

MÁSTER EN  
TECNOLOGÍAS  
AVANZADAS  
PARA EL  
DESARROLLO  
AGROFORESTAL

# Trabajo Fin de Máster

Inventario de Episodios Desérticos en la Región de  
Castilla y León en el periodo 2003-2012.



---

**Universidad de Valladolid**

M<sup>a</sup> Ángeles Burgos Simón





## *Índice de contenido*

RESUMEN.....	5
I.INTRODUCCIÓN.....	6
II.OBJETIVOS.....	7
III.ESTACIÓN DE MEDIDA E INSTRUMENTACIÓN.....	8
IV.METODOLOGÍA.....	9
V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
I.Características generales del inventario de intrusiones desérticas en el periodo 2003-2012.....	13
II.Contribución desértica a los niveles de AOD.....	17
III.Caracterización de los parámetros AOD y Alfa durante los episodios desérticos.....	19
IV.Análisis de escenarios sinópticos durante los episodios desérticos.....	23
VI.CONCLUSIONES.....	28
BIBLIOGRAFÍA.....	29



Máster en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal

Trabajo Fin de Máster: Inventario de Episodios Desérticos en la Región de Castilla y León en el periodo 2003 - 2012.



## *RESUMEN*

Como parte de la caracterización del aerosol atmosférico y del establecimiento de una climatología representativa de la región centro-norte de España (Castilla y León), se realiza el presente trabajo sobre la discriminación y clasificación de tipos de aerosoles.

Nos centraremos en el estudio de los aerosoles desérticos que son transportados a esta zona. Para ello, crearemos un inventario detallado de las intrusiones desérticas que tienen lugar, con sus días asociados y otras características que serán analizadas durante un periodo de 10 años, entre Enero de 2003 y Diciembre de 2012.

El método utilizado aquí es similar al documentado en Toledano et al. (2007), que se basa en establecer valores umbrales para los parámetros AOD y Alfa, adaptados a las particularidades de la región de estudio, en nuestro caso, caracterizada como región de fondo continental limpio. A diferencia del estudio citado, en este trabajo se tendrá en cuenta además la información de  $PM_{10}$  para clasificar y caracterizar los días que presentan intrusión desértica.

La detección de un episodio de tipo desértico no es complicada. No obstante, sí puede ser complicado determinar el número de días exacto de cada intrusión, sobre todo al comienzo o final de los episodios ya que pueden presentar un aerosol desértico mezclado con otros tipos de aerosoles. Con ánimo de mejorar la clasificación de los días, nos serviremos de información adicional como las retrotrayectorias calculadas a través del modelo HYSPLIT a tres alturas, 500, 1500 y 3000 metros, imágenes de satélites del sensor MODIS, mapas sinópticos y predicciones del modelo NAAPS.

El inventario lo componen 167 episodios formados por 405 días de intrusión desértica, que representan un 11,1% de los días del año. El valor promedio de AOD para los días constituyentes del inventario es de  $0.29 \pm 0.13$  y el de Alfa,  $0.91 \pm 0.40$ .

Tras la creación del Inventario se evalúa la contribución desértica al AOD a través de la climatología total (todos los días de medida) de los aerosoles frente a aquella que no considera los días con intrusión. También se evaluará esta contribución año a año, que nos da la variabilidad interanual. Por otro lado, la propia caracterización de los aerosoles desérticos, nos lleva a evaluar su propia climatología y variabilidad interanual.

Encontraremos un patrón bimodal en la climatología del AOD, con máximos en Marzo y Agosto, y mínimos en Abril y los meses de invierno. Este patrón es intrínseco o subyacente al fondo regional pero se verá acentuado debido a la contribución desértica. La variabilidad interanual es muy alta tanto en el número de días, de episodios y de los valores de AOD totales y desérticos. La contribución desértica a los niveles de AOD totales, en términos relativos, variará entre el 5 y el 20% dependiendo del mes y del año considerados.

Y el escenario sinóptico más relevante a la hora de propiciar la llegada de intrusiones desérticas, será el NAH-A.



## I. INTRODUCCIÓN

La presencia de aerosol desértico modifica sustancialmente la estimación de la radiación tanto a nivel de atmósfera como a nivel de superficie. Debido a ello, los efectos radiativos globales de los aerosoles minerales en el clima están sujetos a un intenso estudio desde la década de los 70. El desierto del Sahara es la principal fuente de aerosol mineral en el hemisferio Norte, afectando directamente a la Península Ibérica, concretamente, a nuestra zona de estudio. Tomando como base el inventario de episodios desérticos realizado en el sur-oeste de la Península Ibérica en Toledano et al. (2007), y siguiendo una línea similar en cuanto a los procedimientos y análisis, se pretende extender dicho trabajo al norte de la Meseta Castellana, a la vez que ampliar el periodo de estudio.

El Grupo de Óptica Atmosférica de la Universidad de Valladolid se encarga desde el año 2003 del mantenimiento y cuidado de las estaciones de Palencia y Autilla del Pino. Las medidas que en ellas se realizan se llevan a cabo con un fotómetro Cimel integrado dentro de la red mundial de seguimiento de aerosoles, AERONET.

AERONET, (Aerosol Robotic Network, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>; Holben et al. 1998) es una federación de redes de detección remota de aerosoles establecida por NASA y PHOTONS (PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire, Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de la Universidad de Lille, Francia) y ha sido ampliamente expandida gracias a colaboradores de agencias nacionales, institutos, universidades... Los datos más importantes de los que nos proveerá este programa son las observaciones espectrales de espesor óptico de aerosoles, aunque también se ofrecen otros productos de interés. Esta red impone una estandarización de sus instrumentos, calibraciones, procesado y distribución de datos que aseguran la calidad y validez de la información que facilita.

El espesor óptico de aerosoles (AOD, *aerosol optical depth*) es un indicador de la cantidad de partículas en suspensión que hay en la columna atmosférica considerada y representa uno de los parámetros esenciales a la hora de evaluar la carga de aerosol atmosférico. A partir del AOD, se puede obtener la distribución de tamaños de los aerosoles a través de algoritmos de inversión.

Para describir la dependencia del AOD con la longitud de onda, se utiliza la siguiente expresión, debida a Ångström:

$$AOD_{\lambda} = \beta \cdot \lambda^{(-\alpha)}$$

donde  $\alpha$  es el parámetro o exponente de Ångström que teóricamente puede tomar valores entre 0 y 4 y que da cuenta del tamaño de las partículas. Así, valores de  $\alpha$  pequeños indican presencia de partículas gruesas mientras que valores de  $\alpha$  más elevados indican presencia de partículas finas. Una introducción sobre estos conceptos más extensa y detallada se puede encontrar en Toledano (2005).

Los valores de PM<sub>x</sub> (Particulate Matter,  $\mu\text{m}/\text{m}^3$ ) proporcionan información a cerca de la cantidad de materia particulada en suspensión en la atmósfera de diámetro inferior a  $x \mu\text{m}$ . La principal diferencia entre AOD y PM<sub>x</sub>, es que mientras el primero evalúa la cantidad de aerosol presente en la columna atmosférica a través de la medida remota de la radiancia, el segundo es la medida de la



materia particulada que se ha depositado a nivel de superficie durante un día.

Utilizando las técnicas de detección remota, basadas en las medidas de radiómetros solares a nivel de suelo, y los productos de AOD y Alfa que nos proporcionan, podemos detectar y evaluar intrusiones desérticas y también caracterizar las propiedades ópticas de este tipo de aerosol.

En este trabajo, hemos desarrollado un inventario de los episodios desérticos ocurridos entre Enero de 2003 y Diciembre de 2012, a partir de los datos obtenidos con un fotómetro solar en el marco de la red AERONET en la estación de Palencia. El fotómetro solar permite obtener información real (“ground truth”) sobre los aerosoles desérticos bajo condiciones de cielo despejado, útil para evaluar su influencia en los niveles de AOD y Alfa. Además, contamos con la información de los datos de PM<sub>10</sub> proporcionados por la estación de Peñausende dentro de la red EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme).

Dicho lo cual, pasamos a presentar, en primer lugar, los objetivos, la descripción de la estación de medida, la instrumentación utilizada y las series de datos con las que hemos trabajado. Seguiremos explicando la metodología empleada para terminar mostrando los principales resultados obtenidos.

## *II. OBJETIVOS*

El objetivo principal del Trabajo Fin de Máster, es establecer un inventario de episodios de aerosoles desérticos (también denominadas intrusiones desérticas) que tienen lugar en la región centro-norte de la Península Ibérica, durante el periodo de Enero de 2003 a Diciembre de 2012, tomando como base las medidas del Fotómetro Cimel de la estación de Palencia (parámetros AOD y alfa) y los datos de concentración másica (PM<sub>10</sub>) de la estación de Peñausende en Zamora. Información adicional, como trayectorias de masas de aire, mapas satelitales (sensor MODIS) y de condiciones sinópticas también ayudan a definir los días

El inventario determinará el número, la duración en días y la intensidad de los eventos de aerosol desértico, a la vez que determinará la contribución neta del aerosol desértico sobre los valores de AOD, tanto en los valores del ciclo anual, como sobre cada año del periodo de estudio. Esto último permite observar y cuantificar las tendencias (aumento o disminución) de esta contribución durante el periodo de los 10 años de estudio.



### *III. ESTACIÓN DE MEDIDA E INSTRUMENTACIÓN*

La localización geográfica de la principal estación utilizada, Palencia, es 41.9° N, 4.5° W y se encuentra a 750 metros sobre el nivel del mar. Dicha ciudad pertenece a la comunidad autónoma española de Castilla y León, situada en la zona centro-norte de la Península Ibérica, concretamente en la Meseta Norte.

Castilla y León, con una densidad de población de poco más de 27 habitantes por km<sup>2</sup>, es la tercera comunidad menos poblada de España debido a su gran superficie (94.193 km<sup>2</sup>) y a sus pocos más de 2.500.000 habitantes censados en 2012. Está rodeada por la cordillera Cantábrica (norte), la Gallega (noroeste), la Ibérica (este) y la Central (sur), creando estas una barrera a las influencias marítimas y dotando a la región de un clima continental, Del Río et al. (2007).

La estación de Palencia se encuentra en esta pequeña ciudad (~ 100.000 habitantes) que está situada en un área rural, bien aislada de grandes núcleos urbanos e industriales y desde donde se pueden observar con claridad las intrusiones de polvo desértico. El núcleo urbano más importante de la comunidad autónoma es Valladolid que se encuentra a 50 km. al sur oeste de nuestra estación de medida, por lo que su influencia no es de relevancia en cuanto al aerosol urbano se refiere. De esta manera, se puede considerar Palencia como estación de fondo rural.

Los datos proporcionados por las estaciones de la red AERONET son los correspondientes al fotómetro Cimel ELECTRONIQUE. En la estación de Palencia, se han realizado medidas de las propiedades ópticas de los aerosoles durante este periodo de estudio, de 2003 a 2012, y todavía continúa operativo. Sin embargo, destacamos que no nos ha podido proporcionar medidas durante todo el periodo completo, quedando así los meses de Junio a Diciembre de 2009 y de Enero a Septiembre de 2010 sin datos en esta estación. Durante este periodo, los datos han sido reemplazados por aquellos medidos en la estación de Autilla del Pino, a 7 km. de la ciudad y de características similares a la de Palencia. Los detalles a cerca de la serie de datos utilizada pueden verse también en Bennouna et al. (2014), ya que ambos estudios utilizan la misma base de datos.

Los valores de PM<sub>x</sub> que utilizamos son los que proporciona la estación de EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) situada en Peñausende (41.24° N, 5.90° O, 985 m.s.n.m.), que pertenece a la provincia de Zamora y también se encuentra dentro de la meseta castellana al noroeste de la Península Ibérica. Aunque dista unos 150 km de Palencia, ambas estaciones están aisladas de núcleos urbanos o industriales grandes, recogiendo así los valores característicos de fondo regional rural. Entre la información complementaria de PM que se contempla, están además las medidas provenientes de las estaciones de EMEP de Campisábalos (Guadalajara) y Barcarrota (Badajoz). Analizando los datos de éstas tres estaciones, podemos tener una idea más clara de la zona por la que llegan las intrusiones desérticas.

Los datos de las tres estaciones de EMEP se recogen a través de métodos gravimétricos de medida que siguen los procedimientos establecidos por la DIRECTIVA 2008/50/CE del parlamento europeo y del consejo del 21 de Mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más





limpia en Europa, desde la cual se establecen tanto los puntos de muestreo como los niveles críticos o los métodos de medición de referencia. La recolección de datos en las estaciones EMEP se realiza con frecuencia diaria.

En cuanto al muestreo, cabe señalar que se cuenta con un promedio del 72% de datos radiométricos al año, entre los que no se incluyen los días nublados o que presentan precipitación. Sin embargo, se complementa esta base de datos con aquellos de  $PM_{10}$  proporcionados por EMEP (ya que el muestreo promedio de EMEP en un año es del 88% de los días, que representan 321 días con datos disponibles al año). Ambas bases de datos permiten completar el inventario junto con la información adicional y poder analizar y clasificar como días con intrusión desértica algunos que hubieran quedado fuera del inventario de haber contado únicamente con el criterio de los datos de AERONET.

## *IV. METODOLOGÍA*

Los datos medidos desde las estaciones de AERONET nos permiten calcular el espesor óptico de los aerosoles (AOD) a una longitud de onda de 440 nm y derivar a partir de éste el exponente de Ångström, Alfa, en el rango espectral de 440 a 870 nm. AOD y Alfa constituirán dos de las herramientas fundamentales para nuestro análisis ya que se ha demostrado la capacidad de estas medidas espectrales para discernir tipos de aerosoles (Holben et al. (2001), Stone (2002), O'Neill et al. (2003)).

El proceso que seguiremos para detectar las intrusiones desérticas se basa en una inspección manual de los valores instantáneos de AOD y Alfa para cada día. Además, utilizaremos junto a estos los datos diarios de  $PM_{10}$  de la estación de Peñausende de la red EMEP que nos dará la concentración de la materia particulada de diámetro inferior a 10  $\mu m$  presente en la atmósfera para cada día.

Se establecerán unos valores umbrales para estos parámetros que dependen de la zona de estudio además de nuestra experiencia sobre la serie de datos, la literatura y la climatología del aerosol. Esta será la información base, que se acompañará de otra complementaria que nos servirá de ayuda para confirmar la clasificación realizada y será un soporte para evaluar los días que presenten alguna dificultad.

Según se indica en Bennouna et al. (2013), la climatología de la estación de Palencia presenta un valor medio de AOD (440 nm) de  $0,15 \pm 0,10$  y un valor medio para Alfa (440-870 nm) de  $1,29 \pm 0,35$  durante el periodo de 2003 a 2011. En base a esto, se establece como valor umbral para detectar las intrusiones desérticas que  $AOD > 0.18$  y  $Alfa < 1.0$ , referidos a valores instantáneos de Cimel (medidas quinceminutales). En cuanto al  $PM_{10}$ , tomaremos como valor umbral a partir del cual se considera que hay intrusión desértica,  $13 \mu m^3$ .

Cuando una intrusión de polvo desértico irrumpe en nuestra área de estudio, los datos instantáneos mostrarán un ascenso en los valores de AOD así como un descenso por debajo del valor umbral en los valores de Alfa. Cuando el evento termina, se recobrarán los valores de fondo de la estación. Este patrón es generalmente sencillo de reconocer y mostramos un ejemplo en la Figura 1, donde



los días 23-25 de Abril reproducen el comportamiento explicado. Los eventos más intensos son los que presentan un mayor ascenso en los valores de AOD y un mayor descenso en los de Alfa, en ocasiones incluso, llegando estos a ser próximos a cero.

Además, nos serviremos de los valores diarios de  $PM_{10}$ , con objeto de corroborar la clasificación realizada, que mostrarán un ascenso por encima de  $13 \mu\text{m}^3$  cuando se da una intrusión desértica. De nuevo, mostramos un ejemplo de este comportamiento durante los días 23-25 de Abril en la Figura 2, donde se ven los valores de fondo de la estación y el aumento tras la llegada de una intrusión desértica.

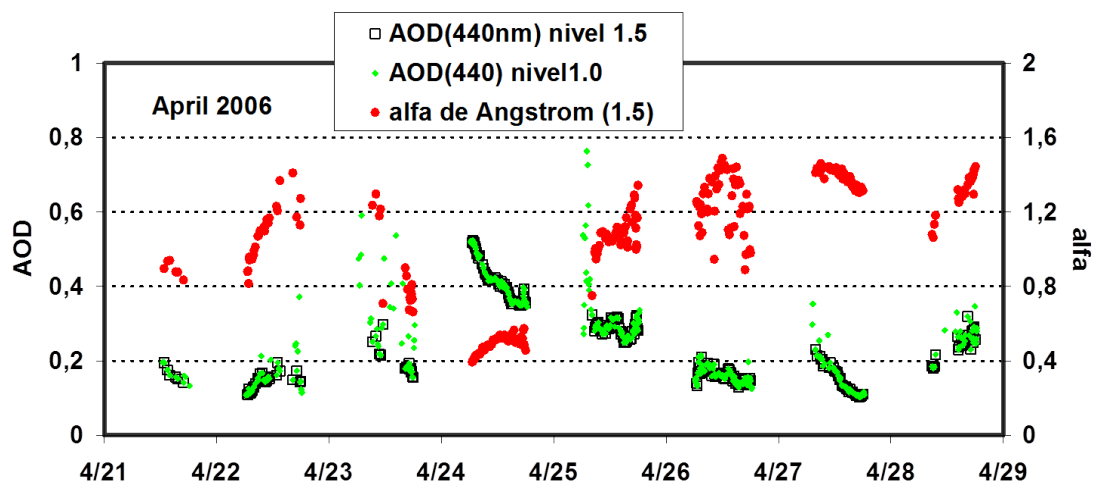


Figura 1: Representación gráfica de los valores instantáneos de AOD y Alfa.

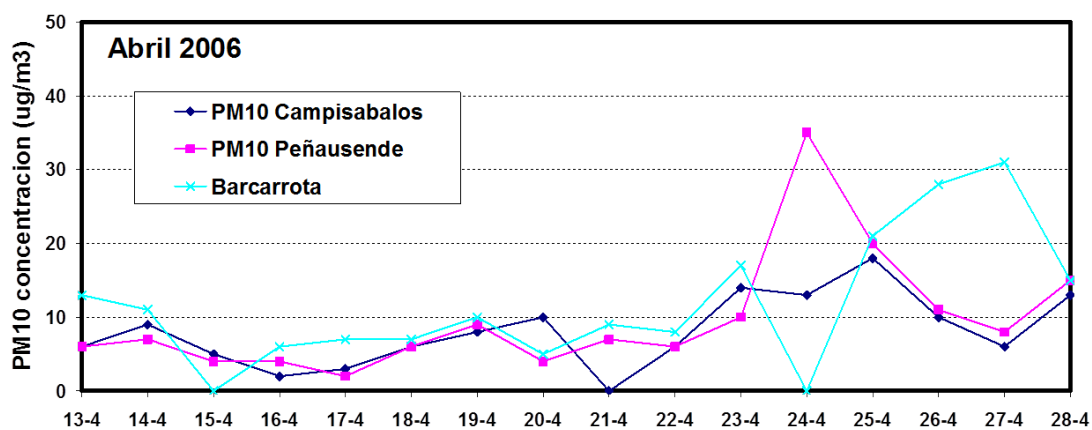


Figura 2: Representación gráfica de los valores diarios de  $PM_{10}$ .



Cabe señalar que las medidas de los fotómetros están únicamente disponibles en condiciones de cielo despejado, por lo que los episodios que ocurran bajo condiciones de lluvia o cielo nublado requerirán de otros mecanismos de detección y evaluación. Es por ello que la información relativa al  $PM_{10}$  y el resto de información complementaria, nos será de especial utilidad en estos casos. Con todo, es previsible pensar que este inventario pueda producir una estimación a la baja de la ocurrencia de eventos desérticos, pero esta es mínima y entra dentro del error de la estimación, tanto en lo concerniente al número de eventos como al número de días asociados a los mismos.

Será por tanto, el primer paso de esta metodología, el que nos permita detectar el episodio en sí, pues los días centrales del mismo o los más intensos se identifican con facilidad una vez establecidos los valores umbrales mencionados anteriormente.

El segundo paso y más complicado será acotar la duración de cada episodio, señalando su primer y último día, así como descartar datos poco fiables como por ejemplo los debidos a la contaminación por nubosidad que no hayan sido correctamente descartados por AERONET.

En la inspección manual se tendrá en cuenta el valor medio diario de AOD, Alfa y  $PM_{10}$  como información base, y como información complementaria se analizarán las retrotrayectorias de las masas de aire evaluadas por el modelo HYSPLIT a tres alturas (500, 1500 y 3000 m, que dan cuenta de la procedencia de las masas de aire, Figura 3), y el escenario sinóptico del día en concreto. Analizando toda la información es su conjunto se puede establecer qué días forman o no parte del episodio. Además se contrastará con imágenes MODIS (Figura 4) y predicciones del modelo NAAPS para descartar posibles datos contaminados o la influencia de nubosidad que podría afectar a los valores de AOD y Alfa siendo similares a los de una falsa intrusión desértica.

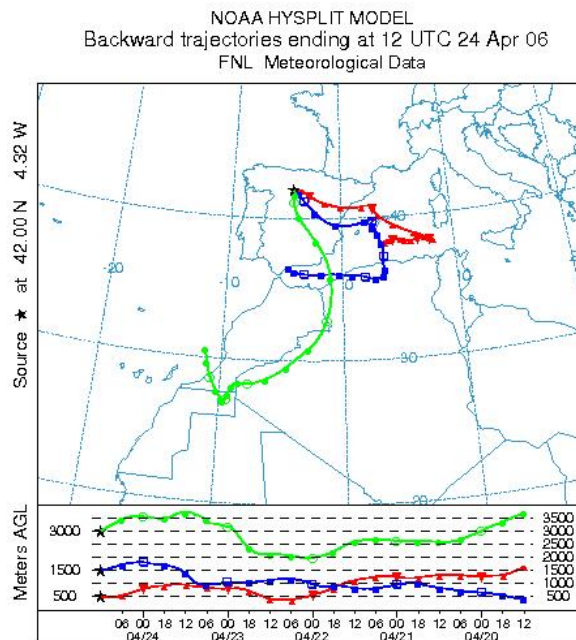


Figura 3: Retrotrayectorias de las masas de aire.

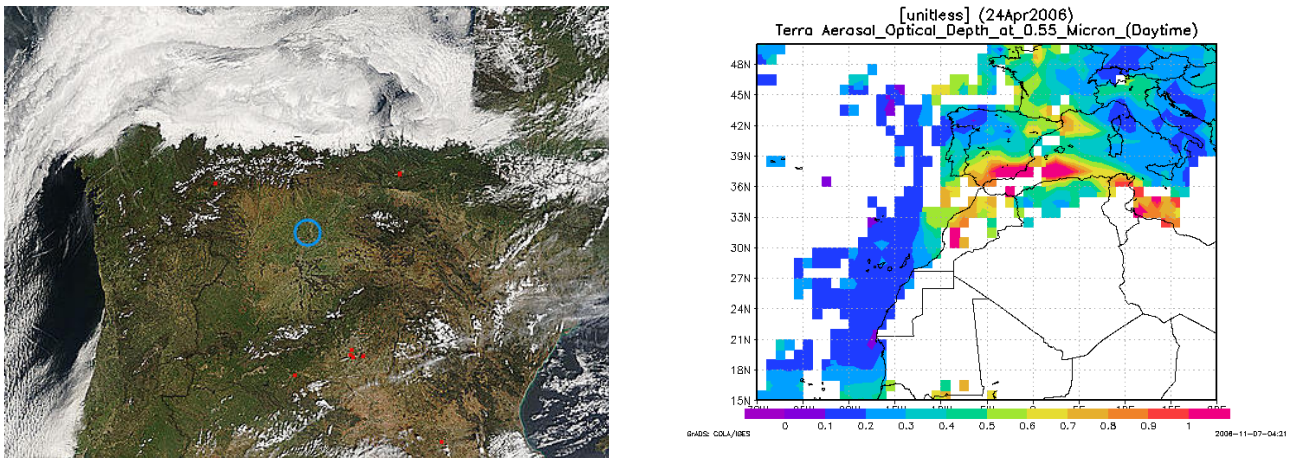


Figura 4: Imágenes MODIS: True Color y el producto de AOD.

Es necesario hacer una distinción cuando tengamos varios días que conforman una intrusión. Así, si la carga de aerosol en la columna atmosférica correspondiente a un día concreto presenta  $AOD > 0.18$  y  $\text{Alfa} < 1.0$ , diremos que tiene una carga de aerosol Desértico Puro, D, siendo estos los más intensos del episodios o los días centrales del mismo. No obstante, podremos encontrar otros días (generalmente al comienzo o final del episodio), en que los valores de AOD sigan siendo igualmente elevados pero en los que el parámetro Alfa tome valores entre 1.0 y 1.5. En estos casos se considera que el aerosol desértico ha podido sufrir una mezcla con el aerosol local, de tipo continental, o bien el aerosol que llega a la zona de detección está ya envejecido y mezclado con otros tipos que ha encontrado a su paso, como ocurre en las típicas recirculaciones de las masas de aire que se dan en verano sobre la Península. En tal caso, se decide clasificar estos días como DC o Desértico Mezcla, donde se indica que la carga de aerosol desértico no es tan pura como la que aparece en los clasificados como D. Asignar porcentajes de mezcla de uno u otro no es tarea fácil, y por ahora únicamente haremos la distinción D y DC sin cuantificar la mezcla que tenemos.

En el presente trabajo se considerará el total de días (esto es, D + DC) para realizar los cálculos correspondientes, y también se trabajará haciendo distinción entre ambos subgrupos cuando sea necesario o queramos estudiar el papel que juega cada uno de ellos.



## *V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN*

### ***I. Características generales del inventario de intrusiones desérticas en el periodo 2003-2012***

Siguiendo los criterios mencionados en el apartado de metodología, se obtiene el inventario para las intrusiones desérticas que llegan al centro norte de España durante el periodo 2003-2012. En dicho inventario se recoge amplia información sobre cada día de intrusión, señalándose la fecha, la duración exacta de cada episodio con su día de inicio y fin, la clasificación de tipo de evento (D o DC), las retro trayectorias de las masas de aire para las 12:00 am evaluadas a tres alturas (500, 1500 y 3000 m), el valor medio diario de PM10 y su incidencia (Sin Incidencia, Baja, Media, Alta o Muy Alta), el valor medio diario para PM2.5, PM(2.5-10) y el ratio PM2.5/PM10, los valores medios diarios de AOD (440 nm) y Alfa (440-870 nm), el tipo de escenario sinóptico que propicia la intrusión según la descripción de Escudero et al. (2005) y el número de datos instantáneos de AOD y Alfa que nos proporciona la red AERONET.

En la Tabla 1 destacamos los principales resultados extraídos del inventario para cada año. Estos son, el número de episodios y días, el porcentaje respecto a los días totales del año que presenta la intrusión, la duración media de los episodios y los valores promedio junto con su desviación estándar para los parámetros AOD y Alfa, tomando como base los datos diarios.

Estos resultados se han calculado para los días clasificados como D y DC y se muestran en la Tabla 1.a,. Además, se calculan los mismos datos únicamente para los días considerados como desérticos puros (D, Tabla 1.b) y para los días con intrusión desértica continental (DC, Tabla 1.c).

Según se muestra en la Tabla 1.a, durante el periodo de estudio se recogen un total de 167 episodios formados por 405 días de intrusiones de alta turbiedad desértica pura y desértica continental. En promedio, anualmente tendremos 16.7 episodios y 40.5 días de intrusión que representarán el 11,1% de días respecto del año. La duración media de un episodio es de 2.43 días, el valor medio para el AOD es de 0,29 ( $\pm 0,13$ ) y para Alfa, 0,91 ( $\pm 0,40$ ). Remarcamos que tanto el número de días como el de episodios presenta una importante variabilidad interanual, oscilando de 12 episodios en 2010 con apenas 20 días de alta turbiedad a 21 episodios en 2005 con 46 días o 20 episodios en 2006 con 61 días de intrusión, siendo estos años excepcionalmente bajo y altos respecto a la media. Así, la presencia de aerosol desértico en la zona de estudio varía entre un 5,5 y un 16,7% en función del año.

Si consideramos los días clasificados como D o DC por separado, vemos que la cantidad de días desérticos puros (241), es mayor a la de días DC (164). En cuanto al porcentaje que representan respecto al número total de días, se realiza el cálculo de dos maneras diferentes y los resultados nos ofrecerán información complementaria. En primer lugar, se calcula el porcentaje de días con intrusión D o DC respecto al número total de días del año, y en segundo lugar (\*), el porcentaje de días D o DC respecto al número total de días con intrusión, D+DC. Este último indica, por tanto, qué porcentaje es el que representan los desérticos puros o los desérticos continentales dentro del



conjunto de todos los días con intrusión.

Como era de esperar, el valor medio para el AOD en días D,  $0,31 \pm 0,14$ , es mayor al que tendremos en días DC,  $0,26 \pm 0,04$ , debido a que los días con intrusión desértica pura más intensa presentan valores muy elevados de AOD. En cambio, el valor para Alfa será menor,  $0,64 \pm 0,27$  para días D frente a  $1,28 \pm 0,06$  de los días DC, ya que es el indicativo de la pureza o mezcla presente en la intrusión, respectivamente.

En la evaluación total o cómputo total de número de episodios y número de días que componen estos episodios, debemos asociar una incertidumbre o error. Sin embargo, estos errores no son fáciles de establecer. Por ejemplo, es difícil de asegurar en verano cuándo hay episodios consecutivos o no, debido a las frecuentes recirculaciones de las masas de aire. No obstante, se decide seguir el criterio de considerar eventos separados si entre éstos hay un día cuyo valor de AOD desciende por debajo del valor umbral. Así, aunque las intrusiones desérticas son sencillas de discernir en base a los valores instantáneos de AOD y Alfa, son más fiables el número de días que el de episodios.

Tabla 1: Principales resultados extraídos del inventario relativos a: a) Todos los días con intrusión (D y DC); b) Días desérticos puros, D; c) Días desérticos continentales, DC. (Sigma = desviación estándar)

a	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Total	Por año
<b>N. Episodios</b>	19	17	21	20	16	16	14	12	16	16	167	16,7
<b>N. Días (D+DC)</b>	49	47	46	61	52	35	30	20	32	33	405	40,5
<b>Porcentaje días, %</b>	13,4	12,9	12,6	16,7	14,2	9,6	8,2	5,5	8,8	9,0	11,09	11,09
<b>Duración media, días</b>	2,6	2,8	2,2	2,8	3,3	2,2	2,1	1,7	2,0	2,1	2,43	2,43
<b>AOD (440 nm) Medio</b>	0,32	0,34	0,27	0,26	0,31	0,27	0,19	0,32	0,27	0,30	--	0,29
<b>Sigma AOD (440 nm)</b>	0,11	0,15	0,16	0,10	0,14	0,10	0,05	0,13	0,09	0,10	--	0,13
<b>Alfa Medio</b>	0,96	0,93	0,93	0,80	1,05	0,99	0,84	0,81	0,91	0,77	--	0,91
<b>Sigma Alfa</b>	0,37	0,37	0,41	0,32	0,36	0,46	0,33	0,50	0,37	0,47	--	0,40



<b>b</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>Total</b>	<b>Por año</b>
<b>N. Días (D)</b>	28	26	28	39	26	19	24	12	17	22	241	24,1
<b>Porcentaje días, %</b>	7,7	7,1	7,6	10,7	7,1	5,2	6,6	3,27	4,7	6,0	6,60	6,60
<b>Porcentaje días*, %</b>	57,1	55,3	60,9	63,9	50,0	54,3	72,7	60,0	53,1	66,7	59,51	59,51
<b>AOD (440 nm) Medio</b>	0,30	0,36	0,31	0,27	0,37	0,29	0,19	0,36	0,31	0,33	--	0,31
<b>Sigma AOD (440 nm)</b>	0,12	0,17	0,20	0,11	0,19	0,13	0,05	0,12	0,11	0,11	--	0,14
<b>Alfa Medio</b>	0,68	0,68	0,60	0,65	0,70	0,62	0,73	0,47	0,61	0,52	--	0,64
<b>Sigma Alfa</b>	0,27	0,28	0,22	0,25	0,24	0,30	0,28	0,22	0,24	0,34	--	0,27

<b>c</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>Total</b>	<b>Por año</b>
<b>N. Días (DC)</b>	21	21	18	22	26	16	6	8	15	11	164	16,4
<b>Porcentaje días, %</b>	5,8	5,8	4,9	6,0	7,1	4,4	1,6	2,19	4,1	3,01	4,49	4,49
<b>Porcentaje días*, %</b>	42,9	44,7	39,1	36,1	50,0	45,7	18,2	40,0	46,9	33,3	40,49	40,49
<b>AOD (440 nm) Medio</b>	0,33	0,32	0,23	0,23	0,27	0,26	0,21	0,24	0,23	0,23	--	0,26
<b>Sigma AOD (440 nm)</b>	0,10	0,12	0,04	0,07	0,07	0,05	0,06	0,04	0,04	0,5	--	0,04
<b>Alfa Medio</b>	1,26	1,27	1,32	1,18	1,30	1,38	1,24	1,32	1,23	1,33	--	1,28
<b>Sigma Alfa</b>	0,18	0,16	0,17	0,14	0,16	0,22	0,19	0,17	0,15	0,15	--	0,06

La distribución mensual para el número de episodios se muestra en la Figura 5.a y para el número de días, en la Figura 5.b (D, DC y la suma de ambos). Es en estas gráficas donde encontramos la principal característica de la climatología de los eventos desérticos en Castilla y León, pues se aprecia un patrón con dos máximos de ocurrencia (uno en Marzo y otro en Mayo/Junio) y dos



mínimos (uno en Abril y otro durante los meses de invierno, centrado en Noviembre/Diciembre).

El patrón encontrado en esta climatología reaparece como es de esperar al evaluar el peso o influencia del aerosol desértico sobre el valor total de AOD, como se mostrará en el apartado relativo a la contribución de los episodios desérticos en los niveles de AOD más adelante.

Las diferencias más significativas entre el patrón climatológico de las intrusiones desérticas encontrado para esta zona de la Península y el descrito por Toledano et al. (2007) para El Arenosillo (Huelva), son las siguientes: el máximo que allí se da entre Febrero y Marzo, aquí aparece con más intensidad en Marzo. El máximo de verano que se centraba en Julio para El Arenosillo, aparece en Palencia con más intensidad durante Mayo y Junio. A su vez, el mínimo de Abril que era muy destacado para la parte sur de la Península, seguirá siendo mínimo aunque menos marcado para la zona centro norte. Y por último, el mínimo que se observaba para los meses de invierno centrado en Diciembre-Enero, aquí aparecerá durante los meses de Noviembre-Diciembre.

Los episodios de menor duración se dan durante el mes de Junio. Se pierde pues en esta zona de la Península, la característica de la que se informa en Toledano et al. (2007) y en Escudero et al. (2005) para el sur y el este de España, que afirma que de entre los meses de verano (Junio, Julio y Agosto), es Julio el que presenta los episodios de menor duración.

En la Figura 6.a se muestra la distribución interanual del número de episodios. En los cinco primeros años, de 2003 a 2007, hay una incidencia mayor de episodios con intrusión desértica que en los cinco últimos, de 2008 a 2012. Esta tendencia también se pone de manifiesto, siendo más acusada aún, si consideramos el número de días con intrusión desértica que se muestra en la Figura 6.b, tanto para intrusión D, DC como para la suma de ambas.

En estas gráficas se observan los máximos en 2005 (número de episodios) y 2006 (número de días) y el mínimo (tanto en días como en episodios) de 2010 que comentábamos anteriormente.

La Figura 6.b también refleja otra de las características que aparecen cuantificadas en la Tabla 1. En general para todos los años, hay más cantidad de días D que de días DC, a excepción de 2007 que tiene un 50% de cada tipo de intrusión. Siendo el año con mayor proporción de intrusiones desérticas puras, 2009, con un porcentaje del 72,7 de días desérticos clasificados como D.

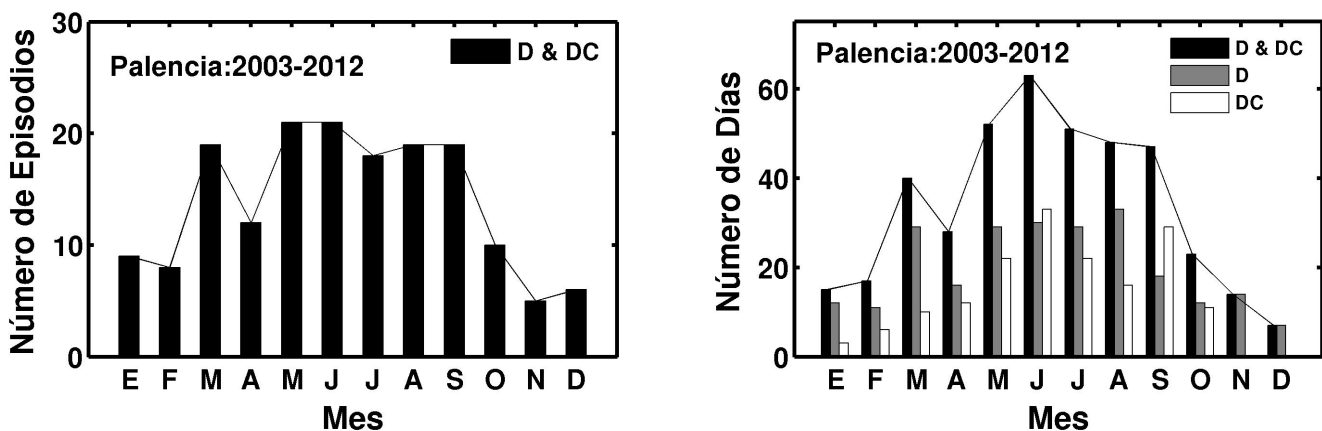


Figura 5: Distribución interanual de: a) número de episodios; b) número de días.



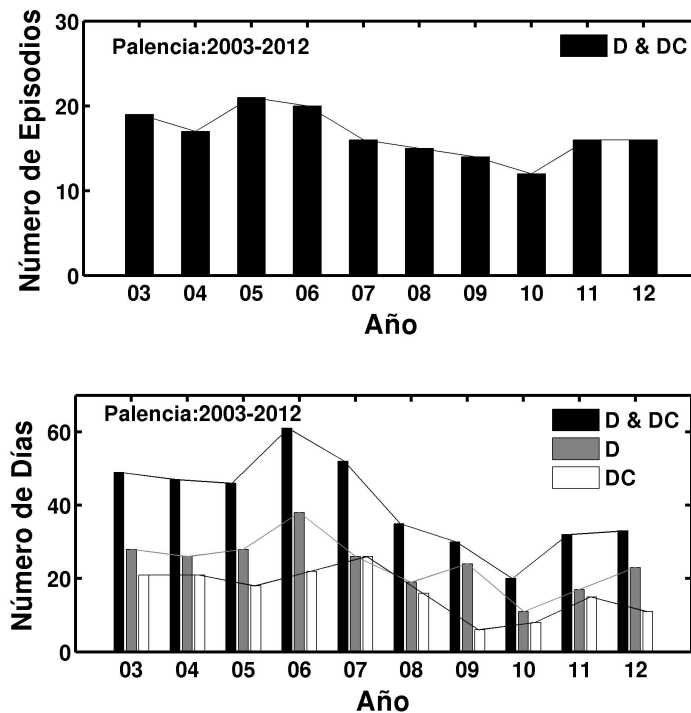


Figura 6: Distribución mensual de: a) número de episodios desérticos; b) número de días con intrusión.

## II. Contribución desértica a los niveles de AOD

Una vez establecidas las intrusiones desérticas que han tenido lugar, se requiere cuantificar su contribución a los niveles de AOD. Mostramos pues, en la Figura 7, la climatología y la variabilidad interanual para el AOD de la siguiente manera: representaremos el valor promedio de AOD teniendo en cuenta todos los días del periodo 2003-2012 (barras negras) y todos los días excepto aquellos considerados como desérticos (barras grises). A continuación, se calculan las diferencias absolutas y relativas entre ambas para obtener la contribución neta del aerosol desértico.

En cuanto a la climatología, notamos que la curva correspondiente al ciclo anual de AOD donde consideramos todos los días del periodo (barras negras) presenta una clara bimodalidad con un máximo en Abril y Junio y valores mínimos durante los meses de invierno. En cuanto al comportamiento del ciclo anual donde se han eliminado los días desérticos (barras grises), vuelve a presentar un máximo en Abril y otro en Septiembre, quedando los mínimos en Agosto y los meses de invierno. Así pues, este comportamiento es subyacente o intrínseco a la climatología de esta zona, pero se ve reforzado con el aporte de los aerosoles desérticos, como se pone de manifiesto al observar tanto las diferencias absolutas como las relativas.



Estos resultados son análogos a los obtenidos en otros estudios, como el mostrado recientemente en (Querol et al., 2013), aunque no enfatizan tan claramente esta bimodalidad estacional del aporte de los datos desérticos ni su influencia o modulación en el ciclo anual de la climatología.

Resultados aquí no mostrados sobre estaciones del sur de España, manifiestan una mayor acentuación de esta bimodalidad en el ciclo anual o climatología de los datos totales de AOD, por el mayor aporte de desérticos en la zona sur de la Península, con un claro gradiente de aumento de norte a sur.

Este patrón de aporte de desérticos también se encuentra en otros estudios (Cachorro et al., RICTA 2014), donde se evaluará el ciclo anual de los eventos desérticos pero a partir de los datos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ .

En términos generales la contribución desértica al ciclo anual se sitúa en torno al 15%, yendo desde el 5,7% en el mes de diciembre al 21.7% en el mes de agosto.

En relación a la variabilidad interanual, encontramos que los años con valores más altos de AOD teniendo en cuenta todos los días del periodo, fueron los tres primeros, y los que presentan un valor más bajo, de 2008 a 2010. No obstante, los años con mayor aporte de desértico al valor absoluto de AOD, son 2004 y 2007, con un 19 y un 16% de contribución respectivamente. El año con un valor más bajo de AOD teniendo en cuenta todos los días del periodo es 2008 y sin embargo, el que menos contribución desértica presenta es 2009, con apenas un 5.9%.

En cuanto a las tendencias que se observan en estos 10 años, tenemos un decrecimiento de los valores de AOD así como un decrecimiento de la contribución desértica, resaltando un pequeño repunte en los últimos años, 2011 y 2012, tanto en valor medio de AOD para toda la serie como en valor de la contribución desértica.

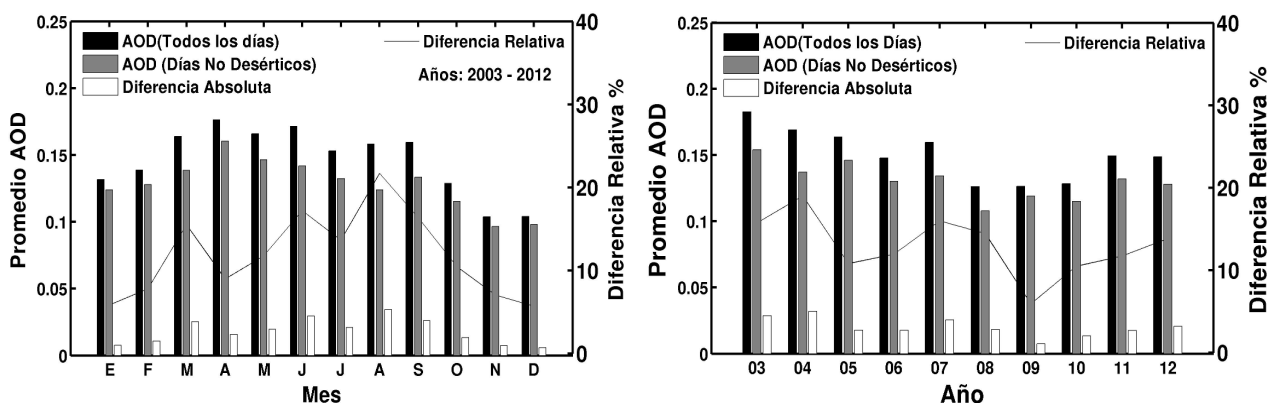


Figura 7: Contribución del AOD desértico sobre el AOD total.



### **III. Caracterización de los parámetros AOD y Alfa durante los episodios desérticos**

Una vez establecido el inventario de intrusiones desérticas y vista la contribución de éstas a los valores totales de AOD, vamos a buscar las principales características de los parámetros AOD y Alfa durante éstos días.

Recordemos que los valores medios (con base en los valores diarios) de todos los días incluidos en el inventario son  $0,29 \pm 0,13$  para AOD (440 nm) y  $0,91 \pm 0,40$  para Alfa (440 – 870 nm). El valor medio de Alfa para los días con aerosol desértico aparece más alto de lo esperado para este tipo de aerosol según Holben et al. (2001), donde se establece que debería oscilar entre 0 y 0.5. Sin embargo, Toledano et al. (2007) encuentra un valor de Alfa también superior a 0.5 para el sur-oeste de la Península. Estos valores más altos se entienden dada la situación geográfica de estudio, donde el aerosol desértico no es estrictamente puro y se mezcla con otros tipos como el local o continental. Más adelante nos volveremos a centrar en estos promedios para evaluar el peso del aerosol desértico sobre toda la base de datos.

Como se ha explicado, para los días con intrusión D o DC los valores de AOD serán superiores al valor fijado como umbral de 0.18 y los valores de Alfa variarán de la siguiente forma: para los días con intrusión desértica pura, serán inferiores a 1, mientras que los días DC tendrán un valor de Alfa entre 1 y 1.5. Nos ayudamos de la distribución de frecuencias de AOD y Alpha para todos los días y para los días desérticos, Figura 8 y Figura 9, respectivamente, para ver esto gráficamente. En la Figura 8, resaltamos en blanco los días que no han sufrido intrusión alguna, en gris los días que han presentado intrusión DC y en negro los días desérticos puros.

Si nos fijamos en la Figura 8.a vemos que el máximo de frecuencias de AOD se sitúa en torno a 0.07, apareciendo los eventos desérticos por encima de valores de 0.18 y no siendo únicamente episodios desérticos los que pueden tener un valor de AOD superior a éste. Los pocos valores inferiores a 0.18 que aparecen como desérticos se deben al método de inspección manual empleado para la caracterización de las intrusiones, ya que aunque el AOD no superase el valor umbral, si el resto de información complementaria hacía pensar que se estaba dando intrusión desértica, el día podía ser considerado como tal. De la misma manera, aunque un día presentara un valor de alfa ligeramente superior a 1, si la información complementaria hacía pensar que era desértico puro también se consideraba como tal, y es por ello que en el histograma de frecuencias de alfa veremos algún caso considerado D y con valor de alfa superior a la unidad. Hay que resaltar que estos son casos excepcionales y que es el método de inspección manual el que nos permite detectarlos y clasificarlos correctamente con mayor precisión.

En el histograma de frecuencias de Alfa, Figura 8.b, vemos como los valores se reparten entre 0 y 2, situándose el máximo de frecuencias en torno a 1.40 y apareciendo los eventos desérticos con valores por debajo de 1, los DC entre 1 y 1.5 y el resto de días con otro tipo de intrusión o sin episodio indistintamente en todo el rango de valores.

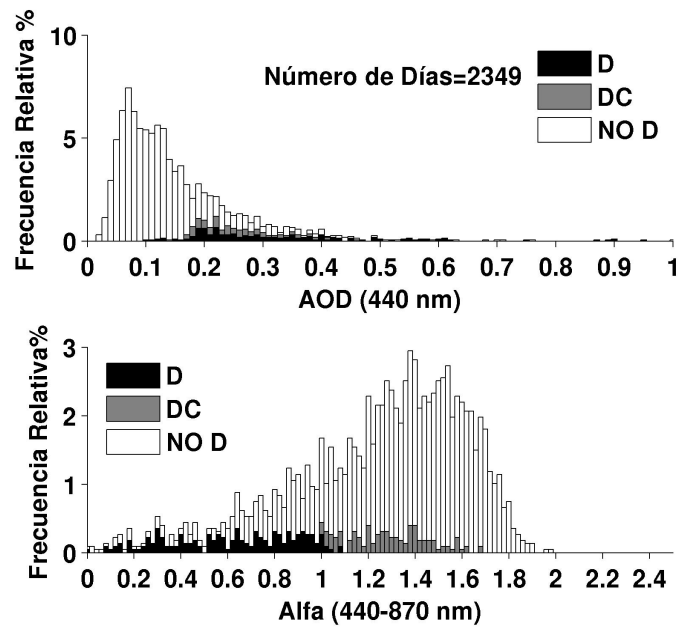


Figura 8: Histograma de frecuencias de a) AOD y b) Alfa

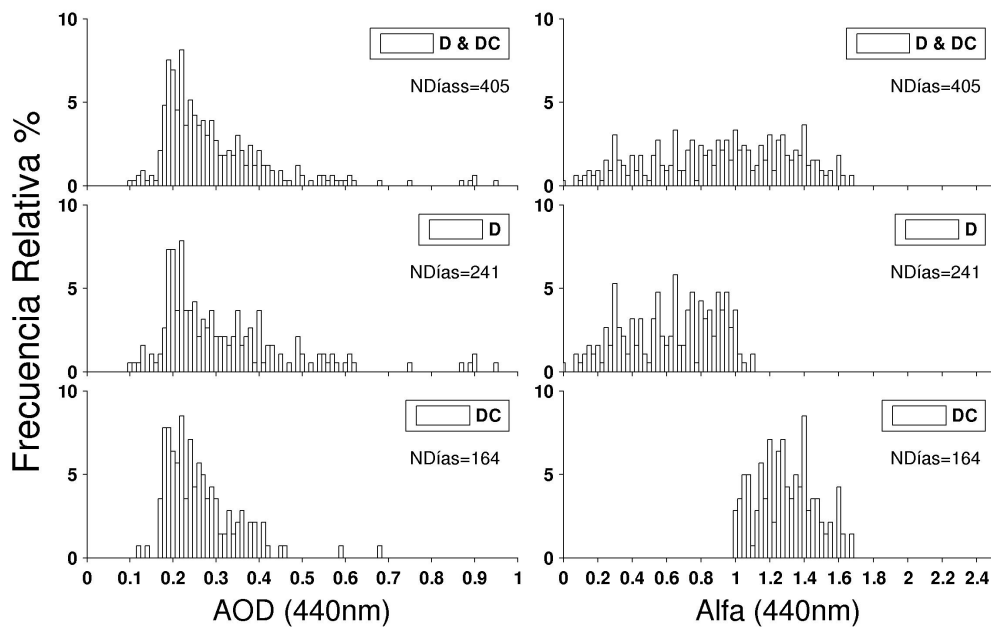


Figura 9: Histograma de frecuencias de AOD y Alfa la clasificación de la intrusión.



En la Figura 9, se muestran de manera separada los histogramas de frecuencias de AOD y Alfa para los días clasificados como D y DC, sólo D y sólo DC con objeto de una mejor visualización del rango de valores que pueden tomar.

El parámetro AOD, para el grupo de los días de intrusión desértica tendrá el máximo de frecuencias centrado en 0.22 en contraposición al pico observado para toda la serie de datos que aparecía en 0.07. En cambio, en el parámetro Alfa se reparten los valores entre todo el intervalo posible sin un máximo claro o destacable.

Los diagramas de dispersión Alfa-AOD nos ayudan a identificar el tipo de aerosol y se utilizan para discernir entre continental, desértico, marítimo, quema de biomasa (Eck et al. (1999); Vergaz, (2001)).

En la Figura 10 se presenta el diagrama de dispersión Alfa-AOD para los días constituyentes del inventario, diferenciando D y DC. En nuestro caso, aunque sólo hemos considerado los días que componen el inventario y que por tanto, ya están dentro de la categoría de desérticos, nos sirve como ayuda visual a la hora de identificar dónde se sitúan en el diagrama los días D y los DC.

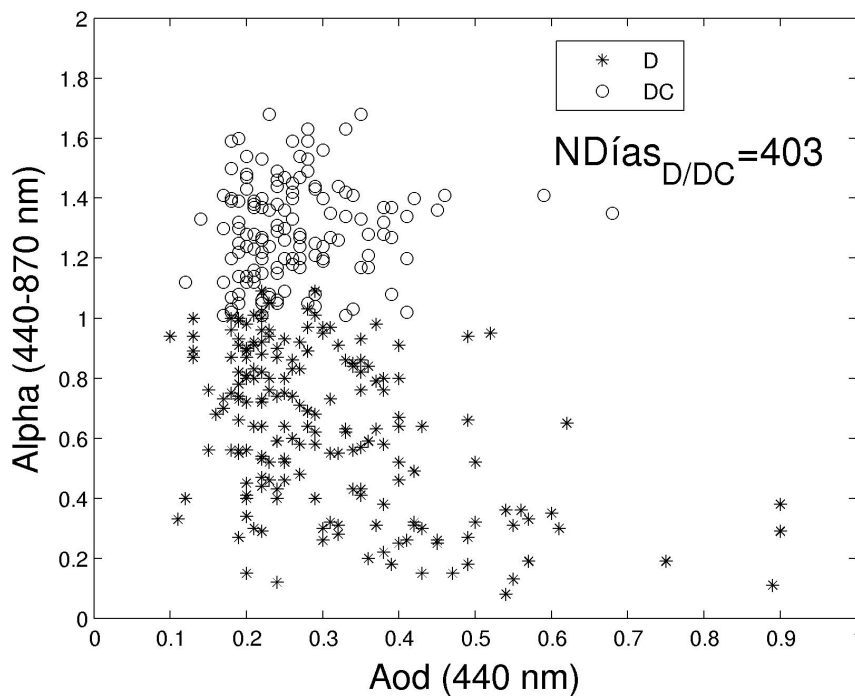


Figura 10: Dispersión Alfa-AOD para los días con intrusión desértica.

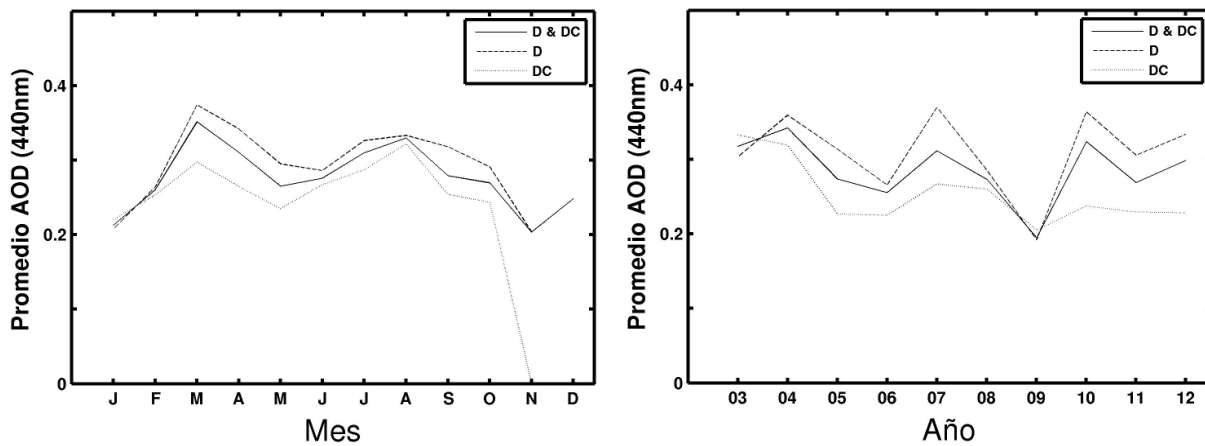


Figura 11: Climatología y variabilidad interanual de los valores promedio de AOD

En la Figura 11, mostramos la climatología y la variabilidad anual que presentan los valores promedios de AOD calculados a partir de las medidas instantáneas. Hemos diferenciado tres subgrupos, todos los días desérticos (D+DC), y los días D y DC por separado.

En ambos gráficos se observa como los promedios para los días D son más elevados, seguidos por D+DC y siendo los de los días DC los más bajos.

La climatología presenta el patrón bimodal con dos máximos, uno en el mes de Marzo y el otro en verano (Agosto), y dos mínimos, uno en Mayo y el otro durante los meses de invierno. Este patrón es el esperado y volverá a aparecer al evaluar el peso o contribución del aerosol desérticos al AOD total, como se estudiará más adelante. En cuanto a la variabilidad interanual, aparecen los valores más elevados para los años 2004, 2007 y 2010, y un mínimo durante el año 2009.

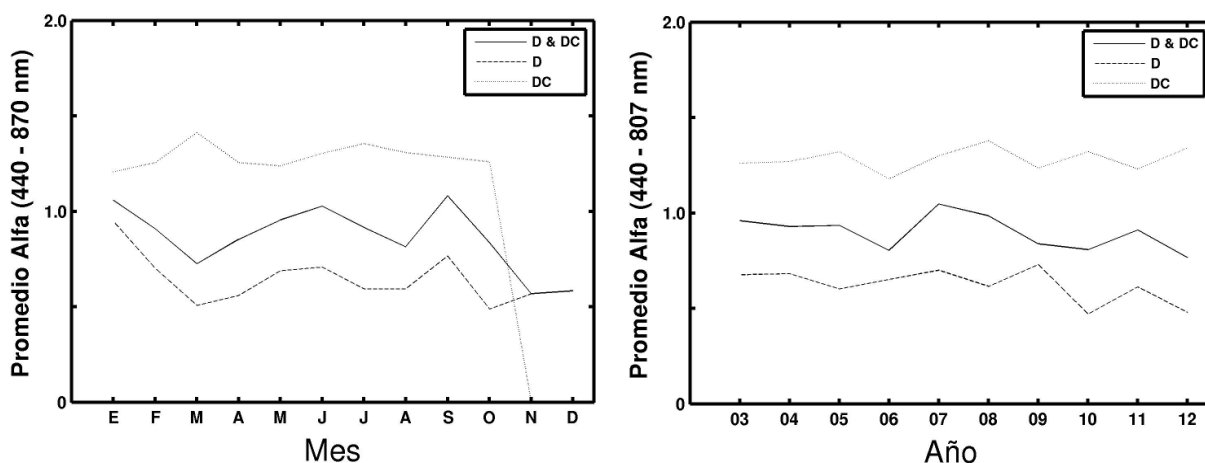


Figura 12: Climatología y variabilidad interanual de los valores promedio de Alfa



De la misma manera, se presenta en la Figura 12 la climatología y la variabilidad interanual para los valores promedio de Alfa. La distinción previamente realizada entre D y DC es la que explica que en esta figura los valores promedios de Alfa para los días DC sean los más elevados mientras que los de D son los más bajos, siempre inferiores a 1.

En la climatología, como es de esperar, serán los meses que presentaban un valor máximo de AOD los que den mínimos en los promedios de Alfa, a saber, Marzo y Agosto. Cabe destacar que en los meses de invierno, Noviembre y Diciembre, dado el poco muestreo a la par que la escasez de intrusiones desérticas, provocan que los valores promedios para estos días sean los de los días D, indicando así que que las intrusiones que se registran son únicamente las desérticas más puras.

Se considerará que se tienen intrusiones más puras cuando los valores promedios de Alfa para D+DC sean más bajos, siendo estos los correspondientes al año 2006 junto y a los tres últimos años.

#### **IV. Análisis de escenarios sinópticos durante los episodios desérticos**

Entre la información complementaria que se ha analizado en la realización del inventario, se encuentra el escenario sinóptico que favorece la llegada de masas de aire procedente de África a la Península Ibérica, según la descripción que aparece en Escudero et al. (2005) y que fue aplicada en el inventario realizado por Toledano et al. (2007) en El Arenosillo.

Describiremos a continuación los 4 escenarios sinópticos (NAH-S, AD, NAD, NAH-A) que son capaces de transportar masas de aire con cargas altas de polvo africano desde el norte de África hacia la Península Ibérica, antes de mostrar los resultados obtenidos para nuestro inventario relacionados con dichos escenarios.

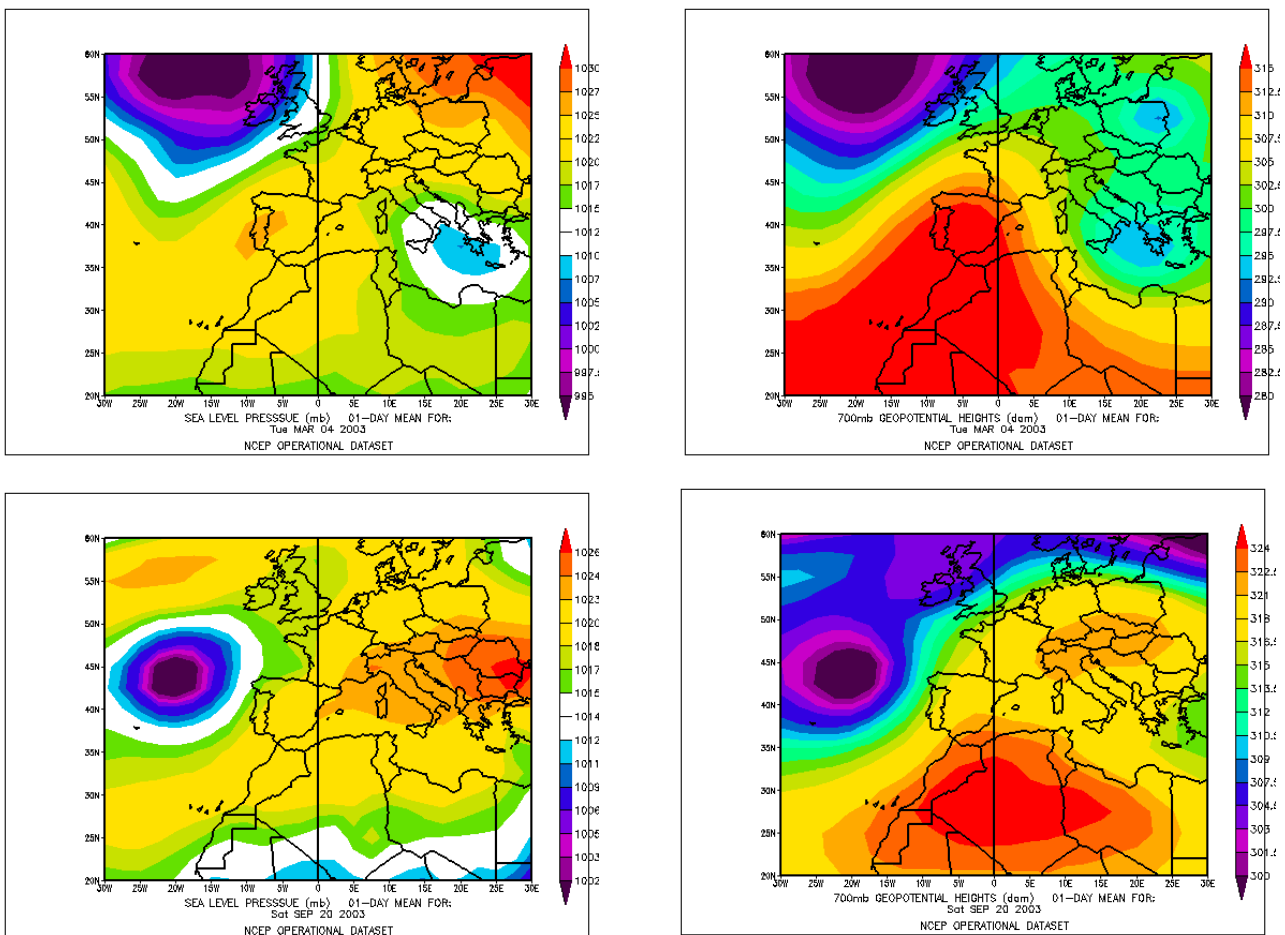
- NAH-S corresponde a *North Africa High Located at Surface Level*, este tipo de escenario explica la ocurrencia de intrusiones de masas de aire Africanas sobre la Península gracias al transporte de polvo a través del oeste vía el arco Atlántico. La característica principal es la no presencia de las altas presiones o anticiclones que se encuentran de forma casi permanente en las Azores. Estas plumas Atlánticas convexas y de largo recorrido son causadas por un anticiclón localizado sobre el sur de la península y el norte de África, el oeste del Mediterráneo o fuera de la costa atlántica. El transporte queda confinado a niveles bajos y se detecta a nivel de superficie.
- AD corresponde a *Atlantic Depression*, una depresión relativamente fuerte, observada desde el nivel del mar hasta los 700 hPa centrada hacia el oeste de la costa Portuguesa con un anticiclón asociado en la parte central del mar Mediterráneo puede ser el causante de transporte de polvo por el este de la Península. Este transporte resulta en un flujo entrante por el sur y a través de todos los niveles de altitud.
- NAD corresponde a *North African Depression*, una zona de bajas presiones a nivel de superficie se centra en Marruecos, Algeria, Túnez o incluso el este Mediterráneo. Este



escenario favorece el transporte de masas de aire hacia la Península a través del Mediterráneo. Las masas de aire transportadas asociadas a este escenario están confinadas a las capas de altitudes más bajas. La mayoría de estos episodios ocurren con eventos de lluvia.

- NAH-A corresponde a *North African High Located at Upper Levels*, este escenario se produce por un intenso calentamiento en el Sahara. A nivel de superficie tendremos una borrasca en el norte de África y un gradiente vertical hacia las capas superiores. Este sistema convectivo empuja la capa de polvo hacia arriba hasta los 5000 metros sobre el nivel del mar. Una vez que el polvo ha sido inyectado en la troposfera media, puede ser transportado hacia la Península. En estos casos las masas de aire están muy cargadas con polvo desértico y son transportadas hacia el norte cubriendo la mayor parte del oeste Mediterráneo y de la Península, formando una pluma ancha de polvo desértico.

La Figura 13 muestra, por orden, un ejemplo de cada uno de los escenarios mostrando las isóbaras a nivel de superficie y a una altura de 700mb.





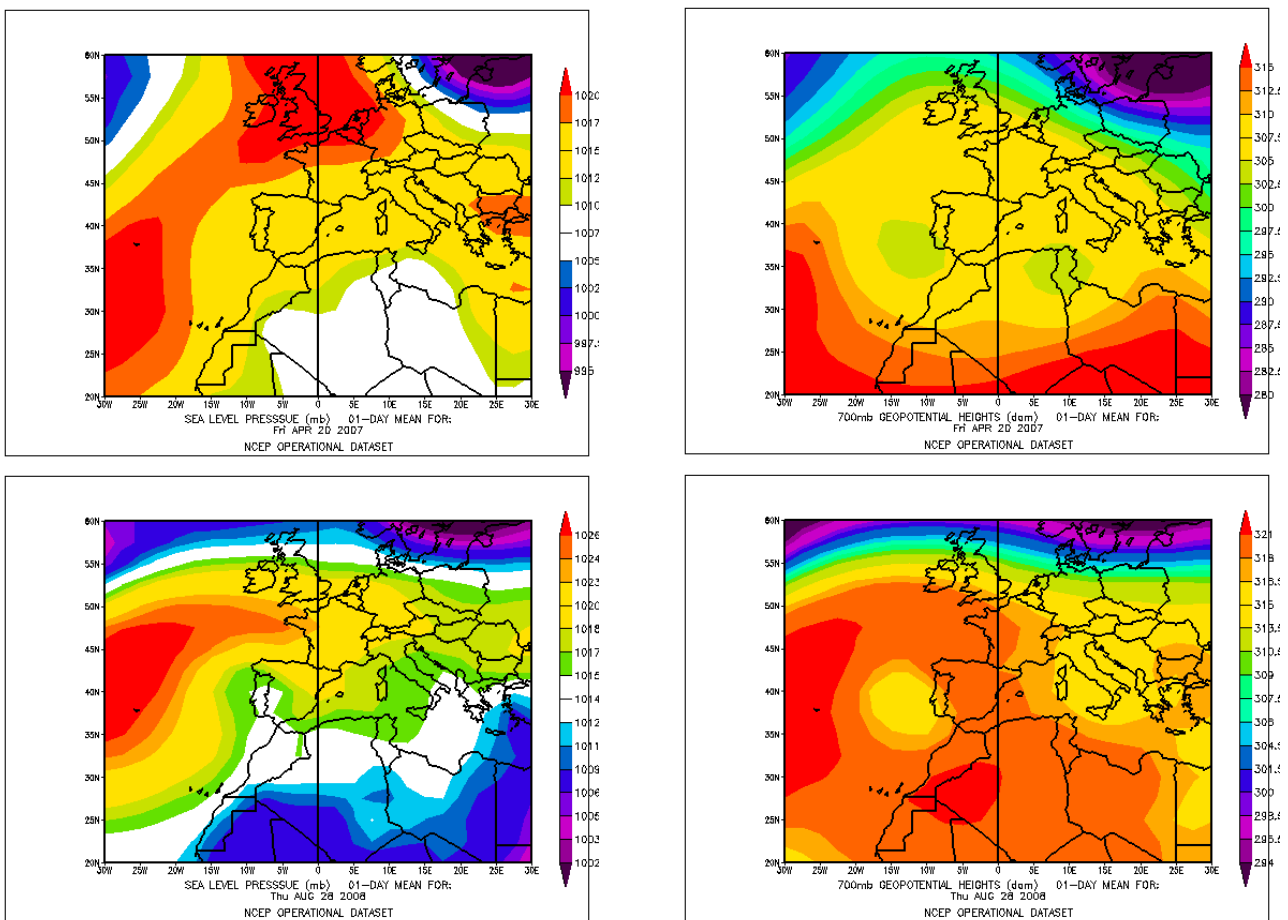


Figura 13: Ejemplo de los cuatro escenarios sinópticos que pueden propiciar las intrusiones de polvo sahariano a la Península.

Una vez explicados los posibles escenarios sinópticos, estamos en condiciones de presentar los resultados relacionados con los episodios que componen nuestro inventario.

Se representa gráficamente el número de episodios en función del mes y año (Figuras 14 y 15, respectivamente) discriminando el tipo de escenario sinóptico que ha favorecido cada intrusión.

Si nos fijamos en la distribución mensual de los escenarios sinópticos, vemos que el más frecuente es, como era de esperar, el NAH-A que es especialmente importante durante los meses de verano. La Figura 14 nos ayuda a entender el patrón mensual de los eventos desérticos según el escenario que los propician. El cuarto escenario sinóptico es el único presente durante los meses de primavera-verano y es así, por tanto, el responsable del segundo máximo en el patrón bimodal de intrusiones desérticas explicado anteriormente.



El escenario NAH-A es el más importante a la hora de introducir a la Península el polvo Africano ya que su procedimiento está relacionado con el fuerte calentamiento de la superficie desértica en el verano que provoca una borrasca a bajas alturas sobre el Norte de África mientras que a niveles superiores encontramos altas presiones. Se produce así una fuerte convección que inyecta a las capas más superiores polvo desértico que será transportado hacia latitudes mayores.

La distribución interanual (Figura 15) nos muestra una clara predominancia en todos los años del periodo, del cuarto escenario, NAH-A. Siendo el segundo en importancia el escenario NAH-S, pero presentando una variabilidad muy alta de un año a otro.

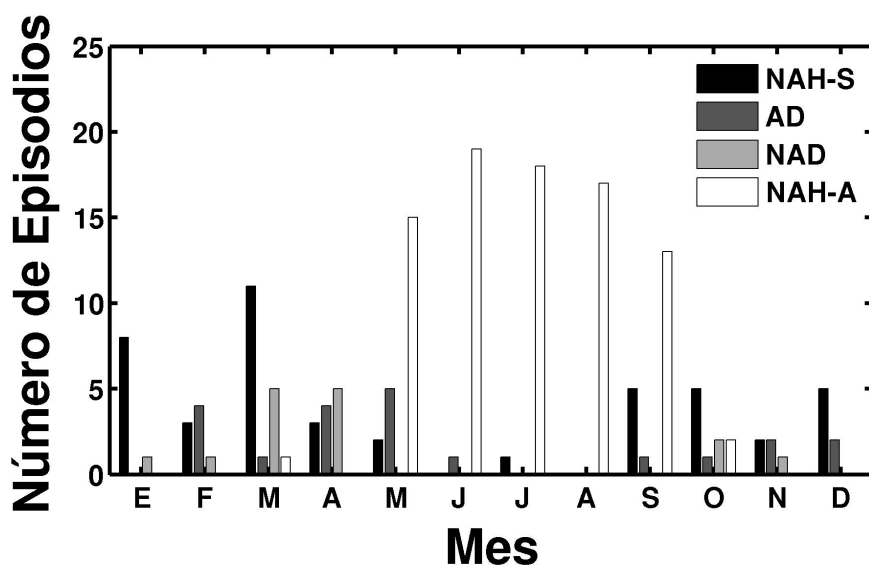


Figura 14: Climatología del número de episodios desérticos, distinguiendo los escenarios sinópticos.

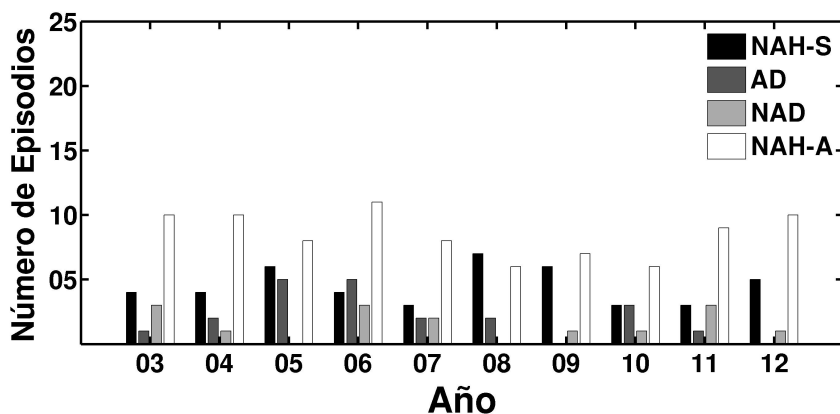


Figura 15: Variabilidad interanual del número de episodios, distinguiendo los escenarios sinópticos.

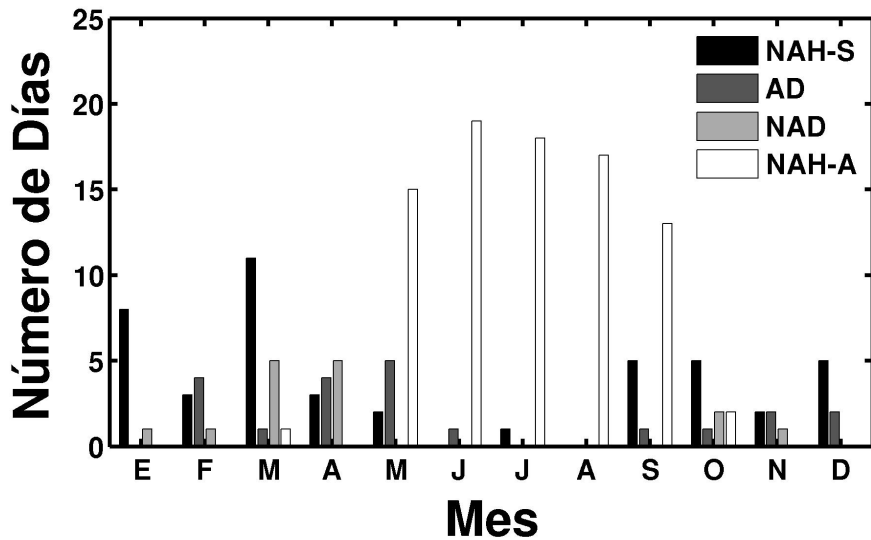


Figura 16: Climatología del número de días, distinguiendo los escenarios sinópticos.

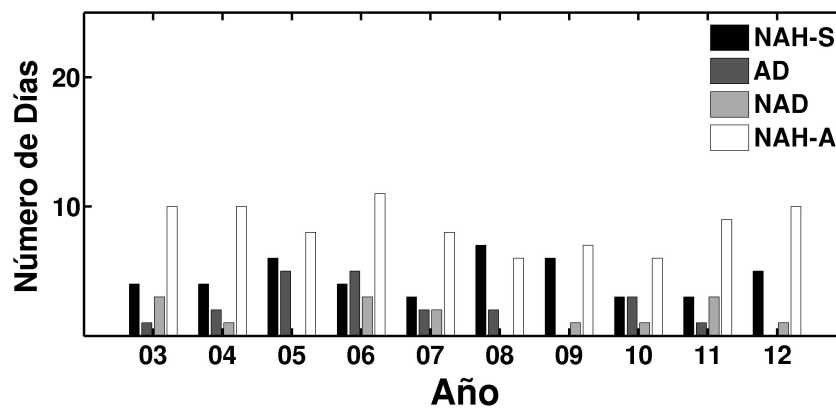


Figura 17: Variabilidad interanual del número de días, distinguiendo los escenarios sinópticos.

Si representamos ahora la climatología y la variabilidad interanual del número de días (Figuras 16 y 17, respectivamente), volveremos a encontrar que el escenario NAH-A es el más representativo de cada año y el que propicia la aparición de intrusiones desérticas durante los meses de Mayo a Septiembre. Citaremos como excepción el año 2008 en el que el escenario NAH-S es igual o incluso más importante que éste, siendo el único año del periodo que muestra esta diferencia.



## VI. CONCLUSIONES

El objetivo principal ha sido establecer el Inventario de Intrusiones Desérticas que llegan a la región centro-norte de la Península Ibérica durante el periodo 2003-2012 a través del análisis de información base (AOD, Alfa y  $PM_{10}$ ) y de información complementaria ( $PM_{2.5}$ , retrotrayectorias, escenarios sinópticos, imágenes MODIS).

Una vez establecido se analizan las características más destacables, como el promedio de días por año (40,5), el promedio de intrusiones al año(16,7), los valores medios de AOD (0,29) y Alfa (0,91)... a su vez, se analizan la climatología y variación interanual del número de días, número de eventos, AOD y Alfa y se estudian los histogramas de frecuencia para AOD y Alfa.

El punto más relevante de este trabajo en lo referente al análisis de datos ha sido la cuantificación de la contribución de aerosol desértico a la climatología de fondo de la región de estudio, representando esta contribución tanto para el ciclo anual y la variabilidad interanual. La contribución varía del 5% (diciembre y enero) al 21% (agosto) para el ciclo anual y de 5% (2009) al 18% (2004) para la variabilidad interanual.

En último lugar se estudia el tipo de escenario sinóptico que propicia las intrusiones siendo el resultado más destacable que es el escenario NAH-A el más importante, siendo prácticamente el único responsable durante los meses de verano, que son los que más días y episodios presentan.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bennouna, Y., Cachorro, V.E., Burgos M.A., Toledano, C., de Frutos, A.M., (2013), “The relations between AOD and  $PM_x$  from long term data for north-central Spain”, Proceeding of the 1st Iberian Meeting on Aerosol Science and Technology, RICTA.
2. Bennouna, Y., Cachorro, V.E., Burgos, M.A., Toledano, C., Torres, B., de Frutos, A.M., (2014), “Relationships between columnar aerosol optical properties and surface particulate matter observations in north-central Spain from long-term records (2003-2011)” *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 7, 5829-5882, 2014.
3. Bennouna, Y., Cachorro, V.E., Torres, B., Toledano, C., Berjón, A., de Frutos, A.M., Alonso Fernández Coppel, I., (2013), “Atmospheric turbidity determined by the annual cycle of the aerosol optical depth over north-central Spain from ground (AERONET) and satellite (MODIS)”, *Atmospheric Environment*, vol. 46, pp. 352-364.
4. Cachorro, V.E., Burgos, M.A., Bennouna, Y., Toledano, C., Torres, B., Mateos, D., Marcos, A., de Frutos, A.M., (2014) “Characterization of  $PM_x$  data belonging to the Desert-Dust-Inventory based on AOD-Alpha RIMA-AERONET data at Palencia-Autilla Stations”, Proceeding of the 2nd Iberian Meeting on Aerosol Science and Technology, RICTA.



5. Del Rio, S., Fraile, R., Herrero, L., and Penas, A. (2007), “Analysis of recent trends in mean maximum and minimum temperatures in a region of the NW of Spain (Castilla y León)” , *Theor. Appl. Climatol.*, 90, 1–12, 5835 .
6. Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O’Neill, I. Slutsker, and S. Kinne (1999), “The wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols”, *J. Geophys. Res.*, 104, 31,333 – 31,350.
7. Escudero, M., S. Castillo, X. Querol, A. Avila, M. Alarcón, M. M. Viana, A. Alastuey, E. Cuevas, and S. Rodríguez (2005), “Wet and dry African dust episodes over eastern Spain”, *J. Geophys. Res.*, 110, D18S08, doi:10.1029/2004JD004731.
8. Holben, B., Tanre, D., Smirnov, A., Eck, T., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W., Schafer, J., Chatenet, B., Lavenu, F., , Kaufman, Y. J., Vande Castle, J., Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karneli, A., O’Neill, N. T., Pietras, C., Pinker, R. T., Voss, K., and Zibordi, G., (2001), “An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET”, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 12067–12097,5832.
9. Holben,B.N., T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, A. Smirnov, (1998), “AERONET – A federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization” *Remote Sensing of Environment*, vol. 66, pp 1-6.
10. O’Neill, N. T., Eck, T. F. , Smirnov, A., Holben, B. N., and Thulasiraman , S., (2003), “Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth”, *J. Geophys. Res.*, 108(D17), 4559, doi:10.1029/2002JD002975.
11. Querol, X., Alastuey, A., Pandolfi, M., Reche, C., Pérez, N., Minguillón, M.C., Moreno, T., Viana, M., Escudero, M., Orío, A., Pallarés, M., Reina, F., (2013), “2001-2012 trends on air quality in Spain”, *Science of the Total Environment*, 490, 957-969.
12. Stone, R. S. (2002), “Monitoring aerosol optical depth at Barrow, Alaska and South Pole: Historical overview, recent results, and future goals” *Proceedings of the 9th Workshop Italian Research on Antarctic Atmosphere*, edited by M. Colacino, pp. 123 – 144, Ital. Phys. Soc., Bologne.
13. Toledano, C., (2005), “Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'El Arenosillo' de la red AERONET”. Tesis doctoral, Universidad de Valladolid.
14. Toledano, C., Cachorro, V.E., de Frutos, A.M., Sorribas, M., Prats, N., de la Morena, B.A., (2007), “Inventory of African desert dust events over the southwestern Iberian Peninsula in 2000-2005 with an AERONET Cimel Sun Photometer”, *Journal of Geophysical Research*, vol.112.
15. Vergaz, R. (2001), “Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos: Caracterización del área del Golfo de Caádiz”, *Ph.D. thesis*, Univ. de Valladolid, Valladolid, Spain.