de partículas es debida a aportes naturales desde el vecino continente.

3.2.4. NIVELES DE FONDO REGIONAL DE PST EN LA ESTACIÓN DE EL RÍO

El estudio de los niveles de PST de fondo regional canario, es decir, de los niveles de PST que se registran en días sin intrusión de masas de aire con elevada carga

de polvo africano, es importante a la hora de caracterizar completamente nuestra región de estudio. Si tenemos en cuenta que la única fuente significativa de polvo mineral en Canarias es el continente africano (no hay contribuciones de industrias cercanas o de resuspensión local), los niveles promedio de PST de fondo, incluyendo la importante contribución del aerosol marino (Viana *et al.*, 2002), se pueden obtener promediando los niveles para días no africanos.

La identificación de los días en los que no tuvo lugar episodio africano se realizó mediante dos métodos diferentes. Por un lado, se realizó una identificación de los días de intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano mediante análisis subjetivo siguiendo el procedimiento descrito anteriormente a partir de una serie de herramientas (uso de modelos de predicción de polvo, imágenes de satélite, retrotrayectorias y campos meteorológicos), con lo que el resto de días de la serie resultaron identificados como días de no intrusión. Por otro lado, se utilizó el método objetivo descrito en el apartado anterior, basado en los índices de africanidad. Con este método se seleccionaron los días con AFI=0 para las tres altitudes finales (200, 1500 y 2400 m.s.n.m). Se calcularon los promedios mensuales de PST del periodo 1998-2003 para los días “no africanos” identificados con estos dos métodos independientes y se estudiaron las series obtenidas. El análisis de la serie de niveles de fondo obtenida a partir del método objetivo dio lugar a la identificación de dos tipos de episodios en los que las concentraciones de fondo pueden ser altas a pesar de que las masas de aire no provienen del continente africano.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. OCURRENCIA DE EPISODIOS AFRICANOS EN CANARIAS. INTERPRETACIÓN DE LA SERIE TEMPORAL DE PST 1998-2003 EN LA ESTACIÓN DE EL RÍO

Representando la serie temporal 1998-2003 de concentraciones de PST en la estación de El Río (Figura 3.8) es fácil advertir que ocasionalmente se alcanzan niveles un orden de magnitud mayores a la media total, que es de $21.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST. Los valores altos de PST tienen lugar en forma de pulsos, que coinciden siempre con intrusiones de masas de aire africano.

Los episodios de alta concentración de partículas se dan durante los meses de invierno y verano, destacando claramente los de invierno. Estos episodios duran entre 1 y 9 días, con una duración media de 3 días. En la gráfica representada en escala logarítmica (Figura 3.8b) pueden distinguirse más claramente los 256 días (entre 2191 días con datos de PST) en los que se sobrepasó el nivel promedio diario de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, valor que calculamos como umbral mínimo de PST para los días de intrusión de masas de aire africano con alto contenido de partículas, tal y como se explicó en la sección 3.2.3.

Los episodios de intrusión de polvo africano tienen lugar en Canarias, tal y como se explicó en la sección 1.8, de manera directa a nivel de superficie en invierno o en medianías y en cumbres de las islas en verano. Un episodio directo en un sitio determinado es el que tiene lugar por el transporte de polvo africano hasta su altura. Sin embargo, existen otros tipos de episodio, a los que llamaremos episodios indirectos, en los que el aporte de polvo africano al lugar de estudio es debido a la deposición gravitacional del polvo que ha sido transportado en alturas superiores.

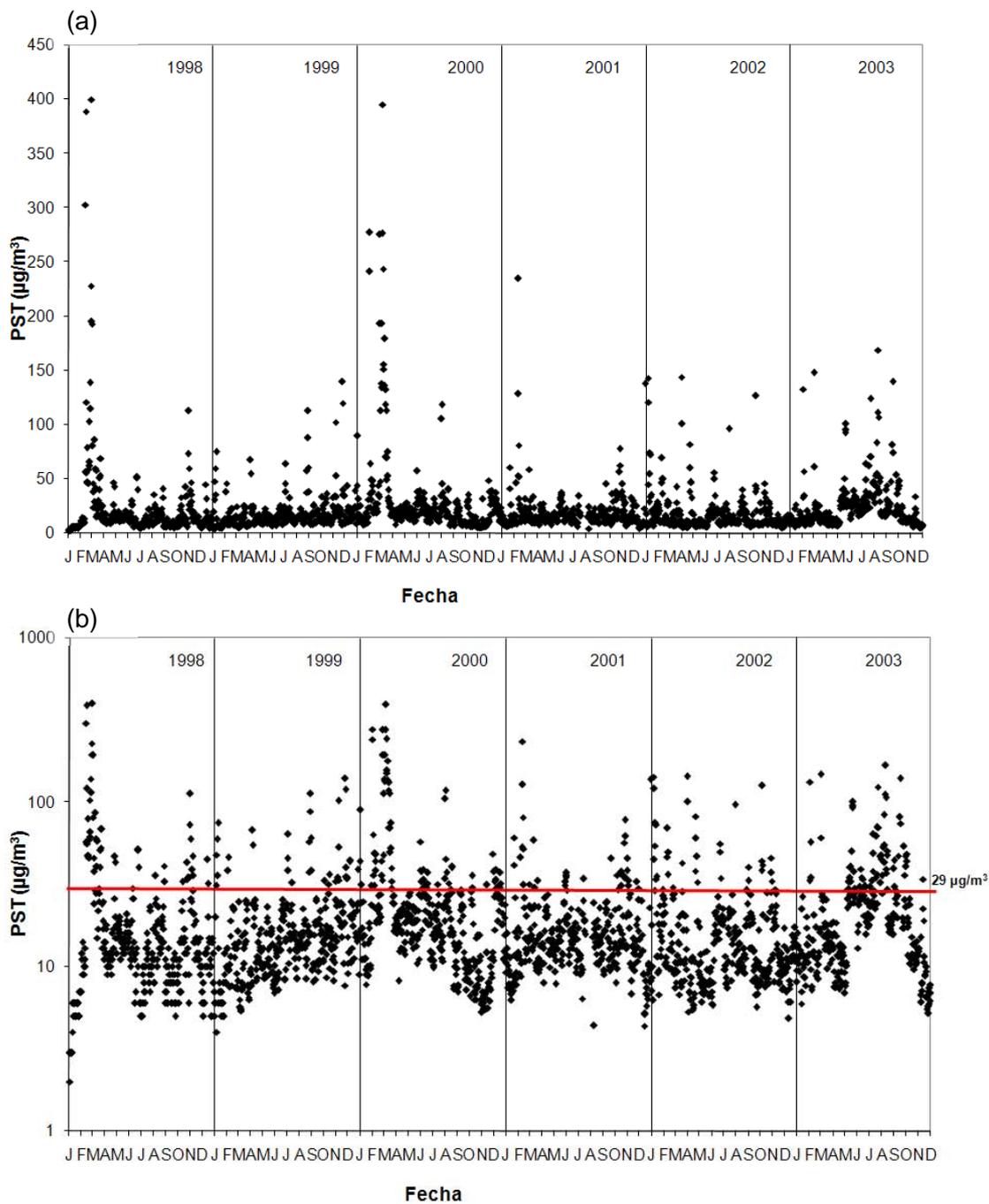


Figura 3.8. (a) Serie temporal de PST 1998-2003 en la estación de El Río. (b) Representación logarítmica de la serie temporal de PST 1998-2003 en la estación de El Río, donde se indica el nivel umbral de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.3.2. RELACIÓN PM10/PST

Los límites de concentración anual de partículas y número máximo de días de superación de un límite diario de concentración establecidos por la normativa europea 1999/30/CE, se refieren a valores de concentración de PM10. Para abordar el estudio del grado de cumplimiento de esta normativa en Canarias a partir de datos registrados en la estación de El Río, necesitamos encontrar la relación PM10/PST en las islas, ya que la serie de datos de El Río es de concentraciones de PST.

Calculando el valor promedio de la serie de datos horarios del cociente PM10/PST comprendidos entre el 17 de Marzo de 2003 y el 22 de Junio de 2005 en la estación que el Observatorio Atmosférico de Izaña (INM) posee en Santa Cruz de Tenerife (Figura 3.9), a 52 m.s.n.m., encontramos un valor promedio de $PM10/PST = 0.42 \pm 0.1$. Si calculamos este cociente tomando únicamente los días de intrusión de polvo africano en Santa Cruz de Tenerife, encontramos exactamente el mismo valor. Este valor es significativamente inferior a los encontrados en estaciones europeas, entre 0.8 y 0.9 en Suiza, 0.9 en Austria y 0.64 en Italia (EMPA, 1999; Schneider, 1999; Gehrig y Hofer, 2000; WHO Regional Office for Europe, 2002) e indica que la fracción de material particulado grueso es mayor en la región subtropical Nororiental del Atlántico que en el continente europeo. Este hecho se debe a la cercanía entre África y Canarias que permite que, dado que el tiempo de recorrido de las masas de aire hasta llegar a las islas es menor que la vida media de algunas de las partículas gruesas en la atmósfera, éstas no se depositen a medio camino y lleguen a impactar en los medidores situados en el archipiélago canario. Una elevada carga de aerosol marino en la zona de estudio también puede contribuir a disminuir el valor de este cociente. La relación PM10/PST que se ha encontrado es incluso menor que el $PM10/PST = 0.7$ utilizado en Viana (2003) para Canarias. Por otro lado, nuestro resultado está de acuerdo con el derivado del estudio realizado por Diouri *et al.* (1998) acerca de la distribución del tamaño de partículas de aerosol sobre el NE de Marruecos, que concluye que el máximo de esta distribución para el polvo africano se encuentra alrededor de las 70 μm , partículas estas más gruesas que las de PM10 que generalmente se estudian para caracterizar episodios africanos, por lo que la fracción gruesa es especialmente importante cerca de las zonas fuente como Marruecos.

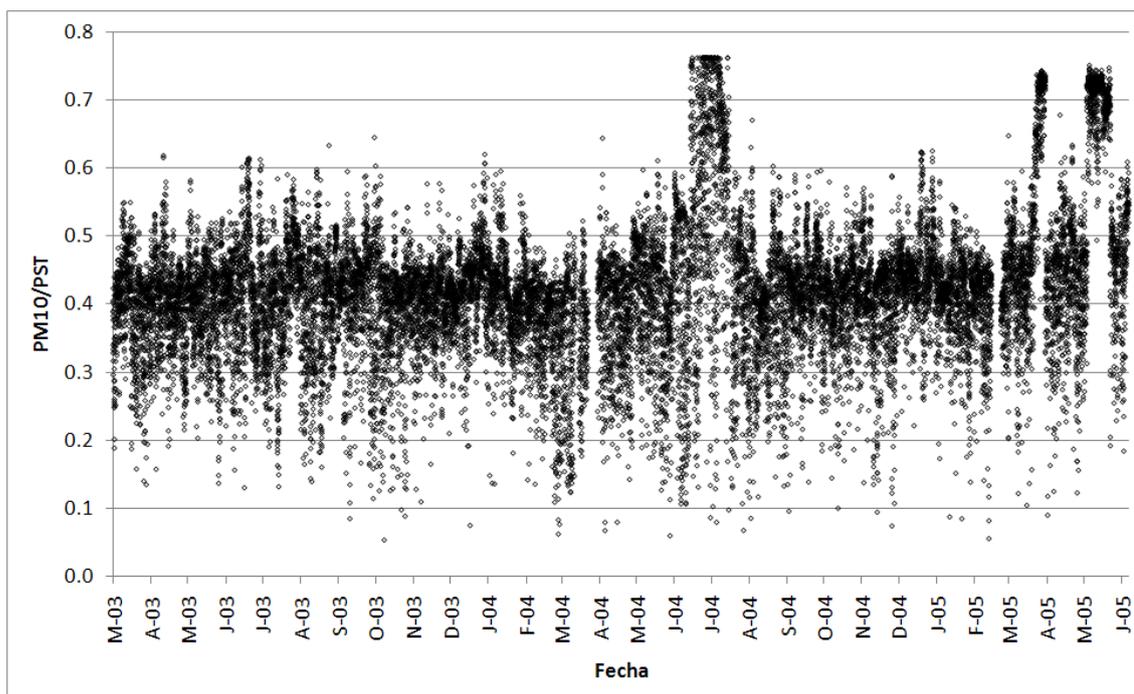


Figura 3.9. Valores horarios de la relación PM10/PST entre el 17 de Marzo de 2003 y el 22 de Junio de 2005.

3.3.3. VARIACIÓN INTERANUAL

Los valores promedio anuales de PST (Figura 3.10) no muestran una tendencia general clara para los seis años de estudio. Estos promedios anuales correlacionan muy bien ($r = 0.97$, para $p < 0.05$) con el número anual de días de intrusión africana ($PST > 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Como muestra la Tabla 3.2, en el año 2000 se registró el record de días de intrusión africana en el periodo de estudio, con un promedio anual de PST de $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante este año se observaron sobre la estación de El Río un número máximo de días de intrusión africana (65 días). El año 2003, con 50 días de episodio africano, también presenta un promedio anual de PST elevado ($24.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respecto a los demás años de la serie. El tercer año destacable en cuanto a promedio anual de concentración de partículas es 1998, con $21.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, ocupando también el tercer puesto de entre los años con mayor número de días de intrusión africana (38 días).

Durante todo el periodo 1998-2003 no se superó en El Río el límite anual de nivel de PM10 establecido por la directiva europea 1999/30/CE a partir del año 2005 en cuanto a los límites de media anual de PM10 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y número máximo de días de superación del límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=35$ días/año).

En cuanto a los valores límite indicativos que se habían fijado (y finalmente no entraron en vigor) para fechas a partir del año 2010, el número máximo de días de superación del límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 ($n=7$) se superarían en algunos casos, no así el límite promedio anual de PM10 = $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En concreto, el número de días de superación del límite diario se sobrepasarían en 2 de los 6 años del periodo estudiado, cumpliéndose este punto de la directiva durante los años 1999, 2001, 2002 y 2003.

Tabla 3.2. Promedio anual de PST y de PM10, número de días de intrusión y número de días de superación del límite establecido por la normativa europea 1999/30/CE. valor de PM10 calculado a partir de $\text{PM10}/\text{PST} = 0.4$

Año	PST	PM10*	Nº días PST > $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Nº días PM10* > $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
1998	21.7	9.8	38	9
1999	17.8	8.0	34	3
2000	29.3	13.2	65	19
2001	18.4	8.3	33	3
2002	17.81	8.0	36	4
2003	24.5	11.0	50	6

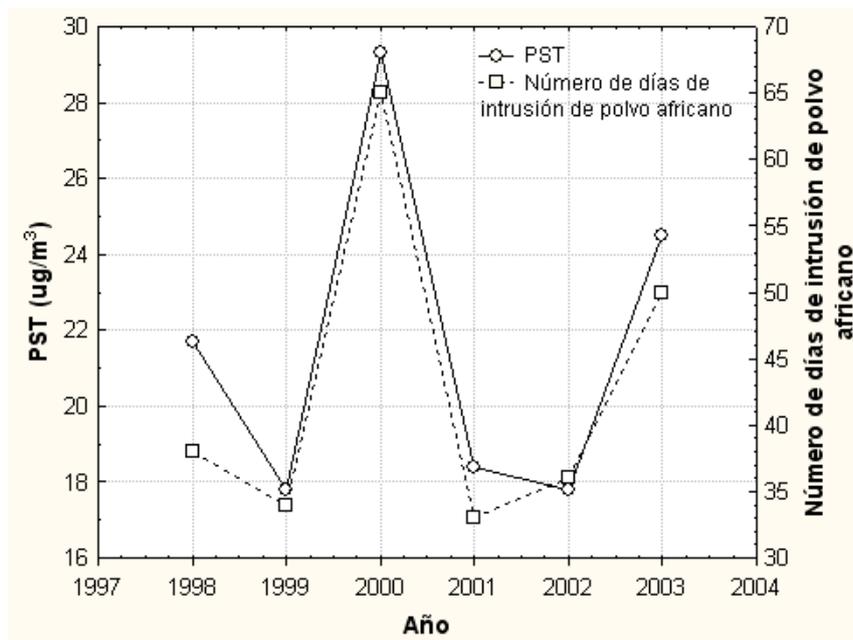


Figura 3.10. Promedios anuales de niveles de PST y número de días de intrusión de polvo africano (PST > 29 µg/m³).

La serie 1998-2003 de promedios mensuales de PST (Figura 3.11a) muestra máximos muy pronunciados en los meses de Febrero de 1998 y Marzo de 2000. En general, aunque no se den necesariamente incrementos tan grandes como en 1998 y 2000, los meses de Enero, Febrero y Marzo son los que presentan los niveles máximos de concentración de partículas totales cada año. En nuestra serie encontramos una excepción a esta observación en el año 1999, donde no se produjeron incrementos considerables de concentración de PST durante los meses de invierno.

En el año 2003 encontramos que, aunque las concentraciones medias aumentaron de Enero a Marzo, los niveles promedio en verano son bastante mayores que en invierno, situación anormal si tenemos en cuenta que en el resto de los años se producen máximos secundarios en verano, pero nunca principales como sucede en este año. Esta anomalía en la frecuencia e impacto a nivel de superficie de los episodios africanos durante el verano de 2003 pudo ser probablemente el resultado de la combinación de un número alto de días de intrusión de masas de aire africano (más de 10) y una altura del límite superior de la capa de inversión térmica (TWI) anormalmente baja durante todo el verano (Figura 3.12). La TWI actuó como barrera para las masas de aire, con lo que este descenso de la altura de la TWI provocó que las intrusiones de verano de 2003 no se limitaran a afectar a

medianías y cumbres de las islas. Durante 9 días del verano de 2003 la estación de El Río se encontraba por debajo de la altura de la TWI, bajo el impacto de las intrusiones de masas de aire africano.

En el caso de la serie de número de días de superación del valor límite diario de PM10 establecido por la directiva 1999/30/CE (Figura 3.11b), aunque la variabilidad es mayor debido a que en este caso no representamos valores medios, encontramos que este límite en general es superado más ampliamente durante los meses de invierno. Encontramos excepciones a esta tendencia en los años 1999 y 2003, donde podemos observar que el citado valor límite se hubiera superó un número mayor de veces durante los meses de verano y otoño que durante los meses de invierno.

La serie del número de días de invasión de material particulado en la estación de El Río, es decir, la del número de días de superación del umbral de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST, sigue muy aproximadamente el perfil de aumentos y disminuciones de los niveles medios de PST (Figura 3.11b). Encontramos así que se los meses en que se produjeron más días de episodio africano fueron los de invierno en los años 1998, 2000 y 2002, mientras que durante los años 1999 y 2001 el máximo número de días de episodio correspondió a meses de otoño. Durante 2003 se produjeron igual número de días de intrusión durante los meses de verano que durante todo el resto del año.

En la Figura 3.11 se pueden observar casos en los que el número de días de intrusión de masas de aire africano en la estación que estamos caracterizando es mayor que cero, pero el número de días de superación del valor límite diario de PM10 establecido por la normativa 1999/30/CE es nulo. Esto es debido a que durante esos meses tuvieron lugar algunos días de intrusión poco intensa cuyo impacto no ocasionó que se superara el nivel de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10 promedio diario. En general estos meses coinciden con los de niveles de PST más bajos para cada año en la Figura 3.11a.

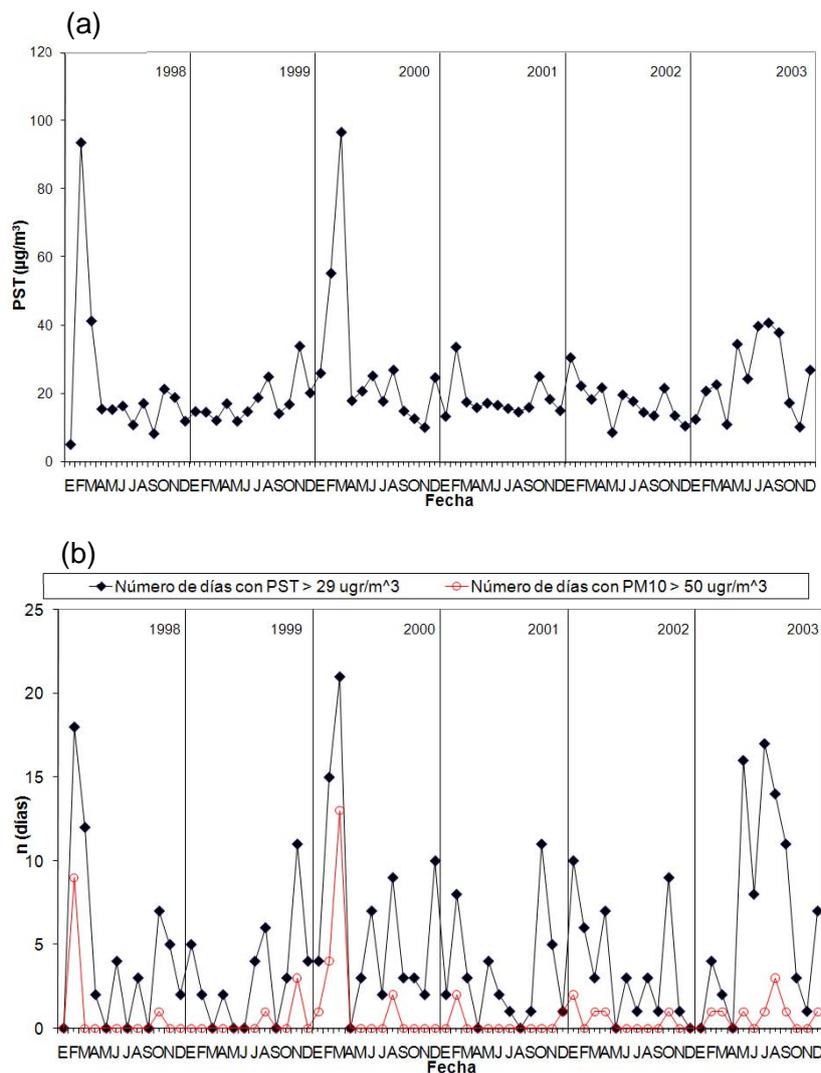


Figura 3.11. (a) Variación interanual (1998-2003) de los promedios mensuales de PST y (b) variación interanual (1998-2003) del número de días de intrusión ($PST > 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y del número de superaciones (n) del valor límite diario establecido por la Directiva Europea 1999/30/CE.

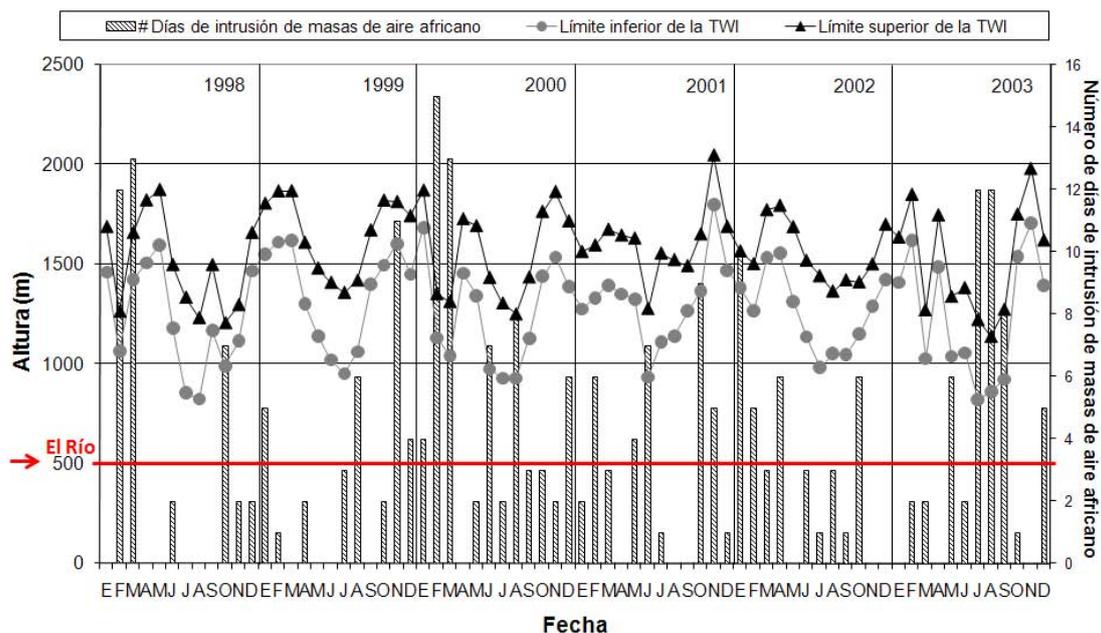


Figura 3.12. Promedio mensual de la altura (a las 12 GMT) de la capa de inversión térmica asociada a los vientos alisios (TWI). Se muestran la base (círculos) y tope (triángulos) de la TWI para el periodo 1998-2003 en Tenerife (eje Y-izquierda). También se muestra el promedio mensual del número de días de intrusión africana (eje Y-derecha), calculada a partir del método objetivo (descrito en la sección 3.2.3). Se indica el nivel de altura de la estación de El Río.

3.3.4. VARIACIÓN ESTACIONAL

La Figura 3.13, muestra los promedios mensuales de niveles de PST para el periodo 1998-2003, así como el promedio mensual del número de días de intrusión de masas de aire africano para el mismo periodo. Es notable la evidencia de un patrón bimodal en la variabilidad estacional de las concentraciones de PST. El máximo principal corresponde a Febrero y Marzo, en buen acuerdo con el máximo principal de los promedios mensuales del número de días con aporte de material particulado africano. Se observa además un máximo secundario en agosto. Este máximo secundario también coincide con el máximo secundario de la serie de promedios mensuales del número de días de intrusión de polvo africano. Existe una buena correlación entre ambas series, con un coeficiente de correlación $r = 0.88$ ($p < 0.05$).

Durante los demás meses del año los niveles medios de PST se mantuvieron relativamente constantes, destacando únicamente el máximo secundario que tiene

lugar en Agosto, que coincide también con un incremento del número de días de intrusión respecto a los meses anteriores. El mes de Noviembre, a pesar de presentar niveles medios inferiores a los de Agosto, registró un número de días de intrusión ligeramente superior. Este hecho es debido a que estos episodios africanos fueron lo suficientemente débiles como para no elevar el promedio mensual de concentración de PST por encima del registrado para Agosto.

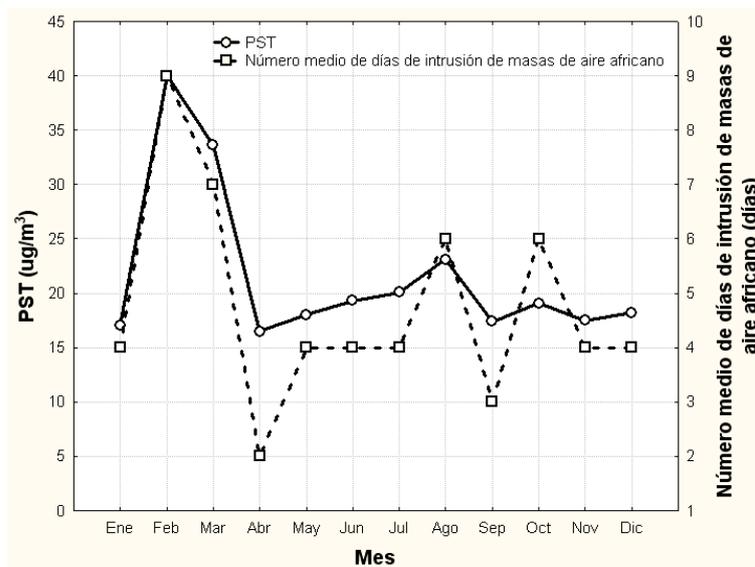


Figura 3.13. Promedios mensuales de niveles de PST en la estación de El Río y número medio de días de intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano observados en esta estación durante el periodo 1998-2003.

En cuanto a la media del hipotético número de superaciones del valor límite diario de PM10 propuesto por la normativa 1999/30/CE a partir de 2005, tomando valores de PM10 calculados a partir de PST usando la relación $PM10/PST = 0.4$ (Tabla 3.3), encontramos valores máximos en los meses de Febrero y Marzo y un máximo secundario en Agosto. Esta gráfica también nos ayuda a comprender qué ocurre en los meses de Octubre: tienen lugar más intrusiones que en Agosto, pero el número de superaciones del límite de $50 \mu g/m^3$ de PM10 es mucho menor, lo que nos lleva a concluir de nuevo que en Octubre suelen ocurrir muchos días de intrusión pero los niveles alcanzados no son muy elevados.

Tabla 3.3. Promedio mensual de niveles de PST, número medio de días con aporte de polvo mineral africano y número medio de días de superación del valor límite diario de PM10 establecido por la normativa europea 1999/30/CE a partir de 2005. * Valor de PM10 calculado a partir de $PM10/PST = 0.4$. Periodo 1998-2003.

Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nº días PST > 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nº días PM10* > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Nº días PST > 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nº días PM10* > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ene	17.0	4	1	Jul	20.1	4	0
Feb	40.0	9	3	Ago	23.1	6	1
Mar	33.6	7	3	Sep	17.4	3	0
Abr	16.5	2	0	Oct	19.1	6	0
May	18.0	4	0	Nov	17.5	4	0
Jun	19.3	4	0	Dic	18.2	4	0

3.3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS NIVELES DE FONDO E IMPACTO DEL APORTE DE POLVO AFRICANO EN LOS NIVELES DE PST REGISTRADOS EN UNA ESTACIÓN DE FONDO REGIONAL DE CANARIAS

Los índices de africanidad, que han sido definidos en la sección 3.4.1 nos sirven para contabilizar el porcentaje de tiempo que las masas de aire permanecen en los sectores Sahara y Sahel antes de llegar a las islas Canarias, considerando diferentes alturas de llegada y diferentes rangos de altura durante el viaje. Además de servirnos para el estudio de la variabilidad temporal del transporte de masas de aire africano a Canarias, esta herramienta es útil para identificar tipos de episodios, pudiendo así distinguir días libres de aporte de polvo africano, días de intrusión de masas de aire africano con llegada directa a la estación de estudio, o días en los que la intrusión únicamente tiene lugar en niveles de medianías y/o altura.

3.3.5.1. Niveles de fondo regional de PST: métodos subjetivo y objetivo

El análisis de la serie 1998-2003 de concentraciones de PST en la estación de El Río da un promedio total de $21.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Si tenemos en cuenta que la estación de El Río es una estación de fondo regional atlántico (alejada de emisiones directas de origen antropogénico), y por lo tanto en ausencia de episodios africanos, es esperable registrar niveles de fondo relativamente bajos (únicamente afectados por los aportes de aerosol atlántico y bajos niveles de PM antropogénico transportado a media y larga distancia). Así pues, los niveles de fondo regional se han deducido a partir de la media de los días no africanos, tanto con los métodos objetivo como subjetivo anteriormente descritos (ver sección 3.2).

Para el método objetivo se ha obtenido el fondo de PST promediando medias diarias de PST para aquellos días con índices de africanidad nulos para las tres altitudes finales (200, 1500 y 2400 m.s.n.m). El promedio mensual del fondo de PST obtenido para el periodo 1998-2003 con los dos métodos se muestra en la Figura 3.14. El promedio de las concentraciones de fondo de PST para el periodo total es de $13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el método subjetivo y de $14.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el método objetivo. Los resultados obtenidos a partir de cada uno de los métodos están en buen acuerdo.

Puede observarse que los niveles de fondo de PST son aproximadamente constantes a lo largo del año con los dos métodos, y que se encuentra más dispersión en los datos a partir del método objetivo.

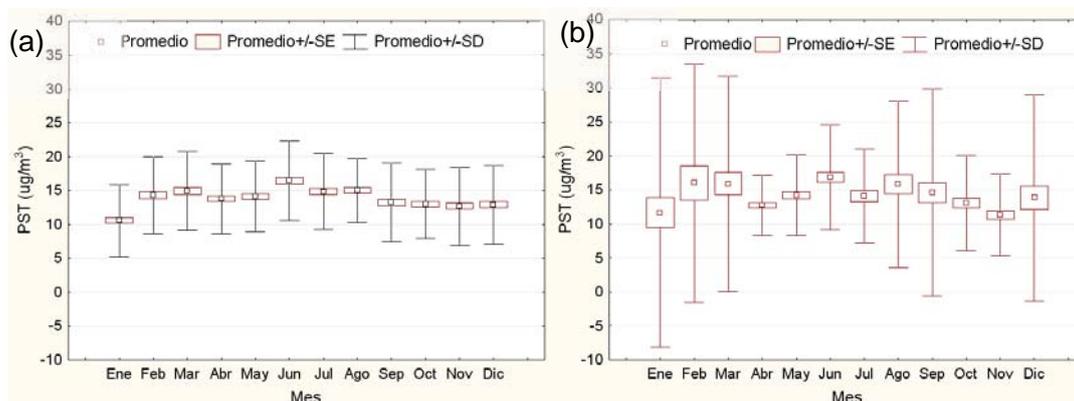


Figura 3.14. Promedio mensual de los niveles de fondo de PST en la estación de El Río calculados con el método subjetivo (a) y con el método objetivo (b). SE = Error estándar. SD = Desviación estándar.

Esta dispersión se debe a que a partir del método objetivo se identificaron días no africanos con promedio diario de PST superior al umbral de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, llegando a alcanzar máximos de $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Aunque estos valores son mayores que aquellos obtenidos como promedio de PST a partir de todos los días de intrusión directa de polvo africano en la estación de El Río, pueden ser explicados por dos tipos de episodios a los que llamaremos “episodios de transición” y “episodios de retorno de masas de aire africano”.

Los episodios de transición (Figuras 3.15a y 3.15b) ocurren justo después de una intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano, cuando una masa de aire “limpia”, por ejemplo de origen Noratlántico, reemplaza a la masa de aire africano que previamente afectó a la zona de estudio, pero la atmósfera todavía no se ha limpiado completamente de aerosoles. El ejemplo de la Figura 3.15a ilustra un episodio de transición ocurrido el 15 de Febrero de 1998. El promedio diario de PST durante para ese día fue de $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de El Río y el Aerosol Index del TOMS confirma la presencia de polvo sobre las islas Canarias debido a una intrusión de polvo sahariano ocurrida en días previos. Como puede observarse en el cálculo de retrotrayectorias, las masas de aire no pasaron el día 15 de febrero de 1998 sobre África o sobre cualquier otra región con alta carga de polvo.

El retorno de masas de aire africano (Figura 3.15b) ocurre cuando una pluma de polvo africano ha viajado hacia el Oeste sobre el océano durante los días previos y luego retorna hacia las islas Canarias debido a un flujo del Oeste. Un claro ejemplo es el episodio ocurrido el 16 de Septiembre de 2003, mostrado en las Figuras 3.15b y 3.16b. Después de una intrusión directa de polvo africano sobre las islas Canarias se formó un arco de polvo sobre el océano Atlántico. Para el 16 de septiembre de 2003, las retrotrayectorias indican que se produjo transporte de polvo desde áreas con alta carga de material particulado localizadas en el océano Atlántico, como muestra el mapa de Aerosol Index del TOMS. Durante este día se registró un promedio diario de PST de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de El Río.

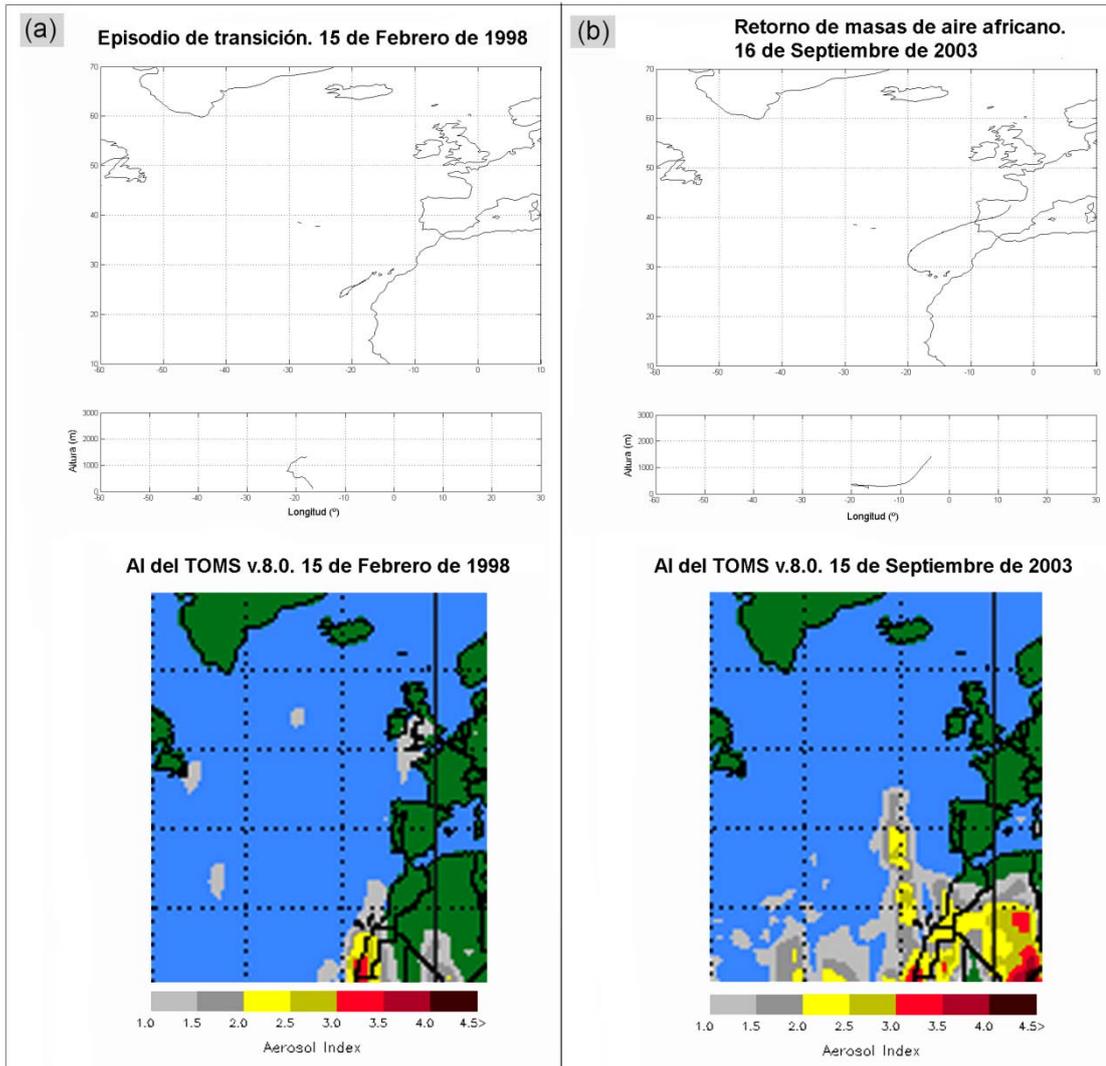


Figura 3.15. Retrotrayectorias HYSPLIT y mapas de índice AI del TOMS para (a) un episodio de transición en ER y (b) un episodio de alta concentración de polvo en El Río debido al retorno de masas de aire africano.

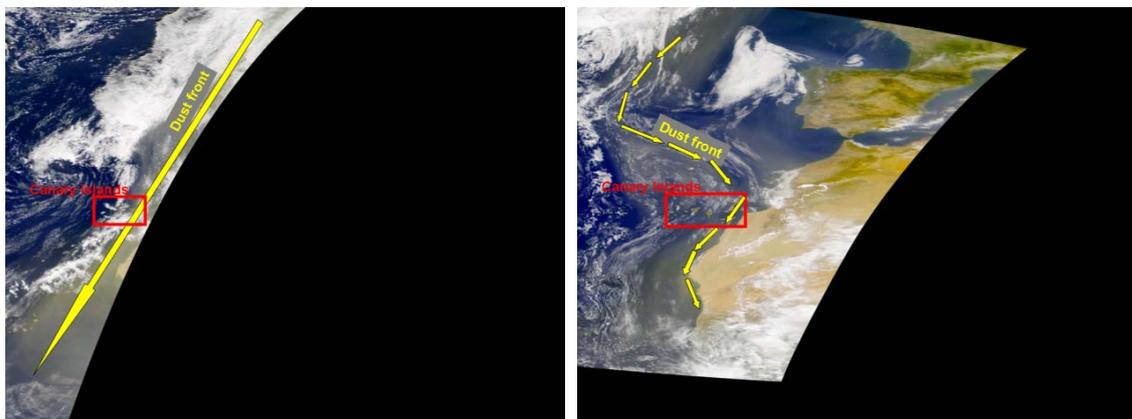


Figura 3.16. Imágenes de satélite (SeaWiFS) para los episodios del día 15 de Febrero de 1998 (izquierda) y 16 de Septiembre de 2003 (derecha). Con flechas amarillas se muestra el trazado del frente de polvo visible en las imágenes. En el rectángulo rojo se muestra la posición de las islas Canarias.

En ambos casos se registraron altas concentraciones de aerosol mineral en la estación de El Río mientras los valores de AFI eran nulos. Es precisamente por esta razón que los errores son mayores en el método objetivo (Figura 3.14b) que en el subjetivo (Figura 3.14a). Los episodios de transición y los episodios de retorno de masas de aire africano incrementan la dispersión del promedio mensual de PST para días con índices de africanidad nulos, principalmente en Enero, Febrero, Marzo, Agosto, Septiembre y Diciembre.

3.3.5.2. Niveles de PST en una estación de fondo regional de Canarias durante episodios de intrusión de masas de aire africano

En la Figura 3.17 se muestran las medias mensuales de los niveles de PST para los días con aporte de polvo africano identificados a partir del cálculo de los índices de africanidad. Aunque esta gráfica muestra los valores más altos de concentración durante los meses de invierno, llama la atención que el promedio mensual para el mes de Marzo sea mayor que para el mes de Febrero, justo al contrario que lo mostrado en la Figura 3.13. Esta diferencia se debe a que, como en el análisis objetivo hemos tenido en cuenta las masas de aire que llegan a cualquier nivel (y no solo las que llegan a 200 m como hacíamos en el análisis subjetivo), algunas medias se incrementan por aportes de partículas procedentes de alturas atmosféricas superiores por vía de deposición gravitacional. Podemos concluir entonces que, independientemente de que se produzcan episodios directos a nivel de superficie, en los meses de Marzo las intrusiones a niveles medios y altos tienen un importante impacto en ese nivel debido a los fenómenos de deposición gravitacional.

El promedio total de las concentraciones de PST para todos los días de intrusión a cualquier nivel es de $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este resultado es muy similar al mismo promedio calculado para los días de episodio africano identificados por interpretación subjetiva de retrotrayectorias, análisis de mapas de concentración de polvo, imágenes de satélite, etc., que resultó ser de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y que tomamos como umbral de concentración mínima de PST para la identificación de episodios africanos en la estación de El Río. Este umbral está, por lo tanto, calculado por dos métodos completamente diferentes que dan prácticamente el mismo resultado, lo que nos

indica que la identificación subjetiva que realizamos en un primer momento es correcta, y la decisión de descartar los días en que las masas de aire provinieron de África pero los niveles de partículas eran muy bajos fue acertada, ya que esos días prácticamente no afectan a la media total.

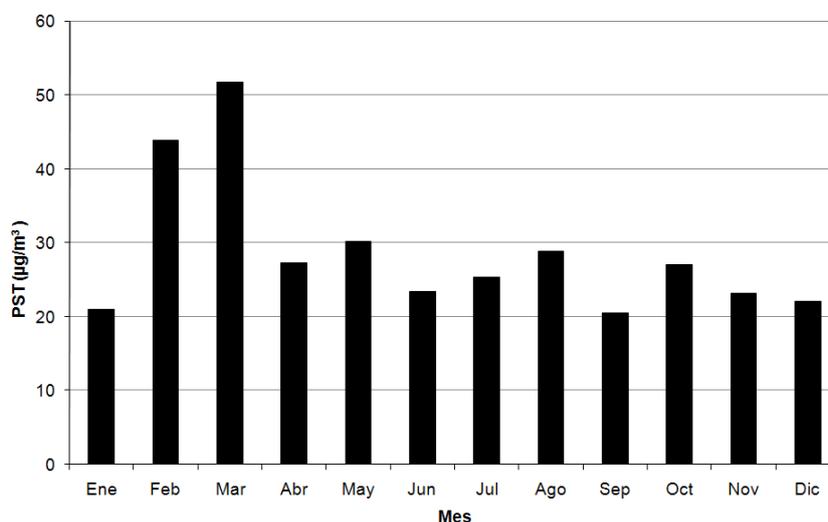


Figura 3.17. Promedios mensuales de niveles de PST para los días en los que alguno de los índices de africanidad es mayor que cero.

Tabla 3.4. Promedio mensual de niveles de PST medidos en la estación de El Río para días con algún índice de africanidad mayor que cero del periodo 1998-2003.

Mes	PST (µg/m³)	Mes	PST (µg/m³)
Enero	21.0	Julio	25.3
Febrero	43.9	Agosto	28.8
Marzo	51.8	Septiembre	20.4
Abril	27.3	Octubre	27.1
Mayo	30.2	Noviembre	23.1
Junio	23.4	Diciembre	22.1

En la Tabla 3.4 se muestran los valores promedio mensuales de niveles de PST para los días de intrusión de masas de aire africano identificadas por el análisis matemático de la serie de índices de africanidad para el periodo 1998-2003. Si

comparamos los valores de la Tabla 3.3 con los de esta última, encontramos que ahora los promedios tienen valores mayores en todos los casos. Esto es debido, como se comentó anteriormente, al hecho de haber considerado esta vez todas las masas de aire, independientemente de su altura de transporte y de llegada, que parten de las zonas Sahara y Sahel y llegan a Canarias. Se tienen así en cuenta tanto los aportes por deposición gravitacional como los directos y no se excluyen del cálculo los días en los que no se produjo intrusión de masas de aire africano.

3.3.5.3. Variabilidad de los niveles de fondo regional

Una vez identificados todos los días con aporte de polvo africano, sin discriminar el número de horas de permanencia de las masas de aire en el continente africano, extraemos del periodo 1998-2003 dichos días para separar los días sin influencia africana. Calculando los promedios mensuales de los niveles de PST de estos días con ausencia de intrusión africana (Tabla 3.5), podemos evaluar la variación de los niveles de fondo regional a lo largo del año.

En la Figura 3.18 puede observarse que no existe una clara estacionalidad en los promedios mensuales de PST para los días sin aporte de masas de aire africano. Los valores de fondo varían muy poco a lo largo del año y tienen un valor promedio de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este sería el valor de concentración de PST que se podría registrar en cualquier época del año en la estación del Río debido a la suma de las contribuciones antropogénicas, recirculación de polvo con origen en las propias islas, aerosol marino y combustión de biomasa, entre otros.

Tabla 3.5. Promedio mensual de niveles de PST para días con todos los índices de africanidad nulos del periodo 1998-2003.

Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Enero	11.7	Julio	14.1
Febrero	16.0	Agosto	15.8
Marzo	15.9	Septiembre	14.6
Abril	12.7	Octubre	13.1
Mayo	14.2	Noviembre	11.3
Junio	16.8	Diciembre	13.8

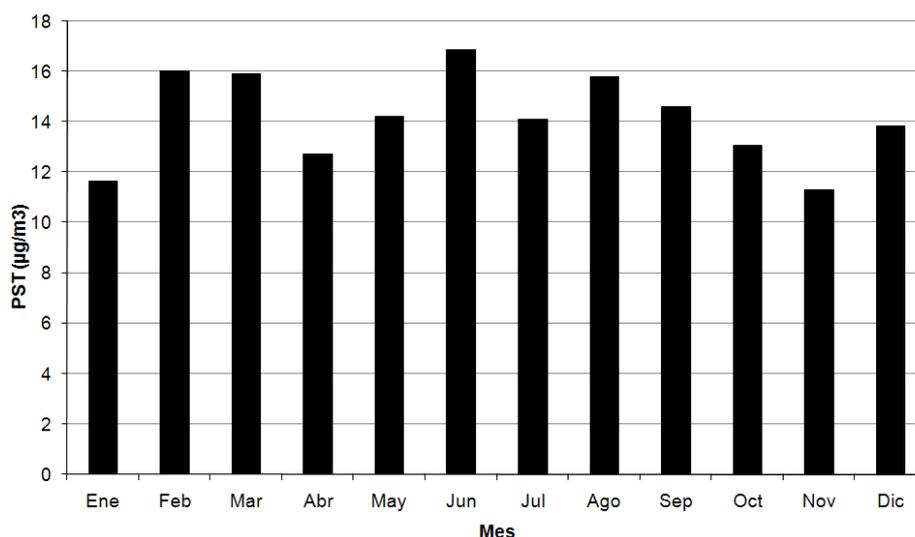


Figura 3.18. Promedios mensuales de niveles de PST para los días en los que todos los índices de africanidad son nulos.

Los valores de fondo se ven ligeramente incrementados o disminuidos debido a la variabilidad de las emisiones de aerosoles desde fuentes ajenas al material particulado africano, tales como el aerosol marino. La concentración de aerosol marino presenta correlación positiva con la velocidad del viento, aunque presenta muy poca variabilidad a lo largo del año (McGovern *et al.*, 2002). Es precisamente en verano, cuando el alisio sopla con mayor frecuencia e intensidad en Canarias (Rodríguez y Guerra, 2001), donde se encuentra el máximo nivel de PST de fondo

(Figura 3.18). Podemos deducir, por lo tanto, que en verano (y más concretamente en Junio) puede haber un mayor aporte de aerosol marino, aunque en la Figura 3.18 podemos ver que la diferencia del nivel promedio de PST en Junio respecto a la de otros meses es como máximo de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En todo caso, es posible que la pequeña variabilidad de los niveles de fondo de PST en la estación de El Río esté dominada por la variabilidad en los aportes de aerosol marino.

Durante los días de intrusión, el aporte de partículas minerales africanas a los niveles de PST se suma a la del fondo, elevando así la concentración total registrada por los instrumentos de medida. Para averiguar en qué grado afectan las intrusiones africanas al nivel total de partículas, es decir, qué concentración de partículas proviene directamente de África, restamos los valores de PST de los días no afectados por aportes africanos a la serie de valores de PST de los días de intrusión en cualquier nivel. En la Tabla 3.6 se encuentran los valores obtenidos y se representan gráficamente en la Figura 3.19.

Tabla 3.6. Promedio mensual de la contribución de las intrusiones africanas durante días de intrusión a la concentración de partículas registrado en la estación de El Río para el período 1998-2003.

Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Enero	9.3	Julio	11.2
Febrero	27.9	Agosto	13.0
Marzo	35.9	Septiembre	5.8
Abril	14.6	Octubre	14.0
Mayo	16.0	Noviembre	11.8
Junio	6.5	Diciembre	8.2

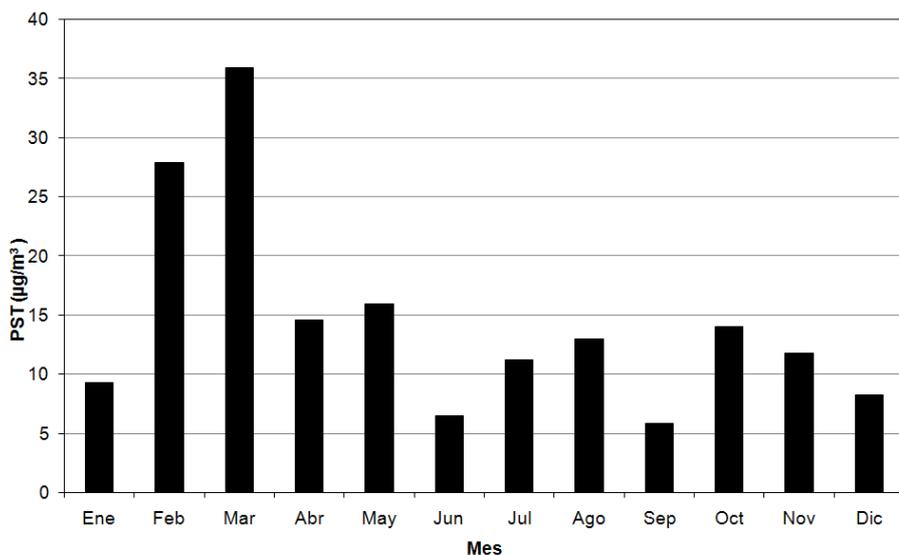


Figura 3.19. Promedios mensuales de contribución africana a los niveles de PST para los días del periodo 1998-2003 en los que tiene lugar intrusión de masas de aire africano.

La mayor contribución del material crustal africano a las concentraciones de PST durante episodios africanos en la estación de El Río tiene lugar en el mes de Marzo, seguido del mes de Febrero. Las mayores contribuciones se dan en los meses de invierno y primavera. En verano, la contribución africana máxima tiene lugar en el mes de Agosto.

Durante los meses de Diciembre, Enero, Junio, Julio, Agosto y Septiembre las intrusiones africanas contribuyen a la concentración media mensual de PST con valores menores que las de fondo.

3.3.6. CONTRIBUCIÓN DE LA DEPOSICIÓN GRAVITACIONAL EN EPISODIOS AFRICANOS EN ALTURA EN LOS NIVELES DE PST EN UNA ESTACIÓN DE FONDO REGIONAL DE CANARIAS

Pudiendo identificar mediante los valores de índices de africanidad aquellos días en los que se produjeron intrusiones de masas de aire africano en Canarias a diferentes alturas, se seleccionaron las fechas en las estas masas de aire no llegaron directamente a nivel de superficie pero sí a 1500 y 2000 m de altura. Para estos días podemos asumir que las concentraciones de PST registradas fueron la suma de las concentraciones de fondo más las debidas a deposición gravitacional

desde niveles medios y altos. En la Figura 3.20 se muestra la variación estacional de los promedios mensuales de número de días en los que podría haber tenido lugar esta situación. Puede observarse que el mayor número de días en los que puede producirse deposición gravitacional, sin tener además aporte directo a nivel de superficie, se da durante los meses de verano. De entre los meses con mayor concentración de PST en la estación de El Río, es el mes de Marzo el que en promedio presenta mayor número de días en los que potencialmente puede haber aporte de partículas africanas únicamente por deposición gravitacional, conclusión a la que se llegó ya en la sección 3.3.5.2. Hablamos del potencial cumplimiento de esta situación (y no de cumplimiento seguro) porque, aunque los índices de africanidad indiquen que pueda producirse deposición gravitacional, pueden haber ocurrido fenómenos de deposición húmeda y/o es posible que el tamaño de las partículas transportadas desde África no sea el apropiado para la sedimentación del material.

En la Figura 3.21, donde se representa la variación interanual del número de días en que tuvieron lugar intrusiones en medianías y altura, pero no en superficie, queda patente que durante el verano de 2003 los episodios de deposición gravitacional pudieron contribuir a los niveles especialmente altos de PST mostrados en las Figuras 3.8 y 3.11a, cuya principal causa fue explicada en la sección 3.3.3.

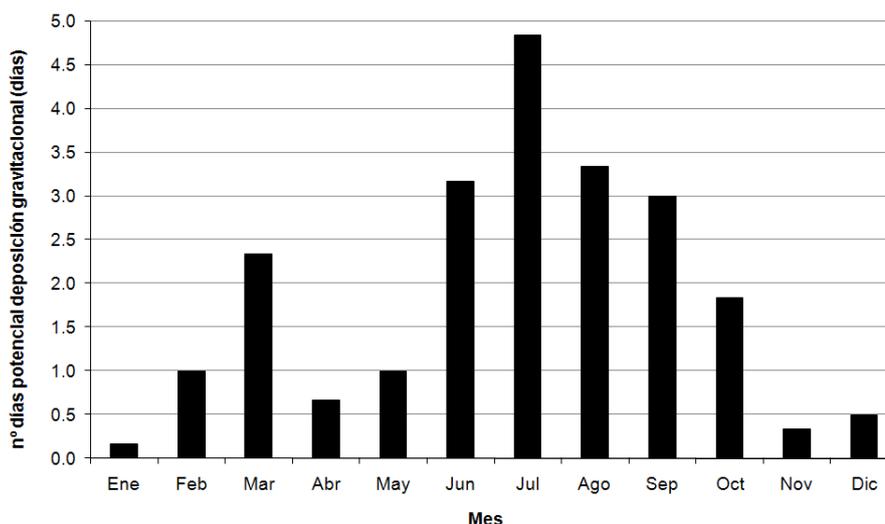


Figura 3.20. Variación estacional del número de días promedio en los que los niveles de PST en El Río podrían haberse elevado respecto a los valores de fondo debido únicamente a deposición gravitacional desde niveles medios y altos.

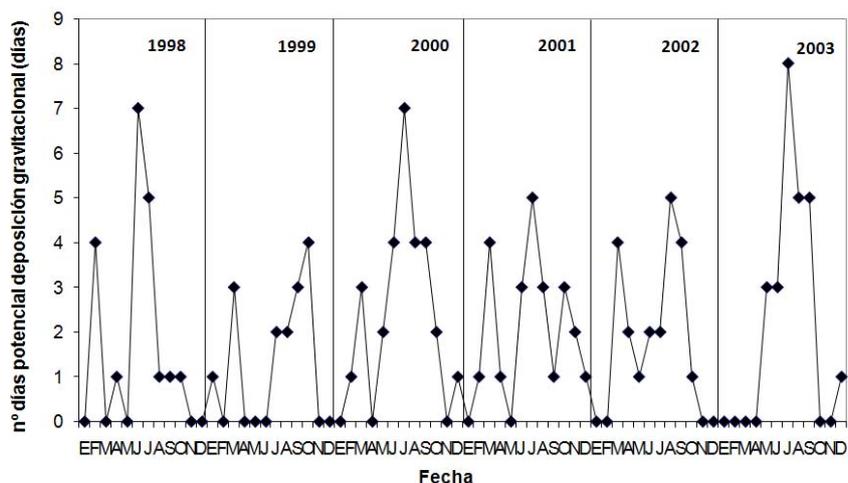


Figura 3.21. Variación interanual del número mensual promedio de días en los que los niveles de PST en El Río podría haberse elevado debido únicamente a deposición gravitacional.

La Tabla 3.7 y la Figura 3.22 muestran la estimación de la contribución de la deposición gravitacional a los niveles de PST medidos en la Estación de El Río ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los días en que potencialmente la deposición desde niveles medios y altos es la única responsable de elevar los niveles de PST respecto a las concentraciones de fondo. Estas concentraciones se han calculado mediante la diferencia entre los valores promedio mensuales de PST para días con intrusión solo en medianías y/o altura y los valores promedios mensuales de PST para días sin influencia africana (Tabla 3.5). La contribución es nula para los meses en que el promedio de días en los que el único aporte de partículas africanas posible es por deposición gravitacional resultó menor que 1, ya que los aislados episodios de deposición gravitacional no son representativos de ese mes. Puede observarse que la deposición gravitacional es más intensa durante el mes de Marzo, cuando aporta en promedio más de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PST. Durante los meses de verano la deposición gravitacional desde niveles medios y altos también es importante, sobre todo en los meses de Agosto y Julio. En Septiembre y Octubre la concentraciones de PST debidos a deposición gravitacional descienden un orden de magnitud. Durante los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Abril no existe una contribución representativa de la deposición gravitacional desde niveles medios y altos a la concentración de PST registrada.

Tabla 3.7. Estimación del promedio mensual de niveles de PST debido únicamente a deposición gravitacional desde niveles medios y altos registrado en la estación de El Río.

Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mes	PST ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Enero	0	Julio	17.3
Febrero	15.3	Agosto	22.4
Marzo	30.5	Septiembre	6.6
Abril	0	Octubre	5.3
Mayo	3.1	Noviembre	0
Junio	11.2	Diciembre	0

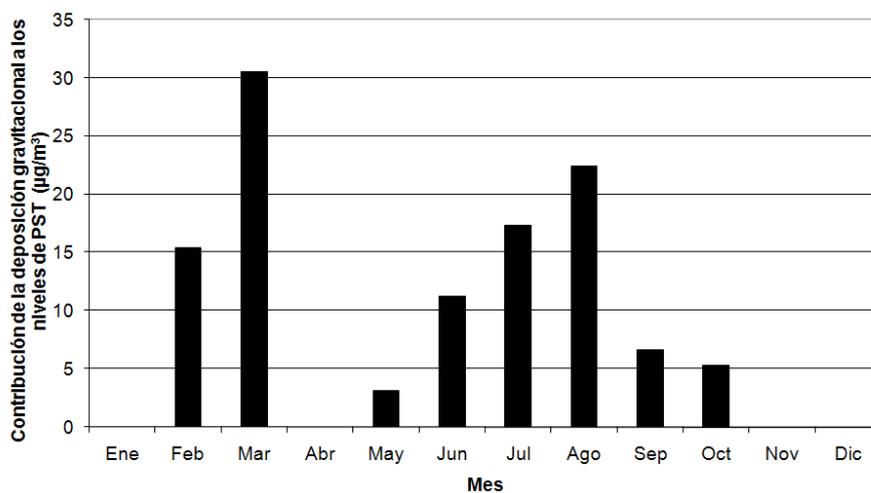


Figura 3.22. Estimación de la contribución mensual de la deposición gravitacional desde niveles medios y altos a los niveles de PST registrados en la estación de El Río.

CAPÍTULO 4

Identificación de áreas fuente de polvo africano para Canarias

4. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS FUENTE DE POLVO AFRICANO PARA CANARIAS

4.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

4.1.1. MECANISMOS DE INYECCIÓN DE POLVO MINERAL EN LA ATMÓSFERA Y ÁREAS FUENTE A ESCALA GLOBAL

El polvo mineral asociado a las intrusiones de material particulado crustal se genera en zonas áridas e hiperáridas del planeta, donde el suelo es fácilmente erosionable por la acción del viento. La erosión está controlada principalmente por el tipo de suelo, su humedad, el tipo de cubierta vegetal y la turbulencia atmosférica en la superficie (Nickovic *et al.*, 2001). Estas zonas suelen estar asociadas a bajas topográficas o situadas en las cercanías de montañas y tierras altas, en las que la erosión causada por el agua en épocas de lluvias torrenciales ha jugado un papel tan importante que el material que compone el suelo es lo suficientemente fino para que, bajo determinadas condiciones, pueda ser elevado a las altas capas de la atmósfera (Prospero, 1999). Los escenarios propicios para que esto ocurra son (Querol *et. al.*, 2002):

- Tasa de precipitaciones muy baja, de hasta 2 de cada 1000 días en zonas de desierto absoluto como ocurre en el sector Este del desierto del Sahara (Dubief, 1977)
- Humedad relativa extremadamente baja (~10%)
- Temperaturas estivales muy altas (60-65 °C)

En zonas donde se cumplan estas condiciones, siempre que el viento alcance una velocidad umbral que depende del tipo de suelo y de las características del material sedimentado (tamaño de las partículas, composición y contenido de la mezcla y propiedades aerodinámicas de la superficie), las partículas se elevarán del suelo. Esta velocidad umbral cambia por lo tanto según la zona, y además en una misma

zona puede cambiar con el tiempo. El valor medio encontrado en el Sahara occidental es de 10.5 m s⁻¹. (Helgren y Prospero, 1987).

Hay que tener en cuenta que el término “velocidad umbral” que hemos definido difiere del que se define en estudios micrometeorológicos de deflación del suelo, donde se utiliza en términos de la velocidad de fricción del suelo (Greeley e Iverson, 1985). La deflación (derivada del latín “soplar”) es un proceso que actúa sobre la superficie del terreno cuando éste se encuentra completamente seco y recubierto de pequeños granos de arena sueltos procedentes de la meteorización de la roca o previamente depositados por el agua en movimiento, el hielo o las olas. Es por ello que las zonas más susceptibles de sufrir deflación, que es un proceso selectivo, son los cursos de los ríos secos, las playas y las áreas recientemente cubiertas por depósitos glaciares.

Una vez resuspendidas, las partículas pueden ser transportadas verticalmente alcanzando la troposfera libre, debido a las turbulencias térmicas que se producen durante las horas de insolación, a causa del fuerte calentamiento de la superficie (Figura 4.1).

Durante la noche se produce una inversión térmica. La alternancia entre calentamiento y enfriamiento de la superficie durante la totalidad del día lleva a que las partículas que se encuentran en altas capas de la atmósfera no puedan sedimentar y puedan ser transportadas a distancias alejadas de estas zonas fuente.

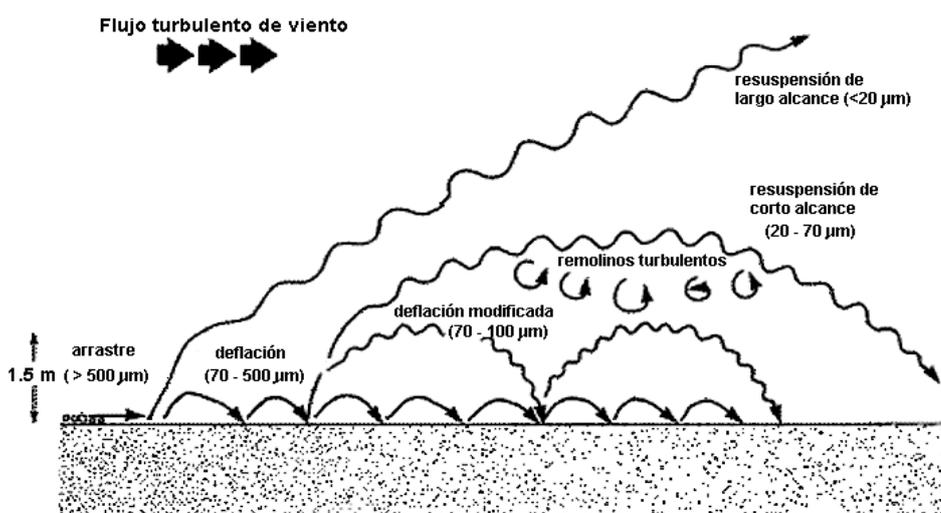


Figura 4.1. Diagrama del proceso de inyección del polvo en la atmósfera (adaptado de Pye, 1987).

Para identificar las zonas fuente de material mineral, antiguamente se utilizaba observaciones esporádicas que relataban los viajeros que pasaban por zonas desérticas o realizadas en diferentes campañas. A raíz de los avances científicos en el campo de los modelos matemáticos de transporte de masas de aire (que nos permiten calcular retrotrayectorias), la instrumentación en estaciones meteorológicas, los modelos de transferencia radiativa y la teledetección por medio de instrumentos a bordo de satélites artificiales, se ha hecho posible el estudio de las áreas en las que se originan los eventos de contaminación por material crustal, así como el seguimiento en el espacio y el tiempo de estos eventos y las características químicas de los aerosoles implicados en ellos, mediante técnicas de fusión de datos (Falke *et al.*, 2001).

Una de las herramientas que actualmente están proporcionando mejores resultados en esta área de estudio es el producto AI (Aerosol Index) del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). El instrumento TOMS, que realiza observaciones en longitudes de onda ultravioleta, ha estado operativo desde 1978 y se utiliza principalmente para el mapeado de ozono.

El AI es un índice semi-cuantitativo de la absorción columnar por aerosoles a 0.34 μm y nos indica la distribución espacial de estos, tanto sobre océanos como sobre tierra firme, incluso sobre desiertos debido a que el albedo en UV en regiones continentales es muy pequeño y relativamente invariante. Los valores positivos de AI indican presencia de aerosoles absorbentes, como pueden ser los debidos a erupciones volcánicas, emisiones por combustión de biomasa o material mineral proveniente de zonas áridas del planeta (Herman *et al.*, 1997). La serie de medidas de AI ha sido corregida recientemente, en su versión 8, de ciertos problemas de calibración. La resolución máxima del instrumento es de 50 x 50 km en el nadir y proporciona una única medida al día.

Una característica muy importante del índice AI del TOMS es que depende, entre otras cosas, de la altitud a la que se encuentren los aerosoles, de manera que se miden valores mayores del índice cuando hay presencia de aerosoles en capas más altas de la atmósfera. Por otro lado, no es capaz de detectar aerosoles que se encuentren situados a una altura inferior a ~500-1000 m (Torres *et al.*, 1998, 2002). Esta limitación ocasiona que el índice AI del TOMS no sea eficaz para estudiar eventos en ciertos meses del año según la zona de estudio. Por ejemplo, en

Canarias no sería eficaz para estudiar los episodios que tienen lugar durante los meses de invierno, cuando el polvo viaja a bajas altitudes, generalmente por debajo de la capa de mezcla.

Los estudios basados en el índice AI del TOMS indican que las fuentes más grandes y persistentes se sitúan en el Hemisferio Norte, principalmente al Norte del paralelo 15 ° N, en un ancho “cinturón de polvo” que se extiende desde la costa Oeste del Norte de África, hacia el Medio Este, Asia Sur y Central y llegando hasta China. Estas zonas están usualmente asociadas a bajas topográficas localizadas en regiones áridas con tasas anuales de precipitación inferiores a 200-250 mm. A pesar de lo que se creía cuando comenzaron a estudiarse las zonas fuente, el análisis de la distribución espacial y temporal de valores de AI del TOMS ha demostrado que los sistemas de dunas no son generalmente buenas fuentes de polvo, porque no son fuente de partículas suficientemente finas para poder ser elevadas a grandes altitudes y transportadas a grandes distancias (Prospero *et al.*, 2002).

Los datos de AI del TOMS indican claramente que la región de la depresión del Bodelé es la que muestra mayor intensidad en valores de AI, con valores que exceden de 30. Se demuestra así mismo que existe un área muy extensa, aunque algo menos intensa (valores entorno a 24), en el Sahara Occidental (Goudie y Middleton, 2001).

Los desiertos del Sahara y Sahel en el continente africano, así como el desierto del Gobi en Asia, son las regiones áridas del planeta que más partículas minerales aportan a la atmósfera. En el caso del continente africano, en verano la región fuente de partículas más importante se sitúa en el Suroeste del Sahara, entre las latitudes de 18° N y 25° N que abarcan regiones de Mauritania, Mali y Sur de Argelia. Otra región fuente importante, sobre todo en los meses de invierno, es la depresión del Bodelé, en el Chad, situada en la zona del Sahel (Prospero *et al.*, 2002). Estas zonas fuente se distinguen claramente en los mapas de espesor óptico de aerosoles, como los de la Figura 4.2.

Basándose en estudios estadísticos del espesor óptico de aerosoles medido por el instrumento TOMS, Moulin y Chiapello (2004) encontraron que las emisiones en el

Noroeste de Sahel son muy variables de un año a otro y controlan la mayor parte de la variabilidad del transporte de polvo hacia el Atlántico tropical en verano. La variabilidad interanual de las fuentes de polvo en el Sahara es menor. Esto puede ser debido a que las condiciones de sequías persistentes, que se vienen dando en la zona de Sahel desde la década de 1980, puede haber modificado en mayor grado las características del suelo y generado un incremento del polvo emitido y transportado desde esa área geográfica de África. El impacto de las actividades del hombre sobre el suelo del Sahel, que pueden haber ocasionado desertificación debido a actividades agrarias y deforestación (Sokilik y Toon, 1996), podría ser causante también de este incremento de emisiones en las últimas décadas. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), en un informe de 2001 (Houghton *et al.*, 2001), concluye que las fuentes de polvo natural se han mantenido constantes desde hace algunos miles de años y que toda la variabilidad en la producción de polvo que es atribuible a la acción del hombre es debida a la modificación del uso del suelo. En todo caso, el grado de impacto de estas actividades no está todavía del todo claro (Nicholson *et al.*, 1998; Prospero *et al.*, 2002), ya que las zonas más importantes del mundo en cuanto a producción de polvo se refiere son precisamente zonas deshabitadas.

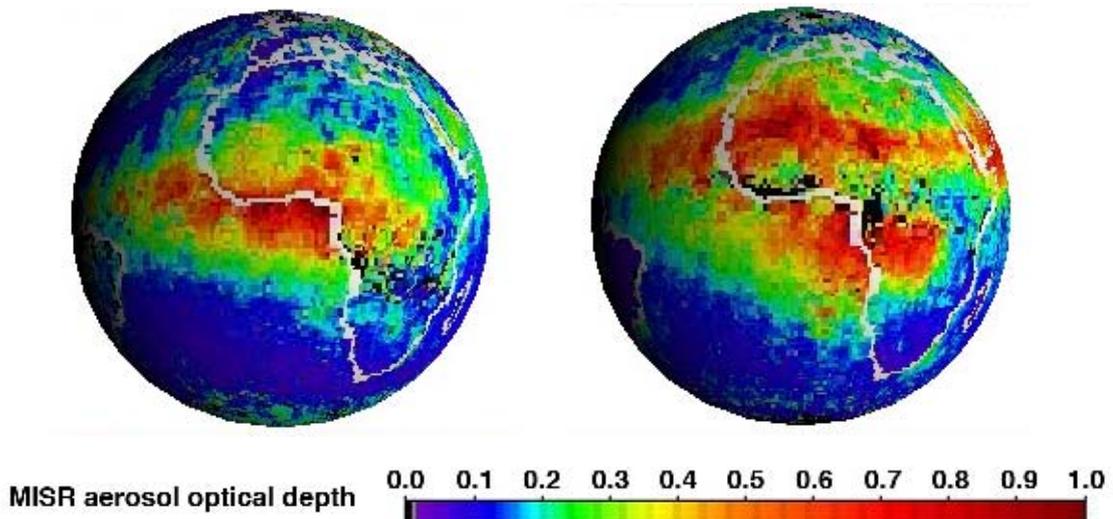


Figura 4.2. Promedio del espesor óptico de aerosoles en los periodos Diciembre-Febrero (izquierda) y Junio-Agosto (derecha) del año 2004. Observaciones Globales de Aerosoles del Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR/NASA). Puede observarse que en invierno las zonas fuente más activas están en la zona de Sahel, especialmente en la depresión del Bodelé. En verano las zonas fuente se extienden más al Norte, pero la depresión del Bodelé sigue siendo muy activa.

Otra técnica a partir de la cual se han identificado regiones del planeta emisoras de material crustal a la atmósfera es la basada en el índice IDDI (Infrared Difference Dust Image) (Legrand *et al.*, 1994; Brooks y Legrand, 2000). El IDDI es una medida semicuantitativa de la concentración de aerosoles atmosféricos, que en regiones desérticas está dominado por polvo mineral. Este índice está basado en datos del canal infrarrojo del satélite METEOSAT. Está especialmente indicado para detectar polvo en la atmósfera continental y para monitorizar las zonas fuente de polvo. Los resultados derivados del índice IDDI conducen a conclusiones similares a las de las investigaciones basadas en el índice AI del TOMS en cuanto a la identificación de las principales regiones fuentes de polvo del planeta.

Los estudios basados en el índice AI del TOMS o en el índice IDDI buscan las regiones fuente de material particulado en el continente africano a escala global, pero no necesariamente las que afectan a Canarias. En la sección 1.10 de esta memoria de Tesis se encuentra una revisión del estado del arte en cuanto a estudios previos focalizados en la identificación de las regiones fuente de polvo africano que afectan a Canarias.

Una interesante línea de investigación abierta recientemente trata sobre la modelización de futuros escenarios climáticos y de uso de suelo para tratar de averiguar de qué manera afectarán a la producción de polvo y, por lo tanto, a su carga neta en la atmósfera. Woodward *et al.* (2005) concluyeron, mediante simulaciones en las que se tuvo en cuenta el efecto del cambio climático en la vegetación del planeta, que sus resultados apuntan a la progresiva aparición de nuevas áreas fuente de polvo y a un incremento del promedio global de carga total de polvo que podría ser superior a un factor tres. Sin embargo, el efecto de la acción del hombre en el uso del suelo podría, según Mahowald y Luo (2003), inclinar la balanza hacia un descenso del 24% en la producción de polvo desértico, mientras que la fracción antropogénica del polvo podría llegar a ser de hasta un 60%.

4.1.2. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS FUENTE DE POLVO AFRICANO PARA CANARIAS

Diferentes autores han estudiado el origen de las masas de aire que llegan a las islas Canarias, en su gran mayoría mediante análisis subjetivo de retrotrayectorias y mapas de índice AI del TOMS. Estudios de este tipo son los de Sancho *et al.* (1992), Merrill (1994), Cuevas (1995), Raes *et al.* (1997), Bergametti *et al.* (1999a), Dorta (1999), McGovern *et al.* (1999), Torres *et al.*, (2002), Dorta *et al.*, (2003) y Viana (2003). Las técnicas utilizadas en estos trabajos permiten tener una idea de cuáles pueden ser, a grandes rasgos, las áreas fuente del material particulado crustal que llega a las islas durante episodios de intrusión de masas de aire africano, pero al ser técnicas subjetivas y no tener en cuenta importantes aspectos como la altura del transporte de masas de aire o las particularidades del suelo en el continente africano, no permiten identificar con precisión las zonas fuente.

En la única clasificación objetiva de retrotrayectorias con llegada a Canarias publicada hasta la fecha (Díaz, 2006) se utilizó la técnica de clasificación de conglomerados y lógica difusa, tomándose África como una única zona fuente. Este estudio se realizó para los observatorios de Izaña, en troposfera libre, y Santa Cruz, a nivel del mar, para el periodo 1948-2005.

A partir de la clasificación de conglomerados se encontró que, para masas de aire con llegada a Izaña, las que permanecieron durante un promedio del 70% del tiempo de la retrotrayectoria utilizada sobre África representan el 16.9% de los casos, ocupando el tercer lugar en frecuencia. El transporte de masas de aire desde África hasta Izaña es más frecuente durante los meses de verano.

En cuanto a los resultados para el observatorio de Santa Cruz, se encontró que la contribución menos importante es la puramente africana, representando sólo un 8% de la frecuencia total. Del estudio de la variación estacional de esta contribución se deduce que el aporte de polvo mineral directo desde el continente africano durante los meses de Junio y Julio es nulo.

En 2006, Sonia Castillo propuso un método objetivo de identificación de zonas fuente basado en la comparación de la caracterización geoquímica y mineralógica

de muestras de material particulado recogido en diferentes zonas del continente africano con la misma caracterización para el material particulado llegado a Canarias. Anteriormente a este trabajo no se lograron identificar elementos trazadores exclusivos que permitieran identificar las diferentes regiones fuente de polvo africano. Con esta técnica (Castillo, 2006), son las diferencias de composición de las diferentes muestras recogidas las que pueden ayudar a reconocer y diferenciar de una manera objetiva las áreas fuente en el Norte de África. La limitación de esta técnica se encuentra en el hecho de que, en la mayoría de los casos, la emisión de partículas a la atmósfera no se produce en una única región fuente, sino que tiene lugar simultáneamente en varias regiones (Escudero *et al.*, 2005). Es por esta razón que este estudio solo pudo aplicarse en un único episodio concreto, ocurrido entre los días 19 y 25 de Marzo de 2002 para el que, mediante análisis subjetivo de modelos de predicción de polvo, retrotrayectorias y campos meteorológicos, pudo identificarse la zona fuente en la región del Sahara Occidental, de donde se disponían de tres muestras de material particulado recogidas en diferentes zonas de esa área geográfica. El análisis objetivo demostró que el origen del material particulado en ese episodio se localizó en el Sahara Occidental y Mauritania. Según este estudio, las características geoquímicas trazadoras que con mayor probabilidad ayudan a identificar objetivamente las zonas fuente del material particulado son los ratios Al/Ca y Al/Mg aunque, como se ha comentado anteriormente, cabe destacar que estos trazadores únicamente son útiles en episodios con un área fuente aislada.

En general se ha observado que el material particulado que llega a las islas proviene de las zonas Sahara y Sahel en el caso de las intrusiones que tienen lugar en invierno, pero no se han distinguido con mucha precisión las regiones fuente.

4.2. METODOLOGÍA

Como se explicó en el apartado 1.6, la mayoría los estudios dirigidos a la identificación de las zonas fuente de polvo mineral a escala global se basan en estadísticas de índices (como el AI del TOMS y el IDDI), que dan cuenta de las regiones del planeta con alto contenido en aerosoles en la atmósfera (Legrand *et al.*

1994; Brooks y Legrand, 2000; Goudie y Middleton, 2001; Prospero *et al.*, 2002) . Estas regiones típicamente se han asociado a zonas fuente pero, tal y como demostraremos, no tienen por qué ser precisamente las zonas de las que parte el material crustal que llega al archipiélago canario.

Los estudios dedicados a la identificación de las zonas fuente de polvo que afecta a Canarias, tal y como se explicó en el apartado 1.10, se basan en su mayoría en técnicas de análisis subjetivo de retrotrayectorias e índice AI del TOMS (Sancho *et al.*, 1992; Merrill, 1994; Cuevas, 1995; Raes *et al.*, 1997; Bergametti *et al.* 1999a; Dorta, 1999; McGovern *et al.*, 1999; Torres *et al.*, 2002; Dorta *et al.*, 2003; Viana, 2003). Solo los trabajos de Díaz (2006) y Castillo (2006) abordan el problema, a partir de técnicas muy diferentes, con técnicas de análisis objetivo.

Para que una región geográfica actúe como fuente de material particulado es necesario que esa región, sobre la que se han dado las condiciones meteorológicas adecuadas para la inyección de material en la troposfera, posea un suelo con las características necesarias (Nickovic *et al.*, 2001). Asumimos que una zona del continente africano puede presentar un índice AI del TOMS muy alto pero no ser el área de la que parten las masas de aire que llegan a las islas. Los aportes minerales podrían partir de zonas que potencialmente pueden constituir un área fuente pero que en un momento dado presenten menor intensidad de AI del TOMS que otras zonas del continente africano con valores de AI más altos por acumulación en la atmósfera.

La única manera de llegar a conclusiones sobre esta hipótesis es a través del análisis matemático de las retrotrayectorias. Se han utilizado tres métodos diferentes basados en esta herramienta. La primera técnica consiste en el estudio de la variabilidad de los Índices de Africanidad asociados a las regiones Sahara y Sahel para diferentes alturas de llegada sobre Tenerife (sección 4.3.2). La segunda técnica consiste en el cálculo del promedio mensual del camino seguido por las masas de aire, tanto en coordenadas geográficas como en altura, y comparar las posibles zonas fuente con los mapas promedio mensuales de AI del TOMS (sección 4.3.4). Por último, hemos utilizado el método del tiempo de residencia para calcular, de forma complementaria a los dos métodos anteriores, la procedencia de las masas de aire para los días de intrusión africana del periodo 1998-2003 previamente identificados (sección 4.3.5).

4.2.1. ESTUDIO DEL ORIGEN DEL MATERIAL PARTICULADO BASADO EN LOS ÍNDICES DE AFRICANIDAD

La primera técnica utilizada en esta Tesis para la identificación del origen geográfico del material particulado atmosférico transportado durante episodios africanos sobre Canarias está basada en los Índices de Africanidad (apartado 3.2.1.1), basados en los datos de retrotrayectorias tridimensionales HYSPLIT, para tres alturas de llegada sobre Tenerife y calculadas para 5 días hacia atrás. Esta técnica consiste en diferenciar dos posibles zonas fuentes africanas y calcular el tiempo de permanencia de las masas de aire en cada zona. Las zonas elegidas son las regiones Sahara ([20N°, 36°N], [18W°, 50E°]) y Sahel ([0°N, 20°N], [18°W, 50°E]). Se diferencia entre tres alturas diferentes durante el trayecto de las masas de aire y, además de considerarse tres posibles alturas de llegada sobre Canarias. En análisis de la variabilidad en el tiempo de permanencia de las masas de aire en estas dos zonas y su estudio en base a la altura de llegada puede darnos, como primera aproximación, una idea de la variabilidad del transporte de polvo africano hacia Canarias, asumiendo que las masas de aire adquieren características de la atmósfera de las zonas en las que invierten un largo tiempo de su recorrido. Este estudio se ha hecho para todos los días del periodo 1998-2003.

4.2.2. CÁLCULO DE RETROTRAYECTORIAS PROMEDIO Y PROMEDIO MENSUAL DE ÍNDICE AI DEL TOMS

Para el cálculo del promedio mensual de las retrotrayectorias HYSPLIT y de su corte transversal correspondiente, teniendo en cuenta únicamente las de los días de intrusión en la estación de El Río, se ha elaborado una rutina de MATLAB. Las retrotrayectorias tridimensionales, generadas a partir de datos meteorológicos procedentes de la base de datos FNL, fueron calculadas con una longitud de 120 horas para tres alturas de llegada sobre Tenerife (200 m, 1500 m y 2400 m), teniendo en cuenta la componente vertical del viento.

La salida de esta rutina es un gráfico con dos paneles: en el panel superior se muestra un mapa del área estudiada en el que se dibuja la retrotrayectoria promedio mensual y sus errores en latitud. En el panel inferior podemos encontrar el promedio mensual de los cortes transversales de la trayectoria, esto es, la información del promedio mensual de la altura frente a la longitud geográfica de las masas de aire, con su error en altura asociado. Los errores se han definido como la desviación estándar de las variables correspondientes.

La información de la malla de datos de valores de AI del TOMS podemos encontrarla, en modo texto, en la propia web del proyecto TOMS. Las mallas de datos, de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolución, son promediadas para cada mes con un software programado en Fortran 77. Una vez calculados los valores promedio se representan sus mapas de contorno para la región de estudio. Para conseguir esta representación realizamos antes una interpolación por el método de Kriging (Cressie, 1991).

Comparando los mapas promedio mensuales de retrotrayectorias con los mapas de promedio mensual de índice AI del TOMS podemos intentar localizar las zonas fuente de material particulado más importantes para cada mes.

Adicionalmente se compararon valores de AI del TOMS con niveles de PST para determinar la capacidad del índice AI para indicar la presencia de polvo africano sobre Canarias en diferentes épocas del año. En este caso los valores de AI son los denominados "overpass" de la versión 8. Se trata, para cada día, de un único dato medido las 12 UTC, en nuestro caso sobre el pixel más cercano a las coordenadas del Observatorio de Izaña (28.3N, 16.5W).

Los datos pueden obtenerse en la siguiente dirección :
ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/overpass/OVP300_ept.txt

4.2.3. MÉTODO DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA

Desde el comienzo de la década de 1980 se ha venido usando el análisis estadístico de los tiempos de residencia de masas de aire como método para

detectar las fuentes potenciales de contaminación del aire (Ashbaugh, 1983). Este método, que basa su cálculo en datos de retrotrayectorias, se fundamenta en la suposición de que las masas de aire toman las características de la atmósfera de las zonas en las que permanecen por largo tiempo. Así, teniendo en cuenta el tiempo de residencia de esas retrotrayectorias sobre las regiones geográficas de estudio podemos conocer cuáles son los caminos por los que principalmente tiene lugar el transporte de masas de aire hasta el punto de destino y, por lo tanto, podemos conocer cuáles son las regiones en las que más comúnmente se origina el polvo.

De la misma manera que para los demás métodos de determinación de zonas fuente mencionados anteriormente, se han utilizado retrotrayectorias tridimensionales de 120 horas a tres alturas de llegada sobre Tenerife (200 m, 1500 m y 2400 m) generadas a partir del modelo HYSPLIT 4.0, en las que se ha tenido en cuenta la componente vertical del viento. Cada retrotrayectoria se define como una serie de coordenadas de latitud y longitud y altura a intervalos de 1 h. Los datos meteorológicos a partir de los que se han generado las retrotrayectorias proceden de la base de datos FNL.

En el método de los tiempos de residencia se divide el dominio geográfico en una malla de cuadrados, en este caso de resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$. Cada retrotrayectoria se divide en una serie de pequeños segmentos de línea, cada uno totalmente contenido en un cuadrado individual de la malla considerada (Figura 4.3). Teniendo en cuenta la longitud específica parcial de cada trayectoria y la velocidad, se puede expresar cada trayectoria como una serie de “tiempos de residencia” para cada cuadrado de la malla a lo largo de todo su recorrido. El cálculo del tiempo de residencia se realiza siguiendo el siguiente procedimiento:

Durante un tiempo dado de viaje de la parcela de aire entre dos puntos (por ejemplo, B-C) de la trayectoria, se asume que ésta viaja a una velocidad constante que es igual a la distancia lineal entre los dos puntos dividido por el tiempo. En nuestro caso, tomaremos puntos separados por 1 h de viaje, ya que esa es la resolución temporal de las retrotrayectorias que usamos (Ecuación 4.1).

Aunque en realidad la velocidad de una parcela de aire varía a lo largo de su viaje de un punto a otro, es razonable suponer una velocidad constante debido a la resolución de nuestros datos. Bajo esta suposición de velocidad constante a lo

largo de cada segmento de la trayectoria, es fácil calcular el tiempo que una parcela de aire permanece en cada uno de los cuadrados de la malla. Para ello se calcula la razón del subsegmento $S_{(i, j, n, k)}$ al segmento total $d_{(n, k)}$ y se toma esa porción de camino recorrido durante 1 h para representar el tiempo de permanencia sobre el cuadrado (i, j) empleado por el segmento (n) de la trayectoria (k) (Ecuación 4.2). (Figura 4.3) El tiempo total de residencia es la suma de todos los tiempos de residencia calculados para cada cuadrado de la malla (Ecuación 4.3).

(Ec. 4.1) $V_{(n, k)} = d_{(n, k)} / 1$, ya que cada segmento de la trayectoria representa el movimiento durante 1 h.

(Ec. 4.2) $Tr_{(i, j, n, k)} = S_{(i, j, n, k)} / V_{(n, k)}$, asumiendo una velocidad constante a lo largo del segmento.

$$(Ec. 4.3) \quad TR_{(i, j)} = \sum_{k=1}^t \sum_{n=1}^{120} S_{(i, j, n, k)} / V_{(n, k)}$$

donde:

t = número total de trayectorias consideradas (cada trayectoria, en nuestro caso, tiene 120 segmentos)

$S_{(i, j, n, k)}$ = longitud de la porción del segmento n-ésimo de la trayectoria k-ésima que pasa por el cuadrado (i, j)

$d_{(n, k)}$ = longitud total del segmento n-ésimo de la trayectoria k-ésima

$V_{(n, k)}$ = velocidad promedio de la parcela de aire en su viaje a lo largo del segmento n-ésimo de la trayectoria k-ésima

$Tr_{(i, j, n, k)}$ = tiempo de residencia sobre el cuadrado (i, j) al que contribuye el segmento n-ésimo de la trayectoria k-ésima

$TR_{(i, j)}$ = tiempo de residencia total para todas las trayectorias sobre el cuadrado (i, j)

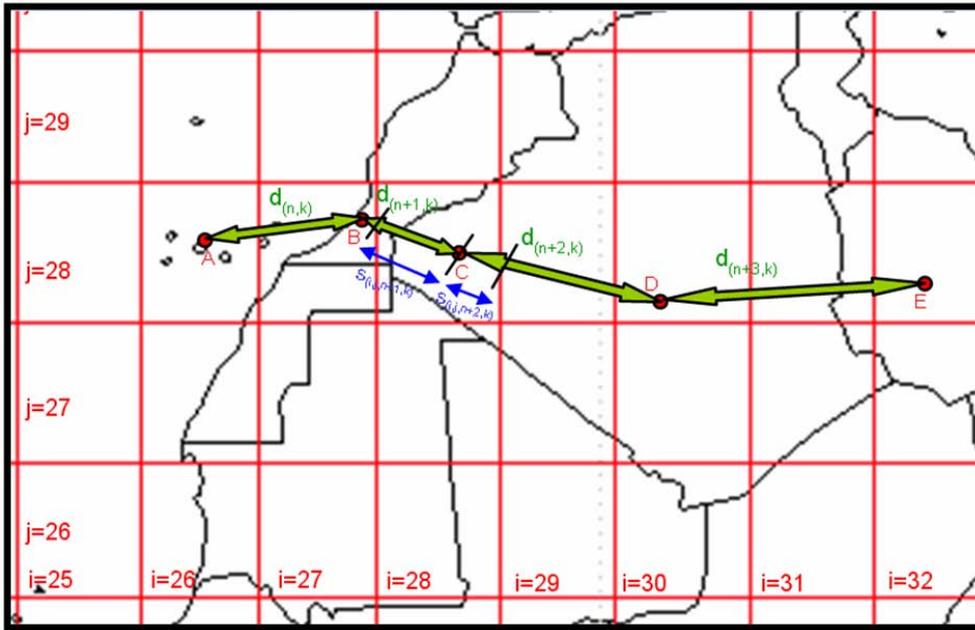


Figura 4.3. Ilustración del cálculo de los tiempos de residencia para una retrotrayectoria ficticia con punto de llegada (A) en la estación de El Río. La resolución de la malla no se corresponde con la utilizada en este trabajo, sino que ha sido elegida para una mejor comprensión de la gráfica.

Una vez calculado el tiempo de residencia total $TR_{(i,j)}$ podemos expresar este valor como probabilidad de tiempo de residencia (Ecuación 4.4), siempre que el conjunto de trayectorias sea lo suficientemente grande como para resultar representativo de todas las posibles direcciones de transporte de las masas de aire.

$$(Ec. 4.4) \quad TRp_{(i,j)} = \left\{ \frac{TR_{(i,j)}}{\sum_{i=1}^{col} \sum_{j=1}^{fil} TR_{(i,j)}} \right\} \times 100$$

donde :

col = número de columnas de la malla

fil = número de filas de la malla

$TRp_{(i,j)}$ = probabilidad de tiempo de residencia en % del total de horas calculadas para todas las trayectorias sobre toda la malla

Los mapas de tiempo de residencia muestran siempre valores altos cerca del punto de llegada de las retrotrayectorias ya que, por definición, todas las trayectorias deben pasar por el cuadrado de la malla en el que se encuentra éste. Por el mismo motivo, es más probable que las retrotrayectorias pasen por los cuadros de la malla más cercanos al punto de llegada. Este efecto puramente geométrico no tiene relación alguna con el origen geográfico de las parcelas de aire a lo largo de su trayectoria o con cualquier otra propiedad de estas, ni tampoco con las condiciones sinópticas. Por lo tanto, se hace necesario eliminar esta tendencia central. Para ello se estima la pérdida de probabilidad de que las masas de aire pasen por cuadrados de la malla cada vez más alejados del punto final de las retrotrayectorias. La técnica para realizar esta corrección (Ashbaugh, 1983) consiste en considerar el área de un anillo con grosor igual a las dimensiones de un cuadrado de la malla, que en nuestro caso es 1° (equivalente a 111.12 km), situado a una distancia D del punto final de las retrotrayectorias (Figura 4.4), y comparar el área del anillo con el área de un cuadrado aislado de la malla. La relación entre las áreas (Ecuación 4.5) representa el número relativo de cuadrados de la malla igualmente probables a una distancia D en comparación con el cuadrado central (donde está el punto de llegada de las masas de aire).

$$(Ec\ 4.5) \quad F_{(i,j)} = \frac{\text{área del anillo}}{\text{área de un cuadro de la malla}} = \frac{\pi \times \left[\left(D_{(i,j)} + \frac{\text{lado}}{2} \right)^2 - \left(D_{(i,j)} - \frac{\text{lado}}{2} \right)^2 \right]}{\text{lado} \times \text{lado}}$$

donde:

$F_{(i,j)}$ = factor de corrección geométrico para un cuadrado de la malla situado a una distancia $D_{(i,j)}$ del punto final de la retrotrayectoria.

$D_{(i,j)}$ = distancia del punto de cálculo al punto de llegada de las retrotrayectorias

lado = longitud del lado de los cuadrados que forman la malla

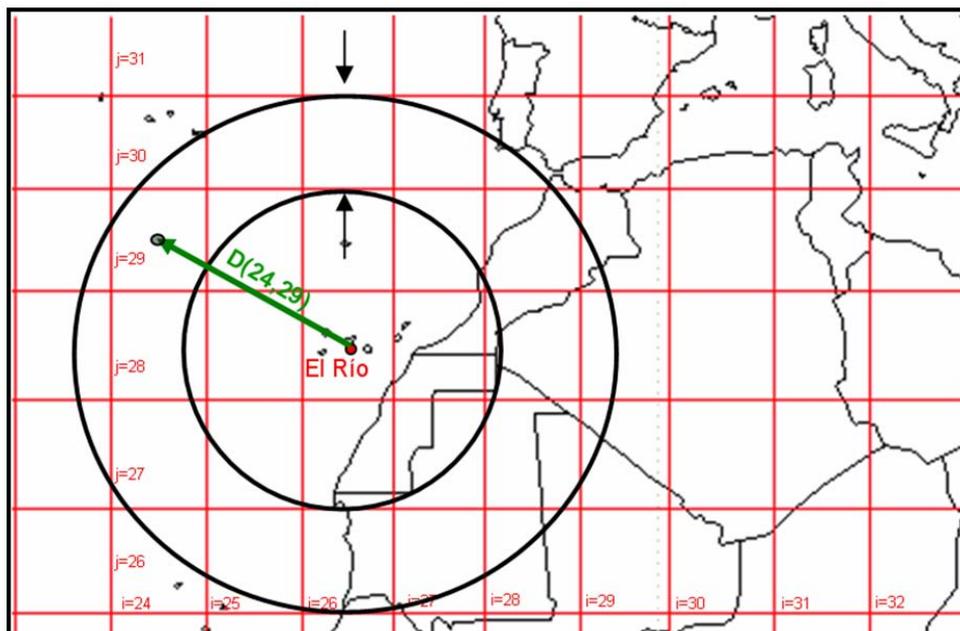


Figura 4.4. Ilustración de la relación entre el área de un cuadrado aislado de la malla y el área del anillo usado en la técnica de eliminación de la tendencia central de la distribución de tiempos de residencia.

Finalmente, multiplicando el tiempo de residencia de cada cuadro de la malla por su correspondiente factor de corrección geométrico, obtenemos tiempos de residencia en los que no influye la tendencia central. Así, las diferencias entre frecuencias reales (tiempos de residencia ajustados) son debidas a otros factores diferentes a la tendencia central.

Este método se aplicó a las retrotrayectorias de los días de intrusión de polvo africano en Canarias durante el periodo 1998-2003. El dominio geográfico considerado en los mapas de tiempos de residencia obtenidos es $[0^{\circ}\text{N}, 60^{\circ}\text{N}]$, $[70^{\circ}\text{W}, 30^{\circ}\text{E}]$.

A continuación se calcularon los promedios de los resultados para las únicas dos estaciones del año consideradas: invierno (Diciembre, Enero, Febrero y Marzo) y verano (Junio, Julio, Agosto y Septiembre).

Una vez obtenidos los mapas promedio de tiempos de residencia se procedió a identificar y caracterizar las zonas fuente, teniendo en cuenta sus características geográficas y geomorfológicas, con la ayuda de mapas y atlas. Para este propósito se usaron los mapas proporcionados por los programas Nasa World Wind

(<http://worldwind.arc.nasa.gov/>) y Google Earth (<http://earth.google.es/>). Debido a sus características en cuanto a la detallada información que suministra y la gran calidad de las imágenes de satélite que permite utilizar, la herramienta más útil fue Nasa World Wind.

El último paso para la identificación de las regiones fuente de polvo fue la confirmación de que las zonas inferidas a partir del método de los tiempos de residencia están situadas en regiones continentales con un tipo de suelo adecuado para la resuspensión de partículas. Para ello, representamos el mapa de tipos de suelo y lo comparamos con los mapas de probabilidad de tiempo de residencia corregidos de la tendencia central. El mapa de tipos de suelo utilizado se representó a partir de la base de datos Olson World Ecosystems Version 1.3A (Olson *et al.*, 1983; Olson *et al.*, 1985). Este conjunto de datos clasifica los tipos de suelo de todo el ecosistema terrestre, con una resolución de 0.5 grados, en 15 clases principales y 8 clases de transición. La clasificación se basa en el contenido en carbono orgánico de la vegetación y en el uso del suelo.

Después de identificar las regiones fuente, comparamos nuestros resultados con los obtenidos por otros autores mediante técnicas diferentes, como pueden ser los obtenidos a partir del índice AI del TOMS (Middleton y Goudie, 2001; Prospero *et al.*, 2002) o a partir del índice IDDI (Legrand *et al.* 1994; Brooks y Legrand, 2000).

4.3. RESULTADOS

4.3.1. LOS ÍNDICES DE AFRICANIDAD COMO INDICADORES DE EPISODIOS AFRICANOS DE MATERIAL PARTICULADO SOBRE CANARIAS

Teniendo en cuenta que los Índices de Africanidad AFINL y AFISL no son nulos cuando una masa de aire con llegada al punto de estudio (en este caso Canarias) ha pasado por las zonas de Sahara y Sahel en el continente africano, podemos con ellos identificar fácilmente los días de intrusión de masas de aire africano, tal y como se explicó en la sección 3.2.2. El índice AFINL₂₀₀, por ser el que representa a

las masas de aire que llegan a nivel de superficie y han viajado por la región del Sahara a menor altura, es el mejor parámetro para explicar la variabilidad de los episodios de intrusión de polvo africano que afectan a los mayores núcleos de población en Canarias.

Para examinar detalladamente la relación entre los niveles de concentración de partículas registrados en la estación de El Río y las horas de permanencia de las masas de aire en la región Sahara, en la Figura 4.5 se representan, para cada año del período 1998-2005, los promedios de los datos de Diciembre-Enero-Febrero-Marzo de los índices $AFINL_{200}$ y de los niveles de PST. Para eliminar la contribución de la deposición gravitacional a los niveles de PST, se tuvieron en cuenta únicamente los datos para los días en que este fenómeno no pudo ocurrir, esto es, no se tuvieron en cuenta los días en los que $AFINL_{1500}$, $AFINL_{2400}$ eran diferentes de cero. Además, tampoco se tuvieron en cuenta los días en que existió intrusión de masas de aire africano desde la región de Sahel. Teniendo todo esto en cuenta, se obtiene un coeficiente de correlación entre ambas series de $r = 0.55$ ($p < 0.05$). Podemos observar que la evolución temporal es la misma para los dos parámetros, si bien se encuentra un valor muy bajo en el promedio de PST para el año 2002 cuando, según el valor máximo de promedios de índices para ese año, podríamos haber esperado un máximo. Este resultado contradictorio podría, sin embargo, ser explicado por una o varias de las siguientes hipótesis:

- a) Aumentó la permanencia en el Sahara de las masas de aire que llegaron a Canarias, con lo que el contenido de material particulado de éstas podría haber sido mayor, pero tuvo lugar un número mayor de procesos de lavado atmosférico locales en Canarias y/o en zonas de tránsito del material particulado respecto a los ocurridos en el resto de inviernos. Pudieron además tener lugar simultáneamente un mayor número de precipitaciones en las áreas fuente. Estos procesos pudieron reducir considerablemente la carga de partículas en la atmósfera.
- b) Las masas de aire que llegaron a niveles bajos en Canarias y que permanecieron en Sahara más de un 20% del tiempo de trayectoria en promedio, provenían mayoritariamente de zonas de Sahara con superficies

no adecuadas para considerarse área fuente, o simplemente no se dieron las condiciones meteorológicas para que se produjeran emisiones atmosféricas masivas de material cristal para su posterior transporte.

Para intentar justificar la primera hipótesis se ha representado el de número anual de días de lluvia para el periodo Diciembre-Enero-Febrero-Marzo para cada año del periodo 1999-2003 para la estación de El Río (Figura 4.6). Los datos fueron obtenidos de la base de datos climatológica del Instituto Nacional de Meteorología. Encontramos un máximo en el invierno de 2002 (12 días de precipitación), seguido de un valor alto (5 días de precipitación) en 2003.

Por otro lado, se representó la tasa de precipitación (mm/día) en un área que cubre los alrededores de Canarias y a las áreas que potencialmente son fuente de material particulado que llega a las islas (Figura 4.7). Encontramos que fue también durante los inviernos de 2002 y 2003 cuando la tasa de precipitación fue mayor en zonas de Marruecos, Sahara Occidental y Argelia (que como veremos en la sección 4.2.2 son típicamente las zonas fuente del material cristal que llega a Canarias), así como en los alrededores del archipiélago canario. Es de destacar que durante el invierno de 2002 se registraron las tasas de precipitación más altas en las zonas de tránsito del polvo hacia Canarias en Marruecos, Sahara Occidental, Oeste de Argelia y Norte de Mali. En resumen, las condiciones meteorológicas en el Norte de África durante los años 2002 y 2003 no favorecieron la resuspensión del material particulado, y además se produjo “lavado atmosférico” en las zonas de tránsito del polvo africano.

Concluimos, por lo tanto, que la causa de que los niveles de PST en el invierno de 2002 sean tan bajos, a pesar de que el promedio de índice $AFINL_{200}$ es máximo, es la expuesta anteriormente como primera hipótesis, por lo que el carácter modulador del índice $AFINL_{200}$ sobre las concentraciones de PST que llegan a Canarias se ve afectado por la precipitación en zonas fuente, en zonas de tránsito y en la zona de muestreo.

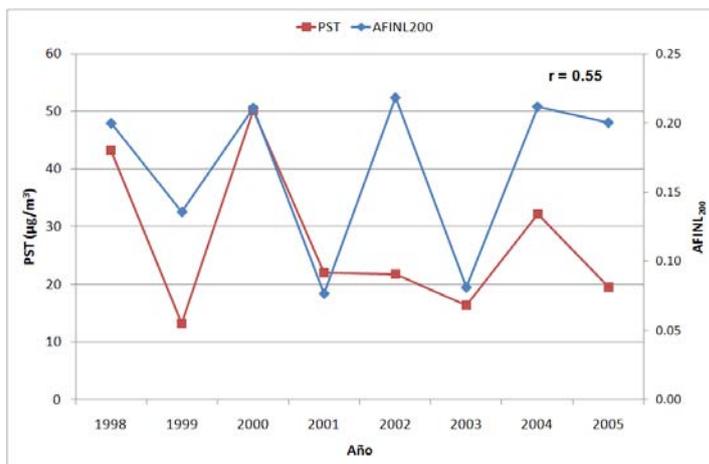


Figura 4.5. Promedios de los datos de Diciembre-Enero-Febrero-Marzo del índice AFINL₂₀₀ y de concentración de PST. Periodo 1998-2005.

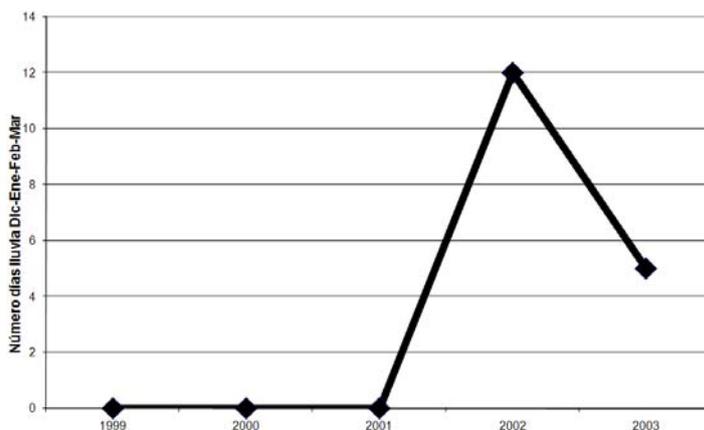


Figura 4.6. Número de días de lluvia en invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) en la estación de El Río durante el periodo 1999-2003. Fuente: Base de datos climatológica del Instituto Nacional de Meteorología.

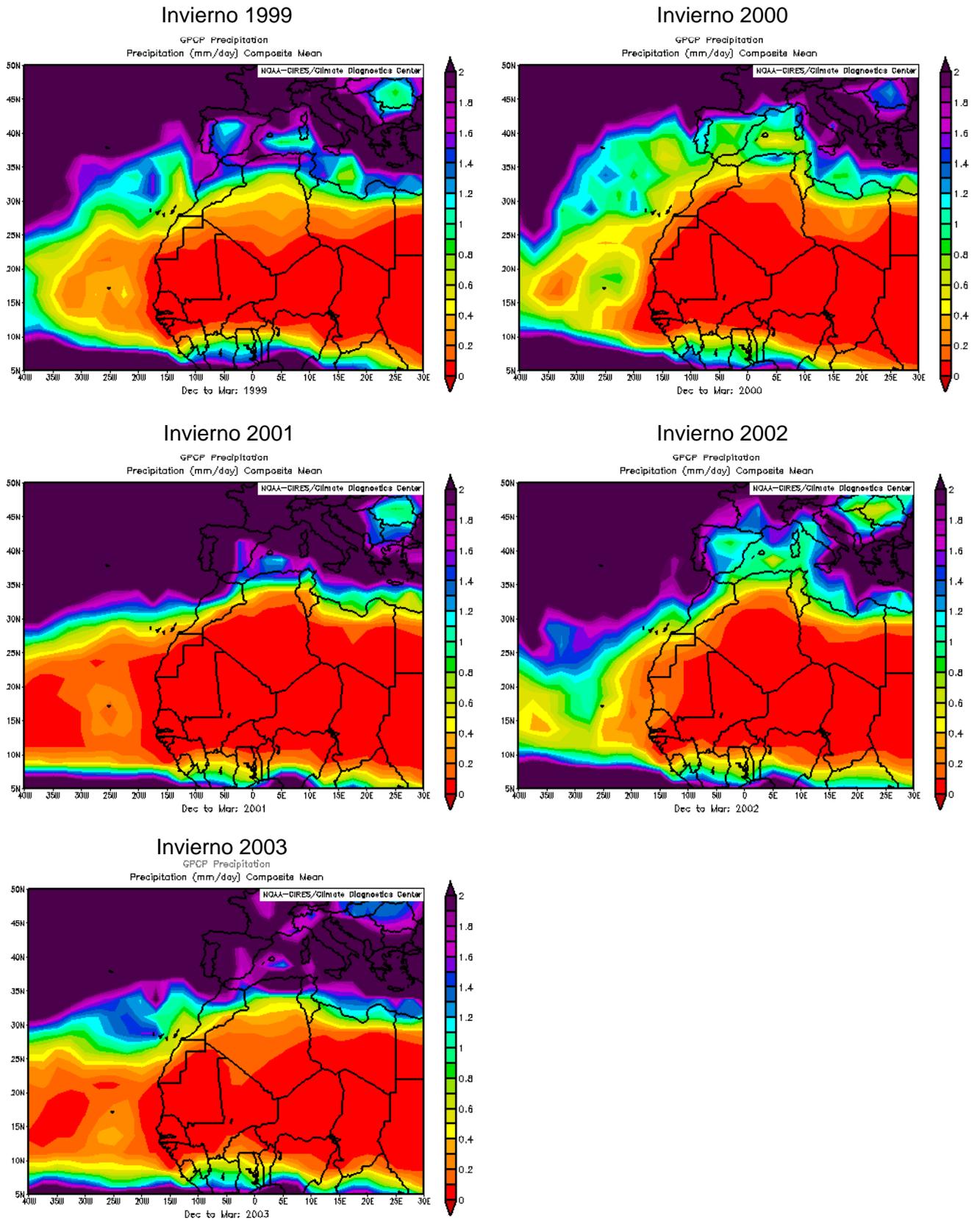


Figura 4.7. Promedio de la tasa de precipitación (mm/día) para los meses de invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) de los años 1999, 2000, 2001, 2002 y 2003. Fuente: Global Precipitation Climatology Project / NCEP.

Una vez identificado el efecto de la precipitación en el carácter modulador de AFINL₂₀₀ sobre las concentraciones de polvo africano en Canarias, estudiamos con más detalle cual es la correlación entre promedios mensuales de dichas variables. Al igual que para estudiar la correlación entre la variación anual de los promedios de PST y AFINL₂₀₀ para invierno (Figura 5), en el caso de los promedios mensuales también tenemos en cuenta únicamente los días en los que los Índices de Africanidad indican que no pudo ocurrir deposición gravitacional de polvo ni intrusión de masas de aire desde la región de Sahel a nivel de superficie. Debido al efecto descrito de los procesos de lavado, no se espera encontrar siempre una alta correlación, pero al menos en la mayoría de los meses sí una cierta modulación.

En las Figuras 4.8 a 4.10 se observa que, en general, las correlaciones son moderadas, incluso buenas en los meses de Enero y Mayo ($r = 0.86$ y 0.91 respectivamente, ambas para $p < 0.05$). Para los meses de invierno, se observa que la variabilidad de la serie de AFINL₂₀₀ es muy similar a la de PST, excepto para los años 2002 y 2003 por las razones expuestas anteriormente.

Durante los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, encontramos varios años con promedio mensual de AFINL₂₀₀ nulo. Esto es debido a que durante esos meses no se produjeron episodios de intrusión de masas de aire sahariano con llegada directa al nivel de la estación de El Río ya que, como ya se ha visto, las intrusiones durante estos meses tienen lugar mayoritariamente en medianías y cumbres de las islas. Las escalas de los ejes correspondientes al índice AFINL₂₀₀ para estos meses (Figuras 4.9 y 4.10) son menores que en el resto de los meses, siendo los valores de AFINL₂₀₀ siempre menores a 0.05. La variabilidad de los niveles de PST durante los meses de verano, habiendo eliminado la contribución de la deposición gravitacional de polvo, está influenciada por el aerosol marino, que en esta época del año afecta en mayor medida a Canarias debido a que el alisio sopla con mayor fuerza e intensidad (Rodríguez y Guerra, 2001; McGovern *et al.*, 2002). Dado que los valores de AFINL₂₀₀ son muy bajos y varían en un rango entre 0 y 0.05, no era de esperar encontrar correlación entre las series de PST y AFINL₂₀₀ durante estos meses.

Teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por los fenómenos de lavado de la atmósfera y por la menor frecuencia de intrusiones a niveles bajos en verano, se

puede concluir que el índice AFINL₂₀₀ presenta en general una variabilidad temporal similar a la de las series de niveles PST en aire ambiente a nivel de superficie en la estación de fondo regional considerada. Por lo tanto, podemos tomar al índice AFINL₂₀₀ como un indicador de la presencia de polvo y como un modulador de la frecuencia e intensidad de los episodios de intrusión de masas de aire africano en las islas.

Este carácter modulador del índice AFINL₂₀₀ sobre las intrusiones de polvo africano en Canarias justifica que sea utilizado más adelante en esta Tesis como una herramienta para el estudio de tendencias de episodios africanos en las islas y la posible relación de estas tendencias con las de algunos índices y parámetros climáticos.

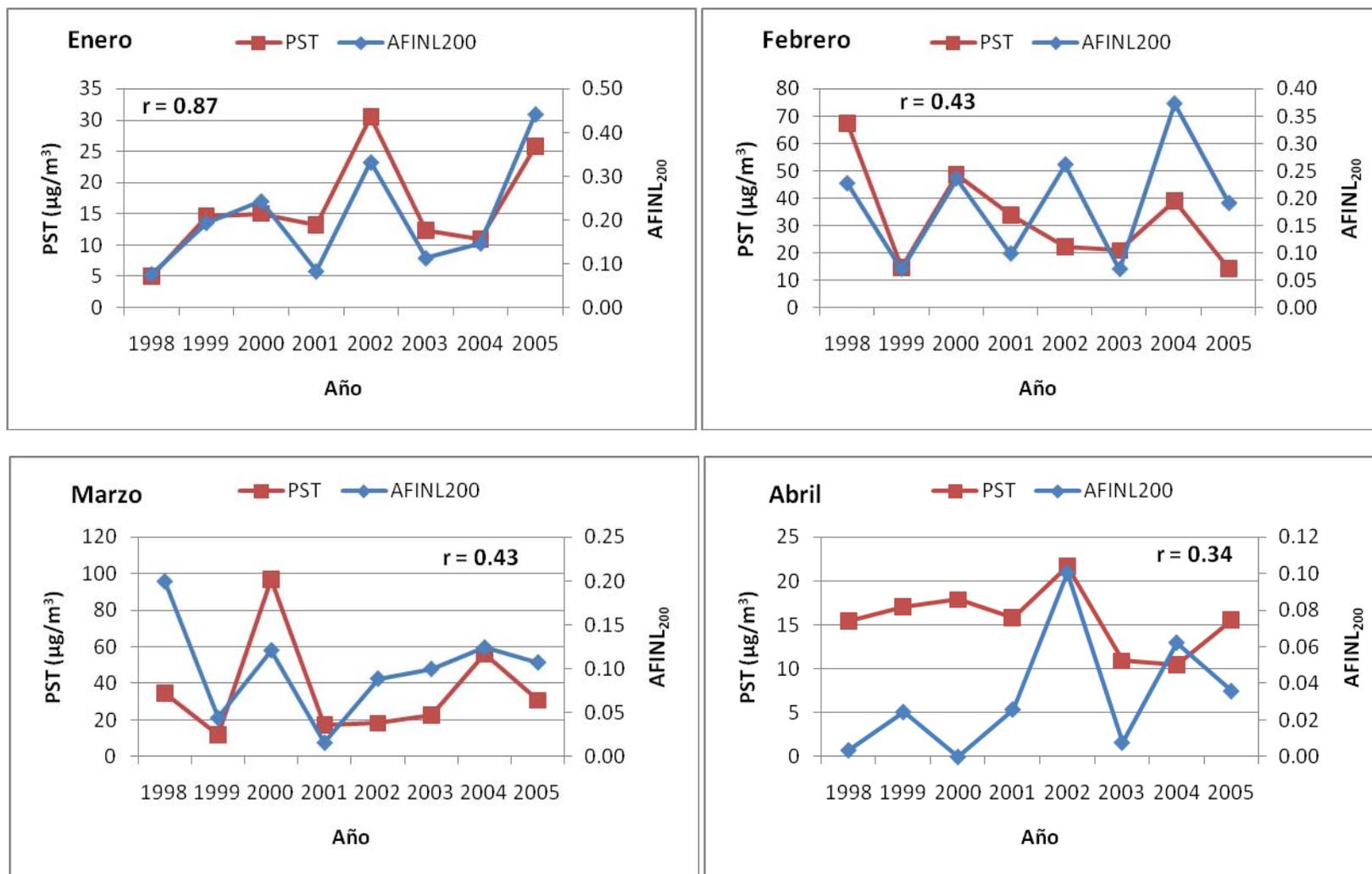


Figura 4.8. Promedios mensuales de las series de niveles de PST registrados en la estación de El Río y AFINL₂₀₀ para el período 1998-2005. r es el valor del coeficiente de correlación entre las dos series ($\rho < 0.05$).

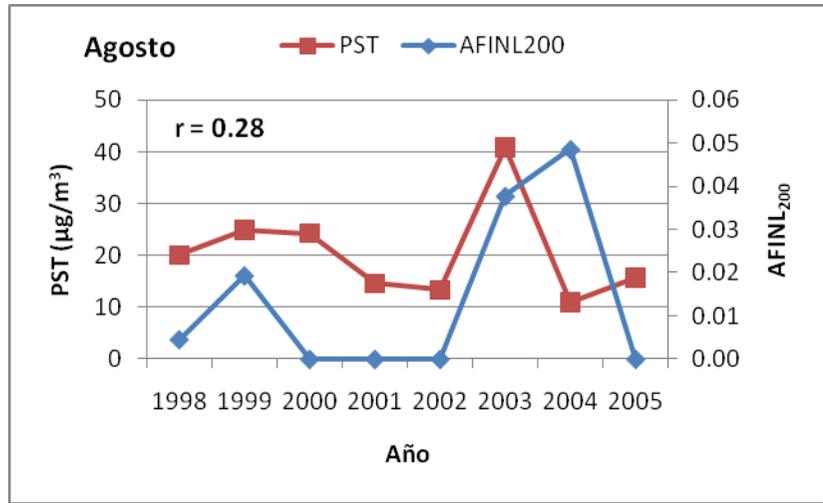
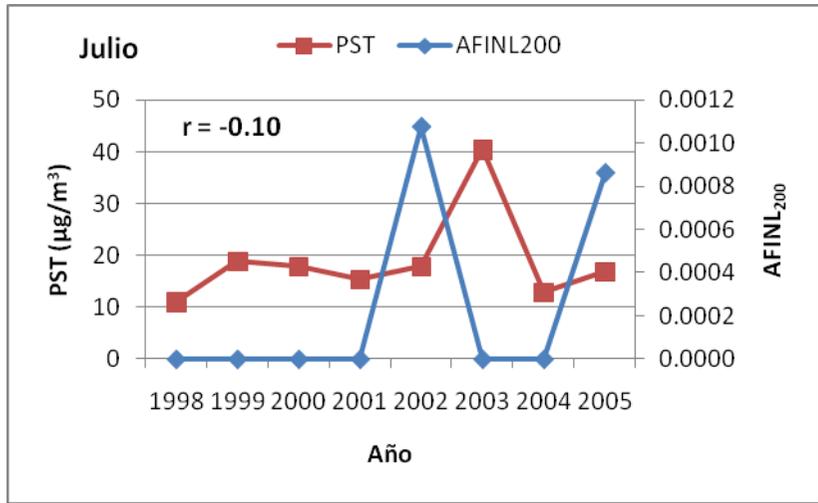
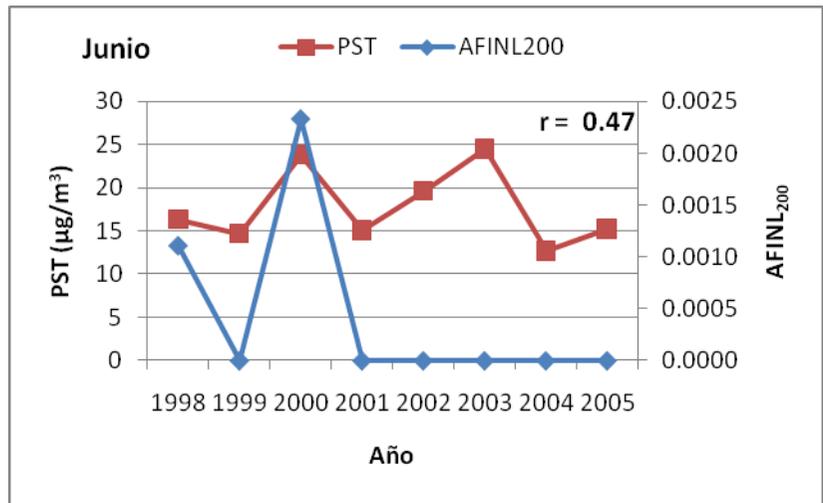
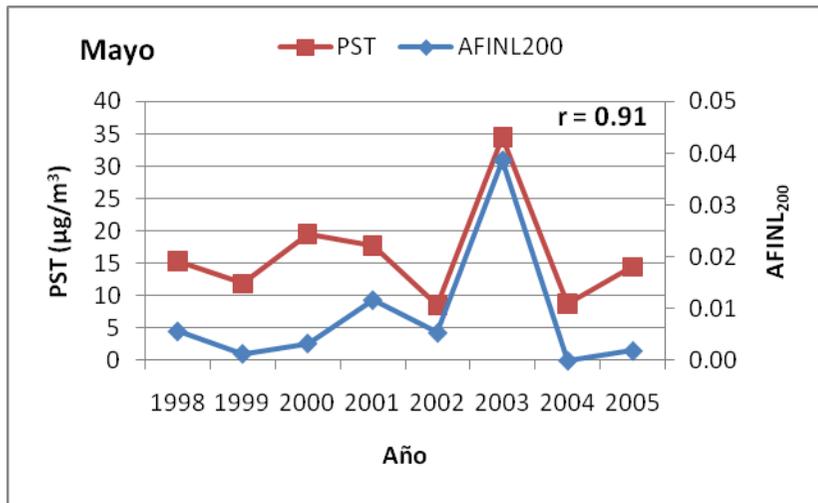


Figura 4.9. Promedios mensuales de las series de niveles PST registrados en la estación de El Río y AFINL₂₀₀ para el período 1998-2005. r es el valor del coeficiente de correlación entre las dos series ($\rho < 0.05$).

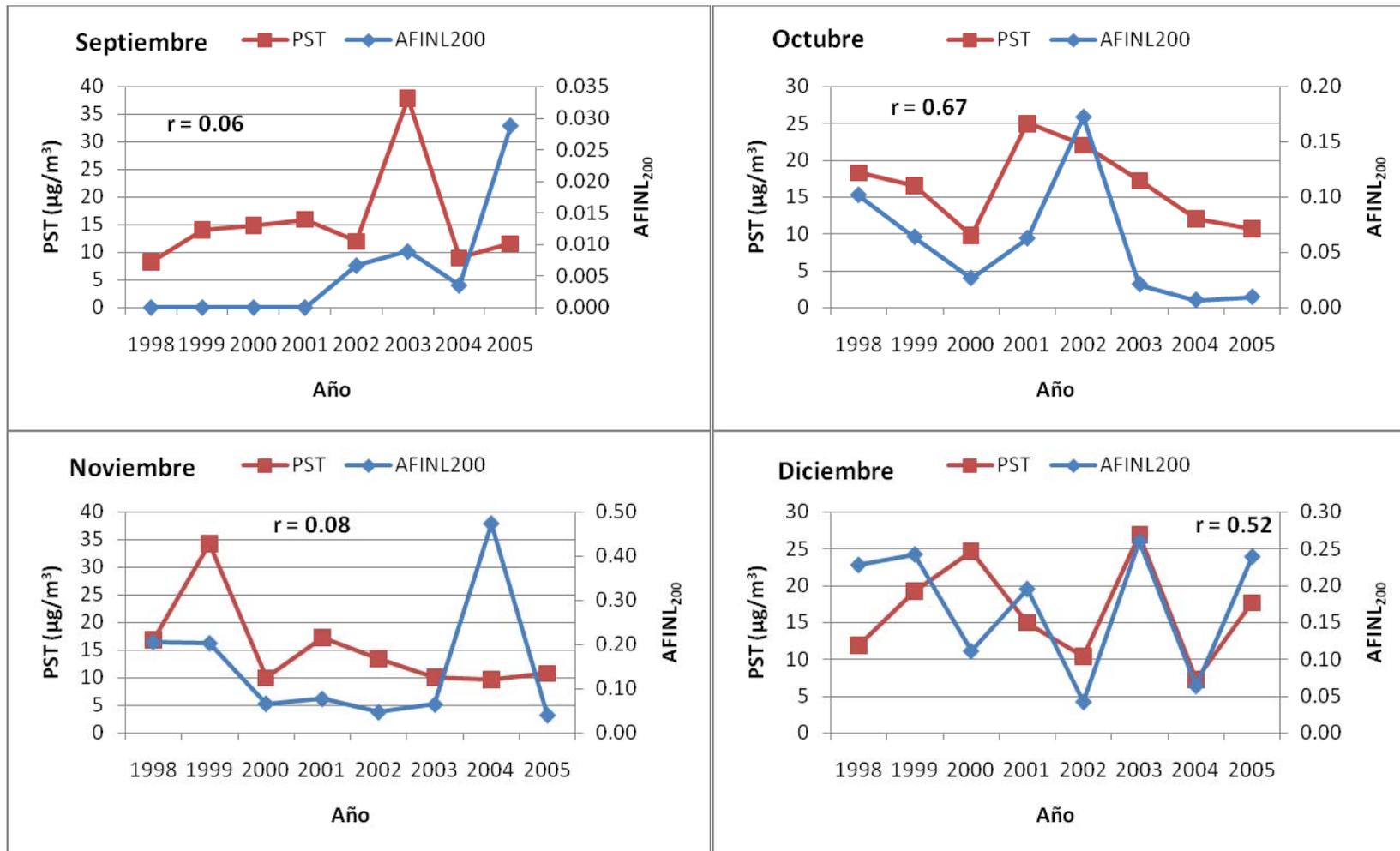


Figura 4.10. Promedios mensuales de las series de niveles de PST registrados en la estación de El Río y AFINL₂₀₀ para el período 1998-2005. r es el valor del coeficiente de correlación entre las dos series ($p < 0.05$).

4.3.2. SERIES DE ÍNDICES DE AFRICANIDAD AFINL Y AFISL: VARIACIÓN INTERANUAL Y ESTACIONAL DEL ORIGEN DE POLVO AFRICANO CON LLEGADA A CANARIAS

Analizando las series de índices de africanidad de nuestro periodo de estudio podemos encontrar cuál es la variabilidad interanual y estacional de la zona de procedencia de las masas de aire africano. En este caso, la serie utilizada comprende los índices calculados para fechas desde septiembre de 1997 hasta mayo de 2004. Esto es debido a que nos interesa tener datos de los inviernos de 1997-1998 y 2003-2004.

En la Figura 4.11 se representan las series de índices de africanidad (índices de permanencia para los sectores Sahara y Sahel) de las masas de aire que han viajado a altura inferiores a 1500 m y han llegado a Tenerife a tres alturas diferentes: 200 m (AFINL₂₀₀ y AFSL₂₀₀, Figura 4.11a), 1500 m (AFINL₁₅₀₀ y AFSL₁₅₀₀, Figura 4.11b) y 2400 m (AFINL₂₀₀ y AFSL₂₀₀, Figura 4.11c). La serie contiene el valor de cada Índice de Africanidad (calculado a las 12 UTC) para cada uno de los días del periodo 1998-2003. Se han representado solo las series correspondientes a alturas de tránsito inferiores a 1500 m porque ya se ha demostrado (sección 4.3.1) que representan bien a las masas de aire que recogen partículas en la capa de mezcla continental africana.

A nivel de superficie, la frecuencia de días en que la procedencia de las masas de aire es la región del Sahara es mayor en invierno, presentándose largos periodos de días con ausencia de intrusión durante los meses de verano. Una excepción ocurre durante el verano de 2003, cuando los índices AFINL alcanzaron valores superiores a los que típicamente se registraron en los meses de verano de los demás años de la serie, coincidiendo con niveles de fondo de PST anormalmente altos (Figura 3.8). Queda claro así que en el verano de 2003 los altos niveles en la serie de PST fueron causados por un incremento de la frecuencia de masas de aire africano que llegaron sobre todo a medianías y altura, cuyo material mineral asociado llegó a nivel del mar por deposición gravitacional. Más adelante se

estudiarán series de anomalías de índices de africanidad, donde esto se verá más claramente.

Tanto en las series completas como en los promedios mensuales cabe destacar que los valores de índice Sahel comienzan a ser apreciables a partir de alturas de llegada de 1500 m. El número de horas de permanencia en la región de Sahel en general es similar para las masas de aire que tienen incidencia en altura (2400 m) y en medianías (1500 m), pero prácticamente nulas a nivel de 200m.

Esto nos lleva a concluir que la región de Sahel no representa una zona fuente de polvo en suspensión para lugares situados a baja altitud en Canarias.

Existe una marcada estacionalidad en los valores de los Índices de Africanidad (Figura 4.11). Los aportes de masas de aire potencialmente cargadas de material mineral desde Sahel ocurren durante los meses de invierno, excepto en unos pocos episodios veraniegos con incidencia en medianías (Figura 4.11b).

Los índices AFINL alcanzan valores máximos en invierno a niveles bajos. Los tiempos de permanencia llegan a ser de aproximadamente entre el 10% y el 20% del tiempo de duración de la trayectoria para los meses de Diciembre a Marzo, presentándose los valores máximos en Enero. En el nivel de 1500 m los máximos tienen lugar en Octubre y Febrero, mientras que a nivel de 2400 m estos índices alcanzan sus valores máximos en verano, representando no más de un 3% del tiempo de permanencia.

Los promedios mensuales de índice Sahel tienen aproximadamente los mismos valores en los niveles de 1500 y 2400 m, y son más importantes en los meses de invierno. Los máximos se encuentran en los meses de Enero, Febrero y Marzo a nivel de 2400 m, aunque el tiempo de permanencia promedio nunca supone más del 1% del tiempo total de las retrotrayectorias.

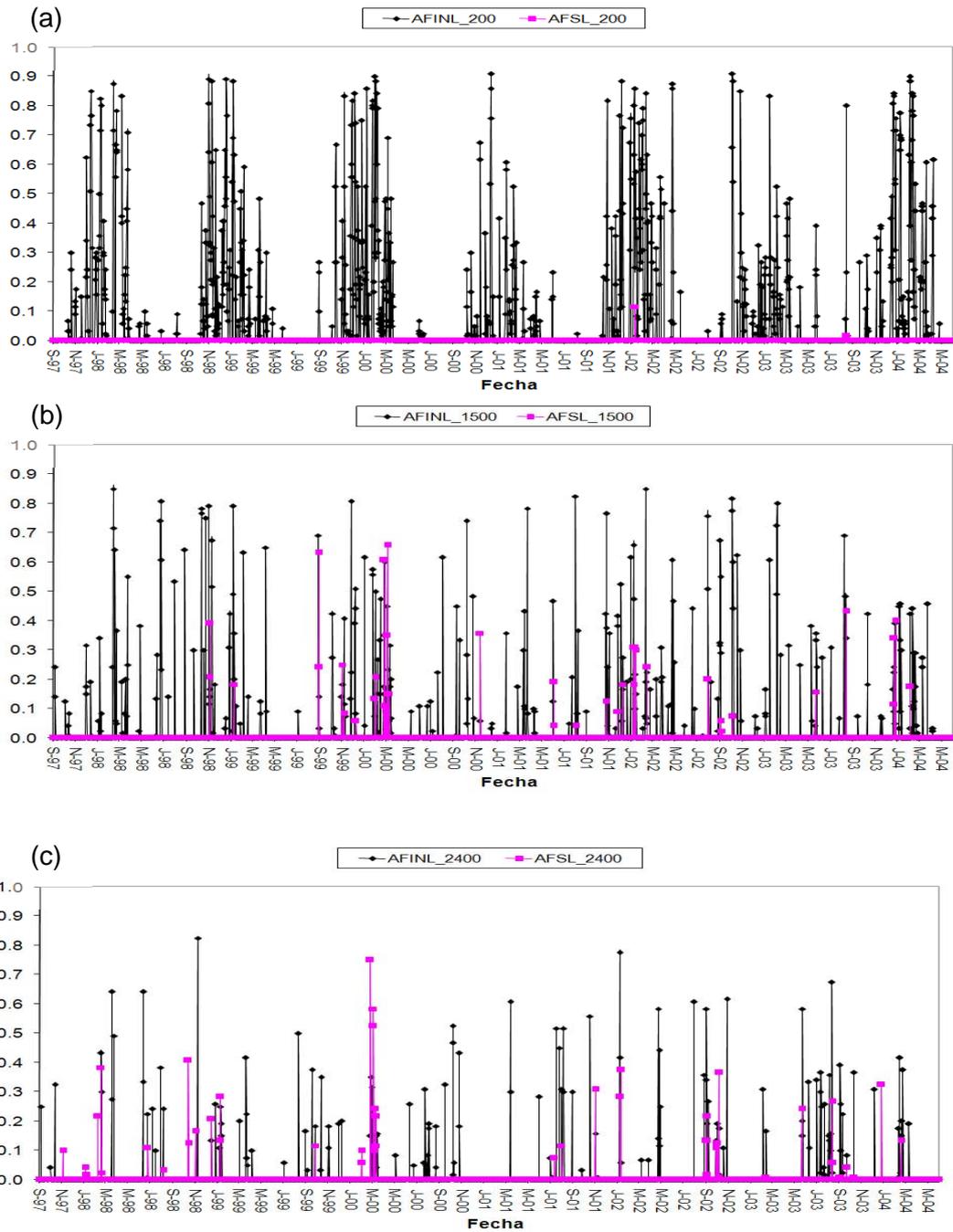


Figura 4.11. Índices de africanidad para transporte a altura inferior a 1500 m para las regiones Sahara (AFINL) y Sahel (AFSL) y para alturas de llegada a 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c).

La suma de los promedios mensuales de índices AFINL y AFSL de los tres niveles considerados muestra que los aportes de masas de aire, tanto Saharianas como de la región de Sahel, son máximos en invierno. El tiempo de permanencia de las masas de aire sobre estas regiones del continente disminuye y se mantiene poco

variable durante el verano, dándose el único incremento notable durante el mes de Agosto (Figura 4.12d).

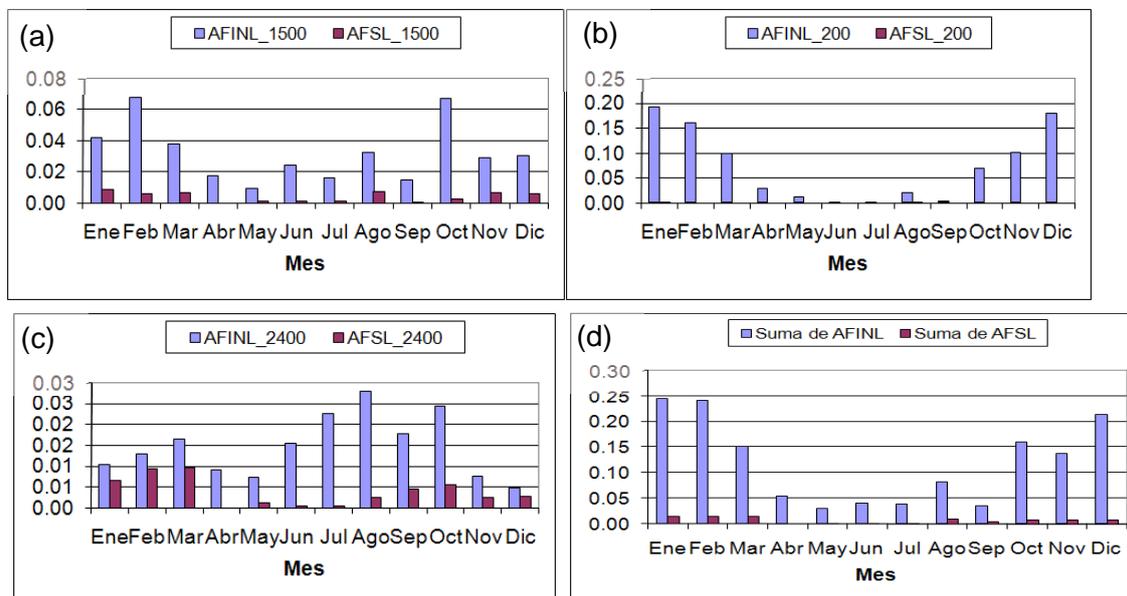


Figura 4.12. Variación anual de los índices de africanidad AFINL y AFSL (serie 1998-2003) para alturas de llegada a 200 m (a), 1500 m (b), 2400 m (c) y suma de las medias mensuales para todos los niveles (d).

En resumen, las principales conclusiones que podemos extraer del análisis de las Figuras 4.11 y 4.12 son:

- A nivel de superficie, las intrusiones tienen lugar básicamente en invierno. Los índices de permanencia de las masas de aire en la región del Sahara son claramente mayores en invierno que en verano.
- Las intrusiones de verano afectan en mayor medida a niveles altos.
- Los aportes de masas de aire desde la región de Sahel solo afectan a medianías y altura, permaneciendo las masas de aire un tiempo considerablemente menor en esa área africana que en la del Sahara.
- Los aportes directos de masas de aire africanas a zonas altas son menos frecuentes pero más regulares a lo largo del año, es decir, con tendencias estacionales menos marcadas.
- En general, teniendo en cuenta el promedio de todos los índices Sahara y Sahel, existe una clara variabilidad estacional en el número de horas de permanencia en el continente africano de las masas de aire que llegan a

Canarias. El tiempo de permanencia es mayor en invierno que durante el resto del año. En verano se produce un incremento en el mes de Agosto.

4.3.3. ANOMALÍAS DE LOS ÍNDICES DE AFRICANIDAD

Una forma de explicar ciertas excepciones en los patrones de variabilidad encontrados para la serie de concentraciones de PST, como pueden ser los altos niveles de fondo encontrados en el verano de 2003 o los máximos muy pronunciados que ocurrieron en Febrero de 1998 y Marzo de 2000, es estudiar la serie de anomalías de los índices de africanidad. Con estas anomalías podemos identificar épocas de especial actividad en el aporte de masas de aire africano a Canarias y tendencias interanuales.

Las anomalías de los índices de africanidad se definen como la diferencia entre el valor del índice para cada día y el valor promedio del mes correspondiente. En la Figura 4.13 se representan los promedios de estas anomalías para los meses de Diciembre-Enero-Febrero Marzo (a) y Junio-Julio-Agosto-Septiembre (b) para todos los índices de africanidad calculados.

En los promedios para los meses de invierno encontramos un periodo bianual en las anomalías de algunos índices, que se hace muy evidente en las del índice $AFINL_{200}$. En los años pares encontramos anomalías cada vez más positivas, mientras que en los años impares estas anomalías son progresivamente más negativas, aunque muy probablemente este comportamiento de la serie sea casual. Los picos de niveles de PST para Febrero de 1998 y Marzo de 2000 coinciden con anomalías positivas en los índices $AFINL_{200}$ para los inviernos de esos mismos años. Los bajos valores en los promedios mensuales de PST registrados durante los inviernos de 1999 y 2003 coinciden a su vez con mínimos de los promedios de las anomalías de este índice para esas fechas.

La excepcionalidad del comportamiento de la serie de PST durante el verano de 2003 se explica, según la Figura 4.13b, por valores máximos de las anomalías positivas de los índices $AFINL_{200}$ y sobre todo de $AFSL_{2400}$, por lo que la deposición gravitacional de material particulado llegado al nivel de 2400 m puede ser la mayor

responsable de este incremento tan marcado de los niveles de fondo de PST registrados.

Al contrario que para los meses de invierno, no se observa un comportamiento periódico en las anomalías de índices de africanidad para los meses de verano.

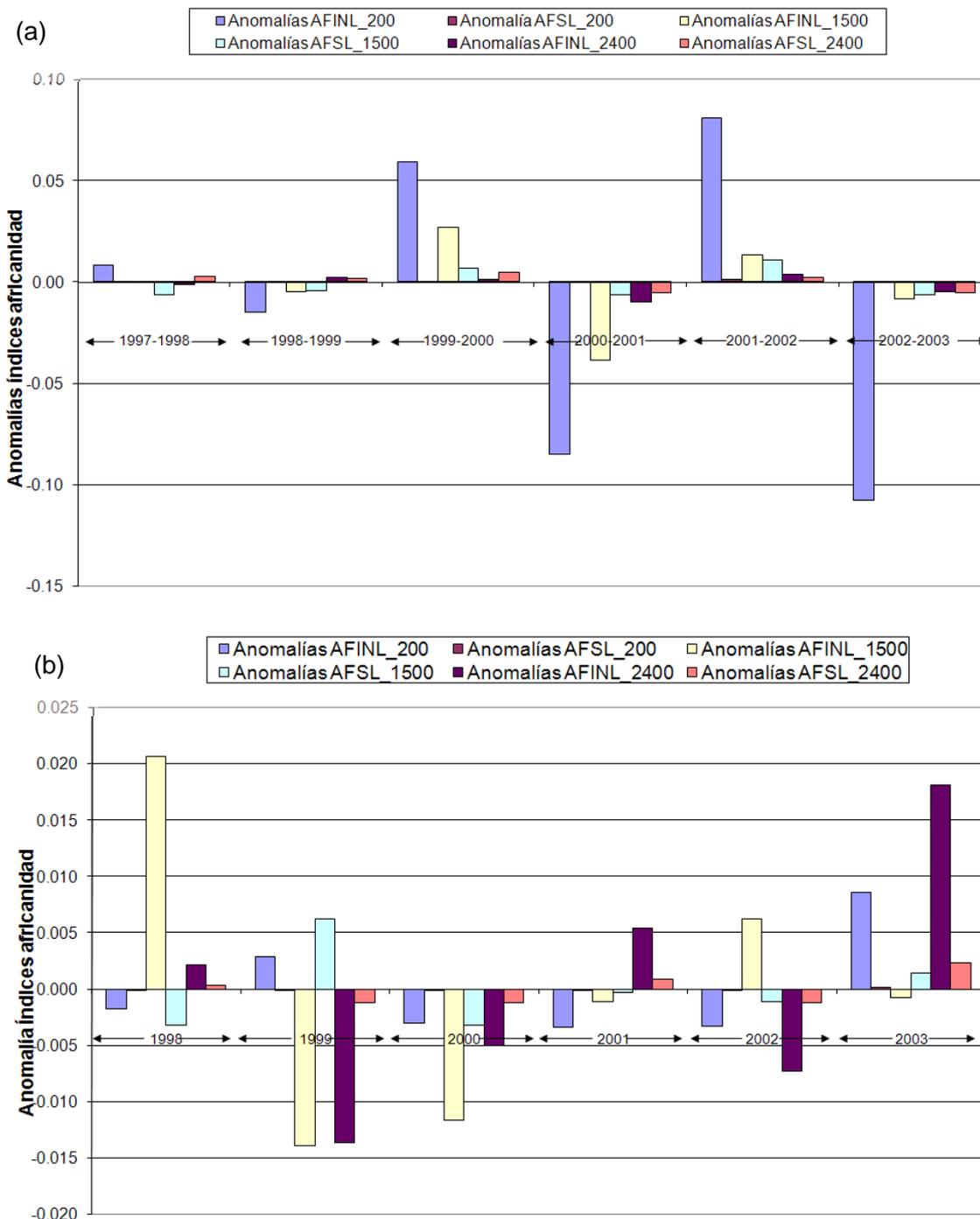


Figura 4.13. Promedios de los periodos Diciembre-Enero-Febrero-Marzo (a) y Junio-Julio-Agosto (b) de las anomalías de los índices de africanidad.

4.3.4. DETERMINACIÓN DE ZONAS FUENTE DEL MATERIAL PARTICULADO A PARTIR DE RETROTRAYECTORIAS MEDIAS Y PROMEDIO MENSUAL DEL ÍNDICE AI DEL TOMS

A continuación se presentan, para cada uno de los niveles de llegada sobre Canarias, los mapas promedio mensual de las retrotrayectorias de los 256 días de intrusión identificados de manera subjetiva. Además se muestran los mapas promedio mensual de AI del TOMS del periodo 1998-2003. A pesar de sus conocidas limitaciones en alturas inferiores a 1000 m, el índice AI del TOMS puede ser un buen indicador de las zonas fuente de polvo en el continente africano debido a que las partículas llegan a elevarse a gran altura en la atmósfera.

Cruzando la información de los dos tipos de mapas podemos estimar en una primera aproximación el origen del material particulado africano que llega a Canarias.

Enero

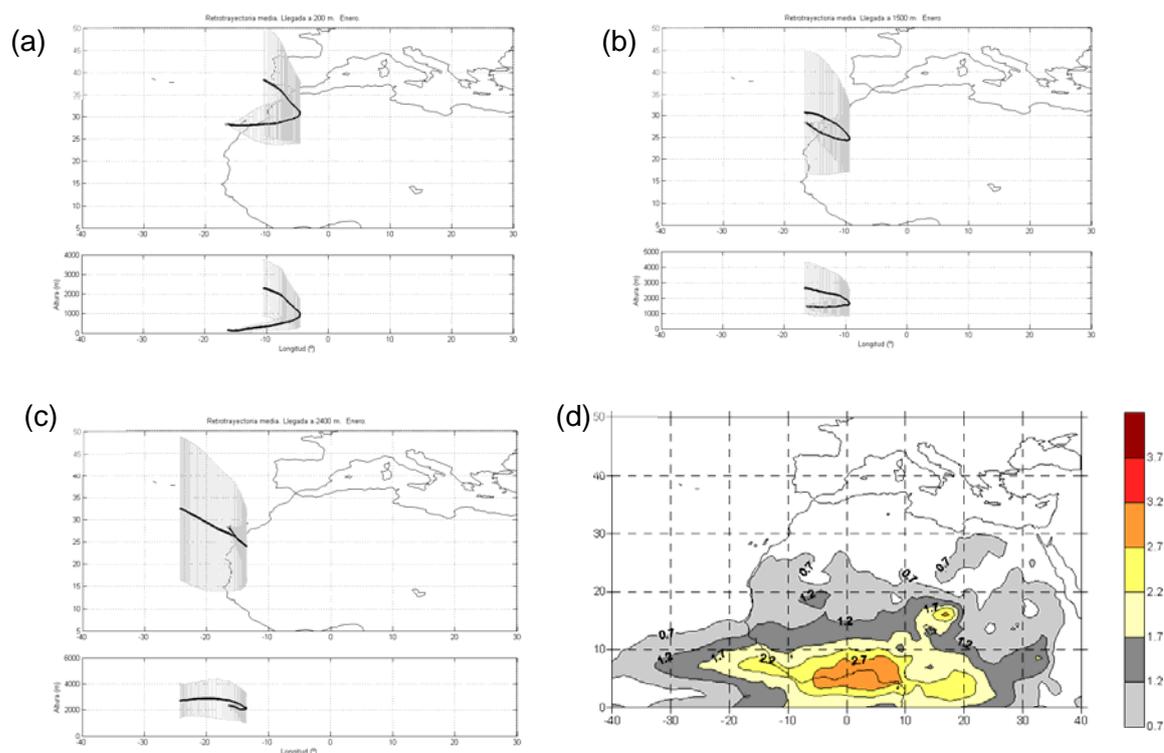


Figura 4.14. Promedio mensual para el mes de Enero de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Enero de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

Las retrotrayectorias promedio del mes de Enero muestran que el transporte de masas de aire africanas ocurre en general por debajo de 3000 m de altura y se confinan en puntos situados a longitudes menores a 5° W en la región del Sahara. Este resultado está de acuerdo con lo mostrado en la Figura 4.5, que indica que la permanencia de masas de aire africanas es mayor en la zona de Sahara que en Sahel para cualquiera de los niveles de llegada. Aunque las zonas con índices AI superior a 1.2 están situadas en la región de Sahel, el promedio de las masas de aire africanas que llegan a cualquiera de las tres alturas consideradas en Canarias no proviene de esas áreas. En el área del Sahel, comprendida entre 5°N y 20°N, los valores altos de AI en los meses de invierno son debidos principalmente a aerosoles carbonosos derivados de la quema de biomasa (Kaufman *et al.*, 2005), aunque también hay contribución del polvo mineral a estos valores. Las masas de aire que llegan desde alturas inferiores a 1500 m en la zona de Sahel lo hacen desde regiones con AI entre 0.7 y 1.2, valores como los presentes sobre el Sahara Occidental (Figura 4.14). De hecho, aunque no tienen aún valor estadístico, las imágenes del satélite MSG indican que en Enero se forman plumas de polvo de corta duración, rápido movimiento y pequeña escala espacial que parten de regiones cercanas a la costa en el Sahara Occidental y afectan a Canarias. Estas plumas de polvo viajan en niveles bajos y el índice AI del TOMS no es capaz de detectarlas.

Enero no es un mes con un promedio mensual de concentración de PST especialmente elevado en la estación de El Río ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 4.3), lo cual parece lógico al observar que, según la Figura 4.14, las masas de aire africanas que llegan al nivel más bajo en Canarias proceden de zonas del continente africano con poca actividad emisora de polvo en suspensión (bajo AI del TOMS), aunque hay que tener en cuenta que el índice AI no es un buen indicador de la presencia de polvo en suspensión en los meses de invierno, cuando las intrusiones son más bajas (Torres *et al.*, 1998, 2002). En todo caso, teniendo en cuenta todos los mapas de la Figura 4.14, la zona fuente de los episodios de PST causados por aporte de polvo africano que tienen lugar en Enero en Canarias parece estar situada en el Sahara Occidental y el Sur de Marruecos.

Febrero

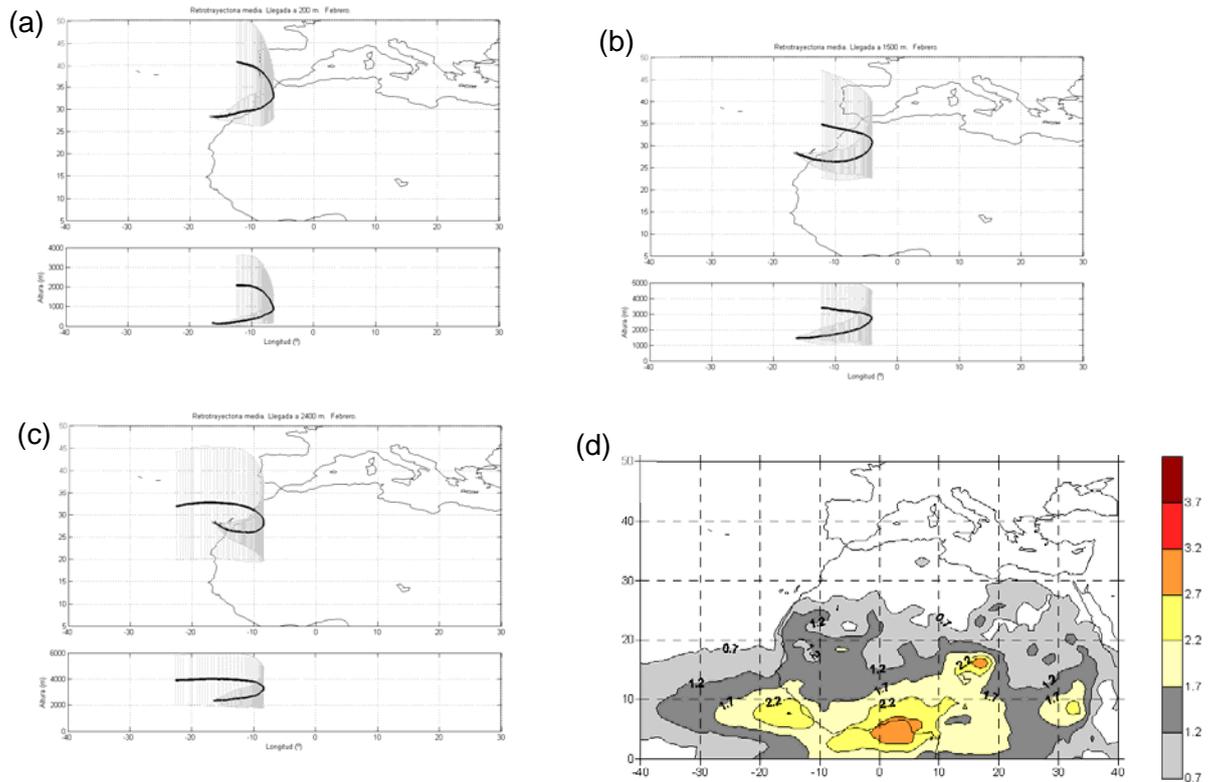


Figura 4.15. Promedio mensual para el mes de Febrero de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Febrero de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

En Febrero, por los mismos motivos expuestos para el mes de Enero, las áreas fuente de las masas de aire africano que llegan a la estación de El Río se encuentran situadas en el Sur de Marruecos y en el Sahara Occidental, a la misma latitud que las islas Canarias. A partir del nivel de llegada de 1500 m existen aportes desde zonas del Norte de Sahel, regiones sobre las cuales el índice AI toma en promedio valores entre 1.2 y 1.7 (Figura 4.15). Febrero presenta los niveles medios mensuales de PST más elevados de todo el año, con medias próximas a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de El Río.

Al igual que ocurre para el mes de Enero, los valores promedio de AI más altos se encuentran en zonas donde la quema de biomasa es muy importante es esta época del año, pero las masas de aire africano que llegan a Canarias no parten de esas áreas. Esta conclusión es compatible con los resultados de Castillo (2006). En su Tesis Doctoral, Castillo no observó diferencias marcadas en la composición química

del polvo africano muestreado entre 2002 y 2003 en Izaña y Santa Cruz. Este hecho se atribuía a que, o bien el área fuente del polvo africano era siempre el Sahara, o bien a que habría una mezcla importante de focos de emisión de polvo. Para este mes, tal y como se comentó para el mes de Enero, las imágenes del MSG muestran plumas de polvo de pequeña escala espacial y rápido movimiento que llegan a Canarias desde zonas costeras del Sahara Occidental.

Marzo

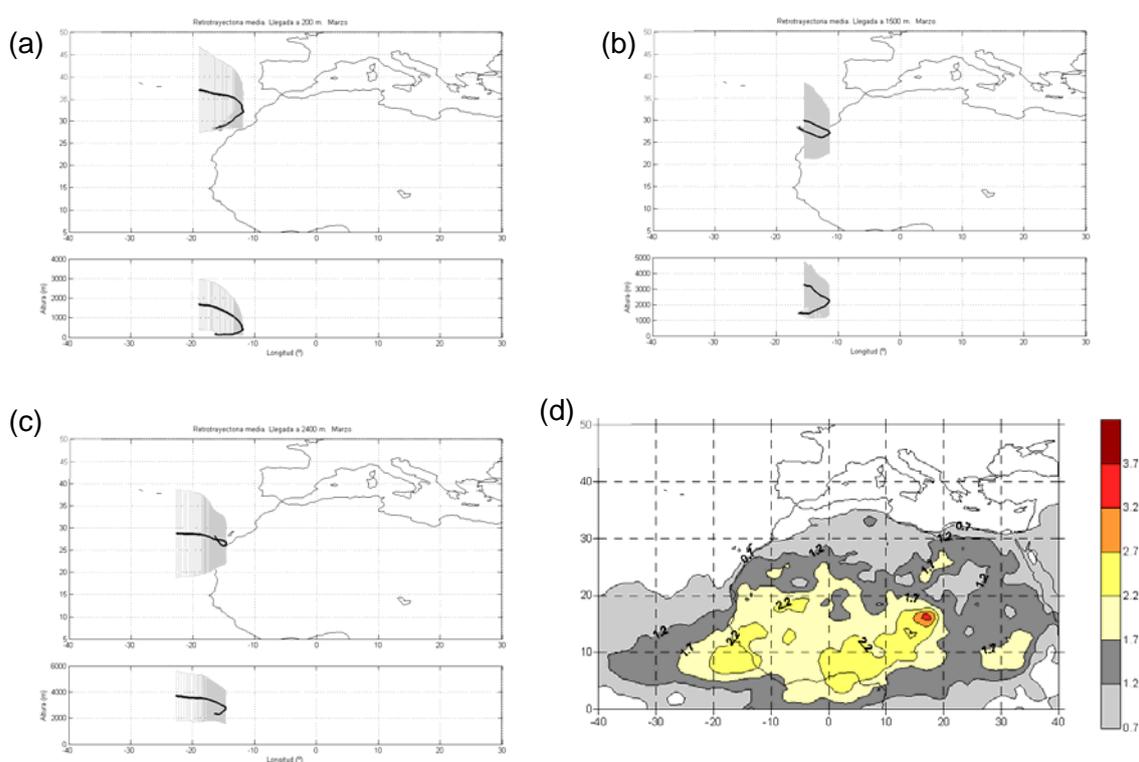


Figura 4.16. Promedio mensual para el mes de Marzo de las retro trayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Marzo de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

Durante el mes de Marzo la retro trayectoria promedio de las masas de aire que llegan a una altura de 200 m sobre Canarias proviene del Atlántico, aunque dentro del intervalo de incertidumbre del promedio entra la costa africana en la zona de Sahara Occidental. Para llegada a 1500 m.s.n.m, la retro trayectoria promedio pasa a alturas inferiores a 2000 m en la zona de Sahara Occidental y Sur de Marruecos, donde los valores del índice AI del TOMS ese mes ya comienzan a ser

considerables (Figura 4.16). La retrotrayectoria para altura de llegada a 2400 m muestra que la posible zona fuente de esas intrusiones está muy confinada al litoral del continente. Podemos concluir que las intrusiones que tienen lugar en Canarias en el mes de Marzo provienen de la costa de Sahara Occidental, la más cercana al archipiélago canario, por lo que es posible que el contenido en partículas gruesas sea el mayor de todo el año.

En el mapa promedio de AI del TOMS puede observarse que las zonas con valores superiores a 1.7 se han extendido hacia latitudes más altas, ya que en Marzo la quema de biomasa en Sahel no es tan importante como en el período Diciembre-Febrero. El Norte de África ya presenta posibles zonas fuente de material particulado crustal. La región más activa sigue siendo la depresión del Bodelé, en el Chad, aunque las partículas de esa zona no llegan a Canarias durante el mes de Marzo. Algunas regiones del Norte del Sahel sí representan una zona fuente para masas de aire que llegan a medianías y altura, aunque siempre en menor medida que las regiones del Sahara.

Marzo presenta niveles promedio de PST bastante elevados ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ello se debe a una combinación de episodios esporádicos, pero muy intensos, de intrusión directa a nivel de superficie (similares a los de Febrero) y la contribución de los episodios de deposición gravitacional vertical a esos niveles de PST medidos.

Para los períodos invernales (Diciembre-Marzo) la incidencia de los aerosoles africanos sobre las islas Canarias depende mucho del régimen pluviométrico de la propia región de Canarias y del Norte de África. Así, durante los años en los que el régimen pluviométrico es más alto, la incidencia de las intrusiones sobre los niveles de PST en el archipiélago será menor aunque el valor de AI sobre la región fuente no haya experimentado variación significativa.

Abril

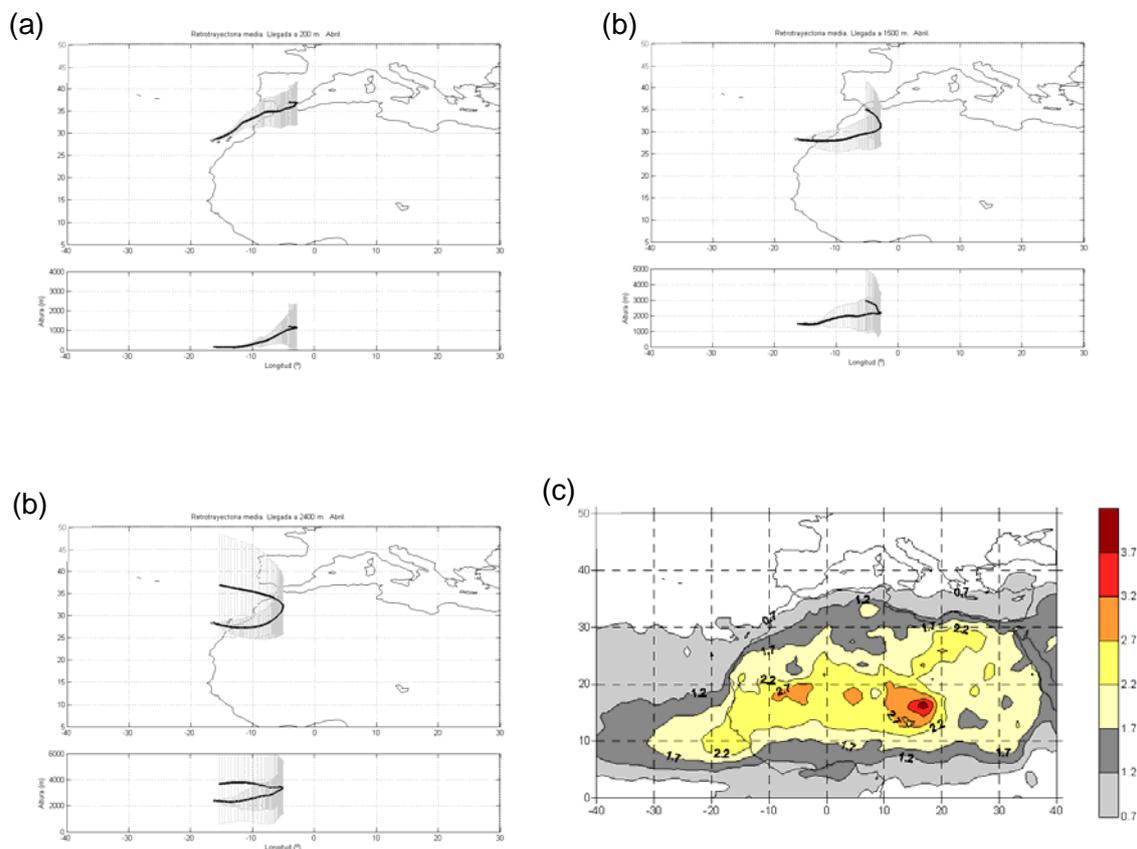


Figura 4.17. Promedio mensual para el mes de Abril de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Abril de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

Abril es el mes con promedio mensual de niveles de PST más bajo en la estación de El Río ($16 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Este hecho concuerda con la retrotrayectoria promedio para masas de aire que llegan a niveles bajos sobre Canarias, ya que las zonas de procedencia de estas se sitúan en el Atlántico y en regiones del Norte de Marruecos que no son áreas fuente de material particulado como, por ejemplo, la región del Atlas. Para las partículas con llegada a 1500 m y 2400 m, la zona fuente del material mineral vuelve a situarse entre el Sur de Marruecos y Norte de Sahara Occidental, donde los valores de índice AI del TOMS ya superan como promedio mensual el valor de 1.2 (Figura 4.17). De nuevo, las zonas más activas en el continente africano se sitúan en la región del Sahel, especialmente en el Chad,

Níger y Malí, pero las partículas que parten de esas regiones no llegan a las islas Canarias.

Mayo

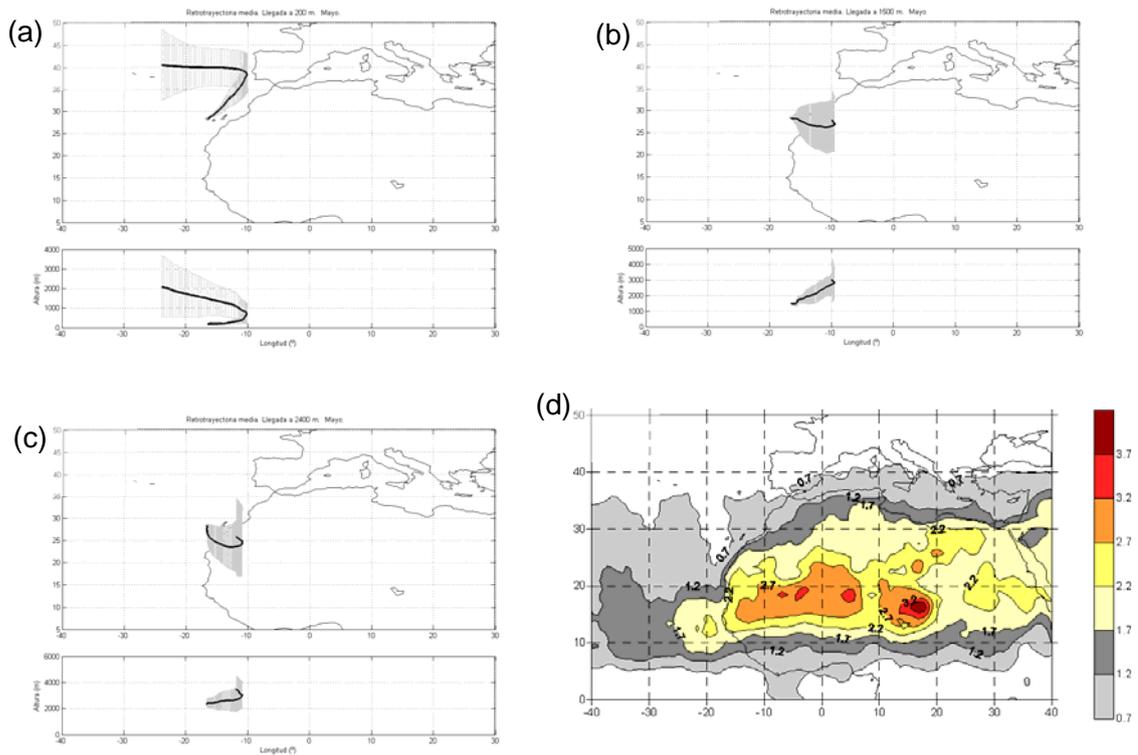


Figura 4.18. Promedio mensual para el mes de Mayo de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Mayo de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

La retrotrayectoria promedio para masas de aire con llegada a 200 m para el mes de Mayo indica que normalmente se produce advección atlántica en este nivel. De hecho, las concentraciones medias de PST en la estación de El Río para el mes de Mayo son relativamente bajas ($18 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Por lo tanto, la capa de mezcla marítima no está afectada por intrusiones directas procedentes de África. Estos aportes directos de material particulado desde África

solo tienen lugar desde zonas de la costa Noroeste de Marruecos, donde durante el mes de Abril el índice AI del TOMS tiene valores superiores a 0.7 (Figura 4.18).

El material particulado que llega a 1500 m y 2400 m sobre Canarias puede tener origen en Argelia, Marruecos, Sahara Occidental e incluso zonas de Mauritania que ya pertenecen a lo que hemos considerado Sahel.

Junio

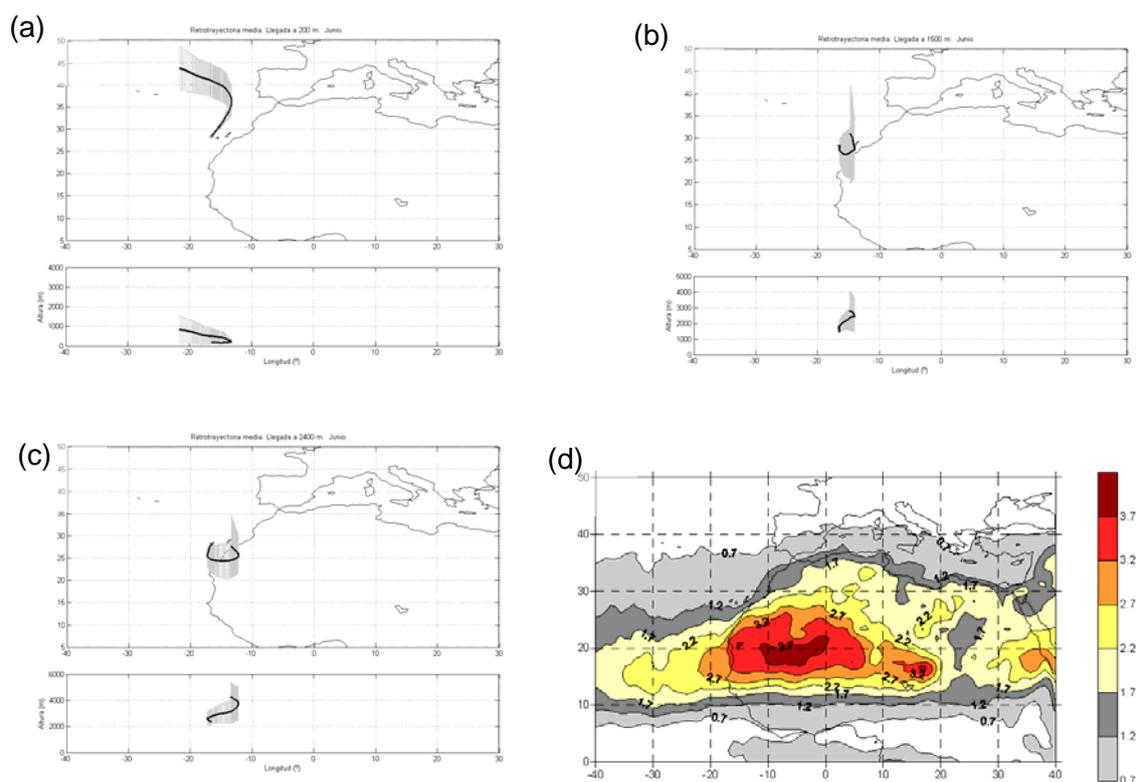


Figura 4.19. Promedio mensual para el mes de Junio de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Junio de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

En Junio el aporte directo de material particulado desde África hasta regiones situadas a baja altura sobre Canarias es despreciable. Las concentraciones medias de PST registradas en la estación del Río son relativamente bajas ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y cuando se incrementan se deben a deposición gravitacional de las partículas de polvo africano que llegan a mayores alturas. Estas últimas provienen, según las

retrotrayectorias promedio, de zonas situadas en Sahara Occidental y Norte de Mauritania donde, según el mapa de promedios de AI del TOMS, los niveles de índice AI llegan a ser de 3.2 (Figura 4.19). Como puede observarse en ese mismo mapa, las regiones más activas durante Mayo se extienden e intensifican en Junio, aunque la mayor parte de las zonas con mayor intensidad de AI continúan encontrándose en el área de Sahel.

Julio

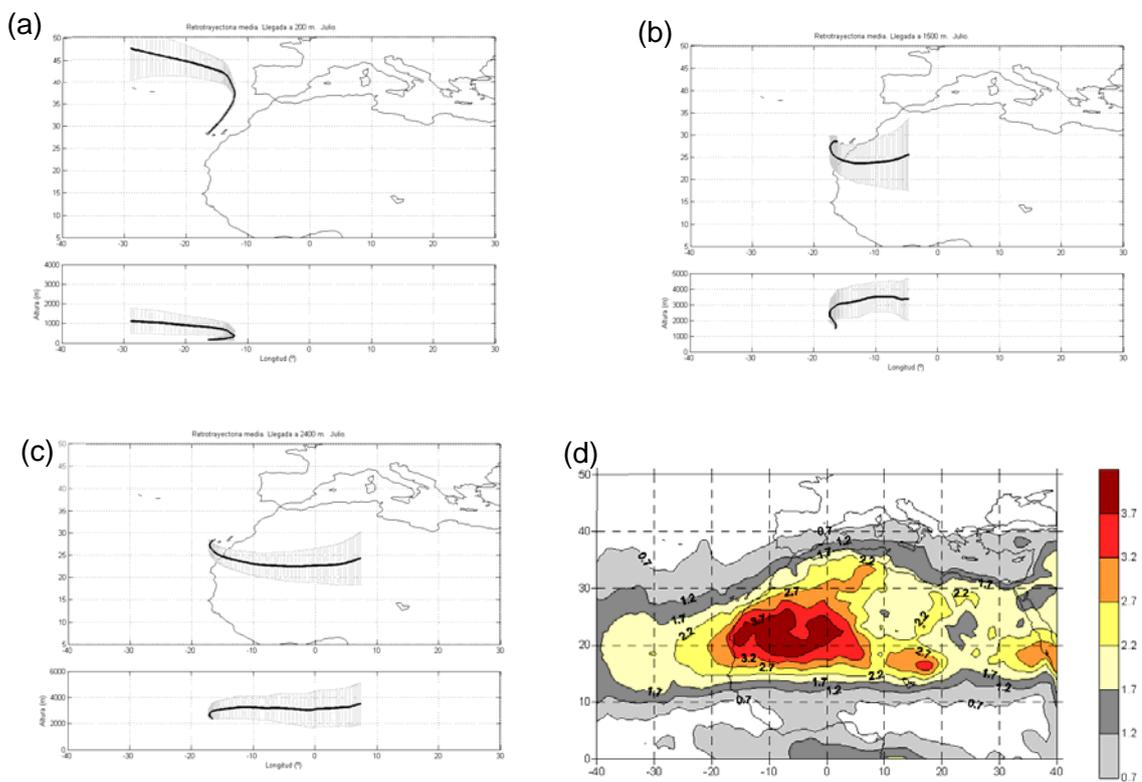


Figura 4.20. Promedio mensual para el mes de Julio de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Julio de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

En el mes de Julio el promedio mensual de las retrotrayectorias con llegada a 200 m indica que la situación habitual es la de advección atlántica. Por lo tanto, las partículas africanas que llegan a niveles bajos sobre Canarias lo hacen gracias al mecanismo de deposición gravitacional desde niveles medios y altos. Un dato que confirma la importante presencia de polvo en suspensión en medianías y altura de

las islas durante el mes de Julio es el máximo del nivel del fondo de AI del TOMS que se encuentra para Canarias durante este mes, con valores que llegan a ser de 2.2. Los niveles promedio de PST siguen siendo relativamente bajos, pero superan a los de Enero o Abril-Mayo ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a valores entre 16 y $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente). Las partículas depositadas pueden provenir de una amplia franja que comprende a los países de Sahara Occidental, Mauritania, Sur de Argelia, Malí, Níger y Chad. Es en estas zonas donde el índice AI del TOMS adquiere valores máximos, superiores a 3.7, en el promedio mensual de este mes (Figura 4.20).

Es este el primer mes donde las regiones fuente de material particulado que llega a Canarias coinciden plenamente con las regiones donde el AI promedio mensual es máximo.

Agosto

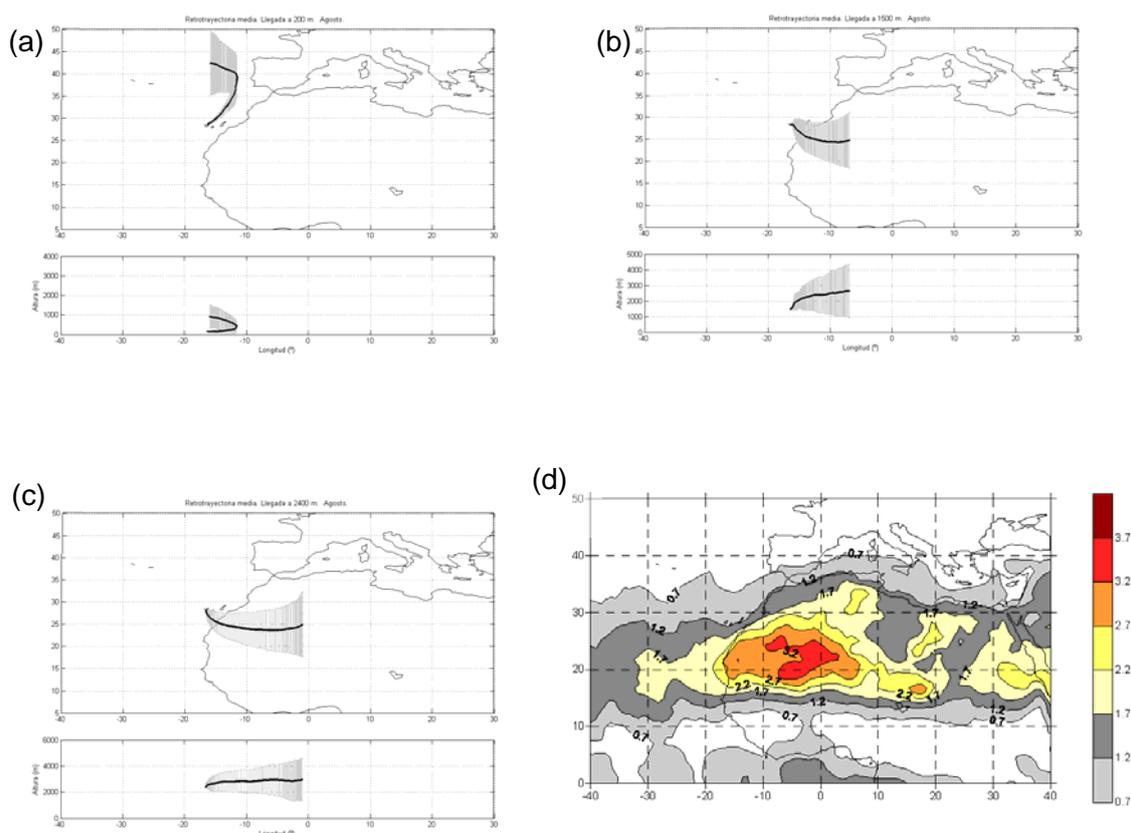


Figura 4.21. Promedio mensual para el mes de Agosto de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Agosto de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

De nuevo encontramos que la retrotrayectoria promedio para el nivel de 200 m es claramente de advección atlántica, aunque esta vez se pueden considerar orígenes de material particulado desde el Noroeste de Marruecos, justo al Sur del Atlas, que llegan directamente a niveles bajos. Las intrusiones más importantes de masas de aire africano tienen lugar sin duda en los niveles medios y altos, desde las zonas con mayor índice AI del TOMS en el Sahara Occidental, Mauritania, Malí, Argelia y Níger (Figura 4.21). El mes de Agosto es el segundo mes del año con mayor valor promedio de AI del TOMS sobre las islas, con valores que llegan a ser de 1.7, lo que confirma que las intrusiones de polvo durante este mes en las islas afectan a niveles medios y altos. En Agosto el AI promedio en África es menos intenso que en Julio, pero en Canarias los niveles promedio mensuales de PST son más elevados que en Julio. Esto se debe a que el número de horas de permanencia de las masas de aire africanas que pasan sobre zonas fuente a alturas por debajo de 1500 m es superior en Agosto, por lo que las masas de aire llegan más cargadas de material particulado. El valor promedio mensual de los niveles de PST en superficie es el mayor del periodo estival ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el tercero en importancia en el periodo anual. Esto es debido, como se ha explicado anteriormente, a que la alta permanencia de las masas de aire en África favorece que lleguen más cargadas de partículas crustales, de manera que los episodios de deposición gravitacional, aunque menos frecuentes, contribuyen más a elevar los niveles de PST, y los esporádicos episodios directos a nivel de superficie contengan una mayor concentración de polvo.

Septiembre

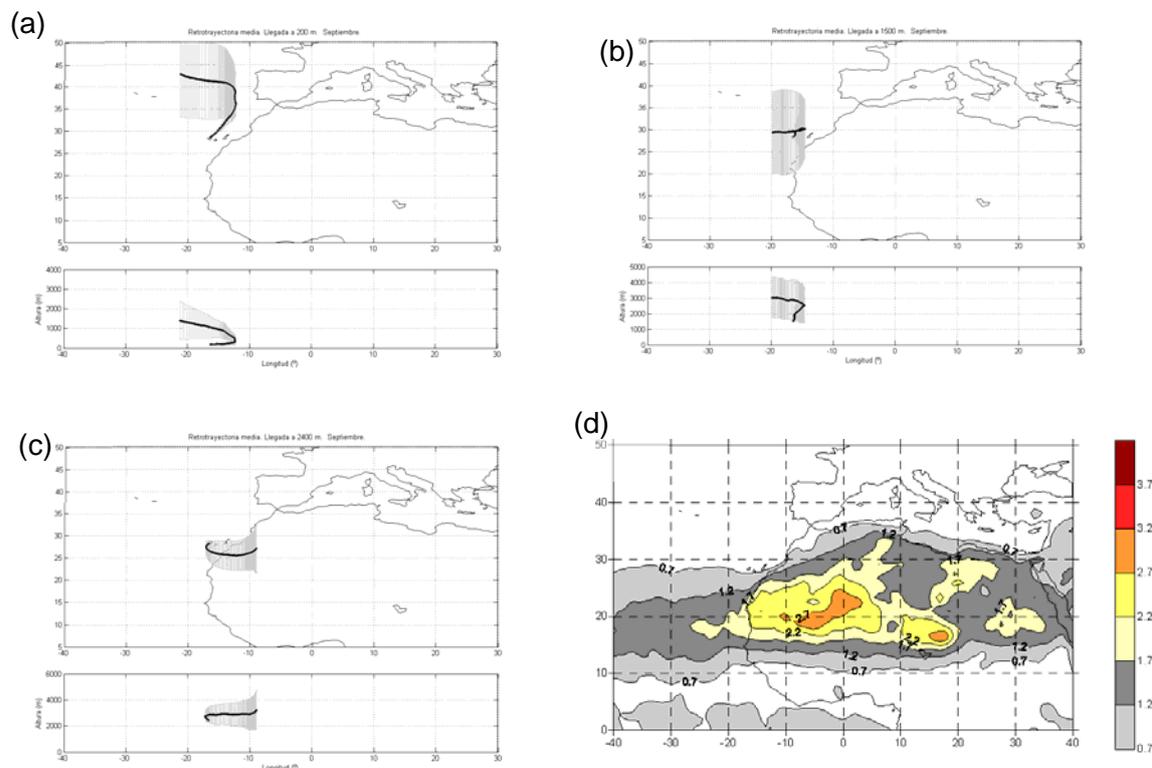


Figura 4.22. Promedio mensual para el mes de Septiembre de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Septiembre de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

Durante el mes de Septiembre, la intensidad de las zonas con mayor AI del TOMS se debilita. La retrotrayectoria promedio de las masas de aire que llegan a niveles bajos en Canarias muestra que, dentro de la incertidumbre del promedio, la única zona fuente de material particulado que lleva material cristal directamente a esos niveles podría estar situada al sur de la región montañosa del Atlas (Figura 4.22). Las masas de aire con llegada a 2400 m parten de regiones del Sahara Occidental, Norte de Mauritania y Malí. El contenido de material particulado transportado por estas masas de aire es menor que el transportado en Agosto ($23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ frente a $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$), hecho constatado también por el debilitamiento del AI registrado por el TOMS.

Octubre

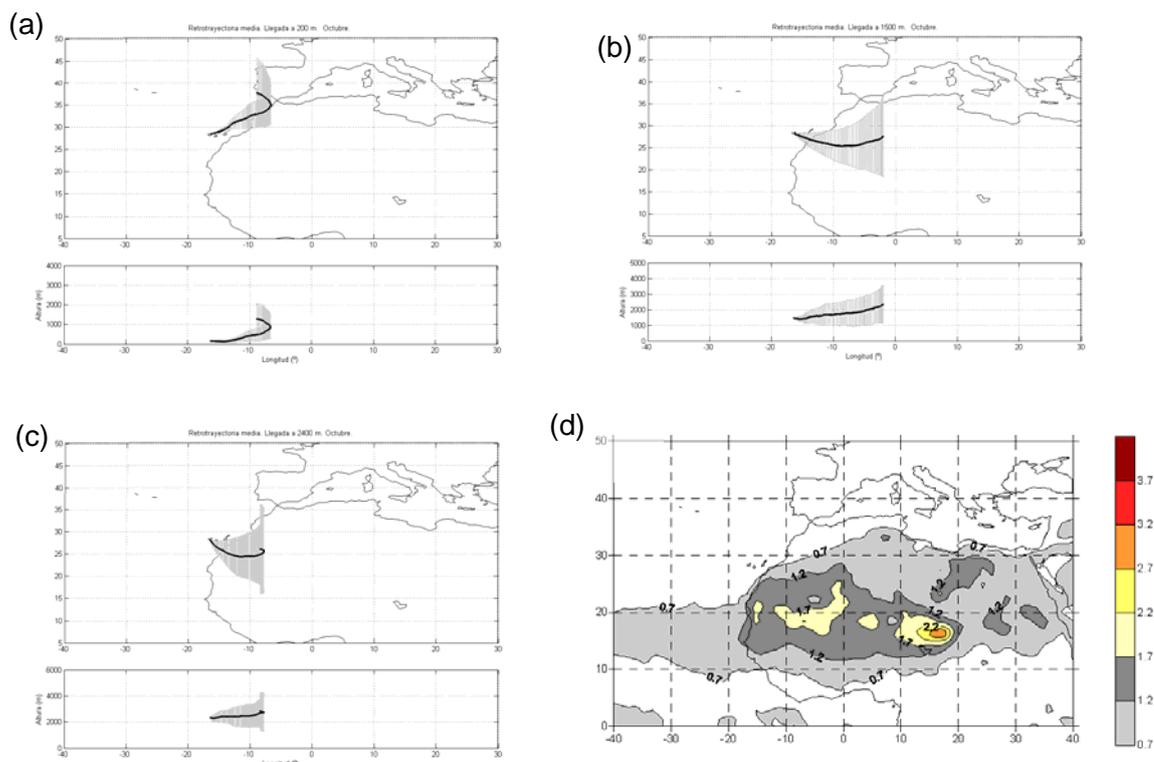


Figura 4.23. Promedio mensual para el mes de Octubre de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Octubre de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

En Octubre vuelven a cobrar protagonismo las retrotrayectorias de origen norteafricano para los puntos de llegada a 200 m sobre Canarias. Las partículas que llegan directamente a este nivel pueden partir del Sur de Marruecos y Oeste de Argelia (Figura 4.23).

Las masas de aire con llegada en medianías son las que viajan durante más tiempo, pudiendo partir incluso desde el Este de Argelia y Níger. Los valores máximos del índice AI del TOMS en el mapa promedio mensual son menores respecto a los encontrados para el mes de Septiembre. Esto es un indicativo de que las plumas de polvo comienzan a desplazarse a alturas cada vez más bajas a partir de este mes. La zona fuente más activa es la depresión del Bodelé en el Chad, aunque de allí no parte material particulado que pueda llegar a Canarias.

Aunque la frecuencia de episodios africanos es relativamente alta (6 días/mes), los valores de AI en las áreas fuente son bajos. Esto explica la baja emisión de aerosoles desde zonas fuente y por lo tanto el hecho de que los niveles de PST en Canarias para el mes de Octubre sean relativamente bajos ($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Noviembre

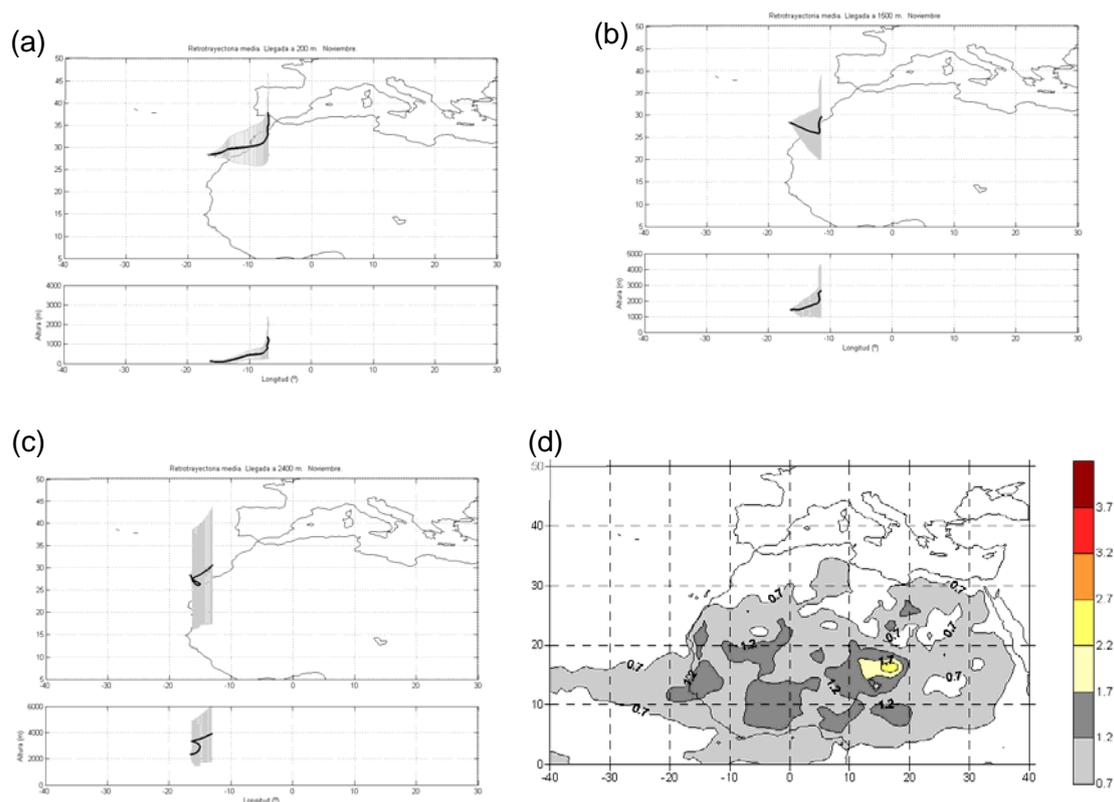


Figura 4.24. Promedio mensual para el mes de Noviembre de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Noviembre de AI del TOMS para 1998-2003 (d).

En el mapa promedio de AI del TOMS para el mes de Noviembre las regiones con valores de AI superiores a 0.7 vuelven a tomar la habitual configuración de invierno (Figura 4.24), similar a la antes vista para Enero (Figura 4.14) y Febrero (Figura 4.15).

Las masas de aire que llevan material particulado a niveles bajos sobre Canarias parten de latitudes superiores a 25°N y pueden tener origen en áreas del Norte de Mauritania, el Sahara Occidental y Marruecos. Los aportes de masas de aire

africano a niveles medios y a cumbres de Tenerife son bastante menos importantes que a niveles bajos.

Durante el mes de Noviembre el transporte de masas de aire africano a Canarias es frecuente, al igual que lo es en Enero y Febrero. Sin embargo, la emisión de material particulado en las áreas fuentes es muy baja, por lo que los niveles de PST registrados en la estación de El Río son muy bajos ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio mensual).

Diciembre

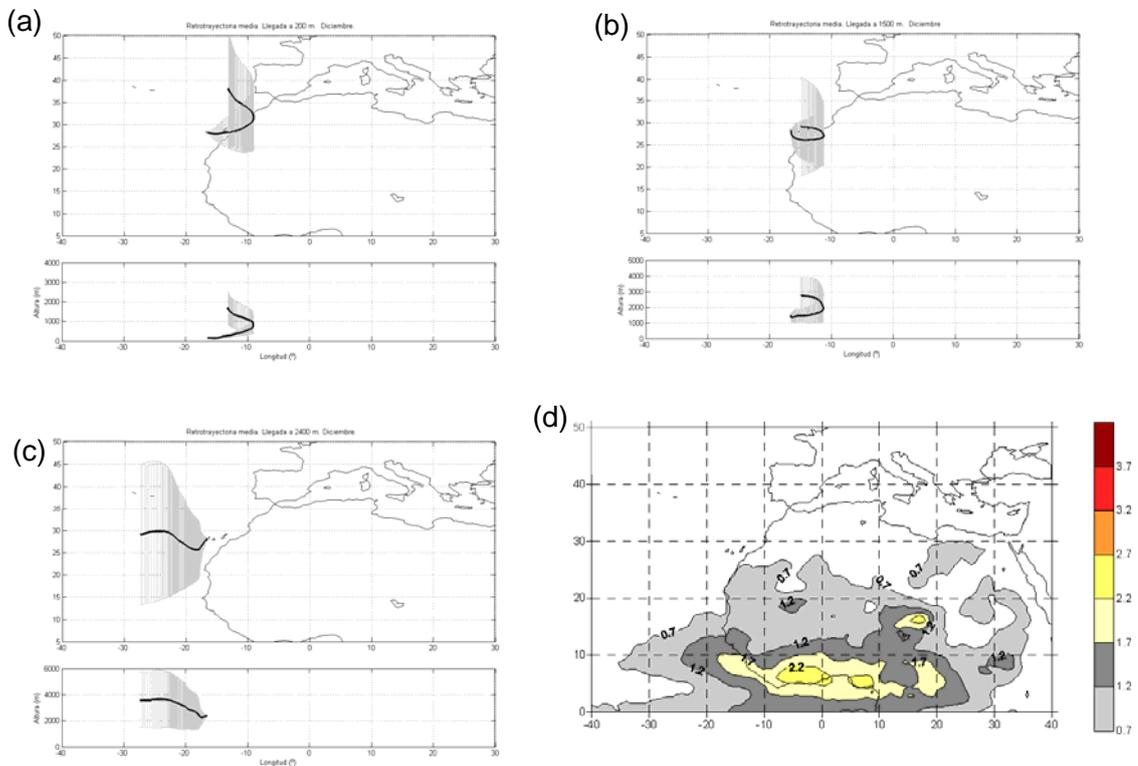


Figura 4.25. Promedio mensual para el mes de Diciembre de las retrotrayectorias de los días de intrusión del periodo 1998-2003, para llegada a nivel de 200 m (a), 1500 m (b) y 2400 m (c), así como mapa promedio de Diciembre de AI del TAMSAN-2 para 1998-2003 (d).

En las retrotrayectorias promedio para el mes de Diciembre se hace más patente el hecho de que las intrusiones de masas de aire africano son más importantes a medida que disminuye la altura de llegada. En este caso, la retrotrayectoria

promedio con llegada a 2400 m de altura es de advección atlántica, con posibilidad de intrusión africana solo desde el Norte de Sahara Occidental (Figura 4.25).

Para el nivel de 200 m, las masas de aire parten de Sahara Occidental y Marruecos y el transporte se produce siguiendo la línea del litoral. En el mapa promedio de AI del TOMS no se observan valores altos de AI para estas zonas, lo que indica que el material particulado es inyectado hasta alturas mucho más bajas que en verano o que, como se ha comentado para los meses de Octubre y Noviembre, la emisión de polvo en las zonas fuentes es muy baja (por ejemplo, porque las condiciones meteorológicas y del suelo no sean las adecuadas).

Los valores más altos en el promedio mensual de AI vuelven a situarse en la zona de Sahel, a latitudes entre 5°N y 10°N, donde la quema de biomasa es importante durante los meses de Diciembre, Enero y Febrero (Kaufman *et al.*, 2005).

4.3.4.1. El índice AI del TOMS como indicador de la presencia de polvo africano en Canarias

Con el objetivo de determinar la capacidad del índice AI del TOMS para indicar la presencia de polvo africano sobre Canarias en diferentes épocas del año, se han representado en la Figura 4.26 los valores diario de AI frente a los promedios diarios de PST medidos en la estación de El Río para días de intrusión africana de invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) y verano (Junio-Julio-Agosto-Septiembre) del periodo 1998-2003. Hay que tener en cuenta que los datos diarios de AI son correspondientes a una sola medida realizada a mediodía, mientras que los valores de PST son promedios diarios. Esto supone una fuente de incertidumbre, ya que a lo largo de un mismo día los niveles de PST pueden variar considerablemente, en especial si se trata de un día de comienzo o finalización de un episodio de intrusión de polvo africano.

Las señales más débiles del índice AI del TOMS muestra mucho ruido, por lo que establecemos un valor mínimo de AI > 0.7 a partir del cual consideramos que el AI detecta los aerosoles absorbentes en el rango UV en toda la columna vertical integrada sobre la Tierra (Herman *et al.*, 1997; Hsu *et al.*, 1999). Encontramos que en la Figura 4.26 hay menos valores con AI > 0.7 en invierno que en verano. Sin embargo, diversos estudios concluyen que es precisamente en invierno cuando la

frecuencia de intrusiones de polvo africano en Canarias a nivel de superficie es mayor (Viana *et al.*, 2002; Castillo, 2006; Alonso-Pérez *et al.*, 2007). Teniendo esto en cuenta, los datos sugieren que el AI del TOMS parece menos capaz de detectar la presencia de polvo en la atmósfera en invierno que en verano. Además, en la Figura 4.26 puede observarse que para los días de intrusión africana ocurridos en verano, por ejemplo aquellos días con niveles de PST $> 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de El Río (Alonso-Pérez *et al.*, 2007), no existe correlación entre los valores de AI y los de PST. Para días con niveles bajos de PST en la estación de El Río el índice AI detecta un gran número de episodios africanos. Estos episodios podrían ser aquellos ocurridos en medianías y cumbres de las islas, pero que no afectaron directamente al nivel de la estación de El Río.

Por lo tanto, y de acuerdo a los resultados aquí expuestos, encontramos que el índice AI del TOMS no es un buen indicador de la presencia de polvo africano en la atmósfera de Canarias para los meses de invierno, cuando las intrusiones tienen lugar principalmente por debajo de 1000 m.s.n.m. Este resultado está de acuerdo con Torres *et al.*, (2002). Nuestros resultados también demuestran que no existe correlación entre los valores de AI y de PST medidos en una estación rural situada en la región de Macaronesia a nivel de 500 m.s.n.m.

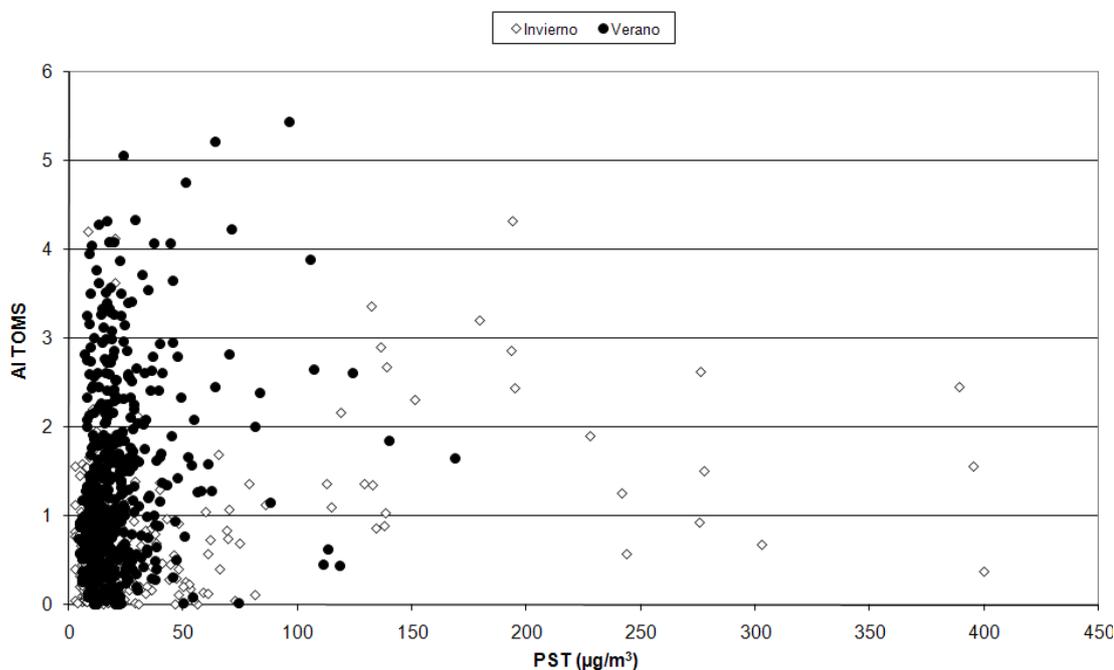


Figura 4.26. Comparativa entre el índice AI del TOMS diario y el promedio diario de PST durante el invierno (Diciembre-Marzo) (diamantes blancos) y durante el verano (Junio-Septiembre) (puntos negros). Las medidas de PST fueron realizadas entre 1998 y 2003 en la estación de muestreo de El Río.

4.3.5. ÁREAS FUENTE DEL MATERIAL PARTICULADO IDENTIFICADAS A PARTIR DEL MÉTODO DE LOS TIEMPOS DE RESIDENCIA

A partir del método de los tiempos de residencia se han identificado las regiones fuente de masas de aire que han elevado las concentraciones de partículas en Canarias en el periodo 1998-2003 (Figura 4.27).

Las fuentes más importantes se desplazan hacia el Sur del Norte de África con la altura de llegada de las masas de aire a Canarias. Este resultado está de acuerdo con el que previamente habíamos encontrado a partir del estudio estadístico de la serie de Índices de Africanidad. En invierno, la mayor parte del transporte de las masas de aire tiene lugar en alturas inferiores a 1500 m.s.n.m. y las áreas fuente se encuentran localizadas en un área del continente africano limitada por las coordenadas geográficas [18°N, 35°N], [15°W, 15°E]. Se encuentran otras pequeñas fuentes en latitudes inferiores a 20°N solo para transporte hacia cumbres de las islas. Las masas de aire procedentes de África en verano y que alcanzan zonas altas de las islas Canarias tienen como origen principalmente el Sur de Argelia.

Para niveles bajos (200 m.s.n.m) en invierno, los mayores tiempos de residencia de las masas de aire se observan sobre la región limitada por las coordenadas [26°N, 34°N], [5°W, 14°E] que se extiende desde el Gran Erg Occidental hasta el Gran Erg Oriental en Argelia (Figura 4.28a). Cabe destacar el efecto orográfico de “sombra” causado por la cordillera del Atlas. El Gran Erg es precisamente una de las zonas mejor definidas en el mapa de promedio anual del índice IDDI (Brooks, 2000; Brooks y Legrand, 2000).

La región de lagos de Wilaya d’El Oued (Noreste de Argelia) es una región secundaria de alto tiempo de residencia de las trayectorias que se observa además en los mapas de invierno del índice AI del TOMS (Prospero *et al.*, 2002). Sin embargo, el índice AI del TOMS no detecta el área fuente sobre Argelia. Este desacuerdo entre nuestro resultado y el obtenido a partir del índice AI del TOMS puede ser debido a la dificultad que tiene este índice para detectar polvo en la capa mezclada continental, a alturas inferiores a 1000 m (Torres *et al.*, 1998, 2002). El

análisis de las series de Índices de Africanidad mostró que el transporte de polvo desde África hacia Canarias en invierno tiene lugar principalmente en altitudes bajas. Este factor, unido a la limitación del índice AI del TOMS anteriormente citada, elimina la posibilidad de detección de los eventos de invierno que afectan a nivel de superficie a partir del método basado en este índice. Podemos identificar además fuentes secundarias de masas de aire en el Sur de Marruecos, Norte del Sahara Occidental (justo enfrente de Canarias), Sur de Argelia, Noreste de Mali y Oeste de Niger.

En la Figura 4.27b puede observarse que, para niveles bajos en verano, no se encuentra transporte de masas de aire africano a partir del análisis de trayectorias. Los índices IDDI y AI del TOMS identifican varias fuentes de polvo en África durante el verano, pero a partir del método del tiempo de residencia se ha podido encontrar que el transporte de polvo hacia Canarias no es efectivo a baja altura. Esto es debido a que la mayoría de las masas de aire en verano que llegan a Canarias en alturas bajas provienen de procesos de advección atlántica. La única influencia en los niveles de PST es debida a procesos de deposición gravitacional de partículas desde capas altas de la atmósfera.

Para niveles medios (1500 m.s.n.m) en invierno se encuentran tiempos de residencia de las masas de aire relativamente altos sobre el Gran Erg Oriental ([24°N, 30°N], [8°W, 3°E]) y en la frontera entre Mali y Argelia. Esta última zona, un área circular centrada aproximadamente en 19°N, 3°E y de alrededor de 225 km de diámetro, se encuentra cerca de la ciudad de Ti-n-Zaotuâtene. Es una de las mayores áreas fuente identificadas, además de ser una región fuente activa durante todo el año según resultados basados en el índice AI del TOMS (Prospero *et al.*, 2002). Se detectan otras áreas fuente menos importantes en el extremo Sureste del Gran Erg Oriental (Oeste de Libia), en el Noroeste del macizo de Ahggar Massif, o en el Este de Argelia, donde el índice IDDI identifica una región fuente importante durante el mes de Julio (Brooks y Legrand, 2002), y de nuevo en la región de lagos de Wilaya d'El Oued.

A partir de trayectorias con llegada a medianías de las islas en verano se encuentran señales débiles sobre el centro de Argelia, entre las latitudes 20°N y 30°N y en la frontera entre Mauritania, Senegal y Mali (14°N, 12°W en la región de Aroundou), lo que confirma la importancia de los sedimentos de ríos secos como

ricas regiones fuente de polvo. Además se encuentran otras fuentes en el Sureste de Mauritania, en los flancos de las montañas del Parque Nacional de Nikolo-Koba, en la región de lagos (lagos Abari Mare y Léné Mare en Tambacounda, Senegal) y otra vez en la región circular de la frontera entre Mali y Argelia, cerca de la ciudad Ti-n-Zaotuâtene.

Estos resultados están en buen acuerdo con los que se encuentran a partir del índice IDDI, pero en desacuerdo con los resultados basados en el índice AI del TOMS para alturas por debajo de 1500 m, lo que podría ser debido a la pobre sensibilidad que el índice AI tiene a la presencia de polvo en niveles bajos (Mahowald y Dufresne, 2002), circunstancia ya comentada.

En cuanto a los niveles altos (2400 m.s.n.m), en invierno el mapa de tiempos de residencia de las trayectorias (Figura 4.27c) es similar al calculado para niveles medios, aunque las regiones fuente indicadas son más débiles. Se pueden identificar 5 áreas fuente principales. Tres de ellas están situadas en Argelia, en el Norte (zona de Erg, al Sur de las montañas del Atlas), Sur (en la frontera con Niger) y en el centro (Suroeste del Gran Erg Oriental) respectivamente. La cuarta región fuente se detecta en el Este de Mali (16°N, 3°E), al Este de la región de Gao, y la quinta fuente se observa en Niger (16°N, 10.5°E) en el Sureste de las montañas de Aïr, en el desierto de Bilma.

Durante el verano puede encontrarse una extensa fuente principal de polvo en el Sureste de Argelia, al Sur de las montañas de Ahaggar. Esta fuente, también identificada por el índice AI del TOMS, se extiende en la región limitada por las coordenadas [20°N, 25°N], [5°W, 13°E]. Existen fuentes secundarias en la mitad Norte de Mauritania y Mali, centro y Noreste de Argelia, región Noreste de Nigeria y en la depresión del Bodelé en Chad.

Es importante destacar que los estudios desarrollados por otros autores (por ejemplo, los ya mencionados basado en los índices IDDI y AI del TOMS) muestran que la depresión del Bodelé es la región fuente de polvo más importante del mundo. Sin embargo, el método de los tiempos de residencia indica que esta región geográfica es una fuente menor para las intrusiones de polvo que afectan a las islas Canarias.

Nuestros resultados muestran que las zonas con mayor tiempo de residencia de las masas de aire para días de intrusión africana en Canarias están asociadas a bajas topográficas o están situadas en regiones en los flancos de montañas y zonas elevadas. Prospero *et al.* (2002) llegaron a la misma conclusión a partir de su estudio de identificación de zonas fuente de polvo basado en el índice AI del TOMS. Este índice muestra una clara relación entre las regiones fuente de polvo, tipos específicos de suelo y topografía. Casi todas las más importantes regiones fuente están localizadas en regiones áridas y centradas sobre bajas topográficas o tierras adyacentes a grandes elevaciones topográficas (Prospero *et al.*, 2002).

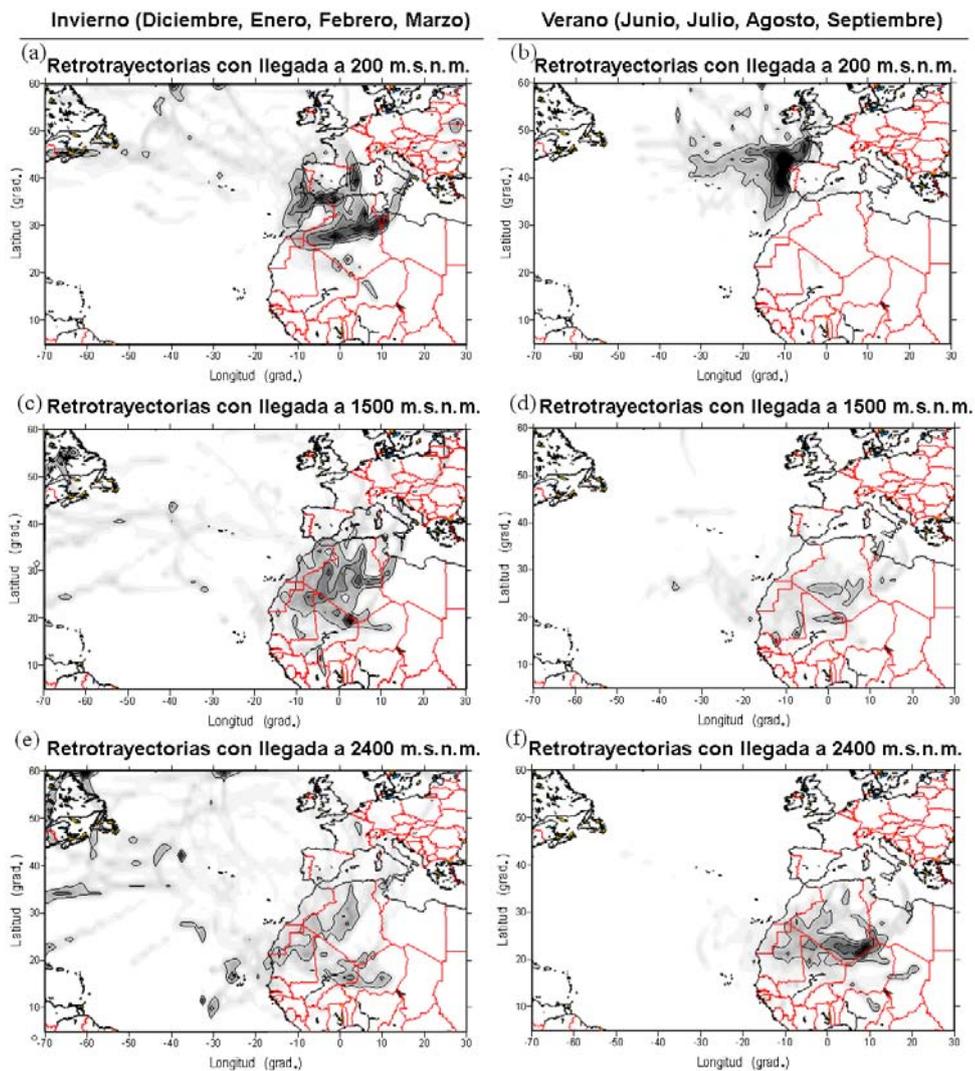


Figura 4.27. Mapas de tiempo de residencia. (a) Invierno, punto de llegada de las retrotrayectorias a 200 m.s.n.m. (b) Verano, punto de llegada de las retrotrayectorias a 200 m.s.n.m. (c) Invierno, punto de llegada de las retrotrayectorias a 1500 m.s.n.m. (d) Verano, punto de llegada de las retrotrayectorias a 1500 m.s.n.m. (e) Invierno, punto de llegada de las retrotrayectorias a 2400 m.s.n.m. (f) Verano, punto de llegada de las retrotrayectorias a 2400 m.s.n.m.

4.3.6. TIPO DE SUELO EN LAS REGIONES FUENTE

Los mapas de tipo de suelo, como el Olson World Ecosystem v.1.3A (Figura 4.28), indican que las regiones que hemos identificado como zonas fuente de masas de aire africanas que viajan por debajo de 1500 m sobre el continente africano y llegan a Canarias durante episodios de intrusión de polvo se encuentran situadas en regiones áridas del continente africano. En la Figura 4.28 podemos comprobar que, en todos los casos, las zonas con mayor probabilidad de tiempos de residencia se sitúan en zonas clasificadas bien como desierto de arena o bien como zona semidesértica. Estas regiones tienen suelos constituidos por partículas potencialmente resuspendibles. Podemos asumir, por tanto, que las regiones origen de las masas de aire que hemos estudiado coinciden con las del material particulado transportado por éstas.

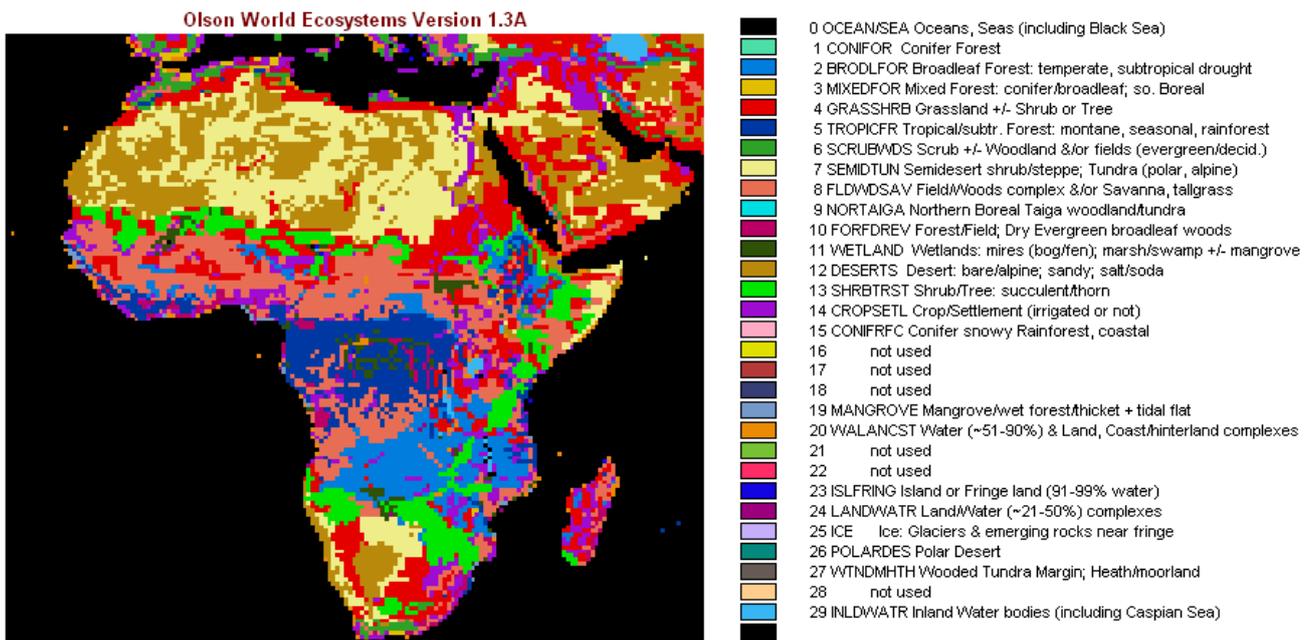


Figura 4.28. Tipos de suelo, según datos de Olson World Ecosystems Version 1.3A. (http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/ged_ia/datasets/a05/ow.htm#element1)

CAPÍTULO 5

Determinación de patrones meteorológicos favorecedores de episodios africanos en Canarias

5. DETERMINACIÓN DE PATRONES METEOROLÓGICOS FAVORECEDORES DE EPISODIOS AFRICANOS EN CANARIAS

5.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

5.1.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE POLVO AFRICANO HACIA CANARIAS: ESCENARIOS METEOROLÓGICOS

El material particulado mineral emitido a la atmósfera desde zonas áridas puede ser transportado a muy larga distancia por procesos atmosféricos. Es bien conocido que las masas de aire africano cargadas de partículas crustales pueden llegar a zonas tan alejadas de la zona fuente como el Caribe y algunas zonas de la América continental (Carlson y Prospero, 1972; Prospero, 1999). Si las cantidades de polvo africano que llegan a estas zonas pueden llegar a ser importantes parece lógico que, debido a su gran cercanía al continente africano, el transporte de material mineral hacia las islas Canarias sea un fenómeno de extrema importancia para el archipiélago.

Las principales regiones emisoras de polvo mineral en el Norte de África han sido identificadas a partir de medidas de índice AI del TOMS (Goudie y Middleton, 2001; Prospero *et al.*, 2002) y a partir del índice IDDI (Legrand *et al.* 1994; Brooks y Legrand, 2000). Una vez completado el proceso de inyección de polvo desde alguna de esas zonas a la atmósfera, tal y como se describe en la sección 4.1.1, el polvo africano es transportado debido a ciertos procesos a escala sinóptica, que generalmente presentan una marcada estacionalidad. En el libro titulado “Saharan Dust. Mobilisation, transport and deposition” (Morales y Wiley eds., 1979), encontramos diversos estudios de climatología de zonas cercanas a las regiones fuentes de polvo africano y deducciones de cómo afectan los distintos patrones meteorológicos observados a los fenómenos de transporte.

En otros estudios, Duce (1995), Andreae (1996), Alfaro *et al.* (1998), Prospero (1999), y Rodríguez *et al.*, (2001) y Escudero *et al.* (2005) describen con detalle los escenarios atmosféricos que favorecen la intrusión de masas de aire africano sobre el Atlántico Norte o regiones de la Península Ibérica. En cuanto a estudios focalizados en el transporte de polvo norteafricano a Canarias, estos escenarios propicios para las intrusiones han sido ya abordados por diversos autores (Prospero y Carlson, 1972; Bergametti *et al.*, 1989a; Chiapello *et al.*, 1995; Cuevas, 1995; Bustos *et al.*, 1998; Rodríguez, 1999; Rodríguez *et al.*, 2001; Torres *et al.*, 2001; Viana, 2003; Dorta *et al.*, 2005), casi siempre desde el punto de vista subjetivo, mediante interpretación visual de los mapas meteorológicos, encontrando variaciones estacionales en cuanto a los escenarios reinantes durante los episodios.

En general, todos estos estudios coinciden en que los escenarios meteorológicos que favorecen el transporte de polvo africano hacia Canarias están generalmente gobernados por un anticiclón del Norte de África. La descripción más detallada es la de Viana *et al.* (2002), en la que se distinguen claramente tres épocas del año:

Verano (Junio-Agosto): Durante los meses de verano las intrusiones africanas tienen lugar en niveles altos de la atmósfera. Los de verano son episodios menos frecuentes e intensos que los de invierno, pero de mayor duración. Debido a la baja térmica que se desarrolla en la superficie continental durante los meses estivales, un anticiclón sobre el Norte de África se desplaza en altura hasta situarse en un nivel de alrededor de 850 hPa (Figura 5.1). Es este anticiclón norteafricano el responsable del transporte de las masas de aire desde África hacia Canarias.

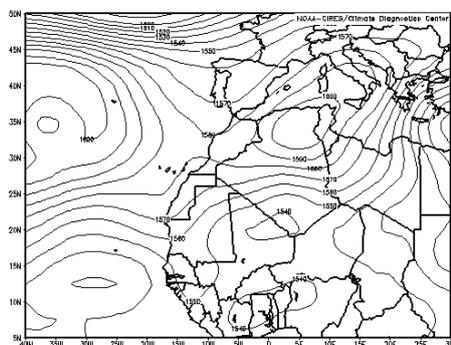


Figura 5.1. Altura geopotencial en el nivel de 850 hPa durante un día de intrusión de masas de aire africano en Canarias (22 de julio de 2003).

Otoño-invierno (octubre-noviembre): Durante estos meses la situación meteorológica en el Norte de África sigue estando dominada por un anticiclón, esta vez a nivel de superficie (Figura 5.2). Sin embargo, no se observan procesos atmosféricos de importancia que lleven a una inyección de polvo desde la superficie de las zonas que potencialmente son fuente de material particulado mineral hacia la baja troposfera. Por lo tanto, los aportes directos de partículas desde África a Canarias solo pueden darse por fenómenos de tormentas de polvo locales que tengan lugar cerca de las islas. Estas intrusiones son las de menor duración y habitualmente son muy intensas. Estas intrusiones suelen tener lugar en los niveles más bajos de la atmósfera, cercanos al suelo. Estos episodios también ocurren, en menor medida, en Diciembre.

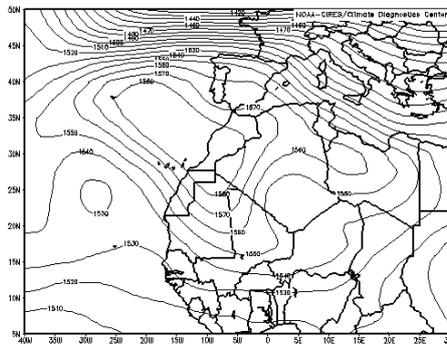


Figura 5.2. Altura geopotencial en el nivel de 850 hPa durante un día de intrusión de masas de aire africano en Canarias (31 de Octubre de 1998).

Invierno (Febrero-Marzo): Estas intrusiones, las más intensas del año, ocurren en la baja troposfera, a alturas por debajo de 2 km en algunos casos incluso en las zonas más bajas de la capa de mezcla. Tienen gran incidencia a nivel de superficie, siendo las que más contribuyen a la superación de los límites dictados por la Directiva 1999/30/CE.

El escenario meteorológico está dominado nuevamente por la presencia de un anticiclón sobre el Norte de África, que puede desplazarse longitudinalmente oscilando entre la costa atlántica del continente y las proximidades del mar Mediterráneo o incluso la Península Ibérica (Figura 5.3).

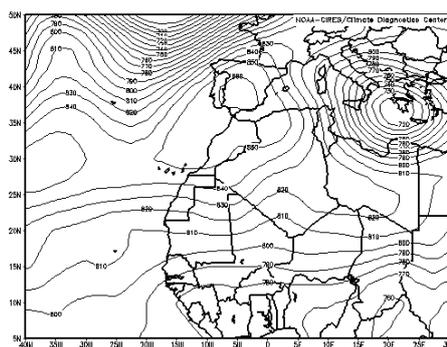


Figura 5.3. Altura geopotencial en el nivel de 925 hPa durante un día de intrusión de masas de aire africano en Canarias (4 de Marzo de 2003).

Las situaciones aquí descritas han sido concluidas de estudios subjetivos de un número de casos de estudio. Previamente a este trabajo nunca se habían estudiado los escenarios meteorológicos que dan lugar a intrusiones de masas de aire africano en Canarias con métodos de análisis totalmente objetivos.

Aunque por lo general el polvo viaja en la troposfera libre cuando se transporta a grandes distancias, el caso de las islas Canarias es especial debido a la gran cercanía a la fuente. En este caso, en determinadas épocas del año el polvo se transporta confinado en la capa de mezcla marina.

La fuerte estratificación de la baja troposfera sobre Canarias es muy importante. Debido a las condiciones de subsidencia que se encuentran casi permanentemente en la troposfera libre y a los vientos Alisios en la baja troposfera, se produce una fuerte inversión térmica de gran estabilidad a una altitud media de ~1400 m.s.n.m. (Font, 1956; Rodríguez, 1999). Esta inversión térmica actúa como límite entre las masas de aire seco de la troposfera libre y las más húmedas de la capa límite marina. En verano (Julio-Agosto), la inversión térmica se sitúa a ~800 m.s.n.m., debido a que el anticiclón del Norte de África es muy intenso y favorece los procesos de subsidencia que causan la compresión de la capa de mezcla marina. En este caso el espesor y el gradiente de temperatura de la inversión se maximizan (Rodríguez, 1999; Torres *et al.*, 2001). En invierno, por el contrario, la capa de mezcla marina alcanza altitudes de hasta 1600 m.s.n.m., ya que la influencia del anticiclón del Norte de África es mínima y esto permite un mayor desarrollo vertical de dicha capa (Torres *et al.*, 2001).

Los episodios que afectan a zonas inmersas en la capa de mezcla ocurren solo durante los meses de invierno y llegan desde la baja troposfera del continente africano. Durante estos meses de invierno las masas de aire africano pueden afectar simultáneamente a estas zonas y a las situadas en la troposfera libre. En verano, cuando la inversión del Alisio es más fuerte, las masas de aire procedentes de África afectan a la troposfera libre pero no a la capa de mezcla marítima donde predomina la situación más habitual en las islas, que es la de masas de aire procedentes del Atlántico Norte (Torres *et al.*, 2002) (Figura 5.4).

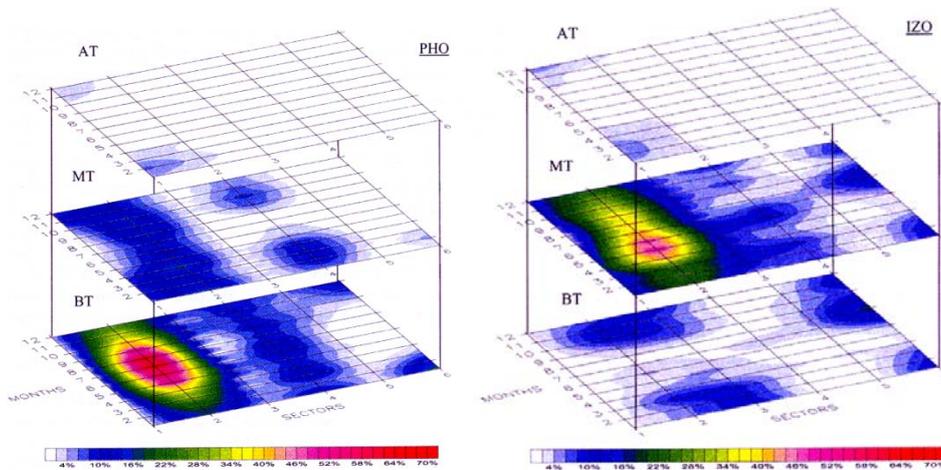


Figura 5.4. Frecuencia relativa mensual de la procedencia de masas de aire para una estación situada en el Faro de Punta del Hidalgo (PHO), en la capa de mezcla (izquierda) y en la Izaña (IZO), en troposfera libre (derecha). El sector 2 es el Atlántico Norte, mientras que el sector 8 es el africano. (Torres *et al.*, 2002) BT = baja troposfera ($p < 770$ hPa). MT = media troposfera ($770\text{hPa} \leq p < 500$ hPa). AT = alta troposfera ($p \leq 500$ hPa).

5.2. METODOLOGÍA

Los patrones meteorológicos que favorecen a las intrusiones de polvo africano en Canarias fueron identificados a partir del análisis de componentes principales y la técnica de agrupamiento de las K-medias. En ambos casos, los cálculos se realizaron a partir de campos de altura de geopotencial en varios niveles para los 256 días de episodio de intrusión de polvo africano previamente identificados en la estación de El Río (ver sección 3.2.2.1) . Los niveles considerados fueron 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa.

En la web de NOAA/Earth System Research Laboratory (<http://www.cdc.noaa.gov/Composites/Day/>) se ofrece un formulario en el que se pueden introducir los datos necesarios para extraer los campos de altura de geopotencial. Rellenar este formulario una vez para cada matriz de 144 x 73 datos de geopotencial, considerando que debemos extraer 1024 campos (256 días x 4 niveles), es una tarea tediosa y que ralentiza mucho la adquisición de los datos. Con la intención de acelerar este proceso se programó en el entorno Visual Basic un software (Figura 5.5) bajo sistema operativo Windows. En este software se selecciona la fecha en un interface de calendario y el nivel en un menú desplegable que contiene únicamente los cuatro niveles que queremos estudiar en este trabajo. Los límites geográficos del campo están fijados de antemano. Con estas pocas entradas por parte del usuario, el software se encarga de hacer una petición al servidor web del NOAA-CIRES Climate Diagnostic Center y en pantalla se visualiza el mapa del campo solicitado y el enlace a los datos en formato de texto. De esta manera se aceleró considerablemente la adquisición de los 1024 campos necesarios para generar las matrices de entrada para los programas de clasificación de patrones.

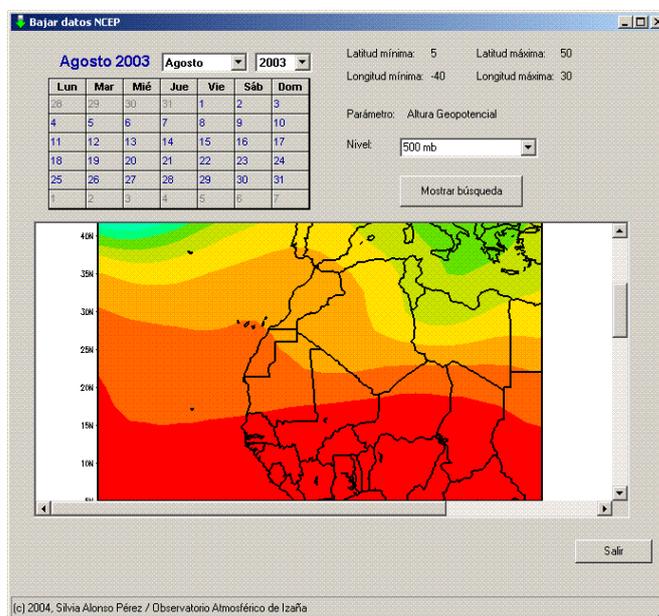


Figura 5.5. Software desarrollado para la extracción rápida de campos de reanálisis NCEP/NCAR de altura de geopotencial desde el servidor NOAA Earth System Research Laboratory

Las anomalías de geopotencial para un día determinado se definen como la diferencia entre el campo promedio diario de un día de episodio y el promedio mensual de las alturas geopotenciales del mes correspondiente en el período de referencia. Para realizar los promedios mensuales de referencia tomamos, en nuestro caso, campos de altura geopotencial del período 1971-2000. Estas anomalías, para cada día, son calculadas además para cada uno de los cuatro niveles considerados, haciendo uso de rutinas programadas en MATLAB.

Las anomalías diarias fueron agrupadas por meses, formando así 48 conjuntos de datos de anomalías mensuales (uno para cada nivel) que servirían de entrada para los programas encargados de realizar la clasificación de los patrones meteorológicos.

5.2.1. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Se ha aplicado la técnica de análisis de componentes principales, también conocida en el ámbito de las ciencias atmosféricas como análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) (Basrnston y Livezey, 1987) a las anomalías mensuales de geopotencial en los 4 niveles de altura considerados.

En una región geográfica dada, las variables que definen los campos de circulación atmosférica presentan no-linealidad, alta dimensionalidad y correlación espacial, con lo que puede existir una gran redundancia en la información. Con esta técnica se reduce la dimensión del espacio proyectando el conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión que el original, donde las nuevas variables (dimensiones) representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen mayor varianza, preservándose así el máximo de varianza de la muestra (Hannachi, 2004). Así, eliminando la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad, se encuentran los principales modos (EOFs) que definen la variabilidad atmosférica en la región de estudio (Preisendorfer y Mobley, 1988).

La simplicidad de este método de análisis ha hecho que sea ampliamente utilizado en las ciencias atmosféricas, a pesar de que las fuertes ligaduras (ortogonalidad en el espacio y en el tiempo) que presentan los modos principales hacen que la

interpretación en base a fuerzas físicas de los patrones resultantes sea motivo de controversia, ya que los modos físicos no son generalmente ortogonales. Para intentar superar este obstáculo en la interpretación se han creado las funciones ortogonales empíricas rotadas (REOFs) (Richman, 1986).

Cuando aplicamos el análisis de componentes principales debemos decidir previamente el número de componentes principales que vamos a extraer. Esta elección debe hacerse llegando a un compromiso entre la calidad de la aproximación y la reducción de la información que queremos obtener (Gutiérrez *et al*, 2004). No hay una regla determinada que podamos usar para tomar esta decisión, pero sabemos que en los estudios de climatología el número de componentes principales tomadas suele ser pequeño, ya que la mayor parte de la variabilidad está explicada a lo sumo por las cuatro primeras componentes. Es por esto que en esta investigación representamos los mapas de las cuatro primeras componentes principales de cada media mensual de anomalía de altura geopotencial. En general, como veremos en la sección 5.3.1, se encuentra que basta con las dos primeras componentes principales para explicar la mayor parte de la variabilidad. A partir de la quinta componente principal no se observan patrones definidos.

5.2.2. K-MEDIAS

El propósito de esta técnica de agrupamiento de las K-medias es la clasificación de datos en diferentes grupos. Es un método de ajuste iterativo de centroides que clasifica las n observaciones de p variables en grupos definidos objetivamente, de modo que cada grupo sea lo más homogéneo posible respecto a las variables de agrupamiento. El agrupamiento se realiza mediante minimización de la suma de las distancias cuadráticas entre los datos y los correspondientes centroides de cada grupo. El objetivo del algoritmo es, por lo tanto, minimizar globalmente la distancia intra-grupos, clasificando los patrones en K grupos.

De entre todos los métodos de agrupamiento posibles, son precisamente estas técnicas de agrupamiento particionales las más adecuadas a la hora de tratar un gran número de patrones en un espacio alto-dimensional, caso habitual en climatología (Gutiérrez *et al.*, 2004).

En nuestro caso, cada anomalía (diaria) corresponde a un punto en el espacio p -dimensional, y cada grupo consiste en aquellas observaciones que están a la menor distancia cuadrática euclídea unas a otras en este espacio (Kassomenos *et al.*, 2003).

El número de grupos (K) debe ser elegido a priori, siendo en nuestro caso $K=4$ para poder comparar con las 4 EOFs calculadas para cada mes y nivel con la técnica de análisis de componentes principales descrita en 3.2.1.

Los pasos seguidos por el algoritmo de las K -medias (Figura 5.6) son los siguientes (De Jakob y Tselioudis, 2003):

- 1) Elegimos el número de K grupos
- 2) Se inicializan los centroides de los grupos. Puede hacerse aleatoriamente o siguiendo el siguiente procedimiento:
 - Se toman los K grupos iniciales como grupos formados por un único elemento del conjunto de datos de dimensión N .
 - Se asigna cada uno de los restantes $N-K$ patrones atmosféricos al grupo correspondiente al centroide más cercano. Después de cada asignación se vuelve a calcular el centroide de cada grupo teniendo en cuenta el nuevo patrón asignado a cada uno de ellos.
- 3) Se toma cada patrón y se calcula su distancia al centroide de cada uno de los grupos. Si un patrón no está en ese momento en el grupo con el centroide más cercano, se re-asigna a éste y se actualiza el cálculo del centroide del grupo al que ha sido añadido este patrón y del grupo en el que estaba anteriormente.

- 4) Se repite el paso 3 hasta que se alcance la convergencia, es decir, hasta que no se produzcan re-asignaciones de patrones entre grupos.

El algoritmo de K-medias que hemos utilizado está programado en entorno MATLAB.

Los datos que hemos introducido en el algoritmo son los mismos grupos de anomalías mensuales de altura geopotencial a los que aplicamos la técnica de análisis de componentes principales. El resultado de la aplicación de esta técnica a nuestros datos será equivalente a la clasificación de estos patrones según la frecuencia de ocurrencia de los mismos, teniendo en cuenta la ligadura de limitarnos solamente a 4 grupos posibles.

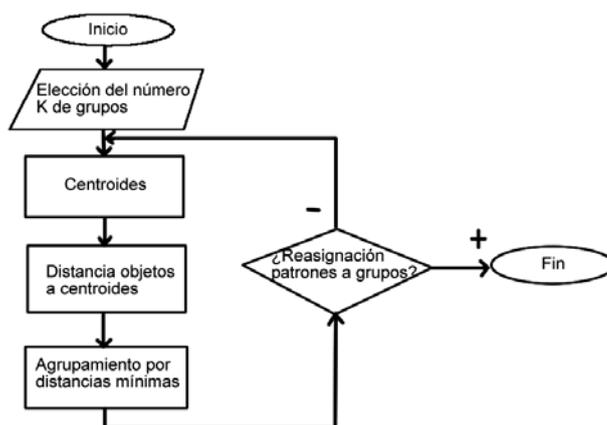


Figura 5.6. Diagrama de flujo del algoritmo K-medias.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. PATRONES DE ANOMALÍAS DE GEOPOTENCIAL QUE FAVORECEN EPISODIOS AFRICANOS EN CANARIAS

De la comparación e interpretación de los patrones de anomalías de altura geopotencial y los principales modos que definen la variabilidad atmosférica hallados mediante las dos técnicas expuestas en la sección 3.2, obtenemos para

cada mes las conclusiones que se resumen a continuación. Las figuras que representan los grupos de anomalías calculados con cada una de las técnicas y para cada nivel se encuentran en el Apéndice A.

Generalmente los patrones mostrados por las dos primeras EOFs (que se definieron en la sección 3.2.1) calculadas por la técnica de análisis de componentes principales se parecen mucho a los dos primeros patrones calculados por la técnica de agrupamiento de las k-medias. La mayor parte de los posibles escenarios se explican con las cuatro primeras EOFs. En la Figura 5.7 puede verse que solo las dos primeras EOFs explican hasta el 80 % de la varianza total. No hay variaciones significativas entre la fracción de varianza total explicada por cada componente principal en los diferentes niveles.

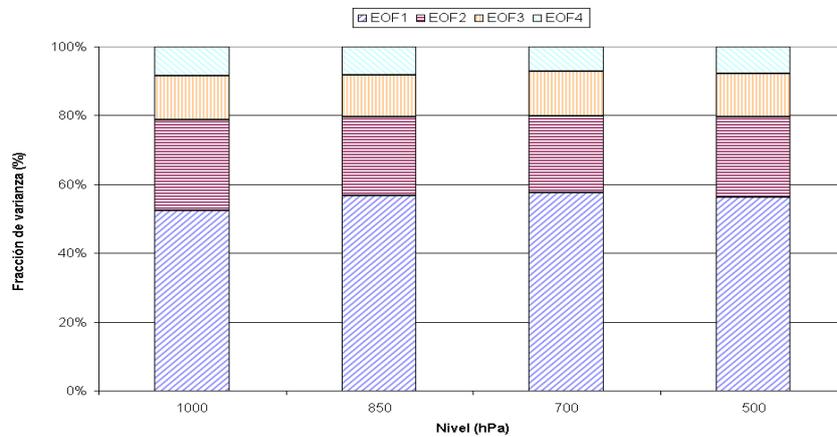


Fig.5.7. Fracción de la varianza del geopotencial correspondiente a las cuatro primeras EOFs en diferentes niveles atmosféricos (1000, 850, 700 y 500 hPa) para el promedio de días de intrusión en la estación de El Río en el periodo 1998-2003.

Enero

En todos los niveles el 80 % de las situaciones de intrusión se dan con una baja situada al WSW de Canarias. Este patrón explica entre el 60% y el 71% de la varianza total y favorece la ocurrencia de episodios de retorno (sección 3.3.5.1) en Canarias. De entre estos casos, en el 66% de los ellos además existe un alta centrada en Europa central y que afecta a Europa y al Norte de África, situación que explica un 49% de la varianza total. Las anomalías aumentan con la altura.

Febrero

Hasta un 78% de las situaciones de intrusión están dominadas por un alta centrada en Europa. Entre el 56% y el 63 % de la varianza total está explicada por anomalías altas en todos los niveles del geopotencial centrados en Europa que dejan a Canarias justo en el flanco SW de dicha anomalía. En el nivel más bajo (1000 hPa) las anomalías asociadas al alta, que afecta también al Norte de África, se adentran en latitudes más bajas del continente africano.

Marzo

Para el mes de Marzo encontramos dos escenarios diferentes. El primero es similar al del mes de Febrero, con el alta ligeramente desplazada hacia el atlántico, lo que explica que los episodios directos sean similares en estos dos meses. En este escenario entre el 49% y el 56 % de la varianza en todos los niveles es explicada por anomalías de alto geopotencial centradas en Gran Bretaña y es el responsable del 75% de los casos de intrusiones en medianías y en superficie.

El segundo escenario, que explica entre el 22% y el 26 % de la varianza total en todos los niveles, es una anomalía alta centrada en el norte de África que favorece la advección de masas de aire desde el Sahara hacia Canarias.

Abril

Entre el 75% y el 80 % de la varianza total viene descrita por una anomalía alta centrada entre la Península Ibérica y el Mediterráneo, que se observa en el 87% de los casos de intrusión africana en Canarias, quedando el archipiélago en el borde SW de dicha alta.

Mayo

Las anomalías de alto geopotencial, centradas en la Península Ibérica y que se adentran más en el norte de África quedando el archipiélago canario en el flanco SW, explican entre el 51% y el 72% de la varianza total y se registran en

aproximadamente el 42% de los episodios africanos en las islas. Las anomalías altas son especialmente intensas en los niveles altos (700 y 500 hPa).

Junio

Durante el mes de Junio las anomalías altas son más importantes en niveles altos. En niveles bajos son muy poco significativas (aunque no tanto con respecto a Julio, como se verá a continuación). En los patrones encontramos altas presiones sobre Europa y norte de África que se extienden hasta las islas Azores, dejando a Canarias al SW de esta alta. Estas componentes principales explican el 52% de la varianza total en el nivel de 500 hPa, un 54% en el de 700 hPa, un 50 % en el de 850 hPa y apenas un 38 % en el de 1000 hPa. En el nivel de superficie, por lo tanto, la situación normal es de no intrusión, mientras que las anomalías indican que en el mes de Junio las intrusiones son más importantes a medida que nos elevamos.

Julio

En el nivel de 1000 hPa no se encuentran anomalías destacables. A partir de 850 hPa, entre un 45% y un 47 % de la varianza total se explica con una anomalía altas en el norte de África, quedando Canarias al WSW de esta anomalía, y una baja al Noreste de Azores. Esta situación se da entre un 53% y un 64% de los días de intrusión africana en Canarias. La situación habitual sigue siendo la de no intrusión en niveles bajos.

Agosto

En el nivel de 1000 hPa un 35% de la varianza total se explica con anomalías relativamente altas en el norte de África. En el nivel de 850 hPa, el patrón que más se repite muestra una dorsal en la que Canarias queda situada al W de dicha dorsal. Este escenario representa entre un 43% y un 47 % de la varianza total.

En el nivel de 1000 hPa la situación ya es más favorable a intrusiones respecto al mes anterior, pero todavía no es muy importante. Las condiciones en Agosto siguen siendo, como durante todo el verano, más propicias para intrusiones en medianías y en altura.

Septiembre

En el nivel de 700 hPa un 31% de la varianza total está explicada por una cuña de anomalías altas centrada al Norte de las islas Azores y que se extiende hacia el Norte de África, quedando Canarias al Sur de dicha anomalía. El escenario en el nivel de 850 hPa es similar al anterior, pero más débil. En el nivel de 500 hPa el alta está centrada en el mar Cantábrico. Este patrón, al igual que en los niveles de 850 hPa y 700 hPa, ocurre en el 33% de los casos de intrusiones africanas en Canarias.

Octubre

La situación en Octubre es muy parecida a la encontrada para Septiembre, aunque las anomalías en el nivel de 1000 hPa comienzan a recobrar fuerza y el escenario se empieza a parecer al de 850 hPa para Septiembre. En 850 hPa el patrón predominante es como el de septiembre pero más intensificado. Las anomalías son más intensas a medida que nos elevamos, y explican hasta un 33 % de la varianza total, con aumento de geopotencial centrado al WNW de la Península Ibérica, quedando Canarias en todos los casos al S de esta anomalía, y observándose disminución del geopotencial al Suroeste del archipiélago. Este patrón de anomalías se registra en el 61% de los casos de episodios africanos que ocurren en el archipiélago canario durante el mes de Octubre, que parece ser un mes de transición entre la época del año en que las intrusiones no tienen lugar a nivel de superficie y los meses en los que sí tienen lugar a ese nivel.

Noviembre

Entre el 35% y el 39% de la varianza total está explicada por un aumento de geopotencial que se produce al Norte de la Península Ibérica, en forma de dorsal que afecta al Norte de África, quedando Canarias en el flanco SW de dicha anomalía. Esta anomalía se va intensificando con la altura y el escenario se repite hasta en el 70% de los casos de episodios africanos en Canarias para este mes.

Diciembre

El mes de Diciembre presenta una complicación adicional respecto a los demás en cuanto a la interpretación de las componentes principales y grupos de patrones que dan lugar a intrusiones de masas de aire africano en Canarias.

Encontramos dos situaciones diferentes. Por un lado, entre un 22% y un 26 % de la varianza total en todos los niveles se explica por una baja centrada en las islas Azores (NW de Canarias) y una dorsal sobre el norte de África. Esta situación se observa en un 28 % de los casos de intrusión africana en las islas para los tres niveles más bajos de los considerados, y en hasta un 44% de los casos en el nivel más alto (500 hPa). Por otro lado, entre un 30% y un 35 % de la varianza total está explicada por un alta centrada al NW de la Península Ibérica, que se adentra en el Norte de África, quedando Canarias situada al Sur de esta alta, que ocurre en aproximadamente entre un 28% y un 33% de los casos para los niveles más bajos, y no se encuentra en los patrones hallados para el nivel de 500 hPa.

Lo que complica la interpretación de los patrones de anomalías de altura de geopotencial encontrados para el mes de Diciembre es la ausencia de alguno de los más importantes en ciertos niveles, o el intercambio en importancia de éstos según la altura.

A partir de todo lo anterior, encontramos que durante todo el año la situación de episodio africano suele estar gobernada por altas centradas en Europa, que llegan a afectar el Norte de África, en ocasiones dando lugar a dorsales y en general dejan a las islas Canarias en el flanco SW de éstas. Durante el verano, las anomalías son más importantes en niveles altos, hecho totalmente de acuerdo con nuestro estudio previo sobre la estacionalidad de las series de índices de africanidad para intrusiones a diferentes alturas.

Los patrones encontrados para los meses de Diciembre en Enero, en los que se combinan una alta que afecta al Norte de África y una baja al Noroeste y Suroeste de Canarias respectivamente, son los que pueden favorecer la entrada de polvo africano mediante episodios de retorno (sección 3.3.5.1).

Aunque este estudio está realizado a partir de fechas de intrusión en una estación a baja altura y, por lo tanto, se espera que estemos dando una mejor descripción para

los eventos que tienen lugar en niveles bajos, encontramos que incluso con esta limitación se observa claramente que las anomalías más importantes en verano se dan en niveles altos.

En la Figura 5.8 se resumen, para cada mes, los patrones meteorológicos que favorecen las intrusiones de polvo africano a nivel de superficie en Canarias.

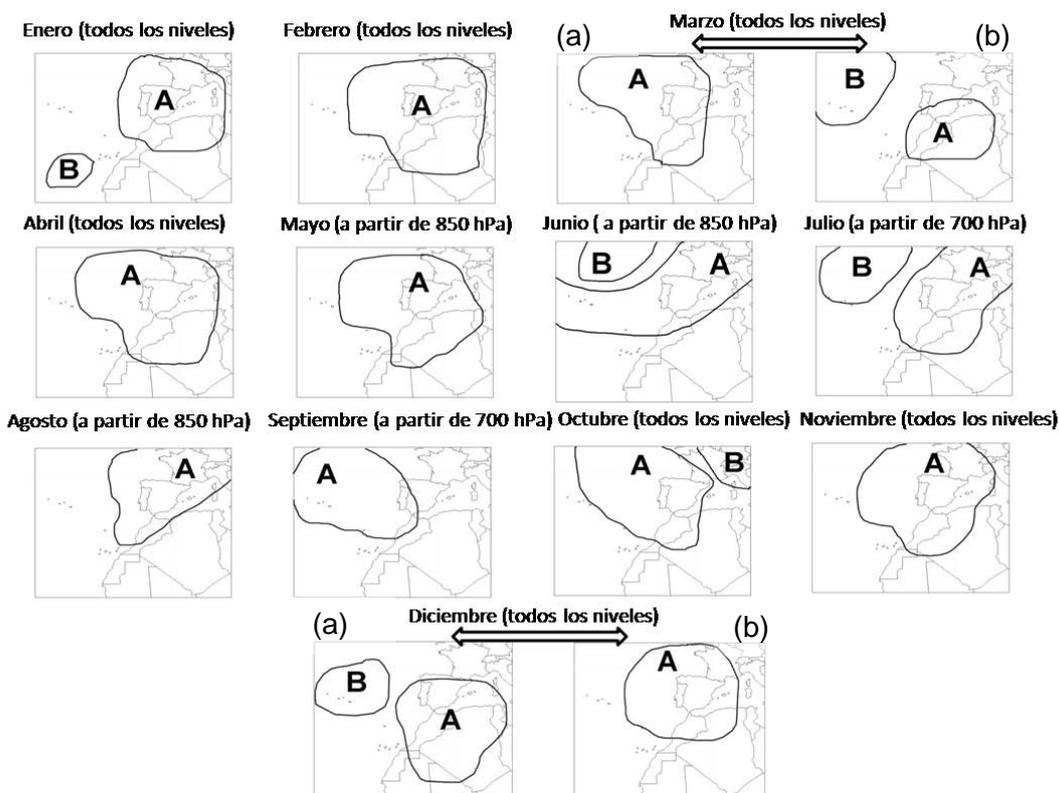


Figura 5.8. Patrones meteorológicos que favorecen la intrusión de polvo africano a nivel de superficie (de manera directa o por deposición gravitacional) en Canarias. Para cada mes se indican los niveles en los estos patrones ejercen su papel regulador del transporte de polvo hacia las islas.

5.3.2. VALIDACIÓN DEL RECONOCIMIENTO DE PATRONES

Con la intención de validar los resultados obtenidos en la clasificación de los patrones de anomalías de altura geopotencial (sección 5.3.1) se han elegido dos episodios ocurridos durante el año 2004, año que no ha sido contemplado en el conjunto de datos analizados con los métodos de análisis de componentes

principales y K-medias. Se eligieron los episodios de manera que pudiésemos analizar uno correspondiente a invierno y otro a verano.

Para cada episodios se calcularon los campos promedios de altura de geopotencial en los niveles de 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa a partir de los datos de reanálisis de NCEP/NCAR publicados en <http://www.cdc.noaa.gov/Composites/Day/> Por último, se compararon los patrones de altura de geopotencial ocurridos durante estos episodios con los correspondientes patrones identificados en la sección 5.3.1.

El primer episodio, que comprende los días del 3 al 8 de Marzo de 2004, fue especialmente intenso a nivel de superficie, con gran incidencia sobre la población en Canarias. Las concentraciones de PM10 registradas en Santa Cruz de Tenerife fueron altas, llegándose a registrar una media horaria de $5238 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 22:00 UTC del día 4 de Marzo (Hernández *et al.*, 2005), día en el que el promedio diario de PST en la estación del Río alcanzó el máximo anual de $364 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Figura 5.9 se muestran las anomalías de altura de geopotencial para los niveles de 1000, 850, 700 y 500 hPa respectivamente, que coinciden con los patrones mostrados en la EOF1 derivada del análisis de componentes principales para el nivel de 1000 hPa (Figura A.9), 850 hPa (Figura A.10), 700 hPa (Figura A.11) y 500 hPa (Figura A.12) repectivamente.

Encontramos anomalías altas centradas en Gran Bretaña y Norte de África, que dejan a Canarias en el flanco SW de las mismas, y bajas en las zonas de Azores y en el Este de Europa que se adentran hasta el centro del continente africano. En el nivel de 1000 hPa las anomalías asociadas al alta centrada en el Norte de África se adentra en latitudes más bajas del continente africano que en el resto de los niveles. Esta es la situación principal que habíamos encontrado en nuestro análisis de clasificación de patrones para el mes de marzo, con la única salvedad de que las anomalías son más intensas en el caso de este episodio puntual.

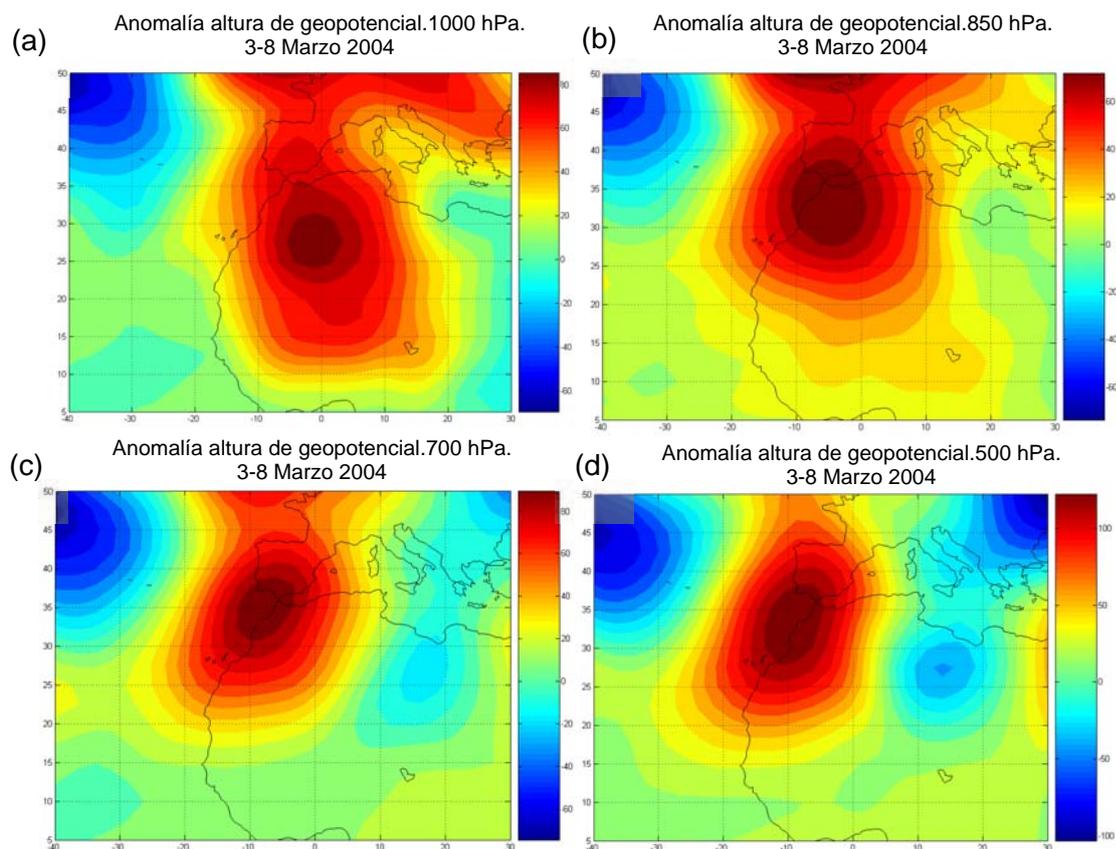


Figura 5.9. Anomalías de altura de geopotencial del campo promedio correspondiente a los días del 3 al 8 de marzo de 2004 en los niveles de 1000 hPa (a), 850 hPa (b), 700 hPa (c) y 500 hPa (d). Comparar con el patrón b de Marzo (Figura 5.8).

El segundo episodio es el ocurrido durante el día 30 de Junio de 2004. El promedio diario de concentración de PST para este día fue de $28.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación de El Río, lo que indica que no tuvo lugar intrusión de polvo a nivel de superficie. Sin embargo, las retrotrayectorias HYSPLIT 4.0 indican que se produjo una intrusión de polvo africano en medianías y cumbres de las islas (Figura 5.10a). Además, el valor del índice AI del TOMS, de 3.11 en Tenerife, indica que ese día existía gran cantidad de polvo en suspensión sobre la isla (Figura 5.10b). Las imágenes de satélite, como la proporcionada por el instrumento MODIS (Figura 5.10c) también muestran la presencia de polvo en suspensión sobre las islas Canarias. Por lo tanto, el día 30 de Junio de 2004 fue un día de episodio africano en medianías y altura en Canarias, que no afectó a nivel de superficie, tal y como hemos visto que suele ocurrir durante los meses de verano.

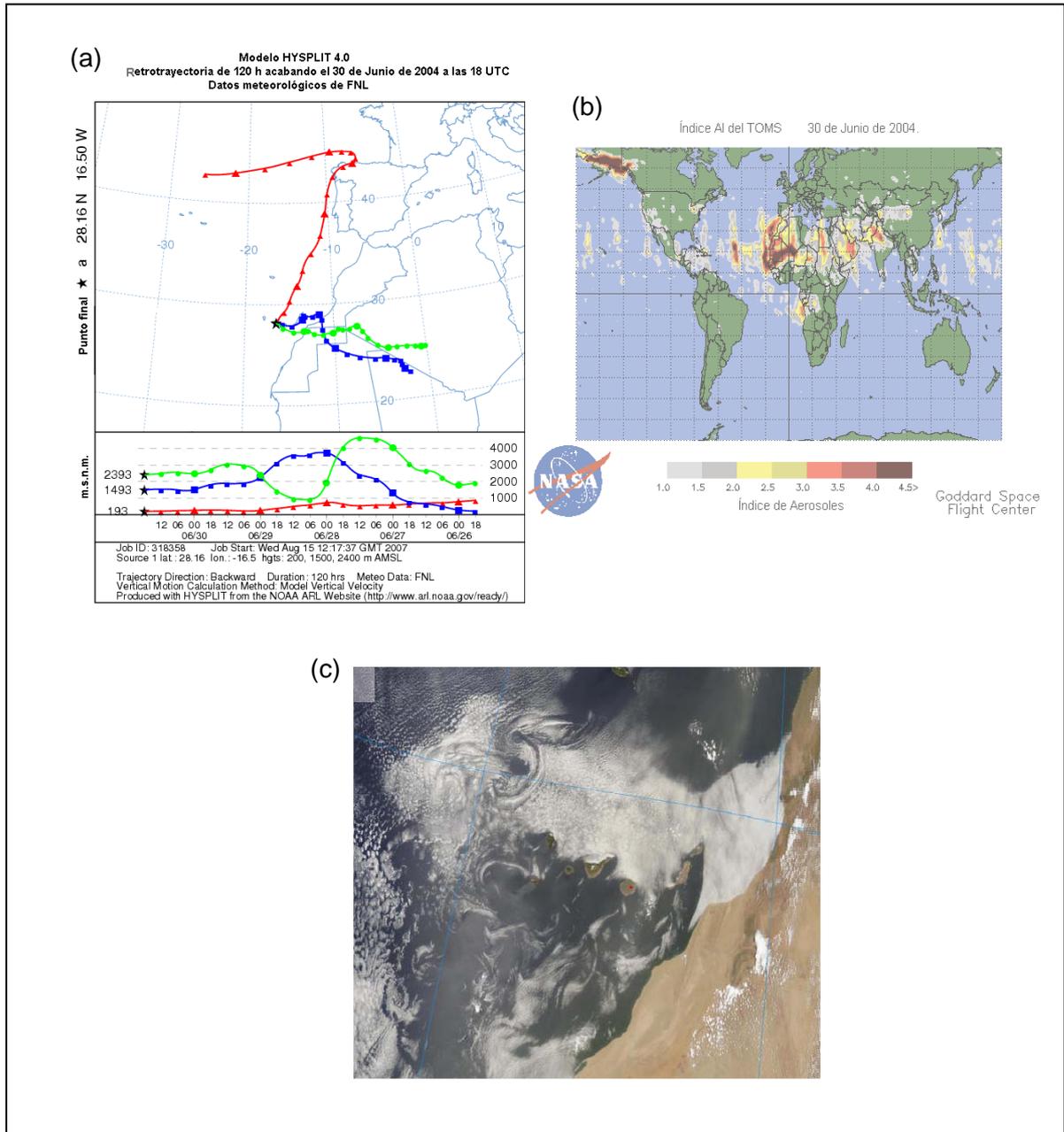


Figura 5.10. (a) Retrotrayectorias HYSPLIT 4.0 de 5 días para el día 30 de Junio de 2004 a las 18 UTC y altura de llegada sobre Tenerife a 200 m (rojo), 1500 m (azul) y 2400 m (verde). (b) Mapa de índice AI del TOMS del día 30 de Junio de 2004. (c) Imagen MODIS del día 30 de Junio de 2004.

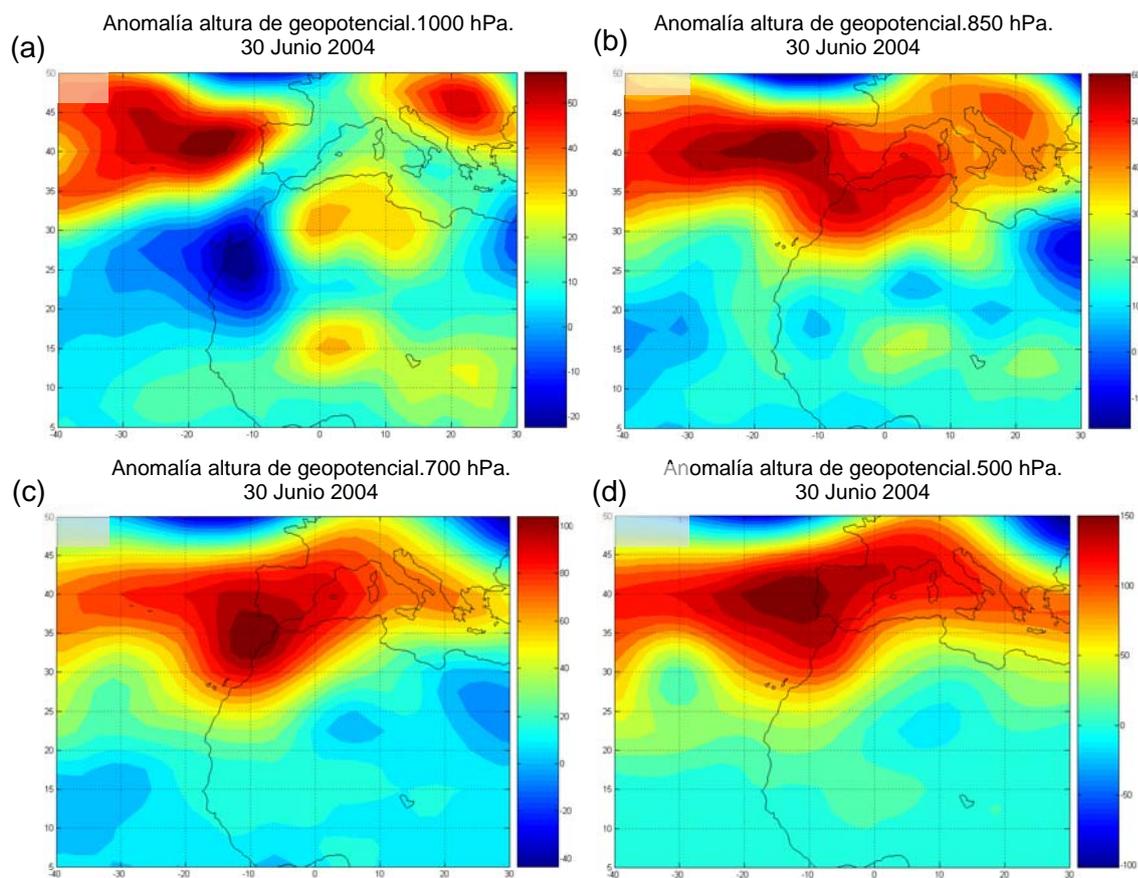


Figura 5.11. Anomalías de altura de geopotencial para el día 30 de Junio de 2004 en los niveles de 1000 hPa (a), 850 hPa (b), 700 hPa (c) y 500 hPa (d).

En la Figura 5.11 puede observarse que las anomalías claramente son las explicadas a partir del nivel de 850 hPa por la primera EOF fruto del análisis de componentes principales (Figuras A.22, A.23 y A.24 y mapa correspondiente a Junio en la Figura 5.8). El escenario meteorológico presenta anomalías altas en el Sur de Europa a partir de 850 hPa, extendiéndose hacia el archipiélago de las Azores y alcanzando al Norte de África, quedando así Canarias en el flanco SW de estas altas. Este patrón es el descrito por el segundo y tercer grupo en porcentaje de casos explicados de entre los hallados con la técnica de las K-medias para los niveles de 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa. Estos grupos explican el 43% de los casos en 850 hPa y en 700 hPa, y el 25% de los casos en el nivel de 500 hPa. El análisis de componentes principales indica que este patrón es el que explica un mayor tanto por ciento de la varianza total, entre un 52% y un 54%. Se trata, por lo tanto, del primer patrón meteorológico en importancia de entre los más comunes encontrados para el mes de Junio (Figura 5.8).

CAPÍTULO 6

**Relación entre la variabilidad de las
intrusiones de masas de aire africano
en Canarias y la de índices de
teleconexión**

6. RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD DE LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO EN CANARIAS Y LA DE ÍNDICES DE TELECONEXIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Pocos trabajos publicados hasta la fecha tratan sobre las intrusiones de polvo o masas de aire africano en Canarias desde un punto de vista climatológico. A continuación se resumen los avances logrados por otros autores en el conocimiento del enlace de los episodios africanos en Canarias con los patrones de teleconexión que describen la circulación general atmosférica y con los cambios climáticos acontecidos en las zonas fuente.

6.1.1. PATRONES DE TELECONEXIÓN

Desde principios de la década de 1980 se conoce el hecho de que existen altas correlaciones, positivas o negativas, que explican la existencia de “enlaces” entre los diferentes climas de la Tierra. A este fenómeno de “enlace” se le denomina “teleconexión”.

Si buscamos la localización de los centros de dichas correlaciones, podemos identificar patrones atmosféricos de escala sinóptica que oscilan en diferentes escalas de tiempo (normalmente estacionales o interanuales) y dominan en gran parte la variabilidad de la atmósfera. Algunos de estos patrones son predecibles, lo que ayuda a realizar pronósticos meteorológicos a la escala temporal del patrón.

En el caso de que los patrones sean bipolares, se puede definir para ellos índices de teleconexión, también conocidos como índices climáticos, que indican en qué fase (positiva o negativa) se encuentra el patrón.

Es ya ampliamente conocida la relación entre la variabilidad de algunos fenómenos meteorológicos diarios o mensuales (como por ejemplo, la precipitación diaria, o la temperatura estacional) y los patrones atmosféricos de gran escala cuya dinámica se desarrolla en escalas temporales diferentes, desde estacionales hasta anuales. Es por ello interesante, tanto desde el punto de vista de la predicción como del análisis, estudiar si existe correlación entre la frecuencia y/o intensidad de las intrusiones de polvo africano en Canarias y alguno de los patrones de teleconexión conocidos. Desde un punto de vista climático, es también interesante averiguar si existe correlación entre alguno de estos patrones de teleconexión y las intrusiones de masas de aire africano en el archipiélago canario, sean o no portadoras de polvo en suspensión.

Como se verá con más detalle a continuación, los patrones de teleconexión que hasta ahora se han relacionado con las intrusiones de polvo africano en Canarias son la Oscilación del Atlántico Norte (en inglés, y de ahora en adelante, North Atlantic Oscillation, NAO) (Torres-Padrón *et al.*, 2002) y El Niño (en adelante El Niño Southern Oscillation, ENSO) (Dorta *et al.*, 2005)

La serie temporal del índice NAO se define como la de diferencias de presión a nivel del mar entre las bajas centradas en Islandia o Groenlandia y las altas centradas en el archipiélago de las Azores, Lisboa o Gibraltar, promediadas para los meses de invierno (Diciembre, Enero, Febrero y Marzo).

Estos sistemas de presión son casi-permanentes durante prácticamente todo el año. En primavera, verano y otoño permanecen débiles y no son relevantes en los procesos de circulación atmosférica, pero en invierno se intensifican y los índices NAO fluctúan entre valores positivos y negativos en periodos de semanas. Los índices NAO son positivos (fase positiva) cuando la presión en Azores es extremadamente alta mientras en Islandia es extremadamente baja, con lo que la diferencia de presiones es alta. Por otro lado, los índices NAO son negativos (fase negativa) cuando la presión se debilita tanto en Islandia como en Azores (especialmente en Azores), resultando una diferencia de presiones baja.

Atendiendo a los promedios anuales, la NAO presenta un periodo irregular de 3 a 5 años de fase positiva, seguido de un periodo similar de fase negativa. Este periodo

irregular parece estar en relación con las corrientes oceánicas y la formación del hielo en el Ártico, pero las razones no se conocen en la actualidad y los modelos no permiten predecirla como ocurre con ENSO.

La posibilidad de que la NAO pueda modular los episodios de intrusiones de masas de aire africano en Canarias se debe al hecho de que este patrón regula la potencia del flujo del aire que forma el canal entre los dos sistemas de presión que lo definen, pudiendo llevar a un incremento del alisio y/o de la circulación de masas de aire desde el continente africano hacia el Atlántico. Cuando el índice NAO es positivo se produce un incremento del transporte de polvo sahariano hacia el Mediterráneo y el Atlántico (Moulin *et al.*, 1997; Chiapello and Moulin, 2002; Amato *et al.*, 2006)

En 2002, Torres Padrón *et al.* encontraron que las variaciones interanuales y estacionales del aporte de masas de aire africano a Canarias podrían estar controlados por las variaciones en el patrón de la NAO, aunque en dicho estudio se admite que para confirmar este hecho es necesario disponer de series temporales más largas, ya que se estudió únicamente el periodo 1997-1998.

El fenómeno ENSO se caracteriza por un calentamiento del agua en la superficie del Pacífico central y Oriental, así como por una variación a gran escala asociada al sistema de presión atmosférica tropical. El índice asociado al patrón ENSO se denomina Oscilación del Sur (SOI). Este índice de teleconexión se calcula mediante diferencias de las anomalías de presión atmosférica entre Tahití y Darwin. El periodo medio del ciclo de ENSO es de aproximadamente cuatro años, aunque a lo largo de la historia ha variado entre periodos de dos a siete años.

Si la NAO está relacionada con el aporte de masas de aire africano a Canarias, parece lógico que el índice SOI muestre cierta correlación con la frecuencia de ocurrencia de episodios africanos en Canarias si tenemos en cuenta que Huang *et al.* (1998) encontraron que ENSO modula la variación de la NAO.

Amato *et al.* (2006) encontraron correlación positiva entre la actividad de producción de polvo en el Oeste de África y el índice SOI. Por otro lado, en un estudio ya focalizado en Canarias, Dorta *et al.* (2005) encontraron una cierta relación entre el

número de días al año de episodio africano en Canarias y el índice SOI para el periodo 1976-2002, si bien el coeficiente de correlación máximo (-0.67) se encuentra calculando la correlación entre el número total de días de episodio africano de cada año y el SOI del mes de enero de cada año.

Empleando una combinación entre datos registrados en varias estaciones y un modelo que simuló, entre otros, datos de concentración de polvo a nivel de superficie para todo el globo entre los años 1979 y 2000, Mahowald *et al.* (2003) no encontraron relaciones entre diferentes índices climáticos (NAO, SOI y Oscilación Decadal del Pacífico (PDO)) y la concentración de polvo en varias estaciones situadas en puntos distantes del globo. Tal y como ocurrió en Torres-Padrón *et al.* (2002), los autores consideran que la serie simulada, en este caso de 22 años, no es suficientemente larga para caracterizar bien estas relaciones. Para la estación de Izaña se encontró una correlación de $r = 0.42$ con el índice NAO, $r = -0.40$ con el índice PDO y $r = -0.24$ con el índice SOI.

Los resultados de Prospero y Nees (1986) que indican que la episodios de polvo africano más intensos en Barbados están asociados con condiciones extremas de ENSO durante el año anterior, apuntaban a que posiblemente esos episodios de polvo estuviesen ligados a las condiciones de sequía en la región de Sahel. La época de lluvias en esta región geográfica tiene lugar entre los meses de julio y septiembre y la sequías condicionan en gran medida la emisión de polvo. Por lo tanto, comenzaron a utilizarse otros índices climáticos que describen las anomalías de la precipitación en zonas áridas de esta región geográfica. Estos índices ayudan a enlazar la variabilidad de las intrusiones con la variabilidad del clima en el Norte de África y con la capacidad del suelo de este continente para resuspender polvo.

Algunos de estos índices, que hasta ahora se han utilizado para estudios no focalizados en Canarias, son el índice de precipitación del Sahel (Sahel Rainfall Index) (Brooks y Legrand, 2000; Amato *et al.*, 2006) y otras variaciones como el referido a la región Sudán-Sahel (Soudano-Sahel Precipitation Index) (Prospero y Lamb, 2003), o el Sahelian Annual Drought index (Chiapello *et al.*, 2005).

El Sahel Rainfall Index está basado en el análisis de componentes principales rotadas del promedio de junio a septiembre de la precipitación en una serie de estaciones que se encuentran situadas dentro de los límites geográficos dados por [8°N, 20°N], [20°W, 10°E] (Janowiak, 1988). Todos los trabajos que relacionan el

Sahel Rainfall Index, o cualquiera de sus variantes, con la variabilidad del transporte de polvo africano concluyen que existe correlación entre el índice climático y la producción de polvo en la región del Sahel.

Además de NAO y ENSO, existe un buen número de índices climáticos ampliamente utilizados. Continuamente se publican trabajos en los que se investigan las causas y efectos de los patrones climáticos a los que representan, se tratan de definir mejor (por ejemplo, a partir de análisis de componentes principales), o se buscan nuevos patrones e índices de teleconexión para explicar mejor ciertos fenómenos meteorológicos. Precisamente este último punto inspira uno de los objetivos de esta Tesis: buscar el índice climático que mejor module el transporte de masas de aire africano hacia Canarias a nivel de superficie. Encontrando el índice climático más adecuado podemos ayudar a mejorar la predicción estacional de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias.

En esta Tesis se ha estudiado la relación existente entre la variabilidad de las intrusiones de polvo africano en Canarias y la variabilidad de los índices NAO, Sahel Rainfall Index y del nuevo índice climático que fue identificado.

6.1.2. PALEOCLIMATOLOGÍA DE LOS EPISODIOS AFRICANOS EN CANARIAS

Desde el punto de vista paleoclimático también se han realizado estudios de las intrusiones de polvo africano en Canarias. En Caballud (2002) se investigó la variabilidad de los aportes africanos en la Cuenca del Norte de Canarias y su correlación con los cambios climáticos en las zonas fuente. Este estudio concluye que las variaciones en los aportes de polvo desde zonas situadas en las regiones Sahara y Sahel hacia la Cuenca del Norte de Canarias se correlacionan con los cambios climáticos acontecidos en las zonas fuente del material particulado. Así, el flujo de polvo africano con llegada a la Cuenca del Norte de Canarias es máximo durante los períodos más húmedos, probablemente debido al aumento de la

meteorización que lleva a un incremento en las zonas fuente de la disponibilidad de partículas susceptibles de ser transportadas por el viento.

6.2. METODOLOGÍA

Los índices de teleconexión, tal y como se mencionó en la sección 6.1.1, describen el estado del patrón atmosférico al que se refieren y nos permiten describir algunas características de la circulación atmosférica, generalmente a escala global, que afectan a ciertos fenómenos meteorológicos. Habitualmente se definen como la diferencia de los promedios mensuales o estacionales de la anomalía de una variable climática (como por ejemplo la altura de geopotencial a cierto nivel, la presión atmosférica a nivel del mar o la temperatura del mar) en dos puntos geográficos que pueden ser muy distantes entre sí. En ocasiones los puntos geográficos en los que se definen se sitúan a distancias más cortas, tales que pueden definirse índices regionales o incluso locales.

A continuación se expone la metodología para el estudio de la relación existente entre las intrusiones de polvo africano en Canarias a nivel de superficie y los índices NAO e índice de precipitación del Sahel (Sahel Rainfall Index). Además, se expone cómo se llegó a identificar un nuevo índice de teleconexión con el que explicar mejor la relación entre los episodios africanos en Canarias y la circulación atmosférica. En todos los casos, tomamos el Índice de Africanidad AFINL₂₀₀ como variable indicativa de intrusiones de masas de aire africano que pueden transportar polvo hacia zonas a nivel de superficie.

6.2.1. RELACIÓN ENTRE INTRUSIONES AFRICANAS EN CANARIAS Y EL PATRÓN DE LA NAO

En esta Tesis se ha estudiado la relación entre la variabilidad de las intrusiones de masas de aire africano y la del patrón de la NAO. Para ello se calculó la correlación entre series temporales de indicadores de estos episodios, como las series de

Índice de Africanidad AFINL₂₀₀ y los niveles de PST en la estación de El Río, y el índice NAO.

Los valores del índice NAO utilizados fueron extraídos, para el periodo 1948-2005, desde la base de datos de índices climáticos de Earth System Research Laboratory (ESRL) del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

6.2.2. RELACIÓN ENTRE INTRUSIONES AFRICANAS EN CANARIAS Y LAS CONDICIONES DE SEQUÍA EN SAHEL

Como se explicó en la sección 6.1.1, diversos autores han encontrado correlaciones entre la variabilidad del Sahel Rainfall Index (o alguna de sus variantes) y la variabilidad de la producción de polvo en la región de Sahel.

Se calculó la correlación lineal entre los promedios de los niveles de PST de invierno (Diciembre, Enero, Febrero y Marzo) en El Río y el índice climático Sahel Rainfall Index para el año anterior, para el período 1998-2005. El PST y el índice climático han sido correlacionados en estudios anteriores (Prospero y Lamb, 2003) para determinar la relación existente entre años de sequía y la emisión de polvo africano hacia el Caribe.

La serie de valores del Sahel Rainfall Index se obtuvo del National Center for Atmospheric Research World Monthly Surface Station Climatology, del Joint Institute for the study of the Atmosphere and Ocean (Universidad de Washington), y está disponible en http://jisao.washington.edu/data_sets/sahel/index2.html.

Utilizamos el promedio de los niveles de PST para invierno en El Río porque es en esta estación cuando las intrusiones tienen lugar de manera directa al nivel de esta estación y porque, tal y como se concluye en nuestro estudio sobre el origen del material particulado que llega a Canarias (sección 4.3), es en invierno cuando se puede encontrar en El Río, principalmente debido a deposición gravitacional de partículas, algún aporte de polvo desde la zona de Sahel. El hecho de utilizar las medias de los niveles de PST de los meses de invierno imposibilita el hacer el estudio de correlación de PST con Sahel Rainfall Index año a año, ya que el índice climático está definido a partir de datos correspondientes a los meses de Junio a

Septiembre, cuando tienen lugar las precipitaciones en la región del Sahel (Legates y Wilmott, 1990). Teniendo en cuenta que la resuspensión de polvo se ve afectada por las precipitaciones en la región fuente (Nickovic *et al.*, 2001), el hecho de calcular la correlación entre los niveles de PST medidos en invierno y el Sahel Rainfall Index del año anterior nos permite estudiar el efecto que la resuspensión de polvo en el Sahel tiene sobre los niveles de partículas en invierno en Canarias.

6.2.3. BÚSQUEDA DEL PATRÓN DE TELECONEXIÓN QUE MEJOR MODULA LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO EN CANARIAS

Como se mencionó en la sección 6.1.1, la comunidad científica continuamente está buscando nuevos patrones de teleconexión que expliquen fenómenos meteorológicos, generalmente extremos. Estos patrones se pueden encontrar identificando las regiones del globo que presentan mayor correlación (tanto positiva como negativa) entre la evolución temporal de un parámetro climático dado y la evolución temporal de la serie que describe a dicho fenómeno, tanto por correlación lineal como por técnicas de componentes principales.

En esta Tesis buscamos si existe un patrón atmosférico de teleconexión que module los episodios africanos en Canarias mejor que el ya conocido patrón de la NAO que, según estudios previos de otros autores (ver sección 6.1.1 de esta Tesis) muestra una correlación moderada con las concentraciones de polvo en las islas. Para ello, calculamos el mapa de correlación lineal de campos de altura de geopotencial a diferentes niveles (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa) con la serie temporal del Índice de Africanidad $AFINL_{200}$, usando promedios anuales y estacionales (invierno y verano) para datos del período 1948-2005, para todo el hemisferio Norte. Utilizamos el índice $AFINL_{200}$ porque, como se ha demostrado en la sección 4.3.1, es una variable cuya variabilidad temporal es similar a la de la frecuencia de ocurrencia de los episodios de intrusión de polvo africano en Canarias, así como a la de los niveles de PST registrados en este archipiélago.

Este cálculo se realizó a través de una aplicación on-line del ESRL de NOAA, disponible en <http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/>. Para que la aplicación pudiera realizar el cálculo, hubo que suministrarle los datos de la serie de AFINL₂₀₀ en un formato especificado por NOAA, subiéndolos a una cuenta de FTP de dicha institución.

Una vez identificados las zonas geográficas de mayor correlación (o anticorrelación) se procedió a definir el índice de teleconexión en base a diferencias de anomalías de altura de geopotencial entre dos puntos y se calculó la correlación entre las series de este índice y de AFINL₂₀₀. El índice de correlación se calculó para los cinco niveles considerados y diferenciando entre series de promedios anuales, promedios estacionales de invierno (Diciembre-Enero-Marzo-Abril) y promedios estacionales de verano (Junio-Julio-Agosto-Septiembre).

6.3. RESULTADOS

6.3.1. RELACIÓN ENTRE EPISODIOS AFRICANOS Y LA NAO

6.3.1.1. Relación entre el impacto de las intrusiones de masas de aire africano en los niveles de PST de Canaria y el índice NAO

En la Figura 4.32 se representan los promedios estacionales de concentración de PST para el intervalo Diciembre-Enero-Febrero-Marzo de la serie 1998-2005 y el mismo promedio para índices NAO. Puede observarse que en el periodo 1998-2005 el promedio de índices NAO de los meses de invierno se mantuvo siempre con valores positivos, excepto en el año 2001.

La variabilidad anual de los índices NAO de invierno es similar a la de la serie de niveles medios de PST para la misma época del año (Figura 6.1). El único año del periodo 1998-2005 en el que se encuentra un comportamiento diferente en las dos series es 1999, cuando los niveles de PST disminuyen pero el índice NAO promedio aumenta. La correlación entre ambos conjuntos de datos es moderada,

con $r = 0.56$ (para $p < 0.05$), y es mayor que la encontrada por Mahowald *et al.* (2003) en Izaña y Torres-Padrón *et al.* (2002) en Pico de la Gorra (Gran Canaria).

Si calculamos la correlación entre las series anuales y estacionales de verano, encontramos correlaciones estadísticamente no significativas, de $r = -0.05$ y $r = 0.22$ respectivamente (ambas para $p < 0.05$).

Nuestro resultado indica que la variabilidad del patrón de la NAO podría jugar un papel relativamente importante en la modulación de la intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano en Canarias, confirmando así los resultados a los que anteriormente llegaron otros autores (Torres-Padrón, 2002). Sin embargo, al igual que en Torres-Padrón (2002) y Mahowald *et al.* (2003), consideramos que la serie aquí estudiada, de solo 8 años de duración, no es suficientemente larga para llegar a una conclusión clara, por lo que a continuación se expone un estudio similar pero sustituyendo la serie de niveles de PST por la del Índice de Africanidad AFINL₂₀₀, lo cual nos permite utilizar una serie de datos de 58 años (período 1948-2005).

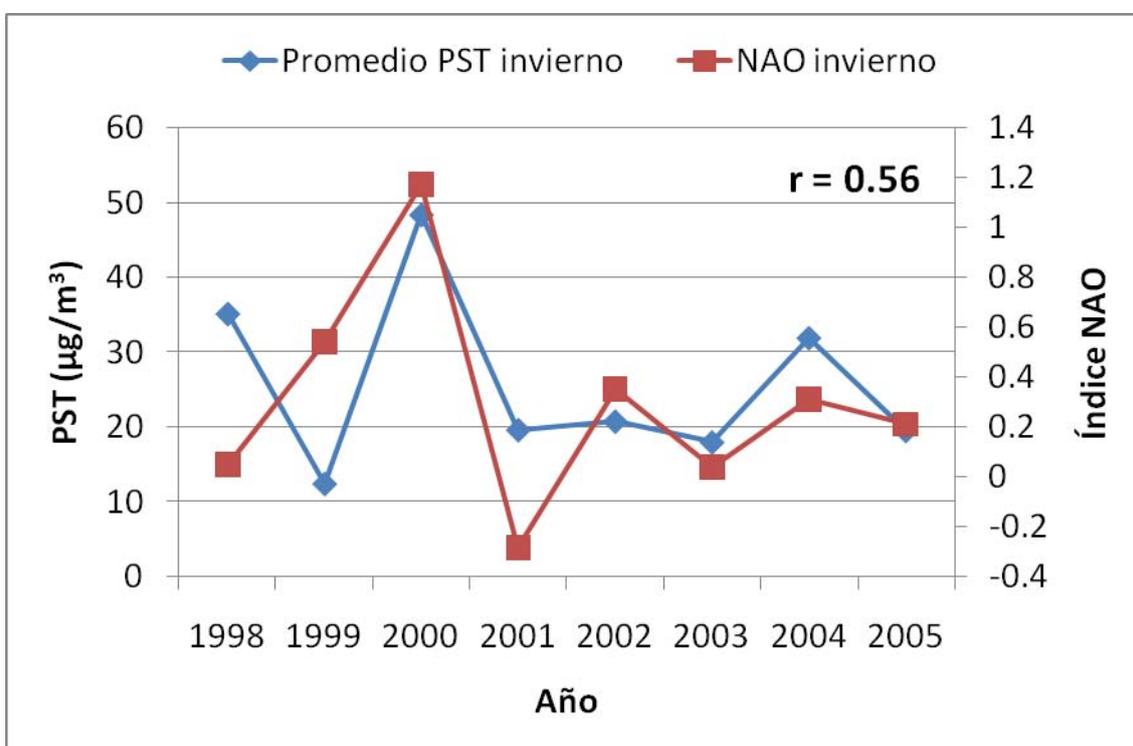


Figura 6.1. Promedio de valores de concentración de PST e índice NAO para las meses de Diciembre-Enero-Febrero-Marzo, para la serie 1998-2003.

6.3.1.2. Relación entre AFINL₂₀₀ en El Río y NAO

Se ha estudiado la relación entre las series de AFINL₂₀₀ e índices NAO, tanto a partir de promedios anuales como de promedios estacionales (invierno y verano) para el período 1948-2005.

Para los promedios anuales (Figura 6.2) se encuentra un coeficiente de correlación $r = 0.35$ entre las dos series ($p < 0.05$). Estudiando la correlación para las series de promedios estacionales únicamente se encuentra una correlación moderada, con $r = 0.58$ ($p < 0.05$), para la estación de invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) (Figura 6.3). Esta correlación es ligeramente mejor que la encontrada para los promedios estacionales de invierno de la serie de PST en El Río. Teniendo en cuenta que la correlación se ha calculado a partir de datos de una serie de 58 años y que la correlación encontrada es moderada se puede concluir, por lo tanto, que el patrón de teleconexión de la NAO modula moderadamente la frecuencia e intensidad de las intrusiones de polvo sahariano que llegan a Canarias a nivel de superficie.

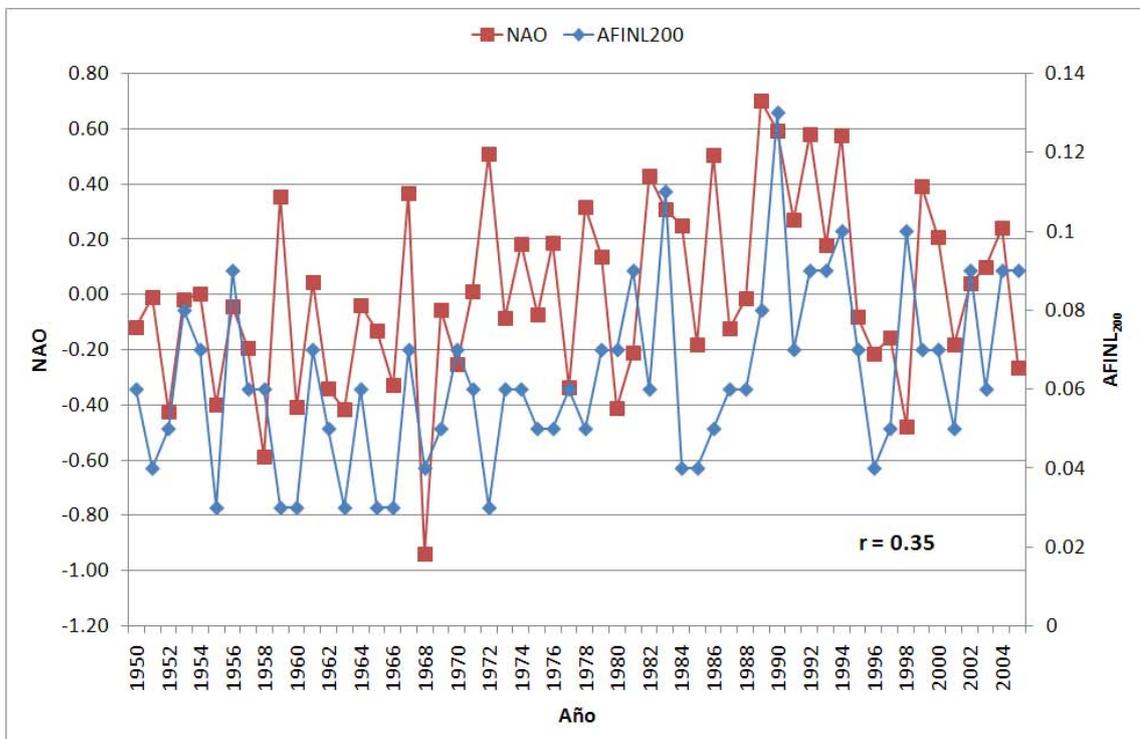


Figura 6.2. Series de promedios anuales del índice NAO y del Índice de Africanidad AFINL₂₀₀ para el período 1950-2005.

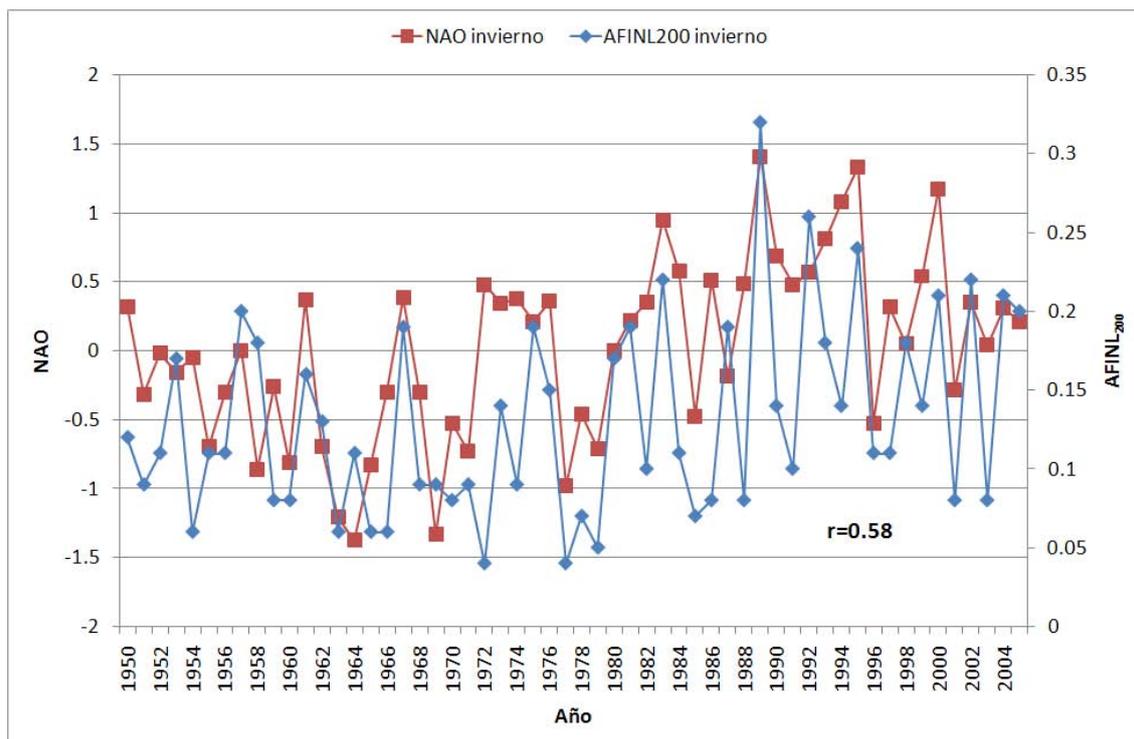


Figura 6.3. Series de promedios calculados a partir de datos de los meses de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo (invierno) del índice NAO y del Índice de Africanidad AFINL₂₀₀ para el período 1950-2005.

Las variaciones de periodo largo y las tendencias de ambos parámetros muestran un buen acuerdo (ver Figuras 6.2 y 6.3).

6.3.2. DEFINICIÓN DEL NUEVO ÍNDICE DE TELECONEXIÓN MADRID-TENERIFE (ÍNDICE MTI)

6.3.2.1. Mapas de correlación entre campos de altura de geopotencial y la serie temporal de AFINL₂₀₀ a partir de promedios anuales

A partir de los promedios anuales de la serie 1948-2005 del Índice de Africanidad AFINL₂₀₀ y de campos de altura de geopotencial para el mismo período en el hemisferio Norte, los mapas de correlación calculados son los que se muestran en la Figura 6.4.

Para todos los niveles puede observarse que las máximas correlaciones se encuentran en la región de Islandia (máximas correlaciones negativas) y en la Península Ibérica (máximas correlaciones positivas). Este patrón meteorológico bipolar recuerda al de la NAO, pero con sus característica alta de las islas Azores desplazada hacia el Este hasta situarse sobre la Península Ibérica. Estos máximos de correlación son mayores en los niveles bajos, es decir, en 1000 hPa y 925 hPa.

La correlación en Canarias es de entre $r = 0.3$ y $r = 0.4$ ($p < 0.05$ en ambos casos) para todos los niveles estudiados.

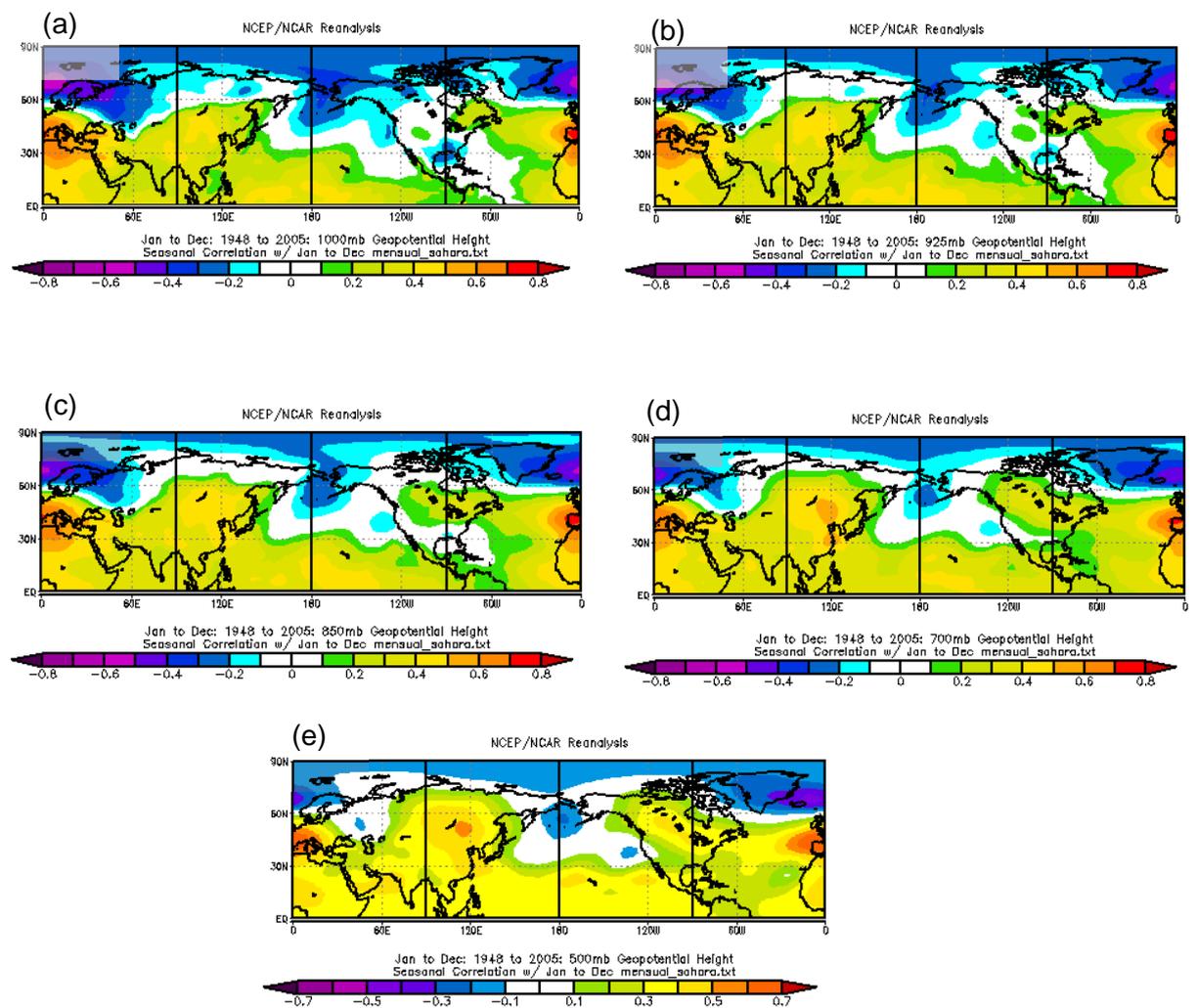


Figura 6.4. Mapas de correlación lineal entre promedios anuales de AFINL₂₀₀ y altura de geopotencial a diferentes niveles, para el período 1948-2005. (a) 1000 hPa, (b) 925 hPa, (c) 850 hPa, (d) 700 hPa, (e) 500 hPa.

6.3.2.2. Mapas de correlación entre campos de altura de geopotencial y la serie temporal de AFINL₂₀₀ a partir de promedios estacionales

Se realizó un cálculo de la correlación lineal entre promedios de campos de altura de geopotencial a varios niveles y la serie temporal de promedios de AFINL₂₀₀, análogo al presentado en la sección 6.3.2.1, esta vez utilizando promedios estacionales. En los promedios de invierno de los campos de geopotencial y de los índices AFINL₂₀₀ se usaron datos de los meses de Diciembre, Enero, Febrero y Marzo. Para el verano, se promediaron los datos de los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre.

En los mapas de correlación lineal correspondientes a invierno (Figura 6.5) se observa que las correlaciones máximas entre la altura de geopotencial a varios niveles y la serie del índice AFINL₂₀₀ vuelven a situarse en la región de Islandia (correlaciones negativas) y en la Península Ibérica (correlación positiva), si bien el centro de las máximas correlaciones positivas se encuentra más desplazado hacia el Oeste (es decir, más próximo a las islas Azores) en los niveles de 700 hPa y 500 hPa, por lo que el patrón bipolar se parece más al de la NAO.

La correlación en Canarias es constante, de entre $r = 0.5$ y $r = 0.6$ (ambos para $p < 0.05$), para todos los niveles excepto para el de 500 hPa, donde es menor.

En los mapas calculados en base a los promedios de los meses de verano (Figura 6.6) no se observan regiones de alta correlación entre la altura de geopotencial promedio en verano y los promedios de índices AFINL₂₀₀ durante la misma estación del año, por lo que en este caso no se puede identificar un patrón de teleconexión.

Las correlaciones en Canarias son mayores en niveles altos (entre $r = 0.4$ y $r = 0.5$, ambos para $p < 0.05$), a partir de 700 hPa.

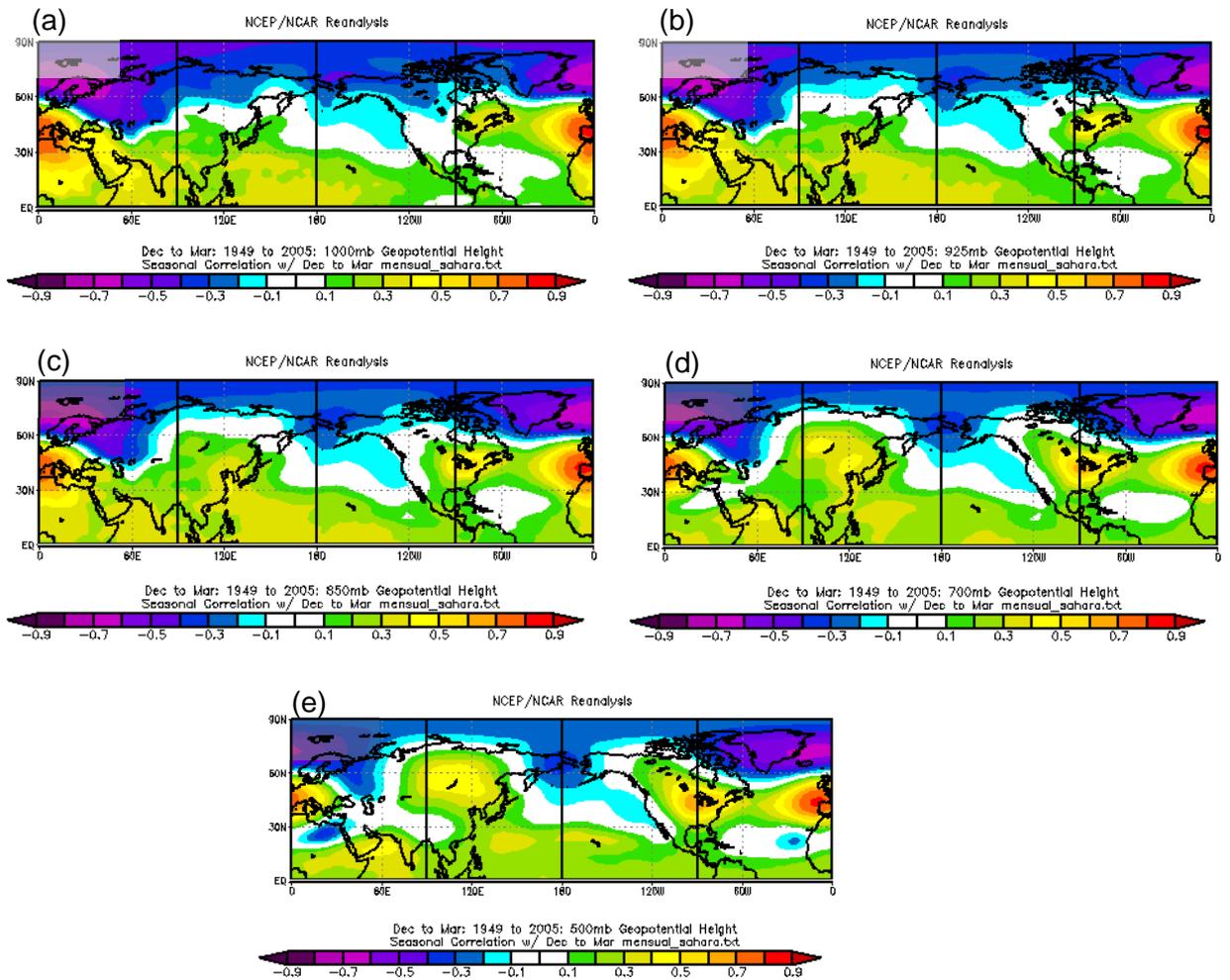


Figura 6.5. Mapas de correlación lineal entre promedios estacionales (invierno) de AFINL₂₀₀ y altura de geopotencial a diferentes niveles, para el período 1948-2005. (a) 1000 hPa, (b) 925 hPa, (c) 850 hPa, (d) 700 hPa, (e) 500 hPa.

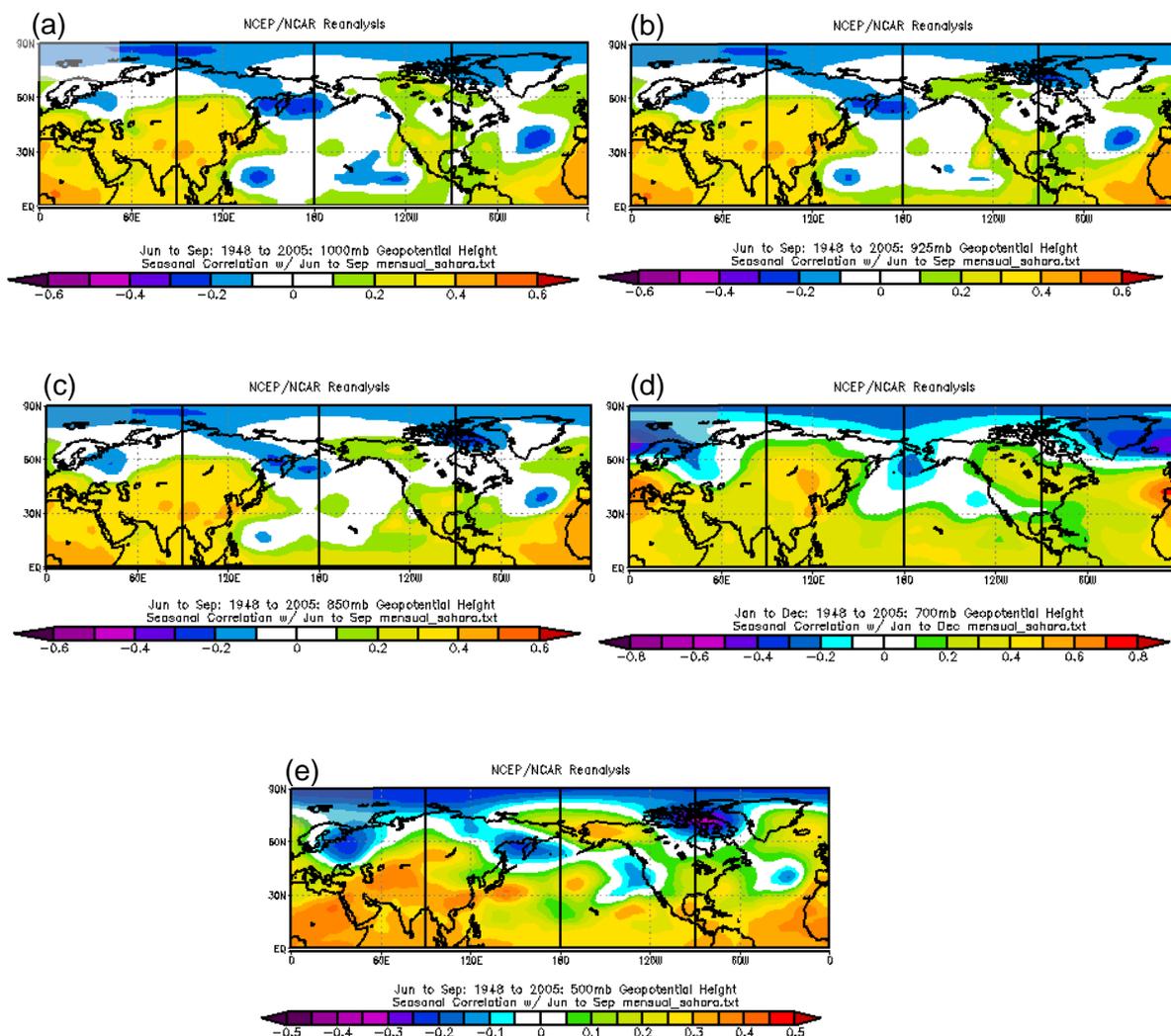


Figura 6.6. Mapas de correlación lineal entre promedios estacionales (verano) de AFINL₂₀₀ y altura de geopotencial a diferentes niveles, para el período 1948-2005. (a) 1000 hPa, (b) 925 hPa, (c) 850 hPa, (d) 700 hPa, (e) 500 hPa.

Como se ha visto anteriormente, el centro de máximas correlaciones positivas entre los promedios anuales y estacionales de invierno del índice AFINL₂₀₀ y de campos de altura de geopotencial a diferentes niveles se encuentra situado en la Península Ibérica. Para niveles bajos, las altas correlaciones se encuentran en el centro del territorio peninsular mientras que, para niveles a partir de 700 hPa, se desplazan en dirección Noroeste. Además, de los mapas de correlación lineal (Figuras 6.4 y 6.5) se puede concluir que en la región de Canarias la correlación se mantiene constante. Es por ello que definimos nuestro índice regional de teleconexión, al que llamaremos índice MTI, como la diferencia de anomalías (referidas a los valores promedio del período 1961-1990) de altura de geopotencial a nivel de 1000 hPa

entre Tenerife y Madrid . Se eligió el nivel de 1000 hPa por ser aquel en el que la correlación del nuevo índice climático con la serie AFINL₂₀₀ es máxima (Tabla 6.1), si bien es cierto que en todos los niveles estudiados la correlación entre las dos series temporales es buena.

Se estudiaron las correlaciones entre AFINL₂₀₀ y MTI a partir de promedios anuales en el período 1948-2005 (Figura 6.7), promedios estacionales de invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) para el período 1949-2005 (Figura 6.8), y promedios estacionales de verano (Junio-Julio-Agosto-Septiembre) para el período 1948-2005 (Figura 6.9). La correlación es buena para las series anuales y de invierno en todos los niveles (Tabla 6.1), siendo mayor en todos los niveles para las series de promedios estacionales de invierno.

En el caso de las series de promedios estacionales de verano, no se encuentra correlación entre MTI y AFINL₂₀₀ (Tabla 6.1). Este resultado es lógico ya que, como se demostró en la sección 4.3.2, las intrusiones de polvo africano en Canarias no tienen lugar a nivel de superficie durante los meses de verano.

Se concluye, por lo tanto, que la clave en la modulación de la frecuencia e intensidad de los episodios de intrusiones de polvo africano que afectan a Canarias a nivel de superficie en invierno se encuentra en la diferencia de presión atmosférica entre Canarias y la Península Ibérica. De hecho, el patrón de correlaciones que se identifica en las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 para la región del Sur de Europa, Canarias y Norte de África, es muy similar al encontrado en la sección 5.3.1 como causante de la mayor parte de la variabilidad de las intrusiones de polvo africano en Canarias, esto es, un sistema de altas anomalías positivas que afecta a la Península Ibérica y se adentra en el Norte de África, quedando Canarias en su flanco Suroriental.

El índice MTI es una herramienta muy útil, ya que podemos predecir sus valores fácilmente a partir de predicciones estacionales de presión atmosférica en Canarias y en la Península Ibérica, lo que nos ayudará a prever a medio plazo la importancia de los episodios de intrusión de polvo africano en el archipiélago canario.

Tabla 6.1 Coeficientes de correlación entre las series de promedios de MTI y AFINL₂₀₀ para el periodo 1948-2005 y para varios niveles de altura.

Coeficiente de correlación (r)			
(ρ < 0.05)			
Nivel (hPa)	Promedios anuales	Promedios invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo)	Promedios verano (Junio-Julio-Agosto-Septiembre)
1000	0.73	0.81	0.17
925	0.72	0.81	0.08
850	0.69	0.81	0.06
700	0.70	0.79	0.15
500	0.72	0.78	0.18

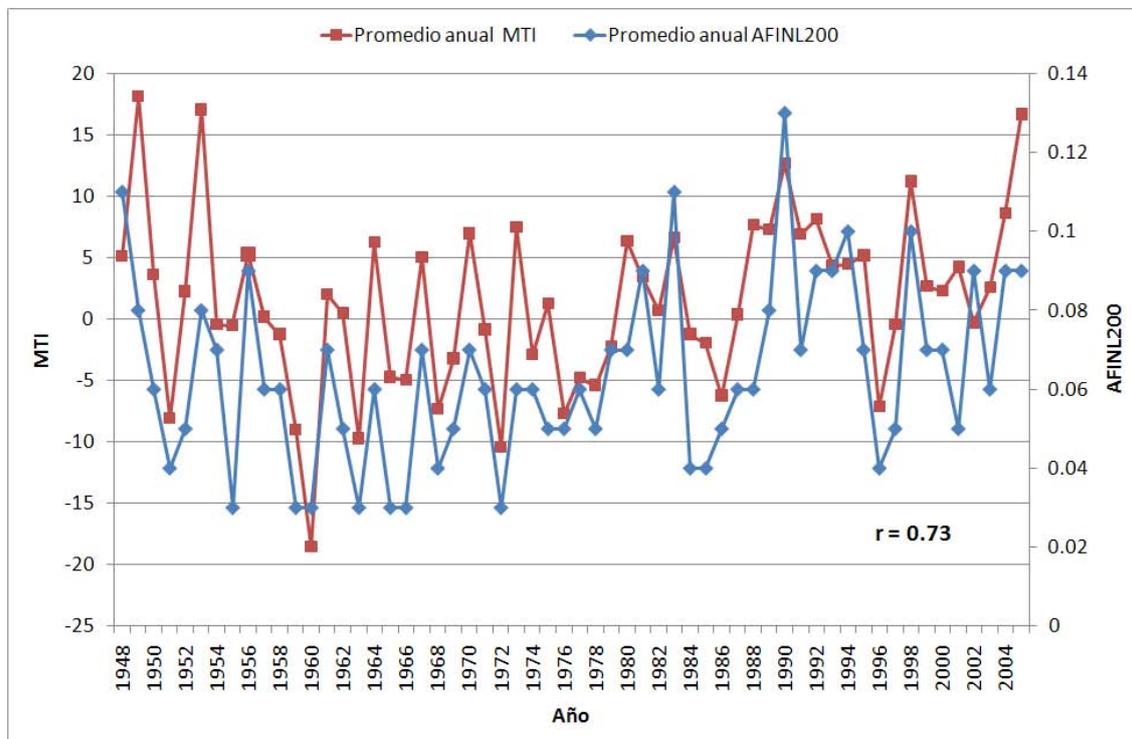


Figura 6.7. Series de promedios anuales de índice MTI y de índice AFINL₂₀₀ para el período 1948-2005.

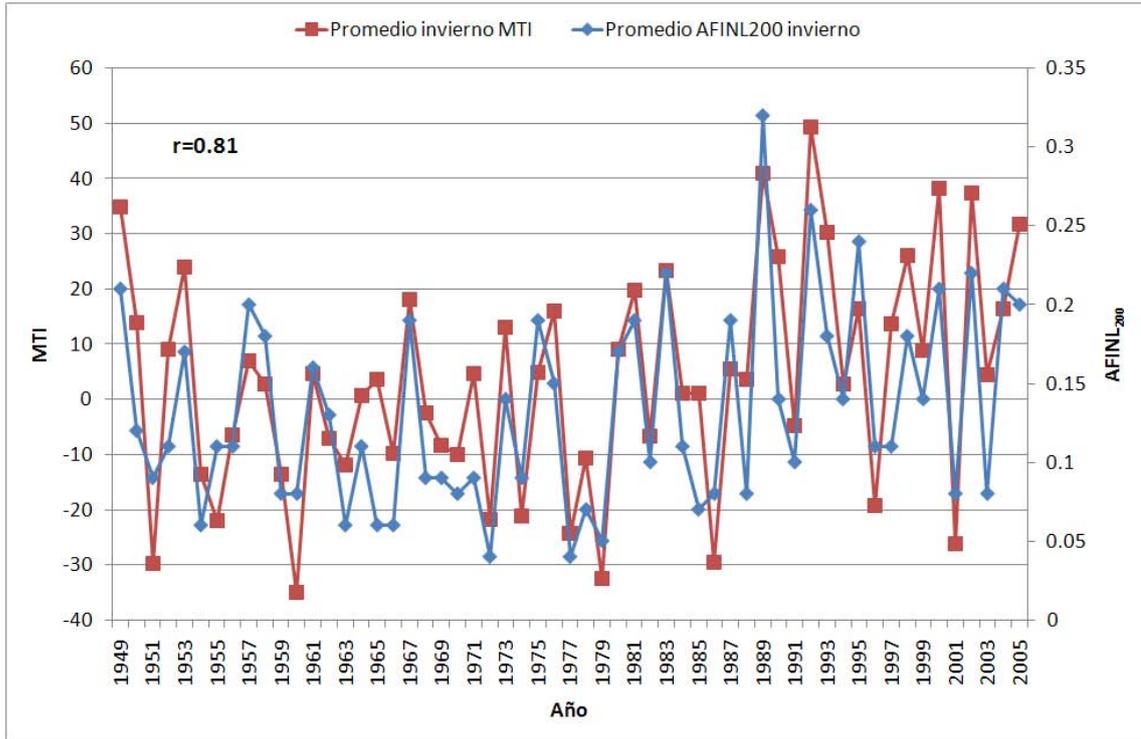


Figura 6.8. Series de promedios estacionales (invierno) de índice MTI y de índice AFINL₂₀₀ para el período 1948-2005.

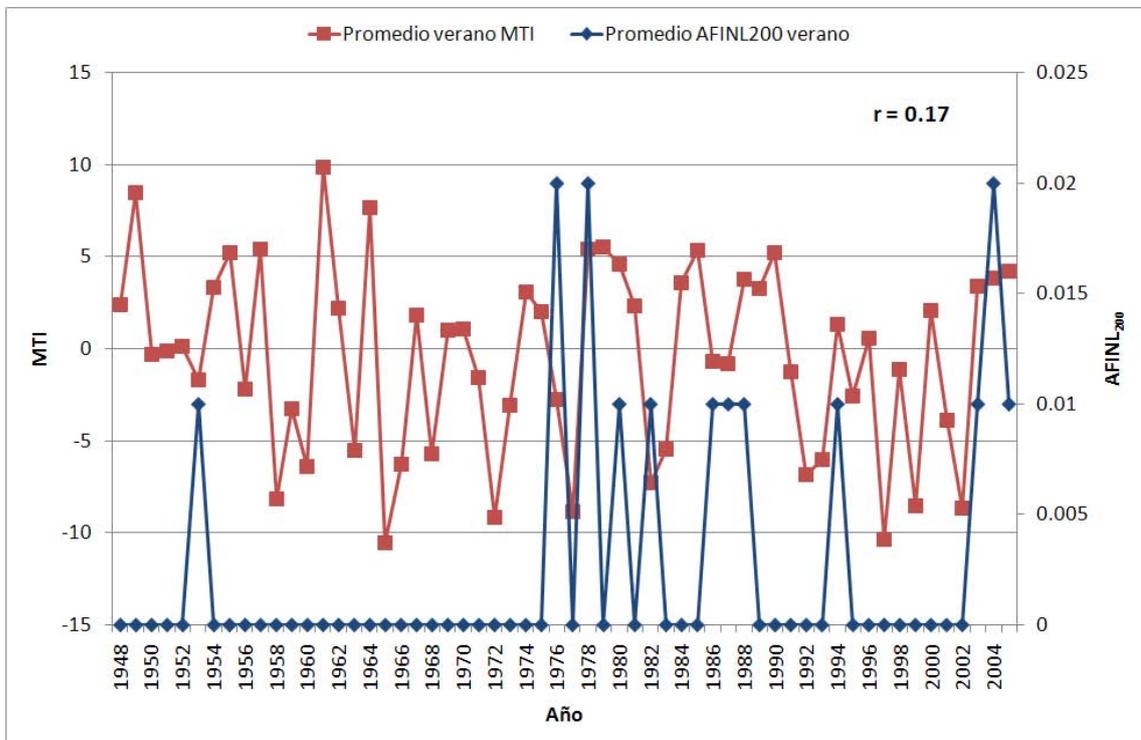


Figura 6.9. Series de promedios estacionales (verano) de índice MTI y de índice AFINL₂₀₀ para el período 1948-2005.

6.3.3. RELACIÓN ENTRE LOS EPISODIOS DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS Y EL SAHEL RAINFALL INDEX

Del estudio de correlación lineal entre los niveles medios de PST para invierno registrados en El Río durante el período 1998-2004 y los valores del Sahel Rainfall Index del año anterior (Fig. 6.10), resulta un coeficiente de correlación $r = 0.33$ ($p < 0.05$). Este valor indica que no se encuentra relación estadísticamente significativa entre la intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano en invierno en Canarias y la precipitación en la región del Sahel durante el año anterior. El resultado es compatible con los resultados de esta Tesis sobre el origen del polvo africano con llegada a Canarias (sección 4.3.3), donde se concluyó que el Sahel no es una zona importante en cuanto el aporte de polvo a Canarias.

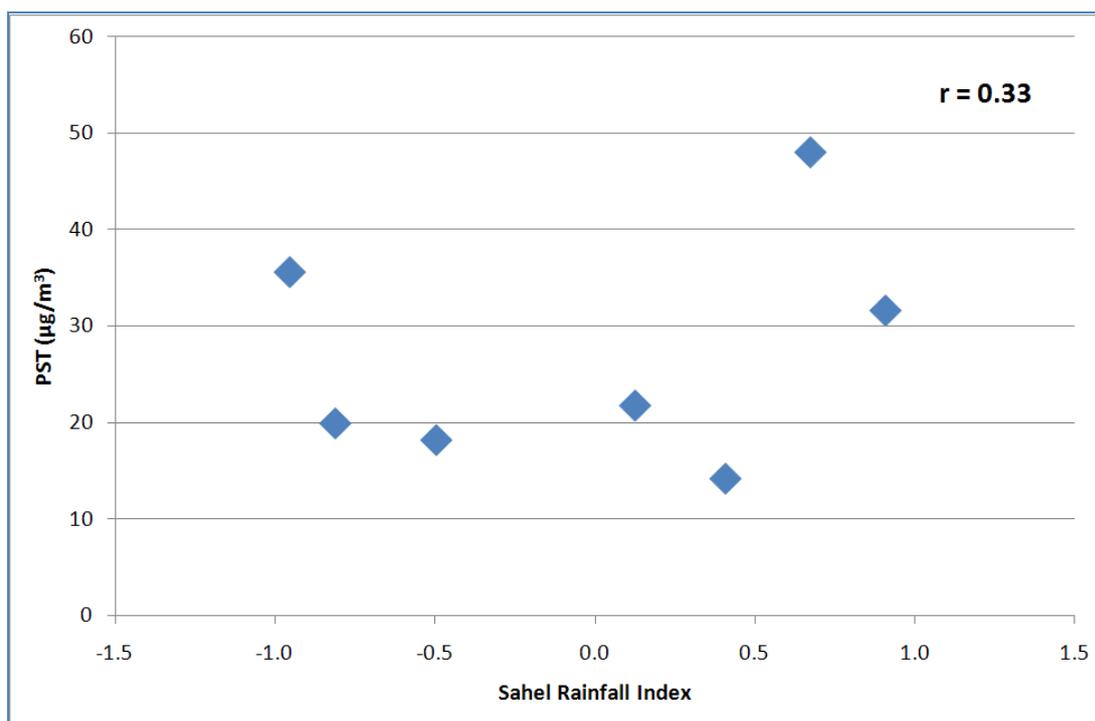


Figura 6.10. Correlación de los niveles promedio de PST en El Río para los meses de Diciembre a Marzo frente al Sahel Rainfall Index del año anterior, para el período 1998-2004.

Prospero y Lamb (2003) encontraron anticorrelación entre las series de concentraciones de partículas en Barbados y el Sahel Rainfall Index para el periodo 1965-1998 porque el estudio se hizo para meses de verano (Mayo-Septiembre) y la

región del Sahel es durante estos meses una importante fuente de polvo con llegada al Caribe y Sureste de EEUU, a pesar de que la máxima actividad emisora de polvo en esta región fuente tiene lugar en invierno. En invierno el transporte de polvo africano se produce hacia latitudes al Sur de Barbados y hacia Suramérica (Prospero y Lamb, 2003). Canarias se encuentra al Norte del corredor de polvo que se extiende desde África hacia América (Figura 6.11). Al igual que en el caso de Canarias y por la misma razón, en invierno en Barbados no existe correlación porque, a pesar de que el Sahel es en esa época del año una fuente importante de polvo africano a escala global, no lo es, sin embargo, para la región estudiada.

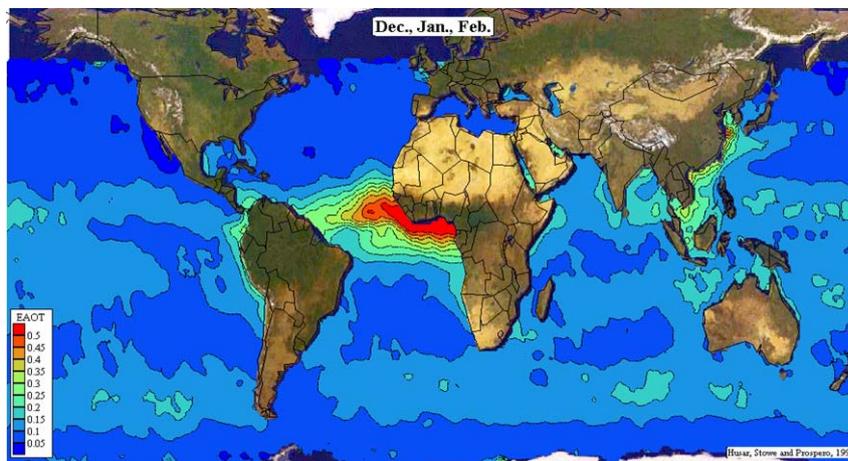


Figura 6.11. Promedio estacional (Diciembre-Enero-Febrero) de espesor óptico de aerosoles. Datos del satélite NOAA/AVHRR. Adaptado de Hussar *et al.*(1997).

CAPÍTULO 7

**Tendencia de las intrusioniones de masas
de aire africano en Canarias y su
relación con el cambio climático**

7. TENDENCIA DE LAS INTRUSIONES DE MASAS DE AIRE AFRICANO EN CANARIAS Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

7.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Durante los últimos años hemos asistido a un progresivo aumento de la importancia que los distintos medios de comunicación, tanto prensa escrita como radio y televisión, dan a los episodios de intrusión de polvo africano en Canarias. Habitualmente nos encontramos con que el mensaje transmitido a la sociedad sugiere que estos episodios son cada vez más frecuentes e intensos. De hecho, esta creencia parece claramente instaurada en la opinión pública canaria.

Cabe preguntarse hasta qué punto esta idea generalizada es correcta o si surge a partir de ciertos factores como la mejora en los métodos de observación, el aumento en el número de trabajos científicos en esta área y la cada vez más rápida transferencia de resultados de investigación a la sociedad, o la proliferación de sistemas de alerta de episodios intensos.

Desde un punto de vista científico, la única manera de averiguar si realmente las advecciones de aire cálido desde África y las intrusiones de polvo africano en Canarias son cada vez más frecuentes es realizando un análisis estadístico de tendencias en las series históricas de los indicadores adecuados. Ejemplos de estos indicadores podrían ser la concentración de polvo, el número de días de intrusión de masas de aire africano, el número de días de superación de un umbral de concentración de polvo, los valores de AI del TOMS o el espesor óptico de aerosoles.

Pocos y contradictorios estudios se encuentran publicados hasta la fecha acerca del estudio de tendencias de los episodios africanos en Canarias. Díaz (2006) encontró un aumento de la presencia de aerosoles sobre la región de Canarias durante la estación cálida en los últimos años del periodo 1978-2004. Por otro lado, Dorta *et al.* (2005) encontraron una ligera tendencia a la disminución de la

frecuencia de intrusiones africanas en Canarias basándose en la interpretación visual de la serie de porcentaje anual de número de días de intrusión para el período 1976-2003.

Comparar la variabilidad y tendencias de diferentes parámetros climáticos con la de los indicadores de intrusiones de polvo africano en Canarias podría esclarecer hasta qué punto este fenómeno está conectado con el denominado Cambio Climático que se ha detectado a partir de finales de la década de 1970 (IPPC, 2007).

7.2. METODOLOGÍA: MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA EL ESTUDIO DE SERIES TEMPORALES

El análisis de series temporales trata del estudio de las series de datos ordenados en el tiempo, bien deterministas o aleatorias, es decir, aquellas en las que a partir de los datos pasados no es posible conocer con total certeza el próximo valor de la variable. El objetivo del análisis de series temporales es, por un lado, explicar las variaciones observadas en la serie en el pasado, tratando de determinar si responden a un determinado patrón de comportamiento y, por otro lado, en el caso de que se consiga definir ese patrón de modelo, predecir el comportamiento futuro de la misma.

A lo largo de los anteriores capítulos de esta Memoria de Tesis se han presentado una serie de análisis básicos de series de datos, tales como la de niveles de PST en El Río o las de Índices de Africanidad, a partir de los que se ha inferido la variabilidad estacional o la correlación entre diferentes conjuntos de datos.

Hasta ahora, la técnica de análisis de series que principalmente hemos utilizado es la denominada como análisis exploratorio de datos, basada simplemente en la descripción de su representación gráfica. En general, este tipo de análisis permite una apreciación de las características de los datos mejor que la que se puede alcanzar mediante resumen estadístico o análisis de nivel de representatividad

estadística. Por medio de esta técnica podemos detectar las características más sobresalientes de una serie, tales como el movimiento a largo plazo, la amplitud de las oscilaciones, la posible existencia de ciclos, los puntos de ruptura, la presencia de valores atípicos o anómalos o la presencia de errores obvios en los datos. Un análisis exploratorio de datos bien realizado puede eliminar la necesidad de un análisis estadístico formal.

En este capítulo, además del mencionado método de análisis exploratorio de series temporales, se utilizan una serie de test estadísticos para tratar de identificar tendencias en las series, así como años de cambio de dichas tendencias. Dependiendo de si los datos de la serie temporal siguen una distribución normal o no, los test estadísticos pueden ser de dos tipos (Sheskin, 2004):

- Test paramétricos: asumen que las series temporales de datos y sus errores (desviaciones respecto a la tendencia) siguen una distribución particular, usualmente una distribución normal. Este tipo de tests son útiles para cuantificar cambios en los datos, como por ejemplo cambios de magnitud en el promedio o gradiente en la tendencia.
- Test no paramétricos: generalmente son independientes del tipo de distribución de los datos. Detectan tendencias y cambios en las series, pero no cuantifican su magnitud. Son muy útiles en el análisis de series temporales de parámetros hidrológicos y climáticos porque ese tipo de datos generalmente no están distribuidos de manera normal.

Como podemos ver, la diferencia entre los test paramétricos y los no paramétricos radica en que para utilizar los paramétricos se requiere asumir más condiciones. La ventaja de este tipo de métodos es que son más eficaces, ya que usan los datos de una manera más eficiente que los no paramétricos.

Cuando los datos de una serie temporal presentan una distribución normal pero se usa un test no paramétrico, encontramos la desventaja de que, en ese caso, la estadística no paramétrica es mucho menos poderosa que la estadística paramétrica.

Se analizaron las tendencias y años de cambio de tendencia de series de promedios anuales y estacionales de índices de permanencia y diversos parámetros climáticos, algunos de ellos a diferentes niveles (1000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa y 500 hPa), para el período 1948-2005. Los promedios estacionales han sido calculados para invierno (Diciembre-Enero-Febrero-Marzo) y verano (Junio-Julio-Agosto-Septiembre). Las series de índices de permanencia analizados son las siguientes:

- AFINL₂₀₀, AFINL₁₅₀₀, AFINL₂₄₀₀ → índices de africanidad de la región Sahara
- AFISL₂₀₀, AFISL₁₅₀₀, AFISL₂₄₀₀ → índices de africanidad de la región Sahel
- NATL₂₀₀, NATL₁₅₀₀, NATL₂₄₀₀ → índices de permanencia en el Atlántico Norte
- SATL₂₀₀, SATL₁₅₀₀, SATL₂₄₀₀ → índices de permanencia en el Atlántico Sur
- SEUL₂₀₀, SEUL₁₅₀₀, SEUL₂₄₀₀ → índices de permanencia en el Sur de Europa
-

En cuanto a las variables ambientales estudiadas, fueron las siguientes:

- Altura de geopotencial
- Temperatura del aire
- Componente meridional del viento
- Componente zonal del viento
- Humedad relativa del aire
- Humedad específica del aire
- Temperatura del mar
- Agua precipitable
- Tasa de precipitación

Estas series de parámetros climáticos se obtuvieron a partir del reanálisis de NCEP-NCAR para un dominio geográfico de límites [25°N,35°N], [14°W,18°W] representativo del archipiélago canario.

A estas series temporales le añadimos la de precipitación acumulada registrada en Santa Cruz de Tenerife durante el mismo periodo (1948-2005). Estos datos proceden de la base de datos climatológica del Instituto Nacional de Meteorología (INM). La estación de Santa Cruz de Tenerife ($28^{\circ}27'18''\text{N}$, $16^{\circ}14'56''\text{W}$, 36 m.s.n.m.) está situada en las instalaciones del Centro Meteorológico Territorial de Canarias Occidental del INM. Se trata de una estación de tipo CATP (completa, automática, termométrica y pluviométrica).

Una vez realizados todos los cálculos estadísticos, comparamos los resultados obtenidos en busca de similitudes que puedan indicarnos posibles relaciones entre las tendencias de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias y las tendencias de diferentes parámetros climáticos.

7.2.1. PRUEBA DE NORMALIDAD DE ANDERSON-DARLING

Mediante un test de normalidad se ha estudiado la distribución de las variables para averiguar cuál es el tipo de test estadístico que mejor se adecúa a su estudio. El test utilizado ha sido el de Anderson-Darling.

El test de Anderson-Darling (Stephens, 1976) se usa para comprobar si un conjunto de datos proviene de una población con una distribución específica, comparando la función distribución acumulativa empírica de nuestra serie de datos con la distribución esperada si los datos fueran normales.

Es una modificación del test de Kolmogorov-Smirnov (Chakravarti y Roy, 1967) por la cual se da mayor peso a la cola de la distribución. A diferencia del test de Kolmogorov-Smirnov, el test de Anderson-Darling hace uso de la distribución específica para calcular los valores críticos. Esta característica lo hace más sensible, pero tiene la desventaja de que los valores críticos deben ser calculados para cada distribución.

A continuación veamos cómo se define el test de Anderson-Darling:

Hipótesis nula $H_0 \rightarrow$ los datos siguen una distribución determinada.

Hipótesis alternativa $H_1 \rightarrow$ Los datos no siguen una distribución determinada.

$$A^2 = -N - S \quad (\text{Ec. 7.1})$$

$$\text{donde: } S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (\text{Ec. 7.2})$$

F es la función de distribución acumulativa de la distribución estudiada. Y son los datos ordenados. N es el número de datos de la serie.

Este test pertenece a los llamados “one-side tests” y la hipótesis nula se rechaza si A es mayor que el valor crítico. Para una distribución dada, el valor estadístico de Anderson-Darling, A, debe ser multiplicado por una constante (que habitualmente depende del tamaño de la muestra N (Stephens, 1976).

Para todas las series estudiadas en este capítulo, la prueba de Anderson-Darling se ha realizado en el entorno del programa Minitab v.15. Tras llevar a cabo la prueba, este programa nos muestra un gráfico de probabilidad (Figura 7.1) en el que se incluye la representación de los intervalos de confianza del 95% (líneas azules) y se muestran los valores del estadístico (AD), promedio (Mean), desviación estándar (StDev), número de datos de la serie (N) y valor p asociado (P-Value).

La distribución es normal si el valor p asociado es mayor que el nivel de confianza usado ($\alpha=0.05$) y el estadístico AD es pequeño. En ese caso, los puntos se ajustarán aproximadamente a una línea recta y se encontrarán dentro de las líneas que marcan los intervalos de confianza.

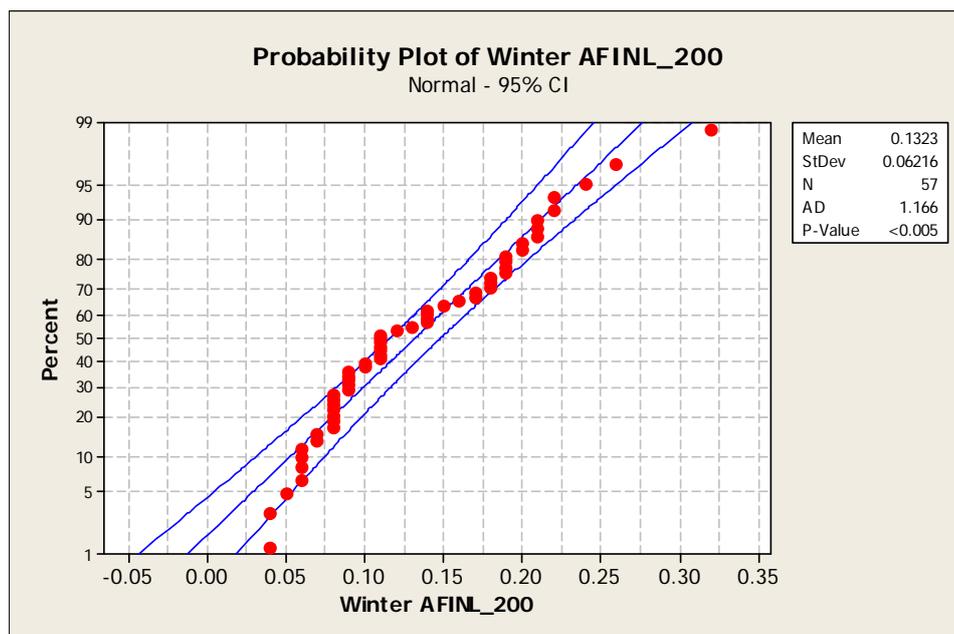


Figura 7.1. Ejemplo de gráfico de probabilidad resultante del test de Anderson-Darling. La variable estudiada es el índice de africanidad AFINL₂₀₀.

7.2.2. CÁLCULO DE TENDENCIAS

La tendencia de las series con distribución normal se calcularon con el método paramétrico de regresión lineal gracias al software Trend v.1.0.2. Este software, de uso gratuito, es un producto del Cooperative Research Center for Catchment Hydrology's (CRCCH) Climate Variability Program (Australia) y está basado en el WMO/UNESCO Expert Workshop on Trend/ChangeDetection (Kundzewicz y Robson, 2000) y en el texto publicado por Grayson *et al.* (1966).

En el caso de las series en las que la distribución de datos no es normal, la tendencia se estudió con el método no paramétrico de Mann-Kendall, gracias a un script ejecutado en el entorno del software Minitab v.15.

Un resultado muy importante en la estadística de cálculo de tendencias es el valor-p. Este valor representa la probabilidad de que pudieran seleccionarse aleatoriamente las poblaciones con la tendencia observada, es decir, informa de la confiabilidad de la tendencia encontrada (Sheskin, 2004):

$$\text{Confiabilidad de la tendencia} = (1 - \text{valor } p) \cdot 100\% \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Por ejemplo, un valor-p de 0.05 significa que hay una probabilidad del 5% de que la tendencia observada sea aleatoria.

7.2.2.1. Test de regresión lineal

El test de regresión lineal prueba si existe tendencia lineal en la serie examinando la relación entre el tiempo (x) y la variable de interés (y). Este test asume que los datos están normalmente distribuidos, por lo que es una prueba paramétrica. Además, asume que los errores (desviaciones respecto a la tendencia) son independientes y siguen la misma distribución normal que los datos, con promedio nulo.

La pendiente de la recta de regresión se calcula de la siguiente manera:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Y el punto de intercepción es: $a = \bar{y} - b\bar{x}$ (Ec. 7.5)

Es estadístico del test, S, es: $S = b/\sigma$ (Ec. 7.6)

donde: $\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2}{n(n-2)(n^2-1)}}$ (Ec. 7.7)

El estadístico S sigue una distribución de Student-t con n-2 grados de libertad bajo la hipótesis nula.

7.2.2.2. Test de Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall es la más ampliamente utilizada en estudios hidrológicos y climatológicos para buscar tendencias en series temporales de datos (Manly, 2001). Se trata de una prueba no paramétrica.

Los n valores de la serie ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) son remplazados por sus rangos ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$).

El estadístico del test es: $S = \sum_{i=1}^{n-1} [\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i)]$ (Ec. 7.8)

donde: $\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

Si la hipótesis nula H_0 es verdadera, S se distribuye de una forma aproximadamente normal con:

$$\mu = 0$$

$$\sigma = n(n-1)(2n+5)/18$$
 (Ec. 7.9)

El estadístico z es: $z = |S|/\sigma^{0.5}$ (Ec. 7.10)

Un valor positivo de S indica que existe una tendencia creciente, mientras que un valor negativo de S indica la existencia de una tendencia decreciente.

Este test se ha realizado de manera independiente con los programas Trend v.1.0.2 y Minitab v.15, encontrándose siempre idénticos resultados.

7.2.3. CÁLCULO DE AÑOS DE CAMBIO DE TENDENCIA

Para calcular los años de cambio de tendencia, se utilizó el método no paramétrico de la suma cumulativa de residuos (conocido como CUSUM , Cumulative Sum of Residuals) para las series no normales y los métodos paramétricos de desviación cumulativa (Cumulative Deviation) y de la razón de probabilidad de Worley (Worsley Likelihood Ratio) para el caso de series con distribución normal (Grayson *et al.*, 1996; Kundzewick y Robson, 2000). Estas tres prueba estadísticas se realizaron gracias al software Trend (ver sección 7.2.2). A continuación se describen los fundamentos matemáticos de estos tests.

7.2.3.1. Prueba de la suma cumulativa de residuos (CUSUM, Cumulative Sum of Residuals)

Esta prueba estadística no paramétrica calcula si el promedio de dos partes de la serie de datos es diferente. El año de cambio de la tendencia será aquel en el que el estadístico de esta prueba sea máximo.

Dada una serie temporal de datos $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, la estadística del test se define como:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{mediana}}) ; k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{Ec. 7.11})$$

donde: $\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$

$\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$

$\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

x_{mediana} es el valor de la mediana de la serie de datos X_i

La distribución de V_k sigue la estadística para dos muestras de Kolmogorov-Smirnov ($KS = \left(\frac{2}{n}\right) \max |V_k|$) con los valores críticos de $\max |V_k|$ dados por:

$$\alpha = 0.10 \quad 1.22\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0.05 \quad 1.36\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0.01 \quad 1.63\sqrt{n}$$

Un valor negativo de V_k indica que la segunda parte de la serie tiene un promedio mayor que la primera parte y viceversa.

7.2.3.2. Prueba de las desviaciones acumulativas (Cumulative Deviation)

El propósito de esta prueba es detectar un cambio en el promedio de una serie temporal tras m observaciones, habiendo asumido antes que los datos están distribuidos normalmente. Por lo tanto, es una prueba paramétrica.

$$E(x_i) = \mu \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (\text{Ec. 7.12})$$

$$E(x_i) = \mu + \Delta \quad i = m+1, m+2, m+3, \dots, n$$

donde μ es el promedio antes del cambio y Δ es el cambio en el promedio.

Las desviaciones acumulativas de los promedios se calculan como:

$$S_0^* = 0 \quad S_k^* = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{Ec. 7.13})$$

Un valor negativo de S_k^* indica que la segunda parte de la serie tiene un valor promedio mayor que la primera parte y viceversa.

Las sumas parciales reescaladas y ajustadas se obtienen de dividir los valores de S_k^* por la desviación estándar:

$$S_k^{**} = S_k^* / D_x \quad (\text{Ec. 7.14})$$

$$D_x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{Ec. 7.15})$$

El estadístico del test es:

$$Q = \max |S_k^{**}| \quad (\text{Ec. 7.16})$$

Este estadístico se calcula para cada año. El año con máximo valor de Q es el año de cambio de tendencia.

7.2.3.3. Prueba de la razón de probabilidad de Worsley (Worsley Likelihood Ratio)

Al igual que las dos pruebas anteriormente descritas, la denominada prueba de la razón de probabilidad de Worsley busca el punto del eje temporal de la serie que separa a ésta en dos partes con promedios diferentes (Worsley, 1979). Este test asume que los datos están distribuidos normalmente (es paramétrico) y es similar al test de las desviaciones acumulativas, salvo en que los pesos de los valores S_k^* dependen de su posición en la serie temporal.

$$Z_k^* = [k(n-k)]^{-0.5} S_k^* \quad (\text{Ec. 7.17})$$

donde
$$Z_k^{**} = Z_k^* / D_x \quad (\text{Ec. 7.18})$$

El estadístico de la prueba, W, es:

$$W = \frac{(n-2)^{0.5} V}{(1-V^2)^{0.5n}} \quad (\text{Ec. 7.19})$$

donde:
$$V = \max |Z_k^{**}| \quad (\text{Ec. 7.20})$$

Un valor negativo de W indica que la segunda parte de la serie tiene un promedio mayor que la primera parte y viceversa.

7.3. RESULTADOS

7.3.1. TENDENCIAS DE LAS SERIES DE ÍNDICES DE AFRICANIDAD

En la Figura 7.2 se han representado las series de promedios anuales de los 6 índices de africanidad correspondientes a masas de aire que viajan a altura inferior a 1500 m.s.n.m. sobre el continente africano y llegan a Canarias a alturas de 200, 1500 y 2400 m.s.n.m, para el periodo 1948-2004. El resultado del análisis estadístico de Mann-Kendall o regresión lineal, según corresponda, para estas series refleja que existe tendencia creciente significativa únicamente en las series de los índices AFINL₂₀₀ y AFINL₂₄₀₀ (Tabla 7.1). Por lo tanto, encontramos que se ha producido un incremento en los promedios anuales de tiempos de permanencia sobre la región Sahara de las masas de aire que llegan a Canarias a nivel de superficie y a cumbres de las islas. Esto significa que existe una tendencia al aumento de la frecuencia anual e intensidad promedio anual de episodios de polvo africano en Canarias a nivel de superficie.

En la Figura 7.2 puede observarse que la tendencia creciente de la serie de AFINL₂₀₀ parece comenzar a partir de principios de la década de 1980, mientras que para la serie de AFINL₂₄₀₀ los valores sistemáticamente más altos que la media se encuentran a partir de finales de la década 1990. Según el análisis estadístico realizado, los años de cambio de tendencia son 1978 para la serie de AFINL₂₀₀ y 2001 para la serie de AFINL₂₄₀₀.

Si estudiamos por separado las series de promedios de índices de africanidad AFINL y AFSL para las estaciones de invierno y verano (Tabla 7.2), encontramos que existe tendencia ascendente estadísticamente significativa en los índices AFINL₂₀₀ y AFINL₂₄₀₀ durante ambas estaciones, aunque los años en los que la tendencia al alza comienza a ser significativa son diferentes. En invierno, el transporte de masas de aire saharianas a superficie en Canarias comienza a ser más frecuente e intenso a partir de 1979, mientras que en verano se estima que la tendencia creciente comienza a partir de 2002 (aunque los promedios de AFINL₂₀₀

en verano, por no ser las intrusiones bajas las más habituales, son muy bajos respecto a los registrados en invierno).

Para el transporte hacia zonas de medianías en las islas, se encuentra tendencia ascendente en invierno a partir de 1990, correspondiente al índice que da cuenta del transporte de masas de aire desde la región de Sahara.

En cuanto al transporte de polvo a zonas de cumbre de las islas, se encuentra tendencia positiva en la serie de promedios del índice AFINL₂₄₀₀ en verano a partir de 1999. El año de cambio de la tendencia en los índices AFINL es más temprano para masas de aire con llegada a nivel de superficie (1978) que para las que tienen una altura de llegada a 2400 m (2001) (Tabla 7.1).

Se obvia comentar los resultados que han dado como año de cambio al último año del período considerado (2005) ya que no parece un resultado realista, no solo porque no tengamos datos para contrastar el resultado con un análisis visual de la serie, sino porque se refieren intrusiones en altura durante el invierno, situación cuya ocurrencia no es significativa.

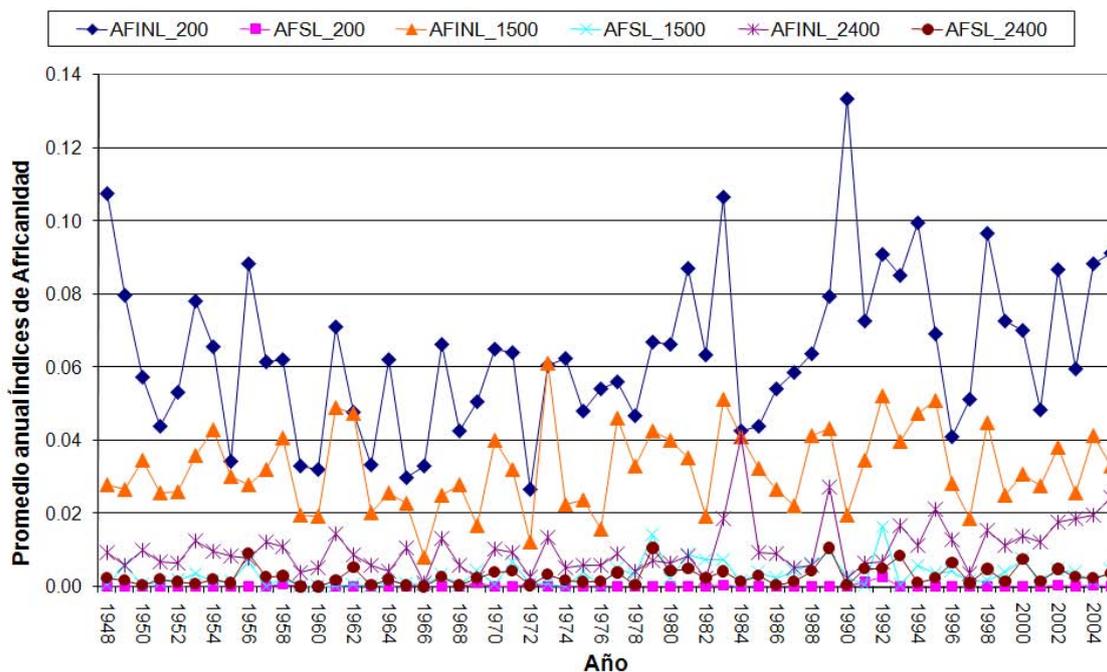


Figura 7.2. Series de promedios anuales de índices de africanidad AFINL₂₀₀, AFINL₁₅₀₀, AFINL₂₄₀₀, AFISL₂₀₀, AFISL₁₅₀₀ y AFISL₂₄₀₀ para el período 1948-2005.

Tabla 7.1. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de las series de promedios anuales de los índices de africanidad AFINL y AFISL para masas de aire que llegan a Canarias a alturas de 200, 1500 y 2400 m.s.n.m. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$. En el caso de NT, se muestran los valores-p correspondientes a los dos posibles resultados.

Índice de africanidad	p	Tendencia	Año de cambio
AFINL ₂₀₀	0.05	↑	1978
AFINL ₁₅₀₀	p=0.09 → creciente p=0.91 → decreciente	NT	
AFINL ₂₄₀₀	p=0.01	↑	2001
AFISL ₂₀₀	p=0.5 → creciente p=0.5 → decreciente	NT	
AFISL ₁₅₀₀	p=0.14 → creciente p=0.86 → decreciente	NT	
AFISL ₂₄₀₀	p=0.37 → creciente p=0.63 → decreciente	NT	

Tabla 7.2. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de las series de promedios estacionales (invierno y verano) de los índices de africanidad AFINL y AFISL para masas de aire que llegan a Canarias a alturas de 200, 1500 y 2400 m.s.n.m., para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$. En el caso de NT, se muestran los valores-p correspondientes a los dos posibles resultados.

Índice de africanidad	Invierno (Diciembre a Marzo)			Verano (Junio a Julio)		
	p	Tendencia	Año de cambio	p	Tendencia	Año de cambio
AFINL ₂₀₀	0.05	↑	1979	0.01	↑	2002
AFINL ₁₅₀₀	0.01	↑	1990	0.14 → creciente 0.86 → decreciente	NT	
AFINL ₂₄₀₀	0.01	↑	2005	0.03	↑	1999
AFISL ₂₀₀	0.19 → creciente 0.81 → decreciente	NT		0.5 → creciente 0.5 → decreciente	NT	
AFISL ₁₅₀₀	0.08 → creciente 0.92 → decreciente	NT		0.17 → creciente 0.83 → decreciente	NT	
AFISL ₂₄₀₀	0.03	↑	2005	0.45 → creciente 0.55 → decreciente	NT	

7.3.2. TENDENCIAS DE LAS SERIES DE ÍNDICES DE NO-AFRICANIDAD

En la sección 7.3.1 se encontró una tendencia creciente de la frecuencia e intensidad de los episodios africanos en Canarias a nivel de superficie, tanto en invierno como en verano, durante el periodo 1948-2005. Lo mismo se encontró para las intrusiones ocurridas en altura durante los meses de verano del mismo periodo. Parece lógico, por lo tanto, esperar una tendencia al descenso, o al menos una ausencia de tendencia, en el transporte hacia Canarias de masas de aire desde regiones no africanas, tales como el Atlántico Norte, Atlántico Sur y el Sur de Europa, al mismo nivel.

Para comprobar si se encuentran resultados consistentes con los expuestos en dicha sección, se calcularon las tendencias y cambios de año de tendencia de las series de NATL, SATL y SEUL, cada uno de ellos para alturas de llegada en Canarias a 200, 1500 y 2400 m.s.n.m.

Los resultados del análisis estadístico de las series se muestran en la Tabla 7.3. Se identifica una tendencia al descenso de la frecuencia e intensidad de los episodios de advección desde la región Norte del Atlántico hacia Canarias a nivel de superficie para los meses de invierno. Las demás series de Índices de Permanencia no presentan tendencias a este nivel. Por otro lado, el método de Mann-Kendall identifica tendencia creciente en el transporte de masas de aire a niveles de medianías desde el Atlántico Norte en verano, aunque el hecho de que el año de cambio resulte ser el 2005 (último año de la serie estudiada) indica que no es realista tener este resultado en cuenta.

El hecho de que la tendencia de los episodios de intrusión de masas de aire desde el Norte del Atlántico hacia cumbres de las islas en invierno resulte ser creciente no es incompatible con el aumento de episodios africanos en Canarias, ya que estos no suelen ocurrir en invierno a este nivel.

Este análisis de tendencias de índices de no-Africanidad, es decir, Índices de Permanencia que no implican un transporte de las masas de aire sobre el continente africano, demuestra que no existen tendencias crecientes estadísticamente importantes en el transporte de masas de aire limpias hacia Canarias. Es más, el cálculo de tendencias demuestra que, a nivel de superficie en

Canarias, ha descendido la frecuencia de episodios de intrusión de masas de aire desde el Atlántico Norte en invierno (Figura 7.3), coincidiendo con el aumento de intrusiones africanas al mismo nivel, aunque el año de cambio de tendencia en el caso de la serie de NATL₂₀₀ es 1986, mientras que para AFINL₂₀₀ resultó ser 1979.

Tabla 7.3 Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de las series de promedios estacionales (invierno y verano) de los índices de permanencia NATL, SATL y SEUL para masas de aire que llegan a Canarias a alturas de 200, 1500 y 2400 m.s.n.m., para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$. En el caso de NT, se muestran los valores-p correspondientes a los dos posibles resultados.

Índice de africanidad	Invierno (Diciembre a Marzo)			Verano (Junio a Julio)		
	p	Tendencia	Año de cambio	p	Tendencia	Año de cambio
NATL ₂₀₀	0.1	↓	1986	0.91 → creciente 0.09 → decreciente	NT	
NATL ₁₅₀₀	0.35 → creciente 0.65 → decreciente	NT		0.04	↑	2005
NATL ₂₄₀₀	0.03	↑	1995	0.51 → creciente 0.49 → decreciente	NT	
SATL ₂₀₀	0.89 → creciente 0.11 → decreciente	NT		0.07 → creciente 0.93 → decreciente	NT	
SATL ₁₅₀₀	0.76 → creciente 0.24 → decreciente	NT		0.34 → creciente 0.66 → decreciente	NT	
SATL ₂₄₀₀	0.60 → creciente 0.40 → decreciente	NT		0.06 → creciente 0.94 → decreciente	NT	
SEUL ₂₀₀	0.50 → creciente 0.50 → decreciente	NT		0.77 → creciente 0.23 → decreciente	NT	
SEUL ₁₅₀₀	0.21 → creciente 0.79 → decreciente	NT		0.93 → creciente 0.06 → decreciente	NT	
SEUL ₂₄₀₀	0.5 → creciente 0.5 → decreciente	NT		SEUL ₂₄₀₀ 0.5 → creciente 0.5 → decreciente	NT	NT

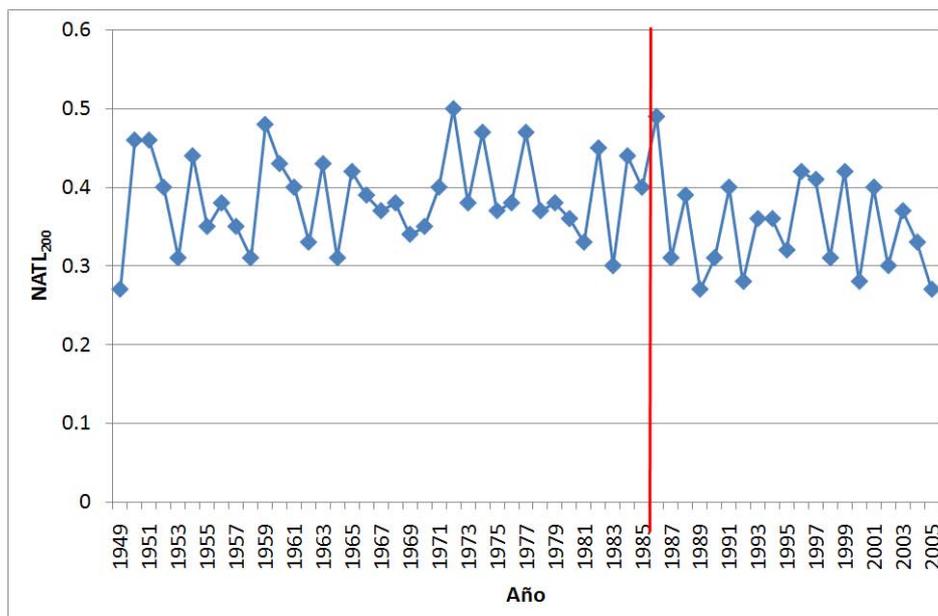


Figura 7.3. Serie de promedios estacionales (invierno) del índice NATL₂₀₀ para el período 1949-2005. Con una línea vertical se señala el año de cambio hacia la tendencia negativa identificada por el test de regresión lineal.

7.3.3. TENDENCIAS DE ALGUNOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS

7.3.3.1. Tendencias anuales

Para ilustrar la variabilidad de las diferentes variables estudiadas, en las Figuras 7.4 a 7.8 se muestran las series de promedios anuales para el período 1948-2005. Puede observarse en estas figuras que la década de 1950 constituyó una época de mínimos promedios anuales de temperatura del aire, máximos de humedad relativa y específica, masas de aire que predominantemente provenían del Sur de Europa y mínimos en el transporte de masas de aire africano.

Los resultados del estudio de tendencias y años de cambio de tendencia para las diferentes series de variables climáticas se resumen en las Tablas 7.4 y 7.5.

En las series de promedios anuales de altura de geopotencial en Canarias, para el período 1948-2005, se encontró una tendencia al ascenso en cada uno de los niveles estudiados. El año a partir del cual esta tendencia es más significativa se sitúa, en todos los casos, en la década de 1970. Para los niveles desde superficie

1000 hPa hasta 850 hPa los años de cambio pertenecen a la primera mitad de la década de 1970, mientras que el cambio parece ser más tardío (1976) en los niveles de 700 hPa y 500 hPa.

La dirección del viento solo experimentó una tendencia significativamente importante, al ascenso, en su componente meridional, lo que significa que los vientos se alejaron cada vez más del régimen de alisios, ganando en componente Sur. La componente zonal del viento en general presenta valores negativos a niveles bajos y medianías, y positivos en los niveles de 700 hPa y 500 hPa. El cambio significativo en la tendencia de los promedios anuales de viento meridional ocurre a finales de la década de 1970, simultáneamente al cambio de tendencia en el Índice de Africanidad $AFINL_{200}$.

Los promedios anuales de la temperatura del aire en las islas Canarias sufrieron una tendencia al aumento desde el nivel de superficie hasta 700 hPa, siendo este aumento significativo a partir de la segunda mitad de la década de 1970, al igual que ocurrió con las variables anteriormente citadas. En el nivel de 500 hPa la serie de promedios anuales sufrió una tendencia al descenso a partir del año 1970.

La humedad relativa descendió en todos los niveles, con la única excepción del de 500 hPa (donde no se encuentra tendencia), a partir de la segunda mitad de la década de 1970, mientras que la humedad específica solo experimentó tendencia al descenso en los niveles de 925 hPa y 850 hPa, a partir de los años 1976 y 1980 respectivamente, no mostrando tendencias significativas en los demás niveles estudiados. De nuevo, encontramos que el cambio en la tendencia de estas variables climáticas coincide en el tiempo con el cambio en la tendencia de las intrusiones africanas a nivel de superficie en Canarias.

La temperatura del mar muestra cierta tendencia al aumento, aunque los métodos paramétricos utilizados sitúan el año de cambio en 1994, por lo que esta tendencia no parece tener relación con la tendencia de los episodios africanos.

La tasa de precipitación en Canarias, en promedio anual, no muestra tendencia para la serie 1948-2005. Sí lo hacen las series correspondientes al agua precipitable, con tendencia al descenso a partir del año 1980, y la de precipitación acumulada en Santa Cruz de Tenerife a partir de 1973, lo cual podría también estar relacionado con el incremento a partir de la década de 1970 de los episodios africanos en las islas.

Tabla 7.4. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de las series de promedios anuales de parámetros climáticos a diferentes niveles, para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$.

Parámetro	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio
Altura de geopotencial	1000	0.01	↑	1971
Altura de geopotencial	925	0.01	↑	1971
Altura de geopotencial	850	0.01	↑	1972
Altura de geopotencial	700	0.01	↑	1976
Altura de geopotencial	500	0.01	↑	1976
Componente zonal del viento	1000	0.11 → creciente 0.88 → decreciente	NT	
Componente zonal del viento	925		NT	
Componente zonal del viento	850		NT	
Componente zonal del viento	700	0.19 → creciente 0.81 → decreciente	NT	
Componente zonal del viento	500	0.5 → creciente 0.5 → decreciente	NT	
Componente meridional del viento	1000	0.01	↑	1967
Componente meridional del viento	925	0.01	↑	1976
Componente meridional del viento	850	0.01	↑	1978
Componente meridional del viento	700	0.01	↑	1978
Componente meridional del viento	500	0.01	↑	1978
Temperatura del aire	1000	0.01	↑	1986
Temperatura del aire	925	0.01	↑	1977
Temperatura del aire	850	0.01	↑	1976
Temperatura del aire	700	0.01	↑	1976
Temperatura del aire	500	0.01	↓	1970
Humedad relativa	1000	0.01	↓	1970
Humedad relativa	925	0.01	↓	1977
Humedad relativa	850	0.01	↓	1976
Humedad relativa	700	0.01	↓	1979
Humedad relativa	500	0.30 → creciente 0.70 → decreciente	NT	
Humedad específica	1000	0.52 → creciente 0.48 → decreciente	NT	
Humedad específica	925	0.01	↓	1976
Humedad específica	850	0.01	↓	1980
Humedad específica	700	0.70 → creciente 0.30 → decreciente	NT	
Humedad específica	500	0.46 → creciente 0.54 → decreciente	NT	

Tabla 7.5. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de series de promedios anuales de parámetros climáticos para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$.

Parámetro	p	Tendencia	Año de cambio
Temperatura del mar	0.05	↑	1994
Tasa de precipitación	0.84 → creciente 0.16 → decreciente	NT	
Agua precipitable	0.1	↓	1980
Precipitación acumulada en Santa Cruz de Tenerife	0.04	↓	1973

7.3.3.2. Tendencias estacionales

Realizando el estudio de tendencias a partir de promedios estacionales para los meses de invierno (Diciembre a Marzo) y verano (Junio a Septiembre) (Tabla 7.6), se encuentra que la tendencia al ascenso en las series de altura de geopotencial ocurre, de la misma manera y a partir de los mismos años que en las series de promedios anuales, durante invierno y verano.

La componente zonal del viento muestra una tendencia creciente a partir del año 1968 durante los meses de verano, esto es, tiende a tener más componente Este, aunque se mantiene con valores negativos en los niveles de 1000 hPa, 925 hPa y 850 hPa. En invierno se encuentra tendencia decreciente a partir del año 1979, aunque no muy significativa ($p = 0.1$). En cuanto a la componente meridional, se encuentra una tendencia al aumento en invierno a partir de finales de la década de 1970, mientras que la tendencia en verano, también creciente, parece comenzar a principios de la década de 1970 y solo afecta a los niveles de 1000 hPa, 925 hPa y 850 hPa. Estas tendencias en las componentes del viento indican un debilitamiento del alisio.

La temperatura del aire en las islas Canarias aumenta en invierno a partir de la segunda mitad de la década de 1970, tal y como ocurre con la serie de AFINL₂₀₀, mientras que en verano esta tendencia al alza se produce a partir de principios de la década de 1980.

La humedad relativa muestra una tendencia al descenso estadísticamente significativa, con el año de cambio de tendencia situado entre los años 1979 y 1981, para los niveles desde 1000 hPa hasta 700 hPa, mientras que en el nivel de 500 hPa no se encuentra tendencia. En invierno la humedad específica también muestra una tendencia al descenso a partir del año 1979 y 1980 en los niveles de 925 hPa y 850 hPa respectivamente.

Durante los meses de verano, la tendencia de la humedad relativa es a descender en los niveles de 1000 hPa, 925 hPa y 850 hPa a partir de la primera mitad de la década de 1970, mientras que se encuentra una tendencia al aumento en el nivel de 500 hPa a partir del año 1970, coincidiendo con el descenso de la temperatura del aire en ese nivel. Las tendencias de las series de humedad específica durante los meses de verano son al descenso en el nivel de 925 hPa y al aumento en el nivel de 500 hPa.

El aumento de la temperatura del mar es estadísticamente más significativo durante los meses de invierno, a partir del año 1994, aunque también se encuentra cierta tendencia al aumento durante los meses de verano.

La tasa de precipitación en las islas Canarias solo muestra tendencia, en este caso al descenso, durante los meses de verano, estimando los métodos estadísticos que el año de cambio de tendencia es el 1966.

La serie de agua precipitable muestra tendencia al descenso a partir del año 1980 en invierno.

En cuanto a la precipitación acumulada en Santa Cruz de Tenerife, se encuentra cierta tendencia al aumento en verano, con el año de cambio de tendencia datado en el 1985.

Tabla 7.6. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de las series de promedios estacionales (invierno y verano) de parámetros climáticos a diferentes niveles, para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$.

Parámetro	Invierno (Diciembre a Marzo)				Verano (Junio a Septiembre)			
	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio
Altura de geopotencial	1000	0.01	↑	1971	1000	0.01	↑	1966
Altura de geopotencial	925	0.01	↑	1972	925	0.01	↑	1966
Altura de geopotencial	850	0.01	↑	1972	850	0.01	↑	1975
Altura de geopotencial	700	0.01	↑	1976	700	0.01	↑	1977
Altura de geopotencial	500	0.01	↑	1976	500	0.01	↑	1976
Componente zonal del viento	1000	0.81 → creciente 0.19 → decreciente	NT		1000	0.01	↑	1967
Componente zonal del viento	925	0.1	↓	1979	925	0.01	↑	1968
Componente zonal del viento	850	0.69 → creciente 0.31 → decreciente	NT		850	0.01	↑	1968
Componente zonal del viento	700	0.86 → creciente 0.14 → decreciente	NT		700	0.05	↑	1968
Componente zonal del viento	500	0.1	↓	1979	500	0.05	↑	1968
Componente meridional del viento	1000	0.09 → creciente 0.91 → decreciente	NT		1000	0.01	↑	1968
Componente meridional del viento	925	0.05	↑	1986	925	0.01	↑	1973

Tabla 7.6 (continuación)

Parámetro	Invierno (Diciembre a Marzo)				Verano (Junio a Septiembre)			
	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio
Componente meridional del viento	850	0.01	↑	1978	850	0.01	↑	1973
Componente meridional del viento	700	0.01	↑	1978	700	0.05 → creciente 0.95 → decreciente	NT	
Componente meridional del viento	500	0.05	↑	1977	500	0.16 → creciente 0.84 → decreciente	NT	
Temperatura del aire	1000	0.01	↑	1978	1000	0.01	↑	1984
Temperatura del aire	925	0.01	↑	1977	925	0.01	↑	1982
Temperatura del aire	850	0.01	↑	1976	850	0.01	↑	1983
Temperatura del aire	700	0.05	↑	1957	700	0.01	↑	1979
Temperatura del aire	500	0.67 → creciente 0.33 → decreciente	NT		500	0.01	↓	1970
Humedad relativa	1000	0.01	↓	1979	1000	0.01	↓	1971
Humedad relativa	925	0.01	↓	1979	925	0.01	↓	1972
Humedad relativa	850	0.05	↓	1980	850	0.05	↓	1977
Humedad relativa	700	0.05	↓	1981	700	0.89 → creciente 0.21 → decreciente	NT	
Humedad relativa	500	0.85 → creciente 0.15 → decreciente	NT		500	0.01	↑	1970
Humedad específica	1000	0.78 → creciente 0.22 → decreciente	NT		1000	0.26 → creciente 0.74 → decreciente	NT	

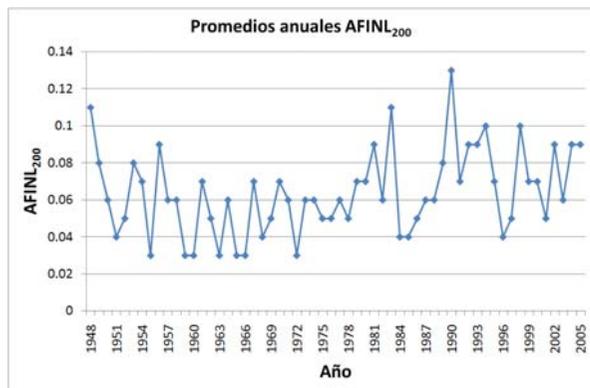
Tabla 7.6 (continuación)

Invierno (diciembre-enero-febrero-marzo)					Verano (junio-julio-agosto-septiembre)				
Parámetro	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio	Parámetro	Nivel (hPa)	p	Tendencia	Año de cambio
Humedad específica	925	0.01	↓	1979	Humedad específica	925	0.01	↓	1966
Humedad específica	850	0.01	↓	1980	Humedad específica	850	0.65 → creciente 0.35 → decreciente	NT	
Humedad específica	700	0.87 → creciente 0.13 → decreciente	NT		Humedad específica	700	0.2 → creciente 0.80 → decreciente	NT	
Humedad específica	500	0.90 → creciente 0.09 → decreciente	NT		Humedad específica	500	0.05	↑	1994

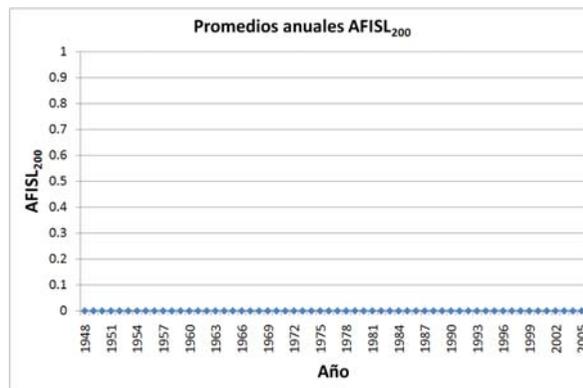
Tabla 7.7. Tendencia, valor-p del test de regresión lineal o del test de Mann-Kendall (según la distribución sea normal o no) para el cálculo de la tendencia y año de cambio de tendencia de series de promedios estacionales (invierno y verano) de parámetros climáticos para el período 1948-2005. NT = no existe tendencia significativa a $\alpha=0.05$. En el caso de NT, se muestran los valores-p correspondientes a los dos posibles resultados.

Parámetro Nivel (hPa)	Invierno (Diciembre a Marzo)			Verano (Junio a Septiembre)		
	p	Tendencia	Año de cambio	p	Tendencia	Año de cambio
Temperatura del mar	0.01	↑	1994	0.05	↑	1986
Tasa de precipitación	0.55 → creciente 0.45 → decreciente	NT		0.05	↓	1966
Agua precipitable	0.05	↓	1980	0.37 → creciente 0.63 → decreciente	NT	
Precipitación acumulada en Santa Cruz de Tenerife	0.84 → creciente 0.16 → decreciente	NT		0.04	↑	1985

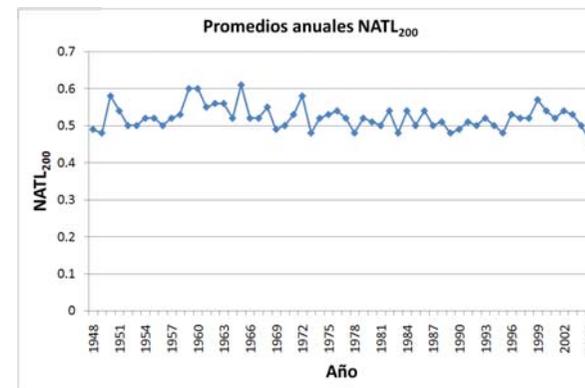
(a)



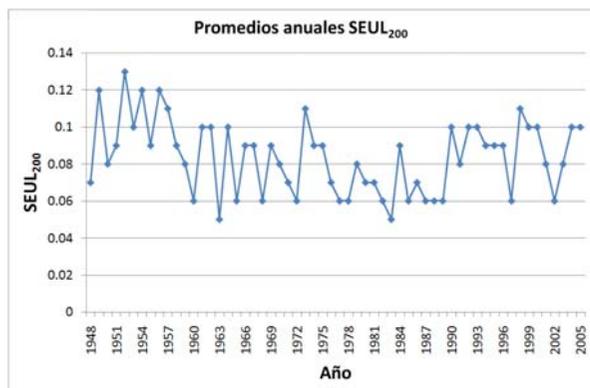
(b)



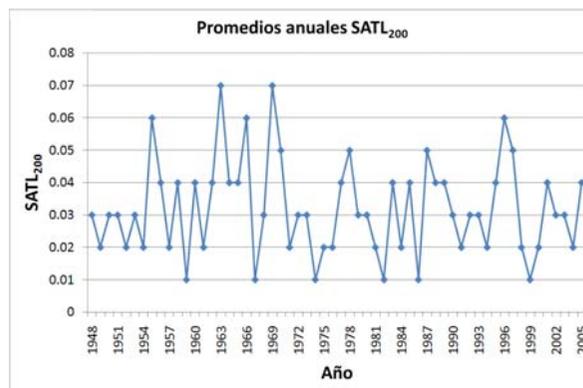
(c)



(d)



(e)

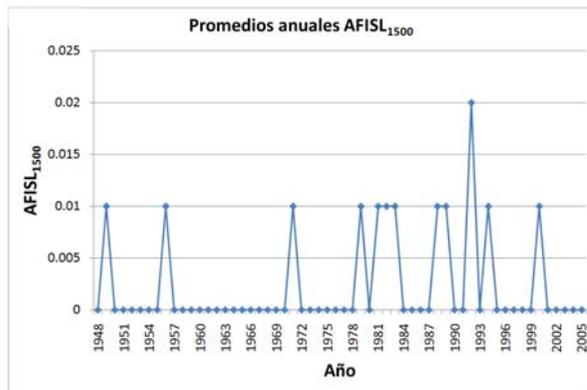


(f)

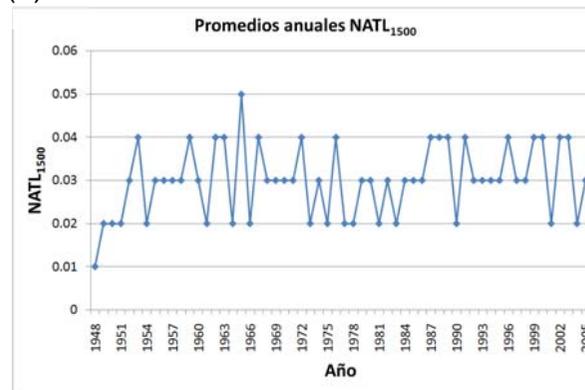


Figura 7.4. Series temporales de promedios anuales de índices de permanencia, para el período 1948-2005 en Canarias. (a) $AFINL_{200}$, (b) $AFISL_{200}$, (c) $NATL_{200}$, (d) $SEUL_{200}$, (e) $SATL_{200}$ y (f) $AFINL_{1500}$

(a)



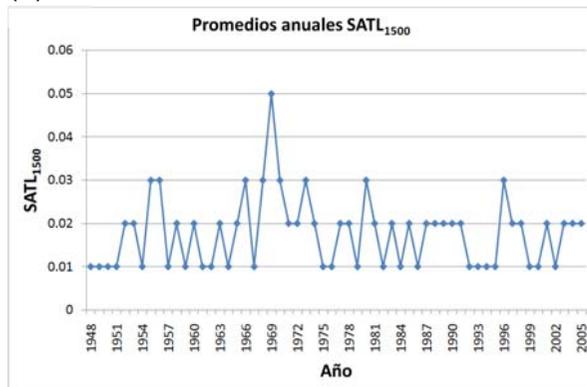
(b)



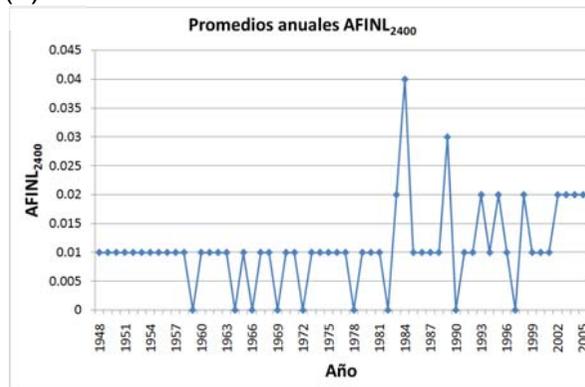
(c)



(d)



(e)



(f)

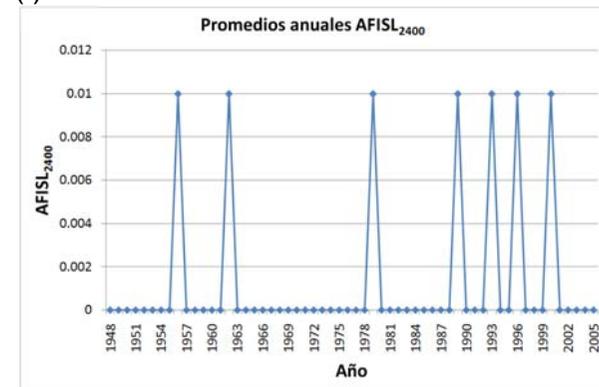
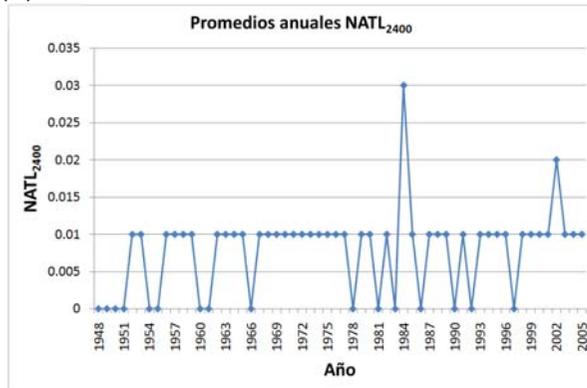


Figura 7.5. Series temporales de promedios anuales de índices de permanencia, para el período 1948-2005 en Canarias. (a) AFISL₁₅₀₀, (b) NATL₁₅₀₀, (c) SEUL₁₅₀₀, (d) SATL₁₅₀₀, (e) AFINL₂₄₀₀ y (f) AFISL₂₄₀₀

(a)



(b)



(c)

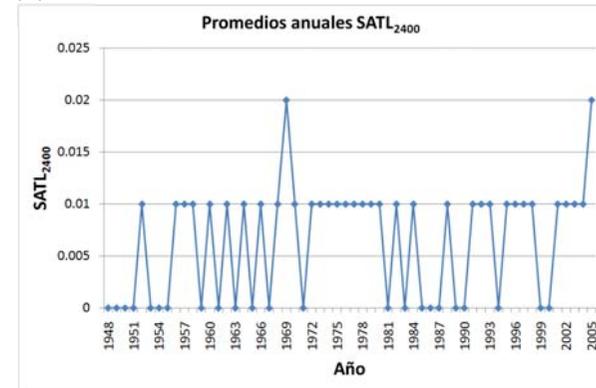


Figura 7.6. Series temporales de promedios anuales de índices de permanencia, para el período 1948-2005 en Canarias. (a) NATL₂₄₀₀, (b) SEUL₂₄₀₀ y (c) SATL₂₄₀₀

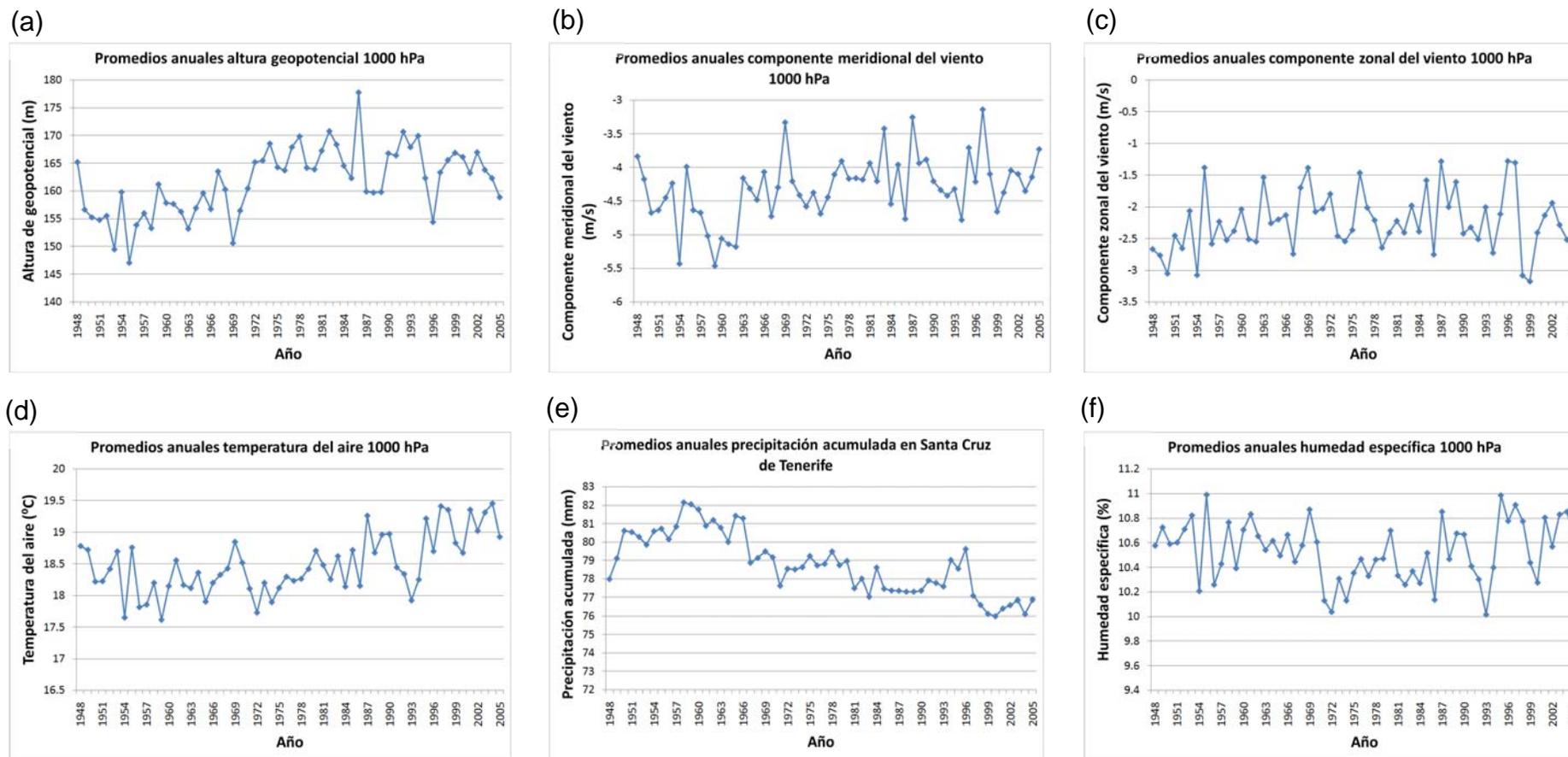


Figura 7.7. Series temporales de promedios anuales de diferentes variables climáticas a nivel de 1000 hPa, para el período 1948-2005 en Canarias. (a) Altura de geopotencial, (b) componente meridional del viento, (c) componente zonal del viento, (d) temperatura del aire, (e) humedad relativa y (f) humedad específica.

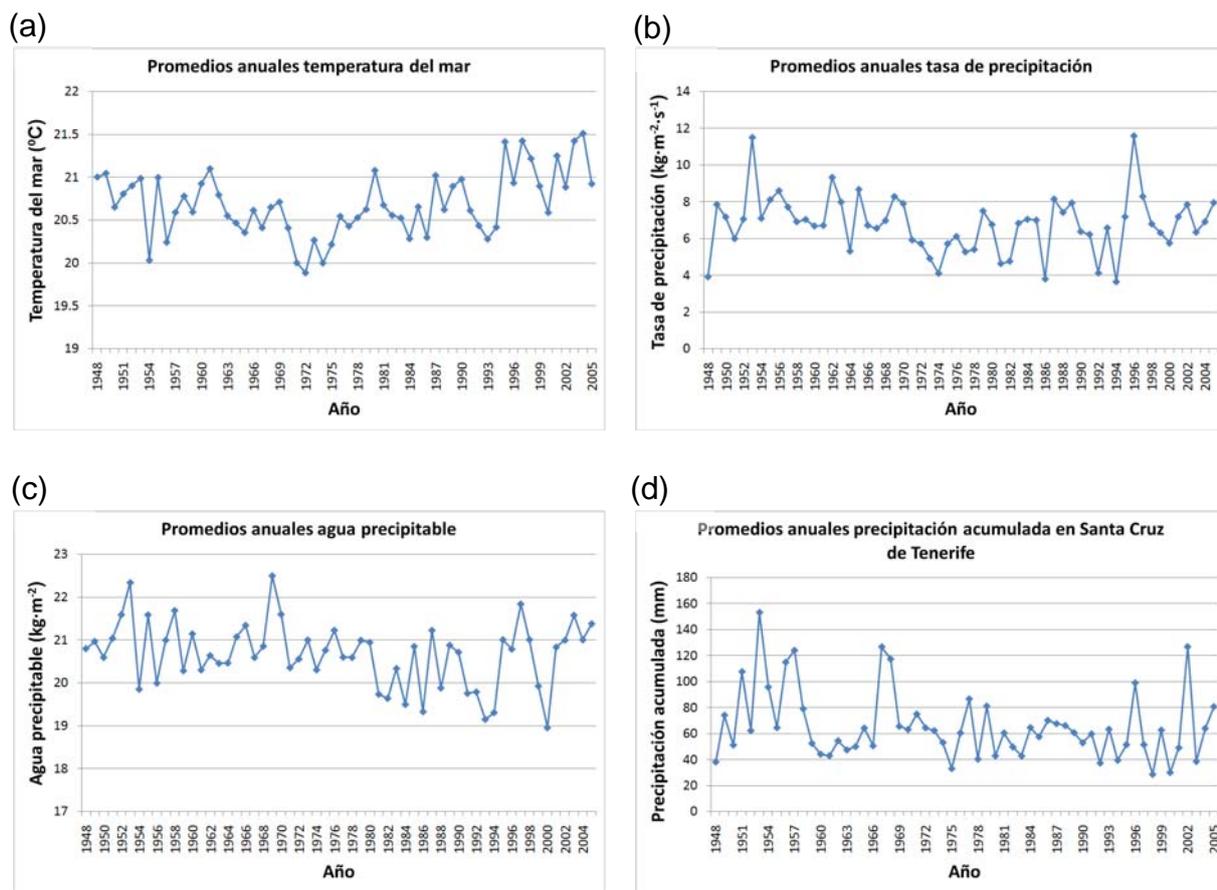


Figura 7.8. Series temporales de promedios anuales de diferentes variables climáticas a nivel de 1000 hPa, para el período 1948-2005 en Canarias.(a) Temperatura del mar, (b) tasa de precipitación, (c) agua precipitable y (d) precipitación acumulada en Santa Cruz de Tenerife.

7.3.4. ENLACE ENTRE LAS TENDENCIAS DE LOS EPISODIOS DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS Y LAS DE DIFERENTES PARÁMETROS CLIMÁTICOS

Del estudio realizado sobre tendencias de los índices de africanidad, índices de no-africanidad y de diferentes parámetros climáticos, puede concluirse que tanto el aumento de frecuencia e intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano a nivel de superficie en Canarias como el aumento de la temperatura del aire, aumento de la altura de geopotencial, descenso de la humedad específica y relativa, y debilitamiento del alisio, todo ello en niveles bajos en las islas, comienza a ser estadísticamente significativo a partir de los últimos años de la década de 1970, especialmente entre los años 1976 y 1979. Es precisamente a partir de la segunda mitad de la década de 1970, y más concretamente en el año 1976 (Trenberth, 1990;

IPPC 2007) cuando se asume que comienza la segunda fase del calentamiento global del sistema Tierra-atmósfera inducido por la acción del hombre .

El tercer informe del IPPC (2007) concluye que este último cambio climático registrado en el siglo XX es unequivoco y no puede ser debido totalmente a fluctuaciones naturales del sistema climático, sino que existen evidencias de que este calentamiento global es debido al efecto de las actividades humanas que resultan en el incremento en la concentración de gases invernadero y aerosoles sulfatados.

Los resultados presentados en la sección 7.3.3 corroboran que el comienzo de este cambio climático coincide con el incremento de la frecuencia e intensidad de los episodios africanos en el archipiélago, por lo que parece que el aumento en la frecuencia e intensidad de estos episodios forma parte del proceso atmosférico que de forma amplia se denomina como cambio climático.

CAPÍTULO 8

Influencia de las intrusioniones de polvo africano en los niveles de ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be en aire ambiente

8. INFLUENCIA DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN LOS NIVELES DE ^{137}Cs , ^{40}K Y ^7Be EN AIRE AMBIENTE

8.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Recientemente, la utilización de isótopos radiactivos como trazadores atmosféricos ha adquirido una gran importancia (WMO/GAW, 2004). Además de trazar la influencia de una gran cantidad de procesos industriales en la composición de las partículas atmosféricas en suspensión, muchos procesos naturales, entre los que se encuentran las intrusiones de polvo africano, pueden también evaluarse mediante estos trazadores (IAEA, 2000; Hernández *et al.*, 2005a y 2005b).

Los trazadores radiactivos son compuestos que contienen en su estructura isótopos radiactivos o radioisótopos. Cada radioisótopo tiene una energía de radiación característica que permite identificarlo de forma unívoca. Su radiactividad disminuye con el tiempo en forma exponencial, por lo que se puede definir un valor que representa el tiempo necesario para que la actividad del elemento disminuya a la mitad de su valor inicial, al que se llama constante de semidesintegración.

El estudio de la relación entre la llegada de polvo africano a Canarias y los incrementos en las concentraciones de ciertos isótopos radioactivos en las islas, tales como ^{137}Cs , ^{40}K ó ^7Be , es importante para tratar de buscar métodos alternativos de identificación de intrusiones de polvo africano.

Las fuentes de radionúclidos de origen antropogénico en el medioambiente, y más específicamente en la atmósfera, son diversas: pruebas y accidentes nucleares, utilización de material radioactivo en la industria y en la medicina, obtención de energía a partir de biomasa, etc. (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988). La identificación y cuantificación de los posibles contaminantes radioactivos existentes en la atmósfera es esencial debido a la radio-

toxicidad de éstos. Igualmente, es de gran interés establecer las fuentes de los distintos radionúclidos a fin de desarrollar o mejorar las políticas existentes de protección radiológica de la población y localizar posibles fugas de material radioactivo.

8.1.1. ORIGEN DE LOS ISÓTOPOS ^{137}Cs , ^{40}K Y ^7Be

El ^{137}Cs es un producto de fisión, de gran importancia debido a su largo tiempo de vida medio (30.2 años) y a su elevada disponibilidad biológica. Este isótopo es soluble en agua y su comportamiento químico es similar al del potasio (Bem *et al.*, 1990). Por lo tanto, este radionúclido puede integrarse rápidamente en los ciclos biológicos y acumularse en los ecosistemas terrestres (Papastefanou *et al.*, 2005).

Se sabe que una fuente importante de ^{137}Cs es la emisión producida por las pruebas de armas nucleares, como las llevadas a cabo por Francia sobre la superficie del Norte de África entre los años 1960 y 1966 (Rauf, 1995; Mahjoubi *et al.*, 2006).

El ^{137}Cs usualmente se encuentra adherido a partículas materiales en las capas superficiales del suelo (Arnalds *et al.*, 1989; Livens *et al.*, 1991). La resuspensión de partículas del suelo es, por lo tanto, una fuente para este radionúclido en capas bajas de la atmósfera.

De manera similar al ^{137}Cs , el ^{40}K , aunque de origen natural, se encuentra en la mayor parte de tipos de suelo y puede ser transportado fácilmente tras su resuspensión (Klement, 1982). El potasio es un componente muy importante de los suelos fértiles y es un nutriente esencial en la dieta humana y para el crecimiento de las plantas.

El ^7Be es un isótopo radioactivo de origen cosmogénico. Se forma principalmente en las capas altas de la atmósfera debido al impacto de partículas cósmicas de alta energía con átomos de oxígeno y nitrógeno (King *et al.*, 1991). El ^7Be alcanza la superficie terrestre debido al intercambio vertical de materia que se produce en la estratosfera y troposfera. Este trazador natural, con una constante de

semidesintegración de 53.3 días, ha sido frecuentemente utilizado como trazador de intrusiones estratosféricas de gases o aerosoles en la troposfera, tales como el ozono (Cuevas, 1995).

Aunque en la literatura científica se encuentra ampliamente analizada la influencia que la deposición húmeda tiene sobre las concentraciones de ^7Be (Caillet *et al.*, 2001; Ioannidou y Papastefanou, 2005), existen pocos estudios sobre la influencia que puede tener la resuspensión y transporte de aerosoles procedentes de grandes superficies continentales en las concentraciones de este trazador en la troposfera (Leea *et al.*, 2004).

En este capítulo se expone el estudio sobre la relación entre las variaciones de concentración de los isótopos ^{137}Cs , ^{40}K y ^7Be y la llegada de material en resuspensión de origen africano en la baja troposfera de la isla de Tenerife, cuyos resultados se encuentran publicados en Hernández *et al.* (2005a) y Hernández *et al.* (2006). El estudio, en colaboración con el equipo del Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna, se realizó para dos episodios africanos intensos ocurridos en invierno en el caso del ^{137}Cs y el ^{40}K , y para el periodo comprendido entre el 7 de Julio de 2003 y el 17 de Enero de 2005 en el caso del ^7Be . Se evaluó además el origen de los isótopos y se plantearon hipótesis sobre sus mecanismos de transporte.

8.2. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

8.2.1. ZONA DE ESTUDIO

La isla de Tenerife es un enclave ideal para la realización de estudios del comportamiento de trazadores atmosféricos del tipo de los aquí tratados, dada su ubicación cercana al continente africano, su orografía y el régimen de vientos.

El registro del material particulado atmosférico se realizó en tres estaciones de medida diferentes, localizadas todas ellas en el área metropolitana de Santa Cruz de Tenerife (Figura 8.1). Una de estas estaciones se utilizó para llevar a cabo las medidas radiométricas (actividad de isótopos), mientras que las otras dos se usaron para la medida de los niveles de PM₁₀.

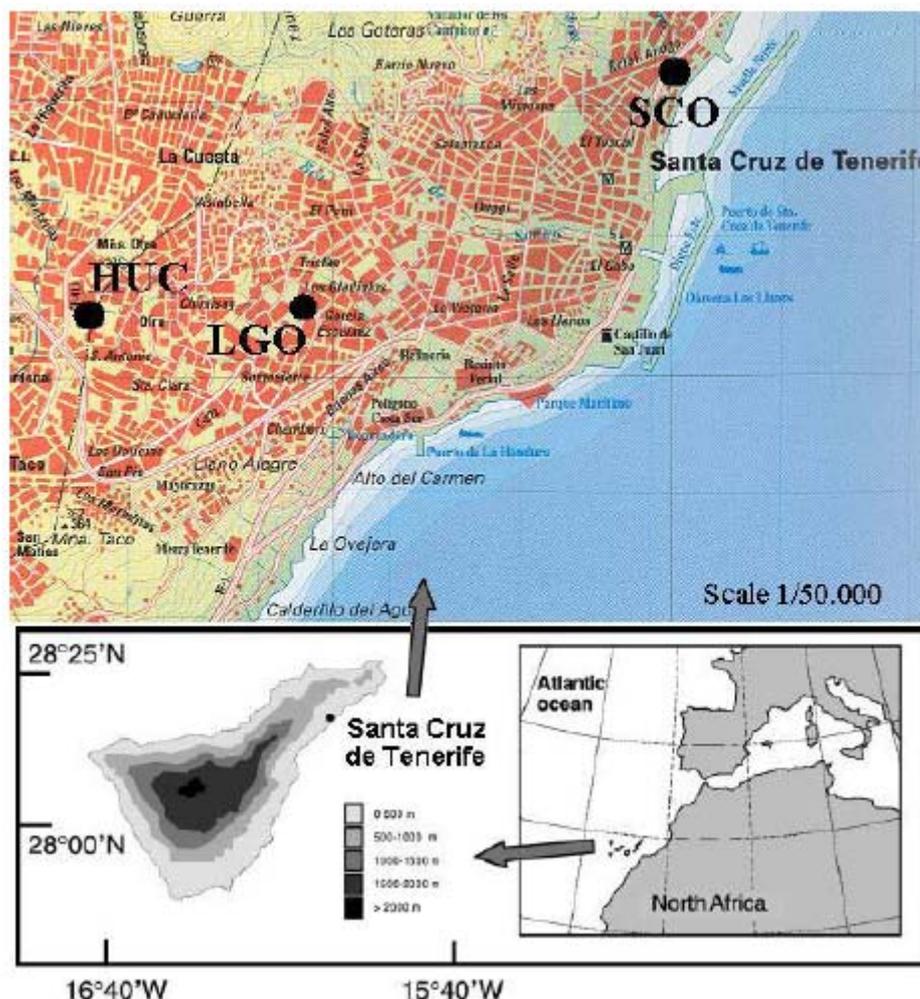


Figura 8.1. Localización del área de estudio y estaciones de muestreo utilizadas para el estudio de los trazadores isotópicos: Hospital Universitario de Canarias (HUC), Los Gladiolos (LGO) y Santa Cruz de Tenerife (SCO).

8.2.2. ESTACIONES DE MUESTREO

8.2.2.1. Estación del Hospital Universitario de Canarias

La estación de medida del Hospital Universitario de Canarias, en la que se muestreó el aerosol que posteriormente se sometió a análisis radiométrico, se encuentra situada en el Laboratorio de Radioactividad Ambiental de la Universidad de La Laguna (FIMERALL), en las instalaciones de dicho hospital (HUC;

28°27'22"N, 16°17'29"W, 344 m.s.n.m.). Este laboratorio dispone de un sistema de captación de aerosoles atmosféricos de alto flujo del tipo P.T.I. Sampling Station ASS-500, que muestrea de manera continua el material particulado atmosférico, haciendo pasar el flujo de aire a través de filtros de polipropileno de tipo G3, con un 93-99% de retención de aerosoles. Este sistema fue configurado para filtrar un promedio de 8500 l·min⁻¹ de aire. La localización y orientación del sistema de captación de alto volumen fueron escogidas para minimizar las posibles influencias de la resuspensión local de partículas del suelo.

La frecuencia de muestreo es semanal y las rutinas de cambio de filtro, siempre llevadas a cabo a mediodía, han sido optimizadas para que no sobrepasen los 10 minutos. Las dimensiones de los filtros de polipropileno son 440 x 440 mm.

La concentración de polvo registrado en los filtros se calculó gravimétricamente por pesado de los filtros antes y después del muestreo, siempre bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad en el laboratorio.

8.2.2.2. Estación de Los Gladiolos

Una de las dos estaciones de control de calidad del aire en las que se midieron los niveles de PM10 es la estación urbana de Los Gladiolos (LGO; 28°27'37"N, 16°16'02"W, 92 m.s.n.m) en Santa Cruz de Tenerife. Esta estación pertenece a la red de vigilancia y control de contaminación atmosférica de Canarias, de la Dirección General de Salud Pública del Gobierno de Canarias. Las concentraciones de PM10 fueron medidas con promedios horarios con un equipo automático de atenuación de radiación Beta (FAG).

8.2.2.3. Estación de Santa Cruz de Tenerife

En la estación de Santa Cruz de Tenerife (SCO; 28°28'21.1"N, 16°14'50.5"W, 52 m.s.n.m.) se midieron los niveles de PM10 con un espectrómetro laser GRIMM 1108. La resolución temporal de las medidas es de una hora. Esta estación urbana pertenece al Observatorio Atmosférico de Izaña (INM). Puede encontrarse una descripción más detallada de esta estación de medida en el apartado 3.2.1.1.2.

8.2.3. MEDIDAS RADIOMÉTRICAS

Todas las medidas radiométricas de las muestras de material particulado obtenidas en la estación de HUC han sido realizadas por el FIMERALL mediante espectrometría gamma de bajo nivel con dos detectores coaxiales de germanio ultra-puro (Camberra Industries Inc., USA). Estos detectores fueron calibrados usando cócteles de referencia gamma certificados QCY48, de la marca Amersham Industries (Amersham plc., Reino Unido), y concentraciones conocidas de cloruro de potasio puro (Merck. E., Alemania) (Hernández, F., comunicación personal). Los detectores tienen protectores de hierro y se sitúan, junto con sus unidades electrónicas asociadas, en un laboratorio especialmente condicionado con filtros de aire que proporcionan un medio óptimo para las medidas gamma de bajo nivel. La temperatura se mantiene constante en todo momento y la sobrepresión mantenida en este laboratorio minimiza la afluencia de Radón desde los alrededores (Hernández *et al.*, 2005a).

Cada filtro fue medido durante 4 días, el mismo tiempo usado para las medidas de fondo. El análisis espectral y la substracción del fondo se realizó con el software de espectrometría Genie2K versión 2.0 (Canberra Industries Inc., USA). Los picos gamma seleccionados para la determinación de los diferentes radionúclidos fueron 661 keV para el ^{137}Cs , 1460 keV para el ^{40}K y 477 keV para el ^7Be (Hernández *et al.*, 2005a).

Para facilitar la detección de cambios en el tiempo en las series de concentraciones de ^{40}K , los valores de fondo se calcularon como el promedio del resultado obtenido durante aproximadamente 20 semanas antes y después de cada uno de los episodios de intrusión de polvo africano (excluyendo los valores obtenidos durante los episodios). En el caso del ^{137}Cs , como este isótopo pocas veces tomó valores apreciables en las medidas que se realizaron entre los años 2000 y 2005, los promedios de valores de fondo se calcularon a partir del promedio anual de su límite de detección. De este modo, el valor de fondo de concentración de ^{137}Cs , calculado para el primer episodio de intrusión, corresponde al promedio de su límite de detección entre junio de 2001 y junio de 2002.

De las medidas radiométricas se infiere la concentración de los tres isótopos estudiados. La variabilidad de las series de concentraciones de los tres isótopos

durante los dos episodios de intrusión de polvo africano estudiados se compararon con la de la serie de PM10 correspondiente.

8.2.4. DETERMINACIÓN DE LA REGIÓN FUENTE DE LOS RADIONÚCLIDOS

Conocer la zona de procedencia del polvo africano, cuando las altas concentraciones de polvo se registran simultáneamente a altas concentraciones de los isótopos medidas, puede contribuir a conocer la naturaleza de éstos. Se determinó la región de procedencia de las masas de aire que alcanzaron el área de estudio durante los episodios africanos considerados, usando retrotrayectorias 3D de 120 h calculadas con el modelo de dispersión HYSPLIT 4.0. Para el cálculo de las retrotrayectorias se usó la base de datos meteorológica FNL y se tuvo en cuenta la velocidad vertical. En la sección 3.2.2.1 puede encontrarse más información sobre las retrotrayectorias generadas por el modelo HYSPLIT 4.0.

Además, en el estudio de la relación entre el transporte de polvo africano y las concentraciones del isótopo ^7Be en Tenerife se han utilizado mapas de carga total de polvo para las 12 UTC generados por el modelo BSC/DREAM (Barcelona Supercomputer Center/ Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics ; <http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM>).

En la sección 3.2.1.1 de esta memoria de Tesis puede encontrarse más información sobre los productos del modelo BSC/DREAM.

8.3. RESULTADOS

8.3.1. INFLUENCIA DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN LAS CONCENTRACIONES DE ^{137}Cs Y ^{40}K EN AIRE AMBIENTE

8.3.1.1. Análisis de los episodios de intrusión de polvo africano

El estudio focalizado en los isótopos ^{137}Cs y ^{40}K se realizó para dos episodios importantes de intrusión de polvo africano a nivel de superficie en Tenerife. Ambos episodios tuvieron lugar en invierno. El primero de ellos tuvo lugar entre el 6 y el 7 de Enero de 2002. Este episodio estuvo precedido por intrusiones de polvo menos intensas que tuvieron lugar algunos días antes. También se observaron intrusiones de polvo africano poco intensas días posteriores a este episodio.

Como los filtros de polipropileno usados para las medidas radiométricas durante este periodo de tiempo se cambiaron el 7 de Enero de 2002 a mediodía, este primer episodio comprende dos semanas de medidas: desde el 31 de Diciembre de 2001 hasta el 7 de Enero de 2002 y desde el 7 de Enero de 2002 hasta el 14 de Enero de 2002. Se dispone, por lo tanto, de dos muestras de isótopos radioactivos para caracterizar este episodio.

El segundo episodio, ocurrido entre los días 3 y 4 de Marzo de 2004, quedó registrado en la semana de muestreo que tuvo lugar del 1 al 8 de Marzo de 2004. En este caso, al igual que ocurrió en el primer episodio, se registraron varios episodios de polvo africano de menor intensidad en días previos y posteriores al evento estudiado.

Para la medida de PM_{10} se usaron dos estaciones, la de LGO y la de SCO, por dos razones: las medidas de PM_{10} no habían sido implementadas en la estación de SCO cuando ocurrió el primer episodio y la instrumentación de medida en la estación de LGO sufrió un fallo operacional durante la época en la que tuvo lugar el segundo episodio. No obstante, las tres estaciones (HUC, SCO y LGO) se encuentran situadas en la capa de mezcla marina en un radio de 2.5 km de

distancia (Figura 8.1), por lo que las condiciones meteorológicas en estas tres estaciones son muy similares.

Comparando las medidas de PM10 registradas en SCO y LGO durante el periodo comprendido entre Mayo de 2002 y Junio de 2004 (Figura 8.2), se encuentra un coeficiente de correlación lineal de $r = 0.9$ ($p < 0.05$). Ambas estaciones muestran un comportamiento similar durante las intrusiones de masas de aire africano. Esta buena correlación asegura que se puedan comparar entre sí los análisis de los dos episodios considerados.

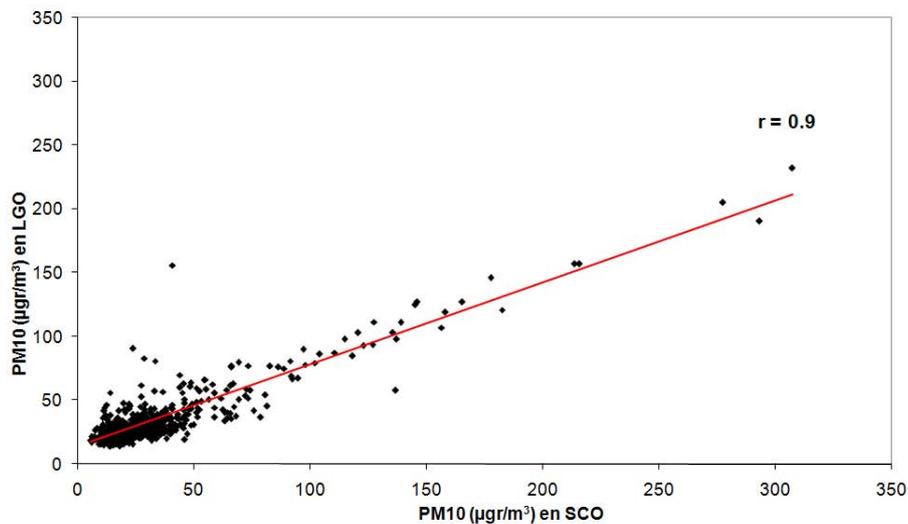


Figura 8.2. Correlación entre los promedios diarios de PM10 medidos en LGO y en SCO para el periodo Mayo 2002 – Junio 2004. r es el coeficiente de correlación lineal. Se obtuvo un coeficiente de correlación lineal $r = 0.9$.

8.3.1.1.1. Episodio del 6 al 7 de Enero de 2002

En la imagen de satélite que se muestra en la Figura 8.3 puede verse una pluma de polvo africano sobre las islas Canarias durante el 7 de Enero de 2002, siendo un buen ejemplo de la gran extensión e intensidad de los episodios de polvo africano en la región de Canarias.

El análisis de retro trayectorias de este primer episodio indicó que la intrusión de polvo africano en Tenerife comenzó a las 18:00 UTC del día 6 de Enero de 2002. El promedio diario de concentración máximo, de $388 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró en la estación

de LGO durante ese mismo día. El área fuente del polvo según la retrotrayectoria (Figura 8.4a) estaba localizada en una región amplia que abarca Argelia, el Norte de Mauritania y el Norte de Mali. La sección vertical de la retrotrayectoria correspondiente al 6 de Enero de 2002 (Figura 8.4b) muestra que la masa de aire permaneció durante el 90% del tiempo de duración de su trayectoria en la capa límite continental, siempre a una altura inferior a 600 m. El 40% de la trayectoria transcurrió sobre África a una altura inferior a 200 m.



Figura 8.3. Imagen de satélite (MODIS) correspondiente al 7 de Enero de 2002.

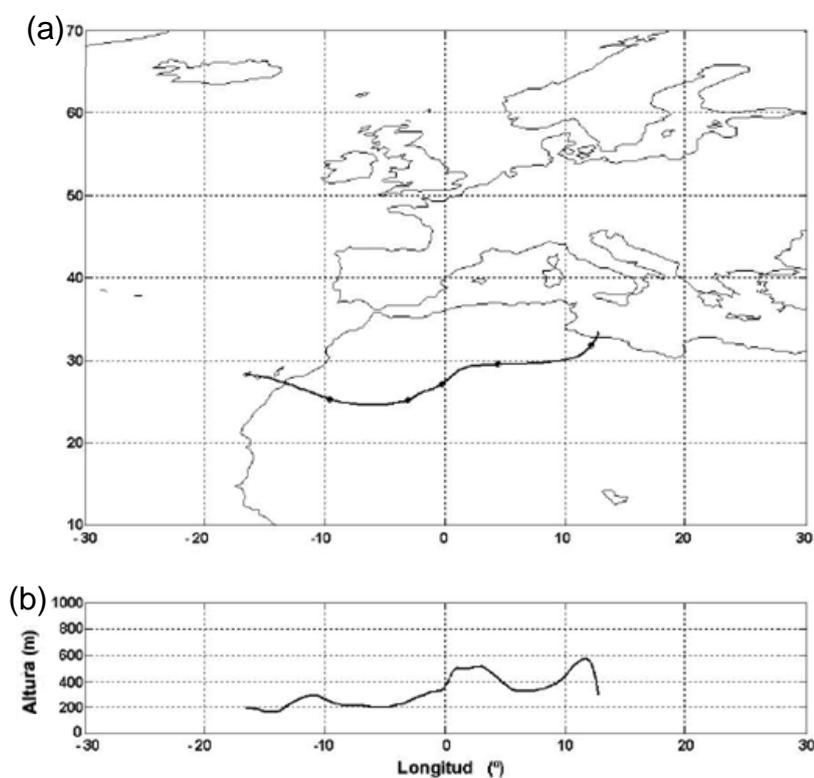


Figura 8.4. (a) Retrotrayectoria HYSPLIT de 5 días hacia atrás, con punto de llegada en Tenerife a 200 m.s.n.m. a las 18:00 UTC del día 6 de Enero de 2002. Los puntos en la retrotrayectoria indican las 00:00 UTC de cada día. (b) Sección vertical (altura sobre nivel del mar frente a longitud) de la retrotrayectoria.

8.3.1.1.2. Episodio del 3 al 4 de Marzo de 2004

El episodio de polvo africano más importante de las últimas décadas en Canarias fue el acontecido entre los días 3 y 4 de Marzo de 2004. El análisis de retrotrayectorias y de imágenes de satélite muestra que este episodio tuvo dos regiones fuentes muy claras. En SCO se registró un máximo en la concentración de PM10, de $2310 \mu\text{g}/\text{m}^3$, asociado al primer frente de polvo a las 20:00 UTC del día 3 de Marzo de 2002. A las 22:00 UTC del día siguiente, en la misma estación se registró un segundo máximo de concentración de PM10, de $5238 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este segundo máximo estuvo asociado a un segundo frente de polvo. En la Figura 8.5 se muestra una imagen de satélite (MODIS), correspondiente al día 4 de Marzo de 2002, en la que se señalan los dos frentes de polvo diferenciados. En la Figura 8.6 se pueden observar las retrotrayectorias asociadas a estos frentes de polvo. El área fuente del polvo cubre una extensa región del desierto del Sahara, pero las principales retrotrayectorias con llegada a Tenerife provienen del Sahara Occidental (Figura 8.6a). La sección vertical altitud-longitud de las retrotrayectorias (Figura 8.6b) indica que las masas de aire permanecieron durante menos del 10% de la longitud total de la retrotrayectoria por debajo de 1 km de altura. Sin embargo, tal y como indica el valor del nivel máximo de PM10 a nivel de superficie, la carga total de polvo en la baja troposfera fue mucho mayor en este caso que en el primer episodio.

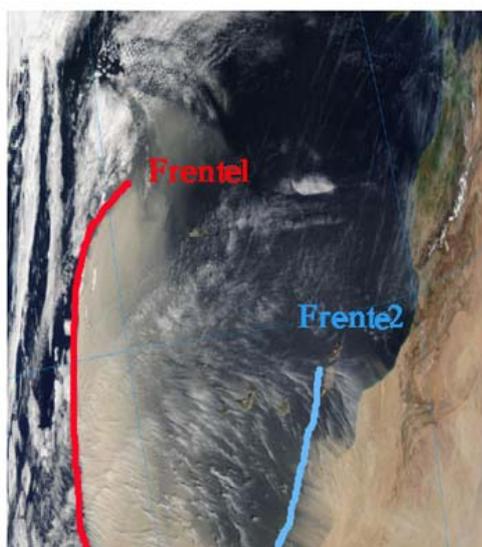


Figura 8.5. Imagen de satélite (MODIS) correspondiente al día 4 de Marzo de 2004, donde se han señalado los dos frentes de polvo.

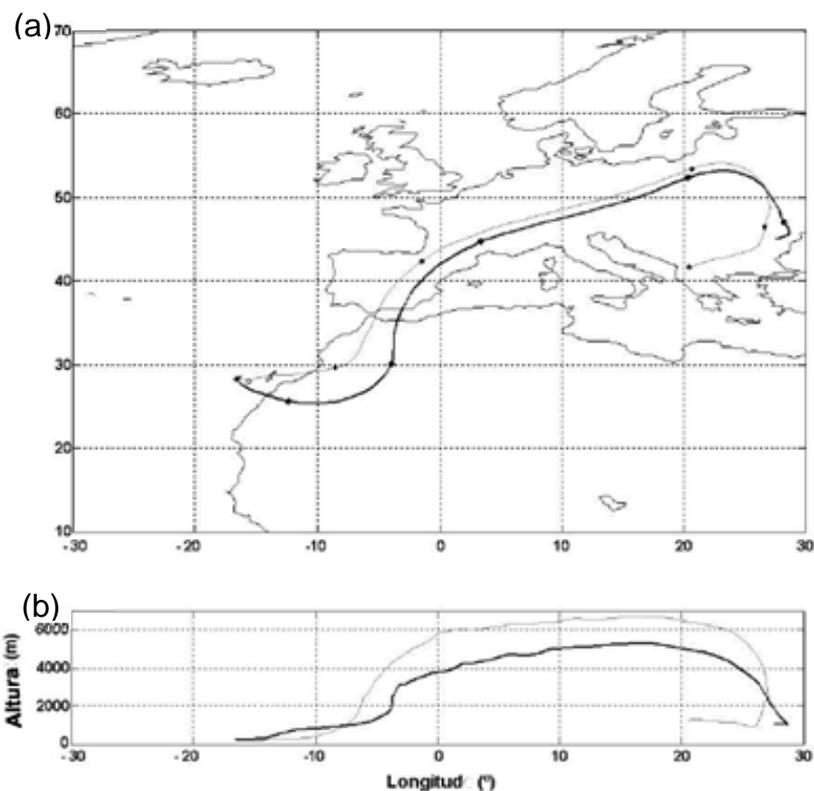


Figura 8.6. (a) Retrotrayectoria HYSPLIT de 5 días hacia atrás, con punto de llegada en Tenerife a 200 m.s.n.m. a las 00:00 UTC del día 4 de Marzo de 2004 (gris) y a las 12:00 UTC del mismo día (negro). Los puntos en la retrotrayectoria indican las 00:00 UTC de cada día. (b) Sección vertical (altitud sobre el nivel del mar frente a longitud) de las retrotrayectorias.

8.3.1.2. Relación entre la variabilidad de las concentraciones de PM_{10} , ^{137}Cs y ^{40}K

Las Figuras 8.7a y 8.7b muestran las variaciones semanales de la concentración de PM_{10} , ^{137}Cs y ^{40}K antes, durante y después de los dos episodios de intrusión de polvo africano estudiados. Las concentraciones máximas de ^{137}Cs fueron de 2.7 ± 0.2 y 11.7 ± 0.06 ($\times 10^{-6}$) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ para el primer y segundo episodio respectivamente.

En el caso de las concentraciones de ^{40}K , los máximos fueron de 1.24 ± 0.04 y 3.4 ± 0.1 ($\times 10^{-4}$) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivamente. Los máximos de concentración semanal de PM_{10} fueron muy elevados, alcanzando niveles de 180 y 380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el primer y segundo episodio respectivamente.

Durante los dos episodios africanos se encuentra una buena correlación entre las variaciones de los tres parámetros, incluso cuando solo ocurren pequeños incrementos de concentración de PM_{10} . Se puede apreciar, además, que las concentraciones de PM_{10} e isótopos ^{137}Cs y ^{40}K aumentan respecto a un valor promedio para días de no intrusión más o menos constante que es, en muchos de los casos, un orden de magnitud menor. Los promedios de concentraciones de fondo de ^{137}Cs , es decir, los calculados a partir de los datos de días de no intrusión antes y después de cada episodio, fueron de 5.9 ± 0.2 y 8.8 ± 0.7 ($\times 10^{-7}$) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivamente. Por lo tanto, las concentraciones máximas de ^{137}Cs fueron aproximadamente un factor 6 y 13 mayores respecto a los valores de fondo calculados para el primer y segundo episodio africano respectivamente.

En el caso del ^{40}K , los promedios de fondo calculados de la misma manera fueron de 1.2 ± 0.6 y 2.4 ± 0.8 ($\times 10^{-5}$) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. De este modo, las concentraciones máximas fueron superiores a los valores de fondo en un factor de 9 y 14 para el primer y segundo episodio africano respectivamente.

Los niveles de fondo de PM_{10} calculados del mismo modo que para los trazadores radiactivos, es decir, promediados semanalmente, fueron para cada episodio de 41 y 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Esto significa que la concentración de PM_{10} varió en un factor 4 durante el primer episodio africano y en un factor 13 durante el segundo.

Un análisis detallado del primer episodio (Figura 8.7a) muestra un desplazamiento de una semana entre el máximo de concentración de PM_{10} y el máximo de concentración de ^{137}Cs y ^{40}K . Este desplazamiento pudo deberse a la combinación de dos factores: la necesidad de promediar semanalmente los niveles de PM_{10} , para ajustarse al muestreo semanal de trazadores radioactivos, y el hecho de que los días con altos niveles de PM_{10} de un mismo episodio pueden incluirse en diferentes semanas de muestreo. En el caso, por ejemplo, de que el primer día de un episodio africano sea el último de una semana de muestreo, el promedio del nivel de PM_{10} para esa semana podría no ser elevado. En la Figura 8.8 se muestran los promedios diarios y semanales de los niveles de PM_{10} en la estación de LGO durante tres semanas de muestreo comprendidas entre el 24 de Diciembre de 2001 y el 14 de Enero de 2002, y los efectos producidos por el promediado semanal de los datos. Aunque los mayores niveles de PM_{10} se registraron durante la semana del 6 y 7 de Enero de 2002, el promediado semanal de los datos

produce un suavizado en las características temporales de la serie, especialmente durante la semana comprendida entre el 31 de Diciembre de 2001 y el 7 de Enero de 2002 (2ª semana) que tuvo menos días con altos niveles de PM_{10} que la semana siguiente.

El promedio del volumen de aire muestreado semanalmente en la estación de HUC es de $85000 \text{ m}^3/\text{semana}$. Durante las semanas en las que tuvieron lugar los episodios de intrusión de polvo africano en Tenerife, el volumen de aire muestreado se mantuvo siempre por debajo de este valor. El límite de detección de los emisores gamma con detectores semiconductores depende, entre otras cosas, de la cantidad de material muestreado. Teniendo esto en cuenta, podría esperarse que las concentraciones de ^{137}Cs y ^{40}K se hubieran medido solo en aquellas ocasiones en las que el volumen de aire era alto. Sin embargo, comparando los volúmenes de aire muestreados y las concentraciones medidas de estos isótopos, se encontró que los incrementos de las concentraciones nunca estuvieron relacionados con incrementos en el volumen de aire. Además, los máximos de concentración de ^{137}Cs y ^{40}K ocurrieron en periodos en los que el volumen de aire muestreado fue bajo o relativamente bajo. Por otra parte, el incremento en las concentraciones de los isótopos fue más significativo que las variaciones en el volumen de aire muestreado. Comparando los volúmenes de aire muestreados con las retrotrayectorias se encuentra que los volúmenes semanales reflejan si la intrusión de polvo africano ocurre al principio, a la mitad o al final de una semana de muestreo.

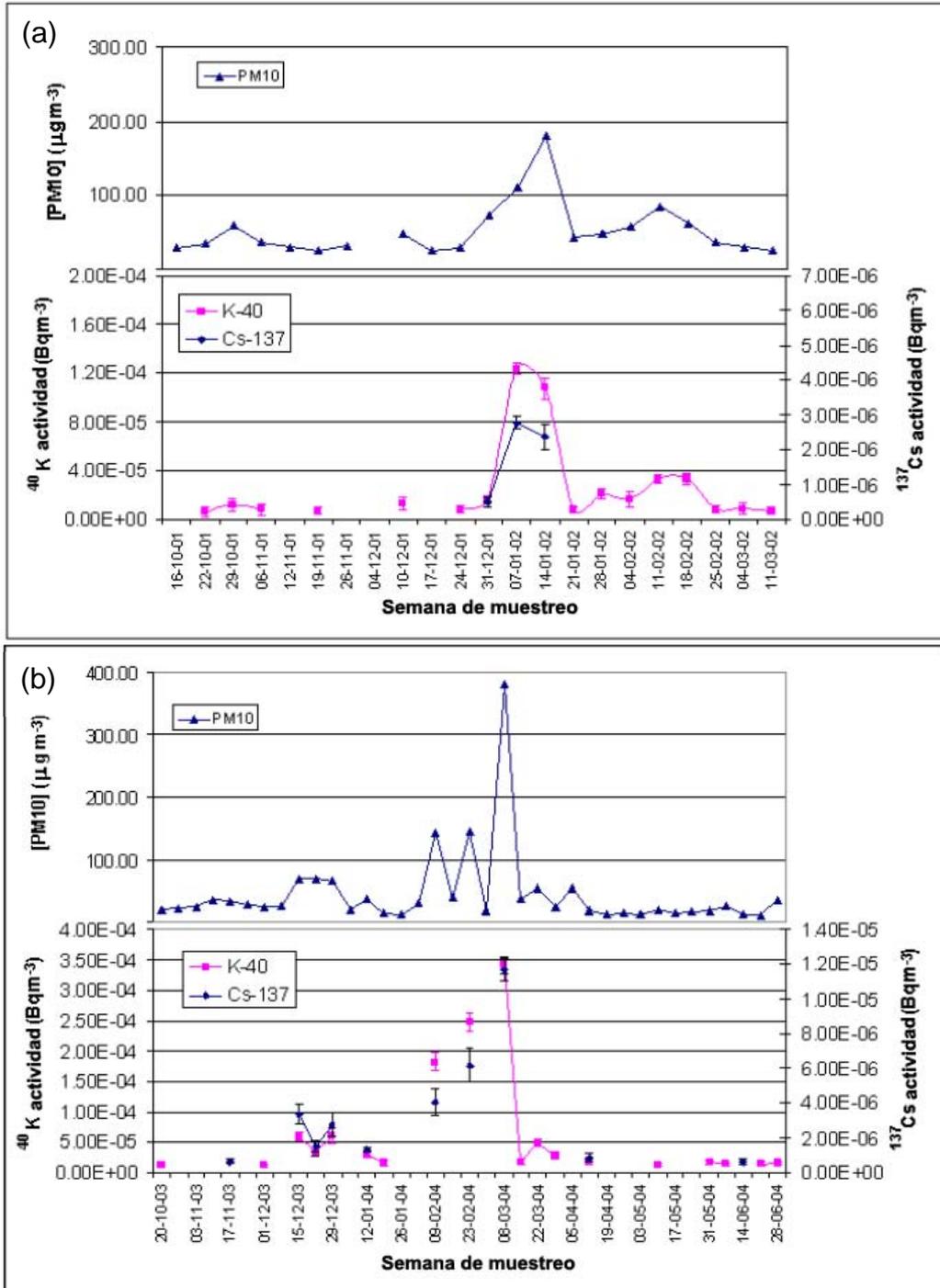


Figura 8.7. Variabilidad semanal de las concentraciones de PM10, así como de la actividad de ^{137}Cs y ^{40}K antes, durante y después de (a) el primer episodio africano y (b) el segundo episodio africano. Nótese la diferencia de escala que se ha usado en ambas gráficas para permitir una mejor visualización de los pequeños detalles. Las concentraciones medidas por debajo del límite de detección no se muestran en las figuras.

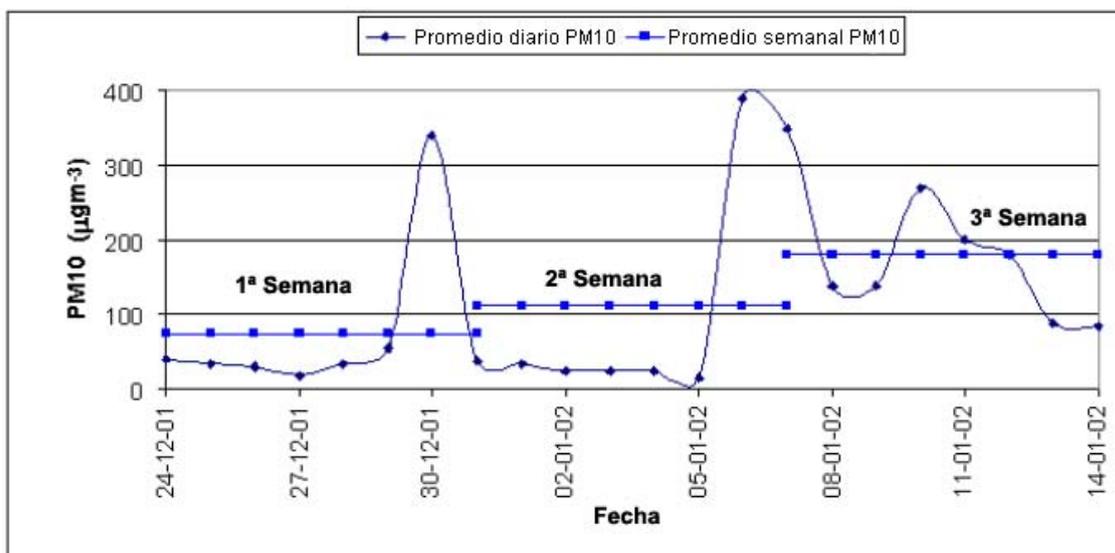


Figura 8.8. Promedios diarios y semanales de concentraciones de PM10 medidas en la estación de LGO para el periodo entre el 24 de Diciembre de 2001 y el 14 de Enero de 2002.

Los cocientes $^{137}\text{Cs}/\text{PM}_{10}$ y $^{40}\text{K}/\text{PM}_{10}$ no se mantuvieron constantes durante los dos episodios africanos y no parecen estar linealmente relacionados con la concentración de PM10. Estos resultados probablemente están influenciados por la cantidad de tiempo que las masas de aire permanecen sobre el continente africano, la variabilidad de las concentraciones de ^{137}Cs y ^{40}K en las regiones fuente y la importancia de los mecanismos de resuspensión de polvo. Medidas preliminares hechas por el laboratorio FIMERALL mediante espectrometría gamma sobre material de la superficie del suelo recogido en el Sureste de Argelia indican que, mientras una gran fracción de la concentración de ^{137}Cs del suelo pudo ser removilizada, solo una pequeña fracción de la concentración de ^{40}K lo fue. Sin embargo, se necesitan investigaciones más detalladas para calcular valores representativos de estos dos radionúclidos en los suelos del Sahara, desde el Sureste de Argelia hasta el Sahara Occidental. Sería además de gran interés llevar a cabo estudios de especiación para determinar el tamaño de las partículas de polvo al que están asociados los diferentes radionúclidos. Estos estudios podrían permitir calcular la porción potencialmente transportable de los diferentes radionúclidos en los suelos del Sahara.

Aunque los incrementos de hasta un orden de magnitud en las concentraciones de los isótopos estudiados debidos a intrusiones de polvo africano no representan un problema para la salud, cuantificar y parametrizar estos cambios es de gran importancia para una caracterización apropiada del medioambiente radiométrico de fondo en la región subtropical del Atlántico Norte. Por otro lado, una buena correlación entre las series de concentración de PM_{10} y las de ^{137}Cs y ^{40}K permite el uso de los trazadores para identificar el carácter africano de una intrusión de polvo en las islas Canarias, lo que podría ser un método complementario a los ya existentes para identificar los días de contaminación natural.

8.3.2. INFLUENCIA DE LA RESUSPENSIÓN Y TRANSPORTE DE AEROSOLES DE ORIGEN AFRICANO EN LAS CONCENTRACIONES DE ^7Be

La Figura 8.9 muestra las series temporales de promedios semanales ^7Be medido en HUC y PM_{10} medido en la estación de SCO para el periodo comprendido entre el 7 de Julio de 2003 y el 17 de Enero de 2005. Se indican con flechas aquellas semanas de muestreo en las que se registró, por un lado, la llegada de material particulado desde el continente africano (incremento de la concentración de PM_{10} por encima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y, por otro lado, un incremento más o menos significativo de la concentración de ^7Be en la baja troposfera de Tenerife. En ninguna de las semanas indicadas se registraron precipitaciones de importancia.

Se pueden observar también en la Figura 8.9 algunas semanas en las que hubo un incremento de la concentración de ^7Be por encima de la media en la baja troposfera, pero no coincidieron con un incremento de la concentración de PM_{10} y viceversa. Esto parece ser debido a que la fuente principal de ^7Be no es la misma que la de partículas de PM_{10} , y existen factores atmosféricos que influyen de manera distinta las concentraciones de ambos parámetros (Hernández *et al.*, 2005b).

El ^7Be es un isótopo que se adhiere con relativa facilidad a las partículas en la atmósfera, especialmente a las de pequeño tamaño. Es, por tanto, probable que los incrementos en la concentración que se han observado durante periodos con

intrusión africana sean debidos a la capacidad de arrastre (scavenging) de este material particulado en suspensión, el cual tras viajar durante días es capaz de “adherir y filtrar” aquellos elementos reactivos con partículas, tales como el ^7Be .

El análisis de los mapas de polvo africano obtenidos con el modelo BSC/DREAM para las 4 semanas indicadas con 2 flechas negras en la Figura 8.9 muestra que el material resuspendido circuló durante, al menos, 24 horas sobre el océano antes de alcanzar la isla de Tenerife (Figura 8.10). La Figura 8.10 muestra una serie de mapas con resultados del modelo BSC/DREAM obtenidos para las fechas entre el 16 y el 23 de Febrero de 2004 para las 12 UTC. Como puede observarse en esta serie de mapas, el material particulado había partido de África antes del día 16 de Febrero de 2004, llegó a Tenerife el día 17, después se desplazó hacia el Norte y volvió a girar hacia el Sur el día 19, regresando nuevamente sobre Tenerife el día 21.

Por el contrario, los mapas de carga de polvo obtenidos para la semana en la que se detectó el máximo de PM_{10} (sin un incremento sustancial de ^7Be), del 3 al 8 de Marzo de 2004 (ver sección 8.3.1.1.2), indican una rápida llegada del material resuspendido desde el continente africano hacia las islas Canarias, pero no se aprecia una recirculación del polvo sobre el océano para retornar posteriormente a Canarias (Figura 8.11).

Analizando las retrotrayectorias de 5 días calculadas para estos dos episodios (Figuras 8.12 y 8.13) y comparándolas con los mapas de carga total de polvo del modelo BSC/DREAM (Figuras 8.10 y 8.11), se encuentra que en los dos casos tuvo lugar subsidencia de masas de aire desde zonas altas de la atmósfera. En el caso del episodio del 16 al 23 de Febrero de 2004 (Figura 8.12), la subsidencia tuvo lugar durante los días 21 y 22 hacia zonas de cumbres de Tenerife y el día 23 hacia nivel de superficie, desde zonas del océano Atlántico al Norte de Canarias donde se había acumulado una alta carga de polvo en suspensión. En el caso del episodio del 3 al 4 de Marzo de 2004 (Figura 8.13), la subsidencia tuvo lugar hacia nivel de superficie de la isla desde regiones de Europa en las que no se observó la existencia de polvo en suspensión.

Los resultados obtenidos indican que al menos en 4 ocasiones en los últimos tres años se han producido incrementos sustanciales de la concentración de ^7Be simultáneamente a la llegada de polvo africano a nivel de superficie desde el continente africano. Dado que en ninguna de estas ocasiones se registraron precipitaciones de importancia, y que las fuentes principales de PM_{10} y ^7Be en la atmósfera son diferentes, es posible que el material particulado resuspendido esté arrastrando concentraciones adicionales de ^7Be desde capas altas de la atmósfera, e incrementando temporalmente su concentración por deposición gravitacional del material particulado en las capas bajas de la atmósfera sobre Tenerife. En todo caso, se ha encontrado que es condición necesaria para que esto ocurra que la pluma de material particulado resuspendido circule sobre el océano durante más de 24 horas. Se encuentra, por lo tanto, que es el efecto de arrastre que las partículas de polvo africano tienen sobre el ^7Be lo que incrementa la concentración de este isótopo en Canarias cuando ocurren episodios africanos de retorno o de transición (sección 3.3.5.1) en los que además las masas de aire experimentan subsidencia desde niveles altos de la atmósfera.

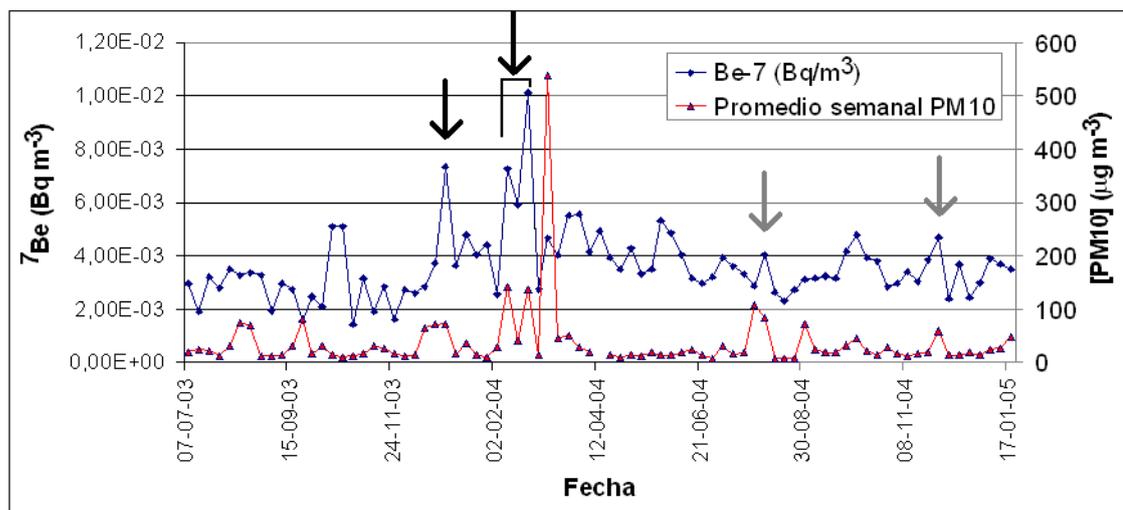


Figura 8.9. Series temporales de promedios semanales de concentración de ^7Be y PM_{10} para el periodo comprendido entre el 7 de Julio de 2003 y el 17 de Enero de 2005. Las flechas indican aquellas semanas en las que la intrusión de partículas de polvo africano coincidió con un aumento sustancial (negro) o moderado (gris) de la concentración de ^7Be en el aire.

CAPÍTULO 8. INFLUENCIA DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN LOS NIVELES DE 137CS, 40K Y 7BE EN AIRE AMBIENTE

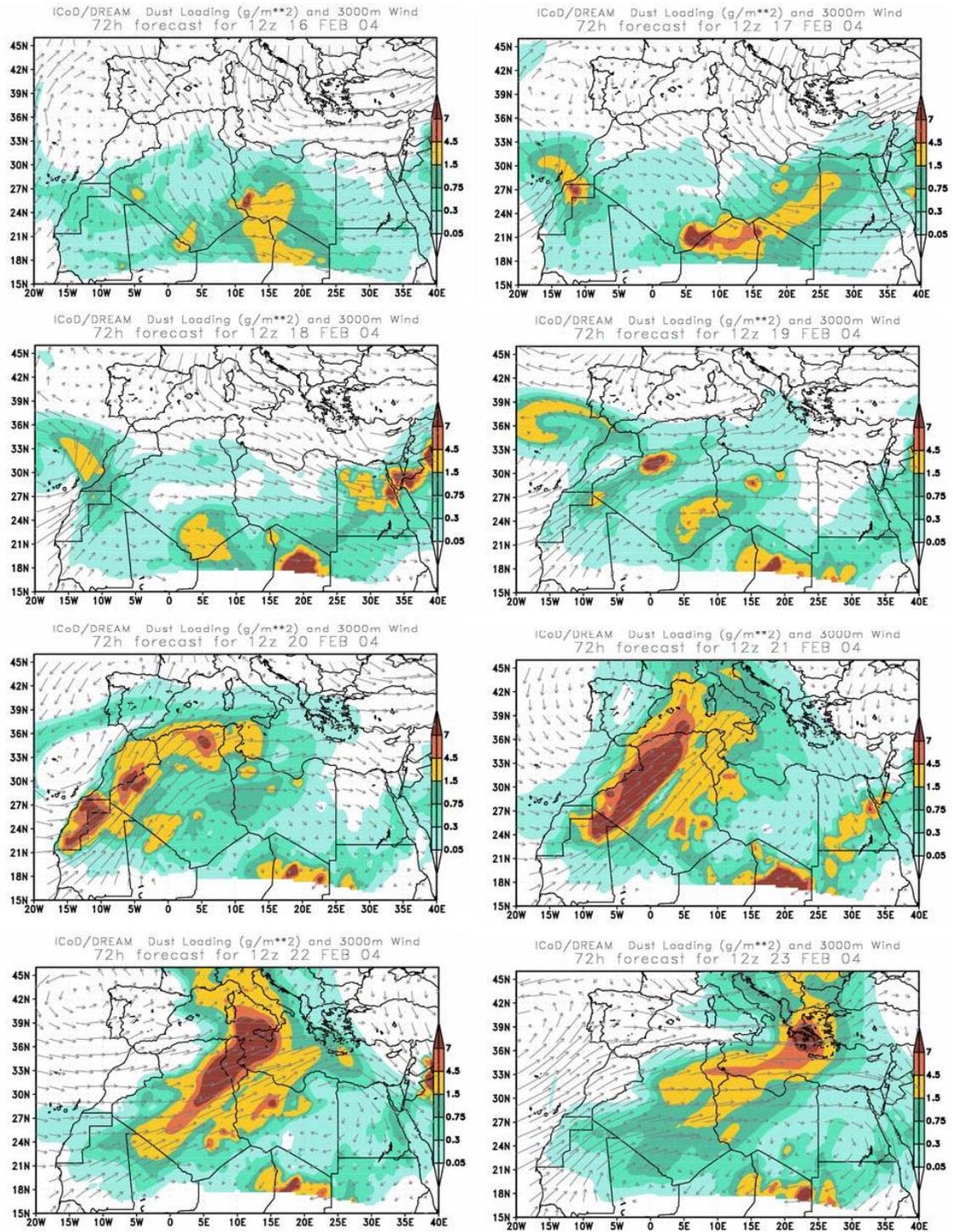


Figura 8.10. Campos de carga total de polvo calculados por el modelo BSC/DREAM para las fechas comprendidas entre el 16 y el 23 de Febrero de 2004.

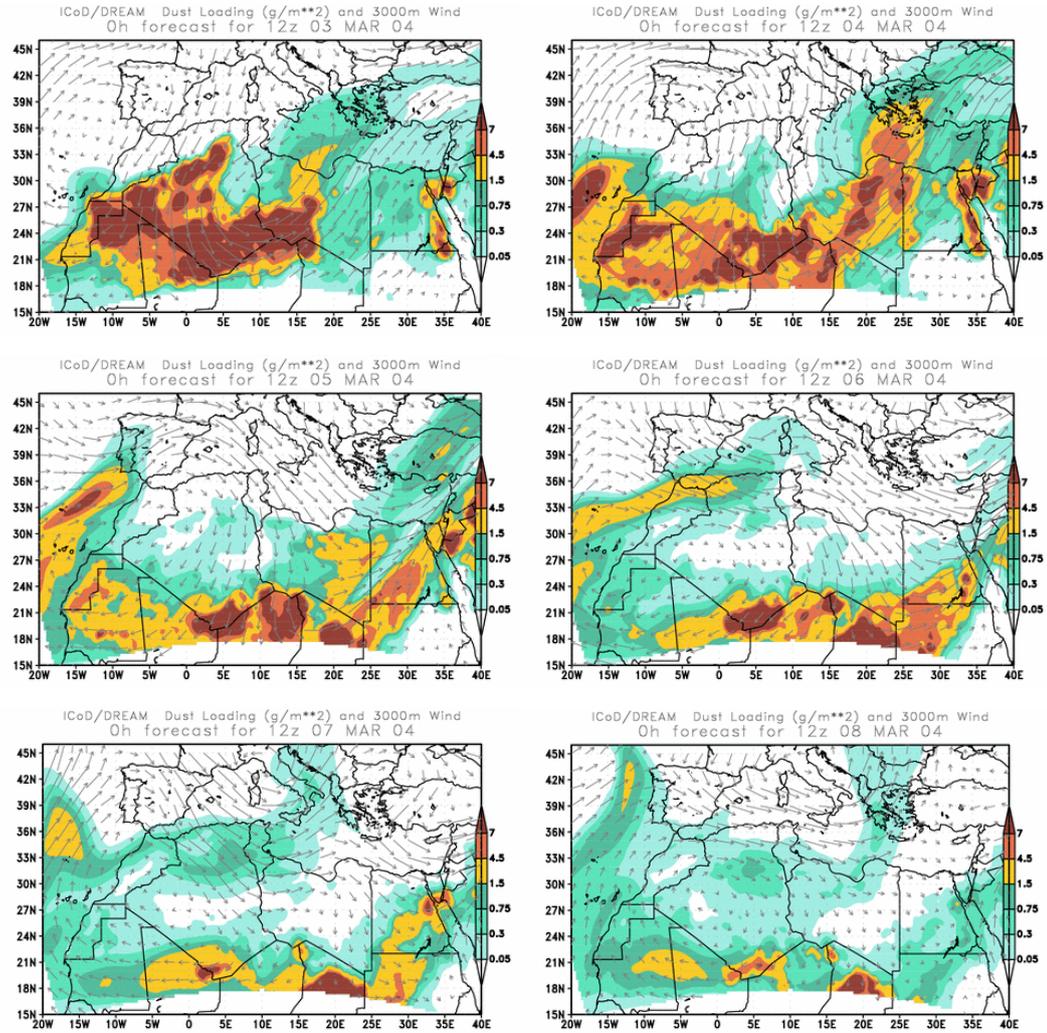


Figura 8.11. Campos de carga total de polvo calculados por el modelo BSC/DREAM para las fechas comprendidas entre el 3 y el 8 de Marzo de 2004.

CAPÍTULO 8. INFLUENCIA DE LAS INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN LOS NIVELES DE 137CS, 40K Y 7BE EN AIRE AMBIENTE

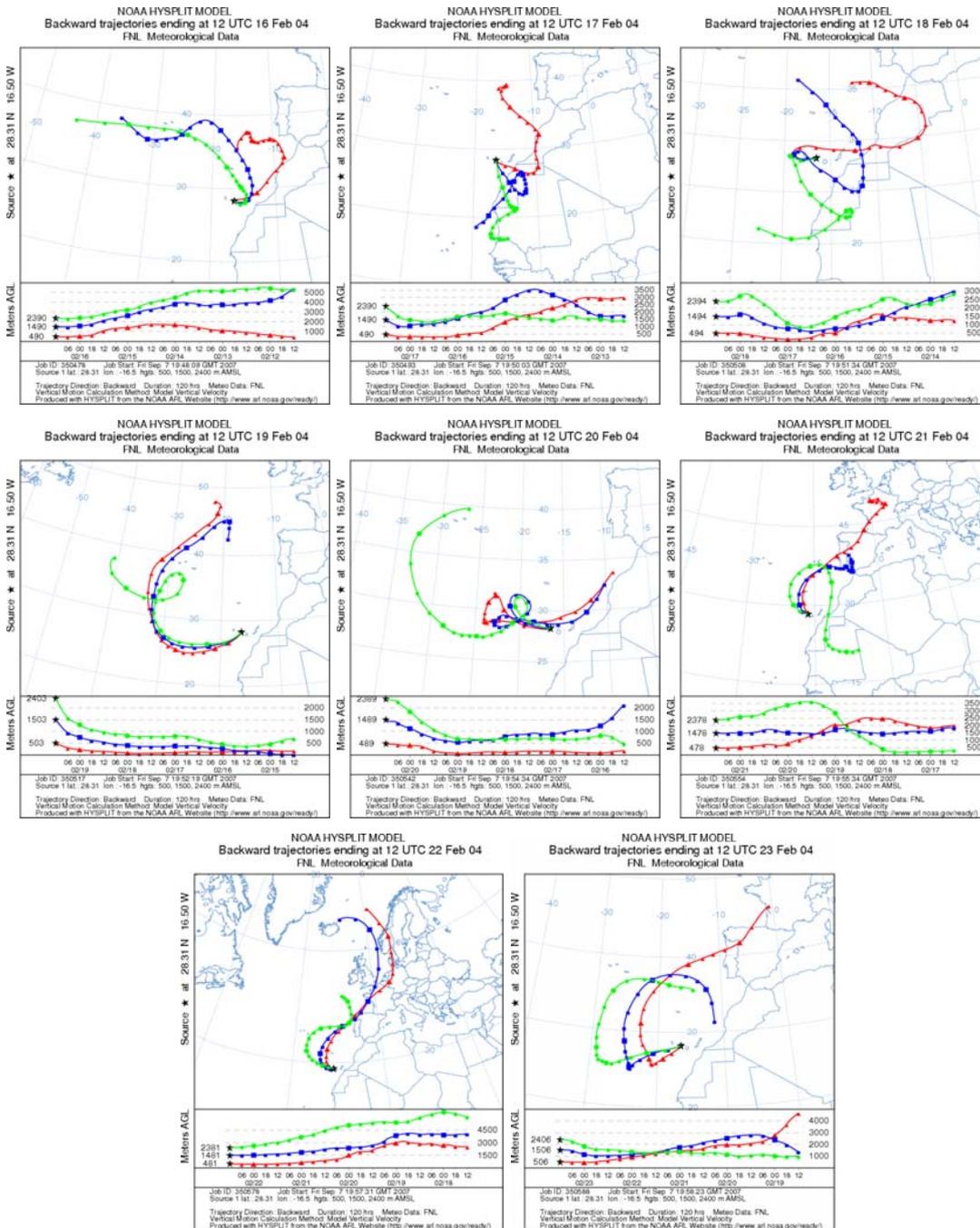


Figura 8.12. Retrotrayectorias HYSPLIT 4.0 de 120 h para tres alturas de llegada (rojo = 200 m; azul = 1500 m; verde = 2500 m), para los días comprendidos entre el 16 y el 23 de Febrero de 2004.

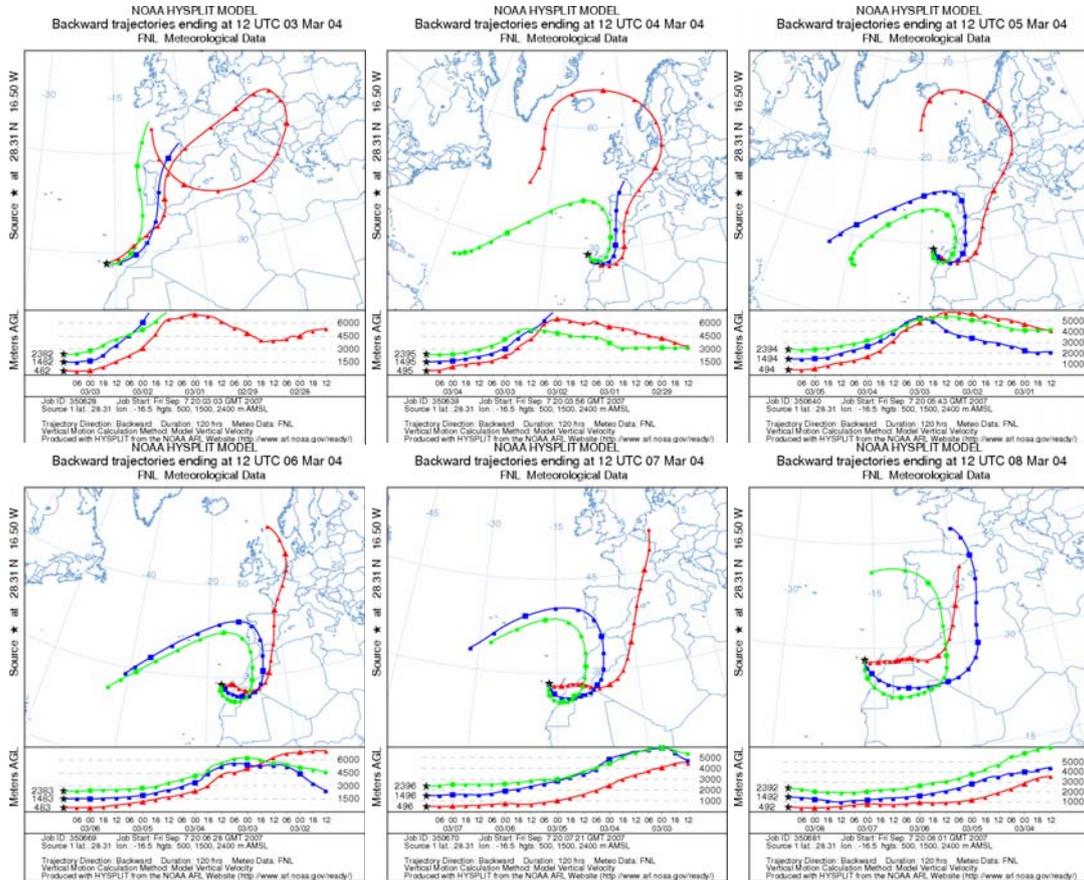


Figura 8.13. Retrotrayectorias HYSPLIT 4.0 de 120 h para tres alturas de llegada (rojo = 200 m; azul = 1500 m; verde = 2500 m), para los días comprendidos entre el 3 y el 8 de Marzo de 2004.

CAPÍTULO 9

Validación del sistema de alertas sobre intrusiones de polvo africano en Canarias

9. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTAS SOBRE INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS

9.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha visto a lo largo de esta Tesis, debido a la proximidad del archipiélago canario al continente africano, las intrusiones de masas de aire cargadas de material particulado proveniente de las áreas de Sahara y Sahel representan una fuente de contaminación natural por partículas en suspensión muy importante. El impacto de las intrusiones puede ser significativo en diferentes actividades socio-económicas. Por ello, el Ministerio de Medio Ambiente ha considerado conveniente que los responsables de las áreas de Medio Ambiente y Sanidad estén puntualmente informados de la predicción de dichos eventos.

Como resultado del convenio de colaboración para el estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en suspensión en España entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, el Instituto Nacional de Meteorología (ambos del Ministerio de Medio Ambiente) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (a través del Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” de Barcelona), desde diciembre de 2003 existe un sistema de alertas de las intrusiones de masas de aire africanas con elevada carga de partículas en suspensión. En el proyecto colaboran además la Universidad de La Laguna, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y la Universidad de Huelva. A través de este sistema se informa de la previsión de episodios de contaminación por material particulado africano a nivel de superficie en toda España, especificando su alcance geográfico, niveles de partículas, fenómenos de deposición húmeda y gravitacional y duración estimada previstos para cada episodio.

Para llevar a cabo con éxito estas predicciones es fundamental la experiencia del predictor en la interpretación del conjunto de herramientas utilizadas. Se ha constituido un equipo de tres predictores para la elaboración y distribución de las

alertas de intrusión de polvo africano en España. La autora de esta Tesis es la predictora habitual de dicho equipo. La aplicación de los conocimientos adquiridos durante la elaboración de esta Tesis en cuanto a identificación de los patrones meteorológicos que favorecen la entrada de polvo africano a Canarias, la identificación de las regiones fuente de este material particulado y la variabilidad de los niveles de partículas en las islas ha sido de vital importancia en este trabajo operativo.

9.2. HERRAMIENTAS Y METODOLOGÍA

Este sistema de alerta está basado principalmente en la información obtenida mediante modelos numéricos de carga de polvo prevista a nivel de superficie, campos previstos de diferentes variables meteorológicas, retrotrayectorias previstas y productos de teledetección para el seguimiento de la capa de polvo. Es la interpretación de todo este conjunto de productos, unida a la aplicación del conocimiento que el predictor posea sobre la caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias, lo que lleva a la elaboración de las predicciones.

A continuación se detallan las herramientas utilizadas:

Modelos numéricos de predicción de polvo

- NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System): Es el modelo de predicción de aerosoles de NRL/Monterrey (Naval Research Observatory, U.S.Navy, EEUU).

[http:// www.nrlmry.navy.mil/aerosol/](http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/)

- BSC-ICoD/DREAM (Barcelona Supercomputer Center/ Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics).

[http:// www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM](http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM)

- Skiron: Modelo de predicción de polvo de la Universidad de Atenas.
<http://forecast.uoa.gr>

Estos tres modelos han sido descritos anteriormente en la sección 3.2.2.1

Modelos numéricos de predicción de campos meteorológicos

- HIRLAM (High Resolution Limited Area Model).

El acceso a la información proporcionada por este modelo es a través del sistema McIDas (ver sección 3.2.1.1). <http://hirlam.org/>

- ECMWF: el modelo de predicción del European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF) ofrece predicciones de diversos campos meteorológicos a escala sinóptica que son de mucha utilidad en las predicciones de episodios africanos. Tenemos acceso a los productos de este modelo a través del sistema McIDAS.
- Modelo de análogos para predicción de precipitación en Canarias: Es un producto interno usado por el personal del INM que permite conocer la probabilidad de ocurrencia de precipitación por encima de determinados umbrales. Este modelo está basado en un método estadístico simple que busca un número de situaciones del pasado similares a la que se quiere predecir. Utilizando la base de datos de observación que se corresponde con esas situaciones se calculan las probabilidades de que se superen ciertos umbrales de precipitación (0.5, 2.0, 10.0 y 20.0 mm). Para poder encontrar estas analogías es necesario definir una medida de la similitud a partir de las variables predictoras más eficaces y a partir de una definición matemática de la distancia que minimice el error mediante una calibración previa de sus parámetros (Lorenz, 1969; Martin, 1972; del Hoyo *et al.*, 2000; Marrero y Bustos, 2003).

Modelos de predicción de retrotrayectorias

- Retrotrayectorias previstas por el modelo HYSPLIT 4.0: además de para hacer análisis de retrotrayectorias ya ocurridas (ver sección 3.2.1.1), desde la web <https://www.arl.noaa.gov/ready/sec/traj.html> el modelo de dispersión HYSPLIT 4.0 nos permite calcular retrotrayectorias previstas. En este caso se calcularon para distintos puntos de la geografía canaria y a diferentes alturas, según convenía en cada caso. En este cálculo, como en el caso del análisis de retrotrayectorias ya ocurridas, se tuvo en cuenta la velocidad vertical de las masas de aire prevista por el modelo. La base de datos meteorológica usada es la del modelo Global Forecasting System (GFS). La resolución espacial de las retrotrayectorias previstas en este caso es de 55 km en todo el planeta. En cuanto a la resolución temporal, es de 3 horas cuando utilizamos la predicción hasta 3.5 días (84 horas) y de 6 horas cuando la predicción tiene un alcance de entre 3.5 y 7.5 días (180 horas).
- Retrotrayectorias previstas por el modelo ECMWF: son retrotrayectorias isentrópicas previstas a partir del modelo europeo ECMWF hasta 72 horas y a seis niveles que corresponden aproximadamente al nivel del mar, 800 m, 1500 m, 2300 m, 3100 m y 4000 m.
- Retrotrayectorias previstas por el modelo HIRLAM: se trata de retrotrayectorias isentrópicas calculadas para seis niveles representativos del nivel de superficie, 925 hPa, 850 hPa, 775 hPa, 700 hPa y 600 hPa (estos dos últimos solo disponibles a partir del 8 de Agosto de 2005) a partir de datos proporcionados por el modelo HIRLAM.

Productos de teledetección

- Imágenes METEOSAT en canales visible, infrarrojo y vapor de agua.
- Imágenes MSG (Meteosat de Segunda Generación).
<http://www.esa.int/SPECIALS/MSG>

- Imágenes SeaWIFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor). <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/banner.html>
- Imágenes MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>
- AI del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer Aerosol Index). <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/meduse>.

Estos productos de teledetección fueron descritos anteriormente en la sección 3.2.2.1. Cabe destacar que las combinaciones RGB de los canales de longitudes de onda 8.9 μm , 10.8 μm y 12.0 μm , que permiten distinguir el polvo en color rosa o magenta oscuro, están disponibles de manera operativa, cada 15 minutos, desde Marzo de 2004. La combinación RGB que permite observar la imagen de satélite en color “natural”, lograda a partir de los canales de longitudes de onda 1.6 μm , 0.8 μm y 0.6 μm , está también disponible operativamente desde Febrero de 2007.

Desde Diciembre de 2006 se dispone de un sistema de recepción de la señal del MSG en el Observatorio Atmosférico de Izaña.

Las imágenes SeaWIFS de Canarias se reciben diariamente en el Observatorio Atmosférico de Izaña por cortesía del Grupo de Investigación de Ecología Marina Aplicada y Pesquerías de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria desde Marzo de 2007.

9.3. DISTRIBUCIÓN DE ALERTAS

Para los días en los que es necesario alertar de intrusión de polvo africano, se elabora un informe o boletín de predicción en el que se incluye y comenta la información y conclusiones más relevantes extraídas de las diferentes herramientas utilizadas. Estos boletines son distribuidos en formato electrónico por dos vías complementarias: correo electrónico y página web.

La distribución por correo electrónico implica el envío del boletín de predicción en formato pdf a una lista de aproximadamente 200 usuarios que previamente han solicitado su recepción. Entre los usuarios se encuentran investigadores en el área de Medio Ambiente, así como gestores de Calidad del Aire y responsables de áreas de Sanidad de diferentes organismos pertenecientes a Comunidades Autónomas, provincias y ayuntamientos.

En cuanto a la distribución por página web, las predicciones se publican diariamente en www.calima.ws (Figura 9.1). En esta web además puede consultarse toda la base de datos de los boletines de alerta emitidos desde la puesta en marcha de este proyecto, además de tablas resumen de episodios ocurridos desde el año 2004, listado de publicaciones de los investigadores implicados en el proyecto, información sobre las estaciones de muestreo y análisis químico que se utilizan para la validación del sistema de predicción, noticias y enlaces a otras páginas web de interés en el marco del proyecto. La autora de esta Tesis ejerce las tareas de administradora de esta web.

Las predicciones se elaboran de lunes a viernes y, para maximizar su fiabilidad, se limitan a un alcance de 48 h. Por ello, normalmente no se emite boletín de alerta para los lunes. En todo caso, se intenta disponer de la predicción a primera hora de la mañana para que los usuarios puedan contar con toda la información lo antes posible.

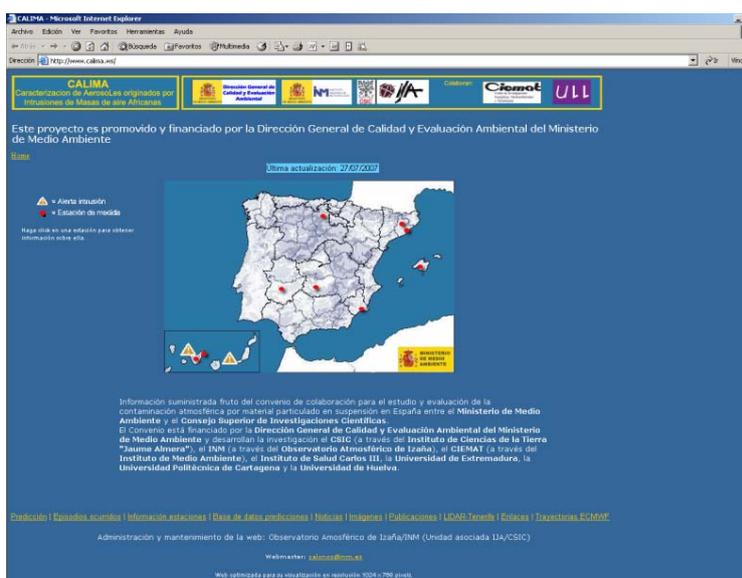


Figura 9.1. Página principal de la web <http://www.calima.ws>

9.4. NIVEL DE CONFIANZA DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN PARA CANARIAS

Para cualquier sistema de predicción es importante conocer cuál es el nivel de confianza que alcanza en sus resultados. Se han comparado los episodios ocurridos (validación a posteriori del análisis de episodios africanos mediante modelos, cálculo de retrotrayectorias, imágenes de satélite y datos de medidas de niveles de PM en estaciones de fondo regional) con todas las predicciones elaboradas desde Febrero de 2004 hasta Junio de 2007. Esta validación se ha realizado siguiendo el mismo método que se aplicó para el estudio del nivel de confianza del sistema de predicción para toda España durante el periodo comprendido entre Febrero de 2004 y Agosto de 2004 (Alonso-Pérez *et al.*, 2004) y que se adjunta en el Anexo B.

Llamamos error positivo al caso en el que se ha alertado de posible intrusión de polvo africano en Canarias a nivel de superficie pero finalmente el episodio no se ha producido. En el caso contrario, cuando ha ocurrido un episodio africano a nivel de superficie que no se ha conseguido predecir, hablamos de error negativo.

En el período validado se realizaron 1077 predicciones. El grado de acierto fue del 88.02%. El 5.2% de las predicciones resultaron en error positivo, mientras que un 6.8% de las predicciones se clasifican en los errores negativos.

La validación por meses se resume en la Figura 9.2. Puede observarse que durante la mayor parte del año el grado de acierto es superior al 85%. En general parece existir una tendencia a obtener un menor grado de acierto durante los meses en los que, según se vio en la sección 3.3.4, la frecuencia de ocurrencia de los episodios de intrusión de polvo africano a nivel de superficie en Canarias es mayor. Existe una mayor tendencia a la subestimación (error negativo) durante los meses de Diciembre, Febrero, Julio y Septiembre. La sobreestimación (error positivo) resultó ser mayor en los meses de Enero y Marzo.

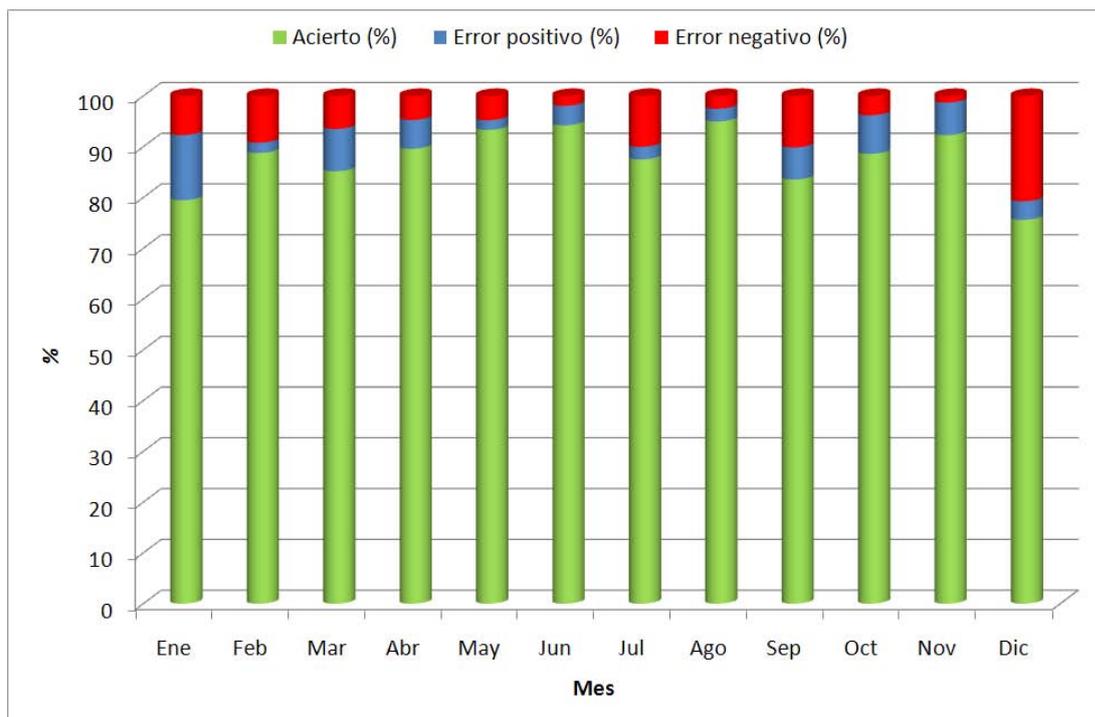


Figura 9.2. Estadística mensual sobre el nivel de confianza del sistema de predicción. Se muestra la cantidad de aciertos, errores positivos (sobreestimación) y errores negativos (subestimación) para el período Febrero 2004 – Junio 2007.

El porcentaje de aciertos es mayor en verano que en invierno, tal y como se muestra en la Tabla 9.1.

El error es mayor en invierno. La experiencia demuestra que es en invierno cuando hay más probabilidad de fallar debido a que el polvo tiene como origen áreas más cercanas a Canarias, lo que supone un menor tiempo de reacción para elaborar la predicción, además de ser en ocasiones zonas fuentes muy pequeñas que los modelos de predicción de polvo no son capaces de resolver por sus limitaciones en resolución espacial. Además, una fuente adicional de incertidumbre en invierno es el hecho de que es más probable que ocurran procesos de lavado, tanto en la zona de tránsito del polvo como en Canarias.

El error negativo es el más grave en el sistema de predicción, ya que supone no alertar cuando en realidad los niveles de partículas se elevan por efecto de la intrusión de polvo africano. Se encuentra que este error es más común en verano. Esto puede ser debido a que en verano los niveles de partículas en superficie se elevan principalmente debido a deposición gravitacional del polvo que llega a medianías y cumbres de las islas (sección 3.3.6), y en este caso los modelos

numéricos no prevén intrusión de polvo a nivel de superficie (ya que realmente no lo hay) y suelen mostrar poco acuerdo y gran incertidumbre en cuanto al impacto de la deposición gravitacional.

Tabla 9.1. Estadística estacional sobre el nivel de confianza del sistema de predicción. Se muestra la cantidad de aciertos, errores positivos (sobreestimación) y errores negativos (subestimación) para el período Febrero 2004 – Junio 2007.

Invierno			Verano		
Aciertos	Error negativo	Error positivo	Aciertos	Error negativo	Error positivo
82.8%	6.6%	10.7%	87.7%	8.2%	4.1%

9.5. PROPUESTAS PARA LA MEJORA DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN

Es de esperar una mejora en el nivel de confianza de este sistema de predicción con el perfeccionamiento de los modelos de predicción (tanto los de polvo como los modelos meteorológicos y de trayectorias de masas de aire) y la incorporación de nuevos productos de teledetección, así como de datos de fotometría solar, LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) y nuevas estaciones de medidas in-situ de concentración de partículas que permitan un mejor seguimiento de las nubes de polvo desde su origen hasta su llegada a la región de estudio.

La fotometría solar permite conocer el espesor óptico de aerosoles durante el día, así como inferir la distribución de partículas por tamaño mediante métodos de inversión. La incorporación de estos datos se realizará a partir de instrumentos de estaciones estratégicamente situadas, todas ellas pertenecientes a la red AERONET (Aerosol RObotic NETwork). Con estos datos podrá realizarse una monitorización en tiempo quasi-real de las masas de aire cargadas de material particulado desde las zonas fuente o de tránsito en el continente africano hasta las regiones de estudio en España. Los instrumentos disponibles están situados en las estaciones de Cabo Verde (16°N, 22°W), Dahkla (23°N, 15°W), Santa Cruz de Tenerife (28°N, 16°W), Izaña (28°N, 16°W), Saada (31°N, 8°W), Blida (36°N, 2E), El Arenosillo (37°N, 6°W), Granada (37°N, 3°W), Pitres (37°N, 3°W), Ahi de Cara

(37°N, 3°W), Armilla (37°N, 3°W), Cabo da Roca (38°N, 9°W), Evora (38°N, 7°W), Palencia (41°N, 4°W) y Barcelona (41°N, 2°E). Las limitaciones de la información proporcionada por esta red de fotómetros solares radican en la resolución espacial de la propia red y en el hecho de que la fotometría solar proporciona información referente a toda la columna atmosférica, con lo que no nos permite resolver si un episodio africano afecta a nivel de superficie. Esta información sería muy útil para seguir el transporte de plumas de polvo, pero no para predecir y analizar el impacto de los episodios africanos a nivel de superficie. Para hacer frente a estas limitaciones se debe disponer de una red de analizadores en superficie, cuya información debe estar disponible en tiempo real, formada por los instrumentos que actualmente se utilizan para la detección de episodios africanos en el marco del convenio CSIC/INM (Figura 9.3) y por los instrumentos de las redes de control de calidad del aire de diferentes Comunidades Autónomas.

Otra herramienta que puede incorporarse al sistema de predicción, en este caso para la observación de la distribución vertical de capas de polvo desde su origen hasta su llegada a España, es una red de instrumentos LIDAR. La red MPL-Net (Micro Pulse Lidar NETwork; <http://mplnet.gsfc.nasa.gov/>) posee dos instrumentos estratégicamente situados para nuestros propósitos: el instrumento de Cabo Verde (16°43.95'N, 22°56.13'W, 60 m.s.n.m.) y el de Santa Cruz de Tenerife (28°28'21"N, 16°14'50"W, 52 m.s.n.m.). Por otro lado, también podrán incorporarse los datos de los instrumentos que la red europea EARLINET (European Aerosol Research Lidar NETwork; <http://www.earlinet.org/>) posee en Barcelona (41°23'N, 2°07'W, 60 m.s.n.m.) y Lisboa (38°45'N, 9°07'W, 50 m.s.n.m.).

La mejora de los modelos de predicción de polvo atmosférico será posible en un futuro próximo por la incorporación en los mismos de asimilación en tiempo quasi-real de información de la distribución vertical de aerosoles que proporcionan los sistemas LIDAR y el sensor satelital CALIPSO, y por la asimilación del contenido de polvo atmosférico en columna que proporcionan los sensores satelitales, y que son de gran importancia para la determinación de zonas fuente.

La vigilancia y los sistemas de alerta están viéndose ya muy beneficiados por la posibilidad de obtener información de alta resolución temporal (cada 15 minutos) y espacial (3x3 km²) de los nuevos sensores a bordo de satélites geoestacionarios (por ejemplo, el Meteosat de Segunda Generación). Asimismo, la proliferación de

sensores de tierra que proporcionan información en tiempo real de espesor óptico de aerosoles (fotómetros solares) y PM10-PM2.5 están mejorando tanto los sistemas de vigilancia, como los procesos de validación en tiempo cuasi-real, tanto de modelos de polvo, como de sensores satelitales y de sus algoritmos para la determinación de polvo.



Figura 9.3. Red de estaciones de fondo regional utilizadas para la detección de episodios africanos.

CAPÍTULO 10

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

10. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

10.1. RESUMEN DE CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una completa caracterización objetiva de las intrusiones de masas de aire con elevada carga de polvo africano en Canarias. En cada uno de los capítulos del 3 al 9 se han expuesto detalladamente las conclusiones extraídas, que pueden resumirse en los siguientes puntos:

Capítulo 3

- La estación de El Río es un emplazamiento idóneo para el estudio de intrusiones de material particulado africano y para la caracterización de los niveles de fondo de PST (Partículas Totales en Suspensión en aire ambiente) en la capa de “mezcla marina en Canarias”, debido a que está muy poco influenciada por fuentes antropogénicas locales. Se ha determinado objetivamente que cuando en esta estación la media diaria de PST sobrepasa el umbral de los $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ podemos considerar que nos encontramos ante un episodio africano. La duración media de estos episodios es de 3 días.
- En la estación de Santa Cruz de Tenerife se encontró una relación $\text{PM}_{10}/\text{PST} = 0.42 \pm 0.1$. Este valor es significativamente inferior al encontrado en estaciones europeas, lo que indica que la fracción de material particulado grueso es mayor en la región subtropical Nororiental del Atlántico que en el continente europeo. Una elevada carga de aerosol marino en la zona de estudio también puede contribuir a disminuir dicha relación.
- Los promedios anuales de la serie de PST en El Río correlacionan muy bien ($r = 0.97$, para $p < 0.05$) con el número anual de días de intrusión africana ($\text{PST} > 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el periodo 1998-2003. La variación interanual de la serie de seis años de concentración de PST en El Río está ligada al

transporte definido por las trayectorias de las masas de aire y modulada por los procesos de lavado. Los fenómenos de precipitación juegan un papel muy importante en esta variación, tal y como se demostró para el invierno de 2002. Las precipitaciones en la zona donde se sitúa la estación de medida y/o en las zonas de tránsito del material particulado provocan el “lavado” de la atmósfera, lo que hace descender bruscamente los niveles de partículas medidos aunque simultáneamente se produzca una intrusión de masas de aire africano. Por otro lado, las precipitaciones en las zonas fuente del material particulado provocan que este material no pueda ser inyectado hacia la troposfera.

- Las concentraciones de PST anormalmente altas registradas durante el verano de 2003 en la estación de El Río pudieron ser probablemente el resultado de la combinación de un número alto de días de intrusión de masas de aire africano (más de 10 días) y una altura del límite superior de la capa de inversión térmica asociada al alisio anormalmente baja durante todo el verano.
- Los límites de concentración media anual de PM10 y número máximo de días de superación de PM10 > 50 µg/m³ impuestos por la Directiva Europea 1999/30/CE se cumplieron durante todo el periodo 1998-2003 en la estación de El Río. Respecto a los límites que originalmente se propusieron en la Directiva a partir de 2010, se incumplió el número máximo de días de superación de la media diaria de PM10=50 µg/m³ durante los años 1998 y 2000, mientras que el límite para el promedio anual de PM10 no se superó. La normativa en cuanto a número de días de superación de PST > 50 µg/m³ se incumple con más frecuencia durante los meses de invierno. Estos resultados indican la importancia del aporte natural de partículas sobre Canarias y la dificultad que se habría encontrado si finalmente se hubieran implantado los límites que originalmente se propusieron para fechas a partir de 2010 (número máximo de días de superación del límite diario de PM10 > 50 µg/m³ igual a 7 y promedio anual máximo de PM10 = 20 µg/m³).
- Existe una marcada estacionalidad en los promedios mensuales de las concentraciones de partículas en suspensión en aire ambiente,

encontrándose un patrón bimodal. Los meses de Febrero y Marzo son los más importantes en cuanto a concentración promedio mensual y número de días de episodios africanos. En verano el máximo promedio mensual de PST se registra en Agosto, así como un elevado número de días de intrusión. El mes de Octubre es importante en cuanto a número de días de intrusión, pero no tanto como Agosto en cuanto a concentración de partículas. Existe una buena correlación entre las series de niveles medios mensuales de PST y las de número de días mensual de intrusión africana para el periodo 1998-2003, con un coeficiente de correlación $r = 0.88$ ($\rho < 0.05$).

- El promedio de las concentraciones de fondo regional de PST para el periodo 1998-2003 es de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los niveles de fondo de PST muestran muy poca variación a lo largo del año. Las pequeñas variaciones de los niveles de fondo son debidas las variaciones en el aporte de aerosol marino.
- Se han identificado y descrito dos tipos de episodios africanos indirectos. Los “episodios de transición” ocurren justo después de una intrusión de masas de aire con elevada carga de polvo africano, cuando una masa de aire “limpia”, por ejemplo de origen Noratlántico, comienza a reemplazar a la masa de aire africano que previamente afectó a la zona de estudio, aunque la atmósfera no se haya limpiado completamente de aerosoles africanos. Los “episodios de retorno” ocurren cuando una pluma de polvo africano ha viajado hacia el Oeste sobre el océano durante los días previos y luego retorna hacia las islas Canarias debido a un flujo del Oeste.
- La mayor contribución del material crustal africano a los niveles de PST durante episodios africanos en la estación de El Río tiene lugar en el mes de Marzo, cuando hay una combinación de episodios esporádicos pero muy intensos de deposición gravitacional y episodios directos a nivel de superficie, seguido del mes de Febrero, donde los episodios ocurren a nivel de superficie. Los aportes africanos más intensos se registran durante los meses de invierno y primavera. En verano la contribución africana máxima tiene lugar en el mes de Agosto. Durante los meses de Diciembre, Enero, Junio, Julio, Agosto y Septiembre la contribución de las intrusiones africanas al promedio mensual de PST es menor que las concentraciones de fondo.

- La deposición gravitacional de polvo africano desde niveles altos es un fenómeno importante que puede incrementar las concentraciones mensuales de PST en la estación de fondo rural de El Río entre 5 y 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este fenómeno es más intenso, aunque no más frecuente que en verano, durante el mes de Marzo. En verano la deposición seca también es importante, tanto en frecuencia como en intensidad, sobre todo en los meses de Agosto y Julio. En Septiembre y Octubre los niveles de PST debidos a deposición gravitacional descienden un orden de magnitud. Durante los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Abril no existe una contribución representativa de la deposición gravitacional a los niveles de PST registrados.

Capítulo 4

- Se han propuesto los índices de africanidad y se ha demostrado la idoneidad de los mismos como indicadores de la frecuencia e intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano.
- La serie de índices de africanidad muestra que las intrusiones de masas de aire africano que afectan a nivel de superficie tienen lugar en invierno. En verano las intrusiones afectan a medianías y altura. Los aportes desde el área de Sahel solo llegan a zonas de medianías y altura y son más importantes en invierno, aunque la permanencia de las masas de aire en esta zona siempre es mucho menor que sobre el Sahara. La estacionalidad de los índices de africanidad sigue el mismo comportamiento que el de la serie de concentraciones de PST: las masas de aire permanecen más horas en el continente africano por debajo de 1500 m, en invierno. Existe también un máximo para verano en el mes de Agosto.
- Aunque según los mapas de AI del TOMS durante todo el año existe una zona muy activa en la región de la depresión del Bodelé (Chad), ésta no representa un área fuente de material particulado para Canarias.

- El índice AI del TOMS no es un buen indicador de la presencia de polvo africano en la atmósfera de Canarias para los meses de invierno, cuando las intrusiones tienen lugar principalmente por debajo de 1000 m.s.n.m.
- Las regiones fuente de polvo para Canarias se localizan cada vez más al Sur a medida que aumenta la altura de llegada de las intrusiones de polvo sobre las islas, situándose en latitudes más meridionales en verano y más septentrionales en invierno.
- Para niveles bajos en invierno el origen del polvo se sitúa principalmente sobre la región limitada por las coordenadas [26°N, 34°N], [5°W, 14°E] que se extiende desde el Gran Erg Occidental hasta el Gran Erg Oriental en Argelia. La región de lagos de Wilaya d'El Oued (Noreste de Argelia) es una región fuente secundaria. En verano no se encuentran regiones fuentes de material crustal que sea transportado de manera directa a nivel de superficie.
- Para intrusiones en medianías de las islas en invierno se encuentra que las zonas fuente más importantes se encuentran en el Gran Erg Oriental ([24°N, 30°N], [8°W, 3°E]) y en la frontera entre Mali y Argelia. En verano el origen del polvo se sitúa en el centro de Argelia, entre las latitudes 20°N y 30°N, y en la frontera entre Mauritania, Senegal y Mali, en el Sureste de Mauritania, en los flancos de las montañas del Parque Nacional de Nikolo-Koba, en la región de lagos (lagos Abari Mare y Léné Mare en Tambacounda, Senegal) y en la frontera entre Mali y Argelia.
- Para las escasas intrusiones que tienen lugar en altura en invierno se pueden identificar 5 áreas fuente principales. Tres de ellas están situadas en Argelia. La cuarta región fuente se detecta en el Este de Mali (16°N, 3°E) y la quinta fuente se observa en Níger (16°N, 10.5°E) al Sureste de las montañas de Aïr, en el desierto de Bilma. Para las intrusiones que tienen lugar en altura durante el verano se encuentra una extensa región fuente principal de polvo en el Sureste de Argelia, al Sur de las montañas de Ahaggar.
- Las principales zonas fuente de polvo africano para Canarias están asociadas a bajas topográficas o están situadas en los flancos de montañas y zonas elevadas.

Capítulo 5

- Las dos primeras componentes principales de los campos de promedio mensual de anomalía de altura geopotencial para días de intrusión explican el 80 % de la variabilidad total. El escenario meteorológico más habitual en días de episodio africano en Canarias consiste en un alta centrada en Europa, que llega a afectar el Norte de África, dando lugar frecuentemente a una dorsal. En general las islas Canarias se encuentran en el flanco SW de esta dorsal. Durante el verano las anomalías son más importantes en niveles altos, conclusión a la que anteriormente habíamos llegado en nuestro estudio sobre la estacionalidad de las series de índices de africanidad para intrusiones a diferentes alturas. Los patrones encontrados para los meses de Diciembre y Enero, en los que se combinan una alta que afecta al Norte de África y una baja al Noroeste y Suroeste de Canarias respectivamente, son los que pueden favorecer la entrada de polvo africano mediante episodios de retorno

Capítulo 6

- La correlación para la serie 1998-2003 entre los promedios de invierno de PST y del índice NAO es moderada, con $r = 0.56$ (para $p < 0.05$). La correlación, para una serie de 58 años, de los promedios de invierno de índices de africanidad y de índice NAO, es también moderada, con $r = 0.58$ ($p < 0.05$). El resultado indica que el patrón de teleconexión de la NAO modula moderadamente la frecuencia e intensidad de las intrusiones de polvo sahariano que llegan a Canarias a nivel de superficie.
- Se encontró un nuevo índice de teleconexión (índice Madrid-Tenerife), definido como la diferencia de anomalías (referidas a los valores promedio del período 1961-1990) de altura de geopotencial a nivel de 1000 hPa entre Tenerife y Madrid. La correlación, para todos los niveles estudiados, entre los promedios anuales de este índice y de $AFINL_{200}$ en la serie 1948-2005 es siempre superior a $r = 0.69$ ($p < 0.05$). En el caso de la correlación de

promedios mensuales, es siempre superior a $r = 0.78$ ($p < 0.05$). Por lo tanto, se encuentra que la clave en la modulación de la frecuencia e intensidad de los episodios de intrusiones de polvo africano que afectan a Canarias a nivel de superficie en invierno se encuentra en la diferencia de presión atmosférica entre Canarias y la Península Ibérica.

- No se encuentra relación estadísticamente significativa entre la intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano en invierno en Canarias y la precipitación en la región del Sahel durante el año anterior, como otros autores han encontrado en otras zonas del hemisferio Norte.

Capítulo 7

- Del estudio realizado sobre tendencias de los índices de africanidad, índices de no-africanidad y de diferentes parámetros climáticos, puede concluirse que tanto el aumento de frecuencia e intensidad de los episodios de intrusión de polvo africano a nivel de superficie en Canarias como el aumento de la temperatura del aire, aumento de la altura de geopotencial, descenso de la humedad específica y relativa, y debilitamiento del alisio, todo ello en niveles bajos en las islas, comienza a ser estadísticamente significativo a partir de los últimos años de la década de 1970, especialmente entre los años 1976 y 1979. Parece, por lo tanto, que el comienzo de la tendencia al aumento en frecuencia e intensidad de los episodios africanos en Tenerife coincide con el comienzo de indicio de cambio climático.

Capítulo 8

- Durante los episodios africanos se encuentra una buena correlación entre las variaciones de la concentración de PM10 y de los isótopos ^{137}Cs y ^{40}K , incluso cuando solo ocurren pequeños incrementos de concentración de PM10. La concentración de estos isótopos puede aumentar respecto a su concentración de fondo hasta en un grado de magnitud durante los episodios africanos. Esta buena correlación permite el uso de los trazadores para

identificar el carácter africano de una intrusión de polvo en las islas Canarias, lo que podría ser un método complementario a los ya existentes para identificar los días de contaminación natural.

- Al menos en 4 ocasiones en los últimos tres años se han producido incrementos sustanciales de la concentración de ^7Be simultáneamente a la llegada de polvo africano a nivel de superficie desde el continente africano. Este hecho se asocia al efecto de arrastre que las partículas de polvo africano tienen sobre el ^7Be , lo cual incrementa la concentración de este isótopo en Canarias cuando ocurren episodios africanos de retorno o de transición, en los que además las masas de aire experimentan subsidencia desde niveles altos de la troposfera.

Capítulo 9

- Como resultado de la validación para Canarias, y para el periodo comprendido entre Febrero de 2004 y Junio de 2007, del sistema de predicción y alertas de intrusiones de polvo, se concluye que el grado de acierto fue del 88.02%. En el 5.2% de las predicciones se cometió un error positivo (sobreestimación) mientras que en un 6.8% se cometió un error negativo (subestimación). El porcentaje de aciertos es mayor en verano que en invierno. Se encuentra que el error negativo es más común en verano, debido a la dificultad que los modelos de predicción de polvo encuentran para predecir cuantitativamente la deposición gravitacional.

10.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En la presente Tesis se ha puesto de manifiesto la importancia que los episodios intrusión de masas de aire africano cargados de material particulado tienen en Canarias, principalmente debido a las consecuencias socioeconómicas y sanitarias que estos frecuentes y a menudo intensos episodios ocasionan en las islas. Es por ello que se encuentra necesario profundizar en el futuro sobre algunos aspectos de esta investigación que se detallan a continuación:

- En el caso del estudio de las series temporales de PST y de su correlación con índices climáticos, sería deseable repetir nuestro estudio con una serie más larga, utilizando datos de diferentes estaciones de fondo rural, y utilizando otros índices además de NAO , Sahel Rainfall Index y Madrid-Tenerife Index.
- Incorporar resultados de métodos de inversión aplicados a datos de fotometría solar para estudiar mejor cómo es la distribución por tamaño de partículas de los aerosoles en la columna atmosférica y calcular con más exactitud el cociente PM10/PST.
- Incorporar datos georeferenciados de erodibilidad del suelo del continente africano a los métodos de identificación de regiones fuente de polvo, lo cual nos ayudaría a distinguir entre zonas fuente y regiones de tránsito del material mineral particulado que llega a Canarias.
- Incorporar datos de reanálisis de concentración de polvo africano a nivel de superficie del modelo BSC/DREAM sobre el Norte de África y el Atlántico. Esta información permitirá obtener un conocimiento más exacto de los procesos de generación y transporte de polvo africano hacia Canarias.
- Utilizar una serie larga de concentración de material particulado africano, calculada mediante reanálisis con el modelo BSC/DREAM sobre un punto de la capa de mezcla marina en Tenerife, para estudiar su tendencia temporal.
- Implementar paulatinamente las mejoras propuestas para el sistema de predicción y alertas por intrusión de polvo africano que se exponen en la sección 9.5.

En un futuro inmediato se trabajará en varios artículos basados en los resultados que se exponen a lo largo de esta Memoria de Tesis con el fin de publicarlos en revistas internacionales especializadas. Los temas propuestos para estas futuras publicaciones son:

- Identificación de áreas fuente de polvo africano que afectan a Canarias

- Determinación objetiva de los patrones meteorológicos a escala sinóptica que favorecen las intrusiones de polvo africano en Canarias
- Relación entre la variabilidad de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias y la de índices de teleconexión. El índice de teleconexión Madrid – Tenerife (MTI).
- Tendencias de las intrusiones de masas de aire africano en Canarias y su relación con el cambio climático.

10.3. PUBLICACIÓN DE RESULTADOS

La aplicación de los conocimientos y experiencia adquiridos durante la realización de la presente Tesis, así como los resultados en ella presentados, han dado lugar a los siguientes trabajos publicados en revistas especializadas y en el Servicio de Publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente :

Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Querol, X., Viana, M., Guerra, J.C. (2007). Impact of the Saharan dust outbreaks on the ambient levels of total suspended particle (TSP) in the Marine Boundary Layer (MBL) of the Subtropical Eastern North Atlantic Ocean. *Atmospheric Environment* (En imprenta).

Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodríguez, S., **Alonso-Pérez, S.** (2007) Impacto de las emisiones desérticas de polvo africano sobre la calidad del aire en España. *Revista MACLA de la Sociedad Española de Mineralogía*. ISSN 1885-7264. (Aceptado).

Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Ferreira, F., Cuevas, E., **Alonso-Pérez, S.** (2007). A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 41, 5516-5524.

Hernández, F., **Alonso-Pérez, S.**, Hernández-Armas, J. y Cuevas, E. (2005). Influence of major African dust intrusions on the ^{137}Cs and ^{40}K activities in the lower atmosphere at the Island of Tenerife. *Atmospheric Environment*, 39, 4111-4118.

- Querol, X., Alastuey, A., Escudero, M., Pey, J., Castillo, S., Pérez, N., Ferreira, F., Franco, N., Marques, F., Cuevas, E., **Alonso-Pérez, S.** (2006). Procedimiento para la identificación de episodios naturales africanos de PM10 y PM2.5, y la demostración de causa en lo referente a las superaciones del valor límite diario de PM10. MMA (Ministerio de Medio Ambiente, España) y Ministério do ambiente, Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional (Portugal).
- Querol, X., Cuevas, Pey, J., **Alonso-Pérez, S.**, Salvador, P., Alastuey, A., Ferreira, F., Franco, N., Marques, F., Cuevas, E., Artiñano, B. (2006). Identificación de episodios de transporte a larga distancia causantes de episodios de partículas en suspensión en España. Informes de Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Querol, X., Cuevas, Pey, J., **Alonso-Pérez, S.**, Salvador, P., Alastuey, A., Ferreira, F., Franco, N., Marques, F., Cuevas, E., Artiñano, B. (2005). Identificación de episodios de transporte a larga distancia causantes de episodios de partículas en suspensión en España. Informes de Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Querol, X., Cuevas, Pey, J., **Alonso-Pérez, S.**, Salvador, P., Alastuey, A., Ferreira, F., Franco, N., Marques, F., Cuevas, E., Artiñano, B. (2004). Identificación de episodios de transporte a larga distancia causantes de episodios de partículas en suspensión en España. Informes de Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente, España. 101 pp.
- Querol, X., Cuevas, Pey, J., **Alonso-Pérez, S.**, Salvador, P., Alastuey, A., Ferreira, F., Franco, N., Marques, F., Cuevas, E., Artiñano, B. (2003). Identificación de episodios de transporte a larga distancia causantes de episodios de partículas en suspensión en España. Informes de Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Ministerio de Medio Ambiente, España. 120 pp.

Algunos resultados de esta Tesis también han sido presentados en los siguientes congresos internacionales:

Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Querol, X., Guerra, J.C. African dust outbreaks over the Canary Islands. (2007). Impact, dust sources areas and meteorological scenarios. 7th EMS Annual Meeting & 8th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM). 1-5 octubre de 2007. San Lorenzo del Escorial. España.

Cuevas, E., Basart, S., Bustos, J., **Alonso-Pérez, S.**, Rodríguez, S., Marrero, C., Manso, M., Martínez, M.A., Velázquez, M., Palomares, M., Baldasano, J.M., Pérez, C., Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., Querol, X., Pey, J., Barrie, L., Nickovic, S. (2007). WMO Sand and Dust Storm Warning System (SDS-WS) for Europe, Africa and Middle East: a GEO-oriented System. 7th EMS Annual Meeting & 8th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM). 1-5 octubre de 2007. San Lorenzo del Escorial. España.

Alonso-Pérez, S. Cambio climático: proyecciones futuras. III Congreso de biología de la conservación de plantas. 25-28 septiembre de 2007. Puerto de La Cruz. Tenerife. España.

Cuevas, E., Basart, S., Bustos, J., **Alonso-Pérez, S.**, Rodríguez, S., Marrero, C., Manso, M., Martínez, M.A., Velázquez, M., Palomares, M., Baldasano, J.M., Pérez, C., Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., Querol, X., Pey, J., Barrie, L., Nickovic, S. (2007). WMO Sand and Dust Storm Warning System (SDS-WS) for Europe, Africa and Middle East: a GEO-oriented System. International Conference on "Secure and Sustainable Living: Social and Economic Benefits of Weather, Climate and Water Services". 19-22 Marzo 2007. Madrid. España.

Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Guerra, J.C., Viana, M., Querol, X.(2006). Influencia de las intrusiones africanas en los niveles de partículas en suspensión totales en la capa de mezcla marina de la región subtropical oriental del Atlántico Norte. X Congreso de Ingeniería Ambiental. Feria Internacional de Medio Ambiente PROMA 2006. 3-5 octubre 2006. Bilbao Exhibition Center, Barakaldo. España.

- Belmonte, J., Roure, J.M., Puigdemund, R., Cuevas, E., **Alonso-Pérez, S.**, González, R., Poza, P., Grau, F. (2006). Aerobiology and respiratory allergies in Santa Cruz de Tenerife, year 2005. 8th International Congress on Aerobiology. 21-25 Agosto 2006. Neuchâtel (Suiza). 21-25 Agosto 2006.
- Gil, M., López-Herreros, J.F., Chueca, S., Serrano, O., **Alonso-Pérez, S.**, Cuevas, E., Romero, P.M., Navarro, M., Andrey, J., Córdoba-Jabonero, C., Yela, M., Redondas, A., Rodríguez, S., Schneider, M., Kramer, I., Blumenstock, T., Pérez, C. (2006). El proyecto TROMPETA (TROpical Monitoring Phase in The Atmosphere): Interacción aerosoles-radiación-ozono en la atmósfera subtropical. 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 30 de Enero – 3 de Febrero 2006. Universidad de Sevilla. España.
- Hernández, F., Karlsson, L., Hernández-Armas, J., **Alonso-Pérez, S.**, Rodríguez, S., Cuevas, E., Fernández-Aldecoa, J.C., Catalán-Acosta, A. (2006). Influencia de la resuspensión y transporte de aerosoles de origen continental en las concentraciones del trazador atmosférico ⁷Be. Congreso de Ingeniería Ambiental. Feria Internacional de Medio Ambiente PROMA 2006. 3-5 octubre 2006. Bilbao Exhibition Center, Barakaldo. España.
- Hernández, F., Karlsson, L., Hernández-Armas, J., Catalán-Acosta, A., Fernández-Aldecoa, J.C., **Alonso-Pérez, S.**, Rodríguez, S., Cuevas, E. (2006). Fuentes de contaminación antropogénica radioactiva en la atmósfera de Tenerife (Islas Canarias, España).(2006). X Congreso de Ingeniería Ambiental. Feria Internacional de Medio Ambiente PROMA 2006. 3-5 Octubre 2006. Bilbao Exhibition Center, Barakaldo. España.
- Alonso-Pérez, S.**, Pey, J., Cuevas, E., Querol, X., Alastuey, A., Romero, P.M., Cristobal, A. (2004). Sistema de información sobre intrusiones de masas de aire africano en España. IX Congreso de Ingeniería Ambiental. Feria Internacional de Medio Ambiente PROMA 2004. 9-11 noviembre de 2004. Bilbao Exhibition Center, Barakaldo. España.

REFERENCIAS

1. 1999/30/CE (Directiva Europea, 1999). Council Directive relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxide of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. The Council of the European Union.
2. Adams, P.J., Seinfeld, J.H., Koch, D.M. (1999). Global concentrations of tropospheric sulphate, nitrate and ammonium aerosol simulated in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 104, 13791-13823.
3. Aitken J. (1880). On dust, fogs and clouds. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, 30, 337-368.
4. Alastuey A. (1994). Caracterización mineralógica y alterológica de morteros de revestimiento en edificios de Barcelona. Tesis Doctoral. Facultad de Geología, Universitat de Barcelona.
5. Alastuey, A., Querol, X., Chaves, A., Ruiz, C.R., Carratalá, A. y López-Soler, A. (1999). Bula deposition in a rural area located around a large coal-fired power station, Northeast Spain, *Environmental pollution*, 106 (3), 359-367.
6. Alfaro, S.C., Gaudichet ,A., Gomes, L. y Maillé, M. (1998). Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies. *Geophysical Research Letters* 25, 991-994.
7. Allen, G., Sioutas, G., Koutrakis, C., Reiss, P., Lurmann, R., Roberts, F.W., Burton, R.M. (1997). Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47, 682-689.
8. Alonso-Pérez, S., Pey, J., Cuevas, E., Querol, X., Alastuey, A., Romero, P.M., Cristóbal, A. Sistema de información sobre intrusiones de masas de aire africano en España. Libro de actas del IX Congreso de Ingeniería Ambiental PROMA 2004. Bilbao, 9 al 11 de Noviembre de 2004. pp.621-629.
9. Alonso-Pérez, S., Cuevas, E., Querol, X., Viana, M., Guerra, J.C. (2007). Impact of the Saharan dust outbreaks on the ambient levels of total suspended particles (TSP) in the Marine Boundary Layer (MBL) of the Subtropical Eastern North Atlantic Ocean. *Atmospheric Environment* (en imprenta).

10. Amato, T.E., Heidinger, A.K., Knippertz, P. (2006). Analysis of winter dust activity off the coast of West Africa using a new 24-year over-water advanced very high resolution radiometer satellite dust climatology. *J. Geophys. Res.*, 11, D12210, doi:10.1029/2005JD006336.
11. Andreae, M.O. (1995). Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. En: Henderson-Sellers, A. (ed.). *World survey of climatology*, vol 16. Future climates of the world. Elsevier. Amsterdam. Pp. 341-392.
12. Andreae, M.O. (1996). Raising dust in the greenhouse. *Nature*, 380, 389-390.
13. Arimoto, R., Duce, R.A., Ray, B.J., W.G.E.Jr., Cullen, J.D. y Merrill J.T. (1995). Trace elements in the atmosphere over the North Atlantic. *Journal of geophysical research*, 100, 1199-1214.
14. Arimoto, R. (2001). Eolian dust and climate: relationships to sources, tropospheric chemistry, transport and deposition. *Earth-Science Reviews* 54, 29-42.
15. Arnalds, O., Cutshall, N.H., Nielsen, G.A. (1989). ^{137}Cs in Montana soils. *Health Physics* 57, 955-958.
16. Ashbaugh, L.L. (1983). A statistical trajectory technique for determining air pollution source regions. *J. Air Pollut. Control. Ass.* 33, 1096-1098.
17. Ávila, A. y Alarcón, M. (1999). Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at rural site in NE Spain. *Atmospheric Environment*, 33, 1663-1677.
18. Ballester, F., Saez, M., Daponte, A., Ordóñez, J.M., Taracido, M., Cambra, K., Arribas, F., Bellido, J.B., Guillén, J.J., Aguinaga, I., Cañada, A., López, E., Iñiguez, Ca., Rodríguez, P., Pérez-Hoyos, S., Berceló, M.A., Ocaña, R., Aránguez, E. (2005). El proyecto MECAS: Protocolo del estudio multicéntrico en España de los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud. *Rev. Esp. Salud Pública*, 2005, 79, nº2, 229-242.
19. Ballester, F., Rodríguez, P., Iñiguez, C., Saez, M., Daponte, A., Galán, I., Taracido, M., Arribas, F., Bellido, J., Ciranda, F.B., Cañada, A., Guillén, J.J., Guillén-Grima, F., López, E., Pérez-Hoyos, S., Lertxundi, A., Toro, S. (2006). Air pollution and cardiovascular admissions association in Spain: results within the MECAS project. *J.Epidemiol. Community Health*, 60 (4), 328-336

20. Barnston, A.G. y Livezey, R.E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea.Rev.*, 115, 1083-1126.
21. Bascom R., Bromberg P.A., Costa D.A., Devlin R., Dockery D.W., Frampton M.W., Lambert W., Samet J.M., Speizer F.E. y Utell M. (1996). Health effects of outdoor air pollution. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 153, 3-50.
22. Bem, H., Lasota, W., Kusmierek, E., Witusik, M. (1990). Accumulation of ^{137}Cs by mushrooms from Rogozno area of Poland over the period 1984–1988. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 145, pp.39-46. doi: 10.1007/BF02328766.
23. Bergametti, G., Gomes, L., Coudé-Gaussen, G., Rognon, P. Y Coustumer, M.N.L. (1989a). African dust observed over Canary Islands: source regions identification and transport pattern for some summer situation. *Journal of geophysical research*, 94, 14855-14864.
24. Bergametti, G., Dutot, A.L., Buat-Menard, P., Losno, R., y Remoudaki, E. (1989b). Seasonal variability of the elemental composition of atmospheric aerosol particles over the NW Mediterranean. *Tellus*, 41B, 353-361.
25. Brasseur, G.P., Orlando, J.J. y Tyndall, G.S. (1999). *Atmospheric Chemistry and Global Change*. Oxford University Press Inc.
26. Brooks, N. and Legrand, M., 2000. Dust variability over northern Africa and rainfall in the Sahel, in S. J. McLaren and D. Kniveton (eds.) *Linking Climate Change to Land Surface Change*, Kluwer Academic Publishers, 1-25.
27. Brunekreef, B., Janssen, N.A.H., Harssema, H., Knape, M. y Vliet, P.V. (1997) Air Pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways. *Epidemiology* 8,8.
28. Bustos, J.J., Cuevas, E., Marrero, C. y Alonso, S. (1998). Caracterización de las masas de aire en la troposfera libre y en la capa de mezcla en Canarias. *Proceedings de la IX Asamblea de Geodesia y Geofísica*, 9-13, Agudulce (Almería).

29. Caballud, A.M. (2002). Registro del aporte de polvo de origen sahariano y de la productividad oceánica en la Cuenca del Norte de Canarias y en el Mar de Alborán. Respuesta a los últimos 250.000 años de cambio climático. Tesis Doctoral. Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines. Universitat de Barcelona.
30. Caillet, S., Arpagaus, P., Monna, F., Dominik, J. (2001). Factors controlling ⁷Be and ²¹⁰Pb atmospheric deposition as revealed by sampling individual rain events in the region of Geneva, Switzerland. *Journal of Environmental Radioactivity* 53, 241-256.
31. Carlson, T.N. y Prospero, J.M. (1972). The large scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic. *Journal of Applied Meteorology*, 11, 283-297.
32. Castillo S., (2006). Impacto de las masas de aire africano sobre los niveles y composición del material particulado atmosférico en Canarias y en el NE de la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Barcelona. 2006.
33. Chakravarti, L, and Roy. (1967). *Handbook of Methods of Applied Statistics*, Volume I, John Wiley and Sons, pp. 392-394.
34. Chiapello, I., Bergametti, G., Gomes, L. y Chatenet, B. (1995) An additional low layer transport of Sahelian and Saharan dust over the North-Eastern Tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters* 22 (23), 3191-3194.
35. Chiapello, I., and Moulin, C. (2002). TOMS and METEOSAT satellite records of the variability of Saharan dust transport over the Atlantic during the last two decades (1979-1997). *Geophys. Res. Lett.* 29, 17-20, 2002.
36. Chiapello, I., Moulin, C., Prospero, J.M. (2005). Understanding the long-term variability of African dust transport across the Atlantic as recorded in both Barbados surface concentrations and large-scale Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) optical thickness. *J. Geophys. Res.*, 110, D18S10, doi:10.1029/2004JD005132.
37. Chun, Y., Boo, K.O., Kim, J., Park, S.U. y Lee, M. (2001), Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *Journal of Geophysical Research*, 106, pp.18461-18469
38. Cogbill, P.M. y Likens, G.E. (1974). Acid precipitation in the northeastern United States. *Water resources research*, 10, 1133-1137.

39. Consejo Económico y Social de Canarias. (1999). Informe anual sobre la situación económica, social y laboral de Canarias en 1998. http://www.cescanarias.org/publicaciones/informes/infor_1998.html
40. Cressie, N. A. C. (1991). *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
41. Criado, C. y Dorta, P. (2003). An unusual blood rain over canary islands (Spain). The storm of January 1999. *Journal of Arid Environments*, 55, págs. 765-783.
42. Crutzen, P.J. y Andreae, M.O. (1990). Biomasa burning in the tropics. Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 250 (4988), 1669-1678.
43. Cuevas, E. (1995). Estudio del comportamiento del ozono troposférico en el observatorio de Izaña y su relación con la dinámica atmosférica. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid.
44. Cuevas, E., Basart, S., Bustos, J., Alonso-Pérez, S., Rodríguez, S., Marrero, C., Manso, M., Martínez, M.A., Velázquez, M., Palomares, M., Baldasano, J.M., Pérez, C., Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., Querol, X., Pey, J., Barrie, L., Nickovic, S. (2007). WMO Sand and Dust Storm Warning System (SDS-WS) for Europe, Africa and Middle East: a GEO-oriented System. International Conference on "Secure and Sustainable Living: Social and Economic Benefits of Weather, Climate and Water Services". Madrid, 19-22 Marzo 2007.
45. d'Almeida, G.A. (1986). A model for Saharan Dust Transport. *Appl. Meteorol.* 25(7). 903-916.
46. Darwin, Ch. (1846). An account of the fine dust with often falls on vessels in the Atlantic Ocean.. *Quartely Journal of the Geological Society of London*, pt. 1,2, 26-30.
47. DeMott, P.J., Sassen, K., Poellot, M.R., Baumgardner, D., Rogers, D.C., Brooks, S.D., Prenni, A.J. y Kreidenweis, S.M.. (2003) African dust aerosols as atmospheric ice nuclei. *Geophysical Research Letters*, 30, N° 14, 1732.
48. Del Hoyo, J., Fernández, A., Mestre, A., Peral, C. (2000). Sistema de predicción analógica de la precipitación del INM (PAP-INM). Nota técnica número 1 del Servicio de Aplicaciones Meteorológicas.

49. Díaz, A.M. (2006). Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna. 2006.
50. Diouri, M., Franke, H., Jaenicke, R., Kandler, K., Külzer, S., Matthias-Maser, S., Maser, R., and Schütz, L. (1998). Size distributions of Aerosols over NE Morocco and Particulate Matter in Wet Deposition over Central Europe. *J. Aerosol Sci.* (1998) 29, S197-S198.
51. Dockery D.W., Pope C.A., Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M., Ferris B.G. y Speizer F.E. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *New England Journal of Medicine* 329, 753-1759.
52. Dockery, D.W. y Pope, A. (1996). Epidemiology of acute health effects: Summary of time-series studies. *Particles in our air: concentration and health effects* (ed. Spengler J.D. Wilson R.), pp. 123-147. Harvard University Press.
53. Dockery, D.W. (2001). Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution. *Environmental health perspectives*, 109 (4), 483-486.
54. Dorta, P. (1999). Las invasiones de aire sahariano en Canarias. Consejería de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de Canarias y Caja Rural de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife.
55. Dorta, P. et al. (2003). Selección de tipos de tiempo en Canarias. Un ejemplo: las invasiones de aire sahariano. 1er Encuentro sobre Meteorología y Atmósfera de Canarias, Ministerio de Medio Ambiente, Santa Cruz de Tenerife, págs. 77-79.
56. Dorta, P., Gelado, M.D., Hernández, J.J., Cardona, P., Collado, C., Mendoza, S., Rodríguez, M.J., Siruela, V., Torres, M.E. (2005). Frecuencia, estacionalidad y tendencias de las advecciones de aire sahariano en Canarias (1976-2003). *Investigaciones Geográficas*, nº38 (2005), pp. 23-45. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante.
57. Draxler R.R., Rolph G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

58. Dubief, J. (1977). Review of the North African Climate with Particular Emphasis on the Production of Eolian Dust in the Sahel Zone and in the Sahara. En *Saharan Dust*, SCOPE 14 (ed. C. Morales), pp.27-48. John Wiley & Sons.
59. Duce, R.A. (1995) Sources, distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. En: *Aerosol forcing of climate* (ed. Charlson R.J. y Heintzenberg J.), pp. 43-72. John Wiley & Sons.
60. Eastern, R.C. y Peter L.K. (1994) Binary homogeneous nucleation: temperature and relative humidity fluctuations, nonlinearity and aspects of new particles production in the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 775-784.
61. EC (2004). Second position paper on particulate matter, European Commission.
62. Ehrenberg C.G. (1862). Erläuterungen eines neuen wirklichen Passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeere vom 29 Okt. 1861. *Monatsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss., Berlin*, 202-224.
63. EMPA, 1999. Vergleich von TSP-, PM10- und PM2.5 Schwebstaubmessungen im NABEL 1997 und 1998. EMPA 168'107, Dübendorf.
64. EPA(1996). *Air Quality Criteria for Particulate Matter*. EPA. Vol.1.
65. Escudero, M., Castillo, S., Querol, X., Ávila, A., Alarcón, M., Viana, M.M., Alastuey, A., Cuevas, E., Rodríguez, S. (2005). Wet and dry African dust episodes over Eastern Spain, *Journal of geophysical research*, 110 (D18S08), 10.1029.
66. Escudero, M., Querol, X., Pey, J., Alastuey, A., Pérez, N., Ferreira, F., Alonso, S., Rodríguez, S., Cuevas. E. (2007). A methodology for the quantification of the net African dust load in air quality monitoring networks. *Atmospheric Environment*, 41, pp. 5516 – 5524.
67. Falke, S.R., Husar, R.B., y Schichtel, B.A. (2001) Fusion of SeaWiFS and TOMS Satellite Data with Surface Observations and Topographic Data during Extreme Aerosol Events. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1579, vol. 51 Noviembre 2001.
68. Falkowski, P. G., Barber, R.T., y Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on primary production, *Science*, 281, 200–206.

69. Fernández-Navarro, L. (1921). A propósito de una caída de polvo en Canarias. Real Sociedad Española de Historia Natural. Tomo del 50º aniv., 436-445.
70. Font, I. (1956). El tiempo atmosférico en las islas Canarias. Ed. Servicio Nacional de Meteorología. Pp 96.
71. Fung, I., Meyn, S., Tegen, I., Doney, S.C., John, J. Y Bishop, J.K.B. (2000). Iron supply and demand in the upper ocean. *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 281-296.
72. Gaffney, J.S., Marley, N.A., Cunningham, M.M., Martello, D.V., Anderson, N.J. (2002). Using natural ²¹⁰Pb and its daughters (²¹⁰Bi and ²¹⁰Po) to estimate aerosol residence times. Proceedings de la NETL Conference "PM2.5 and electric power generation: recent findings and implications", Abril 9-10, 2002, Pittsburg, PA.
73. Gehrig R., Hofer P., 2000. Parallel measurements of PM10 and total suspended particles (TSP) - Estimation of PM10-characteristics from TSP data, *Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft* 60(10), 389-394.
74. Gelado-Caballero M.D., Torres-Padrón M.E., Hernández-Brito J.J., Herrera-Melián J.A., Pérez-Pena J. (1996). Aluminium distributions in Central East Atlantic waters (Canary Islands). *Marine Chemistry*, January 1996, vol. 51, no. 4, pp. 359-372(14).
75. Ginoux, P., Prospero, J.M., Torres, O., Chin, M. (2004). Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation. *Environm. Modelling & Software*, 19: 113-128.
76. Gloster, J., Sellers, R.F., Donaldson, A.I. (1982). Long distance transport of foot-and-mouth disease virus over the sea. *The Veterinary Record* 110(Jan. 16):47.
77. González-Ramos, A., Martel., A., Codd, G.A., Soler, E., Coca, J., Redondo, A., Morrison, L.F., Metcalf, J.S., Ojeda, A., Suárez, S., Petit, M. (2005). Bloom of the marine diazotrophic cyanobacterium *Trichodesmium erythraeum* in the Northwest African Upwelling. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 301, 303-305.
78. Goudie, A.S., y Middleton, N.J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth science reviews*, 56, 179-204.
79. Goudie, A.S. y Middleton, N.J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer-Verlag Berlin & Heidelberg.

80. Graham, W.F. y Duce, R.A. (1979). Atmospheric pathways of the phosphorus cycle. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1195–1208.
81. Grayson, R.B., Argent, R.M., Nathan, R.J., McMahon, T.A., Mein, R. (1996). *Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology*. Cooperative Research Center for Catchment Hydrology, Australia, 125 pp.
82. Greeley, R. e Iverson, J.D. (1985). *Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge University Press, 333 pp.
83. Griffin, D.W., Garrison, V.H., Herman, J.R. y Shinn, E.A. (2001). African desert dust in the Caribbean atmosphere: microbiology and public health. *Aerobiologia*, 17, 203-213.
84. Griffin, D.W., Kellogg, C.A., Garrison, V.H., Shinn, E.A. (2002). The global transport of dust. *American Scientist*, 90, 228-235
85. Gutiérrez, J.M., Cano, R., Cofiño, A.S. y Sordo, C.M. (2004) *Redes Probabilísticas y Neuronales en las Ciencias Atmosféricas* .Serie Monografías, Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente.
86. Hannachi, A. (2004). *A Primer for EOF Analysis of Climate Data*. Departament of Meteorology, University of Reading. <http://www.met.rdg.ac.uk/~han/Monitor/eofprimer.pdf>
87. Helgren, D.M. y Prospero, J.M. (1987.) Wind Velocities Associated with Dust Deflation Events in the Western Sahara. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 26, Issue 9, pp.1147-1151.
88. Henriksson, A.S., Sarnthein, M., Eglinton, G. y Poynter, J. (2000). Dimethylsulfide production variations over the past 200 ky in the equatorial Atlantic: A first estimate. *Geology*, 28, 499–502.
89. Herman, J.R., Bhartia, P.K, Torres, O., Hsu, O., Seftor, C. y Celarier, E. (1997). Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysical Research*, 102, 16911-16922.
90. Hernández, F., Alonso-Pérez, S., Hernández-Armas, J. y Cuevas, E. (2005a). Influence of major African dust intrusions on the ^{137}Cs and ^{40}K activities in the lower atmosphere at the Island of Tenerife. *Atmospherical Environment*, 39, 4111-4118

91. Hernández, F., Hernández-Armas, J., Catalán, A., Fernández-Aldecoa, J.C., Karlsson, L. (2005b). Gross alpha, gross beta activities and gamma emitting radionuclides composition of airborne particulate samples in an oceanic island. *Atmospheric Environment* 39, 4057-4066.
92. Hernández, F., Karlsson, L., Hernández-Armas, J., Alonso-Pérez, S., Rodríguez, S., Cuevas, E., Fernández-Aldecoa, J.C., Catalán-Acosta, A. (2006). Influencia de la resuspensión y transporte de aerosoles de origen continental en las concentraciones del trazador atmosférico ^7Be . Libro de actas del IX Congreso de Ingeniería Ambiental PROMA 2006. ISBN 84-611-3374-9.
93. Horvath, H. (1992). Effects on visibility, wheather and climate. En *Atmospheric Acidity. Sources, Consequences and Abatement* (ed. M. Radojevic and R.M.Harrison), pp.435-466. Elsevier Appliet Science.
94. Houghton, J.T., et al., Eds. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis* (Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge Univ. Press, New York.
95. Huang, J., Higuchi, K., Shabbar, A. (1998). The relationship between the North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett*, 25, 2707-2710.
96. Husar, R.B., Prospero, J.M., Stowe, L.L. (1997). Characterization of Tropospheric Aerosols over the Oceans with the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer Optical Thickness Operational Product. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14), pp.16889-16909.
97. Hydi, G.M. (1994). *Atmospheric sulphur and nitrogen oxides*. Academic Press Limited.
98. IAEA (International Atomic Energy Agency) (2000). *IAEA Annual Report for 2000*.
99. Ioannidou, A., Papastefanou, C. (2005). Precipitation scavenging of ^7Be and ^{137}Cs radionuclides in air. *Journal of Environmental Radioactivity* 85, 121-136.
100. IPCC (1990). *Firs Assesment Report. Scientific Assessment of Climate change*. Report of Working Group I. Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (eds.). Cambridge University Presss, UK. pp 365

101. IPCC (1995). Climate change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Meira-Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, A. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
102. IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. IPCC. Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Xiaosu, D. (eds.). Cambridge University Press, U.K. pp. 944
103. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat.
104. Jaenicke, R. (1978). Dynamics of atmospheric Aitken particles. *Berichte der bunsen gesellschaft. Physical Chemistry and Chemical Physics*, 82 (11), 1198-1202.
105. Jakob, C. y Tselioudis, G. (2003). Objective identification of cloud regimes in the Tropical Western Pacific. *Geophysical Research Letters*, vol.30, nº21, 2082.
106. Janowiak, J. (1988). An investigation of interannual rainfall variability in Africa. *J. Clim.*, 1, 240-255.
107. Jickells, T.D., An, Z.S., Andersen, K.K., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J.J., Boyd, P.W., Duce, R.A., Hunter, K.A., Kawahata, H., Kubilay, N., laRoche, J., Liss, P.S., Mahowald, N., Prospero, J.M., Ridgwell, A.J., Tegen, I. y Torres, R. (2005). Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, vol.308, 67-71.
108. Kassomenos, P.A, Sindosi, O.A., Lolis, J., y Chaloulakou, A. (2003). On the relation between seasonal synoptic circulation types and spatial air quality characteristics in Athens, Greece. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 53, 309-324.
109. Kaufman Y.J., Koren, I., Remer, L.A., Tanré, D., Ginoux, P. y Fan, S. (2005a). Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean. *JJ. Geophys. Res.*, 110, D10S12, doi:10.1029/2003JD004436
110. Kaufman, Y.J., Koren, I., Remmer, L.A., Rosenfeld, D. y Rudich, Y. (2005b). The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean. *Proceedings of The National Academy of Sciences of the USA*, August 9, 2005, vol.102, nº32, 1207-11212

111. King, S.E., Phillips, G.W., August, R.A., Ritter, J.C., Cutchin, J.H., Haskins, P.S., KcKisson, J.E., Ely, D.W., Weisenberger, A.G., Piercey, R.B., Dybler, T. (1991). Radiation Survey of the LDEF Spacecraft. IEE Transactions on Nuclear Science, vol 38, issue 2, part 1-2, pp. 525-530. doi: 10.1109/23.289354
112. Klement, A.W. (1982). CRC Handboo, of Enrironmental Radiation. Allen Brodsky (Ed.). CRC series in radiation measurement and protection. CRC Press Inc. ISBN 0-8493-3761-5.
113. Kundzewicz, Z.W. & Robson, A. (Editors) (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program – Water WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO/TD 1013, Geneva, 157 pp.
114. Künzli N., Kaier, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Jr F.H., Puybonnieux-Texier, V., Quénel, P., Schneider, J., Seethaler, R., Vergnaud, J.C. y Sommer H. (2000). Publick health impact of outdoor and traffic related air pollution: a European assessment. The Lancet 356, 795-801.
115. Lee, H.J., Hopke, P.K., Holsen, T.M., Lee, D.W., Jaques, P.A., Sioutas, C., Ambs, J.L. (2005). Performance evaluation of continuous PM_{2.5} mass concentration monitors. Aerosol Science, 36(2005), 95-109.
116. Leea, L.Y.L., Kwokb, R.C.W., Cheunga, Y.P., Yu, K.N. (2004). Analyses of airborne ⁷Be concentrations in Hong Kong using back-trajectories. Atmospheric Environment 38, 7033-7040.
117. Legates, D.R. & Wilmott, C.J. (1990). Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation. International Journal of Climatology, vol. 10, n°2, pp- 111-127.
118. Legrand, M., N'Doume, C. & Jankowiak, I. 1994. Satellite-derived climatology of the Saharan aerosol, Passive Infrared remote sensing of clouds and the atmosphere II, D. K. Lynch (ed.), Proc. SPIE 2309, 127-135.
119. Levin, Z., Ganor, E. y Gladstein, V. (1996). The effects of desert particles coated with sulphate on rain formation in the Eastern Mediterranean. Journal of applied meteorology, 35, 1511-1523.
120. Levine, J.S. (1990). Atmospheric trace gases-burning trees and bridges. Nature, 346 (6284), 511-512.

121. Liao, H., Seinfeld, J.H., Adams, P.J., Mickley, L.J. (2004). Global radiative forcing of coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model. *Geoph. Res.*, vol. 19, D16207. doi:10.1029
122. Likens, G.E. y Bormann, F.H. (1974). Acid rain: a serious regional environmental problem. *Science*, 184, 1176-1179.
123. Lippman, M.(1999). The 1997 US EPA standards for particulate matter and ozone, in *Air pollution and health* (ed. R.E. Hester y R.M. Harrison), pp. 75-99, Royal Society of Chemistry, 1999.
124. Liu, T. S., et al.. (1985). *Loess and the Environment*, 251 pp., Beijing, China Ocean Press, China.
125. Livens, F.R., Harrill, A.D., Singleton, D.L. (1991). Distribution of radiocaesium in the soil-plant systems of upland areas of Europe. *Health Physics* 60, 539-545.
126. Lorenz, E.N. (1969). Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occuring Analogues. *J. Atmos. Sci.*, 26, 636-646.
127. Losno, R., Bergametti, G., Carlier, P. y Mouvier, G. (1991). Major ions in marine rainwater with attention to sources of alkaline and acidic species. *Atmospheric Environment*, 25A, 763-770.
128. Löye-Pilot, M.D., Martin, J.M. y Morelli, J. (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and the atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, 321, 427-428.
129. Luo, C., Mahowald, N.M., Del Corral, J. (2003). Sensitivity study of meteorological parameters on mineral aerosol mobilization, transport and distribution. *Geophys. Res. Lett.* 108 (D15), 4447. doi:10.1029/2003JD003483.
130. Mahjoubi, H., Labidi, S., Mtimet, S., Essafi, F., Ben Cheikh, F. (2006). Survey of natural and artificial radioactivity in Tunisian soils. *Int. J. Low Radiation*, Vol. 2, Nos. 1/2, pp.60–70.
131. Mahowald, N.M, Kohfeld, K., Hansson, M., Balkanski, Y., Harrison, S.P., Prentice, I.C., Schulz, M., Rodhe, H. (1999). Dust sources and deposition during the last glacial maximum and current climate. A comparasion of model results with paleodata from ice cores and marine sediments. *Geophys. Res.* 104 (D13): 15895-15916.

132. Mahowald, N.M. y Chao, L. (2003). A less dusty future? *Geophys. Res. Lett.*, 30(17), 1903, doi:10.1029/2003GL017880, 2003.
133. Mahowald, N.M., Chao, L., del Corral, J. y Zender, C.S. (2003). Interannual variability in atmospheric mineral aerosols from a 22-year model simulation and observational data. *J. Geophys. Res.*, 108(D12), 4352, doi:10.1029/2002JD002821, 2003.
134. Manly, B.F.J. (2001). *Statistics for environmental science and management*. Chapman & Hall/CRC Eds. ISBN: 1-58488-029-5.
135. Marchand, G., Lavoie, J. y Lazure, L. (1995). Evaluation of bioaerosols in a municipal solid-waste recycling and composting plant. *Journal of the air & waste management association*, 45(10), 778-781.
136. Marrero, C. y Bustos, J.J. (2003). Adaptación para Canarias de un Modelo de Predicción Estadística de la Precipitación mediante un Método de Análogos. 1er encuentro sobre meteorología y atmósfera de Canarias. Ministerio de Medio Ambiente, Santa Cruz de Tenerife.
137. Mårtensson, E.M., Nilsson, E.D., Leeuw, G.D., Cohen, L.H. y Hansson, H.C. (2002). Laboratory simulations and parametrization of the primary marine aerosol production. *Journal of Geophysical Research*, accepted for publication.
138. Martin, D.E. (1972). Climatic Presentations for Short-Range Forecasting Based on Event Occurrence and Reoccurrence Profiles. *J. Appl. Meteor.*, 11, 1212-1223.
139. McGovern, F.M., Raes, F., Van Dingenen, R., Maring, H. (1999). Anthropogenic influences on the chemical and physical properties of aerosols in the Atlantic subtropical region during July 1994 and July 1995. *J. Geophys. Res.*, 104, D12, 14309-14320.
140. McGovern, F.M., Nunes, M.J., Raes, F., Gonzales-Jorge, H. (2002). Marine and anthropogenic aerosols at Punta Del Hidalgo, Tenerife, and the aerosol nitrate number paradox. *J. Geophys. Res.*, 107 (D24), 4766. Doi: 10.1029/2001JD000827.
141. Merrill, J.T. (1994). Isentropic airflow probability analysis. *J. Geophys. Res.*, 99, D12, 25881-25889.
142. Mészáros. E. (1999). *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado.

143. Michaels, A.F., Olson, D., Sarmiento, J.L., Ammerman, J.W., Fanning, K., Jahnke, R., Knap, A.H., Lipschultz, F. y Prospero, J.M. (1996). Inputs, losses and transformations of nitrogen and phosphorus in the pelagic North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*, 35, 181-226.
144. Middleton N. J., Goudie A.S., 2001. Saharan Dust: sources and trajectories. *Transactions of the Institute of British Geographers* 26, 161-181.
145. Miller, R.L., Tegen, I., Perlwitz, J. (2004). Surface radiative forcing by soil dust aerosols and the hydrologic cycle. *Geophys. Res.* 109 (D4). doi: 10.1029/2003JD04085
146. Molesworth, A., Cuevas, E., Morse, A.P., Herman, J.R., Thomson, M.C. (2002). Dust clouds and spread of infection. *Lancet*. 2002;359:81-82.
147. Moulin C. y Chiapello, I. (2004). Evidence of the control of summer atmospheric transport of African dust over the Atlantic by Sahel sources from TOMS satellites (1979–2000). *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L02107.
148. Moulin, C., Lambert, C.E., Dulac, F. y Dayan, U. (1997). Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 387, 691–694.
149. Nemmar, A., Hoylaerts, M.F., Hoet, P.H.M., Dinsdale, D., Smith, T., Xu, H., Vermeylen, J. y Nemery, B. (2002). Ultrafine particles affect experimental thrombosis in an in vivo hamster model. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 166, 998-1004
150. Neuer, S., Torres-Padrón, M.E., Gelado-Caballero, M.D., Rueda, M.J., Hernández-Brito, J., Davenport, R. y Wefer, G. (2004). Dust deposition pulses to the eastern subtropical North Atlantic gyre: Does ocean's biogeochemistry respond?. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 18.
151. Nicholson, S.E., Tucker, C.J. y Ba, M.B. (1998). Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel. *Bulletin of American Meteorological Society*, 79, N°5, 815-829.
152. Nickovich, S., Kallos, G., Papadopoulos, A., Kakaliagou, O. (2001). A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, nº D16, 18113-18129.

153. Olson, J.S., J.A. Watts, and L.J. Allison. (1983). Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems, Report ORNL5862, Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
154. Olson, J.S., J.A. Watts, and L.J. Allison. (1985). Major World Ecosystem Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database NDP017, Carbon Dioxide Information Center, Oak Ridge Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
155. Ozer, P. (2001). Les lithometeores en région sahelienne. *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales*. vol. 24, Belgique.
156. Papastefanou, C., Manolopoulou, M., Stoulos, S., Ioannidou, A., Gerasopoulos, E. (2005). Cesium 137 in grass from Chernobyl fallout. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 83, issue 2, pp. 253-257.
157. Pedgley, D.E. (1986). Long Distance Transport of Spores. New York: Macmillan Publishing Company.
158. Peterson, J.T. y Junge, C.E. (1971). Source Particulate matter in the atmosphere. En: Matthews, W., Kellog, W., Robinson, G.D. (eds). *Man's impact on climate*. MIT Press, Bosto, 99. 310-320.
159. Pope, C.A., Dockery ,D.W., Kanner, R.E., Villegas, G.M. y Schwartz, J. (1999). Daily changes in oxygen saturation and pulse rate associated with particulate air pollution and barometric pressure. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 159, 365-372
160. Pope, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K. y Thurston, G.D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution, *JAMA*, 287, 1132-1141
161. Pósfai, M. y Molnár, A. (2000). Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction. *Environmental Mineralogy*. David J. Vaughan & Roy Al. Wogelius. Pp. 343
162. Preisendorfer, R.W. y Mobley, C.D. (1988). *Principal Component analysis in Meteorology and Oceanography*. Elsevier
163. Prospero, J.M., Bonatti, E., Schubert, C. Y Carlson, T.N. (1970). Dust in the Caribbean atmosphere traced to and african dust storm. *Earth and Planetary Science Letters*, 9, 287-293.

164. Prospero, J.M. y Carlson, T.N. (1972). Vertical and real distribution of Saharan dust over the western equatorial North Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 77, 5255-5265.
165. Prospero, J.M. y Nees, R. (1986). Impact of the North African drought and El Niño on mineral dust in the Barbados trade winds. *Nature*, 320, 735-738.
166. Prospero, J.M. (1999a). Long range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the south-eastern United States. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 96, 3396-3403.
167. Prospero, J.M. (1999b). Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: implications for regional air quality. *J Geophys Res Atmos.*, 104:15917 –15927.
168. Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E. y Gill, T.E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of geophysics*, 40 (1), 2-1:2-31.
169. Prospero, J.M. y Lamb, P.J. (2003). African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications. *Science* 302: 1024-1027.
170. Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massagué, G. y Puig, O. (2001) PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan Area, Catalonia, Spain. *Atmospheric Environment* 35 (36), 6407-6419.
171. Raes, F., Van Dingenen, R., Cuevas, E., Van Velthoven, P. F.J. And Prospero, J.M. (1997). Observations of aerosols in the free troposphere and the marine boundary layer of the subtropical Northeast Atlantic: Discussion of the processes determining their size distribution. *J. Geophys. Res.* 102, 21315-21328.
172. Rauf, T. (1995). French Nuclear Testing: A Fool's Errand. *The Non-Proliferation Review*, Fall, Vol. 3 (1), p. 12, (<http://cns.miis.eu/npr/rauf31.html>).
173. Richman, R.B. (1986). Rotation of Principal Components. *J. of Climatology*, Vol. 6, 293-335 (1986)
174. Rípodas, P., Calbet, X., Bustos, J. J. and Cano, D. (2001). Estudio del índice de aerosoles del TOMS para la predicción de las intrusiones de polvo sahariano en las Islas Canarias. V Simposio Nacional de Predicción del INM, Madrid, (proc.).

175. Rodà, F., Bellot, J., Ávila, A., Escarré, A., Piñol, J. y Terradas, J. (1993). Saharan dust and the atmospheric inputs of elements and alkalinity to Mediterranean ecosystems. *Water, air and soil pollution*, 66, 277-288.
176. Rodríguez, S. (1999). Comparación de las variaciones de ozono superficial asociadas a procesos de transporte sobre y bajo la inversión de temperatura subtropical en Tenerife. Tesis de Licenciatura, Universidad de La Laguna.
177. Rodríguez, S., Gerra, J.C. (2001). Monitoring of ozone in a marine environment in Tenerife (Canary Islands). *Atmospheric Environment*, 135, 1829-1841.
178. Rodríguez, S., Querol, X. Alastuey, A., Kallos G. y Kakaliagou O. (2001) Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and E. Spain. *Atmospheric Environment* 35, 2433-2447.
179. Rolph G.D., 2003. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
180. Romero, P.M y Cuevas, E. (2002). Comparación entre el espesor óptico de aerosoles medido en el Observatorio de Izañay el índice de aerosoles determinado por el TOMS. 3ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Valencia, 2002.
181. Sancho, P., J. de la Cruz, A. Díaz, F. Martín, E. Hernández, F. Valero and B. Albarrán (1992). A five-year climatology of back-trajectories from the Izaña Baseline Station, Tenerife, Canary Islands. *Atmos. Environ.*, 26A, 6, 1081-1096.
182. Sassen, K., DeMott, P.J., Prospero, J.M. y Poellot, M.R. (2003). Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds: CRYSTAL-FACE Results, *Geophys. Res. Lett.*, 30(12),1633.
183. Savoie, D.L. y Prospero, J.M. (1980). Water-soluble potassium, calcium, and magnesium in the aerosols over the tropical North Atlantic. *J. GeoPhys. Res.* 85, 385-392.
184. Schneider J. (1999). Exposure of the Austrian Population to PM10 in 1996. Umwelt Bundes Amt (Federal Environment Agency), R-169. Vienna.
185. Schütz, L. (1980). Long range transport of desert dust with special emphasis on the Sahara. *Ann. NY Acad.Sci.* 338: 515-532.

186. Schwartz, J. (1994). What are people dying of on high air pollution days? *Environ. Res.* 64, 26-35.
187. Schwartz, J., Dockery, D.W. and Neas, L.M. (1996). Is daily mortality associated specifically with fine particles?, *Journal of the air & waste management association*, 46, 927-939.
188. Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, Inc., pp 1323.
189. Sheskin, D.J. (2004). *Handbook of parametric and non parametric statistical procedures*. Chapman & Hall/CRC Eds. ISBN: 1-58488-440-1
190. Shinn, E.A., Smith, G.W., Prospero, J.M., Betzer, P., Hayes, M.L., Garrison, V. y Barber, R.T. (2000). African dust and the demise of Caribbean coral reefs. *Geol. Res. Lett.*, 27, N°19,3029–3032.
191. Slinn, W.G.N. (1984). Precipitation scavenging. *Atmospheric Science and Power Production*. D. Randerson (ed.). DOE/TIC-27601, pp.466-532, Tech. Inf. Cent., Off. Of Sci. and Tech. Inf., U.S. Dep. Of Energy, Wahington, D.C.
192. Smit, E., Leeflang, P., Glandorg, B., Elsas, J.D.V. y Wernars, K. (1999). Analysis of fungal diversity in the wheat rhizosphere by sequencing of cloned PCR-amplified genes encoding 18S rRNA and temperature gradient gel electrophoresis. *Appl. Environ. Microb.* 65, 2614–2621.
193. Smith, G.W., Ives, L.D., Nagelkerken, I.A. y Ritchie ,K.B. (1996). Caribbean sea-fan mortalities. *Nature*, 383, 487.
194. Sokilik, I.N. y Toon, O.B. (1996). Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature*, 381, 681-683.
195. Stephens, M. A. (1976). Asymptotic Results for Goodness-of-Fit Statistics with Unknown Parameters, *Annals of Statistics*, Vol. 4, pp. 357-369.
196. Sultan, B., Labadi, J., Guégan, J.F., Janicot, S. (2005). Climate Drives the Meningitis Epidemics Onset in West Africa. *PLoS Med.* 2005 January; 2(1): e6. Doi: 10.1371/journal.pmed.0020006.
197. Tamura, S. (1983). *A study on the Meteorological Research in Joseon*. 399 p. (en japonés).

198. Tegen, I. y Fung, I. (1994). Modelling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport and optical thickness. *Geophys. Res.* 99 (D11): 22897-22914.
199. Tegen, I. y Lacis, A.A. (1996). Modelling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol. *Journal of geophysical research*, 101, 19237-19244.
200. Thomson, M.C., Molesworth, A.M., Djingarey, M.H., Yameogo, K.R., Belanger, F., Cuevas, E. (2006). Potential of environmental models to predict meningitis epidemics in Africa. *Tropical Medicine International Health*, vol. 2, Issue 6, pp. 781-788.
201. Torres, C.J., Cuevas, E., Guerra, J.C. y Carreño, V. (2001). Caracterización de las Masas de Aire en la Región Subtropical. *Proceedings del V Simposio Nacional de Predicción*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 20-23 Noviembre, 2001.
202. Torres, O., Bhartia, P.K., Herman, J.R., Ahmad, Z. y Gleason, J. (1998). Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis. *Journal of geophysical research*, 103, 17099-17110.
203. Torres, O., Bhartia, P.K., Herman, J.R., Sinyuk, A., Ginoux, P. y Holben, B. (2002). A long-term record of aerosol optical depth from TOMS observations and comparison to AERONET measurements. *Journal of atmospheric science*, 59, 389-413.
204. Torres-Padrón, M.E., Gelado-Caballero, M.D., Collado-Sánchez, C., Siruela-Matos, V.F., Cardona-Castellano, P.J. y Hernández-Brito, J.J. (2002). Variability of dust inputs to the CANIGO zone. *Deep-Sea Research II*, 49, 3455-3464.
205. Trenberth, K.E. (1990). Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 71, 988-993.
206. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (1988). Report to the General Assembly: "Sources, effects and risks of ionizing radiation". United Nations Publication, ISBN 92-1-142143-8.
207. Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Cuevas, E. y Rodríguez, S. (2002). Influence of African dust on the levels of atmospheric particulates in the Canary Islands air quality network. *Atmospheric Environment*, 36, 5861-5875.

208. Viana, M. (2003) Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis Doctoral. Consejo Superior de Investigaciones Científicas/Universitat de Barcelona.
209. Wada, Y. (1917). Dust phenomenon in Korea. Reports on the historical recording of Joseon, Joseon Chongdokbu, 106-143 (en japonés)
210. Warneck, P. (1998). Chemistry of the natural atmosphere. International Geophysics Series. Wiley & Sons. Vol. 41. Academy Press, pp. 757.
211. Weir, J.R., Garrison, V., Shinn, E. y Smith, G.W. (2000). The relationship between gorgonian coral (Cnidaria: Gorgonacia) diseases and African dust storms. In: D. Hopley, P.M. Hopley, J. Tamelander and T. Done (eds), 9th International Coral Reef Symposium. Bali, Indonesia, p. 78.
212. WHO (2002). Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. WHO. Dietrich Schwela, Lidia Morawska, QUT, Dimitrios Kotzias, EC JRC. Published on behalf of the European Commission.
213. WHO Regional Office For Europe, 2002. (2002). Health impact assessment of air pollution in the eight major Italian cities. World Health Organization Regional Office For Europe.
214. WHO. (2003) Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World Health Organization, Bonn, Germany.
215. WMO/GAW (2004). 1st International expert meeting on sources and measurements of natural radionuclides applied to climate and air quality studies. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch. Report nº155, April 2004. WMO TD Nº 1201.
216. Woodward, S., Roberts, D.L. y Betts, R.A. (2005). A simulation of the effect of climate change-induced desertification on mineral dust aerosol. Geophys. Res. Lett., 32, L18810, doi: 10.1029/2005GL023482
217. Worsley, K.J. (1979). On the Likelihood Ratio Test for a Shift in Location of Normal Populations. Journal of the American Statistical Association, vol. 74, nº 366, pp. 365-367. Doi: 10.2307/2286336

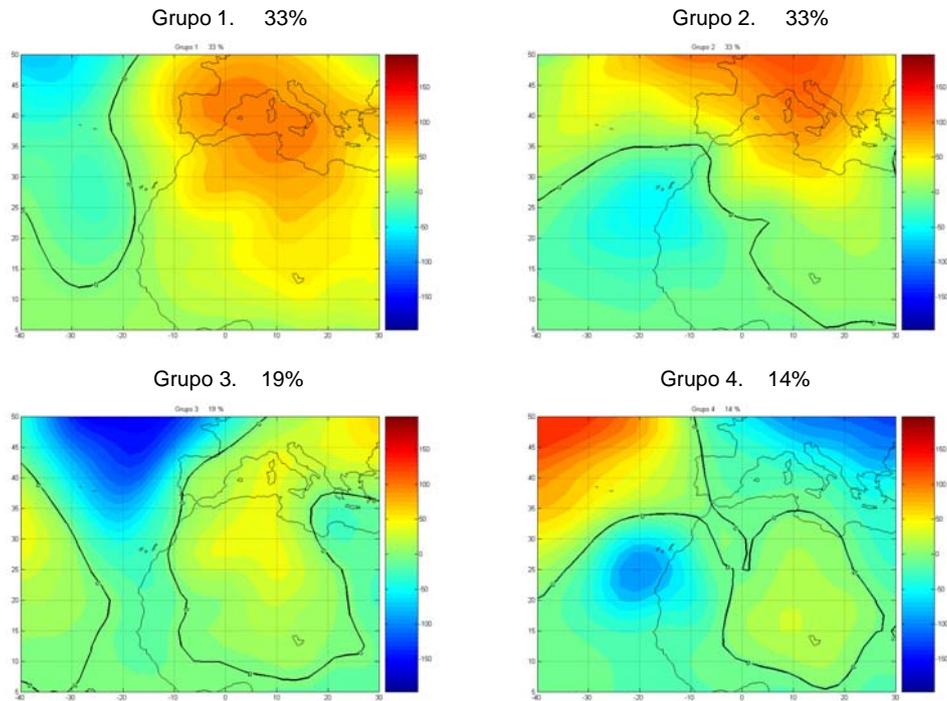
218. Würzler, S., Reisin, T.G. y Levin, Z. (2000). Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions. *Journal of Geophysical Research* 105, 4501-4512.
219. Zender, C.S., Newman, D., Torres, O. (2003). Spatial heterogeneity in aeolian erodibility: Uniform, topographic, geomorphic and hydrologic hypotheses. *Geophys. Res.* 108 (D17), 4543.
220. Zhang, D.E. (1984). Synoptic climate studies of dust fall in China since historic time, *Sci. Sin. Ser. B* 27, 825–836.

ANEXO A

Mapas de componentes principales y grupos K-medias

Mes = Enero Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

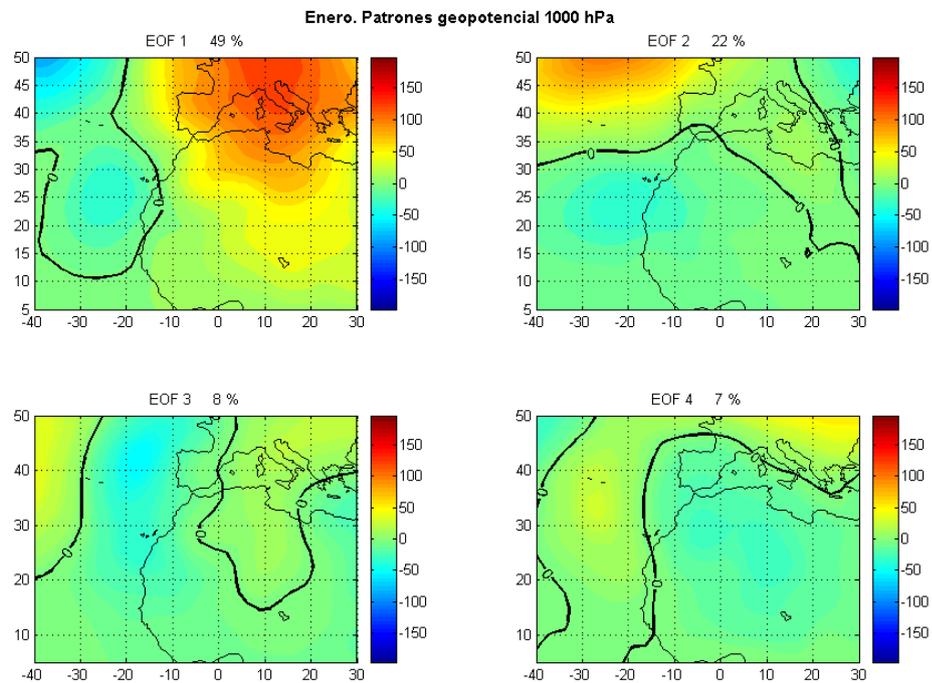
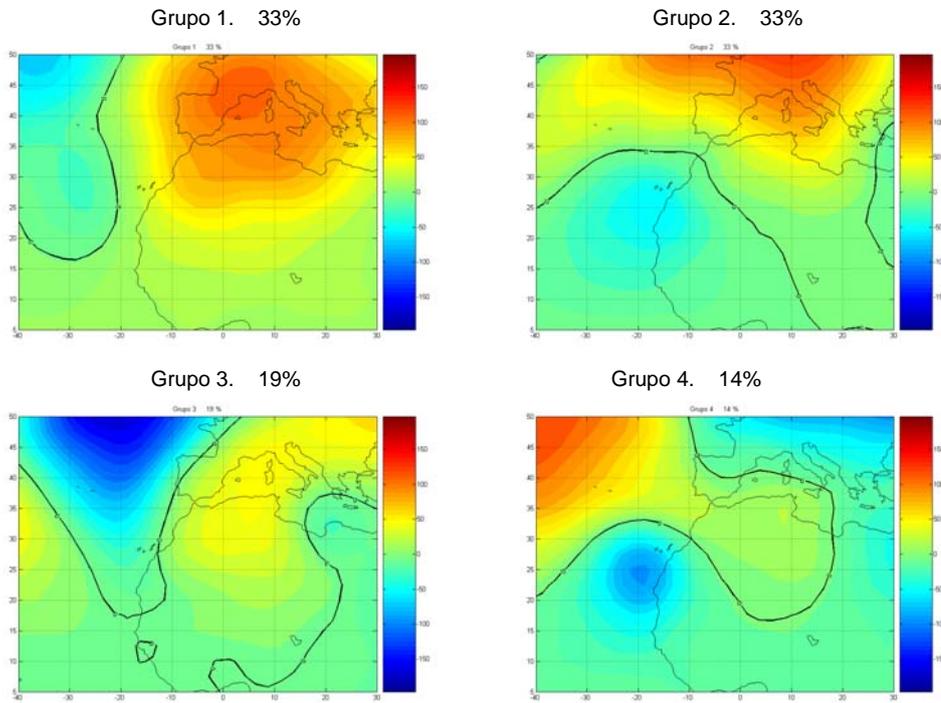


Figura A.1. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Enero. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Enero Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

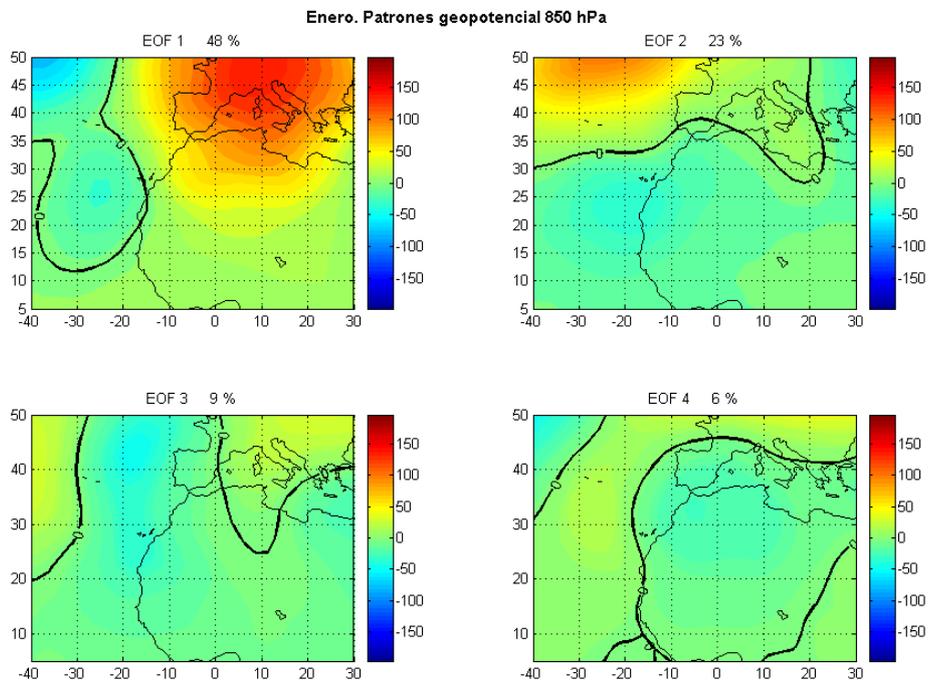
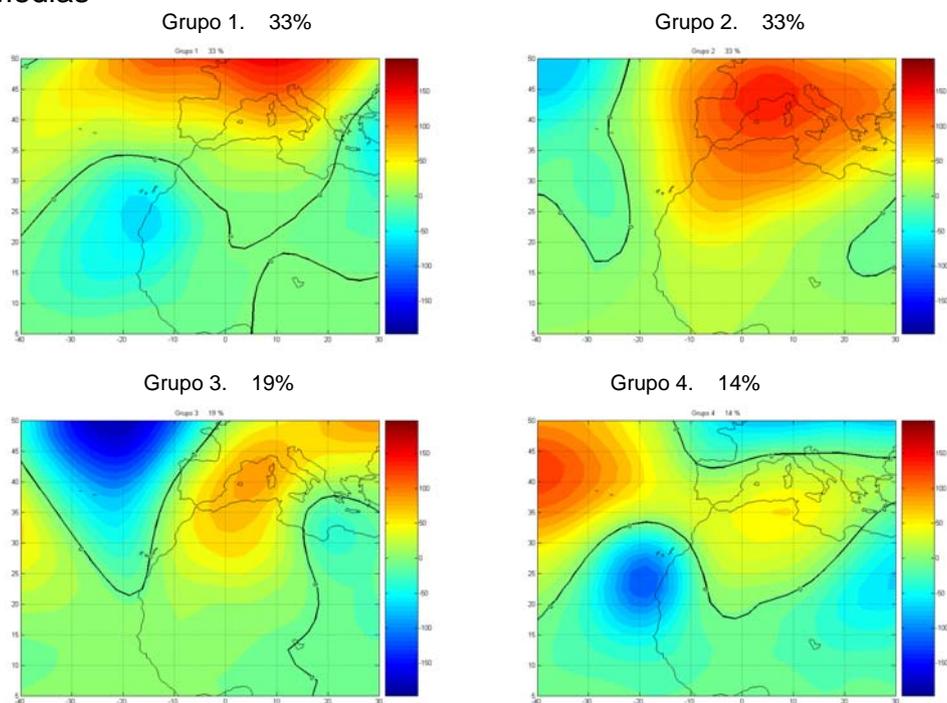


Figura A.2. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Enero. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Enero Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

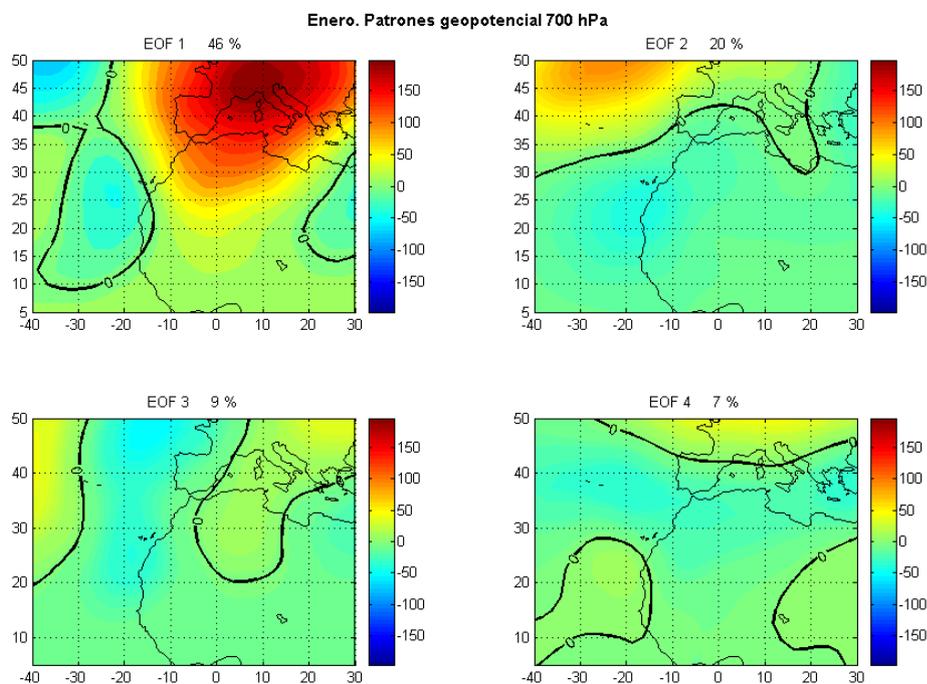
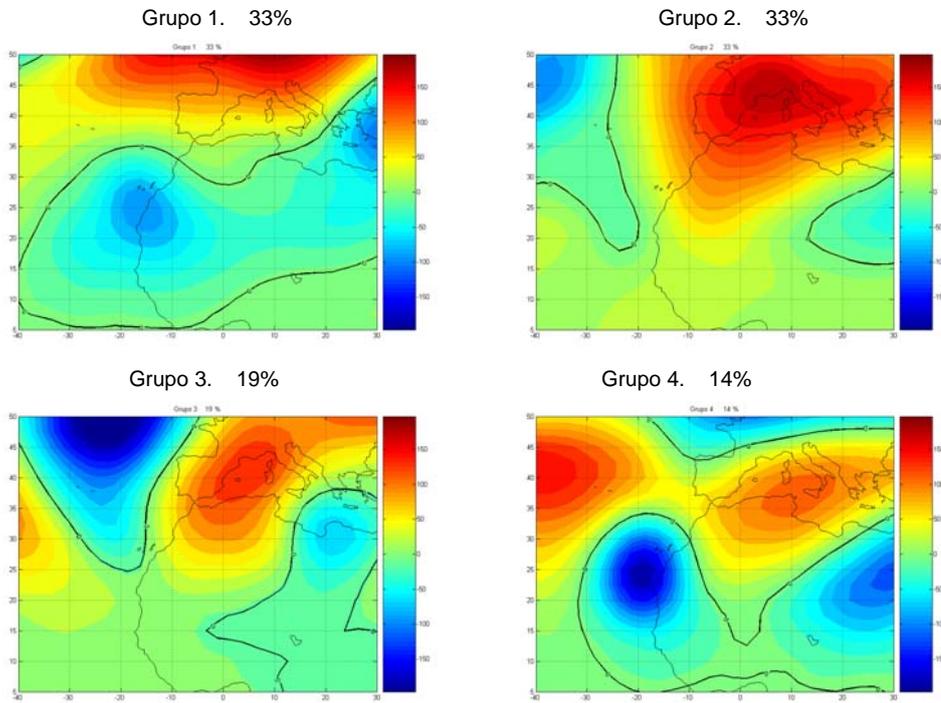


Figura A.3. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Enero. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Enero Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

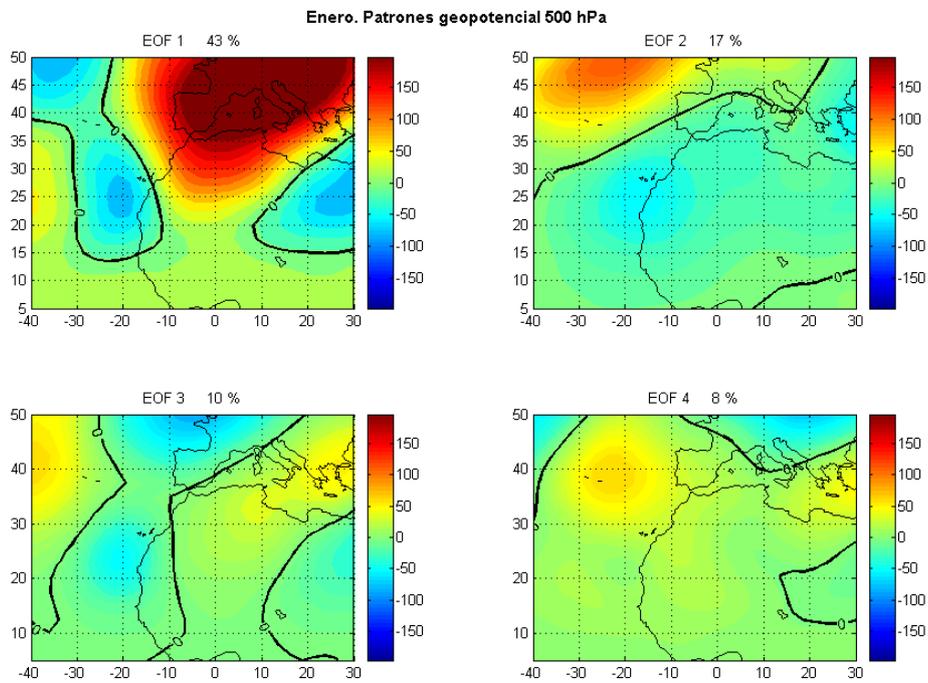
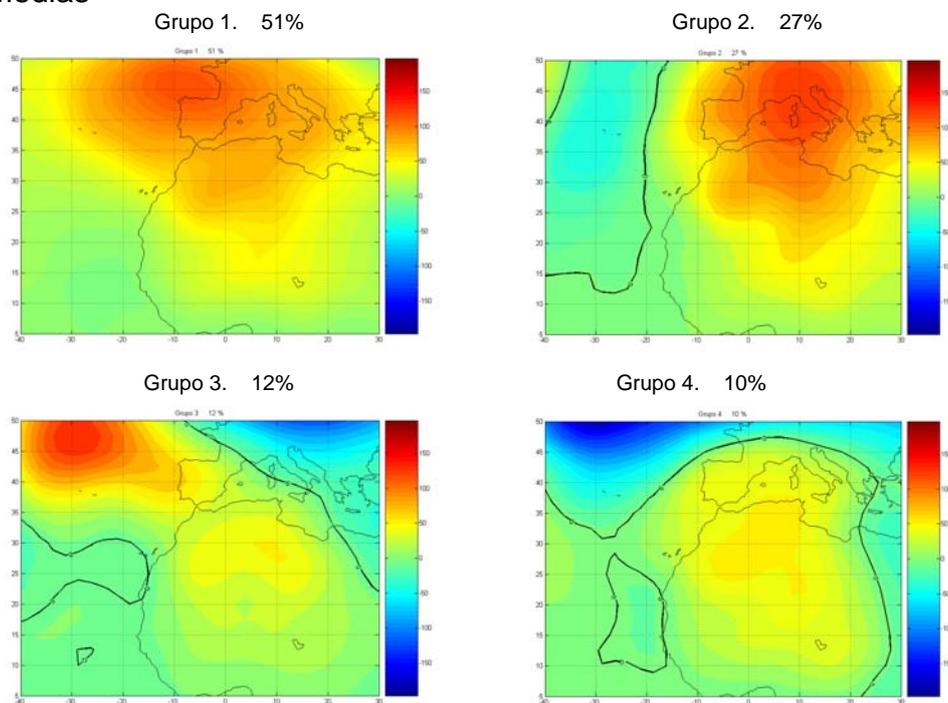


Figura A.4. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Enero. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Febrero Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

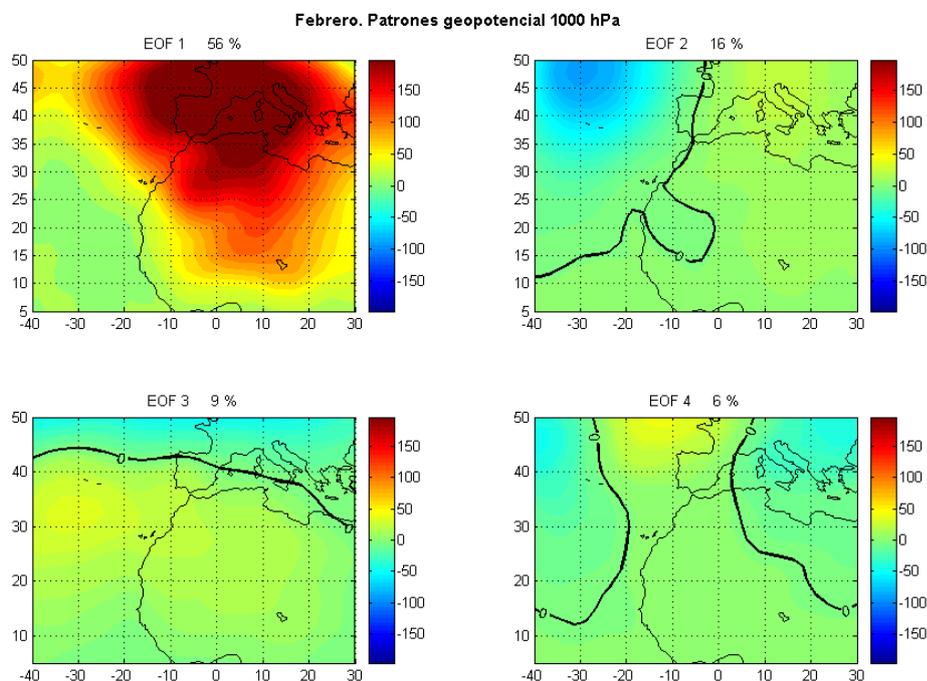
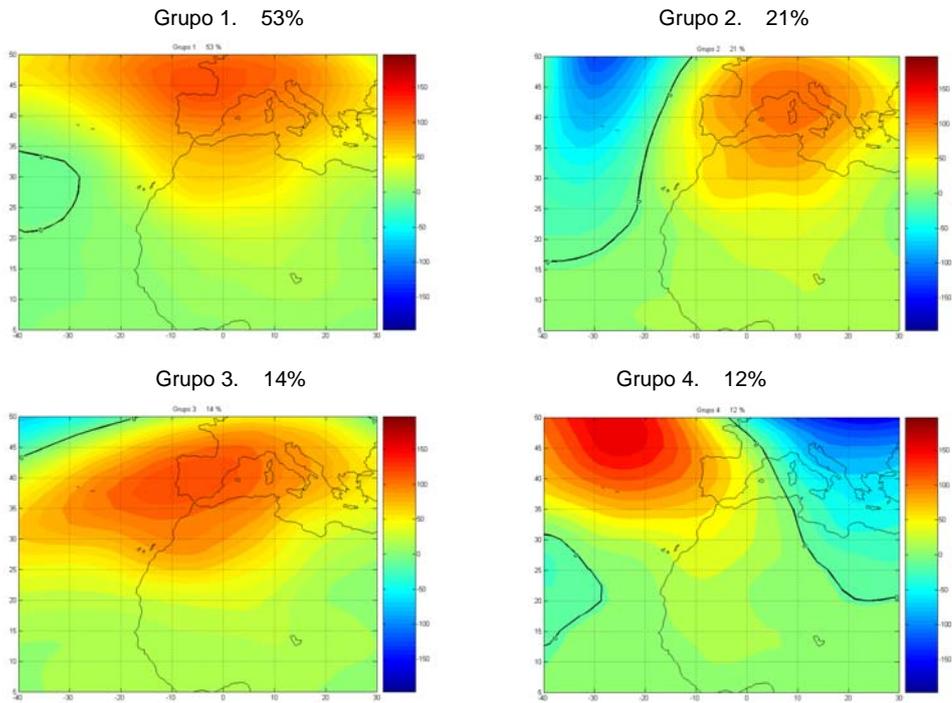


Figura A.5. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Febrero. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Febrero Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

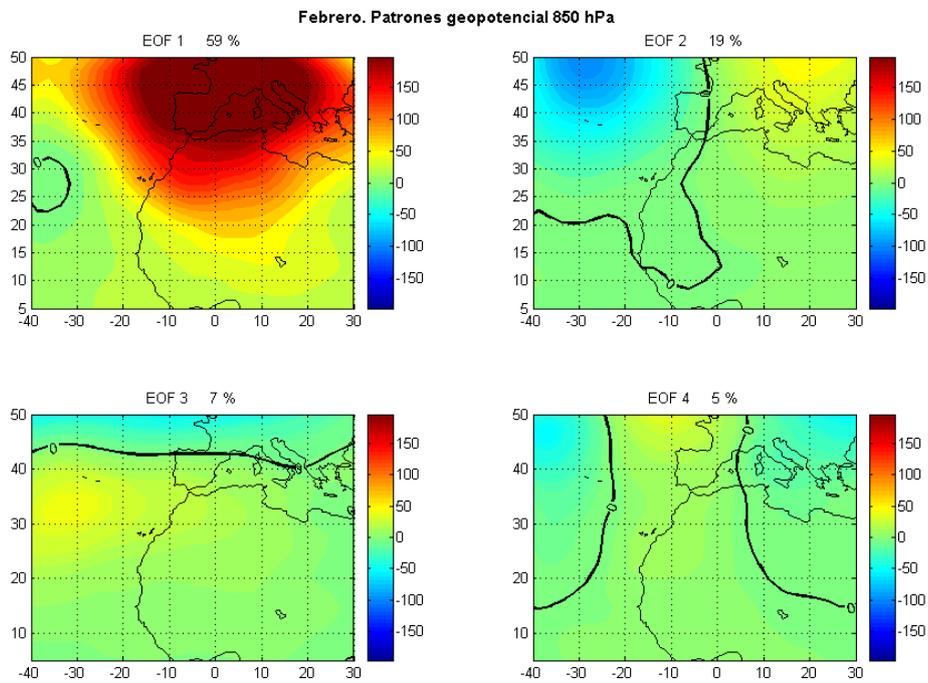
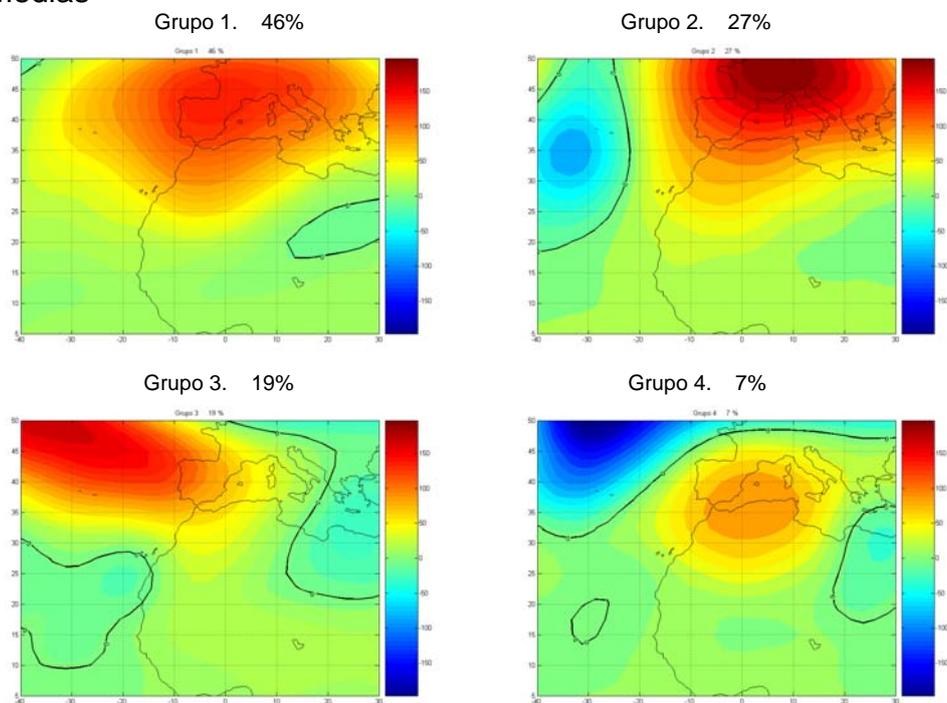


Figura A.6. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Febrero. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Febrero Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

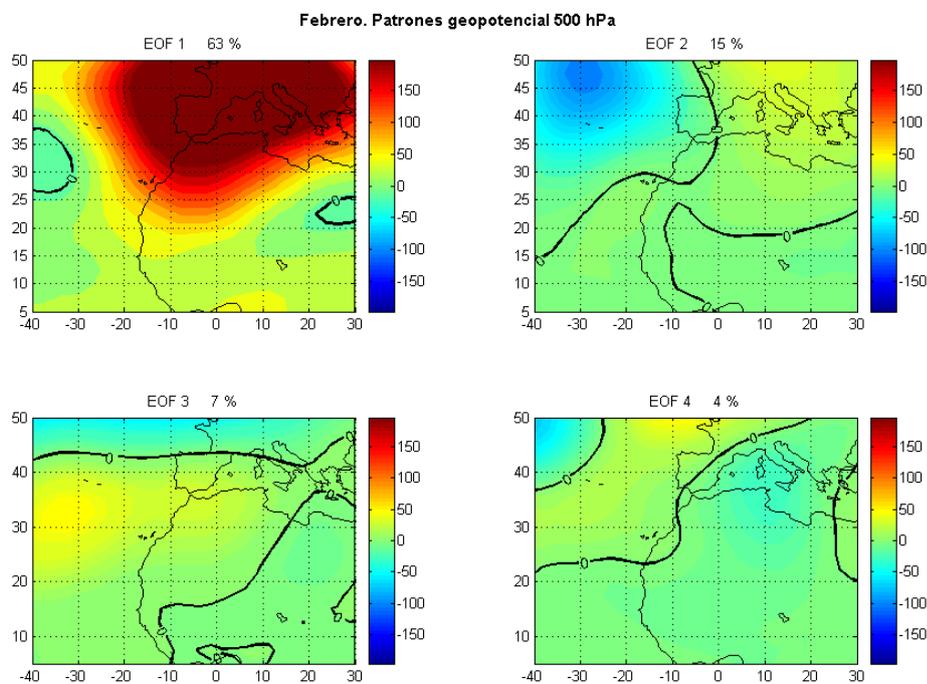
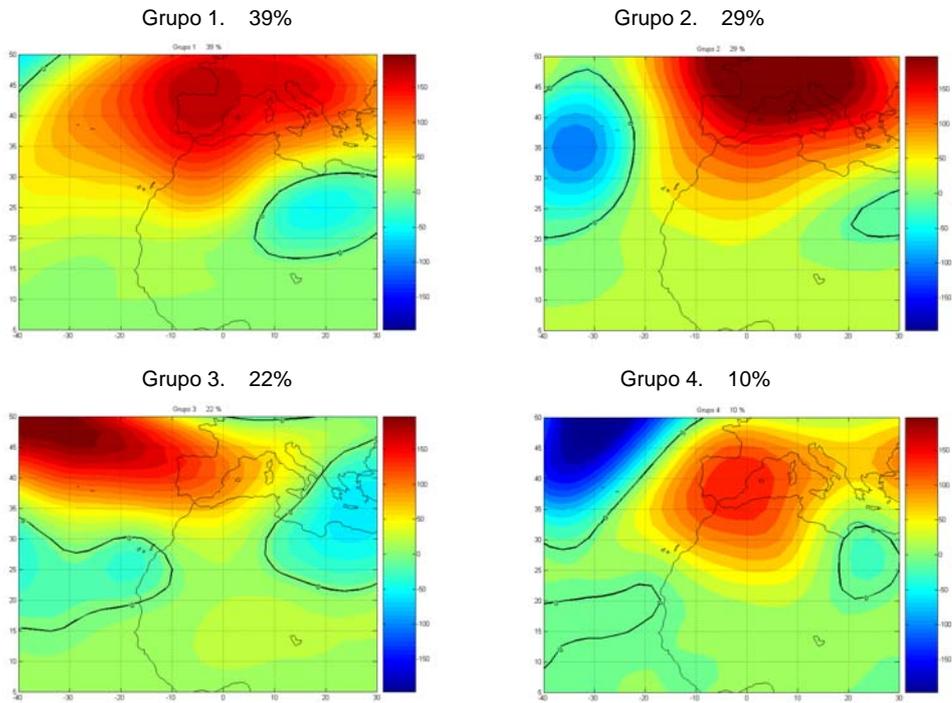


Figura A.7. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Febrero. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Febrero Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

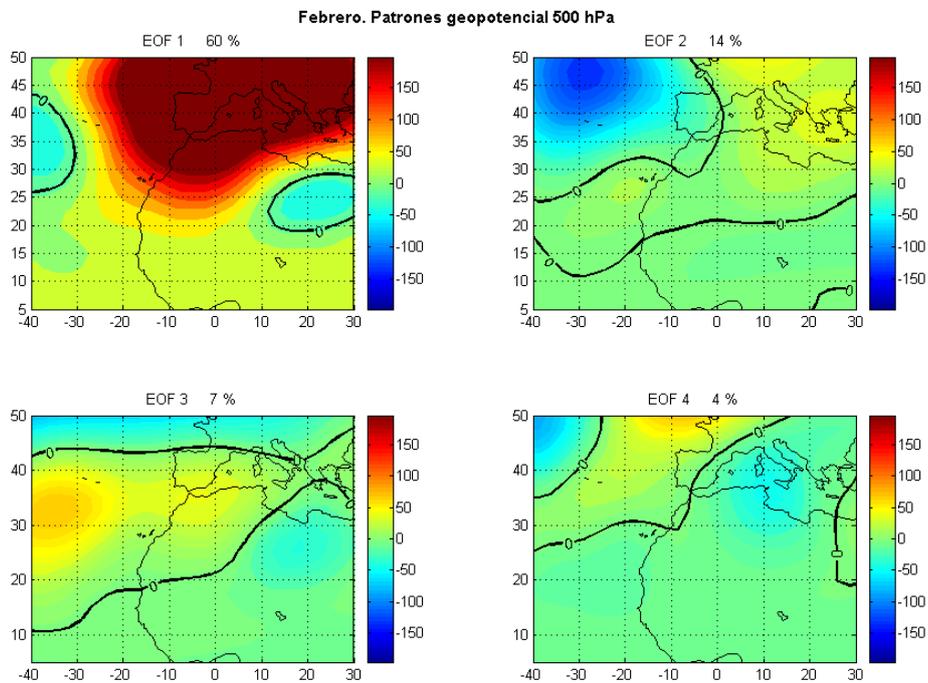
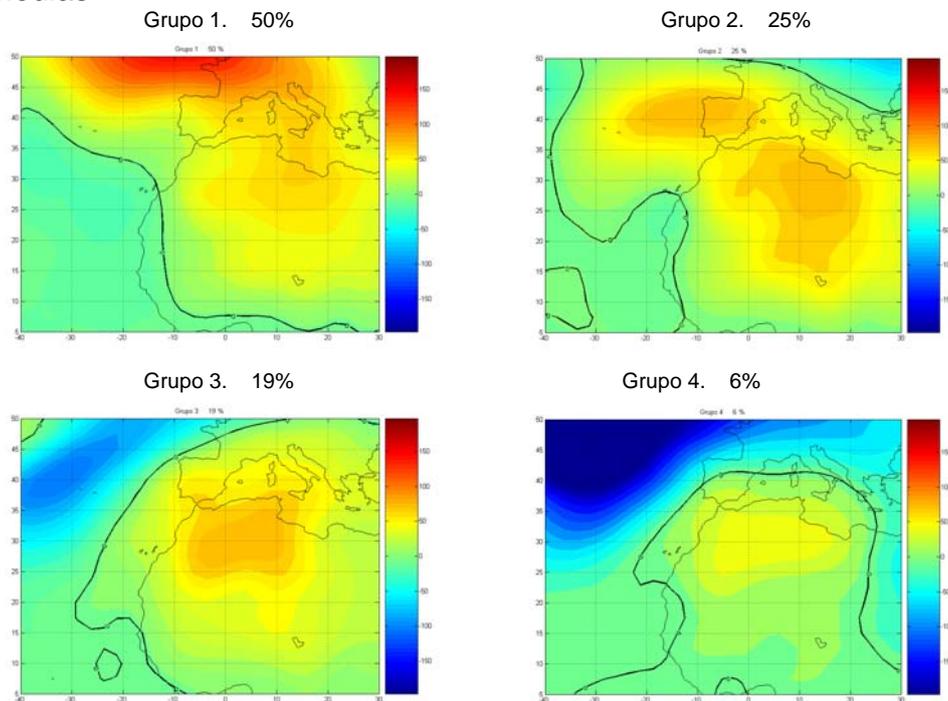


Figura A.8. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Febrero. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Marzo Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

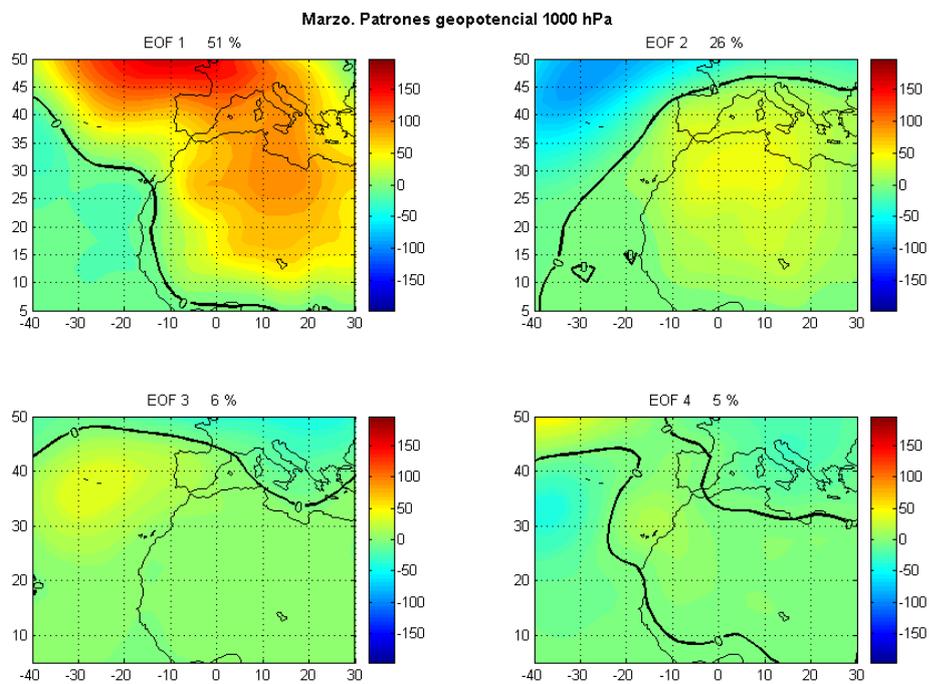
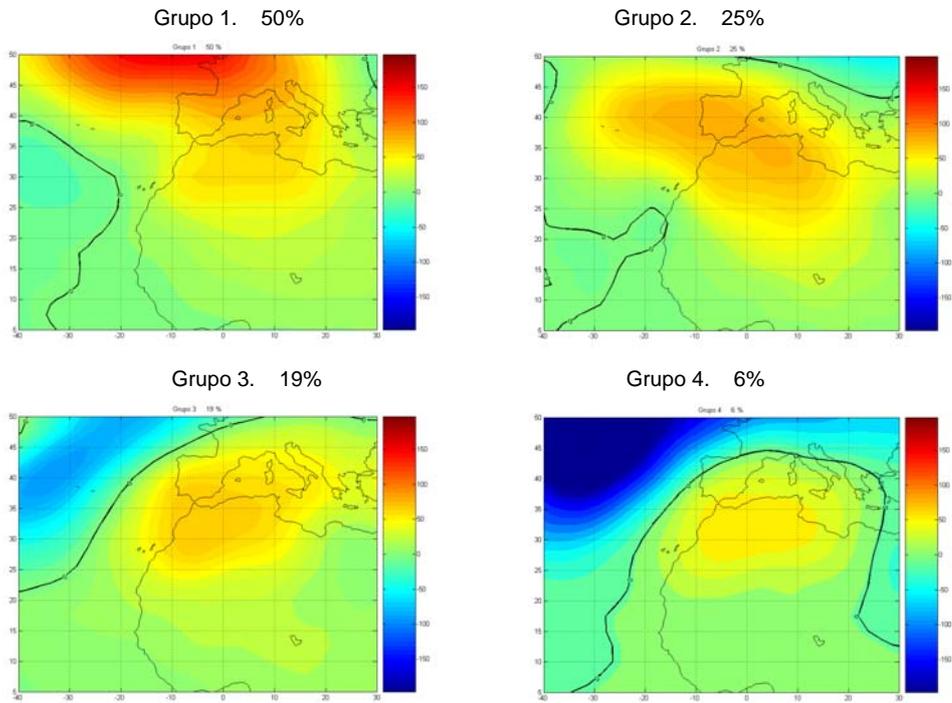


Figura A.9. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Marzo. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Marzo Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

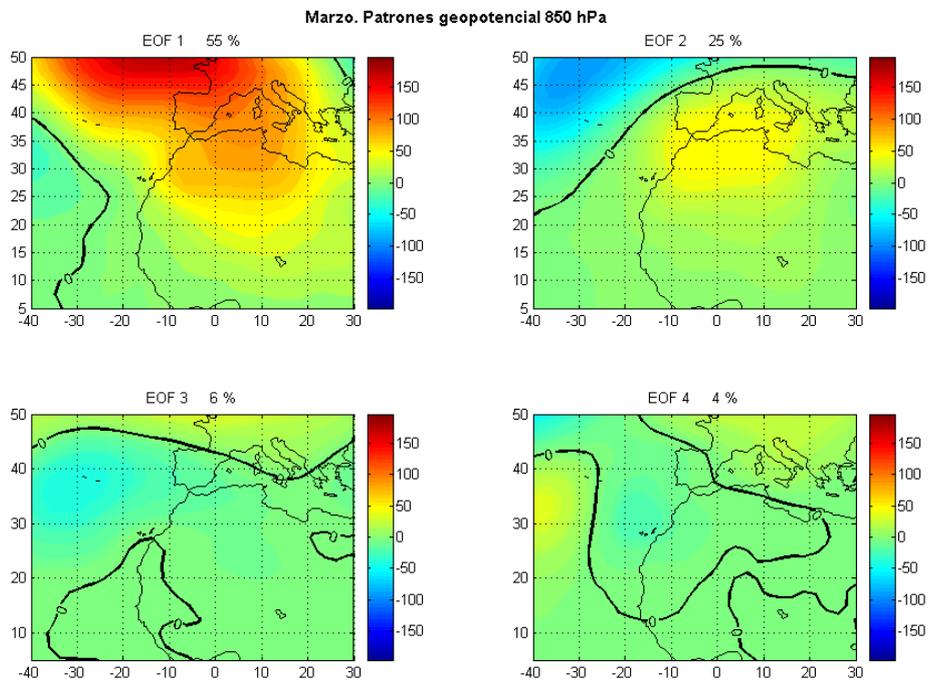
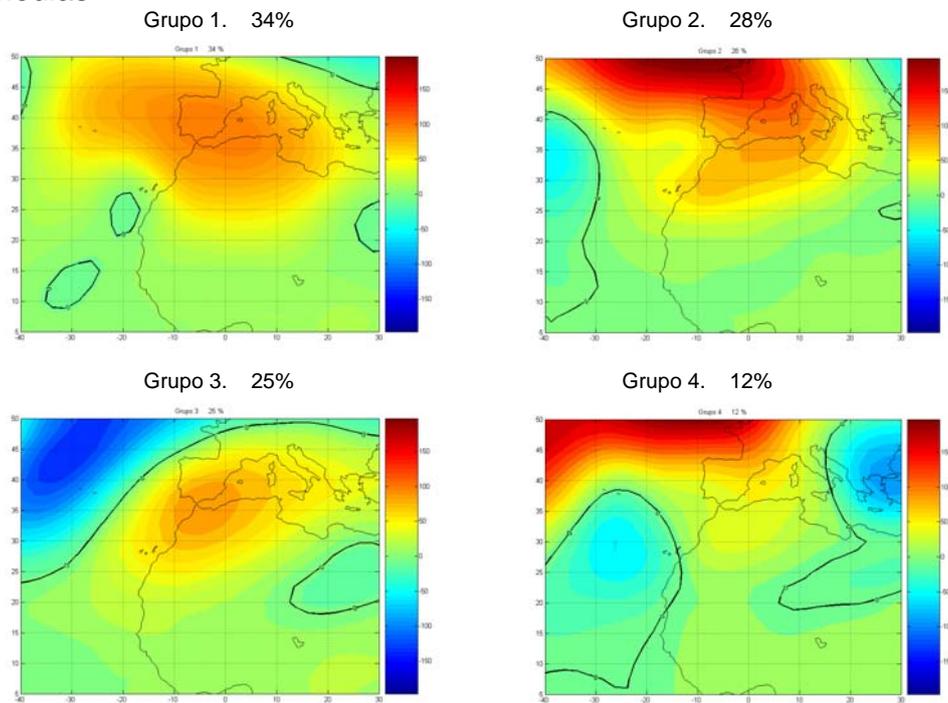


Figura A.10. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Marzo. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Marzo Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

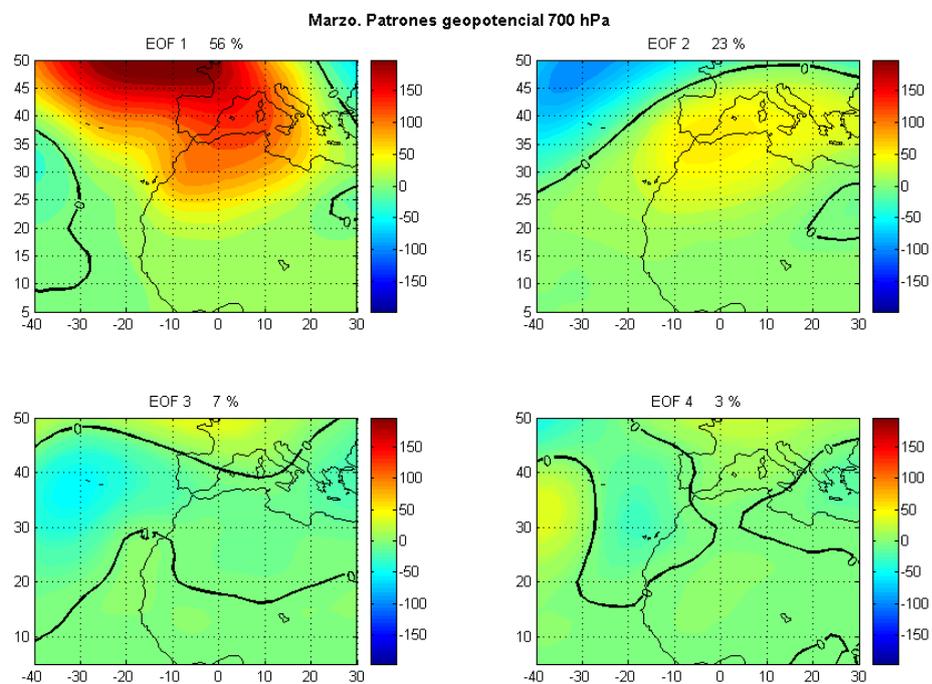
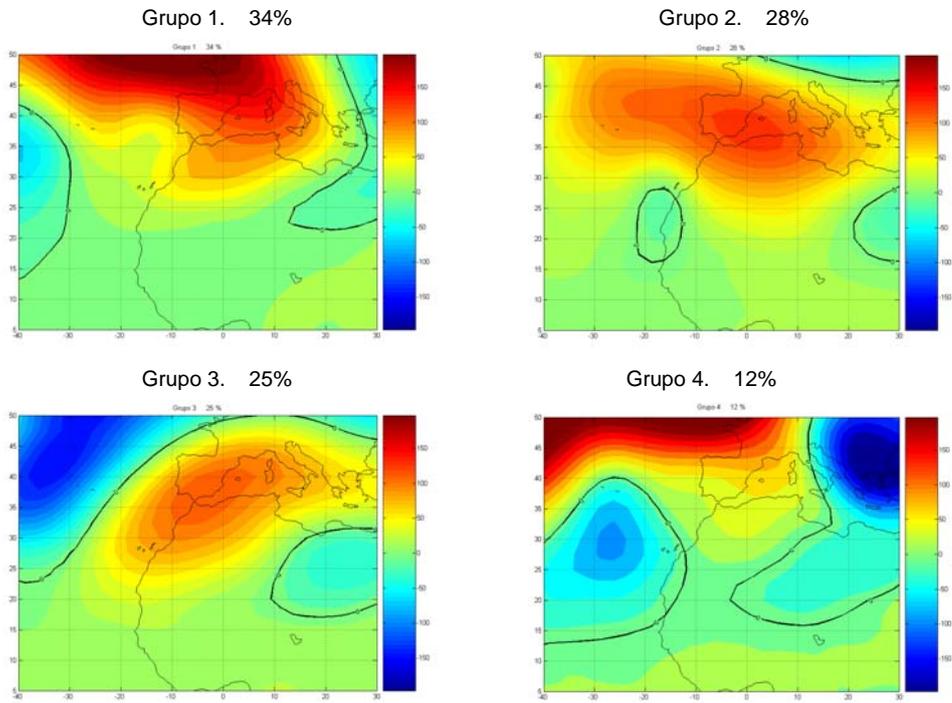


Figura A.11. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Marzo. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Marzo Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

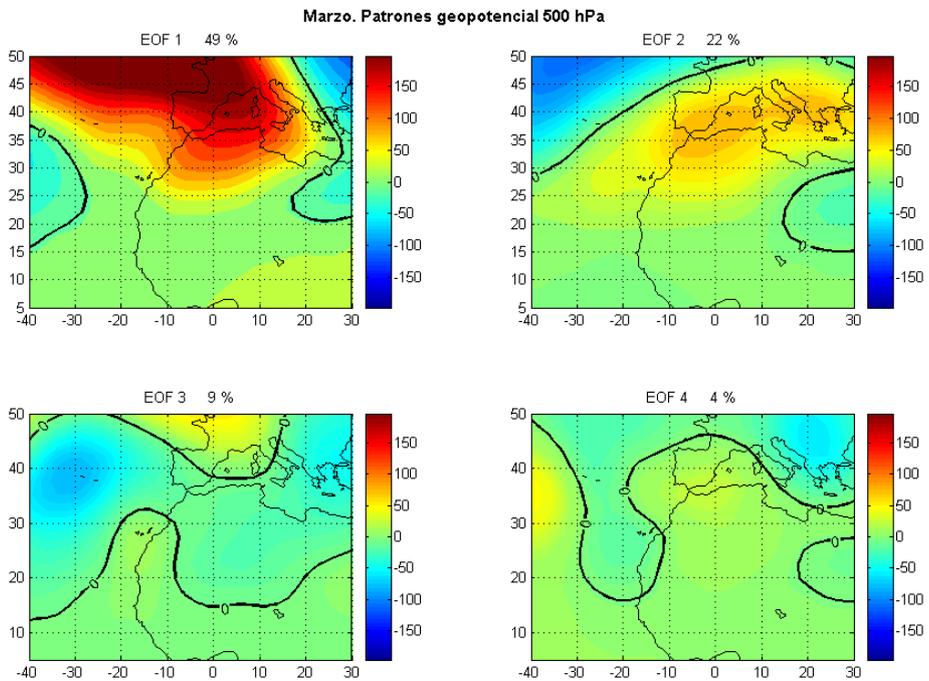
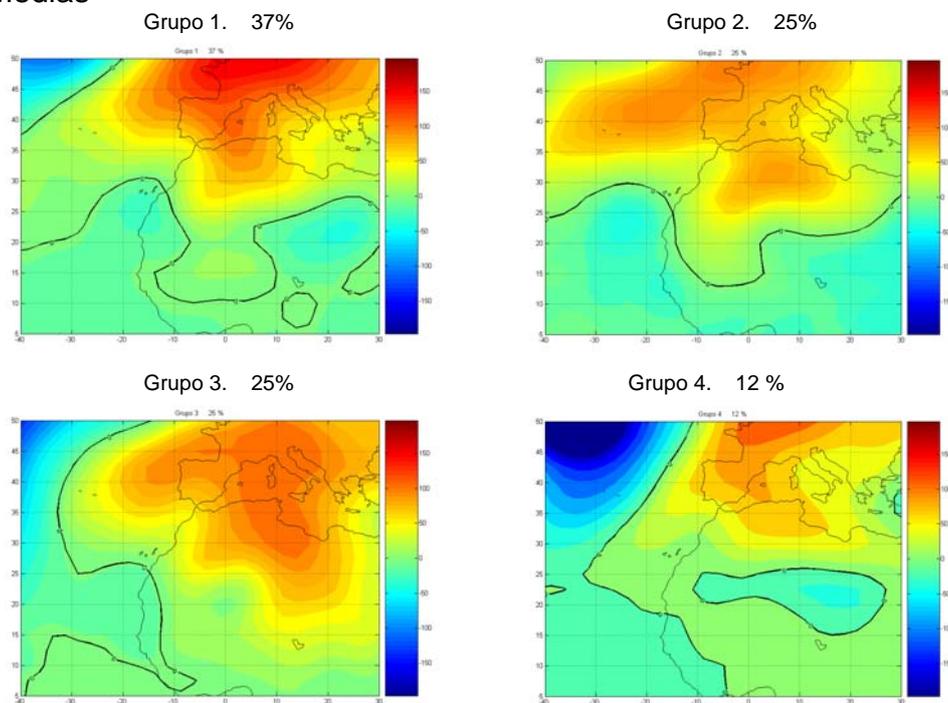


Figura A.12. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Marzo. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Abril Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

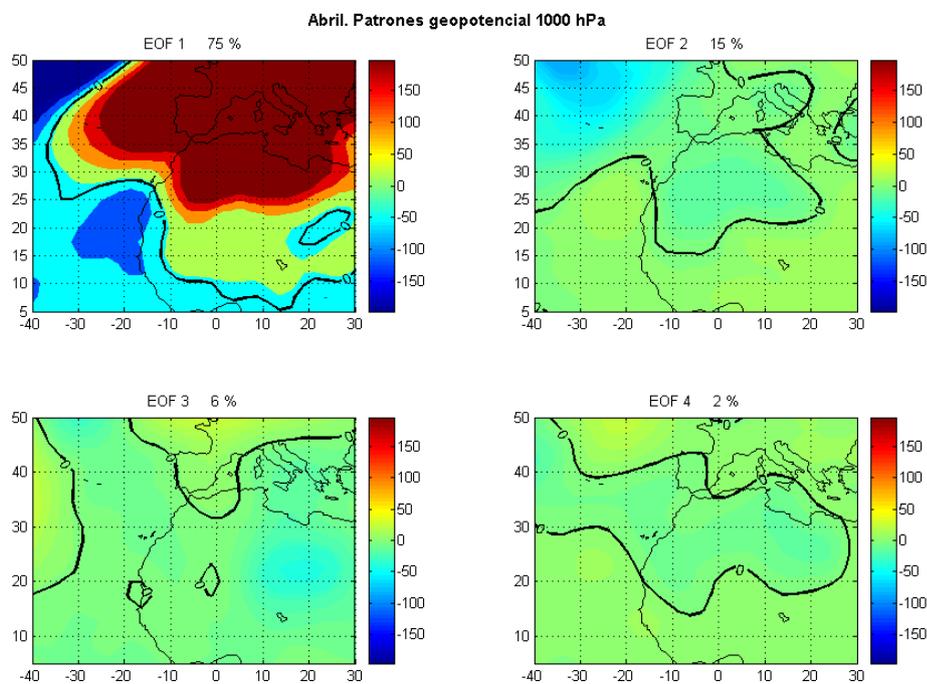
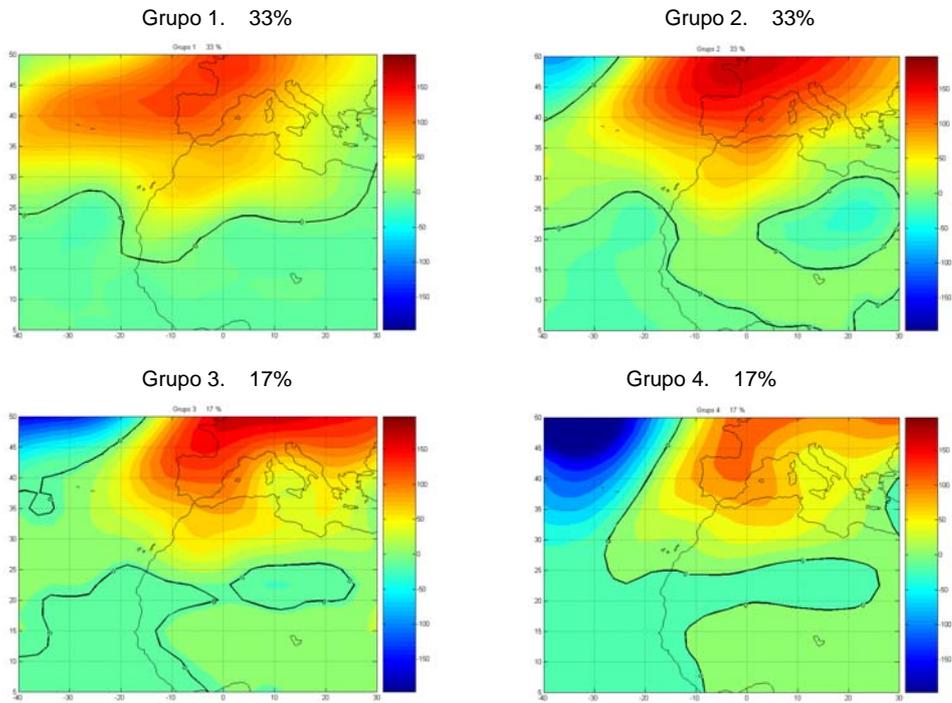


Figura A.13. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Abril. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Abril Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

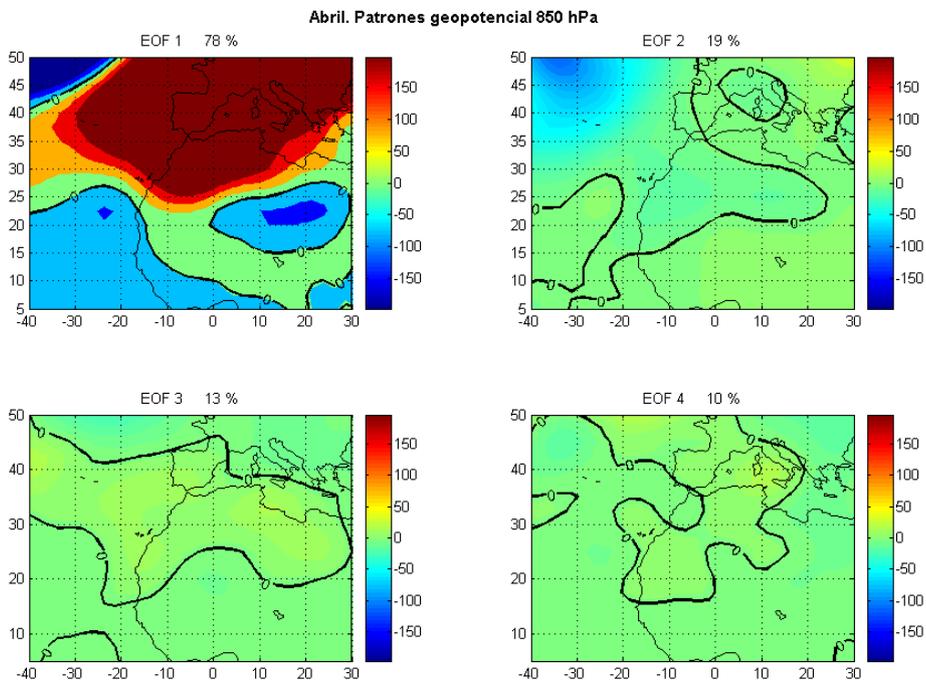
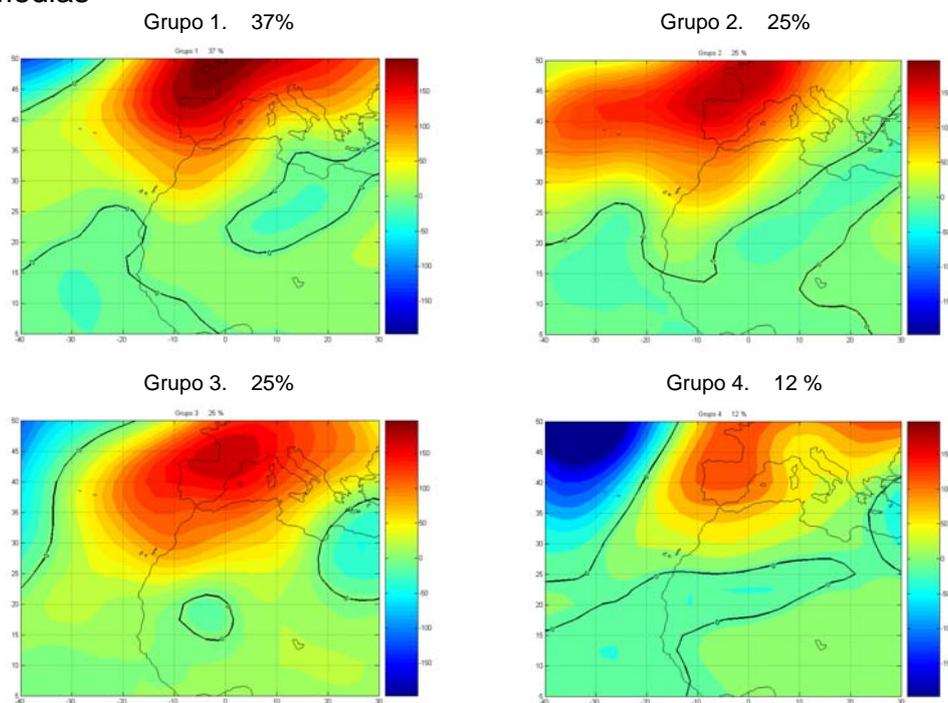


Figura A.14. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Abril. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Abril Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

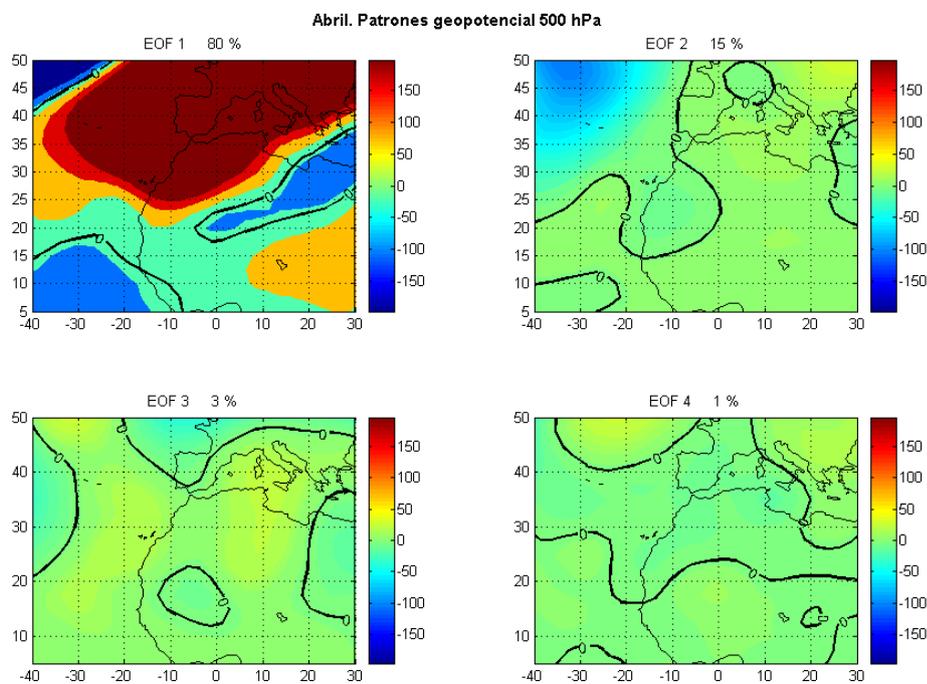
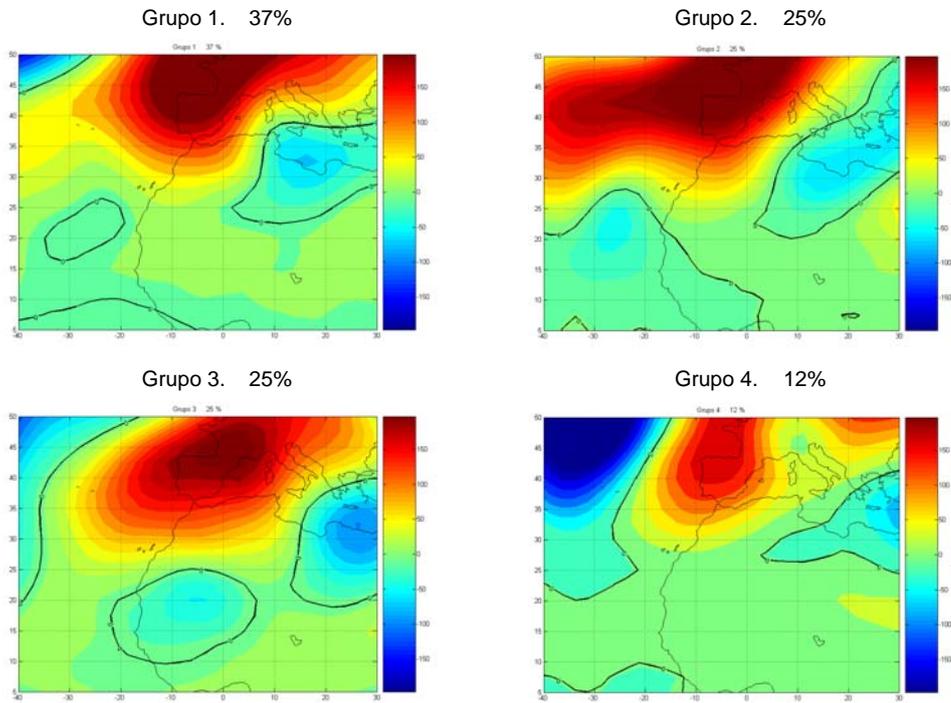


Figura A.15. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Abril. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Abril Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

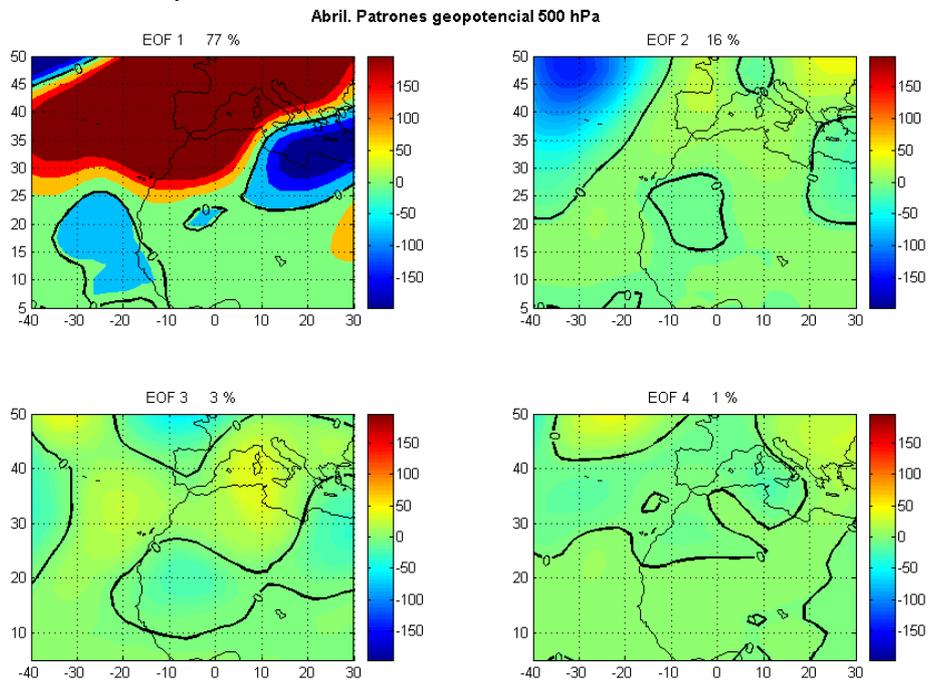
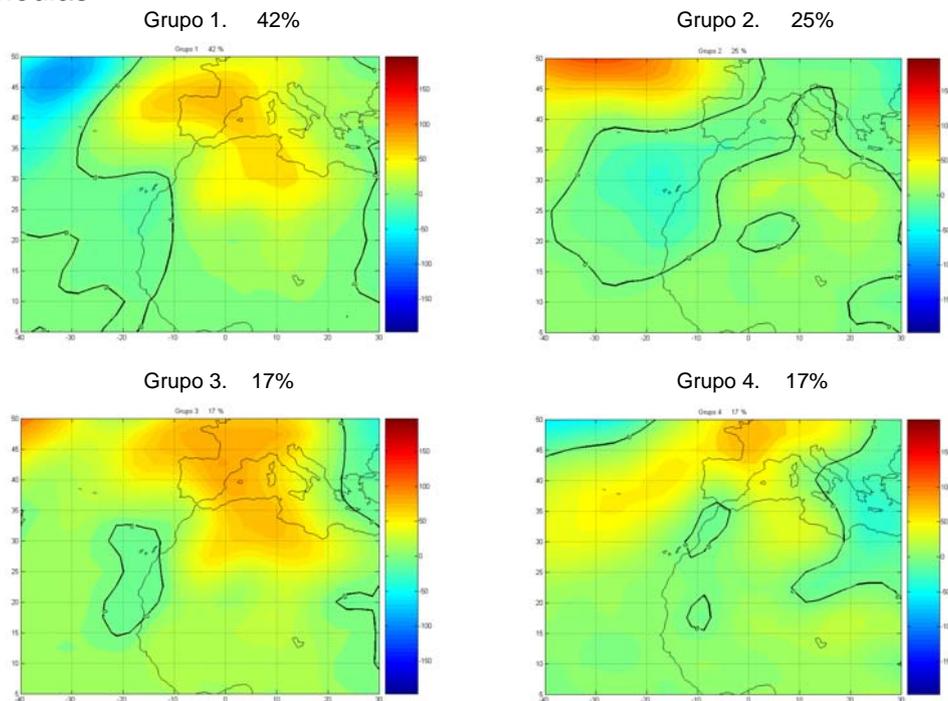


Figura A.16. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Abril. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Mayo Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

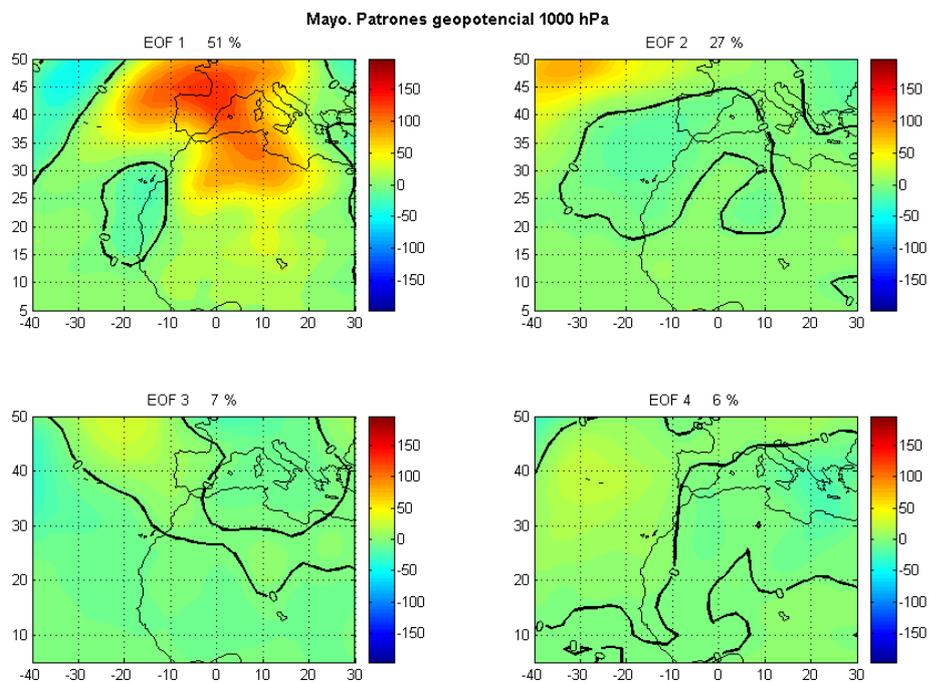
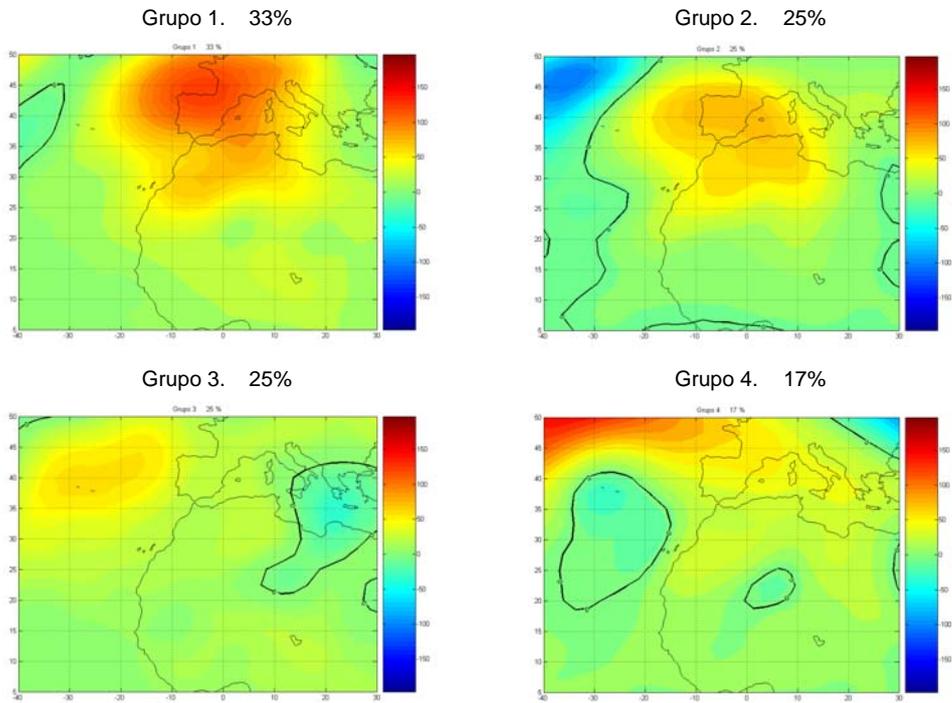


Figura A.17. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Mayo. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Mayo Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

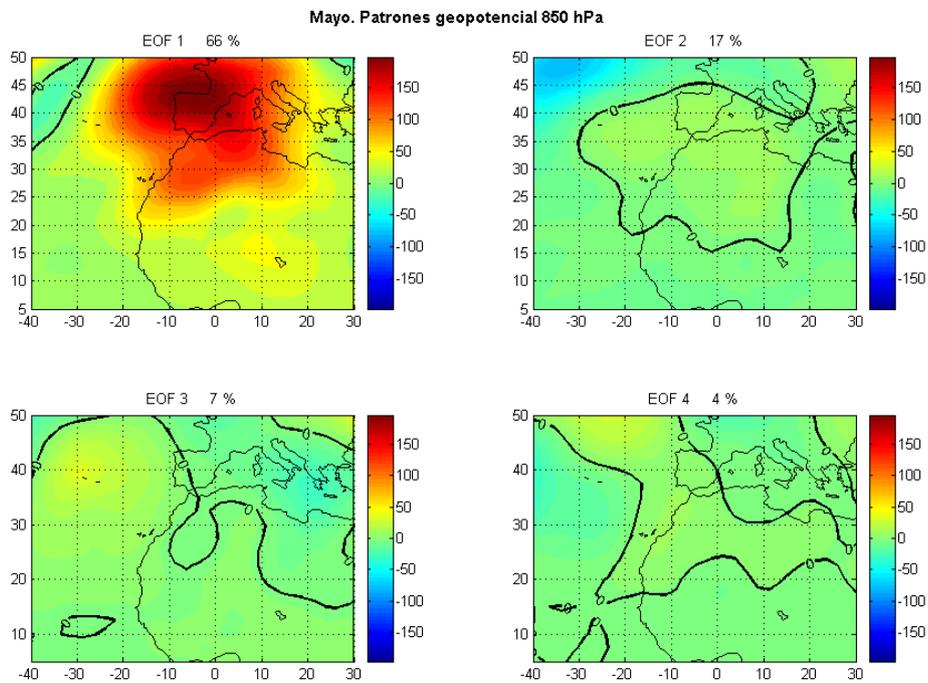
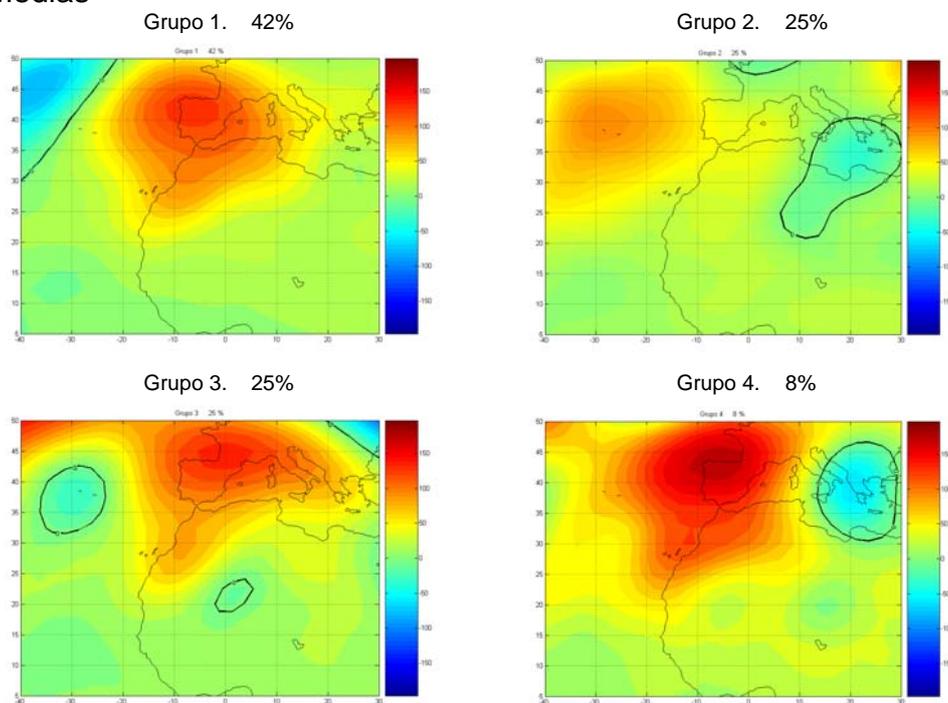


Figura A.18. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Mayo. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Mayo Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

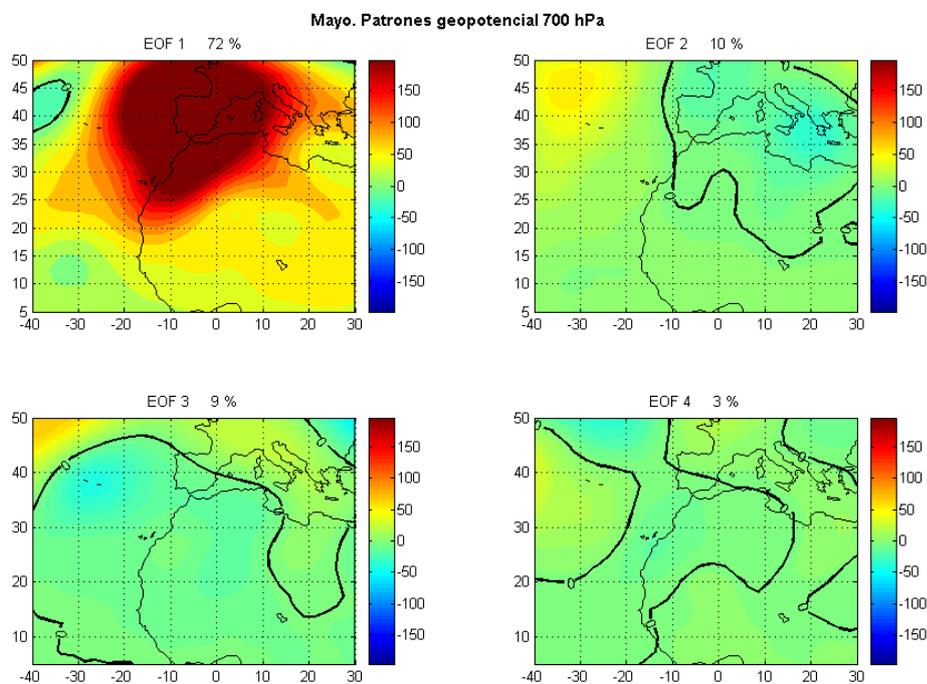
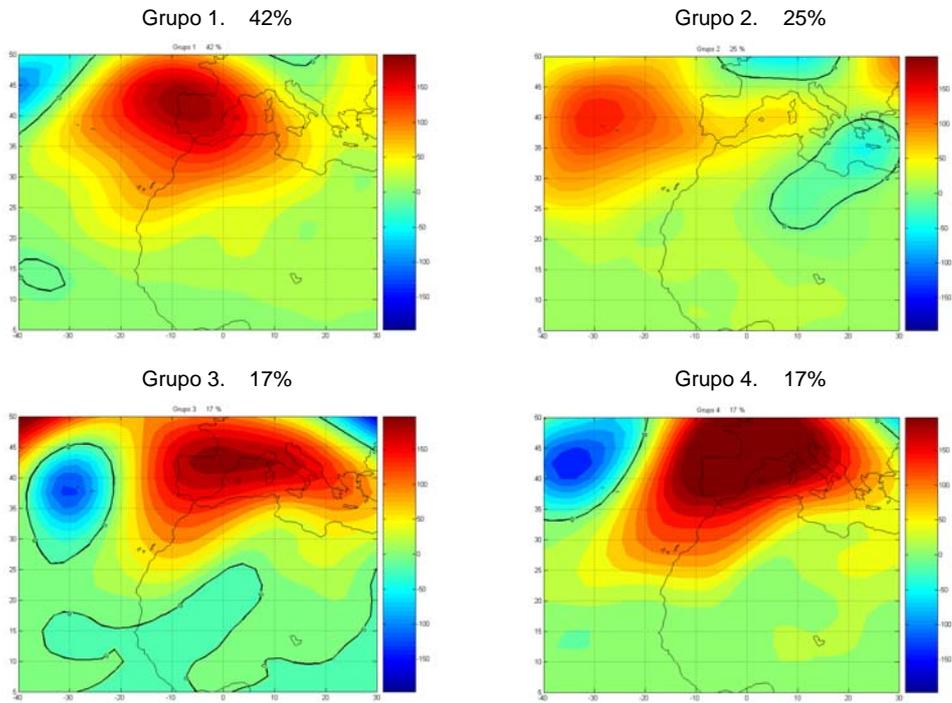


Figura A.19. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Mayo. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes= Mayo Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

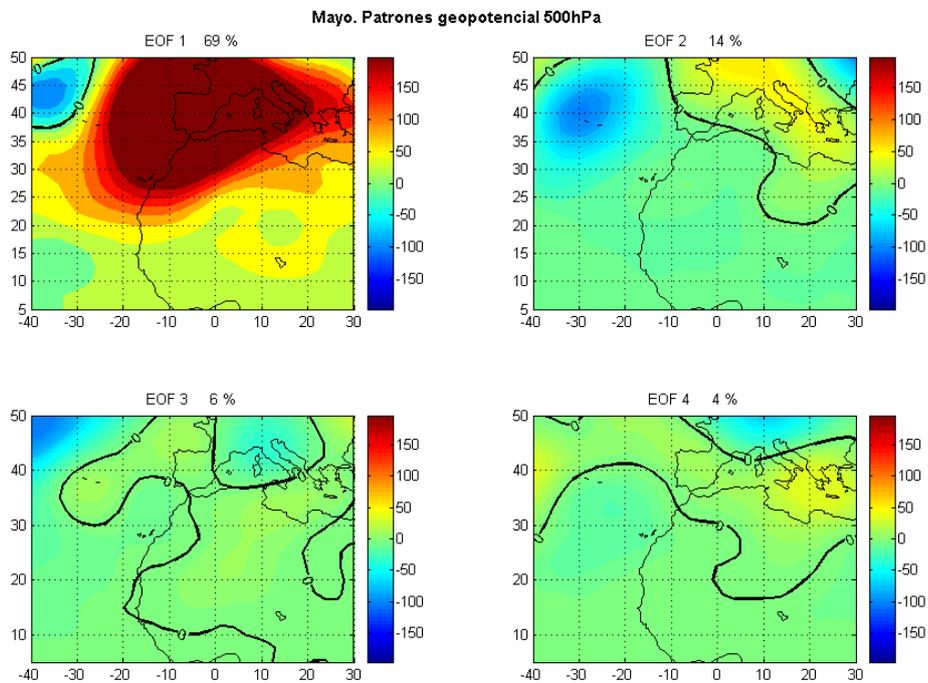
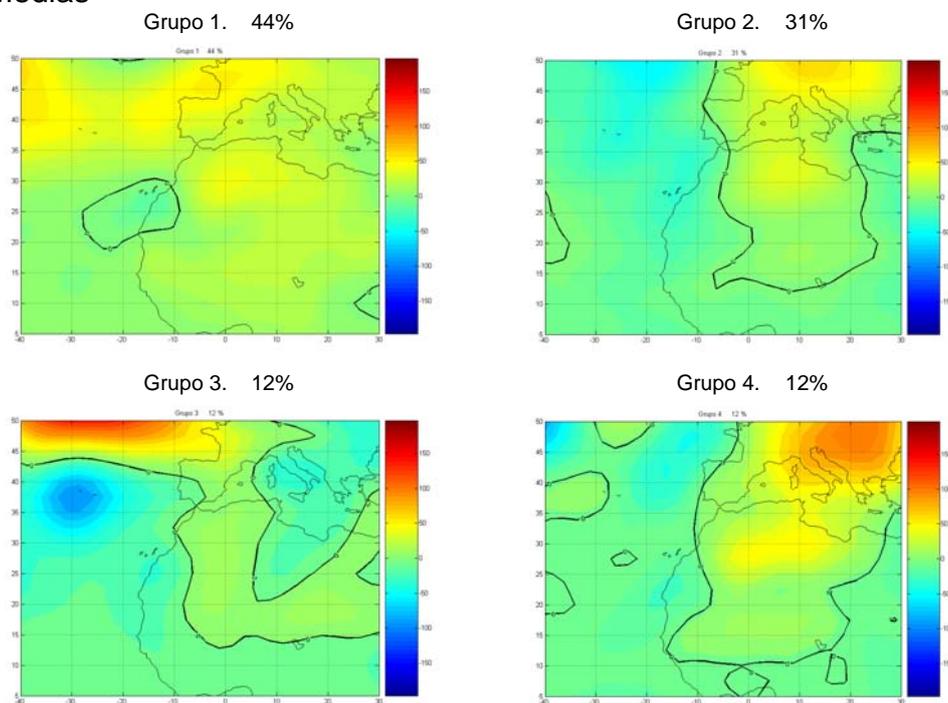


Figura A.20. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Mayo. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Junio Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

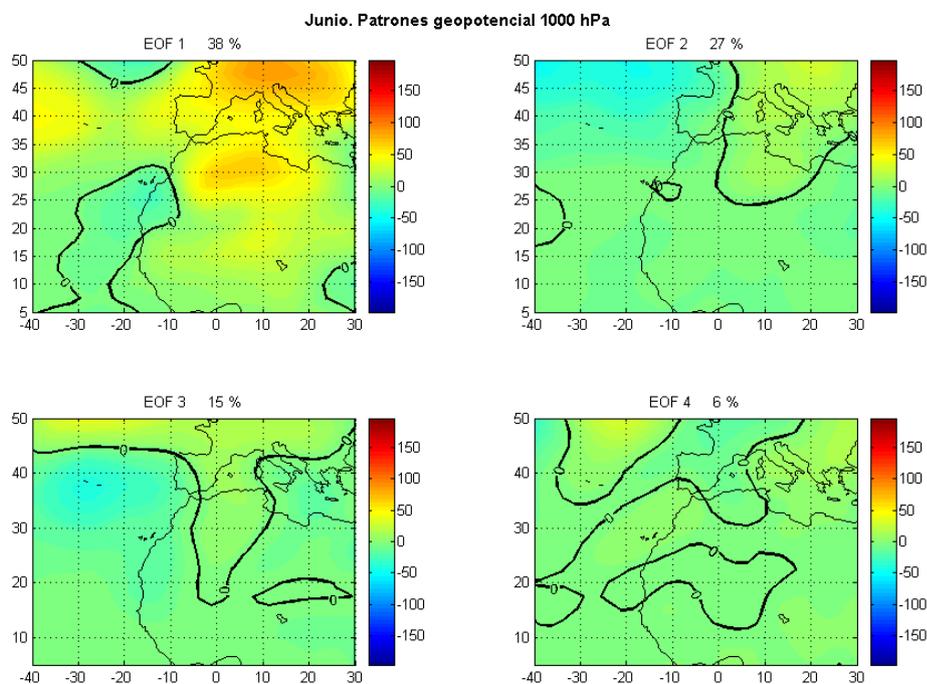
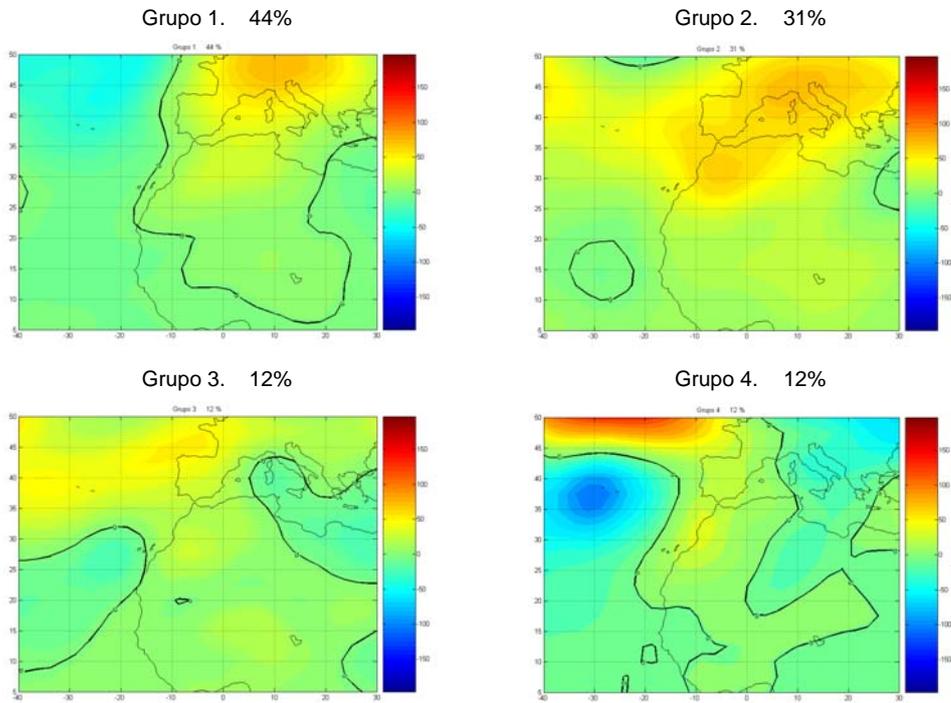


Figura A.21. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Junio. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Junio Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

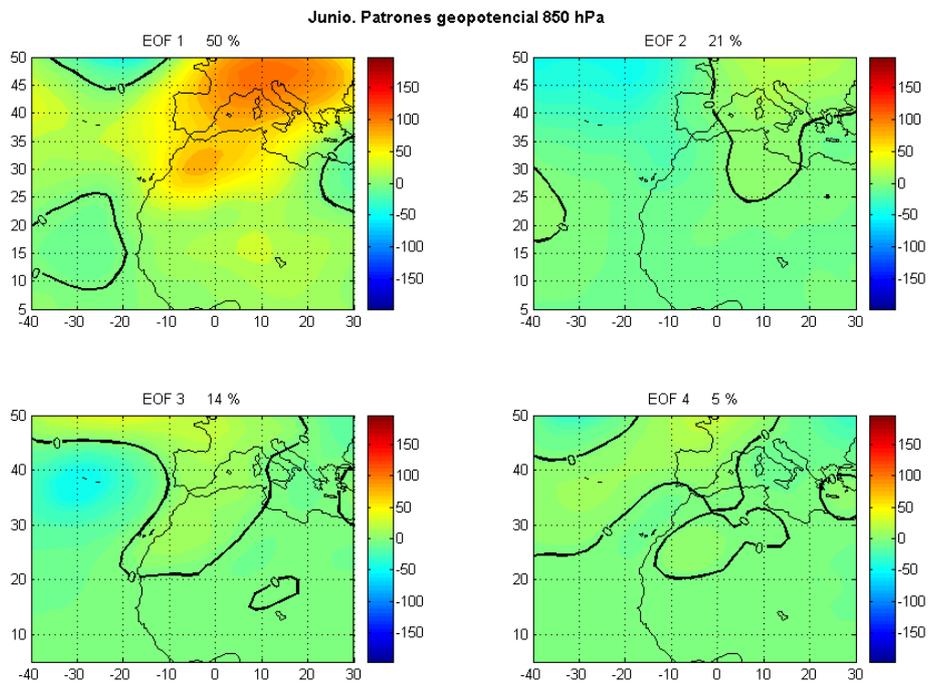
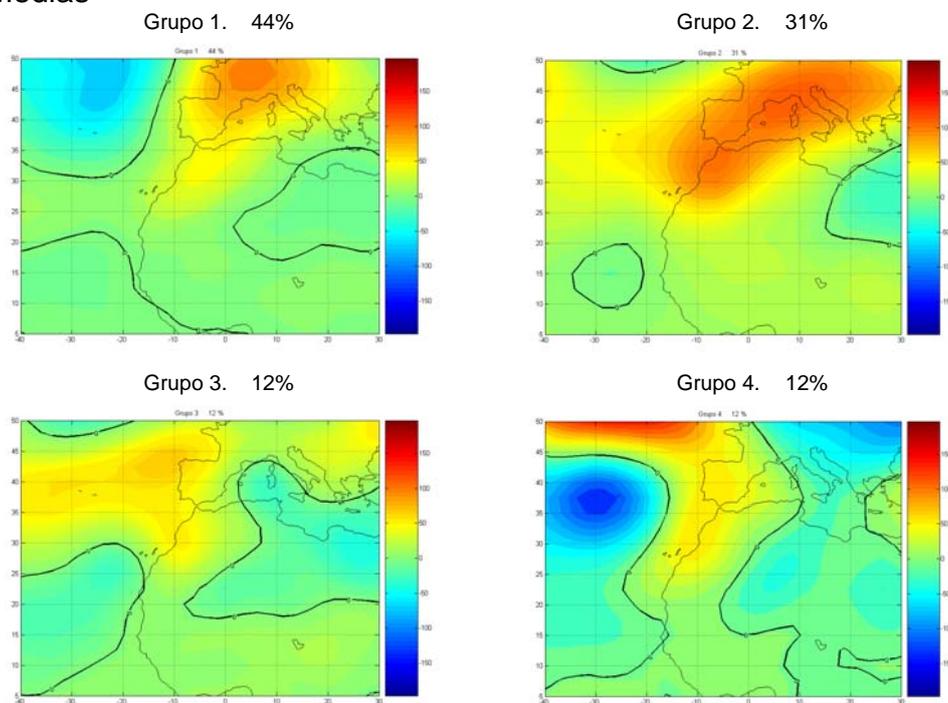


Figura A.22. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Junio. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Junio Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

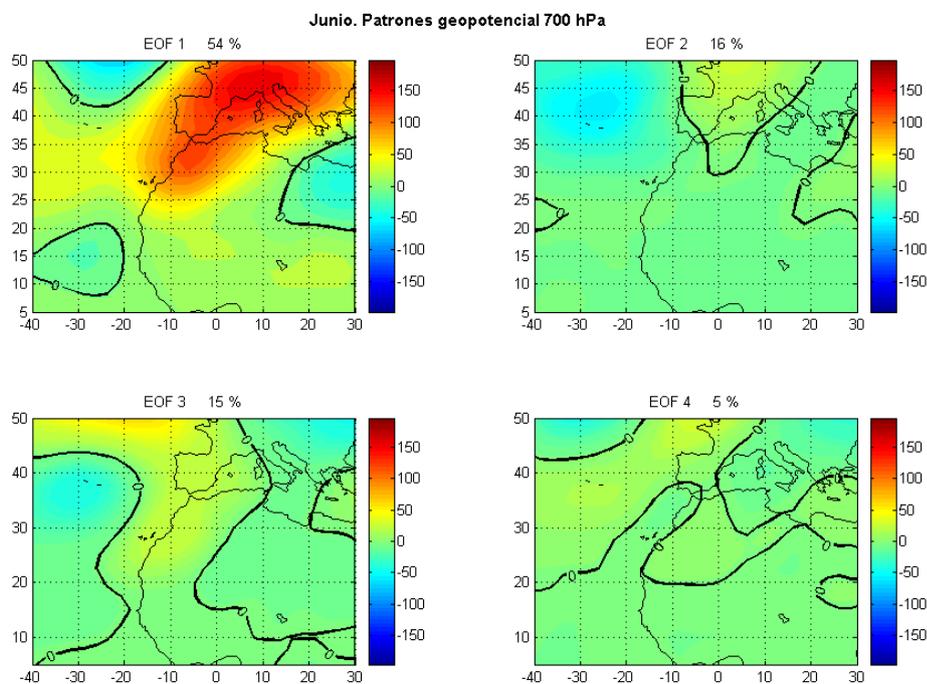
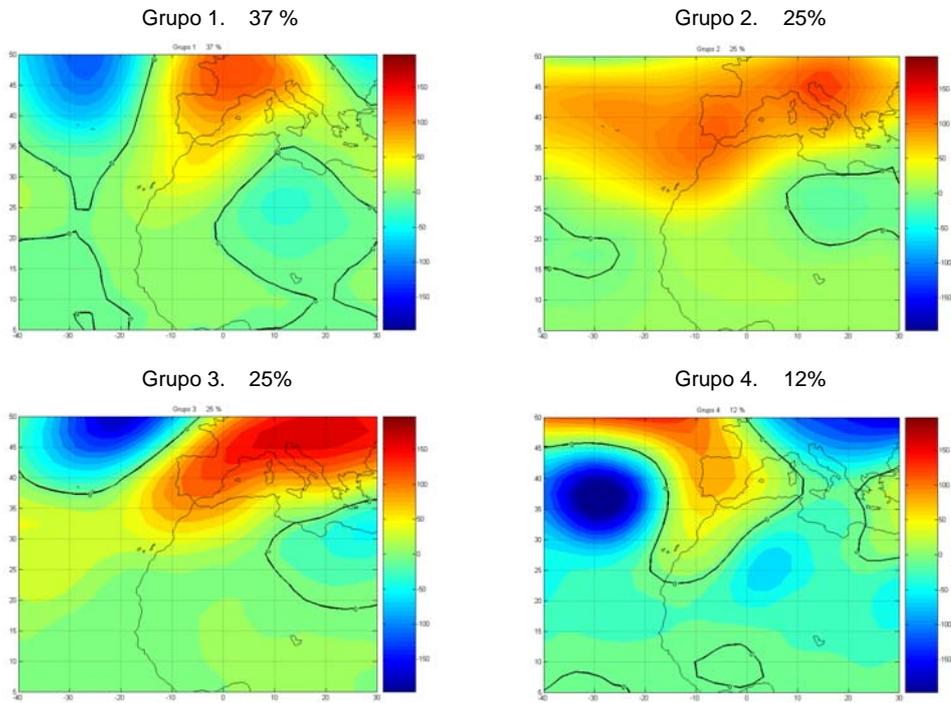


Figura A.23. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Junio. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Junio Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

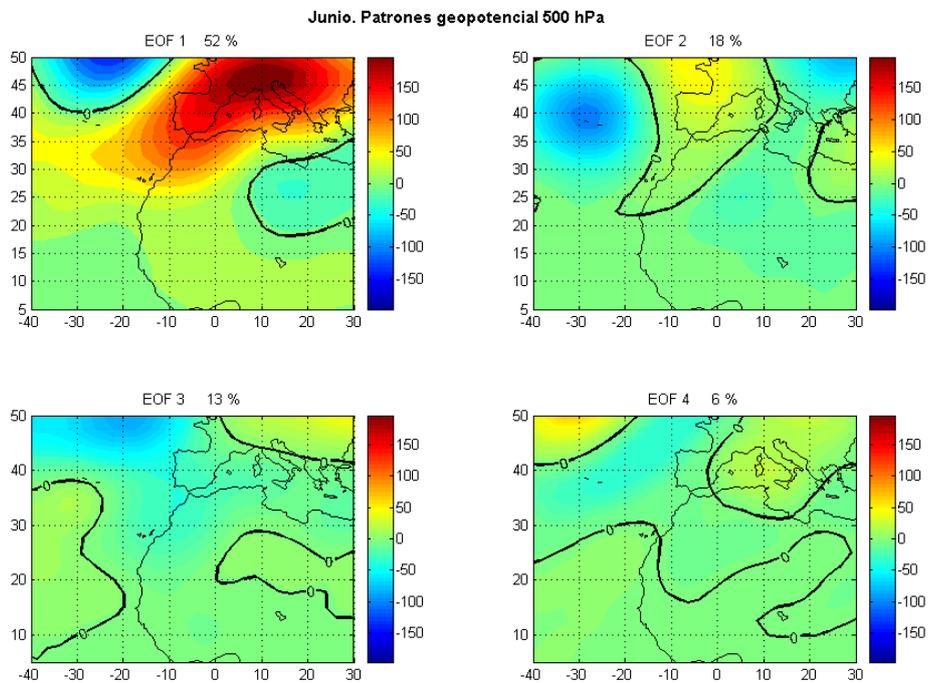
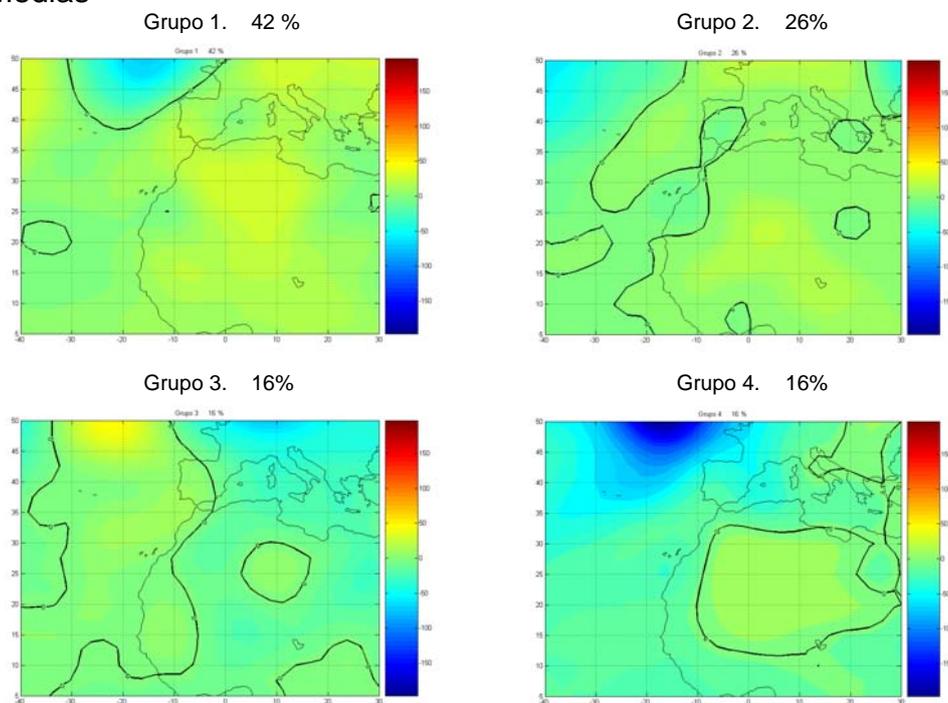


Figura A.24. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Junio. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Julio Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

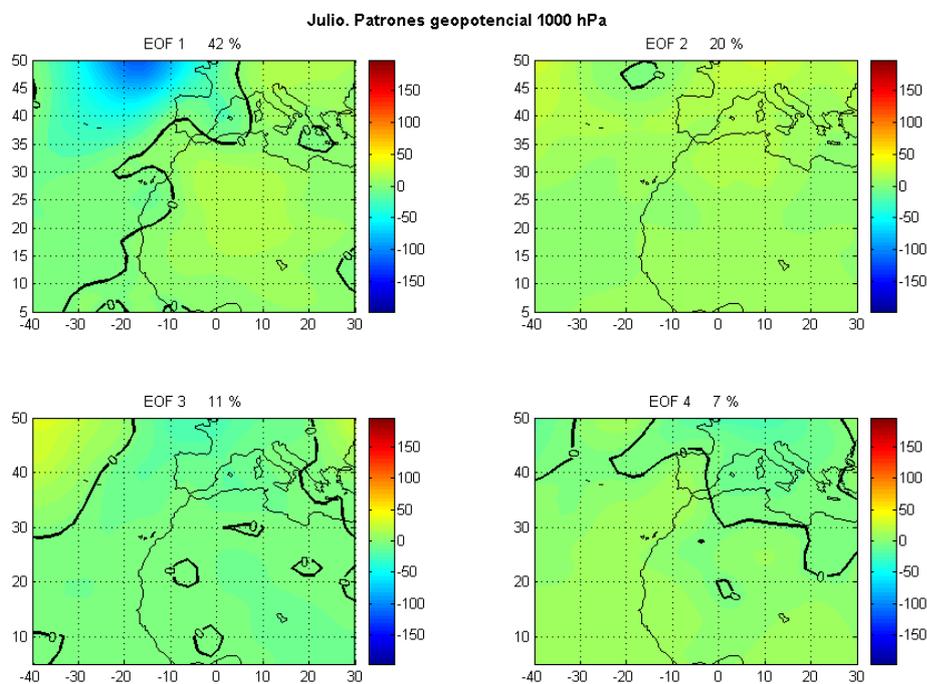
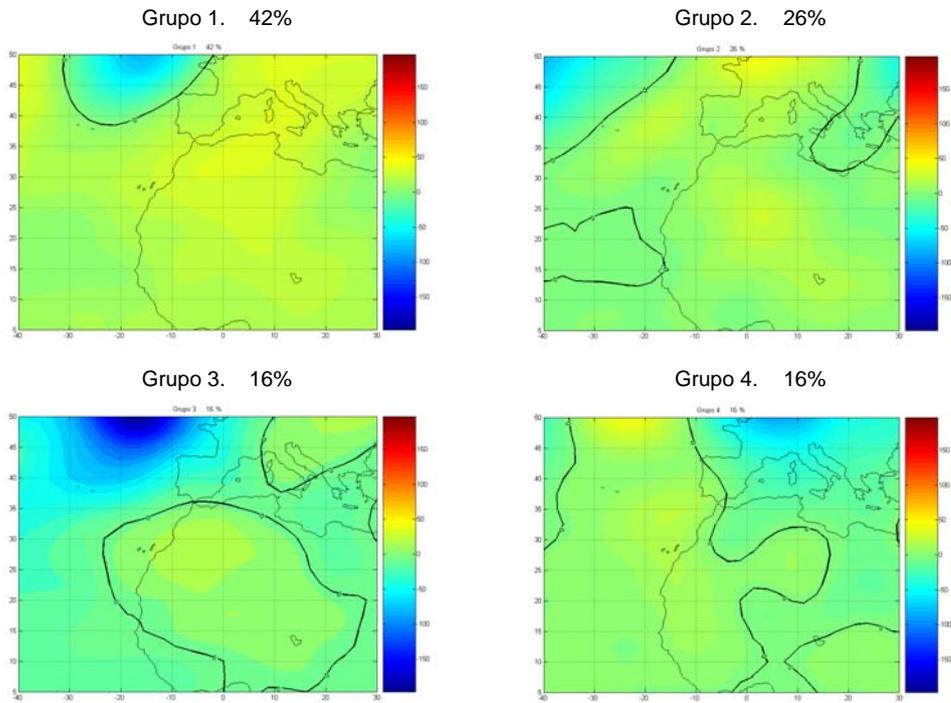


Figura A.25. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Julio. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Julio Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

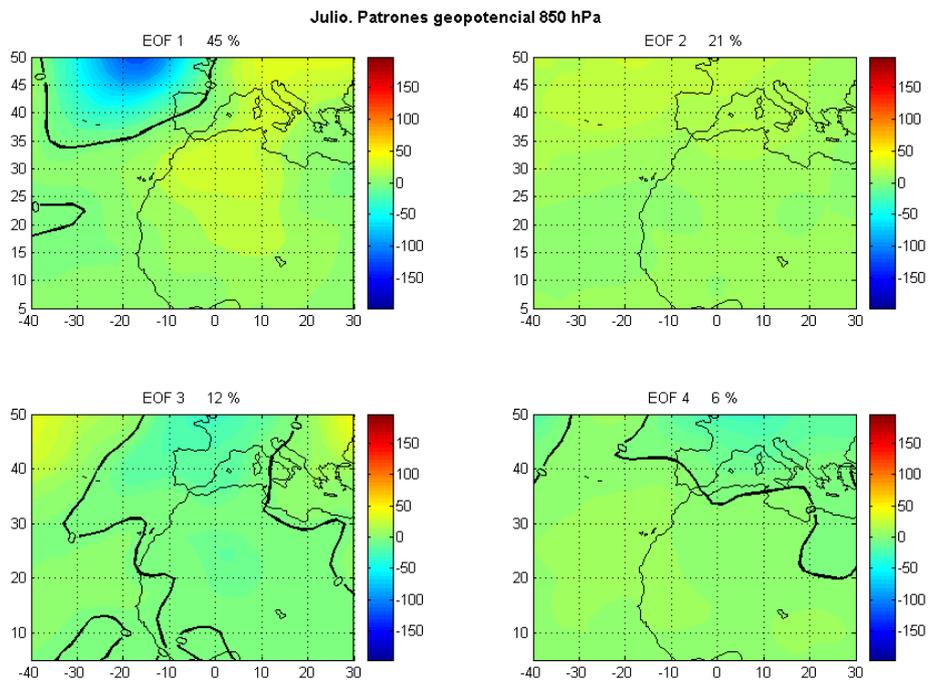
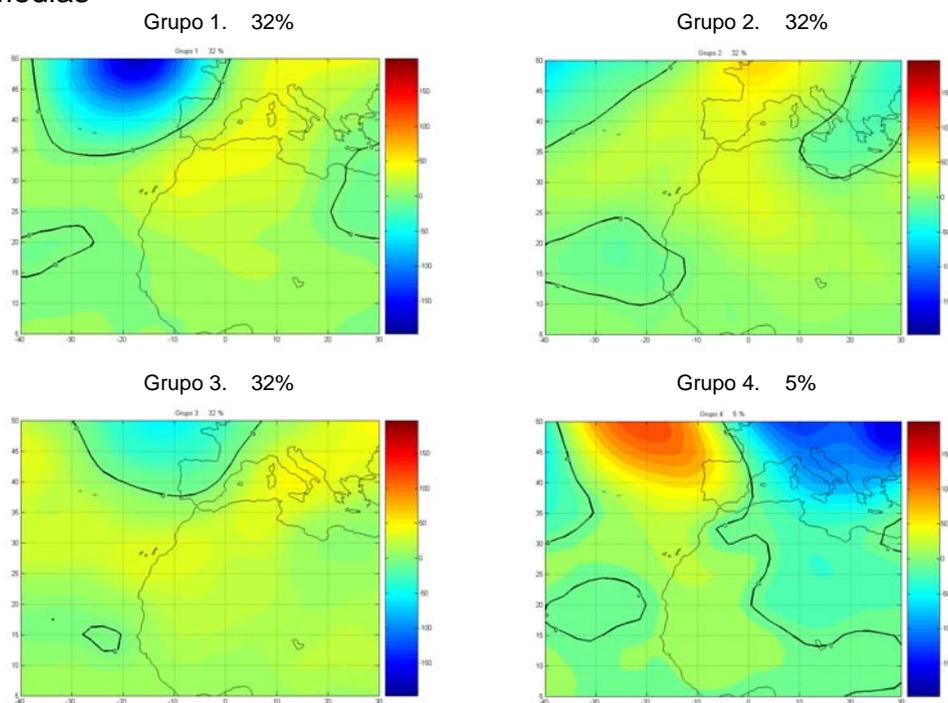


Figura A.26. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Julio. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Julio Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

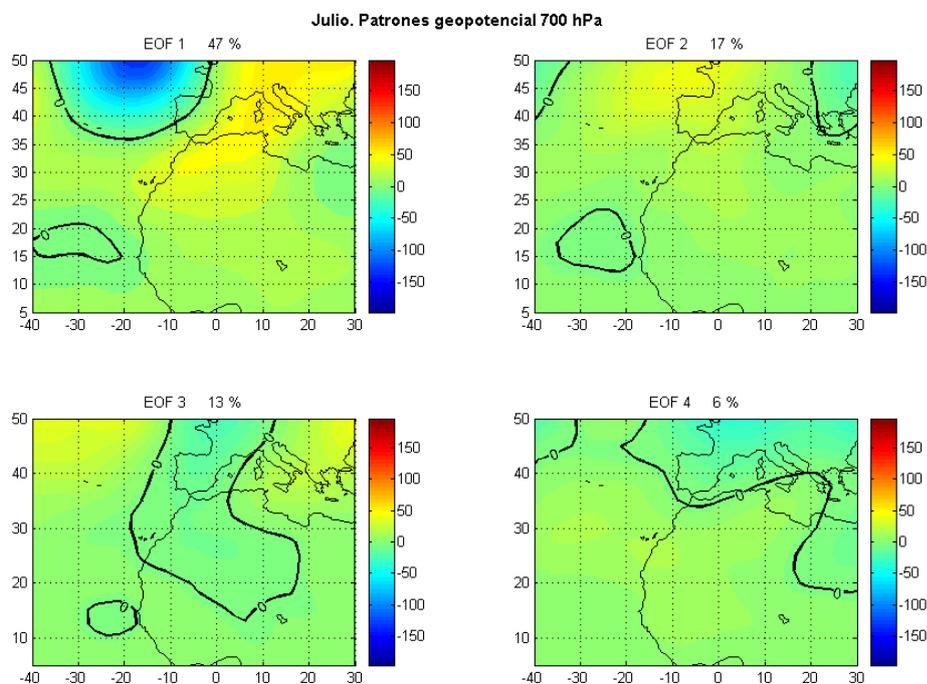
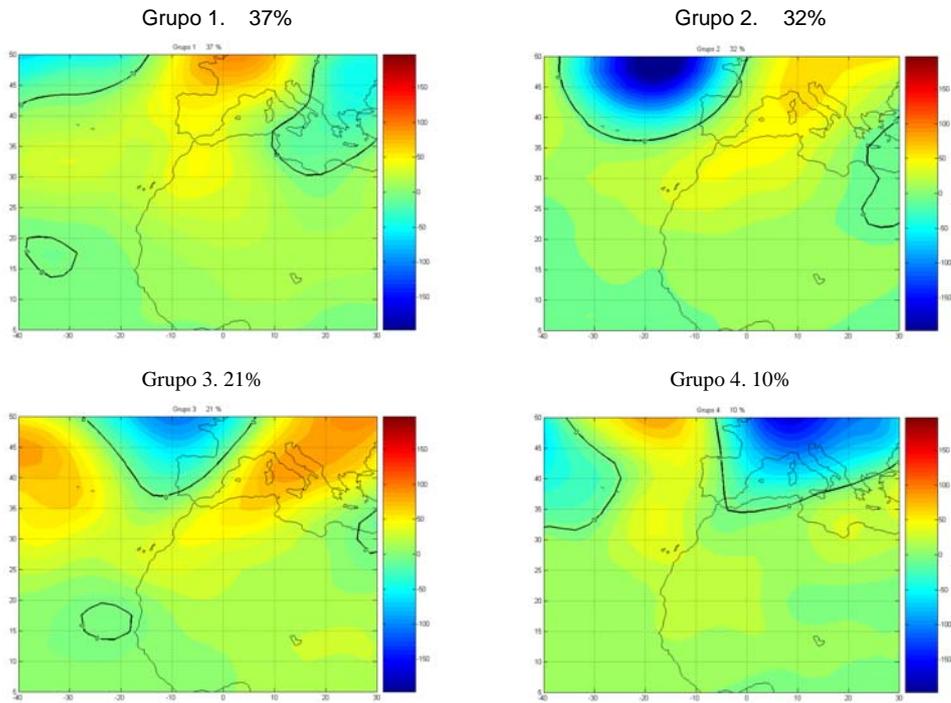


Figura A.27. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Julio. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Julio Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

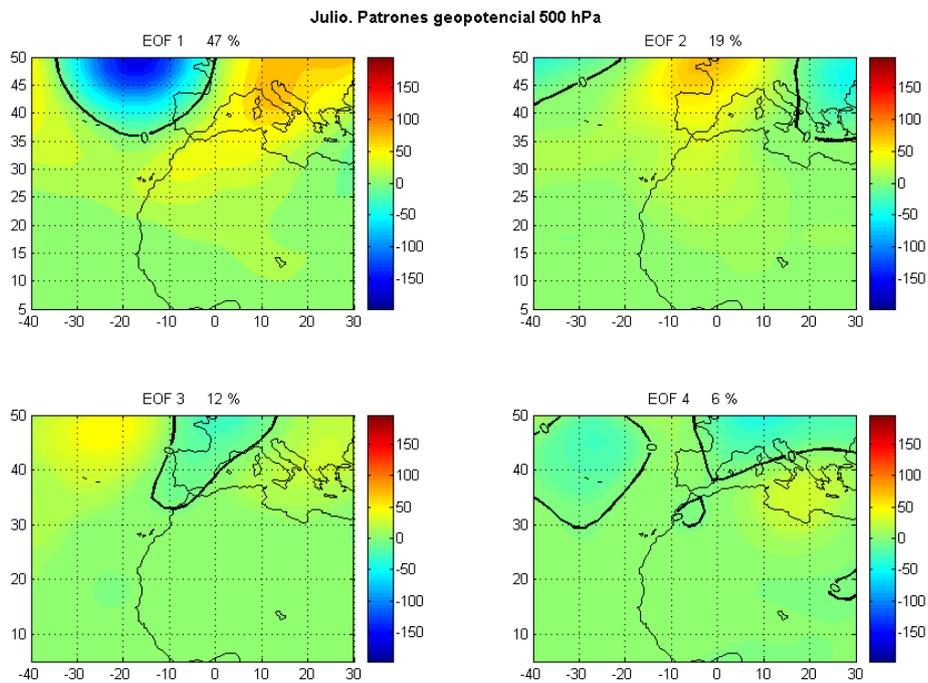
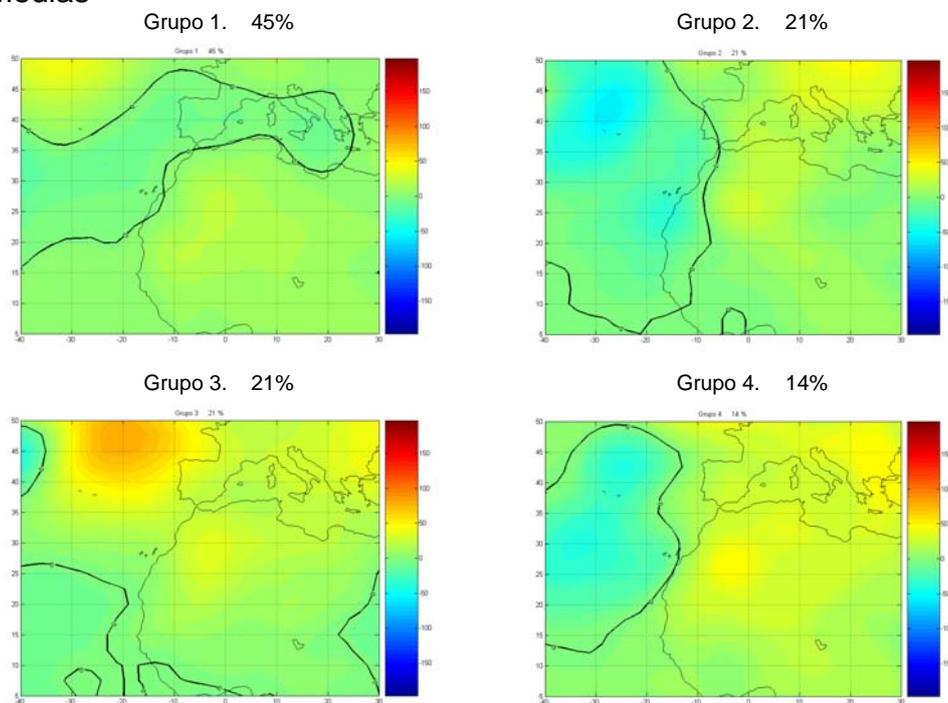


Figura A.28. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Julio. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Agosto Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

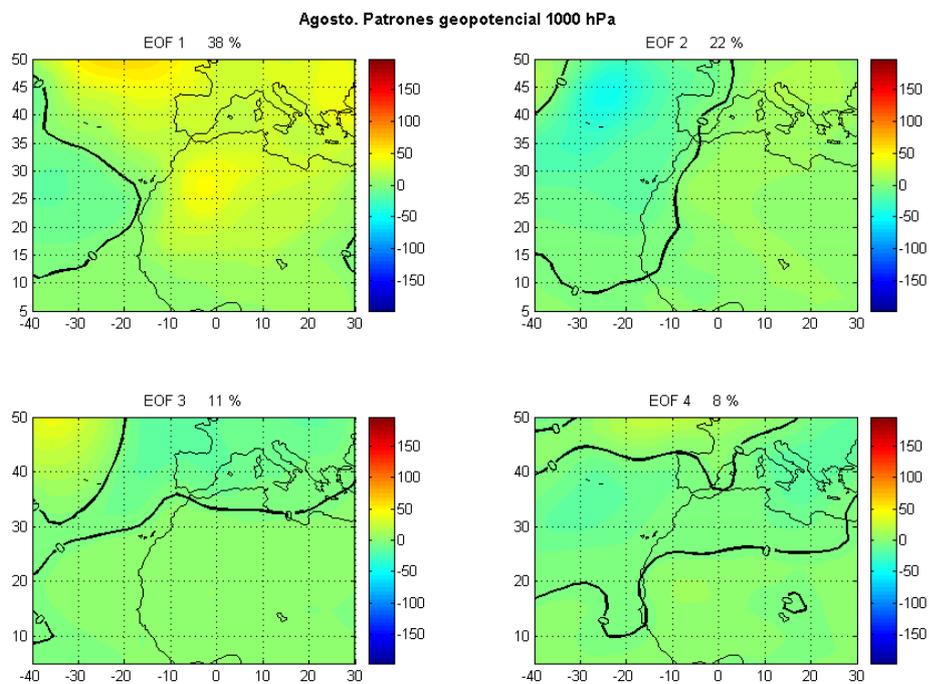
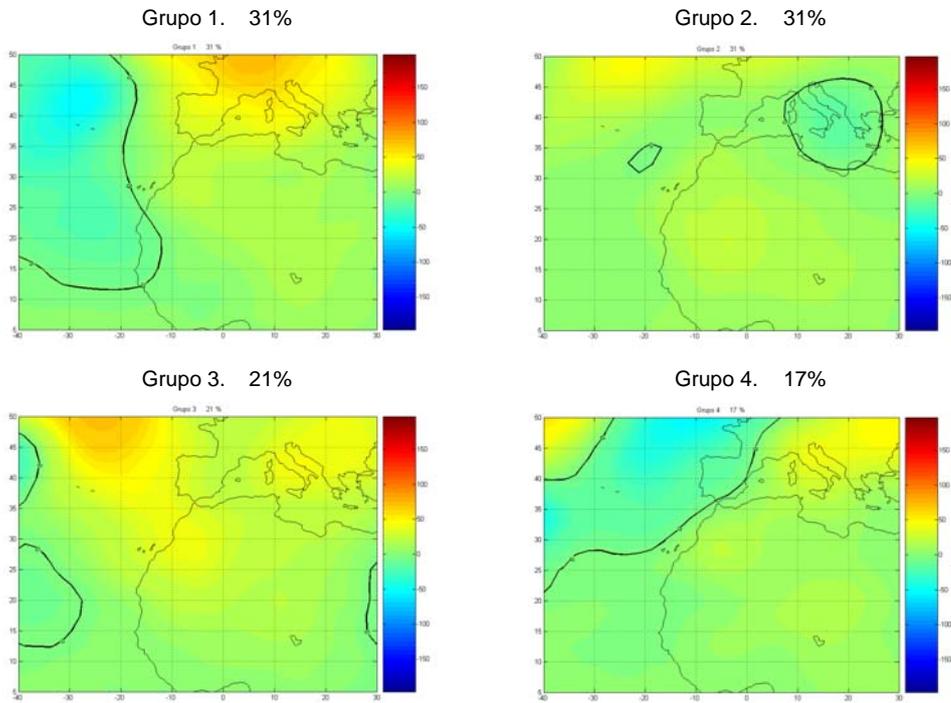


Figura A.29. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Agosto. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Agosto Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

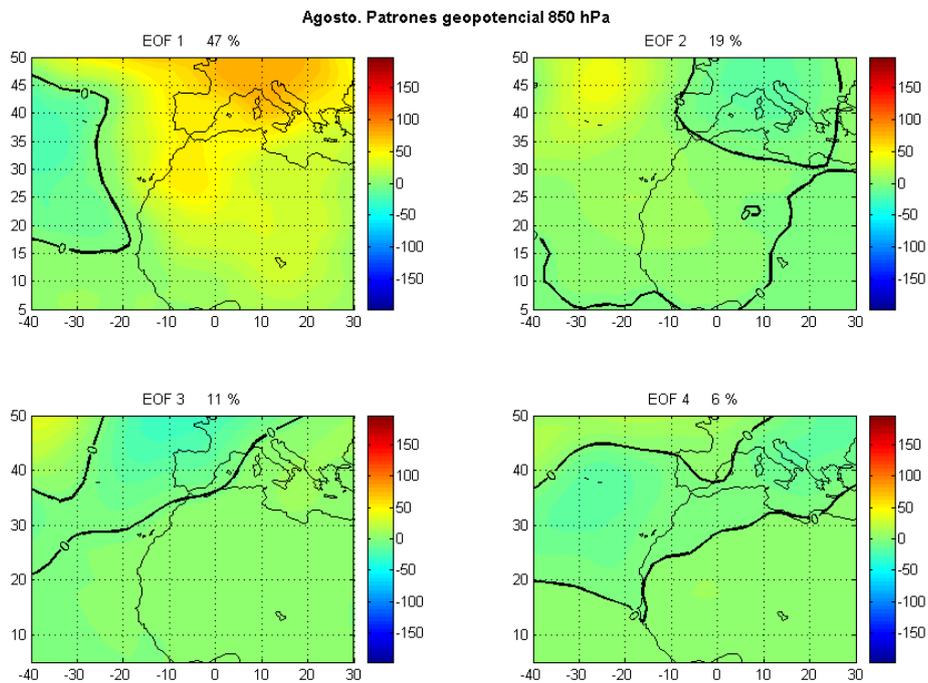
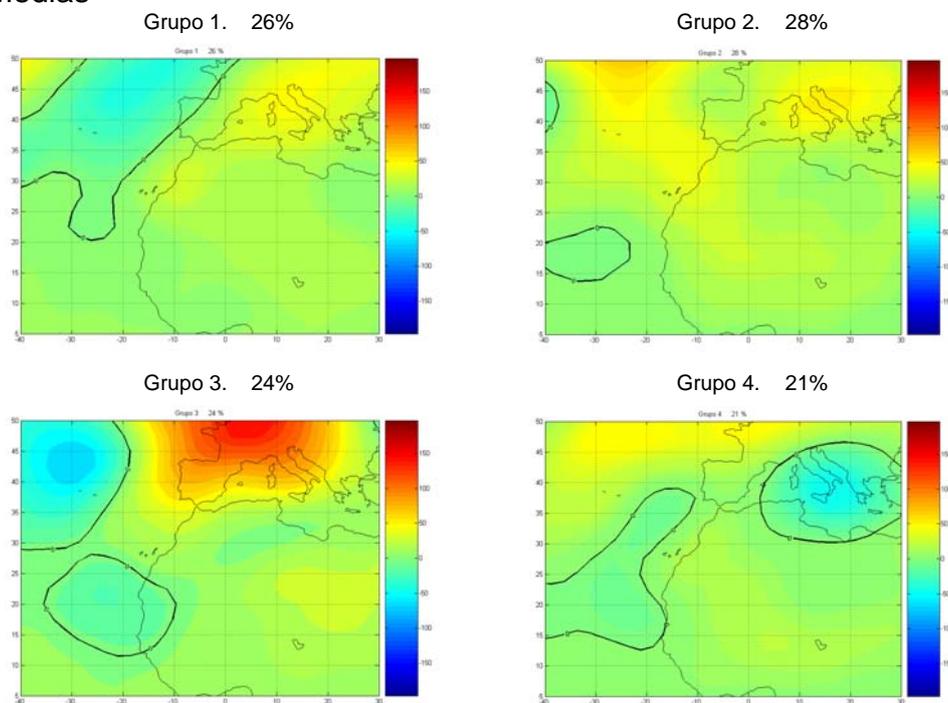


Figura A.30. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Agosto. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Agosto Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

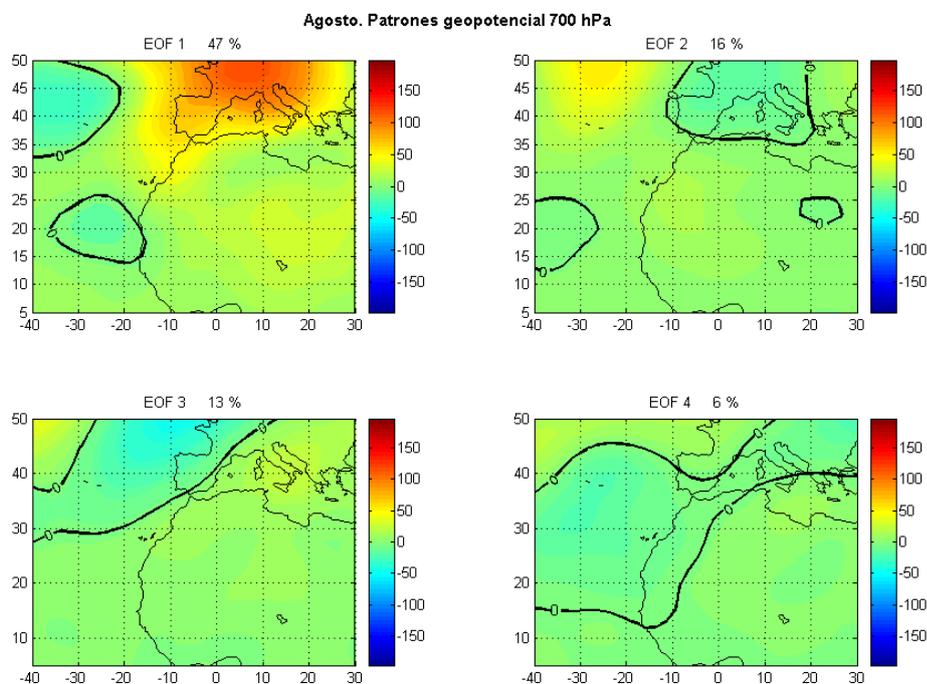
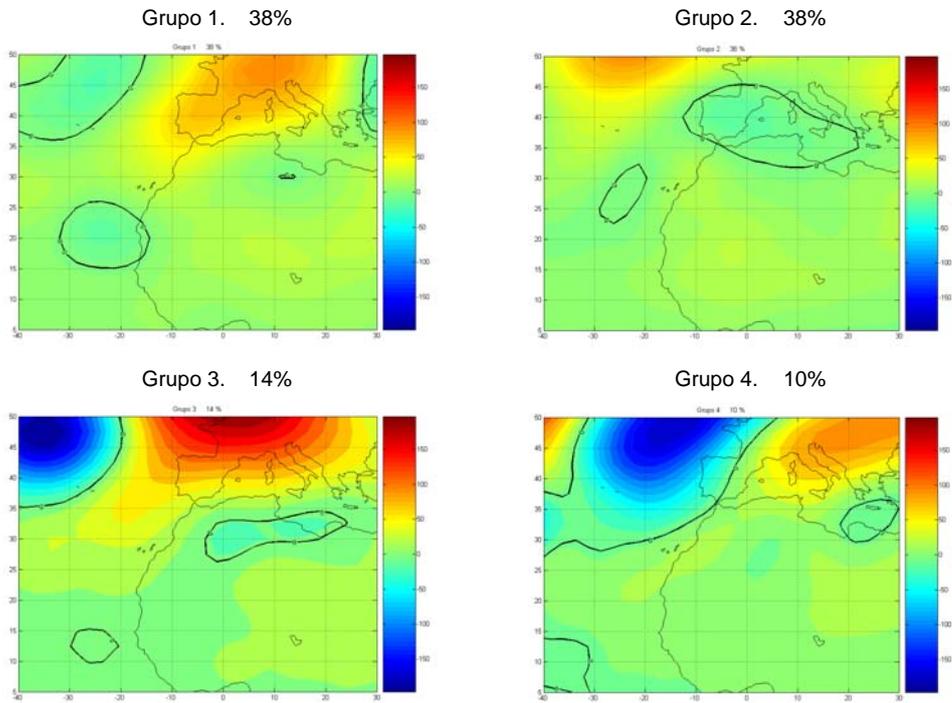


Figura A.31. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Agosto. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Agosto Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

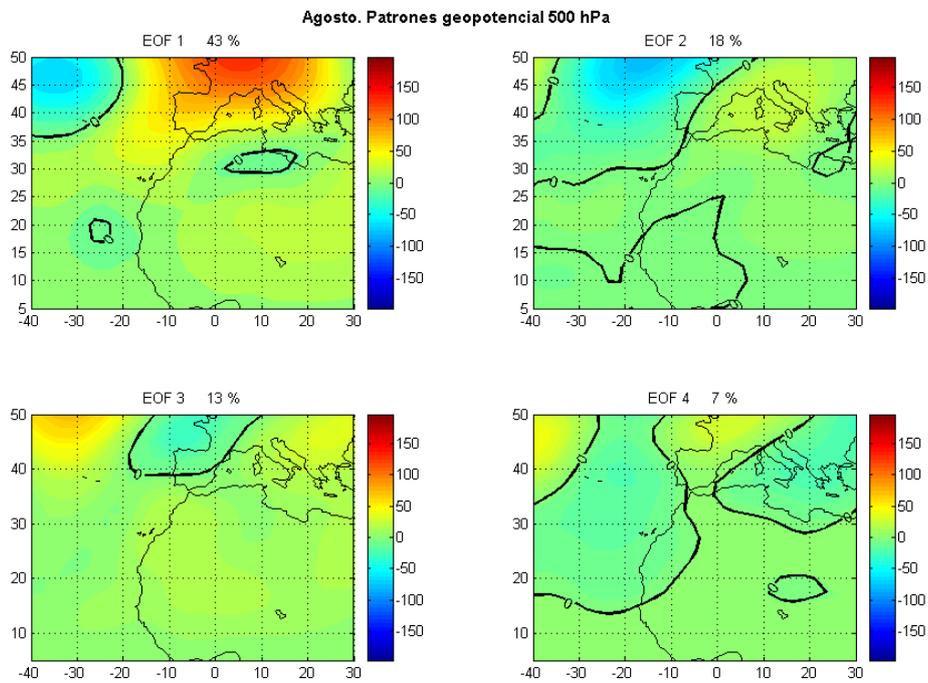
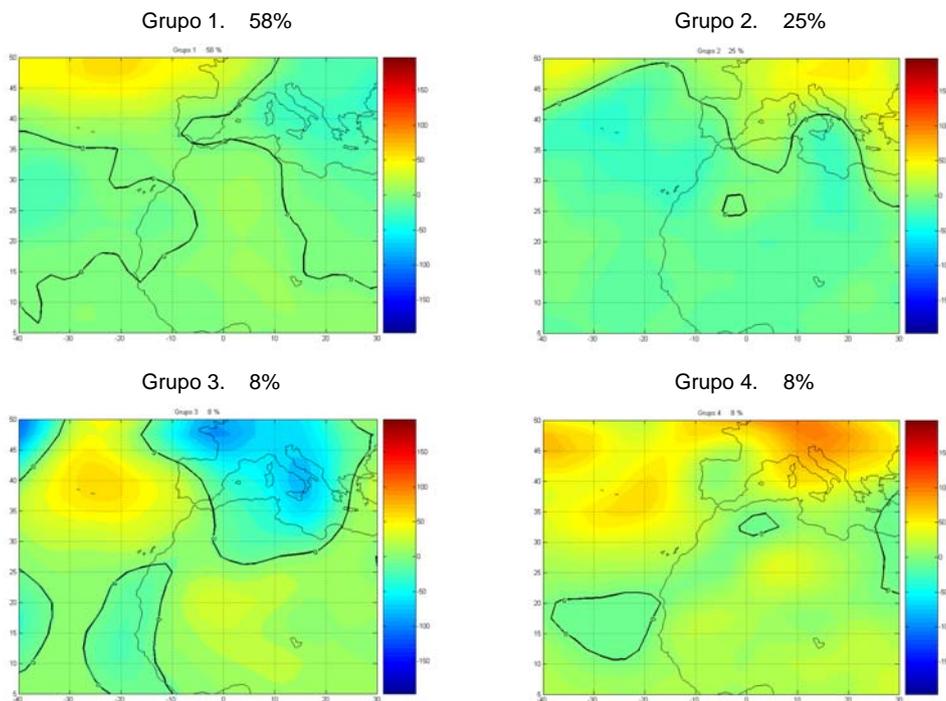


Figura A.32. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Agosto. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Septiembre Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

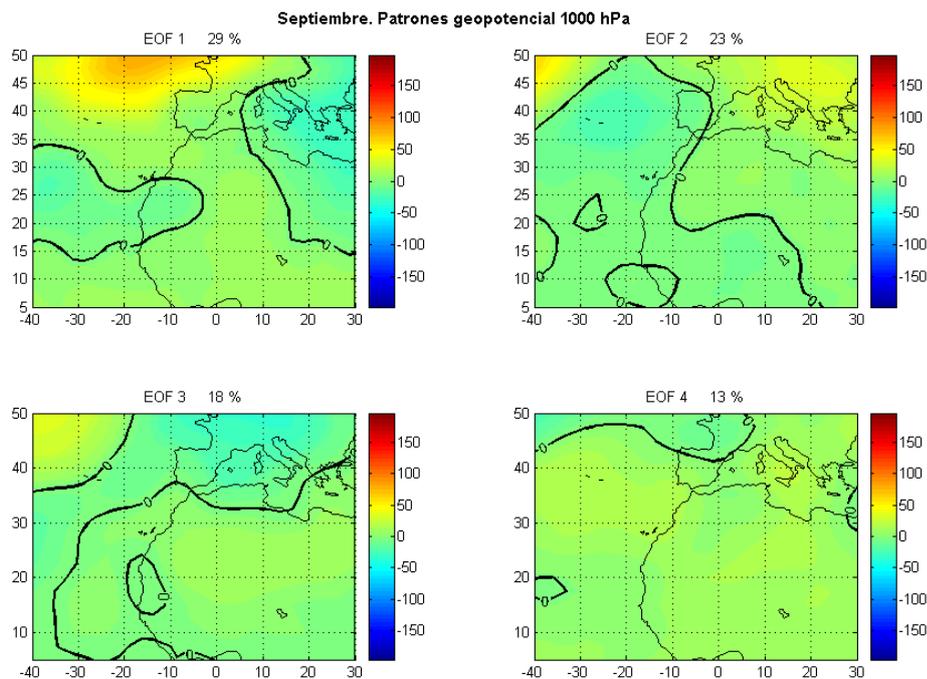
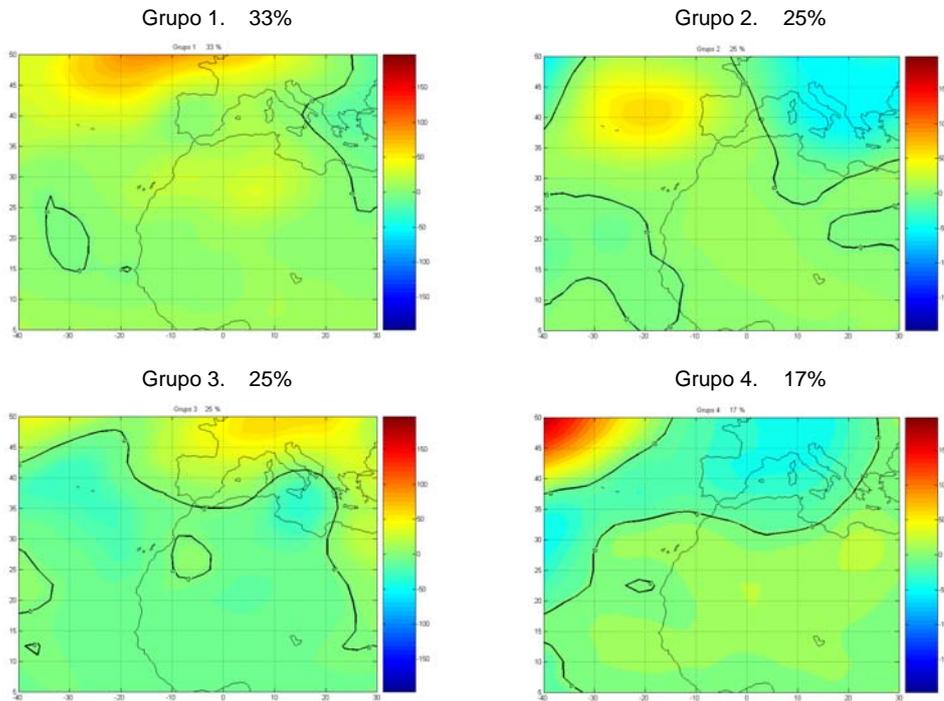


Figura A.33. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Septiembre. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Septiembre Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

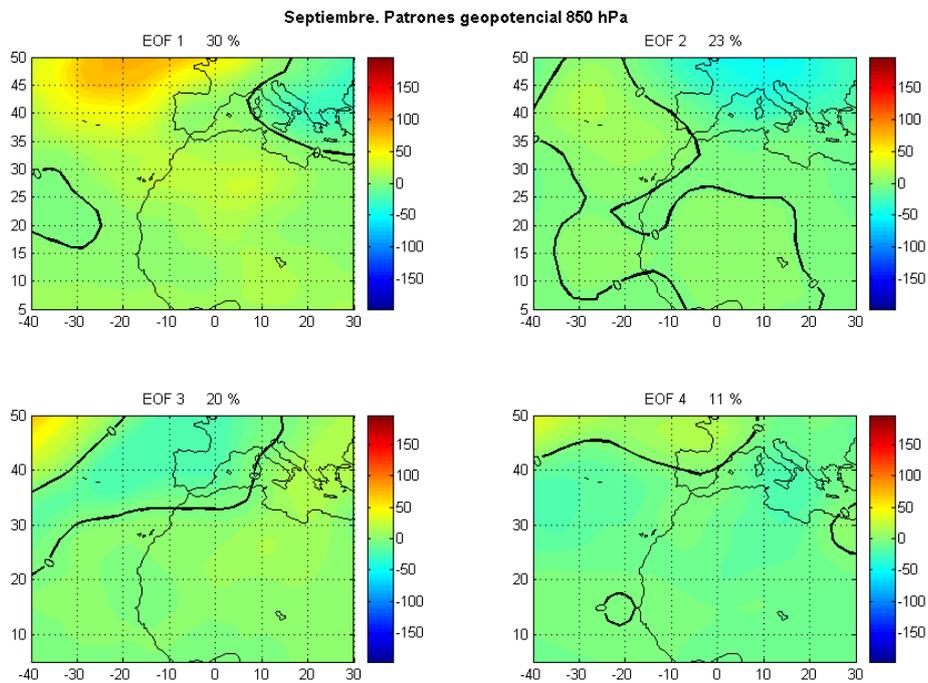
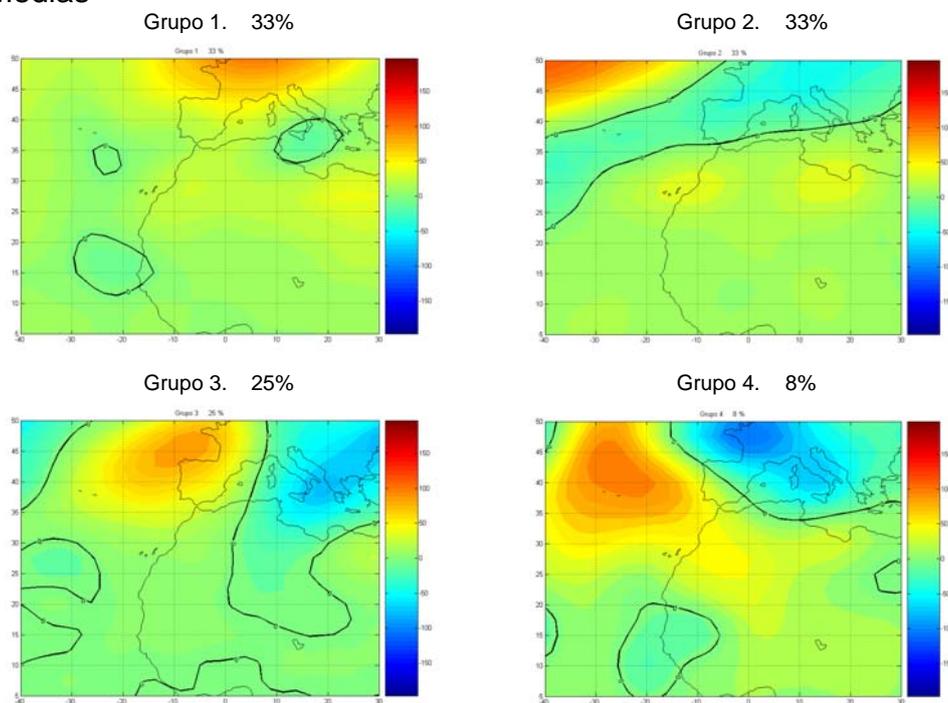


Figura A.34. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Septiembre. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Septiembre Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

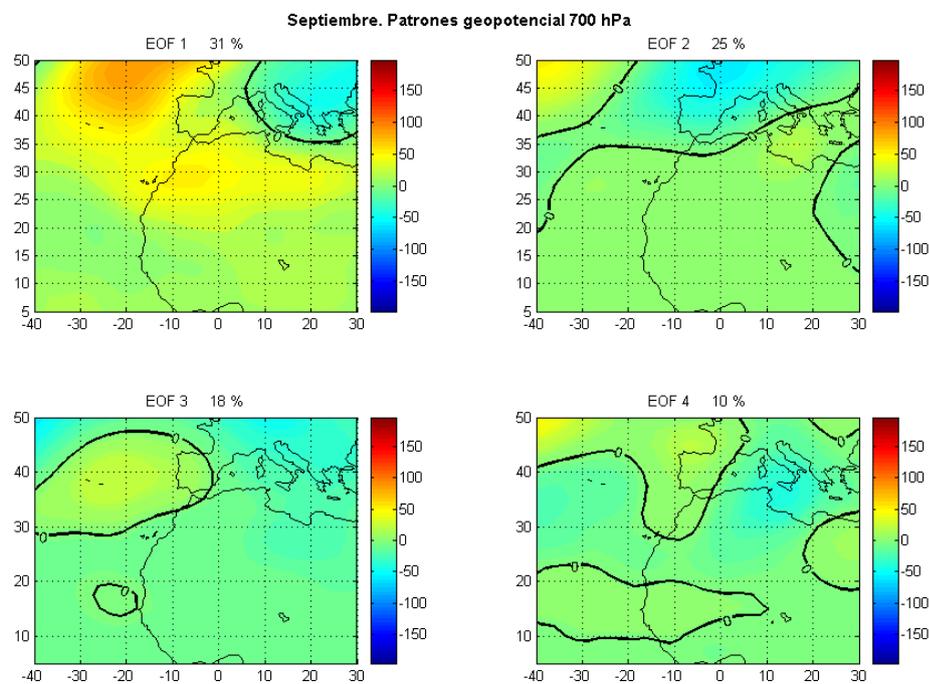
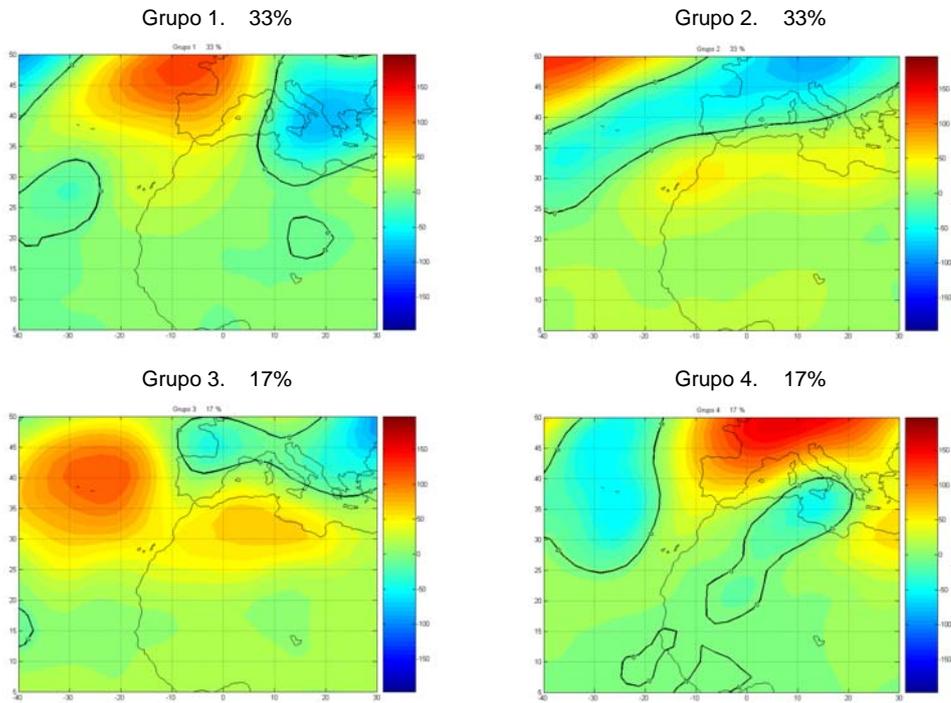


Figura A.35. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Septiembre. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Septiembre Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

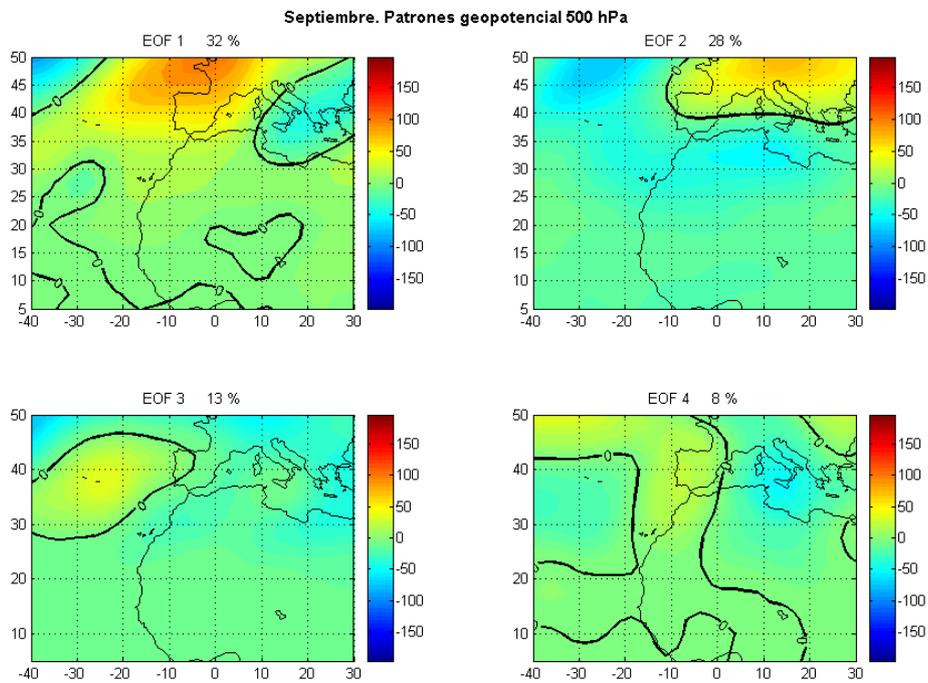
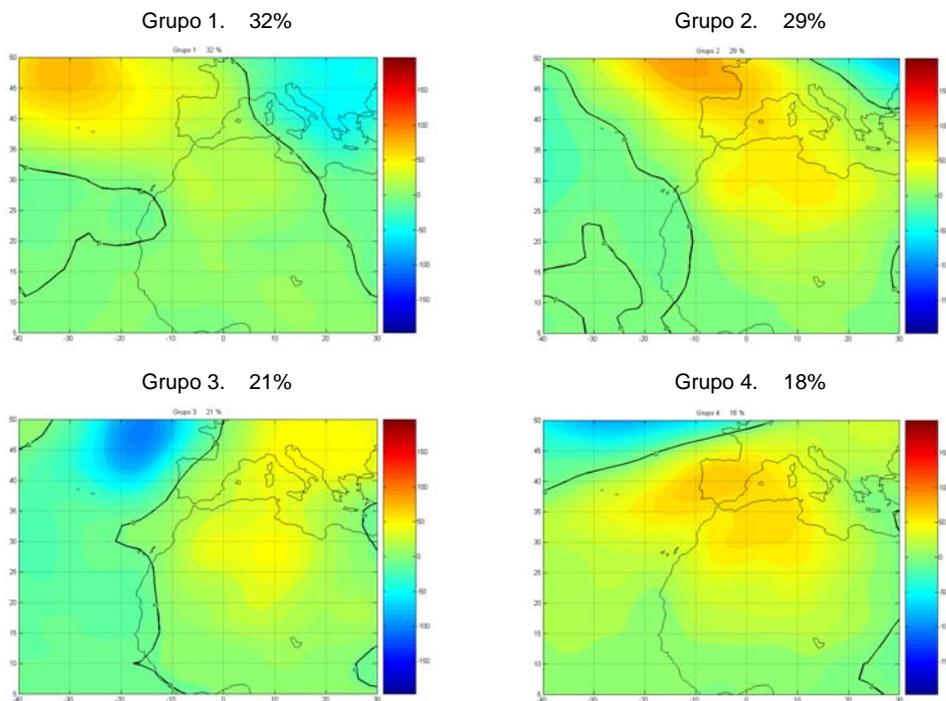


Figura A.36. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Septiembre. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Octubre Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

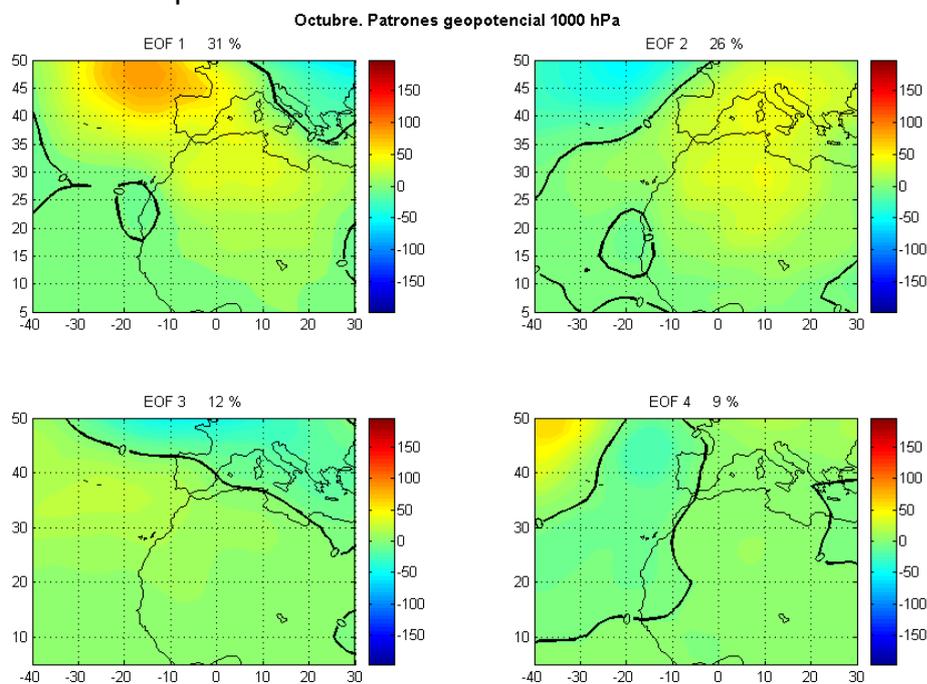
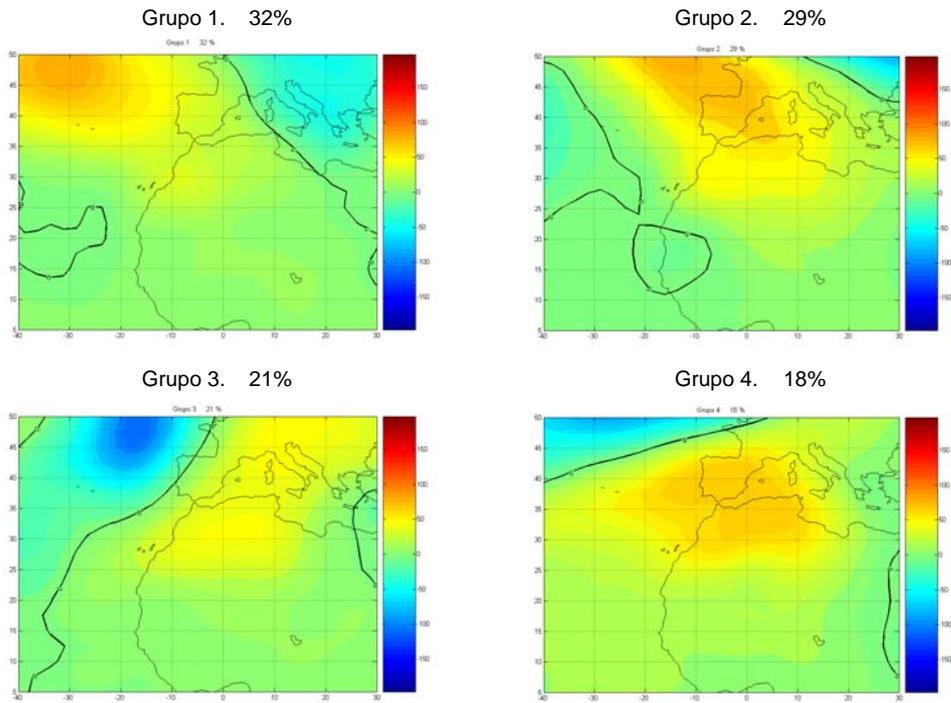


Figura A.37. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Octubre. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Octubre Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

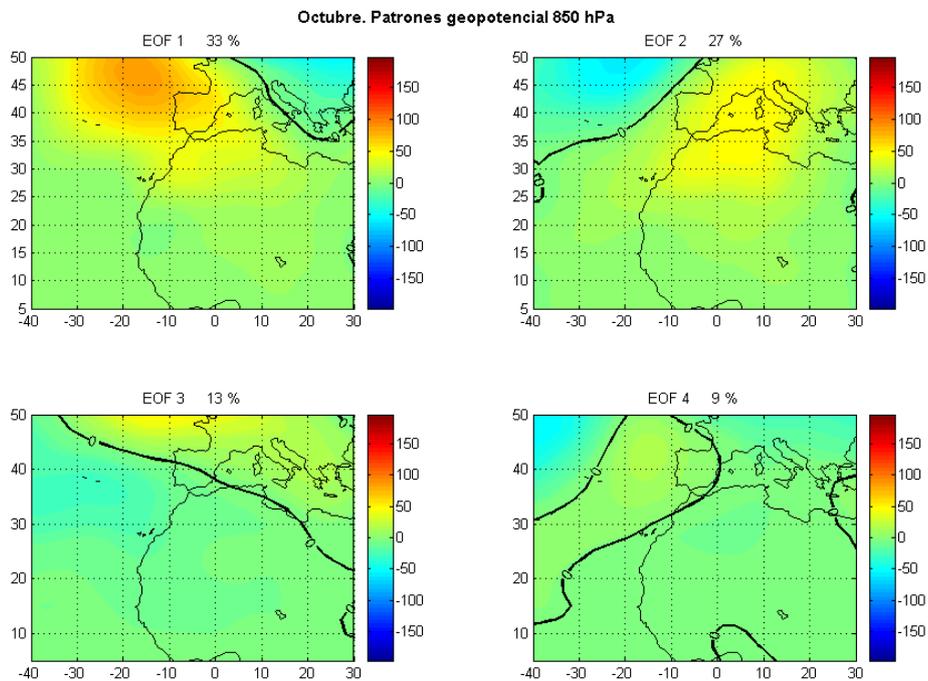
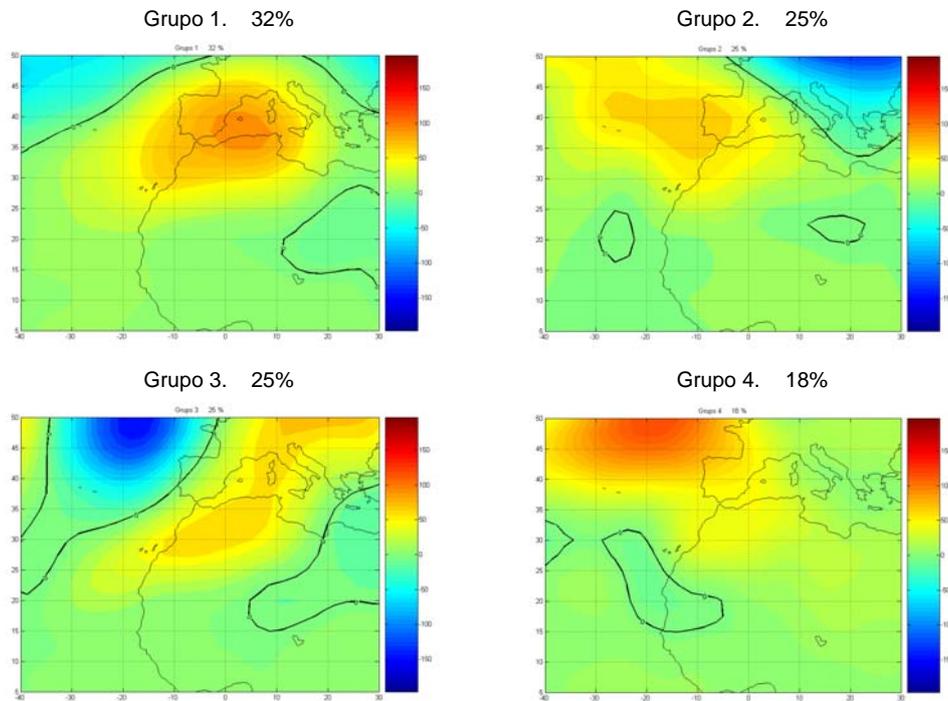


Figura A.38. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Octubre. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Octubre Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

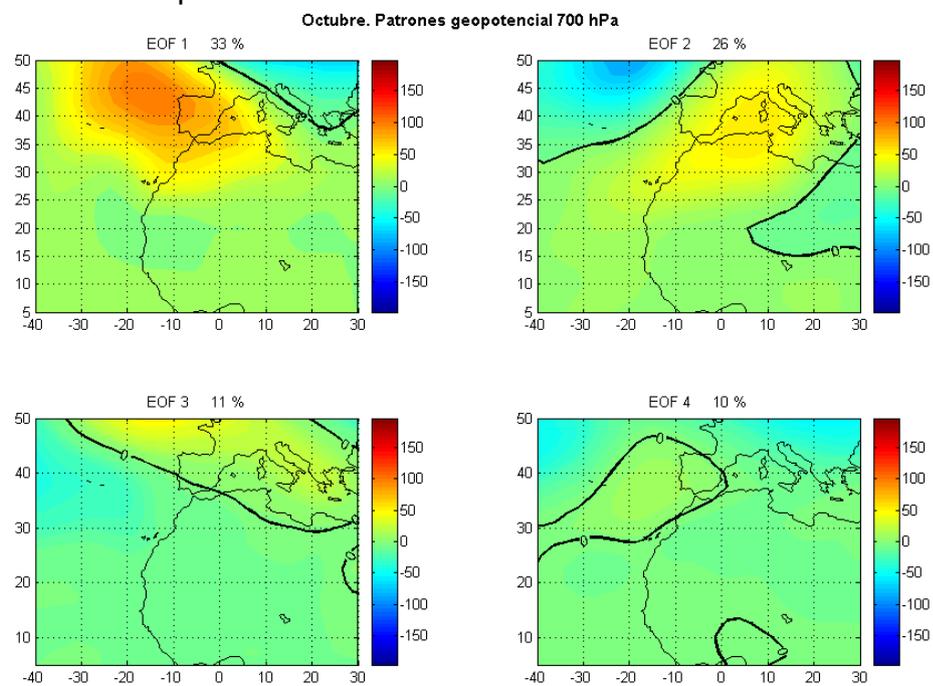
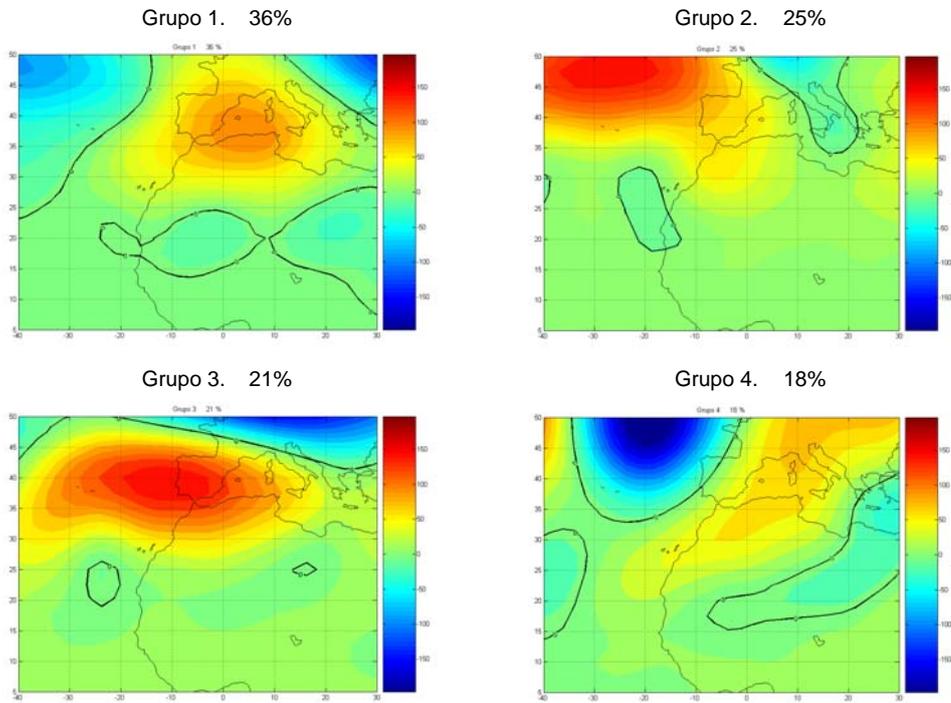


Figura A.39. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Octubre. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Octubre Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

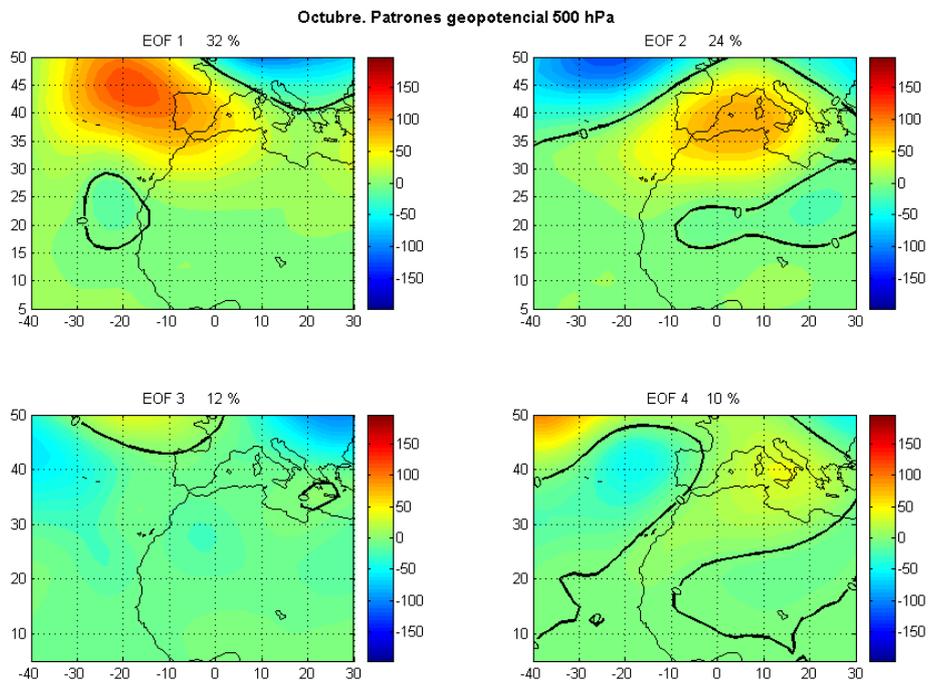
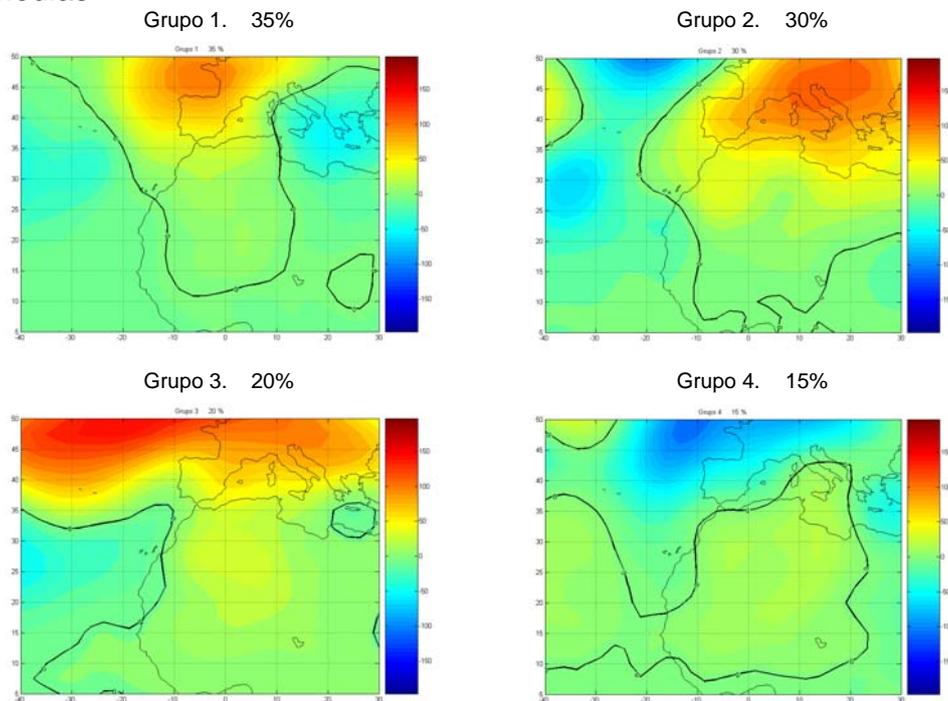


Figura A.40. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Octubre. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Noviembre Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

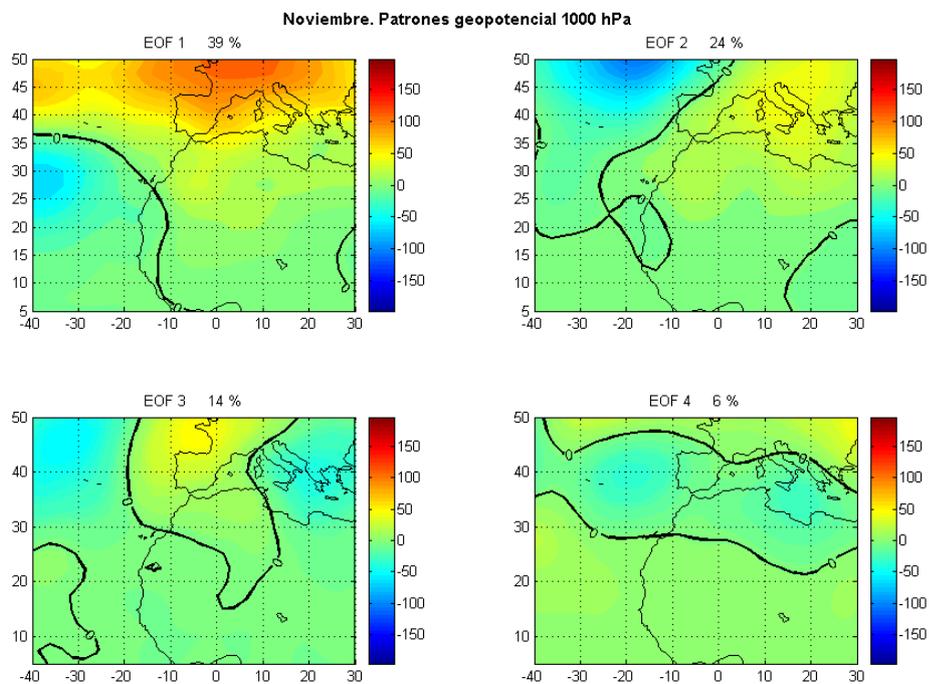
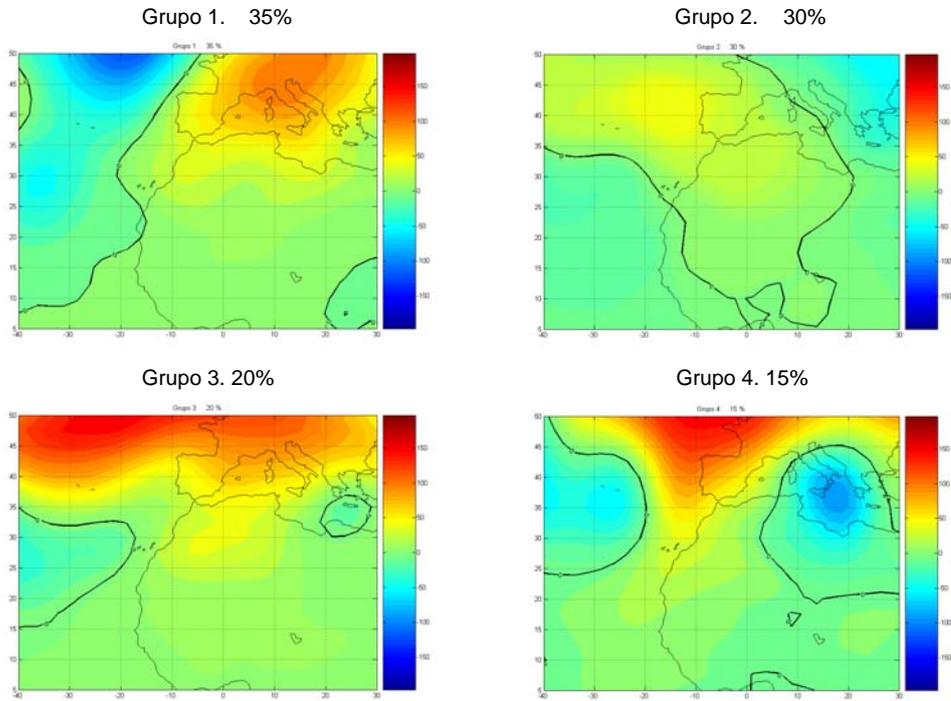


Figura A.41. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Noviembre. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Noviembre Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

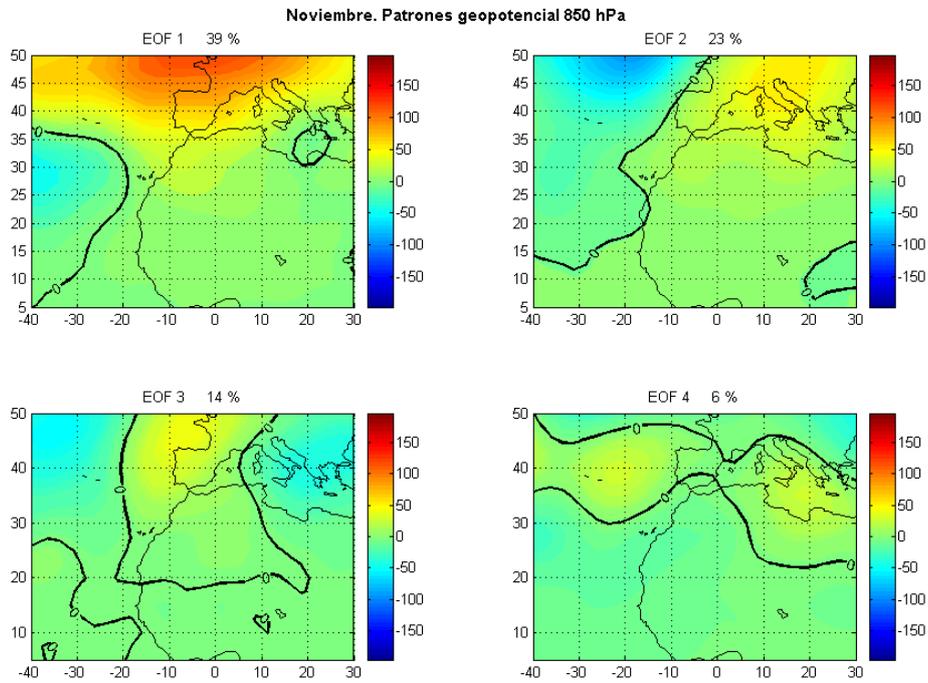
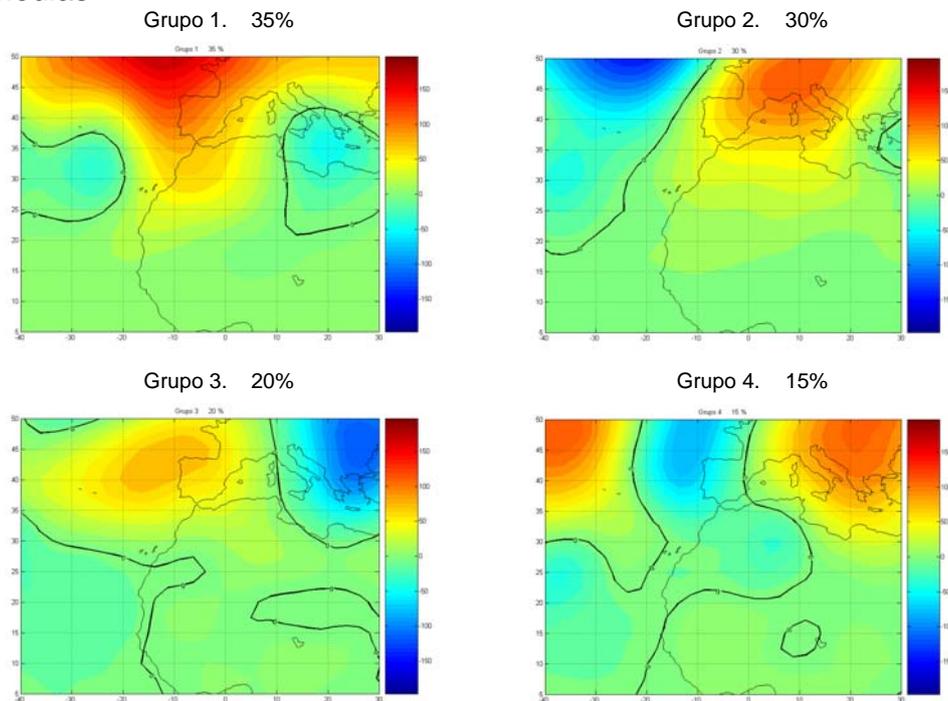


Figura A.42. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Noviembre. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Noviembre Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

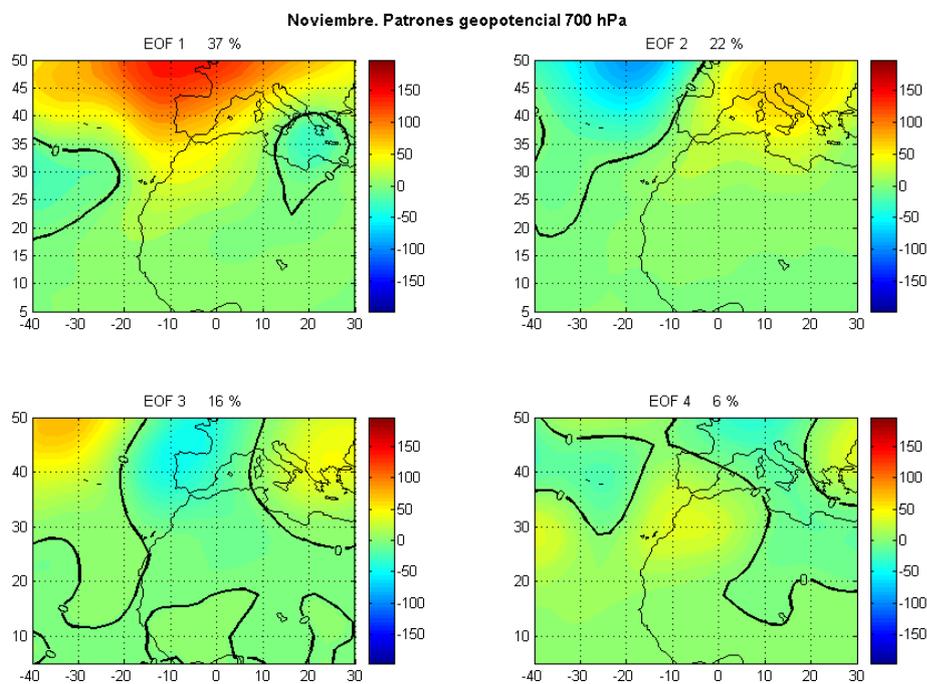
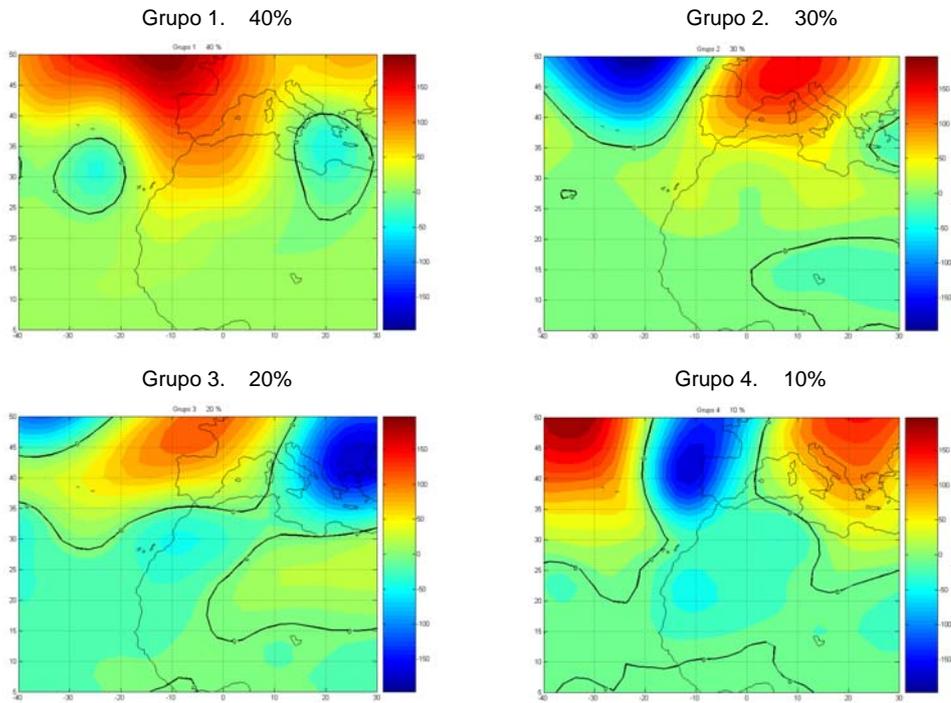


Figura A.43. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Noviembre. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Noviembre Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

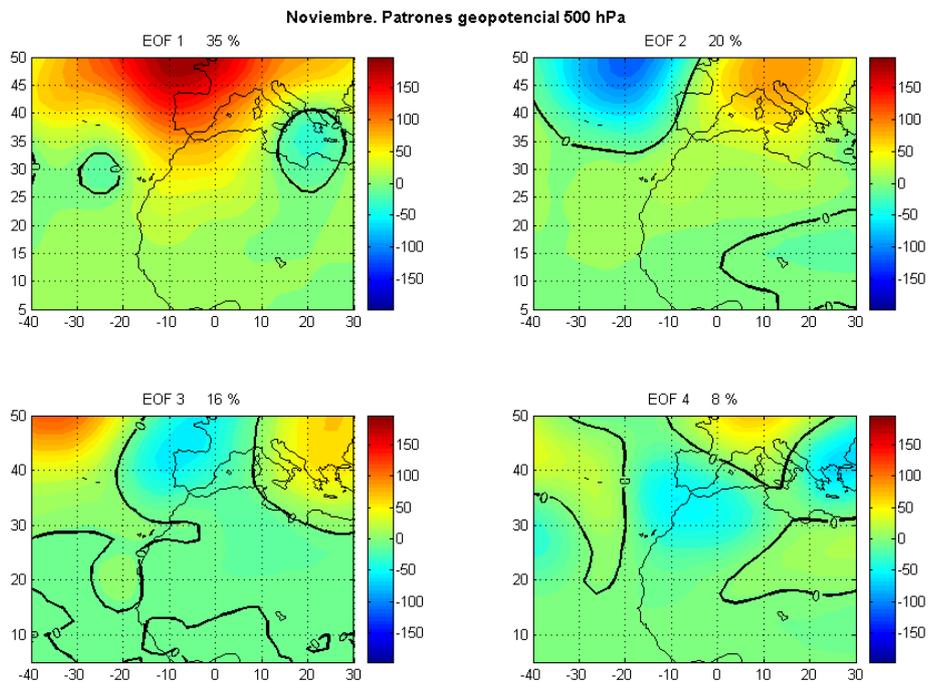
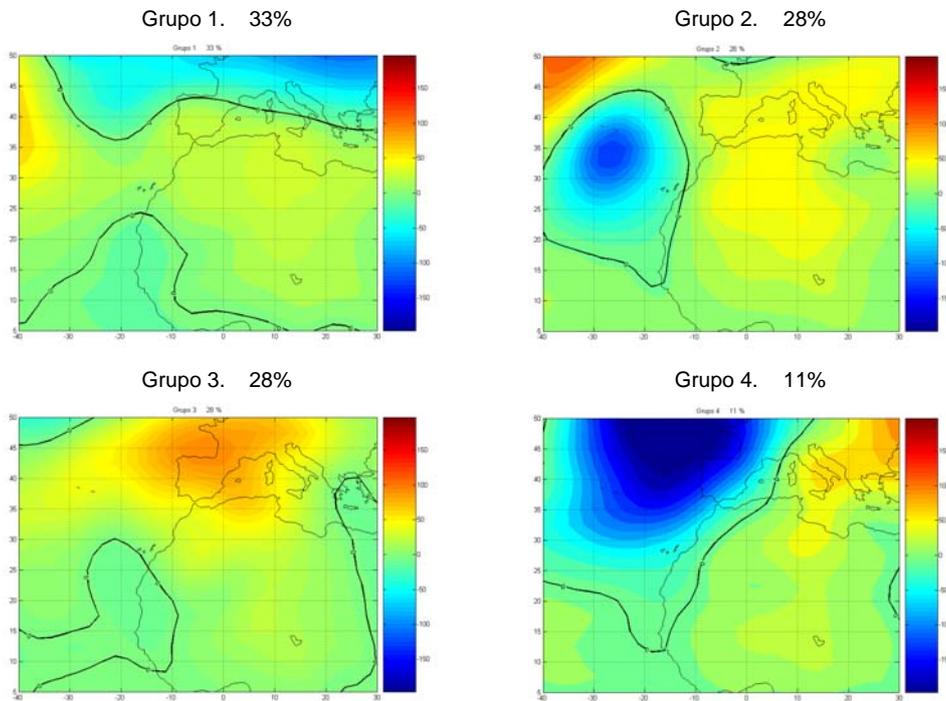


Figura A.44. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Noviembre. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Diciembre Nivel = 1000 mb

K-Medias



Componentes Principales

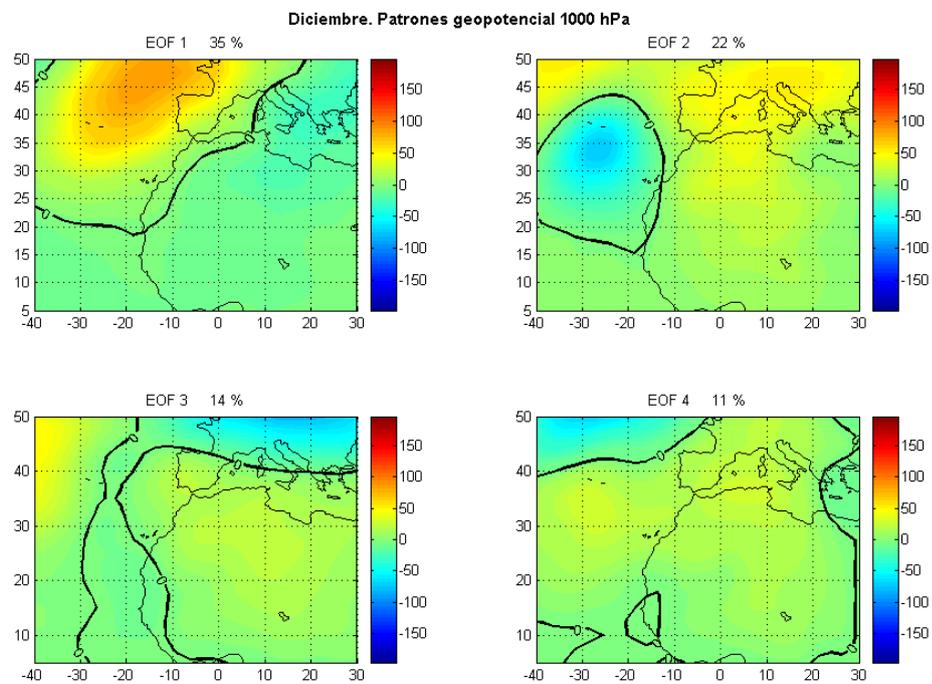
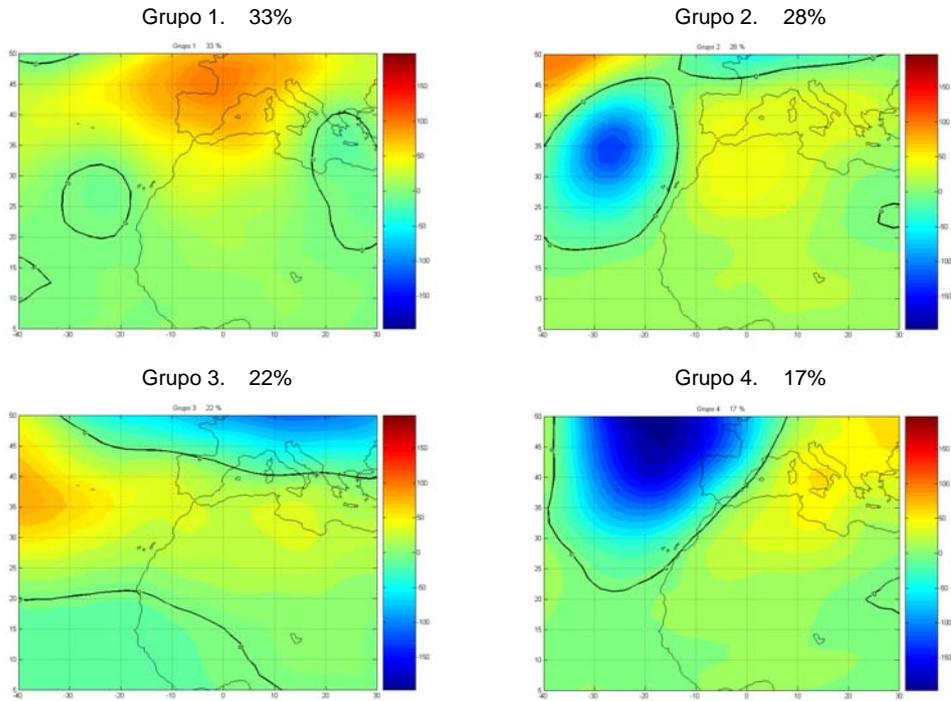


Figura A.45. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Diciembre. Nivel = 1000 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Diciembre Nivel = 850 mb

K-Medias



Componentes Principales

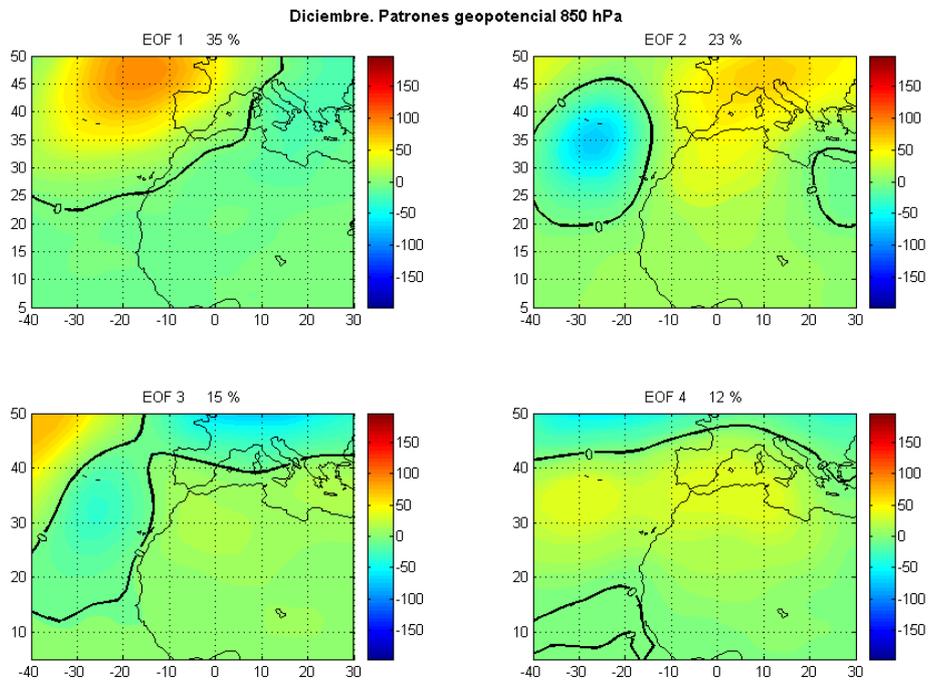
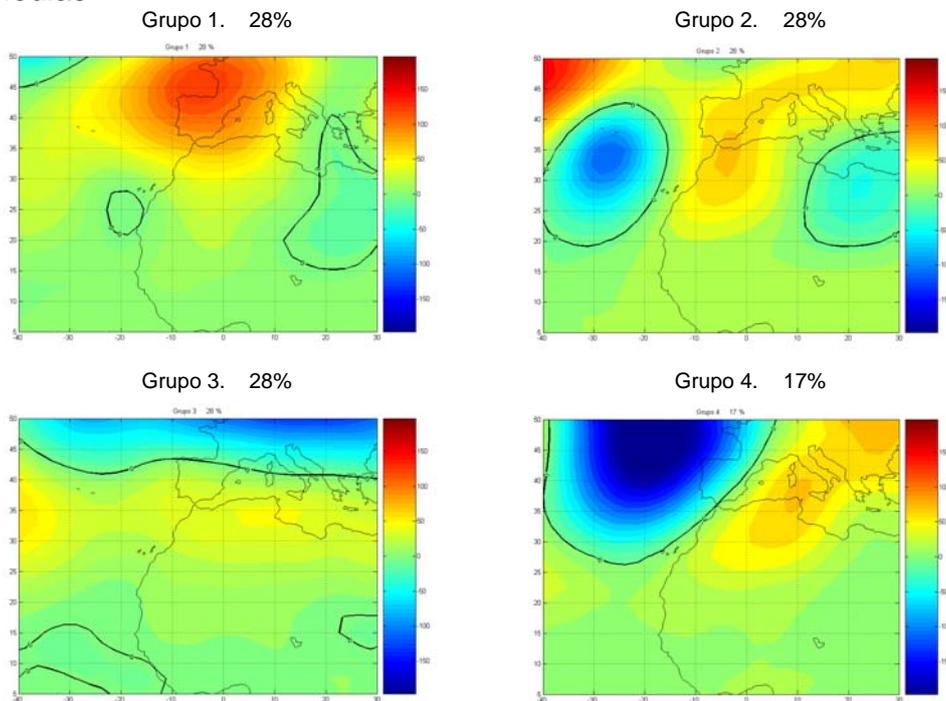


Figura A.46. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Diciembre. Nivel = 850 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Diciembre Nivel = 700 mb

K-Medias



Componentes Principales

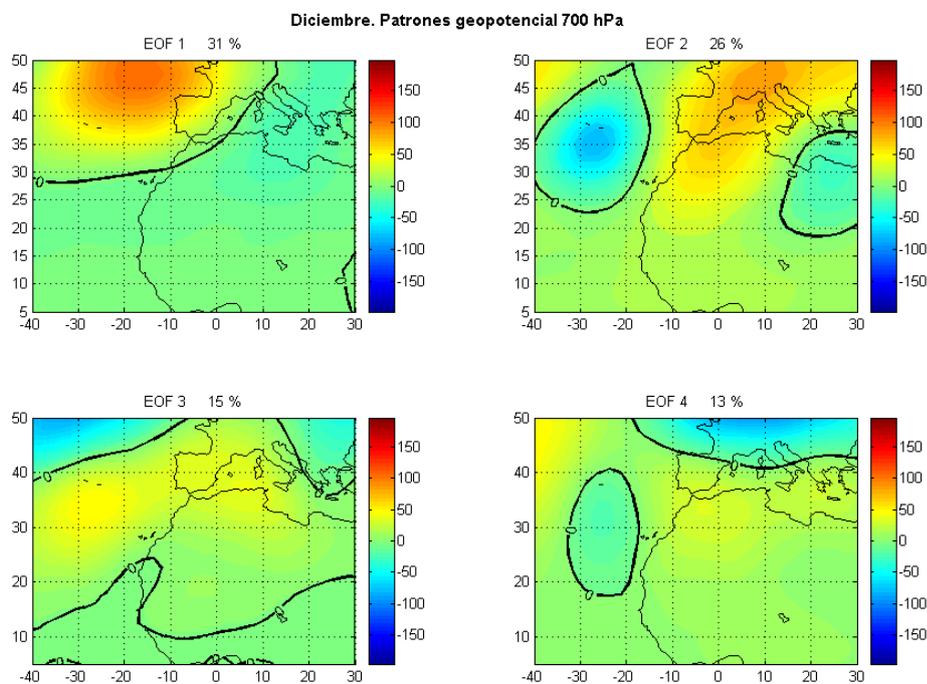
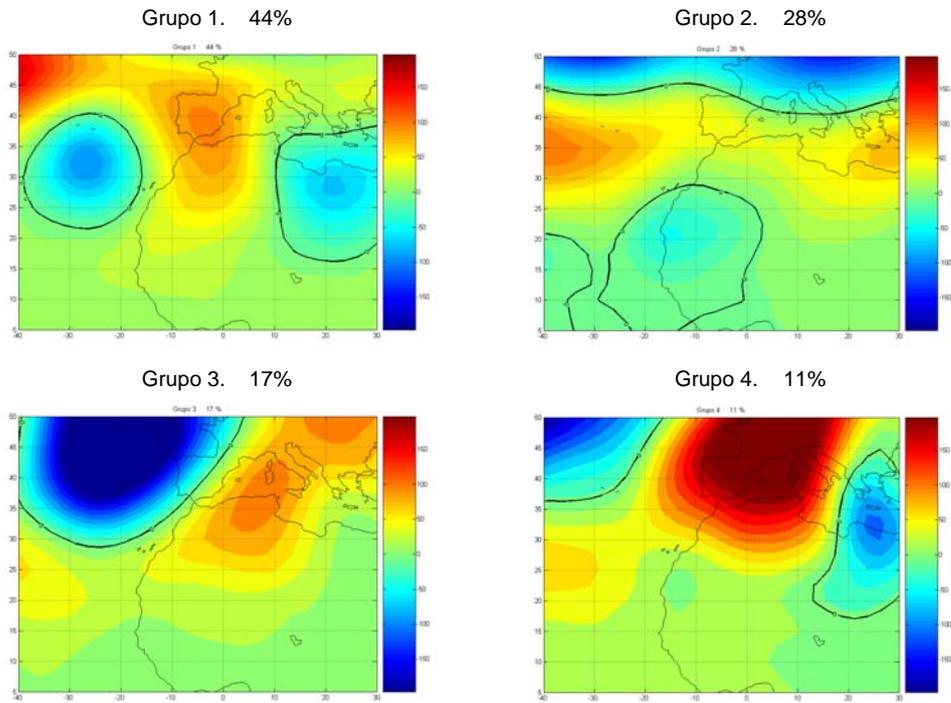


Figura A.47. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Diciembre. Nivel = 700 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

Mes = Diciembre Nivel = 500 mb

K-Medias



Componentes Principales

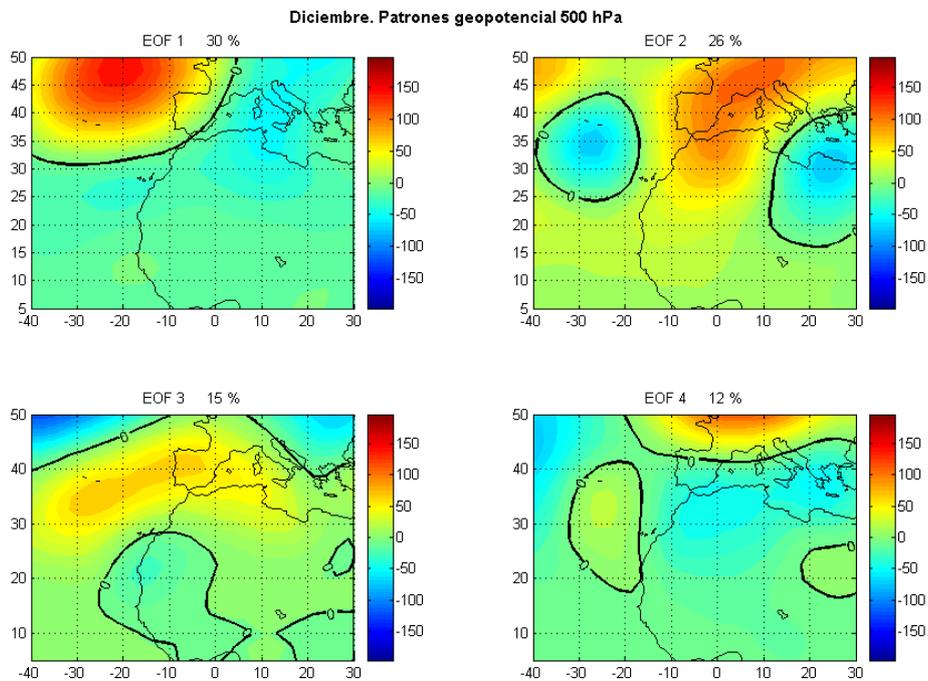


Figura A.48. Patrones de anomalías de altura geopotencial calculados por la técnica de las K-Medias y Componentes Principales (EOFs) de dichas anomalías calculadas por la Técnica de Análisis Componentes Principales. Mes de Diciembre. Nivel = 500 hPa. En cada grupo se indica el tanto por ciento de días de intrusión que le corresponden. En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente.

ANEXO B

Sistema de información sobre intrusiones de masas de aire africano en España

VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTAS SOBRE INTRUSIONES DE POLVO AFRICANO EN CANARIAS

S. ALONSO-PEREZ^{(1)*}, J. PEY⁽²⁾, E. CUEVAS⁽¹⁾, X. QUEROL⁽²⁾, A. ALASTUEY⁽²⁾,
P.M. ROMERO⁽¹⁾, A. CRISTOBAL⁽³⁾

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Meteorología, Santa Cruz de Tenerife. c/La Marina, 20 -
6ªplanta.CP 38071-Santa Cruz de Tenerife.

⁽²⁾ Instituto de Ciencias de la Tierra “Jaume Almera” (Barcelona, CSIC). c/Lluís Solé i
Sabarís, s/n. CP 08028-Barcelona

⁽³⁾ D.G. Calidad y Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente. Plaza San
Juan de La Cruz, s/n. CP 28071-Madrid.

RESUMEN-PALABRAS CLAVE

Debido a la proximidad del territorio español al continente africano, las intrusiones de masas de aire cargadas de material particulado proveniente de las áreas de Sahara y Sahel representan una fuente de contaminación natural por partículas en suspensión muy importante en España. Las implicaciones derivadas de estas intrusiones son de diversa índole y conviene que los responsables de las áreas de Medio Ambiente y Sanidad estén puntualmente informados de la predicción de dichos eventos.

Como resultado del convenio de colaboración para el estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en suspensión en España entre la D.G. de Calidad y Evaluación Ambiental, el Instituto Nacional de Meteorología (ambos del Ministerio de Medio Ambiente) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, desde diciembre de 2003 existe un sistema de alertas de las intrusiones de masas de aire africanas con elevada carga de partículas en suspensión. Se expone el método de trabajo, las herramientas que se usan y se compararán los episodios previstos con los realmente ocurridos, en busca de obtener una estimación del grado de fiabilidad de nuestras predicciones. Asimismo, se presentan datos de concentración de PM10 y PM2.5 en estaciones de fondo

situadas en la isla de Tenerife (Sta. Cruz) y en Catalunya (La Castanya, Montseny, Barcelona) tomados durante días de intrusión sahariana que han tenido lugar desde el inicio del proyecto y se comparan con los datos obtenidos durante días sin aporte sahariano.

PALABRAS CLAVE: material particulado atmosférico, polvo mineral, calidad aire, aportes africanos

B.1. INTRODUCCIÓN

En zonas desérticas concretas, y bajo determinadas condiciones meteorológicas, partículas crustales de polvo son emitidas hacia capas altas de la troposfera pudiendo llegar a viajar durante días y alcanzar zonas alejadas de la región fuente.

Desde antiguo se conocen intensos episodios de deposición húmeda (lluvias y nevadas rojas) en multitud de zonas de Europa. Ya en el siglo XIX el propio Charles Darwin contribuyó al estudio del polvo africano, cuando en 1845 escribió un artículo (1) sobre el análisis del polvo depositado y recogido en diversos veleros que navegaban cerca de las costas de África. En la misma época (2), otros autores identificaron las intrusiones de aire africano como causantes de grandes reducciones de la visibilidad en amplias zonas del atlántico ecuatorial, conocidas como “mar oscuro”. Es por ello que desde hace algunos siglos se viene observando y estudiando el efecto de estos fenómenos, si bien es cierto que no es hasta la década de 1970 cuando comienzan estudios detallados sobre transporte y efectos del polvo africano sobre otras zonas del planeta.

Los efectos del material particulado atmosférico sobre la salud humana han sido evaluados mediante estudios epidemiológicos (véase reciente evaluación de la OMS, 3), demostrándose que existe una clara relación entre los niveles de PM10 (partículas con diámetro inferior a 10 μm) y el número de muertes y

hospitalizaciones diarias debidas a afecciones pulmonares y cardiacas. Estos efectos adversos sobre la salud son la causa de que la Comisión Europea programe planes de reducción de emisiones de material particulado en suspensión, así como de sus precursores gaseosos. En Estados Unidos se han establecido planes similares a raíz de los estudios realizados por la US-EPA (4).

A la hora de evaluar la calidad del aire para el desarrollo de los citados planes hay que tener en cuenta el aporte de aerosoles de origen natural. Dada la proximidad del territorio español al continente africano, las intrusiones de masas de aire cargadas de material particulado proveniente del Sahara y Sahel representan una fuente muy importante de contaminación natural, y por tanto conviene que los gestores de Calidad del Aire y responsables de áreas de Sanidad de las diferentes Comunidades Autónomas estén convenientemente informados de la predicción de dichos eventos.

Como resultado del convenio de colaboración para el estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en suspensión en España establecido entre D.G. de Calidad y Evaluación Ambiental, el Instituto Nacional de Meteorología (ambos del Ministerio de Medio Ambiente) y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, desde Febrero de 2004 existe un sistema de alertas con el que se informa del alcance geográfico, niveles de partículas a nivel de superficie, fenómenos de deposición húmeda y seca y duración estimada previstos para cada episodio. Las predicciones se basan en los resultados de diversos modelos matemáticos que están disponibles bien a través de páginas web o a través del servidor de MclDas (Man Computer Interactive Data Access System) del INM (Instituto Nacional de Meteorología), y se informan mediante su distribución por correo electrónico. Además, se está elaborando su consulta a través de un sitio web específico.

El trabajo realizado tiene un doble objetivo: por un lado la predicción de los episodios de intrusión de masas de aire africano sobre España, y por otro el análisis detallado de estos episodios, labor que sirve para elaborar un modelo conceptual de intrusiones para cada una de las siete regiones en que se ha dividido el territorio

español. Este análisis también es muy importante a la hora de evaluar el cumplimiento los requisitos de la Directiva Europea 1999/30/EC que regula los límites máximos de valores de PM10. Si las superaciones de los valores límite de PM10 de la citada Directiva se deben a aportes naturales, la propia Directiva expone que debe justificarse científicamente dicho origen, artículo 2 (15). La presente comunicación describe los sistemas de predicción y justificación utilizados.

B.2. SISTEMA DE PREDICCIÓN

Para la elaboración de nuestras predicciones hacemos uso de resultados proporcionados por modelos numéricos de predicción y de datos de teledetección.

Los modelos consultados, de los que extraemos los mapas de predicción que se incluyen en las alertas son:

- NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System): Es el modelo de predicción de aerosoles de NRL/Monterrey (Naval Research Observatory, U.S.Navy, E.E.U.U.) De este modelo se extrae información de concentración de polvo a nivel de superficie y espesor óptico de aerosoles previstos. Los mapas de espesor óptico de aerosoles previsto generan información sobre la intrusión en todo el espesor de la atmósfera. En general se observa que los mapas previstos por NAAPS para la concentración de polvo en superficie suelen subestimar ligeramente las intrusiones. La página web de la que se obtiene esta información es la siguiente: <http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/Docs/acknowledgements.html>

- ICod/DREAM: Este modelo del Euro-Mediterranean Centre on Insular Coastal Dynamics nos proporciona información de la concentración de polvo previsto a nivel de superficie. Si se compara la predicción de ICod/DREAM con los eventos finalmente ocurridos, se tiene que este modelo es más fiable en su predicción que el modelo NAAPS para este mismo nivel debido a la escala superior utilizada. La página web de la que se obtiene esta información es la siguiente: www.icod.org.mt/.

- SKIRON: La Universidad de Atenas, a través de este modelo de predicción de polvo (5), proporciona tres resultados útiles para elaborar las predicciones. Por un lado ofrece mapas de carga total de polvo previsto. El hecho de que se trate de predicción de carga total, y no de carga a nivel de superficie, limita a la hora de comparar con los mapas de los modelos anteriormente citados. En todo caso, estos mapas de carga total son útiles a la hora de verificar cuáles son las zonas afectadas por carga de polvo en suspensión a todos los niveles y además permiten ver cómo se desplaza la capa de polvo. Este modelo facilita mapas previstos de deposición húmeda y seca, muy útiles a la hora de elaborar la predicción. Esta información está disponible a través de la web: <http://forecast.uoa.gr>.

- HIRLAM (High Resolution Limited Area Model): Este modelo es el producto de un proyecto de colaboración entre ocho institutos meteorológicos europeos, entre ellos el INM. HIRLAM ofrece predicciones de diversos campos meteorológicos útiles para nuestro estudio. Este modelo se ejecuta específicamente para predicciones y validaciones. Tenemos acceso a él a través del sistema McIDAS.

- Cálculo de retro-trayectorias HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory): Las retro-trayectorias se calculan específicamente para diferentes zonas de España (Figura 1) por HYSPLIT (6) y sirven para determinar la zona de partida de las masas de aire que llegan, en una fecha determinada, a un lugar concreto. Esta información puede obtenerse en la página web: www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html.

Los datos e imágenes satélite se utilizan para elaborar la predicción y validar posteriormente el episodio, así como para conocer las regiones fuente. Para ello se utilizan las siguientes herramientas:

- METEOSAT (Meteorological Satellite): Diariamente almacenamos imágenes en canales visible, infrarojo y vapor de agua tomadas por este satélite de la ESA (Agencia Espacial Europea). Para adquirirlas usamos el sistema McIDAS, pudiendo

analizarlas detalladamente dentro de este entorno, que además permite aplicar filtros y realizar operaciones con ellas si fuese necesario.

- MSG (Meteosat de Segunda Generación): Satélite europeo (ESA) que proporciona imágenes de la Tierra en 12 canales de diferente longitud de onda y resolución de hasta 1 Km. Se tiene acceso a los datos de MSG a través del sistema McIDAS. Este satélite permite una óptima monitorización de aerosoles para detectar polvo proveniente de África, haciendo uso de los canales VIS 0.6/0.8 μm . Pueden realizarse operaciones entre canales para hacer uso de imágenes RGB.

- SEAWIFS (Sea-viewing Wide Field of view Sensor): instrumento a bordo del satélite SeaStar (NASA). Proporciona imágenes diarias de diferentes zonas geográficas (7): Con estas imágenes son fácilmente detectables las intrusiones de polvo cuando se producen sobre el mar. Esta información se encuentra disponible a través de la web: <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/banner.html>

- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer): diariamente se consulta la base de datos de imágenes proporcionadas por los satélites Terra/MODIS y Aqua/MODIS (NASA) en busca de aquellas en las que España sea visible. Estas imágenes son de gran utilidad a la hora de confirmar intrusiones de polvo desde el Norte de África.

- Índice AI del TOMS (8): es un producto derivado de las observaciones del satélite TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). El AI (Aerosol Index) es un índice semi-cuantitativo de la absorción columnar por aerosoles a 0.34 μm y proporciona una indicación de la carga de aerosoles en la atmósfera. Se calcula como el contraste espectral entre los canales de 340 y 380 nm, y depende del espesor óptico de aerosoles, la altura de la capa de aerosoles, las propiedades ópticas de estos y el ángulo de visión del instrumento. Hay que tener en cuenta que, cuando la capa de aerosoles se encuentra por debajo de un kilómetro de altura (aproximadamente), el índice AI no es capaz de indicarnos su presencia. Esta información se encuentra disponible a través de la web: <ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/tmp/meduse>.

B.3. METODOLOGÍA

Este sistema de alerta está basado principalmente en la información obtenida mediante los modelos numéricos citados de carga de polvo prevista a nivel de superficie y el seguimiento de la capa de polvo a través de teledetección. Debido a la gran diversidad geográfica y climática existente en España, para informar sobre las alertas el territorio ha sido dividido en siete zonas geográficas (Figura B.1), para cada una de las cuales se hace un análisis exhaustivo de la concentración de polvo prevista y la procedencia de la masa de aire que llega a la zona.

Diariamente son almacenados los datos más recientes proporcionados por todas las herramientas citadas, elaborando así un banco de datos con toda la información disponible. Se intenta tener la actualización de los datos a primeras horas de la mañana, para poder elaborar y distribuir la predicción lo antes posible.

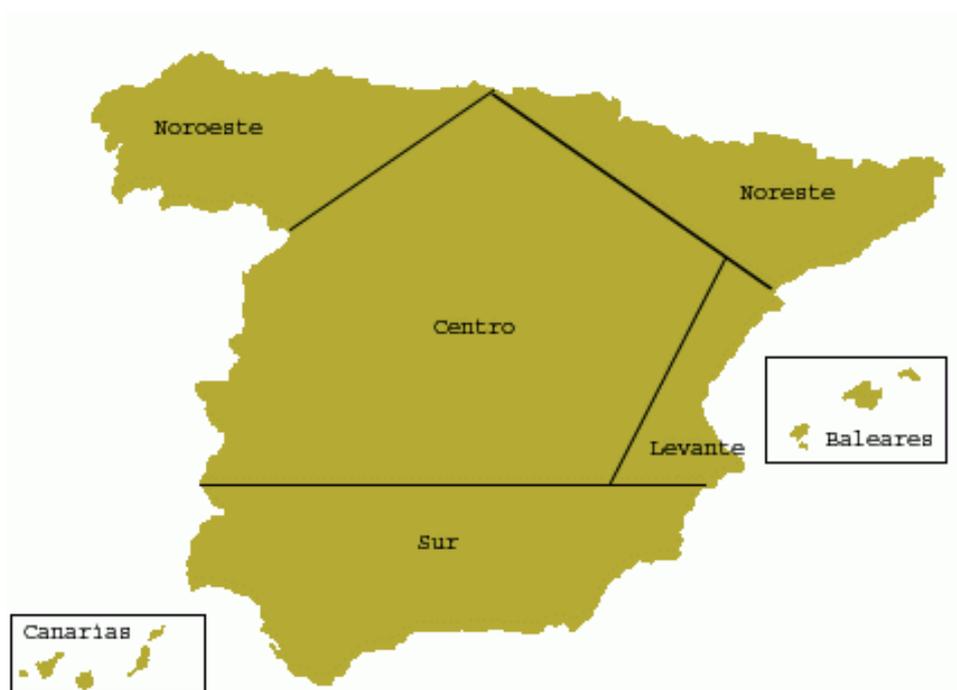


Figura B.1. Mapa de la Península Ibérica, Baleares y Canarias, dividido en las siete zonas de estudio.

El criterio seguido a la hora de determinar si se debe alertar de intrusión de masas de aire de procedencia africana en alguna de las zonas es el siguiente: si al menos dos de los modelos consultados de carga de polvo en superficie coinciden en prever una concentración superior a los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se alerta de posible episodio africano. La experiencia adquirida muestra que cuando la simulación SKIRON prevé deposición seca o húmeda, la intrusión efectivamente ocurre, con lo cual se tiene gran confianza en este modelo a la hora de elaborar una predicción.

Los mapas previstos por NAAPS para el índice de espesor óptico de aerosoles indican cuándo y dónde habrá intrusión en todo el espesor de la atmósfera.

Dado que los modelos matemáticos tienen su incertidumbre asociada, es importante hacer un seguimiento del polvo en suspensión, que permita identificar zonas fuente con altas concentraciones de material crustal, así como apreciar en qué dirección viaja la capa de polvo. Para ello usamos datos de teledetección proporcionados por varios satélites que han sido citados en el apartado anterior.

Con la ayuda del sistema McIDAS, diariamente almacenamos imágenes en canales visible, infrarrojo y vapor de agua del satélite METEOSAT, así como una imagen cada quince minutos de los 12 canales de diferente longitud de onda y resolución de hasta 1 km del satélite MSG.

Los datos del satélite MSG son una herramienta especialmente potente y que todavía está en fase de desarrollo, aunque ya está operativa. Este satélite permite una óptima monitorización de aerosoles para detectar polvo proveniente de África, haciendo uso de los canales VIS 0.6/0.8 μm

Tanto en el caso de METEOSAT como en el de MSG, se visualizan estas imágenes dentro del entorno de McIDAS, pudiendo analizarlas detalladamente, aplicando filtros y realizando operaciones con ellas si fuese necesario. En el caso de MSG es muy útil realizar operaciones entre canales para hacer uso de imágenes RGB. Para la detección de material particulado proveniente de Sahara y Sahel son

especialmente interesantes las operaciones entre los canales VIS0.6/NIR1.6/IR3.9 y IR1.6/VIS0.8/VIS0.6.

La identificación del escenario meteorológico que da lugar a un episodio de intrusión es inferida a partir de los mapas de diversos campos meteorológicos de interés para este estudio, proporcionados por la ejecución del modelo HIRLAM, y a los que se tiene acceso gracias al sistema McIDAS. En la predicción que se distribuye habitualmente se adjuntan los mapas de viento previstos por este modelo para los niveles de superficie, 850 y 700 mb.

Una vez realizada la predicción, se elabora un informe en el que se incluye la información más relevante al respecto, que a continuación es distribuida para que esté a disposición de todas las personas interesadas.

Desde Febrero de 2004, se ha distribuido el producto del trabajo realizado a través de correo electrónico con dos documentos adjuntos. Uno de estos documentos es la predicción, mientras que el otro documento consiste en una serie de tablas mensuales de episodios ocurridos para cada zona de estudio. Además de los episodios de intrusión de masas de aire africano, en estas tablas se informa de los episodios de contaminación debidos a altas concentraciones de sulfatos y a combustión de biomasa (basándose en el modelo NAAPs en estos dos casos).

Como se ha comentado, en un futuro próximo se pretende distribuir la información a través del sitio web en elaboración (Figura B.2).

Por último, en informes finales anuales se aporta confirmación de episodios mediante medidas de niveles de PM10 en estaciones de fondo regional registradas por diferentes redes de control de calidad del aire.

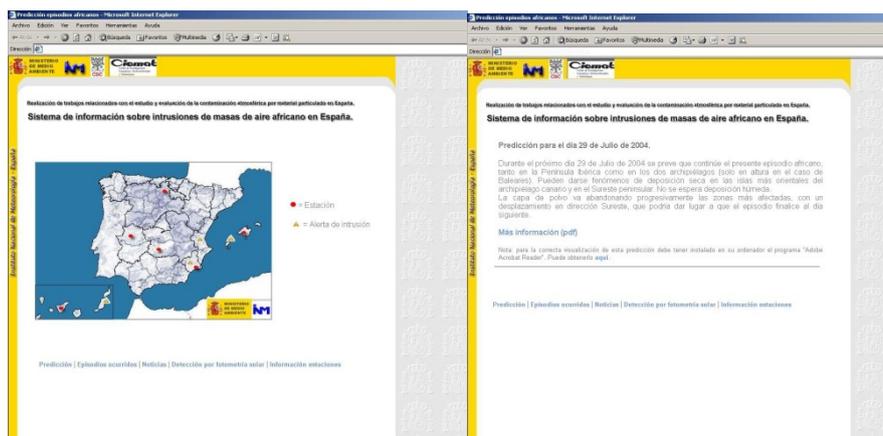


Figura B.2. Página inicial de nuestro sitio web (izquierda) y sección de predicciones (derecha).

B.4. NIVEL DE CONFIANZA DEL SISTEMA DE PREDICCIÓN

Para cualquier sistema de predicción es importante conocer cuál es el nivel de confianza que alcanza en sus resultados. Se han comparado los episodios ocurridos (validación a posteriori del análisis de episodios africanos mediante modelos, cálculo de retro-trayectorias, imágenes satélite y datos de medidas de niveles de PM en estaciones de fondo regional) con todas las predicciones elaboradas desde Febrero hasta Agosto de 2004, teniendo en cuenta en la estadística que normalmente no elaboramos predicciones para los lunes, debido a que nuestro personal trabaja de lunes a viernes y las estadísticas no son fiables para más de dos días a partir del día de elaboración.

Los resultados de la estadística para conocer el nivel de confianza de nuestro sistema de predicción se resumen en la Figura B.3. Llamamos error positivo al caso en el que hemos alertado de posible intrusión de masas de aire africano en una zona pero finalmente el episodio no se ha producido. En el caso contrario, cuando ha ocurrido un episodio que no hemos sido capaces de predecir, hablamos de error negativo.

Nivel de confianza del sistema de predicción

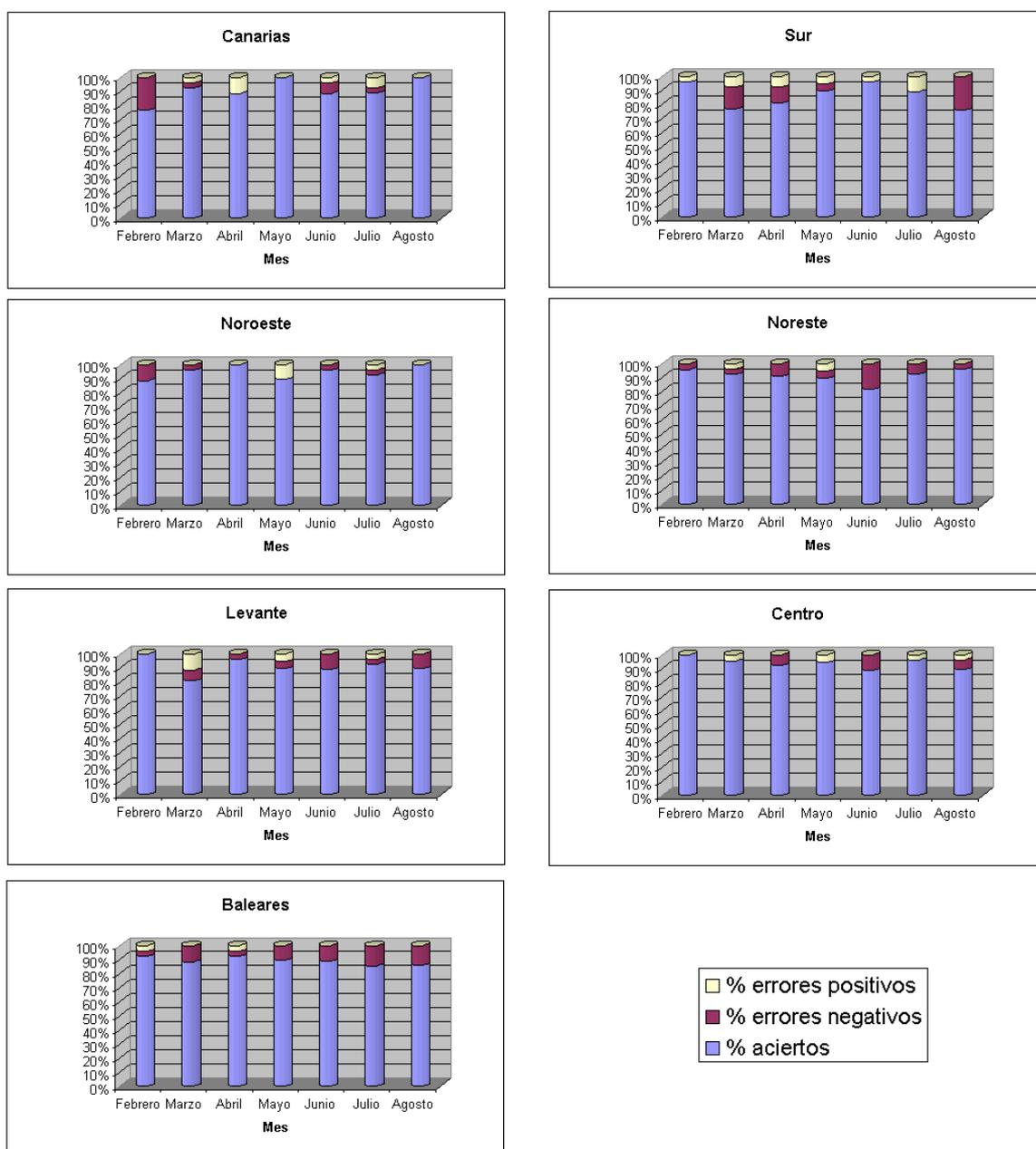


Figura.B.3. Estadística sobre el nivel de confianza del sistema de predicción. Se muestra la cantidad de aciertos, errores positivos (sobreestimación) y errores negativos (subestimación) para cada una de las siete zonas, en el periodo Febrero –Agosto de 2004.

Los resultados muestran que el nivel de confianza de nuestras predicciones nunca ha sido inferior al 76 % (zona Sur, Agosto de 2004) durante estos siete meses estudiados, siendo en algunos meses del 100%. Se aprecia una cierta tendencia a la subestimación de los episodios y en general mayores errores en las zonas de Canarias y Sur peninsular. Esto último puede ser debido a que estas zonas, al estar más cercanas al continente africano, están más afectadas por los errores intrínsecos de las predicciones de los diferentes modelos para las zonas fuente.

B.5. ANÁLISIS

Para el análisis de los episodios de contaminación por material particulado africano en España se dispone de datos de medidas en aire ambiente de niveles de PM10 y PM2.5 tomadas en una red de estaciones que representa a las zonas diferenciadas anteriormente, así como de datos de teledetección y cálculo específico de retro-trayectorias de análisis proporcionadas por HYSPLIT y NCEP/NCAR. El análisis de estos episodios permite crear un modelo conceptual de los patrones meteorológicos bajo los que tienen lugar. Por otro lado, gracias al estudio de las retro-trayectorias, índice AI del TOMS y medidas in-situ de espesor óptico de aerosoles y concentración de polvo mineral en estaciones del continente africano, podemos identificar las zonas fuente. A continuación se expondrán ejemplos de validación de episodios alertados en dos zonas de España (Catalunya y Canarias).

Podemos demostrar que una parte importante de las superaciones diarias del valor límite de PM10 impuesto por la actual Directiva Europea registradas en estaciones de fondo regional, industrial y urbano está causada por un aporte natural de masas de aire que provienen de África. La citada Norma establece que, para el año 2005, el número de días en que la concentración media diaria supere los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no puede ser mayor de 35, y el límite medio anual de concentración queda fijado en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta normativa tiende cada vez a ser más restrictiva, con límites fijados para el años 2010 de no más de 7 días de superación del mismo límite diario que en 2005, y un límite medio anual de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10.

B.5.1. PM10 Y PM2.5 EN CANARIAS

Como ejemplo de los datos in-situ recogidos en una de las estaciones de medida, a continuación se presentan las medidas de PM10 y PM2.5 realizadas en una estación de fondo urbano de Santa Cruz de Tenerife (terrazza del Instituto Nacional de Meteorología) durante el periodo comprendido entre Enero y Agosto de 2004 con un espectrómetro láser GRIMM 1108. Durante el periodo Febrero-Agosto se han producido 7 episodios y 41 superaciones del límite diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Este número de superaciones es superior al fijado por la Directiva europea para el año 2005 (35 días), aunque todas se registraron simultáneamente con episodios de polvo africano. Los niveles medios de PM10 y PM2.5 para el periodo de estudio fueron de 106 y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El valor promedio de concentración de PM10 para los días en los que no hay intrusión de masas de aire africano es de 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de PM2.5. Sin embargo, estos promedios para los días con episodios africanos son de 210 $\mu\text{gPM10}/\text{m}^3$ y 77 $\mu\text{gPM2.5}/\text{m}^3$. El valor de concentración diaria máxima de PM10 alcanzado fue de 1224 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un episodio extraordinariamente intenso del 3-11 de Marzo. En la Figura B.4 se señalan los episodios africanos ocurridos, que tienen una duración media de 8 días, prolongándose durante más días en los meses de invierno que en los de primavera y verano. El sistema de alerta anticipó sobre un 80% de los episodios registrados en superficie.

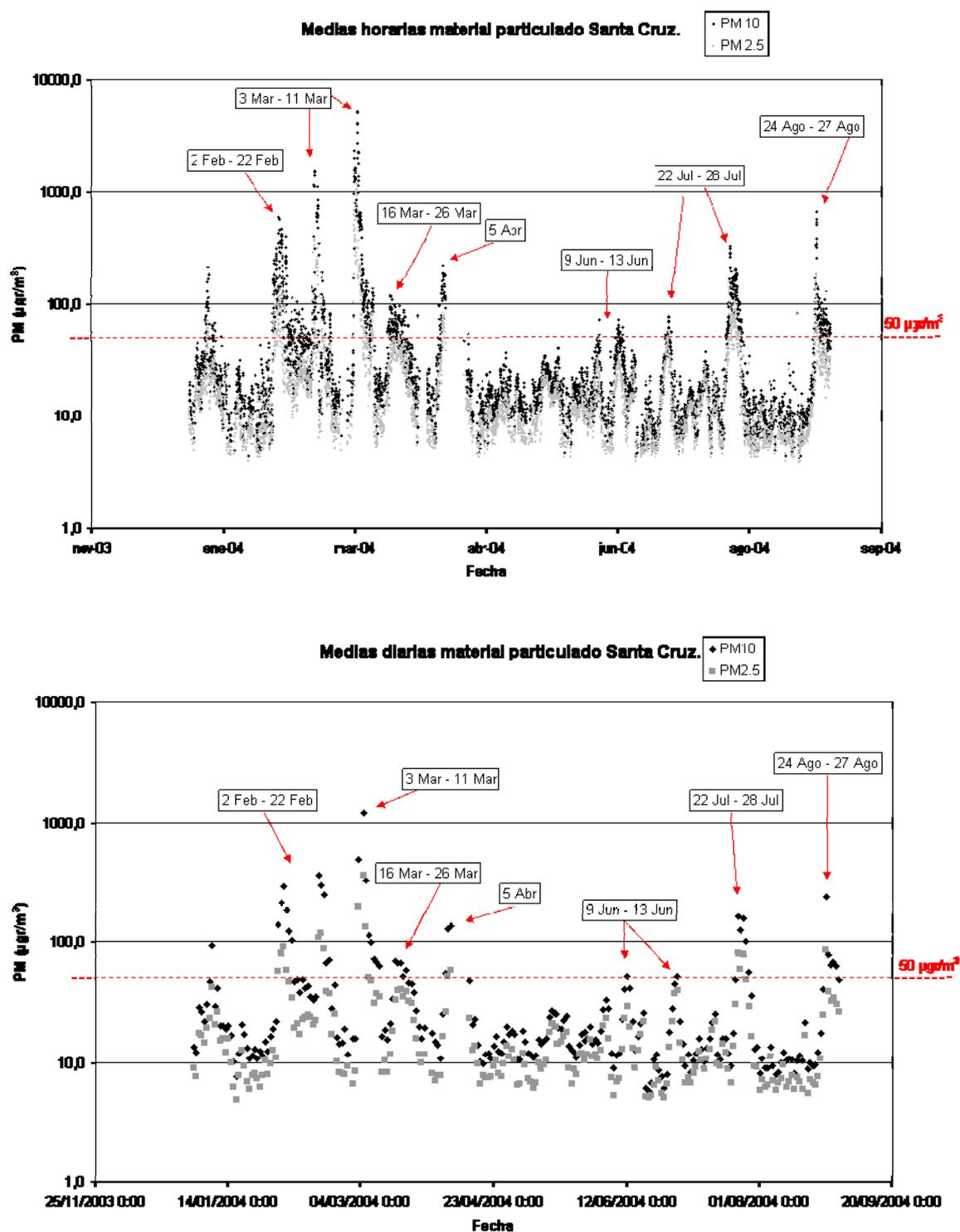


Figura B.4. Serie temporal de PM10 y PM2.5 en la estación de Santa Cruz de Tenerife para el periodo Enero-Agosto de 2004, representando las medias horarias de concentración (arriba) y las medias diarias (abajo). Con flechas se señalan los máximos de concentración de cada uno de los siete episodios ocurridos en dicho periodo. En los recuadros se indica la fecha inicial y final de cada uno de estos episodios.

B.5.2. PM10 Y PM2.5 EN CATALUNYA

El segundo ejemplo lo compone las medidas de PM10 y PM2.5 realizadas en una estación de fondo regional-rural del Montseny-Barcelona, durante el periodo comprendido entre Enero y Julio de 2004 con un espectrómetro láser GRIMM 1107, diariamente corregido respecto a medidas gravimétricas de un captador de alto volumen. Durante este periodo se han producido 12 episodios y 5 superaciones del límite diario de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 3 de las cuales fueron debidas a episodios africanos. Este número de superaciones es muy inferior al fijado por la Directiva europea para el año 2005 (35 días), incluso algo inferior al de 2010 (7), pero hay que tener en cuenta que no se abarca todo el año y que es una estación de fondo regional sita en una zona boscosa. Los niveles medios de PM10 y PM2.5 para el periodo de estudio fueron de 19 y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. El valor promedio de concentración de PM10 para los días en los que no hay intrusión de masas de aire africano es de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el caso de PM2.5. Sin embargo estos promedios para los días con episodios africanos son superiores ($24 \mu\text{gPM10}/\text{m}^3$ y $16 \mu\text{g PM2.5}/\text{m}^3$). El valor de concentración media diaria máxima de PM10 alcanzado fue de $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (extraordinariamente elevado para una estación de fondo regional-rural) en un episodio muy intenso del 21-22 de Febrero, que además registró abundante precipitación. En la Figura B.5 se señalan los episodios africanos ocurridos, que tienen una duración media de 2 días. El sistema de alerta anticipó un 80% de los episodios registrados en superficie. En el NE de la Península determinados episodios africanos (principalmente en primavera y otoño) vienen acompañados de precipitación, con lo que su impacto en los niveles de PM10 y PM2.5 en superficie no es siempre evidente, debido al lavado atmosférico. Ellos representan un 18% de los episodios ocurridos.

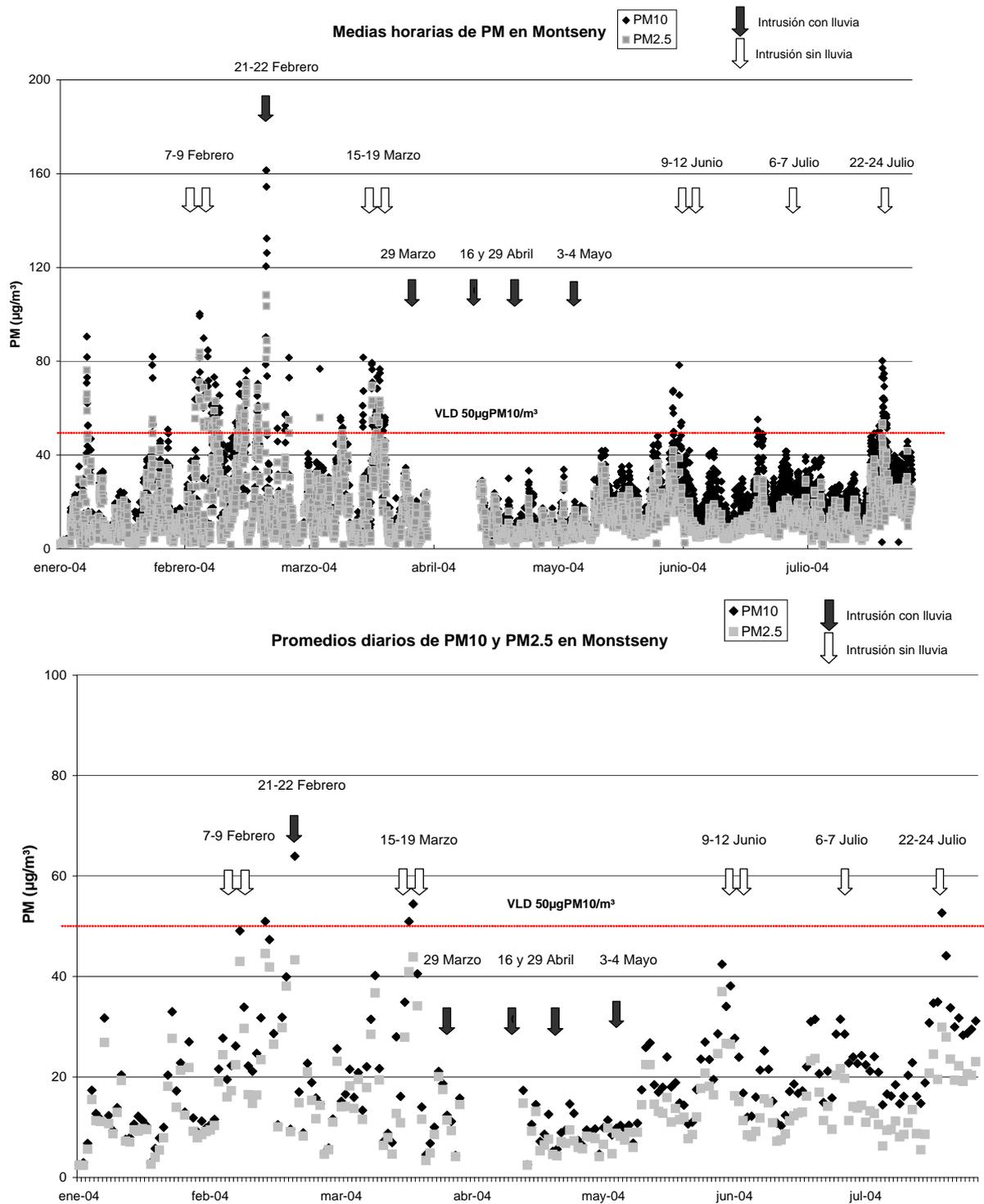


Figura B.5. Serie temporal de PM10 y PM2.5 en la estación del Montseny para el periodo Enero-Julio de 2004, representando las medias horarias de concentración (arriba) y las medias diarias (abajo). Con flechas sin relleno se señalan episodios africanos sin lluvia y con flechas rellenas se indican aquellos que ocurrieron simultáneos con precipitación. En los recuadros se indica la fecha inicial y final de cada uno de estos episodios.

B.6. LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Con el fin de mejorar el sistema de predicción y análisis, han ido surgiendo una serie de ideas que iremos incorporando poco a poco, con la finalidad de elaborar predicciones más precisas y distribuir información de análisis más completa.

Una de las ideas claves sobre la que estamos trabajando actualmente es la incorporación de datos de fotometría solar. Eligiendo instrumentos de estaciones estratégicamente situadas (Figura B.6), todo ellos pertenecientes a la red AERONET (Aerosol RObotic NETwork) , puede realizarse una monitorización en tiempo quasi-real de las masas de aire cargadas de material particulado proveniente de zonas fuente en el continente africano.



Figura B.6. Estaciones con fotómetros solares de la red AERONET que se utilizarán para hacer seguimiento de las masas de aire cargadas de partículas minerales.

Los instrumentos estarían situados en las estaciones de Cabo Verde, Dahkla, Santa Cruz de Tenerife, Izaña, Saada, El Arenosillo, Pitres, Blida, Cabo de La Roca y Barcelona. La fotometría solar nos permite conocer el espesor óptico de aerosoles durante el día, así como inferir la distribución de partículas por tamaño mediante métodos de inversión.

Otro objetivo a corto plazo es incluir en nuestro sitio web un apartado donde se puedan consultar los datos de meteorología y concentraciones de partículas medidos en estaciones de fondo regional de diferentes redes de control de calidad del aire en España.

B.7. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido financiado por un convenio entre la D.G. de Calidad y Evaluación Ambiental, el Instituto Nacional de Meteorología (ambos del Ministerio de Medio Ambiente) y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, así como por dos proyectos de investigación del Plan Nacional de I+D del Ministerio de Educación y Ciencia (REN2001-0659-C03-03 y CGL2004-05984-C07/CLI).

B.8. REFERENCIAS

- (1) Darwin Ch. (1846). An account of the fine dust with often falls on vessels in the Atlantic Ocean.. Quartely Journal of the Geological Society of London, pt. 1,2, 26-30.
- (2) Ehrenberg C.G. (1862). Erläuterungen eines neuen wirklichen Passatstaubes aus dem atlantischen Dunkelmeere vom 29 Okt. 1861. Monatsber. Kgl. Preuss. Akad. Wiss., Berlin, 202-224.
- (3) WHO. (2003) Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World Health Organization.
- (4) US EPA (1996). Air Quality Criteria for Particulate Matter, EPA/600/P-95/001F, US Environmental Protection Agency, Washington, DC.

- (5) Kallos, G., Kotroni, V., Lagouvardos, K. (1997). The regional weather forecasting system SKIRON: an overview. In: Proceedings of the Symposium on regional weather prediction on parallel computer environments, University of Athens, Greece. 109-122.
- (6) Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2003. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- (7) McClain, C.R., Cleave, M.L., Feldman, G.C., Gregg, W.W., Hooker, S.B., Kuring, N. (1998). Science Quality SeaWiFS Data for Global Biosphere Research. Sea Technology, 39 (9), 10-15.
- (8) Herman, J.R., Bhartia, P.K., Torres, O., Hsu, C., Seftor, C., Celarier, E. (1997). Global distribution of UV- absorbing aerosols from Nimbus7/TOMS data. Journal of Geophysical Research, 201, 16911- 16922.

