

TRANSPORTE DE AEROSOLES DE ORIGEN DESÉRTICO A DIFERENTE ESCALA ESPACIO-TEMPORAL. RELACIÓN CON PERTURBACIONES TROPICALES

I.Peñate ¹, A. Cianca ², A. W.Ellis ³, N.J.Selover ⁴

(1) G.P.V. (Grupo de Predicción y Vigilancia). C.M.T. (Centro Meteorológico Territorial en Canarias Oriental). Aemet. (Agencia Estatal de Meteorología). España.

(2) I.C.C.M. (Instituto Canario de Ciencias Marinas). Las Palmas de Gran Canaria. España.

(3) School of Geographical Sciences. A.S.U. (Arizona State University). Tempe. Arizona, U.S.

(4) Department of Geography. State Climate Office. A.S.U. (Arizona State University). Tempe. Arizona, U.S.

Resumen

El estudio de los aerosoles de origen natural ha cobrado creciente interés debido a su implicación en los fenómenos relacionados con la interacción atmósfera-océano, efectos en la calidad del aire y en la salud humana. El fin de este estudio es lograr un conocimiento más amplio sobre los factores que afectan a la incursión de aerosoles de origen mineral sobre regiones próximas a áreas desérticas. Para ello, se identifican los episodios más representativos de eventos de polvo sobre las islas Canarias (España) procedentes del desierto del Sahara y aquellos que afectan al área metropolitana de Phoenix en USA originados en el desierto de Sonora a partir de observaciones en superficie de visibilidad en los aeropuertos de *Fuerteventura* y *Phoenix Sky Harbor International* respectivamente para un periodo de once años. Su elección es consecuencia de las diferentes escalas espacio-temporales en el transporte de aerosoles que les afectan. El principal objetivo de este estudio es caracterizar y clasificar las configuraciones sinópticas más frecuentes que acompañan a este tipo de fenómenos en cada caso y en particular aquellas asociadas con tiempo severo como tormentas. Al mismo tiempo se establece la variabilidad interanual y estacional así como la intensidad y frecuencia de la entrada de aerosoles en forma de polvo en superficie sobre las mencionadas áreas, además se determina el régimen de vientos que acompaña a dichos eventos. Como resultado preliminar se observa que las invasiones más importantes en superficie para el área de Canarias tienen lugar durante el invierno respondiendo a un modelo de transporte a gran escala, mientras que para Phoenix se dan preferentemente durante el periodo estival según un transporte a pequeña escala. A fin de realizar la clasificación sinóptica de las situaciones favorables a dichos episodios, las principales circulaciones atmosféricas que dominan las áreas desérticas próximas a las zonas de estudio deben ser previamente analizadas a fin de conocer los diferentes mecanismos que inducen la generación de tormentas de polvo y determinan el transporte de las plumas resultantes. Teniendo en cuenta tales consideraciones, se proponen varios tipos de tiempo atmosférico propios de invasiones continentales sobre cada área y se muestran algunos ejemplos de tormentas de polvo que dan lugar a los episodios de polvo encontrados. Tras analizar los resultados se pone de manifiesto la relación entre las intrusiones de polvo de origen natural dentro de nuestro marco de estudio con el establecimiento del régimen monzónico en el noroeste de África y el suroeste de Norteamérica propicio para el desarrollo de procesos convectivos que inducen tormentas de polvo así como con perturbaciones atmosféricas tales como ondas del este o AEW (African Easterly Waves) en Canarias y líneas de turbonada o SQ (Squall Lines) en Arizona. Por último se estudia la concomitancia entre la ocurrencia de los fenómenos relacionados con el transporte de polvo en suspensión en nuestro marco de estudio y las perturbaciones de origen tropical en los océanos Atlántico y Pacífico.

1. Introducción:

Localidades próximas a zonas desérticas son afectadas en gran medida por variables entradas de aerosoles de origen continental. En función de sus características físico-químicas, las regiones donde se originan y la configuración sinóptica predominante se producen el transporte y la deposición de los mismos. Los aerosoles de origen mineral y el polvo constituyen un tipo común de material particulado en suspensión que caracteriza las regiones áridas cuyo principal mecanismo de generación es la

erosión debida al viento. Debido a una alta insolación y a fuertes procesos convectivos, las finas partículas de polvo son fácilmente levantadas a cierta altitud y transportadas horizontalmente a áreas muy alejadas de sus regiones de origen. (*Carlson y Prospero, 1972*). Ciertas ocurrencias de intrusiones de dichos de aerosoles, conocidas por *calimas*, están asociadas a situaciones de tiempo atmosférico severo como las tormentas de polvo. Tales condiciones se consideran peligrosas para la salud humana. Se ha constatado que el polvo es una

de las fuentes de origen de especies alérgicas potenciales. Alergias de tipo estacional y enfermedades respiratorias pueden coincidir con elevadas concentraciones de polvo, con frecuencia cuando la arena del desierto es levantada por el viento. (Boreson et al., 2004, Fisher et al., 2000, CDC, 2000 y Stevens, 1995). Por otro lado, actividades humanas, tales como la aviación y el transporte terrestre pueden ser afectados por la ocurrencia de calimas ya que producen una reducción en la visibilidad. Además, se ha demostrado que el polvo mineral puede ejercer una importante influencia sobre la redistribución de los nutrientes en el suelo, así como su contribución en los océanos al ser transportado por el viento afectando a la composición química y actividad biológica en los mismos. (Mahowald, et al., 2005 y Yoon Y.J. et al., 2007). Así mismo, los aerosoles en general y el polvo en suspensión en particular pueden influir sobre el clima mediante procesos de absorción y dispersión de radiación solar y terrestres (Tegen, et al., 1997, Sokolik y Toon, 1996, Sokolik et al., 2001, IPCC, 2001). Por ejemplo, ha sido estudiado el impacto de las tormentas de polvo sobre el balance de radiación atmosférica (Slingo A. et al., 2006) y en particular su efecto en niveles altos de la atmósfera (Heinold, B et al., 2007). Aparte de esto, los aerosoles pueden modificar la concentración de los constituyentes atmosféricos (Schwartz et al., 1995). Como efecto indirecto, actúan como núcleos de condensación, modificando las propiedades ópticas de las nubes y su tiempo de vida (Torres et al., 1998, Cakmur y Miller, 1999). Recientemente se ha confirmado el efecto de los aerosoles sobre la génesis de la precipitación y su distribución desde nubes orográficas. (Lynn. B. et al., 2007). Sin embargo, otros autores suponen que las altas concentraciones de polvo pueden inhibir la precipitación, favorecer la formación de nubes estables y originar el denominado *mar de polvo* que favorece la transparencia atmosférica (Varela et al., 2005).

En resumen, estas son algunas de las razones que explican la necesidad de estudiar tales fenómenos meteorológicos y desarrollar una serie de recomendaciones para predecirlos. Las diversas salidas de modelos numéricos proporcionan suficiente información sobre los campos de viento en diferentes niveles para estimar la dirección del transporte de los aerosoles. Los análisis del perfil de temperatura y humedad también ayudan a detectar las entradas de aire de origen desértico. Las retrotrayectorias isentrópicas y las imágenes de satélite confirman tales episodios. Sin embargo, es complicado estimar la reducción en la visibilidad debida al polvo en suspensión. Sería interesante extraer las configuraciones sinópticas que favorecen dichos eventos en diferentes niveles y clasificarlos en modelos de presión así como establecer una

relación entre la ocurrencia de las intrusiones de polvo en áreas concretas y la observación de tormentas de polvo en zonas adyacentes mediante el estudio de la dinámica y características sinópticas de las grandes depresiones originadas en áreas desérticas. De este modo, los predictores podrían comparar los campos previstos por los modelos con las situaciones tipo favorables en base a pronosticar dicho fenómeno.

En nuestro estudio compararemos dos áreas desérticas distintas, la del Sahara afectada por el océano Atlántico y la del Sonora en el suroeste de Norteamérica y norte de Méjico influenciada por el océano Pacífico, como principales fuentes de aerosoles, estando ambas clasificadas dentro de zonas con clima desértico subtropical (BWh) según la clasificación de Köpen. (http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/ged_iib/data/sets/b03/bec.doc)

Canarias, dada su situación geográfica e influencia de situaciones que afectan al continente africano y que dan origen a tempestades de polvo, se convierte en una zona propicia para la deposición de partículas eólicas procedentes del desierto del Sahara. La fuente dominante de aerosoles saharianos que afectan al archipiélago canario se localiza en las llanuras aluviales a sotavento de *Ahaggar Masif*, cerca de Algeria (Kalu, 1979). Sobre el suroeste de EEUU también se observan intrusiones de material particulado natural de origen desértico, principalmente procedentes de la parte norte del desierto de *Sonora* localizado entre Arizona y California que se prolonga hasta Méjico abarcando ambos lados del golfo de California. (Fig.1) (http://www.desertusa.com/du_sonoran.html). Comprende el suroeste de Arizona, sureste de California, así como la mayor parte de la Baja California y la mitad oeste del estado de Sonora en Méjico donde se han localizado pequeñas fuentes de polvo que parecen estar próximas a la frontera de Nuevo Méjico, en *Chihuahua* (31°N 106.9°W) y en *Coahuila* (26.3°N 103.1°W). También se podría originar en una zona montañosa localizada en 26.5°N 103°W y en 31°N 107°W, área identificada como *dry lake* al sur de El Paso. (Herman, et al., 1997). En el sureste de California encontramos el lago *The Salton Sea* dentro del ecosistema del desierto del Colorado como otra fuente generadora de polvo en el suroeste de EE UU.

El principal objetivo de este estudio es identificar las configuraciones sinópticas más frecuentes que acompañan a las intrusiones de aerosoles de origen desértico en superficie para las áreas mencionadas, clasificarlas en tipos sinópticos y establecer la relación entre dichas intrusiones y el establecimiento de la circulación monzónica en el noroeste de África y en Arizona.

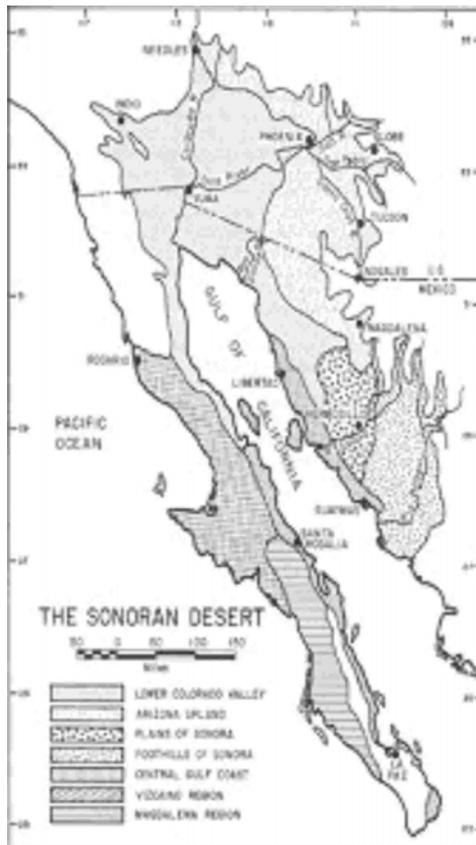


Fig.1. El desierto de Sonora.

2.- Materiales y métodos utilizados:

Los principales datos utilizados son observaciones meteorológicas en superficie (*METARs*), para un periodo de 11 años, desde enero de 1994 a diciembre 2004 tomadas en aeródromos de referencia para cada área de estudio. El aeropuerto de Fuerteventura situado en 28.27°N y 13.51°W a 25 metros de altitud fue considerado el más representativo de las islas Canarias (España) debido a su proximidad a la costa africana siendo el desierto del Sahara su principal fuente de aerosoles. *Phoenix Sky Harbor International Airport*, situado en 33.26°N y 112.03°W a 336 metros de altitud fue seleccionado dentro del estado de Arizona (EEUU) por su relativa proximidad al desierto de Sonora como fuente de polvo en suspensión afectando al suroeste de los Estados Unidos.

La adquisición de los datos fue semihoraria para el aeropuerto de *Fuerteventura* para el cual no existen registros entre las 22:30 y 4:30 horas debido al cierre del aeropuerto y horaria y en ocasiones semihoraria para *Phoenix Sky Harbor Internacional Airport*. Los parámetros analizados fueron: dirección del viento en grados angulares, velocidad del viento (kts), visibilidad (m), presión a nivel del mar (hPa), tiempo presente (observaciones manuales y automáticas) y tiempo presente en las proximidades. Los datos fueron proporcionados por *Aemet (Agencia Estatal de Meteorología)* en España

y *NCDC (National Climatic Data Center)* Asheville N.C. en USA. Inicialmente fueron procesados, siendo seleccionados aquellos con visibilidad igual o menor que 8000 metros sólo si en el *METAR* estaba incluido alguno de los siguientes fenómenos: calima (HZ), polvo en suspensión extendido en el lugar de la observación o próximo a éste, a alturas débiles o moderadas por un viento suficientemente fuerte o turbulento (DU), polvo levantado por el viento a poca altura del suelo (DRDU), tormenta de polvo (DS) o polvo levantado por el viento hasta una altura moderada del suelo también denominado ventisca de polvo (BLDU). Respecto al aeropuerto de Fuerteventura, en aquellas ocasiones en que el fenómeno causante de la disminución de visibilidad no estaba especificado, se emplearon datos del *NCDC* para identificarlo. Para el aeropuerto de Phoenix (*Phoenix Sky Harbor International Airport*) fueron analizados únicamente datos horarios y semihorarios en superficie del *NCDC*. En este caso se incluyeron aquellos relacionados con polvo en suspensión si el fenómeno era observado en las proximidades, entre 8 y 16 km, de la estación.

En base a establecer una comparación de la variabilidad estacional de los aerosoles debidos al polvo en suspensión sobre las áreas de estudio se sigue el siguiente criterio estándar en cuanto a la delimitación de estaciones: primavera (desde el 20 de marzo al 20 de junio), verano (desde el 21 de junio al 21 de septiembre), otoño (desde el 22 de septiembre al 20 de diciembre) e invierno (del 21 de diciembre al 19 de marzo). Para Arizona que posee una estación monzónica característica de julio a septiembre, una mejor aproximación podría ser: primavera (de abril a junio), verano (de julio a septiembre) otoño (de octubre a diciembre) e invierno (de enero a marzo). Sin embargo, los resultados no cambian de forma significativa considerando esta última clasificación para el caso de Phoenix, por lo que se opta por la primera.

Respecto a la determinación de los tipos sinópticos se analizan datos de los aeropuertos de referencia empleándose un análisis y reanálisis de distintos modelos numéricos. Utilizando los campos previstos a partir de los mismos se intentan clasificar algunas situaciones sinópticas favorables a las intrusiones de polvo sobre las áreas de estudio. Para cada una de ellas se seleccionan los episodios favorables a la entrada de polvo, 22 para Canarias y 38 para Arizona, tomando como criterio limitante que las visibilidades registradas en cada aeródromo de referencia durante el periodo de estudio fueran inferiores a 3000 metros. Para Canarias, debido a ser episodios más largos, sólo se consideran los más representativos. Se elaboran composiciones combinando campos de geopotencial, viento, temperatura y humedad en distintos niveles en base a obtener los escenarios que describan cada tipo

sinóptico. La clasificación final atiende básicamente a configuraciones isobáricas que establecen la dinámica atmosférica que favorece la intrusión de polvo para cada caso en niveles bajos. El análisis mesoescalar se realiza si juega un papel importante en la dirección del flujo que llega a las estaciones seleccionadas contribuyendo a la entrada de polvo sobre las mismas. Los campos básicos utilizados para el estudio obtenidos para las 12 UTC fueron: geopotencial (Z), temperatura (T), parámetro frontal térmico (PFT), vorticidad potencial (VORG), humedad (RH), vientos (BARB y SPD) y líneas de corriente (STR). Los niveles considerados fueron 1000 hPa, 925 hPa, 850hPa, 700hPa y 500hPa.

Para la clasificación y caracterización de las situaciones sinópticas se parte de las bases de datos del ECMWF (*European Centre for Medium- Range Weather Forecasts*). Los campos básicos para el análisis de los distintos episodios se obtienen a partir de datos del *archivo ECMWF's Meteorological Archival and Retrieval System (MARS)* basado en modelos atmosféricos procedentes de predicciones deterministas tales como el reanálisis ERA 40. Para los años 2003 y 2004 se emplean datos de un archivo operativo. Las salidas de los modelos numéricos obtenidos se comparan con un reanálisis realizado por *Nacional Center for Environmental Prediction (NCEP)* y *Nacional Center for Atmospheric Research (NCAR)* proporcionado por *Earth System Research Laboratory* perteneciente a NOAA.

(<http://www.cdc.noaa.gov/Composites/printpage.pl>). Para algunos episodios se utilizan análisis del HIRLAM (*High Resolution Limited Area Modelling*). Los resultados se comparan con guías técnicas de diagnóstico elaboradas por el *Centro Nacional de Predicción. Aemet (Agencia Estatal de Meteorología)*. España.

Las imágenes de satélite constituyen un apoyo fundamental para realizar este trabajo. Se analizan imágenes del METEOSAT proporcionadas por Aemet (*Agencia Estatal de Meteorología*) e imágenes SeaWIFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*) proporcionadas por el CREPAD (*Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de Datos de Observación de la Tierra*) perteneciente al INTA (*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*). Otras observaciones se obtienen a partir de boletines de predicción meteorológica del GPV (*Grupo de Predicción y Vigilancia*) de Canarias elaborados en el *Centro Meteorológico Territorial de Las Palmas* y radiosondeos elaborados en Tenerife y facilitados por el *Centro Meteorológico Territorial de Sta. Cruz de Tenerife*.

3. Resultados:

Inicialmente se analiza la variabilidad interanual y estacional de los aerosoles de origen desértico sobre las zonas de estudio. En segundo lugar se estudia la frecuencia e intensidad de los eventos de polvo así como los vientos dominantes que acompañan a estas situaciones. En tercer lugar se realiza una clasificación de las configuraciones sinópticas favorables a los eventos de intrusiones de polvo sobre las mencionadas áreas. Posteriormente se intentan relacionar con las tormentas de polvo e influencia del régimen monzónico en las áreas desérticas próximas. Por último se estudia su concomitancia con las perturbaciones tropicales en los océanos Atlántico y Pacífico que acontecen dentro del periodo de estudio.

3.1. Variabilidad interanual y estacional:

La variabilidad interanual y estacional de las intrusiones de polvo para los aeropuertos de *Fuerteventura* y *Phoenix Sky Harbor International* con registros de visibilidad iguales o inferiores a 8000 metros considerados en este estudio están representadas en las figuras 2 a 4.

Para analizar la variabilidad interanual se representan las anomalías estandarizadas interanuales de los eventos de polvo. (Fig. 2). La línea negra representa las anomalías de visibilidad, la línea violeta una media móvil de siete valores y la línea roja las anomalías de la duración de los eventos.

Para Canarias, (Fig.2A) en el año 1998 podemos señalar la primera situación importante de llegada de polvo en superficie a las latitudes de las islas dentro del periodo de estudio observándose visibilidades inferiores a 1000 metros. Se produce una calima intensa entre el 11 y el 20 de febrero registrándose 800 m de visibilidad el día 13. Destacan los meses de enero y febrero del año 2000, como episodios más intensos respecto a la reducción de visibilidad debida a entrada de aire sahariano encontrando el 25 de febrero del 2000 el episodio de menor visibilidad, 100 metros, dentro de los analizados. En 1999 encontramos el segundo episodio destacable el cual tiene lugar los días 5 y 7 de enero con visibilidades reducidas hasta 300 metros aunque es de escasa duración. En enero de 2002 se produce el tercer evento relevante, durante los días 6 y 7, encontrando valores de visibilidad de 400 metros. La tendencia general (línea violeta) es que el periodo de reducción de visibilidad por intrusiones de aerosoles de origen desértico más importante en Fuerteventura para el periodo estudiado se da entre finales de 1998 y mediados de

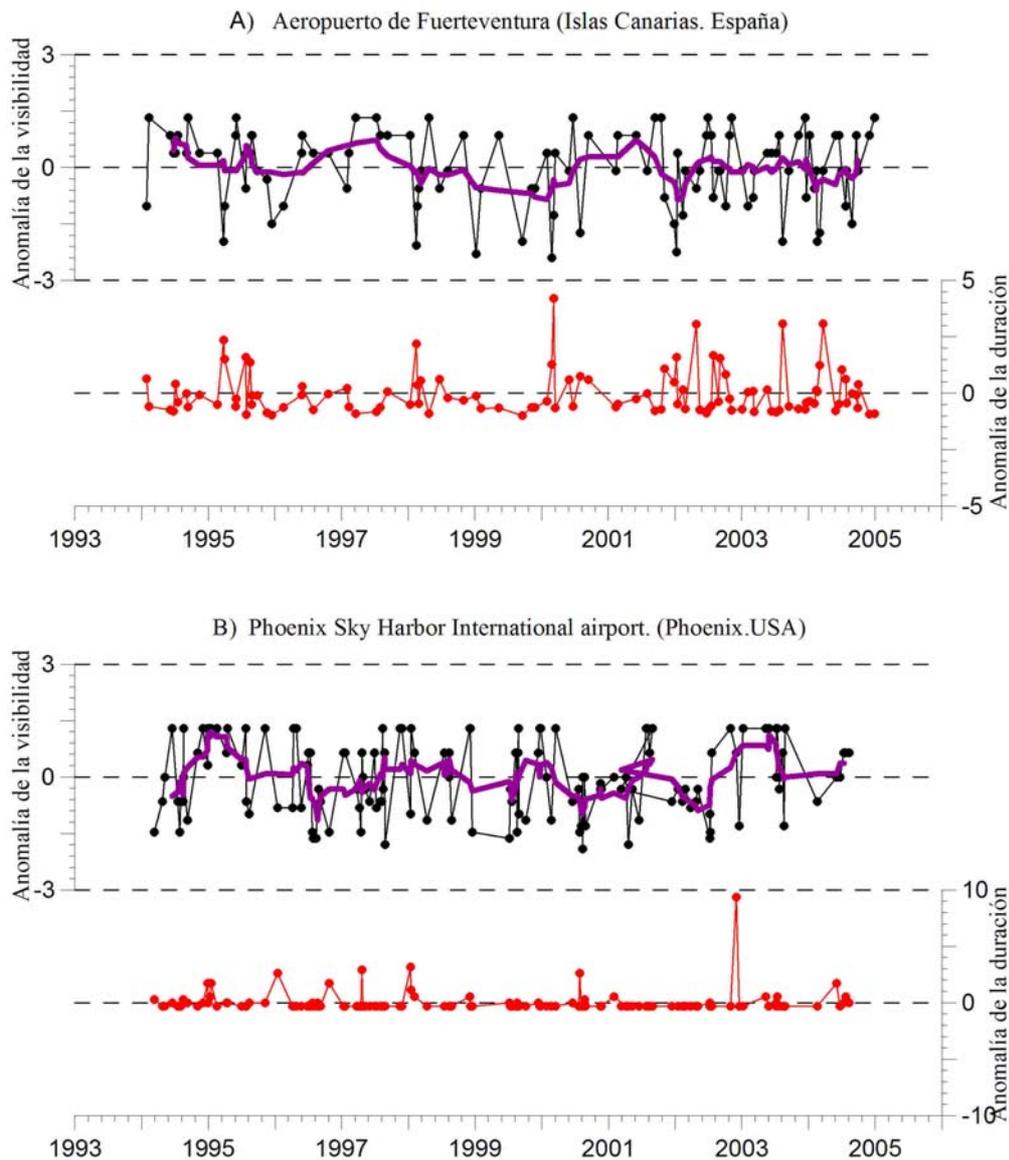


Fig.2. Anomalías estandarizadas interanuales de los eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS), desde visibilidad ≤ 8000 m.

2000, con dos mínimos relativos entre finales del 2001 y principios del 2002 y a comienzos de 2004.

En cuanto a la duración de los mismos, el evento más destacado se produce al igual que la mínima reducción de visibilidad en el año 2000 registrándose a principios de marzo un episodio con 128 horas de duración considerado como el más largo de la serie estudiada, la visibilidad mínima fue de 2500 metros. Tras este máximo sobresalen los de 2002, 2003 y 2004 con unas 100 horas de duración y visibilidades de 4000, 1000 y 5000 metros respectivamente.

Realizando un análisis similar para la ciudad de Phoenix (Fig.2 B), encontramos que existen diferencias sustanciales en cuanto a la observación de eventos de polvo entre los años que

constituyen el periodo de estudio. En verano de 1996 (28 de julio y 15 de agosto) tienen lugar los primeros episodios importantes con una visibilidad mínima de 800 metros. Destaca como episodio más intenso el del 14 de agosto de 2000 en el que se registran 100 metros seguido por los del 29 de agosto de 1997 y 21 de abril de 2001 ambos con visibilidades de 400 metros. Los periodos más destacables en cuanto a reducción de visibilidad por invasiones desérticas son desde mediados de 1996 hasta finales de 1997 y entre comienzos del 2000 y mitad del 2001 con tres mínimos relativos en 1994, 1999 y 2002.

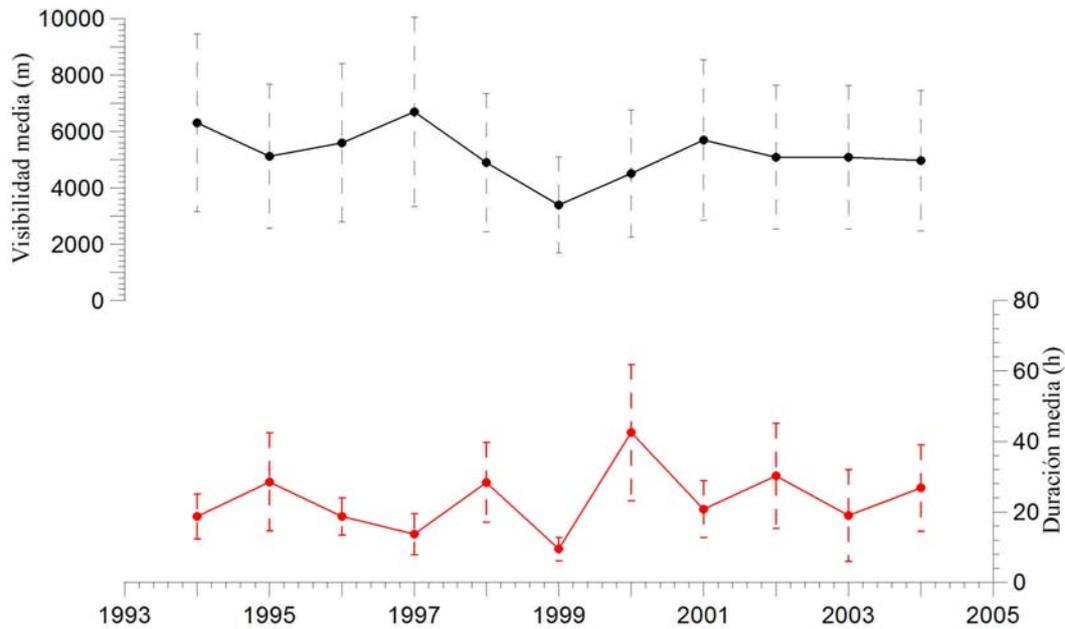
Respecto a la duración de los mismos, en general son episodios cortos, predominando los eventos de media a una hora. El evento más largo, con un total de 17 horas, tiene lugar entre el 4 y 5 de diciembre de 2002 y con una visibilidad de 6400 metros. También encontramos algunos episodios con

duraciones superiores a 5 horas en enero de 1996, abril de 1997, enero de 1998 y julio de 2000. Aunque para ambas estaciones el valor medio de visibilidad reducida hasta 8000 metros debida a entradas de aerosoles desérticos es similar, en torno a unos 5000 metros, se observa una gran diferencia en la media de la duración de los mismos siendo de unas 24 h para Fuerteventura, mientras que para Phoenix es escasamente de 1 hora.

En la figura 3 se representa la variabilidad interanual del promedio de los eventos de polvo. La línea negra representa los promedios de visibilidad y sus desviaciones estándar y la línea roja los promedios de la duración de los eventos y las desviaciones estándar correspondientes. Para la

visibilidad se observa en general mayor dispersión con respecto a los valores promedio en comparación con los resultados obtenidos para la duración. Para Canarias (Fig.3A), la curva sigue una distribución que se podría ajustar a una recta con un máximo y un mínimo destacables detectándose los eventos más intensos respecto a reducción de visibilidad media en 1999 y los menos intensos en 1997. Respecto a la duración se presenta una alternancia general de máximos y mínimos, encontrando en el año 2000 el máximo y en 1999 el mínimo absoluto de la serie. Destaca el hecho de que durante este último año los episodios son los más cortos pero sin embargo se dan los menores valores de visibilidad.

A) Aeropuerto de Fuerteventura (Islas Canarias.España)
1994-2004



B) Phoenix Sky Harbor International airport. (Phoenix.USA)
1994-2004

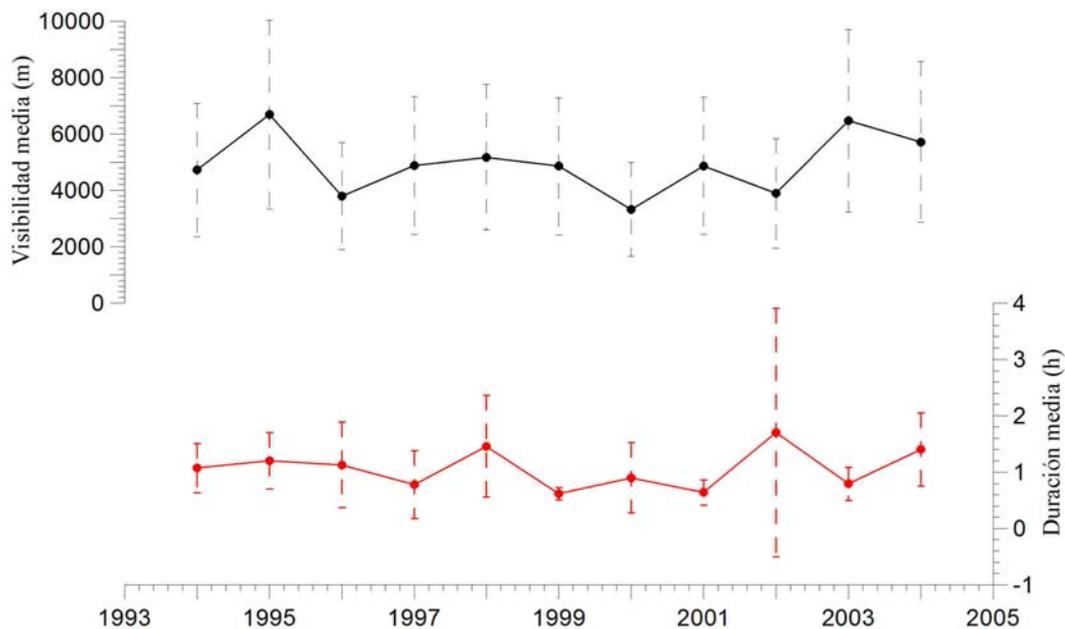


Fig.3. Variabilidad interanual del promedio de los eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS), desde visibilidad ≤ 8000 m.

Con respecto a Phoenix (Fig.3B) encontramos una dispersión similar a la mencionada para Fuerteventura, a excepción el año 2002 que presenta gran dispersión respecto a la duración de intrusiones de polvo. Las distribuciones encontradas también son ajustables a rectas. Respecto a la visibilidad media la máxima reducción de visibilidad por polvo se encuentra en el año 2000 seguida por

1996 y 2002 y mínima en 1995. Según la duración media en el año 2002 se detectan los episodios más largos coincidiendo con un mínimo de visibilidad seguido de 1998 y 2004.

Análogamente, en la figura 4 se representa la variabilidad estacional del promedio de los eventos de polvo. Respecto a la reducción de visibilidad por polvo, la tendencia general es que las

invasiones saharianas sobre el archipiélago canario son más frecuentes durante el invierno, destacando las de febrero (Fig.4 A). En verano destacan las acontecidas en agosto. Con respecto a la duración media de las mismas, los episodios más largos son los de primavera (abril y marzo) seguidos de los de agosto en que como hemos comentado se observa un mínimo en la visibilidad. En el mes de junio se dan los episodios más cortos y a su vez con registros de visibilidad mayores.

Analizando la variabilidad estacional respecto a la reducción de visibilidad por polvo para Phoenix (Fig. 4B), la tendencia general es que los

eventos de polvo más importantes tienen lugar durante el verano y principio del otoño (principalmente entre septiembre y octubre). De acuerdo con los resultados obtenidos, a principios del invierno es el periodo menos propicio para observar aerosoles de origen desértico sobre ésta zona. Sin embargo respecto a la duración, es en este periodo cuando se dan los eventos más largos existiendo una gran dispersión para los meses de diciembre y enero. En octubre se detecta un máximo en la duración de los eventos de polvo coincidiendo con un mínimo por visibilidades reducidas debido a dicho fenómeno.

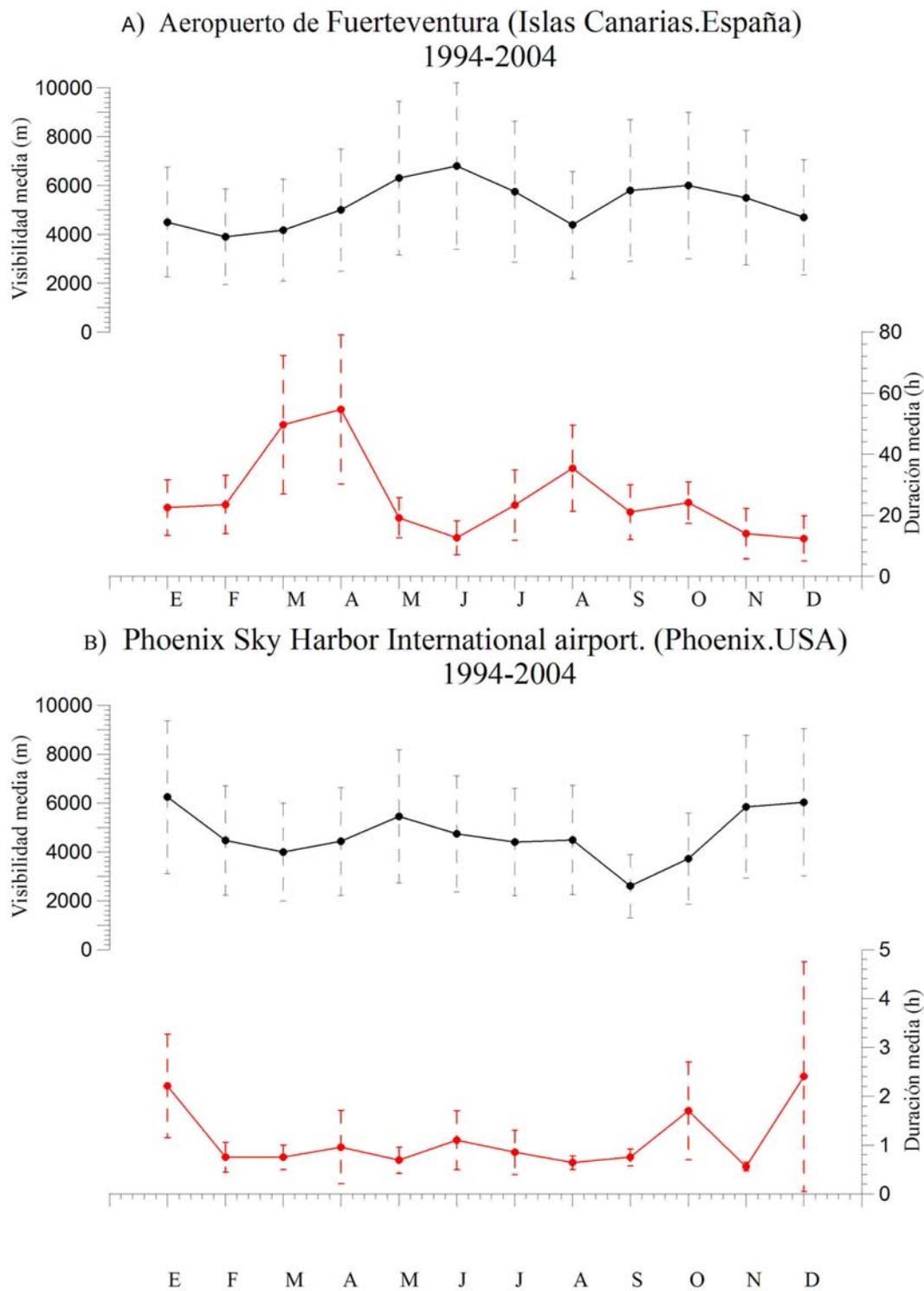


Fig.4. Variabilidad estacional del promedio de los eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS), desde visibilidad ≤ 8000 m.

3.2. Frecuencia e intensidad de los eventos de polvo:

Las tablas 1 y 2 resumen los resultados obtenidos para los aeropuertos de Fuerteventura y Phoenix respectivamente, respecto al número de ocurrencias teniendo en cuenta la estación del año en que acontecen los episodios de calimas, días y horas de polvo para dichas estaciones para los once

años de estudio y visibilidades inferiores a 8000 metros por polvo en suspensión. Una ocurrencia comprende los días consecutivos en que se registran visibilidades inferiores a 8000 metros debidas a fenómenos relacionados con invasiones desérticas. Cada una de ellas se computa considerando desde el día de inicio hasta el de fin del episodio. Se considera día de polvo aquel en que durante un periodo comprendido entre las 00 a las de 24 U.T.C.

horas se registra una observación que incluya reducción de visibilidad relacionada con dicho fenómeno. Finalmente, el número de horas de polvo es computado considerando el número de observaciones horarias consecutivas que incluyen visibilidad reducida debida a aire de procedencia continental. Respecto al número de horas de polvo registradas anualmente, en el aeropuerto de Fuerteventura (Tabla 1) se observa en general una alternancia de máximos y mínimos en el número horas en que dicho aeropuerto se ve afectado por intrusiones de polvo a lo largo del tiempo, con una tendencia general de aumento a partir del año 1997 a excepción del mínimo de 1999. Los máximos se producen los años 1998, 2000, 1995, 2002 y 2004 de forma ascendente, obteniéndose en estos dos últimos años la misma intensidad, unas 450 horas de calima al año. En el año 1995 se observa un incremento anómalo con unas 357 horas, aunque en general se registran visibilidades superiores a 4000 m. El mínimo se detecta en 1999 con 56 horas de polvo. El número de horas de polvo total para *Fuerteventura* a lo largo del periodo de estudio fue 2676.

En relación a la frecuencia del número de ocurrencias de calimas anual, para Canarias se observa en general la tendencia de un crecimiento continuo del número de eventos de calima desde el año 1996 a excepción del máximo observado en

1998 y un pequeño mínimo en 2003. Coincidiendo en términos generales con la representación el número de horas para este aeródromo, los máximos en sentido ascendente se producen en los años 2000, 2001, 1998, 1995, 2002 y 2004 siendo éste último en el que se da sin lugar a dudas el mayor número de episodios con 17 ocurrencias. Discrepan para 2001 que presenta un mínimo respecto al número de horas. Durante los años 2000 y 2001 el número de eventos de polvo coinciden, aunque durante el último tales eventos tienen menor duración. Igual que para el número de horas, encontramos un máximo en el año 1995 exhibiendo un ascenso anómalo con 13 ocurrencias de eventos de polvo. El mínimo tiene lugar en 1996 con sólo 5 ocurrencias. El número total de ocurrencias de polvo para Canarias fue 110. Destacan las acontecidas en invierno constituyendo el 33% de los casos seguidas de las de verano que suponen el 32% de las observaciones totales para los once años analizados. En un porcentaje similar representando el 18 % y 17% de los casos, se observan en primavera y otoño respectivamente. En relación con el número de días de polvo durante 2004 se registran el mayor número de días de polvo (45 días) coincidiendo con el máximo de ocurrencias. El valor mínimo fue detectado en 1999. El número de días de polvo total para todo el periodo fue 285.

AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA (1994-2004)							
año	n. oc. primav.	n. oc. verano	n. oc. otoño	n. oc. invierno	n. oc. Total	n. días de polvo	n. horas de polvo
1994	1	5	1	2	9	23	168.5
1995	4	5	3	1	13	41	357.5
1996	2	1	1	1	5	11	93.5
1997	0	3	0	3	6	13	82
1998	1	2	1	5	9	25	255.5
1999	1	1	2	2	6	7	56
2000	2	2	0	4	8	29	340.5
2001	1	2	2	3	8	17	166.5
2002	2	6	3	4	15	43	453.5
2003	3	4	2	5	14	31	247
2004	3	4	4	6	17	45	455.5
total	20	35	19	36	110	285	2676

Tabla 1. Frecuencia de eventos de calima: número de ocurrencias por estaciones (n.oc.), días y horas para el aeropuerto de *Fuerteventura*. Visibilidad $\leq 8000\text{m}$ (1994-2004).

Para el área metropolitana de Phoenix (Tabla 2) el máximo respecto al número de horas de polvo se produce en el año 2002 con 24 horas, seguido de 1998 y 1996 ambos con aproximadamente 17 horas. El mínimo se detecta en el año 2001 con 7 horas. El número total de horas

estimadas en que Phoenix se se ve afecta por invasiones de origen desértico fue 152. Comparando los resultados para ambas áreas podemos decir que entre 1998 y 2003 son similares en cuanto a la alternancia de máximos y mínimos, si

bien la intensidad de los eventos en Fuerteventura es muy superior a la de Phoenix.

En relación al número de ocurrencias la estación americana expone a diferencia de Fuerteventura, un descenso general a partir de 1997 mostrándose este año el máximo absoluto de ocurrencias de intrusiones de polvo en todo el periodo con un total de 20 eventos. Los siguientes máximos coincidiendo en general con los de las horas de polvo son observados en 2000 con 16 ocurrencias seguido de los observados en 1994 y 1996 con 15 eventos. El mínimo en número de ocurrencias para Phoenix se detecta en 2004 con 7 eventos cuando se encuentra el máximo absoluto para Canarias. El número total de eventos para

Phoenix para todo el periodo fue 146. Durante el periodo estival se registra el mayor número de episodios de polvo, aproximadamente un 51% del total de los casos estudiados, seguidos de los de primavera, con el 20 % de los episodios e invierno con el 16% de los mismos y siendo difícilmente observadas los de otoño que constituyen aproximadamente el 13% del total. En general, Phoenix presenta mayor número de eventos de polvo que Canarias pero menos intensas.

Para *Phoenix* coinciden en general los años de máximas y mínimas ocurrencias con los de días de polvo. El número total de éstos últimos fue 154.

PHOENIX SKY HARBOR INTERNATIONAL AIRPORT (1994-2004)							
año	n. oc. primav.	n. oc. verano	n. oc. otoño	n. oc. invierno	n. oc. Total	n. de días de polvo	n. de horas de polvo
1994	3	7	2	3	15	15	16
1995	2	4	1	4	11	13	13
1996	4	9	1	1	15	16	17
1997	7	9	2	2	20	20	15.5
1998	1	5	3	3	12	13	17.5
1999	0	9	2	2	13	14	8
2000	2	9	3	2	16	16	15
2001	3	5	2	1	11	12	7
2002	2	5	2	5	14	16	24
2003	3	8	0	1	12	12	9.5
2004	1	5	0	1	7	7	9.5
Total	29	75	19	24	146	154	152

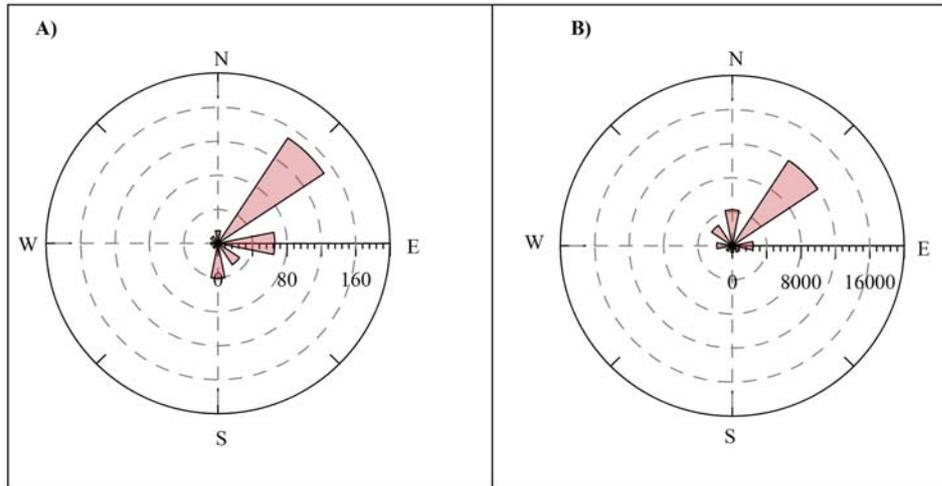
Tabla 2. Frecuencia de eventos de calima: número de ocurrencias por estaciones (n.oc.), días y horas para *Phoenix Sky Harbor International Airport*. Visibilidad ≤ 8000 m (1994-2004).

3.3. Vientos en superficie dominantes en las áreas de estudio en situaciones de intrusión de polvo con origen desértico:

La figura 5 muestra la dirección predominante del viento en superficie en situaciones de calima tomando exclusivamente aquellos datos en los que la visibilidad es menor o igual a 5000 metros, considerando este umbral representativo de situaciones debidas exclusivamente a polvo en suspensión, en comparación con la representación de la rosa de viento general para los aeródromos de referencia durante periodo de estudio. Para Fuerteventura, en ausencia de calimas se observa que la situación de alisios es dominante, los vientos más frecuentes después del régimen de alisios son los de dirección norte y noroeste (Fig. 5B). En situaciones de calima con visibilidades iguales o inferiores a 5000 m (Fig 5A) se observa la predominancia del viento del nordeste a la que sucede en frecuencia el este. A continuación, para este tipo de situaciones están presentes las direcciones sur y sureste. Realizando la misma

representación en situaciones susceptibles de calima con visibilidades iguales o inferiores a 3000 metros (Fig. 6 A) se observó el predominio del régimen del este seguido en frecuencia por el sur, sureste y nordeste. Siendo los vientos del suroeste apenas perceptibles. Para el aeropuerto de Phoenix en Arizona, se realizan similares representaciones. Se observa que en ausencia de calimas (Fig.5D) predominan para nuestro periodo de estudio los vientos del oeste seguidos por los del este estando en bastante menor frecuencia los del sureste, suroeste y noroeste. En presencia de aerosoles de tipo desértico que reducen la visibilidad hasta o por debajo de 5000 metros (Fig. 5C), prevalecen los vientos del sur seguidos estrechamente por los del oeste. El régimen de vientos procedente del este y sureste, ambos en similar porcentaje, también están presentes aunque en menor frecuencia siendo los de dirección nordeste apenas perceptibles. Estudios anteriores muestran como dirección predominante del viento en general para este aeropuerto el oeste durante el mes de julio y el este durante los meses de junio, agosto y septiembre (*Schmidli, 1996*) lo cual está en

Aeropuerto de Fuerteventura. (Islas Canarias, España)
1994-2004



Phoenix Sky Harbor International airport, (Phoenix, USA)
1994-2004

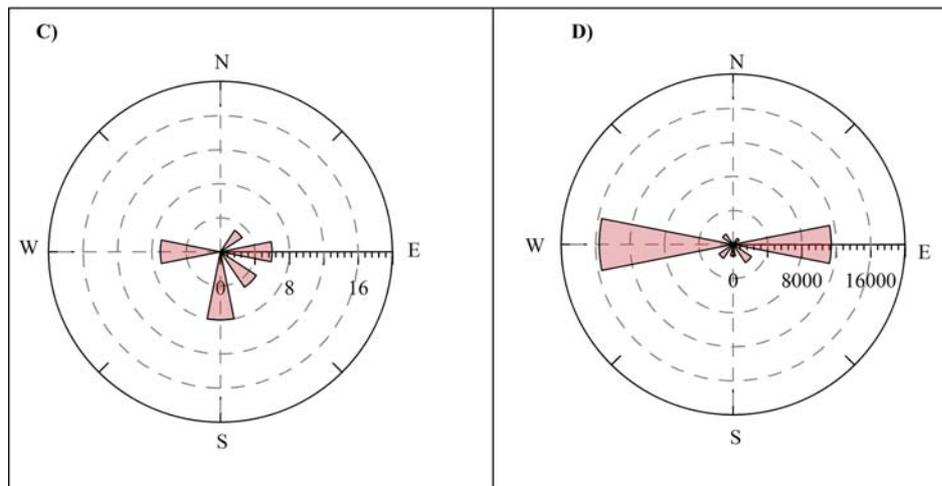


Fig.5. A) y C) Dirección del viento en superficie en situaciones de eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS). Visibilidad ≤ 5000 m. sobre el aeropuerto de Fuerteventura y Phoenix Sky Harbor International Airport respectivamente. B) y D) Rosa de viento en superficie para el periodo 1994-2004 sobre el aeropuerto de Fuerteventura y Phoenix Sky Harbor International Airport respectivamente. Datos horarios de superficie procedentes de METARs (INM y NCDC).

relativa concordancia con nuestros resultados dada la predominancia estival de las intrusiones de aire de origen desértico sobre Arizona.

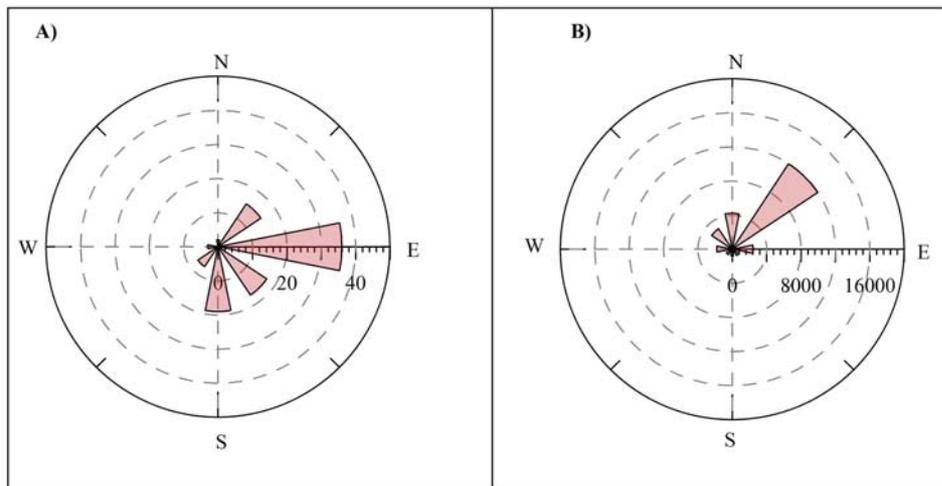
En el análisis similar realizado tomando como criterio una reducción de visibilidad de 3000 metros, cuando las emisiones de polvo afectan al aeropuerto de Phoenix (Fig. 6C), la circulación en superficie que afecta a este área es claramente del sur, seguida en menor frecuencia por un régimen de vientos procedente del oeste, estando los del suroeste y sureste apenas presentes. En la figura 7 se representa la dirección del viento en superficie en vientos en kts para el periodo considerado.

En situaciones de invasiones saharianas, en Fuerteventura (Fig.7 A) los vientos suelen ser del segundo cuadrante, irregulares y racheados, con frecuentes giros, variaciones durante el día y calmas (*Memorándum climatológico descriptivo. Aeropuerto Fuerteventura*). Situaciones de polvo en suspensión sobre este aeropuerto, considerando eventos que reducen la visibilidad hasta 8000 metros, se caracterizan durante el día por vientos con una velocidad media de unos 10 kts del nordeste y este estando los del sur y sureste en escasa proporción. Por la noche dominan los del nordeste seguidos por los del noroeste con una velocidad

media de 9 a 10 kts estando los del este y oeste en baja frecuencia. Aunque las rachas máximas pueden alcanzar valores de hasta 30 kts durante el día y 25 kts por la noche. Sin embargo, las situaciones de calima sobre el área metropolitana de Phoenix (Fig. 7 B) se caracterizan durante el día por vientos con una velocidad media de 8 kts dominando los del este y en menor frecuencia los del oeste y sureste y por la noche con una velocidad media de 18 kts predominan los del sureste seguidos por los del

oeste y nordeste. Sin embargo, las rachas máximas pueden alcanzar valores de hasta 27 kts durante el día y 35 kts por la noche. En este aeródromo destaca el hecho de que los eventos de polvo más intensos en general tienen lugar por la noche siendo entonces cuando se producen los vientos más fuertes, siendo la variación diurna de la intensidad del viento en situaciones de intrusión de polvo muy marcada.

Aeropuerto de Fuerteventura. (Islas Canarias, España)
1994-2004



Phoenix Sky Harbor International airport, (Phoenix,USA)
1994-2004

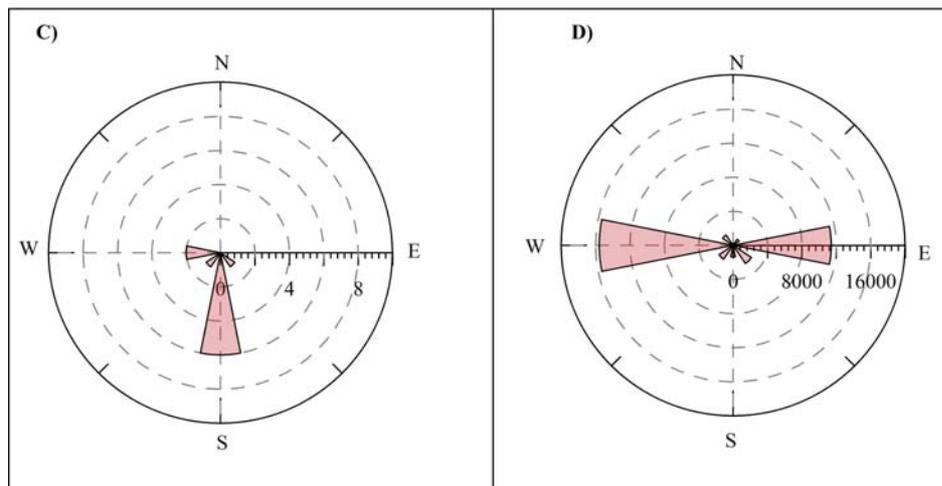


Fig. 6. A) y C) Dirección del viento en superficie en situaciones de eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS). Visibilidad ≤ 3000 m. sobre el aeropuerto de Fuerteventura y Phoenix Sky Harbor International Airport respectivamente. B) y D) Rosa de viento en superficie para el periodo 1994-2004 sobre el aeropuerto de Fuerteventura y Phoenix Sky Harbor International Airport respectivamente. Datos horarios de superficie procedentes de METARs (INM y NCDC).

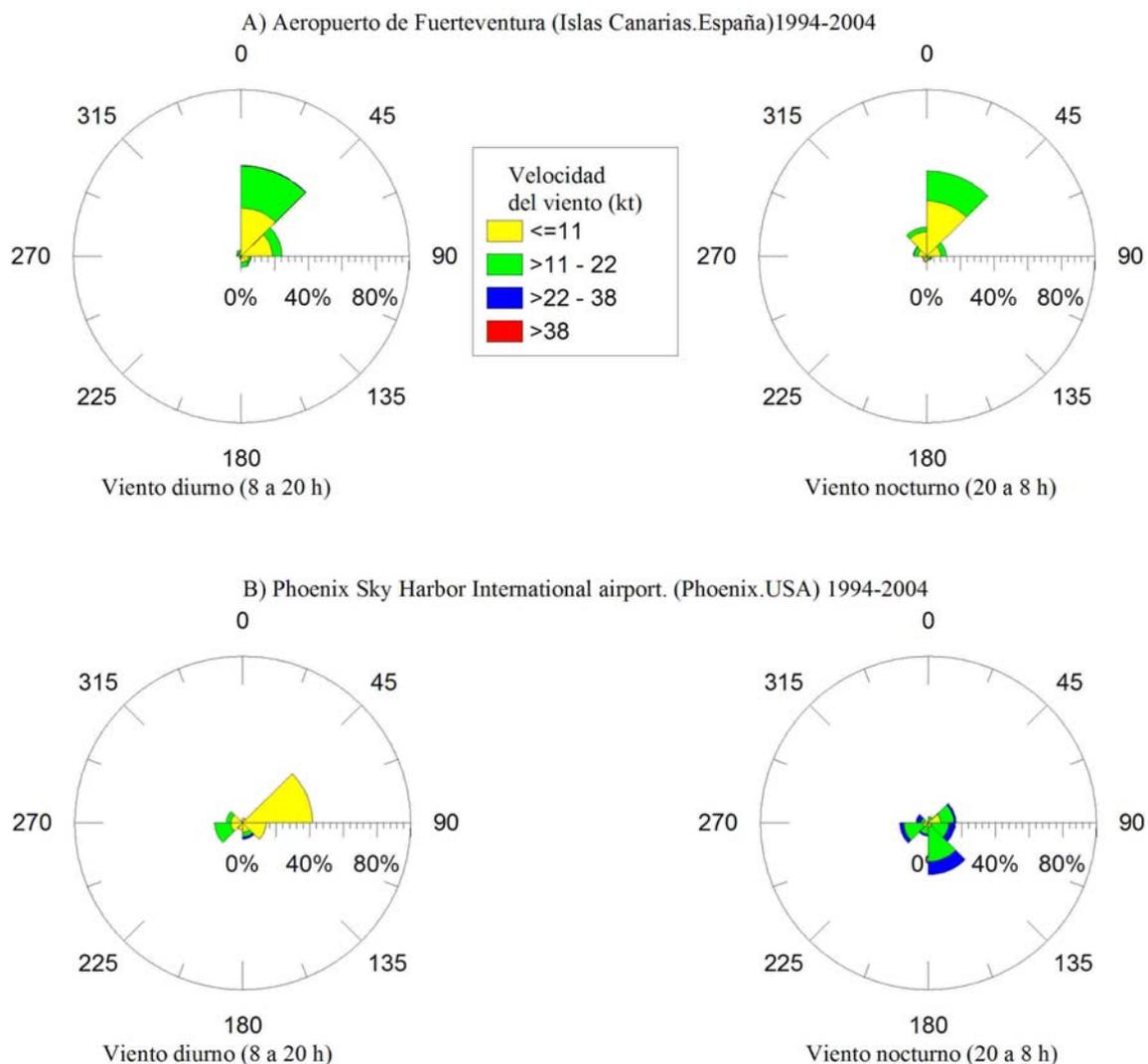


Fig.7. Dirección del viento en superficie en situaciones de eventos de polvo (HZ, DU, DRDU o DS) e intensidad en kts desde visibilidad ≤ 8000 m. En amarillo se representan vientos flojos, en verde moderados y en azul fuertes.

3.4. Clasificación de las configuraciones sinópticas favorables a la intrusión de aerosoles minerales de origen desértico sobre las áreas de estudio:

Una breve descripción meteorológica de las áreas geográficas estudiadas puede ayudar a comprender mejor los mecanismos que hacen que intrusiones de polvo de origen desértico les afecten.

Respecto al área de Canarias, durante el invierno el anticiclón de Azores experimenta un debilitamiento desplazándose de su posición normal (Díaz, *et al.* 2001) junto con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur. Dicha situación junto con el establecimiento de un sistema de bajas presiones térmicas próximo a la costa occidental africana afectando al entorno de Canarias y altas presiones sobre el norte o noroeste

de África da lugar a un régimen del este que favorece la entrada de polvo sobre las islas.

Respecto al área de Arizona, se encuentra normalmente bajo la influencia de la dorsal localizada en el interior o a lo largo de la costa oeste de los Estados Unidos propiciando un tiempo claro y cálido. A principios del verano, desde finales de junio hasta principios de julio, se produce un avance del anticiclón del Pacífico este hacia el norte, el vórtice polar se contrae y el alta del Pacífico se expande, fortaleciéndose y moviéndose hacia el norte favoreciendo condiciones atmosféricas estables. Tal situación limita la precipitación frontal a lo largo de la costa oeste de EE UU, pero la convección local asociada a una baja térmica en superficie sobre el suroeste se desarrolla creando ciertas condiciones inestables pudiendo llover en algunas áreas del



Fig. 8. Dust devil.14/09/00. Condado de Coconino, Arizona.
(<http://www.wrh.noaa.gov/Flagstaff/science/dustdvl.htm>).

suroeste de EE UU y norte de Méjico. (Davis and Walker, 1992). Las altas presiones se sitúan sobre el nordeste de Arizona lo cual hace que el viento sea del sur o sureste. Estos vientos aportan humedad desde el océano Pacífico, el golfo de California y el golfo de Méjico hacia el suroeste de los Estados Unidos causando tormentas sobre la región. En algunos casos, tales condiciones de tiempo severo se acompañan de tormentas de polvo que tienen lugar en los desiertos del suroeste de Arizona como

es el caso del desierto de Sonora afectando a algunas ciudades como Phoenix. Estas tormentas asociadas con fuertes vientos turbulentos pueden reducir sensiblemente la visibilidad horizontal. En ocasiones especiales, se observa un tipo de intensas tormentas de arena conocidas como *haboobs*, características de regiones muy secas. Son comunes en el desierto del Sahara y en áridas regiones del SW de los Estados Unidos como Texas, Nuevo Méjico y Arizona. Estos fenómenos en ocasiones pueden estar acompañados de vórtices conocidos como *dust devils* por los residentes de Arizona o *eddy tornadoes* (Ingram, 1973). Suelen ocurrir en zonas abiertas del desierto y están asociados con la zona frontal de una gran tormenta de polvo. En la figura 8 se muestra un ejemplo que ocasionó daños el 14 de septiembre de 2000 en el condado de Coconino cerca de Flagstaff, Arizona.

A continuación se describen los principales tipos sinópticos favorables a entradas de polvo diferenciando las áreas de estudio seleccionadas considerando visibilidades menores o iguales a 3000 metros.

3.4.1 Área de Canarias:

TIPOS DE CONFIGURACIONES SINÓPTICAS SOBRE LAS ISLAS CANARIAS		
Tipo 1	ANABSC	Anticiclón N / NW África. Bajas presiones sobre S/ SW Islas Canarias
Tipo 2	ANABNC	Anticiclón N / NW África. Bajas presiones W/NW Islas Canarias
Tipo 3	ANA	Anticiclón N / NW África.
Tipo 4	ANABSAR	Anticiclón N / NW África. Bajas presiones S Argelia

Tabla 3. Configuraciones tipo que favorecen las intrusiones de polvo sobre Fuerteventura (Islas Canarias; 1994-2004).

De los 22 episodios de intrusiones intensas de polvo sahariano estudiados para el área de Canarias se obtienen 4 tipos de tiempo atmosférico que se resumen en la tabla 3. Ejemplos de cada uno de ellos se muestran en las figuras que representan campos de modelos numéricos a las 12 UTC de geopotencial en superficie a partir de reanálisis del NCEP y NCAR (Fig. 9).

Prácticamente en todas las situaciones estudiadas la configuración sinóptica que da origen a entrada de calima sobre Canarias coincide con el establecimiento de un potente anticiclón afectando al norte o noroeste de África. Encontramos que los episodios en los que se registran visibilidades entre 100 a 1500 metros éste se sitúa sobre el oeste de Argelia, sur de Marruecos, Sahara occidental o norte

de Mauritania y rara vez, si posee un radio de acción considerable, sobre el Mediterráneo occidental o

Europa Central.

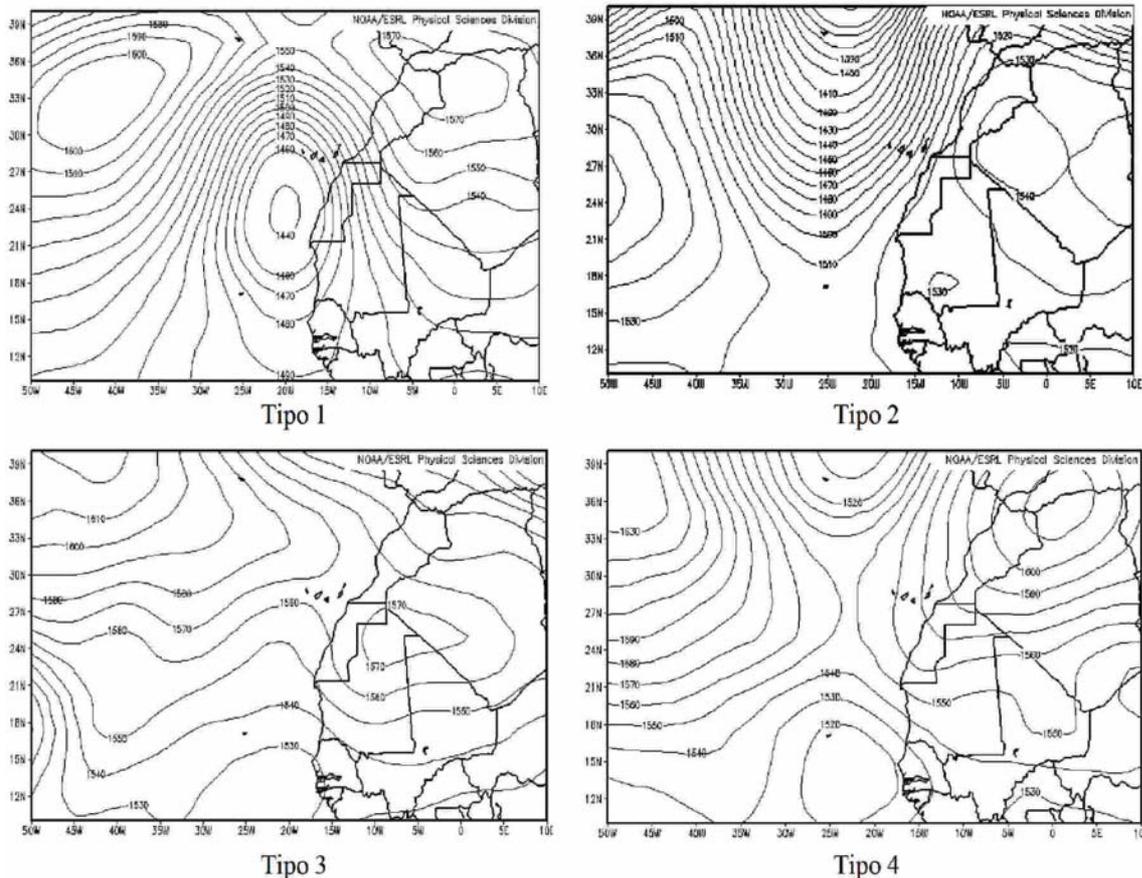


Fig.9. Tipos de tiempo sinópticos favorables a la entrada de calimas sobre las Islas Canarias. Geopotencial en 1000 hPa a 12 UTC. Reanálisis del NCEP y NCAR (NOAA). Visibilidad ≤ 3000 m, 1994-2004.

Para aquellos en que las visibilidades registradas están entre 2000 y 3000 metros las altas presiones se localizan en general al norte de Argelia, Mediterráneo occidental, península Ibérica e incluso en el norte de Azores. Este sistema de altas presiones suele estar acompañado por una depresión en el entorno de Canarias, preferentemente al sur o suroeste de las islas (*Tipo 1*) lo que genera un flujo del sureste propiciando la entrada de polvo sobre el archipiélago. En este tipo se engloban el 41% de las situaciones analizadas resumidas en la tabla 4. Bajo el segundo tipo sinóptico más frecuente que favorece estas intrusiones (*Tipo 2*) y constituyendo un 36% de los episodios analizados, las bajas presiones están al noroeste o alguna vez al oeste de las islas. En algún caso particular el centro anticiclónico se sitúa al norte de la península Ibérica, reflejado en nuestro estudio en el episodio del 2 de abril de 1995, o al norte de Azores, como el caso del 17 de febrero de 1996, afectando al noroeste de la península Ibérica y noroeste de África. Los ejemplos más representativos enmarcados en este tipo se muestran en la tabla 5. Con menor frecuencia, aproximadamente un 18% de los casos de estudio, encontramos episodios donde la

circulación que favorece éste fenómeno es claramente regida por flujo anticiclónico procedente del norte o noroeste del continente africano sin que exista un sistema de bajas presiones que afecte claramente al archipiélago (*Tipo 3*) o bien que junto al alta africana al noroeste de Canarias se encuentre un anticiclón atlántico centrado en el entorno de Azores. Como caso excepcional, en un porcentaje de aproximadamente un 4% de los episodios estudiados, encontramos aquellos en que al sistema de altas presiones al noroeste de África le acompaña una depresión al sur de Argelia (*Tipo 4*). Como ejemplo encontramos la situación del 23 de julio de 2004. Los eventos de polvo más intensos caracterizados bajo los tipos 3 y 4 se resumen en la tabla 6.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo 1) SOBRE EL AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA (1994-2004)

orden	episodio	principal día de polvo	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	11-15/02/98	13/02/98	I	800	78	+HZ +DU		1021	NNE E
2	05-07/01/99	07/01/99	I	300	22	HZ	+RA	1015	E SE
3	23-27/02/00	25/02/00	I	100	56	HZ	-RA -DZ	1018	N ESE
4	31/07/00 a 02/08/00	31/07/00	V	1500	42.5	+DRDU		1011	W
5	06-11/01/02	06/01/02	I	400	64	HZ DS	+SHRA TS +RA	1016	ESE
6	04-08/10/02	05/10/02	O	3000	45	HZ		1015	N
7	01-05/02/03	03/02/03	I	3000	25.5	HZ			ENE
8	05-16/08/03	12/08/03	V	1000	100	BR	+SHRA TS		NE ENE
9	24-25/08/04	25/08/04	V	2000	24.5	HZ		1013	NNE ENE

Tabla 4. Episodios de polvo sobre el aeropuerto de *Fuerteventura* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo 1.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo 2) SOBRE EL AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA (1994-2004)

orden	episodio	principal día de polvo	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	23-29/03/95	24/03/95	P	1000	62	HZ		1017	NNE
2	02-05/04/95	02/04/95	P	3000	57	HZ		1015	N-NNE
3	12-13/12/95	13/12/95	O	2000	1	HZ +SHRA			SSW
4	17/02/96	17/02/96	I	3000	9.5	HZ		1024	N-NNE
5	01-11/03/00	06/03/00	I	2500	128	HZ		1016	E-W
6	29-31/12/01	29-30/12/01	I	2000	38	HZ		1016	ENE WSW
7	07-13/02/02	13/02/02	I	2500	30	HZ		1015	W WNW
8	17-18/02/04	17/02/04	I	1000	26.5	HZ	SH +SHRA TS	1015	N-ENE

Tabla 5. Episodios de polvo sobre el aeropuerto de *Fuerteventura* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo 2.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLDES DESÉRTICOS (Tipos 3 y 4) SOBRE EL AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA (1994-2004)

tipo	episodio	principal día de polvo	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
3	19-22/02/98	20/02/98	I	3000	34.5	HZ	BR	1022	NNE SE
3	03-06/03/04	03/03/04	I	1500	55	HZ	BR/FU	1025	NNE ESE
3	29/01/94 a 01/02/94	01/02/94	I	3000	40.5	HZ/DU		1023	NNW NE
3	16/09/99	16/09/99	V	1000	1	+DU/DU/DRDU		1018	WNW
4	22-26/07/04	23/07/04	V	3000	54.5	HZ/DU		1015	WNW ENE

Tabla 6. Episodios de polvo sobre el aeropuerto de *Fuerteventura* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipos 3 y 4.

Las configuraciones sinópticas estudiadas se dan principalmente durante el invierno. En general el fenómeno que produce la disminución de visibilidad es la calima (HZ) que en ocasiones como en el episodio encontrado entre los días 11 y 15 de febrero de 1998 es intensa (+HZ). Este evento, clasificado en este estudio como **Tipo 1**, ha sido considerado la mayor intrusión de polvo sahariano entre 1985-1998 (*Torres, 2000*). La intensidad del citado episodio ha sido confirmada por los resultados obtenidos a través del proyecto *CANIGO (Canary Islands Azores Gibraltar Observation)* en el periodo de observación 1996-1999 (*Pérez et al., 2002*). Nuestro análisis para eventos con visibilidades inferiores a 3000 metros, revela que en febrero de 2000 (**Tipo 1**) se observa la mínima reducción por polvo (100 metros) de los casos estudiados y en marzo de 2000 (**Tipo 2**) el episodio más largo (128 horas).

En diciembre de 1995 encontramos el único episodio dentro de los estudiados en el que este fenómeno es concomitante con chubascos fuertes en el aeropuerto de Fuerteventura, (Tabla 5), pudiendo ser registrados en otras ocasiones antes o después de

la observación de polvo en suspensión. Se trata de un corto episodio clasificado como **Tipo 2** en el que bajas presiones al noroeste de las islas se desplazan hacia el este afectando a la mitad más oriental del archipiélago.

Algunas situaciones están vinculadas a la ocurrencia de fenómenos adversos como aquellos casos en que se establece una depresión aislada en niveles altos (*DANA*) generalmente al oeste o noroeste de las islas y tienen lugar en invierno. Destacan las situaciones correspondientes a enero de 1999 (*Bustos, 1999*), febrero de 2000 y enero de 2002 clasificadas en el estudio como **Tipo 1** (Tabla 4) o el caso de febrero de 2004 considerada dentro del **Tipo 2** (Tabla 5). En este último episodio destaca el desplazamiento de la pluma de polvo, observando como el día 17 sale de la costa noroccidental africana desplazándose hacia el oeste, afectando a la mitad oriental del archipiélago (Fig. 10) y al día siguiente afecta a las islas más occidentales experimentando un ligero transporte hacia el este siguiendo el giro ciclónico del centro de bajas presiones situado al noroeste de las islas.

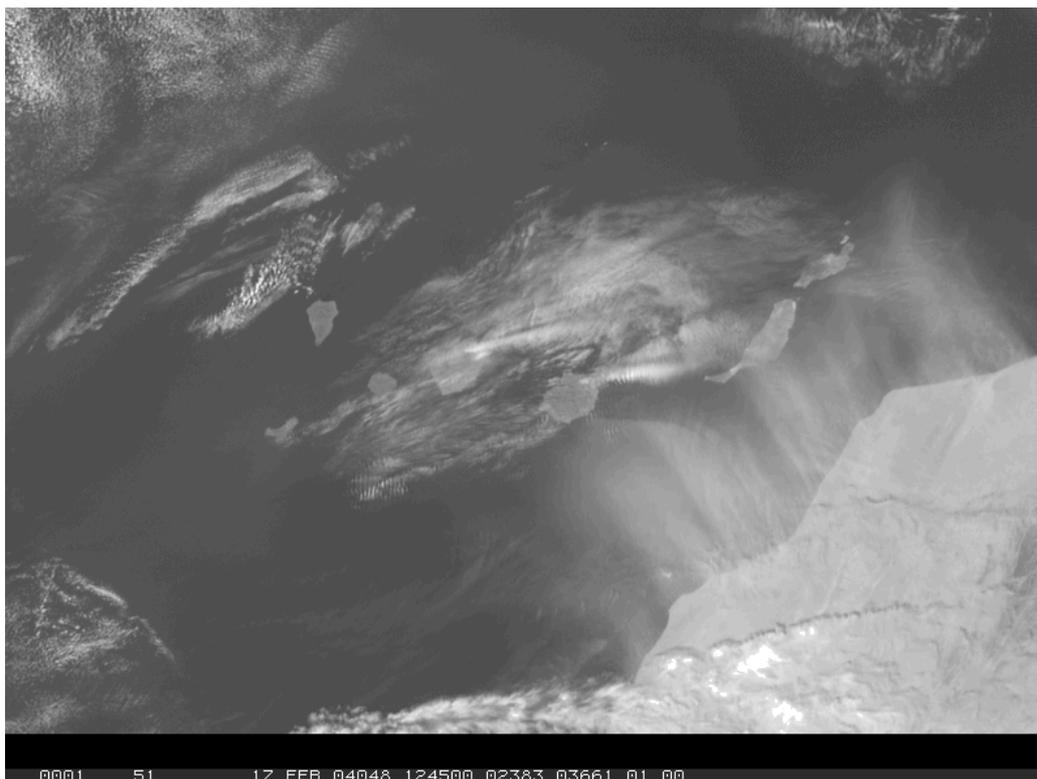


Fig.10. Imagen visible MSG. Irrupción de polvo sobre Canarias. 17/02/04.

Una configuración típica que suele acompañar a las intrusiones de polvo sahariano se denomina *dipolo orográfico* y se suele localizar en el entorno del *Atlas* (Marruecos), como se muestra para el día 3 de agosto de 2000 (Fig. 11). Se define como aquella estructura mesoescalar de presión que consiste en una anomalía positiva (sobrepresión) a barlovento y una anomalía negativa (depresión) a

sotavento de una cresta montañosa con respecto al flujo general que la cruza. Esta estructura se presenta siempre que cualquier tipo de elevación orografía intercepta a un flujo de aire más o menos organizado (Díaz, 1993). Acompañando a dicha configuración dipolar suele observarse una línea de convergencia en la costa noroccidental africana en 850 hPa (1500 metros).

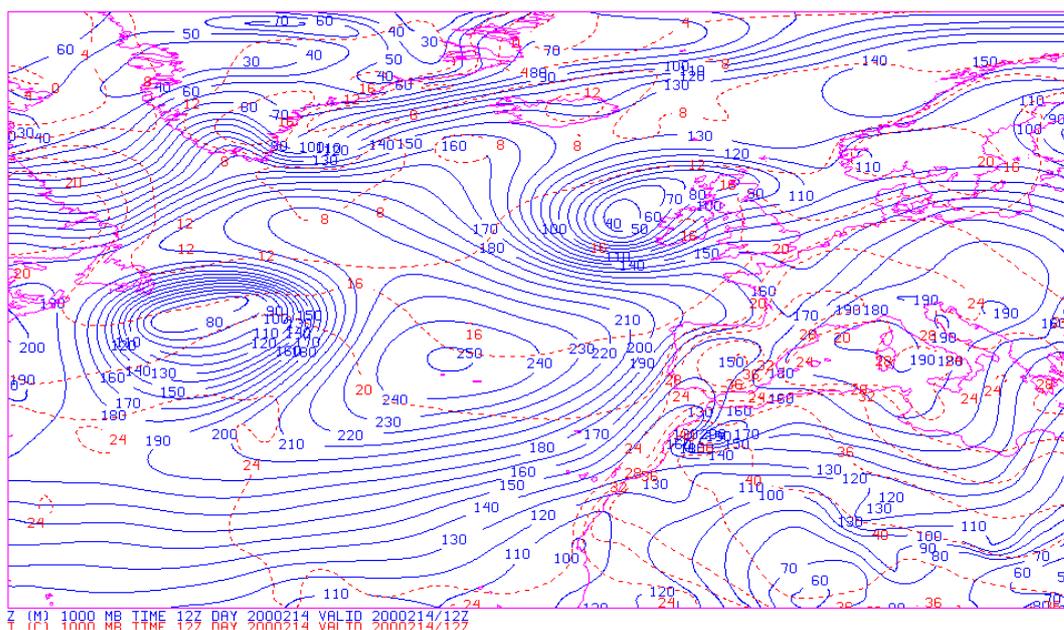


Fig. 11. Geopotencial y temperatura. (1000 hPa). ECMWF. 03/08/00 .12 UTC.

En nuestro análisis la encontramos con frecuencia junto a las circulaciones generales que responden al **Tipo 1** como en los eventos del 31 de julio al 2 de agosto de 2000, en el del 05 al 16 de agosto de 2003, así como en los episodios de octubre de 2002 y agosto de 2004 (Tabla 4) y en algún caso particular al **Tipo 4** como sucede en julio de 2004 coincidiendo con una ola de calor (Tabla 6).

3.4.2. Área de Phoenix:

De los 38 episodios de intrusiones de polvo estudiados procedentes del desierto de Sonora que afectan al área metropolitana de Phoenix se obtienen 4 tipos sinópticos (Fig. 12) que se resumen en la tabla 7.

TIPOS DE CONFIGURACIONES SINÓPTICAS SOBRE ARIZONA		
Tipo a	BYu	Bajas presiones SW Arizona/ NW México (Yuma)
Tipo b	BGC	Bajas presiones Golfo de California
Tipo c	AAZ	Anticiclón sobre Arizona
Tipo d	BNE/SE AZ	Bajas presiones NE /SE Arizona

Tabla 7. Configuraciones tipo que favorecen las intrusiones de polvo sobre *Phoenix* (Arizona; 1994-2004).

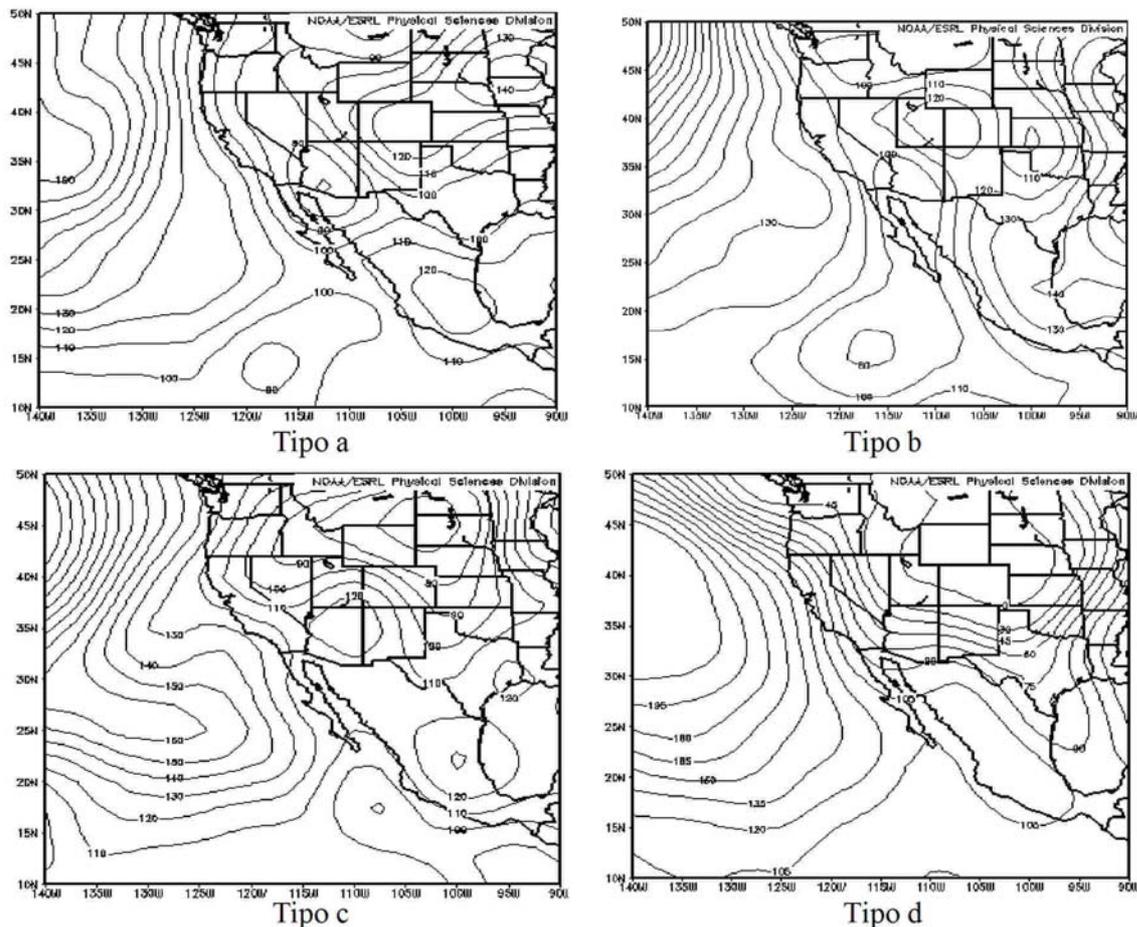


Fig.12. Tipos de tiempo sinópticos favorables a la entrada de aerosoles minerales de origen desértico sobre Arizona. Geopotencial en 1000 hPa a 12 UTC. Reanálisis del NCEP y NCAR (NOAA). Visibilidad \leq 3000 m. 1994-2004.

El más frecuente es el clasificado como **Tipo a** dentro del cual se engloban el 53% de los episodios estudiados (Tabla 8). Se caracteriza por el dominio de un centro de bajas presiones sobre el suroeste de Arizona localizado sobre *Yuma* afectando al sur de California y noroeste de Méjico en el desierto de Sonora. Las bajas presiones en ocasiones se encuentran ligeramente desplazadas

hacia el este afectando a Nuevo Méjico como el 12 de marzo de 1994 o hacia el norte afectando al estado de Nevada, como ocurre en los episodios del 11 de julio de 1997 y 15 de julio de 2002.

En aproximadamente el 95% de los casos analizados denominados **Tipo a** un sistema de altas presiones afectando Méjico sobre las cordilleras de *Sierra Madre Oriental* o *Sierra Madre Occidental*

domina el área lo cual favorece aún más la entrada de polvo sobre el suroeste de Arizona. Esto corresponde a un patrón sinóptico que durante la estación estival afecta a las regiones fronterizas entre Méjico y EE UU caracterizado por una atmósfera cálida y húmeda directamente relacionada con la circulación subtropical. (Comrie, 1996). Sólo se detecta un episodio entre los 20 clasificados bajo este tipo con bajas presiones sobre Nuevo Méjico y Texas afectando a Méjico, el 24 de mayo de 1996. (Fig.13).

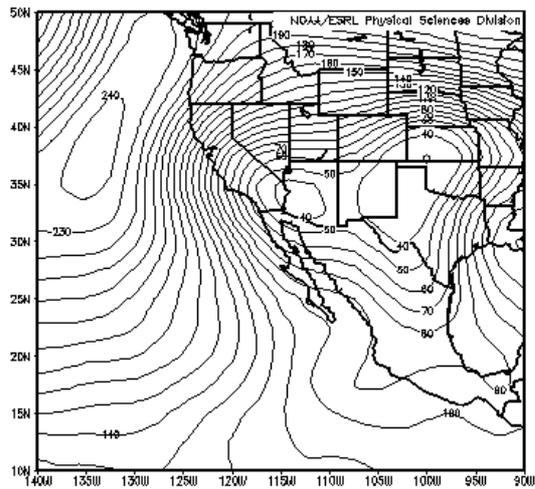


Fig.13. Geopotencial en 1000 hPa. 24/05/96. 12 UTC. Reanálisis del NCEP y NCAR (NOAA).

La segunda configuración favorable a la entrada de aerosoles de tipo natural sobre este aeródromo (*Tipo b*) constituye un 13% de los casos estudiados (Tabla 9). En este tipo las bajas presiones se sitúan sobre el golfo de California o al suroeste de la península de California llegando su radio de acción hasta el noroeste de Méjico y en ocasiones suroeste de Arizona. Suele acompañarse de un sistema de altas presiones sobre el este de Méjico afectando a la cordillera de *Sierra Madre Oriental*. Dentro de este tipo enmarcamos cinco episodios de los estudiados, y sólo en uno de ellos, el 12 de agosto de 1995, encontramos bajas presiones sobre Méjico. En igual porcentaje que el tipo anterior están las configuraciones sinópticas con altas presiones sobre Arizona que se extienden afectando al suroeste de EE UU clasificadas como *Tipo c* y descritas en la tabla 10. En la mayoría de ellas se detecta una circulación similar sobre el este de Méjico como el 30 de agosto de 2000. En algunas ocasiones el centro anticiclónico está sobre Nuevo Méjico como el 20 de diciembre de 2002. Sólo el 5 de abril de 1996 un sistema de bajas presiones domina el sur de Méjico. Finalmente, las bajas presiones al nordeste o sureste de Arizona se clasifican como *Tipo d* representando un 21% de los casos de estudio e incluidos en la tabla 11 siendo claramente más frecuente la primera circulación descrita. Sólo es observado un episodio, el 11 de abril de 1997 que

sigue la segunda configuración propuesta. Dichas bajas presiones suelen ir acompañadas por altas afectando Méjico como el 25 de octubre de 1996. En un par de situaciones bajas presiones se localizan al nordeste de Arizona y en Méjico como los episodios de 14 de abril de 1998 y 17 de enero de 1996. (Fig.14)

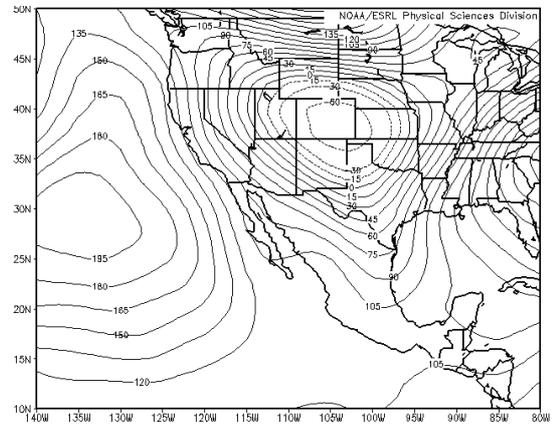


Fig.14. Geopotencial en 1000 hPa. 17/01/96.12 UTC (*Tipo d*). Reanálisis del NCEP y NCAR (NOAA).

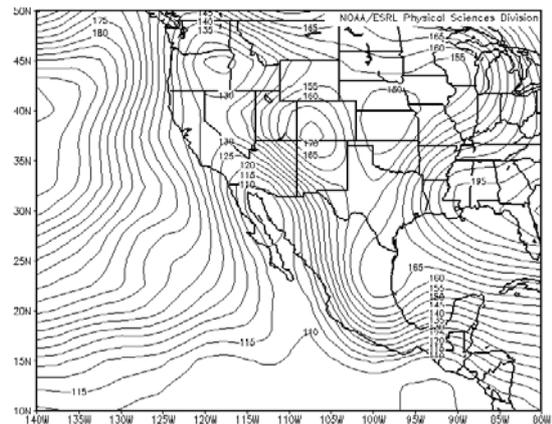


Fig.15. Geopotencial en 1000 hPa. 28/07/96. Reanálisis del NCEP y NCAR (NOAA).

En la mayoría de los casos estudiados encontramos junto con las configuraciones sinópticas anteriormente descritas un centro de altas presiones relativas localizado sobre el punto conocido como “*Cuatro Esquinas*” donde confluyen los estados de Arizona, Utah, Colorado y Nuevo Méjico, aunque puede estar ligeramente desplazada hacia el nordeste. Esta situación es característica del establecimiento del monzón de verano sobre el área de estudio. Un ejemplo lo encontramos el 28 de julio de 1996 clasificado como *Tipo a* (Fig.15).

La mayoría de los episodios estudiados son situaciones estivales. Los más intensos con visibilidades inferiores a 3000 metros registrados en el periodo de estudio están clasificados bajo la configuración sinóptica *Tipo a* destacando los observados el 14 de agosto de 2000 con 100 metros

de visibilidad reducida por calima (HZ) y el 29 de agosto de 1997 con 400 metros por polvo transportado por el viento a poca altura (DRDU) (Tabla 8). Bajo el **Tipo d** destaca el episodio de polvo observado el 21 de abril de 2001 con 400

metros reducidos por calima (HZ). (Tabla 11). Los más largos con unas 6 horas de polvo se detectan en julio del 2000 (**Tipo a**) y enero de 1996 (**Tipo d**).

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo a) SOBRE PHOENIX SKY HARBOR INTERNATIONAL AIRPORT (1994-2004)								
orden	episodio	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	12/03/94	I	1200	1.5	HZ	-RA	1008	WSW
2	29/07/94	V	1200	0.5	HZ/TS/RATS	TS -RA/TSRA	1007	ESE
3	10/09/94	V	2000	1	HZ		1008	S
4	24/05/96	P	2800	0.5	HZ		1002	WSW
5	26/07/96	V	1200	1	HZ	-RA/RA/+RA/ SHRA/+SHRA/ ++SHRA/TSRA/ +TSRA	1011	SE
6	28/07/96	V	800	0.5	HZ	DRDU/-RA/RA/ SHRA/+SHRA/ TSRA	1009	S
7	15/08/96	V	800	0.5	HZ	-RA/TS	1010	NNE
8	23/08/96	V	2800	1	HZ		1007	ENE
9	11/07/97	V	2800	0.5	HZ		1005	S
10	29/08/97	V	400	0.5	DRDU		1007	S
11	17/12/98	O	1200	0.5	HZ		1016	ENE
12	05-06/07/99	V	800	0.5	HZ	SQ/-RA/SHRA/TS /TSRA+RATS	1006	ESE
13	31/07/00	V	1200	5.5	DRDU	HZ/-RA/RA/SHRA/ +SHRA/TS/TSRA	1007	ESE
14	14/08/00	V	100	0.5	HZ/TS	TS/ TSRA	1006	S
15	23/08/00	V	1600	1.5	HZ		1011	SSE
16	21/06/01	V	2000	0.5	DRDU		1013	S
17	10/07/02	V	800	1	DU	HZ/SHRA/ TSRA	1006	SSE
18	13/07/02	V	2400	0.5	DRDU/-RA	HZ/SQ/TS/ -RA/TSRA	1007	SSE
19	15/07/02	V	1200	0.5	DRDU/TS	+RA/+TSRA/ TSRA/TS/++SHRA/ +SHRA/SHRA/HZ	1004	SSE
20	19/08/03	V	1600	0.5	DRDU		1007	S

Tabla 8. Episodios de polvo sobre *Phoenix Sky Harbor International Airport* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo a.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo b) SOBRE PHOENIX SKY HARBOR INTERNATIONAL AIRPORT (1994-2004)

orden	episodio	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	12/08/95	V	2400	1	DRDU	TS/-RA/TSRA	1005	SE
2	29/08/98	V	2000	0.5	HZ/SQ	SQ -RA/RA/SHRA/TSRA	1006	ESE
3	20/08/99	V	1200	1	HZ/SQ	SQ /-RA	1009	SSE
4	06/10/99	O	2000	0.5	HZ		1003	WSW
5	04/08/00	V	1600	0.5	HZ/TS	-RA/TS SHRA/TSRA	1008	S

Tabla 9. Episodios de polvo sobre *Phoenix Sky Harbor International Airport* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo b.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo c) SOBRE PHOENIX SKY HARBOR INTERNATIONAL AIRPORT (1994-2004)

orden	episodio	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	05/04/96	P	2800	0.5	DRDU	-RA	1014	SE
2	18/04/97	P	1200	0.5	HZ	-RA	1011	ENE
3	31/08/99	V	2400	0.5	HZ	+SHRA/SHRA TSRA/-RA	1008	SW
4	30/08/00	V	1600	0.5	HZ		1009	E
5	20-21/12/02	O	1600	0.5	DRDU	-RA	1013	WNW

Tabla 10. Episodios de polvo sobre *Phoenix Sky Harbor International Airport* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo c.

EPISODIOS MÁS DESTACADOS DE INTRUSIONES DE AEROSOLES DESÉRTICOS (Tipo d) SOBRE PHOENIX SKY HARBOR INTERNATIONAL AIRPORT (1994-2004)

orden	episodio	estación	menor visib.	duración (horas)	fenómeno	fenómeno asociado	MSLP (hPa)	direcc. viento
1	17/01/96	I	2000	5.5	HZ	DRDU	1004	W
2	25/10/96	O	1200	4	HZ	FU	1002	W
3	11/04/97	P	2800	0.5	HZ	-RA	1010	ESE
4	12-13/01/98	I	2400	6.5	HZ	BR/FG	1019	NE
5	14/04/98	P	2000	0.5	HZ		1013	SSW
6	22/02/00	I	2000	0.5	HZ		1014	W
7	21/04/01	P	400	0.5	HZ	-RA/+SHRA/TSRA	1008	WNW
8	28/03/02	P	2800	0.5	DRDU		1007	W

Tabla 11. Episodios de polvo sobre *Phoenix Sky Harbor International Airport* (1994-2004). Visibilidad ≤ 3000 m. Tipo d.

El fenómeno más frecuente observado como causante de la disminución de visibilidad es la calima (HZ), aunque también se registra polvo o arena levantada por el viento a poca altura sobre el suelo (DRDU). Las intrusiones de aerosoles naturales de origen desértico en el área de Phoenix suelen estar acompañados de precipitaciones en forma de chubascos que pueden llegar a ser fuertes o incluso muy fuertes como en los episodios del 26 de

julio de 1996 ó 15 de julio de 2002 clasificados como **Tipo a**. Las precipitaciones ocurren preferentemente horas o días después de la intrusión de polvo aunque pueden ocurrir con anterioridad o bien darse ambos fenómenos a la vez como en el último episodio mencionado. Las tormentas también son habituales junto a este tipo de fenómeno como se observan el 29 de julio de 1994 ,14 de agosto de 2000 y 15 de julio de 2002; episodios bajo la

categoría *Tipo a* (Tabla 8) ó 4 de agosto de 2000 clasificado como *Tipo b* (Tabla 9).

3.5. Relación entre las intrusiones de aerosoles de origen desértico en las áreas de estudio y el establecimiento de la circulación monzónica en el noroeste de África y suroeste de EE UU.

El estudio de las intrusiones de aerosoles naturales de origen desértico implica un conocimiento de los fenómenos que provocan el levantamiento de las nubes de polvo en áreas donde la convección es activa.

3.5.1. Convección y circulación monzónica en el noroeste de África. Relación con las ondas del este:

Sobre África occidental se han determinado zonas potencialmente favorables a la inestabilidad, poniéndose de manifiesto la existencia de ejes de penetración del aire cálido, húmedo e inestable procedente del golfo de Guinea (Nigeria, Sierra Leona y Liberia) que inducen a la convección generando frecuentes tormentas de polvo (López, 1999; Iché, 1996). Los procesos convectivos en esta región están directamente relacionados con las circulaciones a gran escala que afectan a la misma como el monzón o *WAM* (*West African Monsoon*), el *TEJ* (*Tropical Easterly Jet*) localizado alrededor de los 5°N y entre 150 y 250 hPa y el *AEJ* (*African Easterly Jet*) localizado sobre unos 30°N y entre 650 y 700 hPa. Este se define como un flujo del este consecuencia del gradiente de temperatura entre el desierto del Sahara y la costa, más fría, de Guinea y el Océano Sur-atlántico (Lare et al. 1994). También hay que tener en cuenta la presencia del chorro subtropical o *STJ* (*Subtropical Jet*) situado sobre los 40° N y a 200 hPa. Así mismo se ha estudiado que las intrusiones extra-tropicales de aire cálido y seco en la troposfera media, relacionadas con el chorro polar (*Polar Jet Stream*) y originadas entre 300 y 200 hPa juegan un importante papel en la variabilidad sinóptica e inter-estacional de la circulación asociada a la convección profunda sobre la región del *Sahel* (Redelsperger y Lafore, 1988, Lafore y Moncrieff, 1989).

Sobre la costa oeste africana varios factores determinan la convección en el continente, como la topografía, el régimen de vientos, las ondas del este o los fuertes ciclos diurnos sobre tierra en un ambiente seco en la troposfera media. El campo de vientos general sobre África occidental y el Atlántico tropical consiste en dos regímenes de vientos alisios cuya frontera se define como *ZCIT* y cuya posición cambia estacionalmente (Semyon et al., 2001) quedando normalmente en latitudes lejanas a Canarias. Durante el verano, entre mayo y junio, ocupa una posición cuasi-estacionaria de 5°N. Su ocurrencia media es el 14 de mayo. El *onset* del

monzón de verano en el oeste de África está relacionado con el desplazamiento de la *ZCIT* a 10°N que se produce entre julio y agosto (Sultan y Janicot, 2000). (<http://www.lodyc.jussieu.fr/~bslod/index.html>), siendo entonces cuando la zona del Sahel recibe considerable precipitación coincidiendo con la estación monzónica en el hemisferio norte (Landsea y Gray, 1992). Los vientos monzónicos están controlados por el gradiente de presión entre la baja térmica centrada a lo largo del frente intertropical (*ITF*) (*Intertropical Front*) y las altas presiones oceánicas regidas por el anticiclón de Santa Helena. Dicha baja térmica se caracteriza por un máximo de vorticidad positiva y por la confluencia de humedad entre los vientos monzónicos húmedos del SW y el seco *Harmattan* del noreste normalmente cargado de polvo a unos 15°N en el frente intertropical, *ITF*. (Sultan y Janicot, 2000, 2003). La profunda convección en la *ZCIT* se localiza al sur de dicha baja térmica, limitada a niveles medios y bajos de la troposfera. El establecimiento del *ITF* corresponde al *preonset* monzónico, aportando humedad a través de sistemas convectivos aislados desarrollados en la zona del Sudan-Sahel. La humedad en la troposfera media y fuertes vientos en capas bajas inducidos por la *AEJ* también favorecen la duración de los sistemas convectivos en la región.

Otro importante factor que condiciona el clima de África occidental es la profunda y seca capa convectiva sobre el Sahara que se extiende hacia el Ecuador alcanzando el *Sahel* denominada *Saharan Air Layer* (*SAL*). Esta capa de mezcla llega a alcanzar una altura de 6 km sobre algunas regiones (Gamo, 1996) y se considera que complementa el papel de la *ZCIT* en el mantenimiento de la *AEJ* (Thorncroft y Blackburn, 1999) que provee la energía e inestabilidad necesarias para el desarrollo, mantenimiento y propagación de las perturbaciones que provocan precipitación en esta región controlada por la advección de humedad desde el golfo de Guinea en niveles bajos. (Sultan y Janicot, 2003).

Ciertas configuraciones sinópticas relacionadas con la convección en África occidental, frecuentes durante el verano y responsables del transporte del polvo desde el continente hacia el océano Atlántico están determinadas por el establecimiento de una corriente general del este que corresponde a la circulación en el lado meridional de un extenso anticiclón, cuya región central se extiende desde Europa occidental hacia el Atlántico, alcanzando la longitud 30°W (Font-Tullot, 1956). Dicha corriente del este está asociada a perturbaciones de tipo tropical conocidas como *ondas del este* o *AEW* (*African Easterly Wave*) (Prospero et al., 2004) que se caracterizan por una deformación en el campo isobárico apareciendo vaguadas más o menos definidas, que se trasladan de

este a oeste. Se pueden observar entre mayo y octubre, preferentemente en agosto y septiembre coincidiendo con la estación de mayor precipitación en el *Sahel* (Fontaine et al, 1995). Dichas perturbaciones consisten en sistemas de bajas presiones que se desplazan horizontalmente hacia el oeste alcanzando su máxima amplitud al nivel de 750 hPa. Están originadas por la presencia de un chorro en la troposfera media en la región africana hacia los 16°N y entre 700 y 650 hPa., constituyendo la inestabilidad asociada al *EAJ* la fuente energética que permite el desarrollo de estas ondas (Burpee, 1972). Están asociadas a vórtices o vaguadas que se propagan sobre unos 17.1° N, desarrollándose al sur del Sahara o al sur (8.6° N) de la *AEJ* (*African Easterly Jet*) (Chang, 1993, Pytharoulis y Thorncroft, Thorncroft y Blackburn, 1999, Fink y Reiner, 2003). Una vaguada en el *AEJ* (aproximadamente a 0° W) puede representar un vórtice en el flanco sur de una onda del este. El giro de estas ondas se produce sobre la línea de unos 15° N. Las que pasan al sur de la misma transportan humedad y generan convección induciendo precipitación. Durante la estación estival, una capa de aire situada sobre los 500 hPa sobre África, asociada con estas ondas avanza hacia el oeste desde la costa noroeste de África, siendo interceptada por la capa de mezcla marítima convirtiéndose en la mencionada *SAL*. (Dunion y Velden, 2004). Una vez que alcanza el océano su base es de unos 900 a 1800 metros y su cima está sobre los 5000 metros. (Díaz et al.1976). La

frecuencia y cantidad de precipitación sobre el Sahel suelen estar reguladas por el paso de dichas perturbaciones que se propagan hacia el oeste estando estrechamente relacionadas con el *AEJ* (Lare y Nicholson, 1994). Su aparición hacia el sur juega un papel importante en la ocurrencia de un tardío monzón de verano y en la génesis de huracanes. Sin embargo, aquellas que pasan al norte de los 15° N aportan aire seco y cálido desde el Sahara transportando toneladas de polvo mientras se desplazan hacia el oeste con los vientos alisios. En aproximadamente una semana pueden transportar polvo hasta el golfo de Méjico y Florida. Tienen un periodo de vida de 3 a 4 días (Carlson, 1969). Suelen estar acompañadas por el establecimiento de un dipolo orográfico sobre el Atlas y convergencia de viento en la costa africana lo cual favorece la entrada de polvo sobre el archipiélago canario. Mientras la perturbación se encuentra sobre el continente africano son muy efectivas en levantar grandes cantidades de polvo que puede ser transportado hacia las Islas Canarias por los vientos del este. Cuando la vaguada cruza las islas lo hace muy lentamente, de forma que durante dos o tres días el archipiélago puede quedar sometido a su acción (Font-Tullot, 1956). En resumen, podemos decir que para localizar ondas del este los flujos en niveles medios, altos son fundamentales. La presencia de un chorro en 700 hPa ayuda a su detección.

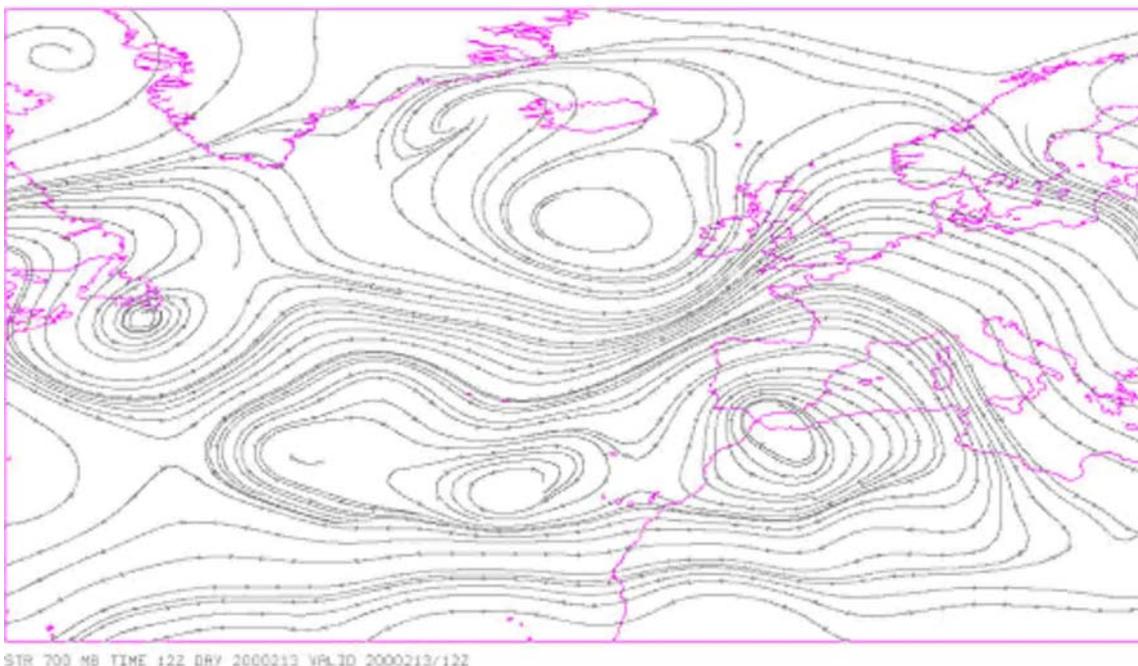


Fig.16. Líneas de corriente sobre las Islas Canarias. (700 hPa). ECMWF. 31/07/00. 12UTC.

Estas vaguadas apenas se notan en el mapa de superficie, aunque a cierta altura sobre el nivel

del mar se aprecia claramente el giro del viento, que pasa de soplar del nordeste, antes del paso del eje de

la vaguada, al sureste después de haber pasado. Además parece ser que la cresta de la onda se inclina hacia el este al aumentar la altura. En el mapa de 500 hPa no suele mostrarse ninguna circulación bien definida, existiendo una región con escaso gradiente y apareciendo un núcleo de altas presiones al oeste de la vaguada de superficie. Cuando esta vaguada es débil en superficie el cambio del tiempo se ve limitado a la aparición de nubes medias. Los campos térmicos no suelen aportar demasiada información, aunque es de esperar la presencia de un mínimo de temperatura en general poco marcado. Tampoco suelen llevar asociadas perturbaciones de temperatura muy destacables en 500 hPa (*Elizaga comunicación personal, 2002*). Es importante analizar las imágenes de WV para localizar dichas perturbaciones. Esta especial configuración sinóptica queda reflejada en este estudio en los episodios del 31 de julio al 2 de agosto de 2000 y del 5 al 16 de agosto de 2003 clasificados como **Tipo 1**. (Tabla 4). Para ambos episodios se detecta la presencia de un *dipolo orográfico* sobre el *Atlas*. La presencia de dicha onda se observa al este de las islas, sobre todo en los campos de líneas de corriente en 850 hPa y de 700 hPa (Fig.16).

3.5.2. Circulación monzónica en el suroeste de EE UU. Relación con líneas de turbonada o Squall Lines:

El flujo del sur o sureste que predomina sobre Arizona en situaciones de entrada de polvo de origen desértico, tiene relación con la típica situación monzónica. En Arizona, el monzón de verano está relacionado con el avance hacia el norte del anticiclón del Pacífico este a finales de junio o principios de julio. También se observa en junio un giro del flujo general desde el suroeste en 500mb (cuando un tiempo seco y caluroso caracteriza a la estación monzónica) hacia el este o sureste en julio, periodo en que el monzón es más nuboso y húmedo. La baja térmica en superficie está normalmente sobre el área baja del río Colorado y norte de Yuma. La región de altas presiones está sobre la zona conocida como "*El área de las cuatro esquinas*" de modo que el flujo sobre Arizona es del sur o sureste. (*David and Walker, 1992, Selover, N., personal communication, 2005*). El establecimiento del "monzón de verano" induce tormentas ocasionales y un aumento de la humedad en las regiones desérticas. La típica situación monzónica tiene lugar cuando aire húmedo atraviesa la superficie cálida del suroeste del continente norteamericano procedente del sur (humedad en niveles bajos desde golfo de California) o el sureste (humedad desde el golfo de Méjico). (*Davis y Walter, 1992, Ellis et al. 2000*). Una vez que la humedad alcanza el área, el calentamiento térmico y la convección generan tormentas, algunas de las cuales están directamente relacionadas con tormentas de polvo que hacen

reducir la visibilidad sobre las áreas próximas a zonas desérticas (*Ellis, 2005, comunicación personal*). La estación monzónica se puede extender desde abril hasta septiembre, pero es más pronunciada en julio y agosto. (*Lydolph, 1985, Bryson and Lowry, 1955*). En junio y septiembre es común encontrar un modelo pre- y post- monzónico conocido como "*dry summer situation*" (*Davis y Walter, 1992*) siendo la dirección del viento general sobre Arizona del SW débil a moderado en 850mb. Durante los meses de verano, tiene lugar el denominado "*The Arizona Monsoon*" caracterizado por la presencia de masas de aire marítimo tropical e intensa insolación. Se consideran como regiones centrales afectadas por el régimen monzónico en el área de estudio las situadas en el suroeste de EEUU y noroeste de Méjico entre 25 - 30° N y 110 - 100° W aproximadamente (*Collier y Zhang, 2006*). Las irrupciones de aire marítimo tropical hacia el desierto de Sonora proveen pues de relativas bajas temperaturas y aire húmedo al el interior de Arizona aportando a las zonas desérticas próximas un incremento brusco de humedad siendo frecuentes fuertes lluvias de carácter convectivo. (*Davis y Walter, 1992, Collier y Zhang, 2006*). Esto explica la ocurrencia de chubascos fuertes aislados y tormentas ocasionales durante el verano (*Green y Sellers, 1964, Bryson y Lowry, 1955 y Hales, 1974*). En Arizona la precipitación se caracteriza por un ascenso brusco entre junio y julio, manteniéndose sin grandes fluctuaciones entre julio y agosto para experimentar un descenso general desde agosto a septiembre. Las lluvias estivales con frecuencia están acompañadas por fuertes vientos y se producen principalmente en las regiones montañosas del centro y sureste de Arizona y oeste de Méjico. Respecto a suroeste de USA y norte de Méjico, la zona de mayor intensidad se localiza en las proximidades de *Sierra Madre Occidental* en Méjico mientras que el nordeste de Méjico es la zona más seca durante los meses de verano (*Collier y Zhang, 2006*). La estación de tormentas abarca desde julio hasta agosto. A veces, se pueden observar breves periodos de polvo en suspensión soplando antes de la precipitación. Es destacable el hecho de que los días con mayor número de tormentas sobre el aeropuerto de Phoenix suelen tener lugar en verano (*Schmidli, 1996*) coincidiendo con la mayor frecuencia en la ocurrencia de intrusiones de polvo observadas durante el periodo de estudio. Cabe resaltar el hecho de que la presencia de centros de altas presiones bien afectando al suroeste de EE UU o al extremo occidental del golfo de México se repite en todos los tipos sinópticos propuestos en este estudio favorables a la entrada de aerosoles de tipo desértico sobre el área metropolitana de Phoenix como se refleja en la tabla 12. Este rasgo es común en las circulaciones monzónicas de la estación estival en la zona de estudio. (*Comrie, 1996*)

Año	Configuración sinóptica tipo	Episodios de polvo sobre PHX cuando anticiclón SW de EE UU	Episodios de polvo sobre PHX cuando anticiclón W Golfo de Méjico
1994	Ta		12/03/94, 29/07/94
1996	Ta		26/07/96, 28/07/96, 15/08/96
	Tc	05/04/96	
1997	Ta		11/07/97, 29/08/97
	Tc	18/04/97	18/04/97
1998	Ta		17/12/98
	Td		13/01/98
1999	Ta		05/07/99, 06/07/99, 10/07/99
2000	Ta		31/07/00, 23/08/00
	Tb		04/08/00
	Tc	30/08/00	30/08/00
	Td		22/02/00
2001	Ta		21/06/01
	Td		21/04/01
2002	Ta		10/07/02, 13/07/02, 15/07/02
	Tc	21/12/02	20/12/02, 21/12/02
	Td		28/03/02
2003	Ta		19/08/03

Tabla 12. Situaciones sinópticas favorables al régimen monzónico coincidiendo con intrusiones de polvo sobre *Phoenix Sky Harbor International Airport*. Visibilidad ≤ 3000 m (1994-2004).

Teniendo en cuenta las fechas de comienzo y final de la circulación monzónica para *Phoenix Sky Harbor Airport* (Arizona), recogidas por *Robert Schmidli* y el *NWS (Nacional Weather Service, 2005)*, podemos decir que casi todos los episodios de intrusión de polvo analizados, con la excepción del 11 de julio de 1997, tienen lugar dentro del periodo monzónico.

En la tabla 13 se resumen algunos episodios estivales estudiados con reducción de visibilidad igual o inferior a 3000 metros y tipos sinópticos asignados, predominando el **Tipo a**, indicando el comienzo y final del régimen monzónico para dicho aeródromo, así como el desplazamiento de la ZCIT de 5° N a 10° N en el periodo 1994-2004 observándose la ocurrencia de éste entre mediados de junio y principios de julio.

Jugando un papel fundamental en la generación de tormentas durante el monzón que afecta al suroeste de EE UU encontramos las líneas de turbonada (*SQ*) o *Squall lines (SLs)*, asociadas a fuertes vientos en superficie (*Schmidt, y Cotton, 1989, Nicholls et al., 1988*). Son estructuras

mesoescalares que suelen localizarse en zonas tropicales o de latitudes medias consistentes en estrechas líneas de células convectivas organizadas orientadas en dirección norte-sur que originan abundante precipitación de tipo estratiforme pudiendo tener más de 1000 km de longitud y persistir durante horas pudiendo viajar más rápido que el viento a cualquier nivel. (*Rowell y Milford, 1993, Schmidt y Cotton, 1989, Nicholls, et al. 1988*). Este fenómeno meteorológico se caracteriza por cambios muy marcados en la velocidad del viento. Comienza bruscamente durando unos minutos y disminuye con rapidez. Con frecuencia viene acompañado por chubascos o tormentas. Constituyen un elemento fundamental para generación de precipitación en el norte y oeste de África (*Global Atmospheric Research Program (GARP) Atlantic Tropical Experiment (GATE), Lafore J-P et al., 2005*) donde suelen estar orientadas en dirección norte-sur y viajar en dirección oeste. (*Rowell y Milford, 1993*). En el análisis mesoescalar de los episodios de polvo estudiados para Phoenix observamos este fenómeno bajo las clasificaciones sinópticas denominadas **Tipo a** (Tabla 8) o **Tipo b** (Tabla 9).

Año	Circulación monzónica en Phoenix (inicio y fin)	Episodios estivales de calima Phoenix	Desplazamiento de la ZCIT de 5°N a 10°N	Episodios estivales de calima Fuerteventura
1994	17Jul-13 Sep	29/07/94 10/09/94 Ta	18 de junio	
1995	11Jul-18 Sep	12/08/95 Tb	15 de junio	
1996	30Jun-13 Sep	26/07/96 28/07/96 15/08/96 23/08/96 Ta	18 de junio	
1997	21Jul-19 Sep	11/07/97 29/08/97 Ta	02 de julio	
1998	04Jul-16 Sep	29/08/98 Tb	04 de julio	
1999	25Jun-25 Sep	05/07/99 a 06/07/99 Ta 20/08/99 Tb 31/08/99Tc	18 de junio	16/09/99 T3
2000	17Jun-31Aug	31/07/00 Ta 14/08/00 Ta 23/08/00Ta 04/08/00Tb 30/08/00 Tc	29 de junio	De 31/07/00 a 02/08/00 T1
2001	21Jun-04Sep	21/06/01 Ta	15 de junio	
2002	09Jul-11Sep	10/07/02 13/07/02 15/07/02 Ta	17 de junio	
2003	18Jul-10 Sep	19/08/03 Ta	30 de junio	De 05/08/03 a 16/08/03 T1
2004	12Jul- 19Aug		15 de junio	De 24/08/04 a 25/08/04 T1 De 22/07/04 a 26/07/04 T4

Tabla 13. Episodios estivales de calima, (visibilidad ≤ 3000 m) sobre los aeropuertos de *Phoenix Sky Harbor Internacional* y *Fuerteventura*, circulación monzónica en *Phoenix Sky Harbor Internacional Airport* y desplazamiento de la ZCIT de 5°N a 10°N en el periodo 1994-2004.

En el primer caso, las líneas de turbonada se observan los días 6 de julio de 1999 y 13 de julio de 2002 algunos minutos antes de la observación de baja visibilidad debida a polvo o calima en la estación de estudio. Para los episodios clasificados bajo el segundo tipo como el 29 de agosto de 1998 y 20 de agosto de 1999 dicho fenómeno coincide en tiempo de observación con un episodio de reducción de visibilidad por calima.

3.6. Relación de intrusiones de polvo en las áreas de estudio con la ocurrencia de tormentas de polvo en áreas desérticas próximas durante el periodo 1994-2004.

Se han observado a través de imágenes de satélite algunos eventos de polvo junto con la ocurrencia de fuertes tormentas de arena.

3.6.1. Ocurrencia de tormentas de polvo en el noroeste de África durante el periodo 1994-2004:

En el área de Canarias, ciertos episodios estudiados coinciden con la ocurrencia de fuertes tormentas en el noroeste y oeste de África en aquellas regiones fuente de aerosoles que causan la llegada de plumas de polvo sobre las islas. Algunos ejemplos que quedan resumidos en la tabla 14. (<http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/>).

Este fenómeno también pueden detectarse a partir de imágenes *TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer Images)* creadas por la NOAA a partir de datos suministrados por NASA. En estas imágenes, el *AI (Aerosol Index)* muestra una estimación de la concentración de aerosoles en la atmósfera.

Episodio de polvo	Visibilidad mínima registrada (Fuerteventura)	Tormentas de polvo en África (observación y trayectorias de plumas de polvo)
06/03/00	2500	Cabo Blanco desplazándose hacia el norte
22/07/01	7000	Norte del Sahara occidental y Mauritania
Del 14/ 01/02 al 15/01/02	6000	Golfo de Guinea
Del 23/04/02 al 29/04/02	4000	Sur de Cabo Verde
Del 27/08/02 al 28/08/02	5000	Entre Mali y Mauritania
Del 02/03/03 al 03/03/03	3500	Cabo Verde
12/03/03	5000	Marruecos
13/12/03	8000	Mauritania extendiéndose hacia el norte
04/02/04	4000	Mauritania y sur de Marruecos
Del 11/02/04 al 18/02/04	1000	Día 11 lago Chad Día 17 sur de Marruecos, norte del Sahara occidental Día 18 oeste de Canarias
Del 03/03/04 al 06/03/04	1500	Sahara, Mauritania y Senegal
Del 18/03/04 al 24/03/04	5000	Cabo Verde
Del 25/08/04 al 26/08/04	2000	Canarias y Madeira dirigiéndose hacia Portugal

Tabla 14. Tormentas de polvo en África coincidiendo con episodios de intrusiones de polvo en el aeropuerto de Fuerteventura. Visibilidad \leq 8000 m. (1994-2004).

Describiremos el episodio de marzo de 2004 por ser considerado uno de los más intensos en nuestro periodo de estudio y coincidir con frecuentes tormentas de polvo sobre el continente africano que se extienden hasta finales de dicho mes. Entre los días 3 y 6 se registran visibilidades de 1500 (Tabla 14) metros en el aeropuerto de Fuerteventura coincidiendo con una tormenta de polvo en el interior del Sahara. En este tipo de situaciones la pluma de polvo puede seguir el flujo en superficie rodeando la alta topografía del Sahara como el *Tibesti* (3415m) o ser canalizada por macizos montañosos como el *Air* (2022m) o el *Hoggar* (2918m) (*Knippertz y Fink, 2006*). En niveles altos, el día 3 la situación se caracteriza por un centro de bajas presiones situado sobre Argelia y otro sobre el Chad. Esta tormenta dura varios días y se observa como los primeros, 3 y 4, la pluma de polvo sale del continente africano siendo observada desde cabo *Yubi* hasta cabo *Verde* afectando a Marruecos, Sahara occidental, Argelia, Mauritania, Mali y Senegal. (http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/Africa_W/2004/DST2afr063_N6.jpg). Los días posteriores, 5 a 8, se detecta una pluma transportando polvo desde Marruecos hacia el Atlántico afectando a Portugal y al estrecho de *Gibraltar*, desplazándose por el Atlántico al oeste de Canarias y conectándose con otra que sale del continente africano a la altura de Guinea y se extiende desde cabo Verde hasta el golfo de Guinea. Desde el 9 de marzo y hasta finales de este mes el polvo se observa preferentemente en el entorno próximo al golfo de Guinea.

También son de destacar los episodios de febrero de 2004 con visibilidad mínima de 1000 metros y el observado entre los días 1 y 11 de marzo de 2000. Este último es el de máxima duración (128 horas) dentro del periodo de estudio (Tabla 5) registrándose 2500 metros como mínima visibilidad el día 6 en el aeropuerto de Fuerteventura (Tabla 14). Se observa como la pluma de polvo sale de la costa oeste africana y comienza afectando a cabo Blanco desplazándose los días siguientes hacia el norte para ser parcialmente absorbida por una borrasca atlántica al final del episodio así como por la circulación de un sistema tormentoso que se mueve hacia Portugal, afectando parte de dicha pluma al suroeste de la península Ibérica. (http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/Africa_W/2000/DSTafrW069_MT.jpg)

3.6.2. Ocurrencia de tormentas de polvo en el suroeste de USA y Méjico durante el periodo 1994-2004.

Las tormentas de polvo en Arizona han sido ampliamente estudiadas por su efecto sobre la

calidad del aire en la zona fronteriza entre EEUU y Méjico (*Brazel y Nickling, 1986*). Cabe mencionar el remolino de arena que causó daños en Glendale (condado de Maricopa, Arizona) el 24 de abril de 1997 cuando se registran 6400 metros de visibilidades Phoenix. Dado que las intrusiones de polvo sobre Phoenix como consecuencia de tormentas de polvo en áreas desérticas próximas son fenómenos muy locales y de corta duración, son difícilmente detectadas a través de imágenes de satélite.

3.7. Concomitancia entre eventos de polvo sobre Canarias o Phoenix y perturbaciones tropicales en los océanos Atlántico y Pacífico:

Se observa que ocasionalmente los episodios de calima sobre Fuerteventura o Arizona, con visibilidades menores o iguales a 8000 metros, coinciden con la ocurrencias de huracanes, ciclones o tormentas tropicales tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico. Encontramos en general más casos en el área de Phoenix que en Canarias, observando durante los años 1996 y 2000 el mayor número episodios de intrusiones de polvo concomitantes con perturbaciones tropicales en Arizona mientras que en 1995 estas ocurrencias coinciden con mayor frecuencia con eventos de polvo sobre latitudes próximas a Fuerteventura.

3.7.1. Área de Canarias:

Para Canarias algunos ejemplos en que se observan perturbaciones tropicales en el océano Atlántico coincidiendo con ocurrencias de intrusiones de polvo en el aeropuerto de Fuerteventura se resumen en la tabla 15. Destaca el episodio del 16 de septiembre del año 1999 en que se registran 1000 metros en el aeropuerto de Fuerteventura coincidiendo con dos huracanes atlánticos afectando a la costa oriental de EEUU: el huracán *Floyd* que tras aproximarse a las Bahamas, Puerto Rico y la costa suroriental de USA se desplaza hacia el norte de Carolina convirtiéndose en tormenta tropical y alcanzando *Nueva Inglaterra* (<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-floyd-19990916-0645utc-84kmir.jpg>) y el huracán *Gert* que tras pasar por Puerto Rico se aproxima al oeste de las pequeñas Antillas. (<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-gert-19990916-0300utc-g8ir.jpg>), (<http://www.srh.noaa.gov/jan/cyclo2000.php>). También cabe mencionar la intrusión de polvo observada entre el 2 y el 3 de noviembre del 2001 en que se registran entre 3500 a 7000 metros en el aeropuerto de Fuerteventura coincidiendo con el huracán *Michelle* en el Caribe.

(<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-michelle-20011102-1745-g8ir2km.jpg>).

Episodio de polvo	Visibilidad mínima registrada (m) (Fuerteventura)	Perturbaciones tropicales en el océano Atlántico
13-18 /08/95	6000	Huracán <i>Felix</i>
24/08/95	7000	Huracán <i>Humberto</i> y varias tormentas tropicales
29/08/95	8000	Huracanes: <i>Humberto</i> y <i>Iris</i> Tormentas tropicales <i>Karen</i> y <i>Luis</i>
30/08/95	7000	Huracán <i>Iris</i> Tormenta tropical <i>Karen</i>
31/08/95	8000	Tormenta tropical <i>Jerry</i>
29/09/95	5000	Huracán <i>Noel</i>
18/10/96	8000	Huracán <i>Lily</i>
Del 05/09/97 al 07/09/97	8000	Huracán <i>Erika</i>
16/09/99	1000	Huracanes <i>Floyd</i> y <i>Gert</i>
Del 02/11/01 al 03/11/01	3500	Huracán <i>Michelle</i>
15/07/02	7000	Tormenta tropical <i>Arthur</i>
16/09/03	5000	Huracán <i>Isabel</i>

Tabla 15. Perturbaciones tropicales en el océano Atlántico coincidiendo con episodios de intrusiones de polvo en el aeropuerto de Fuerteventura. Visibilidad \leq 8000 m. (1994-2004).

3.7.2. Área de Phoenix:

Para el área próxima a Arizona, los episodios de intrusiones de polvo concomitantes con perturbaciones tropicales observadas tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico quedan resumidos en la tabla 16. Caben destacar el paso de las tormentas tropicales *Beryl* en el suroeste del golfo de Méjico y desplazándose hacia el norte, *Hector* al oeste de la península de California e *Ileana* al oeste de la costa de Méjico, el 14 de

agosto de 2000 observando 100 metros de visibilidad en *Phoenix Sky Harbor Airport*.

(<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/ts-beryl-20000814-1815utc-g8ir.jpg>,

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/threestorms-20000814-g10ir.JPG>).

Este es, dentro del periodo de estudio, el episodio en que se registra menor visibilidad en dicho aeropuerto. (Tabla 8). Otros ejemplos significativos con una reducción de visibilidad para dicho aeródromo de hasta 1200 metros se observan junto con la

tormenta tropical *Daniel* formada al sur de la península de California el 31 de julio de 2000 afectando las islas Hawai y la tormenta tropical *Arthur* originada en el golfo de Méjico afectando a Terranova observada el 15 de julio de 2002.

(<http://www.prh.noaa.gov/cphc/tcpages/DANIEL.php>) (www.nhc.noaa.gov/2002arthur.shtml?text).

Finalmente, encontramos otro ejemplo significativo el 23 de agosto de 1996 en que el huracán *Dolly* afecta al este de Méjico, registrándose en el aeropuerto de Phoenix 2800 metros de visibilidad reducida por polvo.

(<http://www.nhc.noaa.gov/1996dolly.html>, <http://fermi.jhuapl.edu/hurr/index.html>)

Episodio de polvo	Visibilidad mínima registrada (m) (Phoenix)	Perturbaciones tropicales	
		Océano Atlántico	Océano Pacífico
01/01/95	8000	Tormenta tropical <i>Gabrielle</i>	Tifones <i>Ryan, Ward, Kent y Oscar</i>
31/07/95	3200	Tormenta tropical <i>Dean</i>	
15/07/96	6400		Tifón
26/07/96	1200	Tormenta tropical <i>Cesar</i>	
23/08/96	2800	Huracán <i>Dolly</i>	
28/08/96	4000	Huracán <i>Edouard</i> Tormenta tropical <i>Fran</i>	
11/07/97	2800	Tormenta tropical <i>Bill</i>	
14/08/98	6400	-	Huracán <i>Georgette</i>
28/08/99	8000	Huracanes <i>Cindy y Dennis</i>	
31/07/00	1200		Tormenta tropical <i>Daniel</i>
14/08/00	100	Tormentas tropicales <i>Beryl, Hector e Ileana</i>	
18/08/00	3200	Tormenta tropical <i>Chris</i>	
28/11/01	4000	Huracán <i>Olga</i>	
15/07/02	1200	Tormenta tropical <i>Arthur</i>	
12/07/03	8000		Tormenta tropical <i>Enrique</i>
12/08/04 13/08/04	6400	Tormenta tropical <i>Bonnie</i> Huracán <i>Charley</i>	

Tabla 16. Perturbaciones tropicales en los océanos Atlántico y Pacífico coincidiendo con episodios de intrusiones de polvo en *Phoenix Sky Harbor International Airport*. Visibilidad ≤ 8000 m. (1994-2004).

4.- Conclusiones :

En este trabajo se han estudiados dos áreas geográficas donde la influencia de los aerosoles de tipo desértico está vinculada a un transporte a distinta escala espacio-temporal. Aunque se carece de información sobre medidas de concentración de polvo in situ, los datos utilizados, básicamente METARs, nos proporcionan una adecuada aproximación de la frecuencia e intensidad de los eventos de polvo sobre las zonas de estudio. Así mismo, a partir del análisis de la variabilidad interanual y estacional de las intrusiones de polvo en dos áreas geográficamente distintas pero que coinciden en su proximidad a regiones desérticas, se ha ampliado el conocimiento de la climatología relacionada con este fenómeno en las citadas zonas.

Para el área de Canarias, los resultados obtenidos responden a un modelo de transporte de aerosoles a gran escala, generado por tormentas de polvo originadas en el noroeste de África y transportadas sobre el océano Atlántico durante varios días pudiendo alcanzar Cuba, Florida e incluso cubrir el mar Caribe y el sureste de EEUU (Herman, et al. 1997, Prospero et al., 2001) observándose en ocasiones en Barbados (Savoi et al., 1989) y Bermuda (Arimoto et al., 1995 y Chiapello et al., 2005). Dichos episodios de intrusión de aire sahariano pueden ser observados a diario por un periodo de una o más semanas. Según Herman et al., 1997, estos podrían durar incluso meses. Se concluye pues con la idea de una masa de aire de procedencia continental que penetra sobre las islas principalmente con vientos del segundo cuadrante procedente del desierto del Sahara, con dominancia del flujo del este seguido del sur y sureste, aunque también es posible encontrar calimas sobre las islas en presencia de vientos alisios.

En comparación con nuestra otra área de estudio, en el suroeste de EEUU encontramos situaciones relacionadas con intrusiones de polvo esporádicas que persisten apenas un día y tienen lugar durante escasos meses al año. Estas pequeñas y cortas invasiones de polvo de origen desértico observadas en el suroeste de EEUU, son frecuentemente consecuencia de tormentas que ocurren en Arizona durante la estación monzónica, lo cual responde a un modelo de pequeñas y localizadas inyecciones de polvo de origen desértico también observadas en los desiertos de *Tarim Basin* y *Takla Maken* en el oeste de China o el lago Eyre en Australia (Herman et al. 1997).

De los episodios de entradas de polvo intensas estudiados para el aeropuerto de

Fuerteventura la mayor parte tienen lugar durante el invierno, generalmente entre enero y febrero coincidiendo con el debilitamiento y desplazándose las altas presiones de Azores de su posición normal (Díaz, et al. 2001) junto con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el sur. Estudios anteriores (Jankowiak y Tanré, 1992) concluyen que el transporte de polvo sobre la costa noroccidental africana tiene lugar preferentemente de diciembre a mayo siendo transportado desde el sur a latitudes más septentrionales. Por otro lado, teniendo en cuenta que nuestro análisis se realiza en base a observaciones en superficie, habría que considerar los cambios estacionales respecto a la altura de la capa de los aerosoles. Por esta razón, se sugiere comparar nuestros resultados con aquellos proporcionados por TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). En el hemisferio norte, durante el verano, las masas de aire del continente africano afectan exclusivamente a la troposfera libre y el transporte de polvo ocurre preferentemente en una capa relativamente elevada seca y cálida debido a su origen desértico, que se extiende desde el tope de la denominada *capa de mezcla marítima (CMM)* o *marine boundary layer (MBL)* sobre el Atlántico occidental hasta una altitud de unos 700 hPa (3000 metros), (Karyampudi et al., 1999, Reid et al. 2002, 2003, Torres et al. 2003) denominada *Saharan Air Layer (SAL)*, (Carlson y Prospero, 1972, Karyampudi et al., 1999); mientras que en invierno proceden de la baja troposfera afectando a la *capa de mezcla marítima* y el transporte está centrado próximo a superficie, sobre unos 900 hPa (1000 metros) (Chiapello et al., 1995, Torres et al. 2003). Además, de acuerdo con otros autores, (Yoon, Y.J. et al., 2007), respecto al análisis de la variación estacional de la concentración de aerosoles deberían tenerse en cuenta otros factores como la velocidad del viento.

Contrariamente a los resultados obtenidos para Canarias, la mayoría de los episodios estudiados para *Phoenix* tienen lugar en verano, cuando el monzón que afecta a Arizona es intenso, aunque dicha ocurrencia puede ir desde abril a septiembre (Lydolph, 1985). Esto está directamente relacionado con el avance del anticiclón del Pacífico este hacia el norte entre finales de junio y comienzo de julio asociado con el giro del flujo general en junio sobre unos 5000 metros hacia el este o sureste en julio (Davis and Walker., 1992), lo cual es consistente con nuestros resultados. Se observa que el desplazamiento de la ZCIT hacia el norte durante el periodo de estudio tiene lugar entre mediados de junio y principios de julio mientras que las ocurrencias de polvo sobre *Phoenix* algo más tarde, entre julio y agosto (Tabla 13). En este sentido, sería interesante estudiar más detenidamente la

relación entre el comienzo del monzón en el suroeste de los EE. UU. en relación con el giro de la ZCIT (*Sultan y Janicot, 2000, Prospero, 1981*) y las incursiones de aerosoles sobre áreas próximas.

También se propone estudiar el origen de las masas de aire procedentes de zonas desérticas del suroeste de EEUU y Méjico en base a determinar a que altitud se produce el transporte del polvo y su influencia en la variabilidad estacional de las entradas del mismo sobre áreas adyacentes.

De igual modo sería de interés analizar la variación diurna de los aerosoles de origen desértico en las áreas de estudio, para lo cual debería tenerse en cuenta su relación con el espesor de la capa límite planetaria y la estabilidad de las posibles inversiones térmicas. (*Shaw, G.E., 2007*)

A pesar de que el periodo de análisis puede parecer corto para caracterizar las intrusiones de polvo sobre las zonas seleccionadas, ha sido posible extraer los principales rasgos sinópticos en base a clasificarlos. Dicha caracterización, teniendo en cuenta variables atmosféricas y fenómenos que los acompañan, junto con las herramientas operativas existentes, facilita su predicción en las áreas de estudio, lo cual implica una anticipación en el conocimiento de la ocurrencia de los mismos pudiendo ejercer cierto control sobre las consecuencias ambientales y sanitarias que provocan.

Las situaciones de entrada de polvo sobre el archipiélago canario pueden atribuirse en general al establecimiento de un sistema de bajas presiones térmicas próximo a la costa occidental africana afectando al entorno de las islas preferentemente al sur o suroeste de las mismas y de una menor influencia del anticiclón de Azores. Esto suele estar acompañado por el establecimiento de altas presiones sobre el norte o noroeste de África (*Tipo 1*). Sin embargo, la configuración sinóptica más frecuente dentro de los episodios estudiados para Phoenix corresponde al dominio de un centro de bajas presiones sobre el suroeste Arizona afectando al sur de California y noroeste de Méjico generando un flujo del sur o sureste que favorece la intrusión de polvo desde el desierto de Sonora. (**Tipo a**).

Las comparaciones realizadas entre diferentes modelos numéricos muestran una alta consistencia entre los resultados obtenidos a partir de los reanálisis del ECMWF y NCEP-NCAR realizados cubriendo el periodo 1994-2004. El tipo de clasificación sinóptica empleada se realiza a través del reanálisis y la composición de campos a partir de un archivo convencional lo cual conlleva un mayor número de decisiones subjetivas que condicionan los resultados finales más que cualquier técnica automática de clasificación sinóptica como

las empleadas por *Davis y Kalkstein, 1990, Petisco y Martín, 1995, Frakes y Arnal, 1997, Rasilla, 2003 o Dorta, 2005*. Es por ello que se considera una muestra reducida como representativa de los eventos de polvo en las áreas de estudio a partir de un conocimiento general de la dinámica atmosférica de dichas zonas a diferencia de las técnicas estadísticas en las que es viable el empleo de un mayor número de situaciones. Por otro lado, si bien se considera que las técnicas estadísticas son de gran utilidad para realizar este tipo de análisis, existen ciertas configuraciones sinópticas especialmente dentro de la mesoscala difíciles de determinar que han podido ser analizadas a través del método empleado en este estudio. No obstante, sería interesante comparar de forma más exhaustiva los resultados con aquellos procedentes de técnicas dentro del marco de la estadística inferencial como el análisis discriminante (*Rasilla, 1995*) o la regresión logística (*Armengot, 2002*).

En comparación con las clasificaciones de configuraciones sinópticas que propician la entrada de polvo sobre las islas Canarias propuestas por otros autores, (*Dorta et al., 2005*) existe similitud con los resultados obtenidos respecto al predominio de los tipos anticiclónicos en cuanto a frecuencia, encontrando coincidencia con los *Tipos 1 y 3* propuestos, lo cual confirma la validez del método de clasificación empleada. También coinciden en general con este autor respecto a la variabilidad interanual y estacional de los eventos de aire continental para Canarias para el periodo estudiado, encontrando en invierno un predominio de aire sahariano. La intensidad de los eventos estimada mediante el promedio de horas de polvo al año (Fig. 3A) es consistente con la proporción anual de días de polvo propuesta por *Dorta et al., 2005* encontrando sólo discrepancias para los años 1994 y 1997, así como en el máximo absoluto supuesto en este trabajo en el año 2000.

Para el caso de Phoenix, podemos comparar los tipos de tiempo atmosférico expuestos con los presentados por otros autores, caracterizados como modelos de circulación típicos de la estación estival, propios de un régimen húmedo y cálido, influenciados por la circulación subtropical relacionada con la estación monzónica que afecta al suroeste de EE UU. En esta línea, según *Comrie, 1996*, responderían a este modelo situaciones como la extensión del anticiclón de Bermuda sobre el extremo occidental del golfo de Méjico (afectando a San Antonio en Méjico) junto con un centro de bajas presiones afectando al suroeste de USA (cluster 5 según *Comrie, 1996*) o el establecimiento de un anticiclón en el Pacífico afectando al golfo de California y suroeste de USA (cluster 3 según *Comrie, 1996*) clasificadas como típicas situaciones de verano estando la primera relacionada

directamente con el régimen monzónico. Estas configuraciones, clusters 5 y 3, coinciden con las denominadas **Tipo a** y **Tipo c** respectivamente en nuestro estudio. Situaciones sinópticas que se encuentran en un 72% de los episodios estudiados relacionados con intrusiones de polvo sobre Phoenix con visibilidades iguales o menores a 3000 metros. De ellas un 64% están bajo la clasificación **Tipo a** asignada en este estudio y un 8% bajo la denominación **Tipo c** (Tablas 8 y 10 respectivamente).

A pesar de la dificultad inherente del análisis empleado y el escaso número de episodios considerados, los resultados obtenidos ponen en evidencia la relación entre las intrusiones de polvo en las áreas de estudio con perturbaciones atmosféricas como las ondas del este en Canarias y las líneas de turbonada en Arizona habiendo sido ampliamente estudiada la relación entre ambos fenómenos en el oeste de África (Fink y Reiner, 2003), así como su asociación con la variabilidad de la intensidad de las tormentas de polvo (Próspero, 1996) sobre el África occidental. (Fink y Reiner, 2003).

Además, este estudio confirma la relación de las entradas de aerosoles con las circulaciones monzónicas en las áreas próximas a las zonas de estudio mostrando en particular la vinculación entre el monzón de verano y la variabilidad del transporte de polvo sobre Arizona. Un análisis más exhaustivo sobre dicha relación implicaría un conocimiento de los fenómenos convectivos desencadenantes de las tormentas de polvo en regiones donde la predicción suele ser extremadamente compleja. (López, 1999). El paso de ondas del este próximas a Canarias podría establecer cierta relación de las intrusiones de polvo sobre Canarias con la circulación monzónica en África occidental durante la estación estival. Sin embargo la mayor parte de los episodios analizados tienen lugar en invierno, por lo que sería conveniente el efecto del monzón de invierno en África sobre el régimen de vientos que llega a Canarias teniendo en cuenta la menor influencia del régimen de los alisios.

Dada la importancia que están tomando las intrusiones de polvo de origen desértico debido a su relación con fenómenos que resultan de la interacción atmósfera-océano e implicaciones sanitarias y en la calidad del aire, (Próspero, 1999) se propone en futuros trabajos continuar estudiando los procesos que originan las tormentas de polvo así como el desplazamiento de las plumas resultantes. Algunos autores señalan que el periodo estacional en que se produce el transporte de estos aerosoles coincide con fuertes fenómenos del Niño (Próspero y Lamb, 2003) o fases positivas del índice NAO (North Atlantic Oscillation) (Pérez et al., 2003). A

partir de datos del TOMs se ha observado como la variabilidad del transporte de polvo africano durante el invierno está directamente relacionado con dicho índice (Moullin y Chiapello, 2004). Su estrecha relación con el periodo monzónico en verano que exhibe una fuerte variabilidad interanual en el oeste de EEUU, pone de manifiesto su vinculación con las anomalías de la temperatura del agua de mar y los episodios ENSO (Oscilación del Pacífico Sur) (Carleton et al., 1990). De acuerdo con la relación establecida por Dorta et al. (2005) entre el predominio de aire sahariano y un valor negativo del índice SOI (Southern Oscillation Index), nuestros resultados coinciden con los del autor observándose para el año 1998 un marcado máximo de entrada de polvo de origen continental sobre las islas Canarias, siendo un año de máximo intensidad de El Niño. Del mismo modo para los años 1999 y 2001 se propone un valor positivo del índice SOI coincidiendo con años en que decrece la intensidad de calima sobre las islas. (Fig. 3A). Se propone en futuros trabajos analizar las pautas de variación de los eventos de polvo con los principales patrones atmosféricos de circulación en base a otros índices como EA (East Atlantic pattern) para Canarias y con PNA (Pacific/North American pattern), EP (East Pacific pattern), NP (North Pacific pattern), PDO (Pacific Decadal Oscillation) o MEI (Multivariate ENSO Index) para Arizona.

En base a analizar la relación entre eventos de polvo y perturbaciones tropicales, podemos decir que en relación con el área de Canarias, se conoce el importante papel que juega la SAL (Saharan Air Layer) en la frecuencia e intensidad de las perturbaciones tropicales en el Atlántico tropical (Dunion y Velden, 2004) considerando que durante los años más húmedos en África occidental, propicios para el desarrollo de ondas del este, se observa una mayor ocurrencia de huracanes atlánticos (Landsea y Gray, 1992). Respecto a la ocurrencia de dichas perturbaciones afectando directamente a las áreas de estudio, conocemos que la única tormenta tropical que se ha observado próxima a Canarias en su génesis, Delta, tuvo lugar a finales de noviembre de 2005, considerada depresión extra-tropical cuando alcanzó las islas. (Martín, et al, 2005). (<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/DELTA.shtml?>).

Para el área de Arizona, respecto a la relación entre la ocurrencia de eventos de polvo y perturbaciones tropicales, el paso de las tormentas tropicales Beryl, Hector e Ileana próximas a Arizona en agosto del año 2000 coincidiendo con uno de los episodios más destacables de intrusión de aerosoles de origen desértico afectando a Phoenix revela una posible relación entre ambos fenómenos meteorológicos. Sin embargo, Arizona se ve

afectada esporádicamente por tormentas tropicales procedentes de la baja California o la costa de Sonora, por ejemplo *Nora* que afectó a Arizona el 25 de septiembre de 1997 o *Juliette* que se observa en *Yuma* el 2 de octubre de 2001.

(<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo1997/pacifico/nora/nora.html>,

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-nora-ir.gif>)

(<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2001/pacifico/juliette/juliette.html>,

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-juliette-20010925-2100-g10vis.jpg>)

Teniendo en cuenta la escasa frecuencia en la observación de estas perturbaciones sobre las áreas de estudio no podemos relacionarlas directamente con entradas de aire continental. En el futuro sería conveniente estudiar la implicación de éstos y otros fenómenos meteorológicos a escala global que afectan a la interfase atmósfera–océano en la ocurrencia de fenómenos relacionados con intrusión de aerosoles de origen desértico.

Finalmente se propone comparar los resultados obtenidos con datos de superficie de otras estaciones próximas a las estudiadas en base a evaluar la extensión del polvo en longitud. En el archipiélago canario encontramos *Lanzarote*, *Gran Canaria*, *Tenerife Sur*, *Tenerife Norte*, *La Palma*, *La Gomera* y *El Hierro*. En EE UU las estaciones propuestas son Tucson, *Casa Grande*, *Nogales* y *Yuma* y en el NE de Méjico, *Hermosillo* y *Puerto Peñasco*.

Agradecimientos:

Este estudio es el resultado de un trabajo de investigación fruto de una colaboración entre *Aemet* (*Agencia Estatal de Meteorología*) en España, ASU (*Arizona State University*) en USA y el NWS (*Nacional Weather Service*) en la ciudad de Tucson (*Arizona, USA*) cuya realización ha sido posible gracias a Jesús Patán Torres (subdirector general del Área de Predicción en *Aemet*), Dr A. W. Ellis (*State Climatologist for Arizona. School of Geographical Sciences. ASU*) y Eric Pytlak (*science and operations officer. NWS Tucson*). También deseo expresar mi agradecimiento a las siguientes instituciones y personas por su apoyo y colaboración en la realización del mismo: G.P.V. (*Grupo de Predicción y Vigilancia en el C.M.T. de Las Palmas. Aemet*) y ATAP (*Área de Técnicas de Análisis y Predicción. Aemet*) en particular a Fermín Elizaga Rodríguez. A Manuel Palomares (jefe de sección del departamento del Servicio de Relaciones Internacionales (*Aemet*) y Dr. Susanne Neuer (*associate professor. School of Life Sciences. ASU*) por su apoyo en el inicio del proyecto y a Eduardo Monreal (*Área de Telemática Meteorológica. Aemet*) por su ayuda en la adquisición de los datos.

Acrónimos:

Aemet (*Agencia Estatal de Meteorología*)
AEJ (*African Easterly Jet*)
AEW (*African Easterly Wave*)
AI (*Aerosol Index*)
AMMA (*African Monsoon Multidisciplinary Analyses*)
ASU (*Arizona State University*)
CANIGO (*Canary Islands Azores Gibraltar Observation*)
CMM (*Capa de mezcla marítima*)
CMT (*Centro Meteorológico Territorial*)
CREPAD (*Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de Datos de Observación de la Tierra*)
DANA (*Depresión aislada en niveles altos*)
EA (*East Atlantic pattern*)
ECMWF (*European Centre for Medium- Range Weather Forecasts*)
ENSO (*El Niño Southern Oscillation*)
EP (*East Pacific pattern*)
GARP (*Atmospheric Research Program*)
GATE (*Atlantic Tropical Experiment*)
GPV (*Grupo de Predicción y Vigilancia*)
HIRLAM (*High Resolution Limited Area Modelling*)
INM (*Instituto Nacional de Meteorología*)
INTA (*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*).
ITF (*Intertropical Front*)
MARS (*Meteorological Archival and Retrieval System*)
MBL (*Marine Boundary Layer*)
MEI (*Multivariate ENSO Index*)
METARs (*METEorological Aerodrome Report*)
MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)
MSG (*Meteosat de Segunda Generación*)
NAO (*North Atlantic Oscillation*)
NCAR (*Nacional Center for Atmospheric Research*)
NCEP (*Nacional Center for Environmental Prediction*)
NCDC (*National Climatic Data Center*)
NOAA (*Nacional Oceanic and Atmospheric Administration*)
NP (*North Pacific pattern*)
NWS (*Nacional Weather Service*)
PDO (*Pacific Decadel Oscillation*)
PNA (*Pacific/North American pattern*)
SAL (*Saharan Air Layer*)
SeaWIFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*)
SOI (*Southern Oscillation Index*)
STAP (*Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción*)
STJ (*Subtropical Jet*)
TEJ (*Tropical Easterly Jet*)
TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer Images*)
UTC (*Universal Time Code*)
WAM (*West African Monsoon*)
ZCIT (*Zona de Convergencia Intertropical*)

Acrónimos incluidos en Tablas:

MSLP: Presión media a nivel del mar
P: Primavera
V: Verano
O: Otoño
I: Invierno
HZ: Calima
DU: Polvo en suspensión extendido.
DR: Polvo transportado por el viento a poca altura sobre el suelo.
RA: Lluvia
SHRA: Chubasco
TS: Tormenta
TSRA: Tormenta con lluvia
SQ: Línea de turbonada.
FU: Humo
FG: Niebla
BR: Bruma

Rerefencias:

- Arimoto, R., Duce, R.A., Ray, B.J., Ellis Jr., W.G., Cullen, J.D. y Merrill, J.T. (1995). "Trace elements in the atmosphere over the North Atlantic". *J. Geophys. Res.*, Vol. 100, N.O. D.1. pp. 1199-1213.
- Armengot, R. (2002). "Las lluvias intensas en la comunidad valenciana". M.M.A. (Ministerio de Medio Ambiente) Madrid. España.
- Boreson J., Diller, A.M. y Peccia, J. (2004). "Correlating bioaerosol load with PM2.5 and PM10 concentrations: a comparison between natural desert and urban-fringe aerosols". Department of Civil and Environmental Engineering, Engineering Center and Department of Chemical and Materials Engineering, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Burpee, R.W. (1972). "The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of North Africa" *J. Atmos. Sci.*, 29, pp.77-99.
- Brazel, A.J. y Nickling, W.G. (1986). "The relationship of weather types to dust storms generation in Arizona" (1965-1980). *International Journal of Climatology*, 6 pp.255-75.
- Bryson, R.A. y Lowry, W.P. (1955). "The Synoptic Climatology of the Arizona Summer Precipitation Singularity". *Bulletin of the American Meteorological Society*. 36, pp.329-339.
- Cakmur R.V. y Miller R.L.(1999). "A comparison of seasonal and interannual variability of soil dust aerosols over the Atlantic Ocean as inferred by Toms AI and AVHRR AOT retrievals". Department of Applied Physics and Applied Mathematics, Columbia University, New York. NASA Goddard Institute for Space Studies, New York.
- Carleton, A.M., Carpenter, D.A. y Weser P.J.(1990). "Mechanisms of interannual variability of the southwest United States summer rainfall maximum". *J.Climate*, 3 pp.999-1015.
- Carlson, T. N. (1969). "Some remarks on African disturbances and their progress over the tropical Atlantic", *Mon. Weather Rev.*, 97, pp. 716– 726.
- Carlson, T.N. y Prospero, J.M.(1972). "The large-scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic". *J.Appl. Meteorol.* 11, pp. 283-297.
- CDC, (2000). "Coccidioidomycosis in travelers returning from Mexico-Pennsylvania, 2000. Morbidity and Mortality". *Weekly Report* 44, pp.1004–1006.
- Collier, J. C. y Zhang G.J. (2006). "Simulation of the North American Monsoon by the NCAR CCM3 and Its Sensitivity to Convection Parameterization". *Journal of Climate* Vo. 19 no. 12 pp. 2851-66.
- Comrie A. (1996). "An all-season synoptic climatology of air pollution in the US-Mexico border region". *Professional Geographer*. Vol 48, pp.237-251.
- CMT en Canarias Oriental. "Memorandum climatológico descriptivo. Aeropuerto de Fuerteventura. El Matorral". Ministerio de Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología. España.
- Chang, C. B. (1993). "Impact of desert environment on the genesis of African wave disturbances," *J. Atmos. Sci.*, 50, pp. 2137–2145.
- Chiappello, I.G., Bergametti, L., Gomes, B. Chatenet, F. Dullac, J. Pimienta, J. y Santos Suárez, E. (1995). "An additional layer transport of sahelian and saharan dust over the northeastern tropical Atlantic". *Geophys.Res. Lett.*, 22, pp.3191-3194.
- Chiappello, I., Moulin, C. y 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.
- Davis, R. y Kalkstein, L.(1990) "Development of an automated spatial synoptic climatological classification". *Int.J.Climatol.*, 10, pp. 769-794.
- Davis R.E. y Walker D.R. (1992). "An Upper-Air Synoptic Climatology of the Western United States". *Journal of Climate*. Vol. 5, No. 12, pp. 1449-1467.
- Diaz, H. F., Carlson, T. N. y Prospero, J. M. (1976). "A study of the structure and dynamics of the Saharan air layer over the northern equatorial Atlantic during BOMEX". *National Hurricane and Experimental Meteorology Laboratory NOAA Tech. Memo. ERL WMPO-32*, pp.61.
- Díaz, J. (1993). "Variación espacio y temporal de los parámetros de estabilidad en orografía compleja y ondas de montaña". Universidad Complutense de Madrid. España. Facultad de Ciencias Físicas.
- Díaz, J.P., Expósito, F.J., Torres, C., Herrera, J. F., Prospero, J.M. y Romero, M.C. (2001). "Radiative properties of aerosols in Saharan dust outbreaks using ground-based and satellite data: Applications

- to radiative forcing". J. Geophys. Res., 106(D16), 18, pp.403-18, pp.416.
- Dorta, P., Gelado, M.D., Hernández, J.J., Cardona, P., Collado, C., Mendoza, S., Rodríguez, M.J., Siruela, V. y Torres, M.E. (2005). "Frecuencia, estacionalidad y tendencias de las advecciones de aire sahariano en Canarias (1976-2003) Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante. Investigaciones Geográficas, nº38 (205) pp.23-45 ISSN: 0213-4619
- Dunion, J.P. y Velden C.S. (2004). "The impact of the Saharan air layer on Atlantic tropical cyclone activity". Bulletin of the American Meteorological Society. Vol.85 nº3 pp. 353-365.
- Ellis, A.W., Hildebrandt, M.L., Thomas, W.M. y Fernando, H.J.S. (2000). "Analysis of the climatic mechanisms contributing to the summertime transport of lower atmospheric ozone across metropolitan Phoenix, Arizona, USA". Climate Research. Vol.15, pp.13-31.
- Fink A.H. y Reiner, A. (2003). "Spatiotemporal variability of the relation between African Easterly Waves and West African Squall Lines in 1998 and 1999". Journal of Geophysical Research, Vol.108, Nº D11, 4332, doi: 10.1029/2002JD002816.
- Fisher, M.C., Koenig, G.L., White, T., y Taylor, J., (2000). "Pathogenic clones versus environmentally driven population increase: analysis of an epidemic of the human fungal pathogen *Coccidioides immitis*". Journal of Clinical Microbiology 38, 807-813.
- Font-Tullot I. (1956). "El tiempo atmosférico en las islas Canarias". Servicio Meteorológico Nacional. Ministerio del aire. Dirección general de protección de vuelo. Madrid.
- Fontaine B., Janicot S. y Moron V. (1995). "Rainfall anomaly patterns and wind field signals over west Africa in August (1958-1989)". Journal of Climate. Vol.8 Nº6. ISSN 0894-855. pp. 1503-1510.
- Frakes, B. y Arnal, B. (1997). "A procedure for blending manual and correlation-based synoptic classification". Int. J. Climatology, 17, pp.1381-1396.
- Gamo, M., (1996). "Thickness of the dry convection and large-scale subsidence above deserts". Bound-Layer Meteor., 79, pp.265-278.
- García Mendez A. (1999). "Modelo conceptual de Anafrente. Convección cálida". Módulo Tempo. Diagnóstico en niveles bajos. STAP. INM. España.
- Gillette, D. (1999). "A qualitative geophysical explanation for "hot spot" dust source region, Contributions to Atmospheric Physics", 72, pp.67-77.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O. y Lin S-J. (2001). "Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model". Journal of Geophysical Research, Vol.106. Nº17 pp 20,255-20,273.
- Green C.R. y Sellers W.D., editors. (1964). "Arizona Climate". The University of Arizona Press. Tucson, Arizona 1. pp.503.
- Grodsky S.A y Carton J.A. (2001). "Coupled land/atmosphere interactions in the West African Monsoon". Geophysical Research Letters, Vol.28, nº28, pp.1503-1506.
- Hales, J.E., Jr. (1974). "Southwestern United States Summer Monsoon Source, Gulf of Mexico and Pacific Ocean." Journal of Applied Meteorology. 13, pp.331-342.
- Heinold, B., Helmert, J., Hellmuth, O., Wolke, R., Ansmann, A., Marticorena, B., Laurent, B. y Tegen, I. (2007). "Regional modelling of Saharan dust events using LM-MUSCAT: Model description and case studies." Journal of Geophysical Research, Vol.112, D11204, doi:10.1029/2006JD007443.
- INM (Instituto Nacional de Meteorología) (1996). "Definición de los meteoros significativos para las operaciones aeronáuticas". Sección de Meteorología aeronáutica. España.
- Ingram, R.S. (1973). "Arizona eddy tornadoes". NOAA Tech. Memo. NWS WR 91, 9 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001), "Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate", editado por J.T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Jankowiak, I. y Tanré, D. (1992). "Satellite Climatology of Saharan Dust Outbreaks: Method and preliminary Results". Journal of Climate. Vol.5 Nº6. ISSN 0894-8755. Pp.646-656.
- Kalu, A.E. (1979). "The African dust plume: its characteristics and propagation across west Africa in winter. Saharan dust: mobilization, transport and deposition". Edited by C. Morales, John Wiley, New York. pp. 95-118.
- Karyampudi, V.M., Palm, S.P., Reagen, J.A., Fang, H., Grant, W.B., Hoff, R.M., Moulin, C., Pierce, H.F., Torres, O., Browell, E.V. y Melfi, S.H. (1999). "Validation of the Saharan dust plume conceptual model using Lidar, Meteosat, and ECMWF data". Bull. Amer. Met. Soc., 80, pp.1045-1076.
- Knippertz, P. y Fink, A.H. (2006). "Synoptic and dynamic aspects of an extreme springtime Saharan dust outbreak" Q.J.R. Meteorol. Soc., 132, pp.1153-1177.
- Koren, I. y Kaufman, Y.J. (2004). "Direct wind measurements of Saharan dust events from Terra and Aqua satellites". Geophysical Research Letters, VOL.31, L06122, doi: 10.1029/2003GL019338.
- Lafore, J-P. y Moncrieff, M.W. (1989). "A numerical investigation of the organization and interaction of the convective and stratiform regions of tropical squall lines". J. Atmos. Sci., 46, pp. 521-544.
- Lafore, J-P., Piriou, C. y Redelsperger, J-L. (2005). "Extratropical Dry-Air Intrusions into the West African Monsoon Midtroposphere: An Important Factor for the Convective Activity over the Sahel." By: Roca, Rémy; Journal of the Atmospheric

- Sciences*, Vol. 62. Issue 2, pp. 390-407.
- Lare A.R. y Nicholson S.E. (1994). "Contrasting conditions of surface water balance in wet years and dry years as a possible land surface-atmosphere feedback mechanism in the west African Sahel". *Journal of Climate*. Vol. 7 pp.653-668.
- López Carmona, M.P. (1999). "Interpretación de Modelos Numéricos sobre África". (Adapted from "Exemples d'utilisation des modèles en régions tropicales", Iché B., 1996). INM. Madrid. España.
- Lydolph, P.E., (1985). "Weather and Climate" Rowman and Allanheld, pp. 216.
- Lynn, B., Khain A., Rosenfeld, D. y Woodley, W.L. (2007). "Effects of aerosols on precipitation from orographic clouds." *Journal of Geophysical Research*, Vol.112,D10225,doi:10.1029/2006JD007537.
- Mahowald, N., Baker, A., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R., Jickells, T., Kubilay, N., Prospero, J. y Tegen, I. (2005). "Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean *Global Biogeochem. Cycles*" Vol. 19, No. 4, GB4025, 10.1029/2004GB002402.
- Martín, F., Alejo, C. J., Bustos J.J., Calvo, F.J., San Ambrosio, I. Sánchez-Laulhé J.M. y Santos D. (2005). "Estudio de la tormenta tropical "Delta" y su transición extratropical. Efectos meteorológicos en Canarias. (27-29 de noviembre de 2005)". Nota técnica del INM en colaboración con el STAP. España.
- 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) *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, No. 2, L02107.10.1029/2003GL018931.
- Nicholls, M.E, Johnson, R.H.y Cotton, W.R (1988). "The sensitivity of two-dimensional simulations of tropical squall lines to environmental profiles". *Journal of the Atmospheric Sciences*. Vol, 45.Nº23. pp. 3625-3649.
- Pérez-Marrero, J., Llinás, O., Maroto,L., Rueda M.J. y Cianca,A. (2002). "Saharan dust storms over the Canary island during winter 1998 as depicted from Advanced Very High Resolution Radiometer". *Deep-sea Research II* 49 pp. 3465-3479.Ed. Pergamon.
- Pérez-Marrero, Maroto-Goikoetxea L., Rueda M.J., Villagarcía M., Godoy J., Cianca A., Barrera C., Cardona L. y Llinás O. (2003). "Estudio por teledetección de las entradas de polvo sahariano al océano y su posible influencia sobre la productividad marina en el área macaronésica". 1^{ER} Encuentro sobre Meteorología y Atmósfera de Canarias. I.N.M. (Instituto Nacional de Meteorología) Ministerio de Medio Ambiente. España. Pp.33-35.
- Petisco de Lara, E. y Martín Herreros, J.M. (1995). "Caracterización de la circulación atmosférica en la Península y Baleares". Servicio de Análisis e Investigación del Clima, informe nº 5.I.N.M. Madrid.España.
- Prospero, J.M., (1996). "Saharan dust transport over the north Atlantic ocean and Mediterranean: An overview, in the impact of desert dust from northern Africa across the Mediterranean", edited by S. Guerzoni and R. Chester, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. Pp.133-151.
- Prospero, J.M. (1981). "Eolian transport to the World Ocean, in the oceanic lithosphere". *The Sea*, Vol. 7, edited by C. Emiliani, Wiley Interscience, N.Y. pp. 801-874.
- Prospero, J.M.(1999) "Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences, University of Miami, Miami, Florida. *J. Geophys. Res.*, 104, D13, 15, 91715,927
- Prospero, J.M., Olmez, I. y Ames, M. (2001). "Al and Fe in PM 2.5 and PM 10 suspended particles in South-Central Florida: The impact of the long range transport of African mineral dust", *Water, Air, and Soil Pollution*, 125, pp.291-317.
- 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". *Rev. Geophys.*, 40, 1002, doi: 10.1029/2000RG000095.
- Prospero, J.M., y Lamb J.P. (2003). "African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change and implications", *Science*, 302, pp.1024-1027.
- Prospero, J.M., Blades, E. Mathison, G. y Naidu, R. (2004). "Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust", *Aerobiologia*, 20(4).
- Pytharoulis, I., y Thorncroft, C. D. (1999). "The low-level structure of African Easterly Waves in 1995", *Mon. Weather Rev.*, 127, pp. 2266– 2280.
- Rasilla, D.F. (1995). "Viento sur y efecto Föhn en la cordillera Cantábrica". Tesis Doctoral. Departamento de Geografía de la Universidad Autónoma de Madrid.España.
- Rasilla, D.F. (2003). "Fuentes y métodos para la caracterización de ambientes meteorológicos o "tipos de tiempo". Clima y calidad ambiental. Martí Ezeleta, A.(ed). Universidad de Santiago de Compostela. España. pp. 171-199.
- Rasilla D.F. (2003). "Aplicación de un método de clasificación sinóptica a la península Ibérica". Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante. España. Investigaciones Geográficas nº30 ISSN: 0213-419, pp.27-45.
- Reddy, M. S., Boucher, O., Bellouin, N., Schulz, M., Balkanski, Y. Dufresne, J.-L. y Pham,M. (2005) (2005). "Estimates of global multicomponent aerosol optical depth and direct radiative

- perturbation in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model*". *J. Geophys. Res.*, 110, No. D10, D10S16.
- Redelsperger, J.L. y J.P. Lafore (1988). "A three dimensional simulation of a tropical squall line: Convective organization and thermodynamic vertical transport" *J. of the Atmospheric Sciences*, 45, pp 13334-1356.
- Reid J.S., Westphal D.L., Livingston, J.M., Savoie, D.L., Maring, H.B., Jonsson, H.H., Eleuterio D.P., Kinney, J.E. y Reid, E.A. (2002). "Dust vertical distribution in the Caribbean during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE)". *J. Geophys. Res. Lett.* 29(7), 1151, doi: 10.1029/2001GL014092.
- Reid J.S., Kinney J.E., Westphal, D.L., Holben, B.N., Welton E.J., Tsay S-C., Eleuterio D.P., Campbell, J.R., Christopher, S.A., Colarco, P.R., Jonsson H.H., Livingston J.M., Maring, H.B., Meier, M.L., Pilewskie, P., Prospero, J.M., Reid, E.A., Remer, L.A., Russell, P.B., Savoie, D.L., Smirnov, A. y Tanré, D. (2003). "Análisis of measurements of Sahara dust by airborne and ground-based remote sensing methods during the Puerto Rico Dust Experiment (PRIDE)". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, NO. D19, 8586, doi: 10.1029/2002JD002493.
- Rowell, D.P. y Milford, J.R. (1993) "On the generation of African Squall Lines". *Journal of Climate*. Vol 6. Pp. 1181-1193.
- Savoie, D.L., Prospero, J.M. y E.S. Saltzman, (1989). "Nitrate, non-seasalt sulfate and methanesulfonate over the Pacific Ocean, in *Chemical Oceanography*", Volume 10, edited by J. P. Riley, Academic Press, New York, pp. 219-250.
- Schmidli R.J. (1996). "Climate of Phoenix, Arizona: An Abridged On-Line Version of NOAA Technical Memorandum NWS WR-177". Weather Service Forecast Office Phoenix, Arizona.
- Schmidt, J.M. y Cotton, W.R. (1989). "A High Plains Squall Line associate with severe surface winds". *Journal of the Atmosphere Sciences*. Vol 46. N°3. pp 281-302.
- Schwartz S.E., Arnold, F. Blanchet, J. P., Durkee, P. A., Hofmann, D. J., Hoppel, W. A., King, M. D., Laci, A. A., Nakajima, T., Ogren, J. A. y Toon, O. B. (1995). "Group Report: Connections between Aerosol Properties and Forcing of Climate". *Aerosol Forcing of Climate*, R. J. Charlson and J. Heintzenberg, Eds., John Wiley and Sons, 251-280.
- Semyon, A., Grodsky y Carton, J.A. (2001). "Coupled land/atmosphere interactions in the West African Monsoon". *Geophysical Research Letters*.
- Shaw, G.E. (2007), "Aerosols at a mountaintop observatory in Arizona". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, D07206, doi: 10.1029/2005JD006893.
- Slingo, A., Ackerman, T.P., Allan, R.P., Kossianov, E.I., McFarlane, S.A., Robinson, G.J., Barnard, J.C., Miller, M.A., Harries, J.E., Russell, J.E. y Dewitte, S. (2006). "Observation of the impact of a major Saharan dust storm on the atmospheric radiation balance". (2006). *Geophysical Research Letters*. Vol. 33, L24817, doi: 10.1029/2006GL027869.
- Sokolik, I.N., Toon, O.B., (1996). "Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols". *Nature* 381, 681-683
- Sokolik, I.N., Winker, D.M., Bergametti, G. et al. (2001). "Introduction to special section: Outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust". *J. Geophys. Res.*, 106, 18.015-18.027
- Stevens, D.A., (1995). "Coccidioidomycosis". *New England Journal of Medicine* 332, 1077-1082.
- Sultan, B. y Janicot, S. (2000). "Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability". *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, N° 20, pp. 3353-3356.
- Sultan B y Janicot S. (2003). "The West African Monsoon Dynamics. Part II: The "Preonset" and "Onset" of the Summer Monsoon". *Journal of Climate*. Vol. 16. pp. 3407-3427.
- Tegen, I., Hollrig, P., Chin, M. Fung, I., Jacob, D. y Penner, J. (1997). "Contribution of different aerosols species to the global extinction optical thickness: estimates from models results". *J. Geophys. Res.*, Vol. 102 N° (D20), pp. 23895-23915.
- Thorncroft, C.D. y Blackburn, M. (1999). "Maintenance of the African easterly jet". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125, pp. 763-786.
- Torres, O., Bhartia, J., Herman, J., Ahmad, Z. y Gleason, J. (1998). "Derivation of aerosols properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis". *J. Geophys. Res.*, 103, pp. 17099-17110.
- Torres, M.E., (2000). "Impacto de las entradas eólicas en aguas del océano Atlántico Central". Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España.
- Torres, C., Cuevas, E. y Guerra, J.C. (2003). "Estudio de la procedencia de las masas de aire en la región subtropical: episodios de polvo sahariano". Primer encuentro sobre Meteorología y atmósfera de Canarias. Sta Cruz de Tenerife. España. pp 74-76.
- Varela A.M., Muñoz-Tuñón, C., Fuensalida, J.J., García-Lorenzo, B. y Eff-Darwich, A. (2005). "Calima anticiclónica y mar de nubes: implicaciones en los observatorios de Canarias". XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de la Cruz. Tenerife. España.
- Yoon, Y.J., Ceburnis, D., Cavalli, F., Jourdan, O., Putaud, J.P., Facchini, M.C., Decesari, S., Fuzzi, Sellegri, K., Jennings, S.G. y O'Dowd, C.D. (2007). "Seasonal characteristics of the physicochemical properties of North Atlantic marine atmospheric aerosols". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 112, D04206, doi: 10.1029/2005J007044.

Web sites:

Aemet (Agencia Estatal de Meteorología, España):<http://www.inm.es>

-Bustos J.J.(1999) "El temporal del SE de los días 7 y 8 de enero de 1999. Descripción dinámica. Trayectorias isentrópicas". Estudios Meteorológicos y climatológicos. C.M.T. Canarias Occidental (<http://193.144.131.167/cmt/eedd/TemporalEnero99/temporal.html>)

-Carretero Porris O. y Elvira Montejo B.(2002) "Extensa irrupción de polvo africano sobre el Atlántico". Comentarios técnicos sobre situaciones significativas y temas varios. Servicio de Análisis y Predicción (STAP) (http://www0.inm.es/wwj/stapwww/casos_significa/polvo_12feb01/inicio.html)

ECMWF (European Centre for Medium- Range Weather Forecasts). Reading, Inglaterra:

http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/era40/ERA40_PRS19_rev.pdf

<http://data.ecmwf.int/data>

<http://www.ecmwf.int/products/data>

<http://www.ecmwf.int/services/archive/d/catalog/class=od>

NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration). USA:

http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/ged_iib/datasets/b03/bec.doc

<http://www.cdc.noaa.gov/Composites/printpage.pl>

<http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/>

<http://www.nhc.noaa.gov/archive/2005/DELTA.shtml?>

<http://www.srh.noaa.gov/jan/cyclo2000.php>

http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/ged_iib/datasets/b03/bec.doc

http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/Africa_W/2004/DST2afr063_N6.jpg

http://www.osei.noaa.gov/Events/Dust/Africa_W/2000/DSTafrW069_MT.jpg

<http://www.nhc.noaa.gov/1996dolly.html>

NCDC (National Climatic Data Center) Asheville N.C. USA:

<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/surfaceinventories.html#A>

<http://cdo.ncdc.noaa.gov/cgi-bin/hsei/hsei.pl>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/ts-enrique-20030712-1800utc-g10vis.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-floyd-19990916-0645utc-4kmir.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-gert-19990916-0300utc-g8ir.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-michelle-20011102-1745-r2km.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-nora-ir.gif>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/hurr-juliette-20010925-2100-g10vis.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/ts-beryl-20000814-1815utc-g8ir.jpg>

<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/images/threestorms-20000814-g10ir.JPG>

<http://www.prh.noaa.gov/cphc/tcpages/DANIEL.php>

<http://www.nhc.noaa.gov/2002arthur.shtml?text>

http://www.ngdc.noaa.gov/seg/cdroms/ged_iib/datasets/b03/bec.doc

NASA (National Aeronautics and Space Administration) USA:

http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/natural_hazards_v2.php3?topic=dust

<http://seawifs.gsfc.nasa.gov>

<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?search=Dust+storm>

<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2002088-0329>

http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/images.php3?img_id=16534

<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery/?2002088-0329>

OTROS:

<http://www.lodyc.jussieu.fr/~bslod/index.html>

<http://ssieu.fr/%7Ebslod>

<http://www.lodyc.jumonsoon>

<http://fermi.jhuapl.edu/hurr/index.html>

<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo1997/pacifico/nora/nora.html>

<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2001/pacifico/juliette/juliette.html>