



El episodio de polvo de febrero de 2016

UNA MIRADA A TRAVÉS DE LA RADIACIÓN SOLAR

JUAN RAMÓN MORETA¹, JOSÉ MONTERO¹, JOSÉ MARÍA SAN ATANASIO¹, DANIEL MORENO¹, ALEJANDRO ROA²

¹SERVICIO DE REDES ESPECIALES Y VIGILANCIA ATMOSFÉRICA, AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

²ÁREA DE TÉCNICAS Y APLICACIONES DE PREDICCIÓN, AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

El pasado 21 y 22 de febrero, tuvo lugar de forma generalizada en gran parte de la Península Ibérica un episodio de intrusión de polvo sahariano, inusual tanto por su intensidad como por la época del año en la que tuvo lugar, dado que estos fenómenos son más propios de los meses de verano o próximos a dicha estación. En este artículo pretendemos mostrar de forma resumida el efecto que dicho episodio tuvo sobre la radiación solar, y a su vez mostrar un ejemplo del seguimiento de estos episodios mediante el uso de fotómetros solares, una herramienta de teledetección terrestre cuyos productos son de gran utilidad para diversos campos y sectores, como su utilización en modelos numéricos de predicción del tiempo y de calidad del aire, herramienta de apoyo para la navegación aérea o elemento de vigilancia de la calidad del aire.



Figura 1.- Instantánea de la zona de rascacielos del norte de Madrid durante los días del episodio de polvo. Fuente: La Opinión de Málaga

INTRODUCCIÓN

Las dos redes involucradas son la Red Radiométrica Nacional y la Red de Fotómetros Solares CIMEL, ambas pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), y operativas dentro del Servicio de Redes Especiales y Vigilancia Atmosférica.

La Red Radiométrica Nacional constituye una de las principales redes de observación de la radiación solar a nivel euro-

peo, y está constituida por un total de 38 estaciones distribuidas a lo largo de toda la Península y los dos archipiélagos. La red permite obtener registros de la radiación solar en sus componentes global (total de la radiación solar incidente sobre un plano horizontal), directa (radiación proveniente directamente del sol e incidente en un plano normal al de incidencia) y difusa (toda aquella radiación registrada sobre una superficie ho-



Figura 2.- Mapa de la Red Radiométrica Nacional de la AEMET



Figura 3.- Mapa de la Red de Fotómetros Solares CIMEL de la AEMET

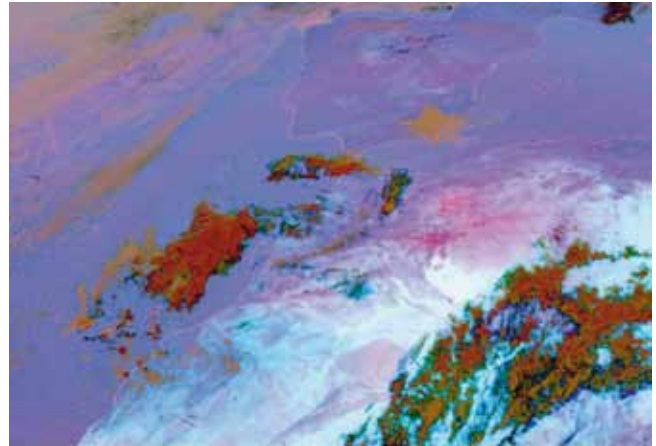
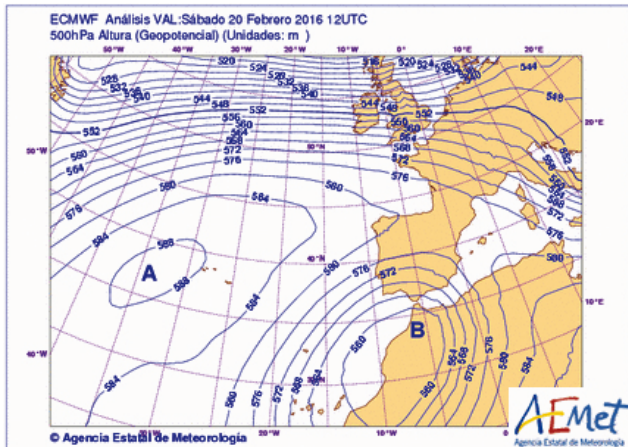


Figura 4.- Izquierda: Campo de geopotencial en 500 hPa del modelo del ECMWF correspondiente a la pasada del día 20 de febrero de 2016 a las 12 UTC, alcance H+00. Derecha: Producto "Dust RGB" de AEMET correspondiente al 20 de febrero de 2016 a las 12 UTC. Este producto está diseñado para la identificación de concentraciones significativas de polvo en suspensión en la atmósfera, las cuales aparecen identificadas mediante un color rosa intenso o magenta. Mientras que este producto ofrece ciertas limitaciones sobre océano, tiene su mayor potencial sobre continente. Este es el caso del norte de África, la principal fuente del polvo susceptible de afectar a la Península o Islas, de ahí el enfoque de la imagen hacia dicha región.

horizontal, excluyendo la proveniente directamente del sol). Adicionalmente, la red cuenta con instrumentos específicos para la medida de la radiación ultravioleta.

La Red de Fotómetros Solares CIMEL de AEMET está constituida por cinco fotómetros, cuatro instalados en territorio peninsular, y uno en las Islas Baleares. Estos instrumentos, mediante la medida de la radiación solar directa en determinadas longitudes de onda, estiman de forma indirecta el contenido total de aerosoles atmosféricos en la columna atmosférica mediante el parámetro denominado espesor óptico, que cuantifica el poder atenuante de la radiación solar por los mismos. Esta red está integrada en el programa AERONET, la principal red de medida de aerosoles a nivel mundial, y clave para la difusión internacional de la medida de aerosoles atmosféricos.

En este artículo se pretende reflejar el grado en el que la intrusión sahariana afectó a los registros de radiación solar en sus tres componentes (global, directa y difusa), y a su vez, mostrar la intensidad de la propia intrusión a través de las medidas de

espesor óptico registradas. Se ha elegido para el estudio la estación del Centro Radiométrico Nacional ubicada en la azotea del edificio de Servicios Centrales de la AEMET en Madrid (Ciudad Universitaria), la cual dispone en paralelo de una estación radiométrica completa, con medida de radiación global, directa, difusa, ultravioleta eritemática e infrarroja, y de un fotómetro solar CIMEL CE-318.

SITUACIÓN SINÓPTICA

El episodio tuvo sus prolegómenos durante el día 20 de febrero, en el que una baja en altura se situó en el norte de África, al sur-suroeste de la Península Ibérica. Durante ese día, no hubo reflejo de presencia de polvo en las estaciones del centro peninsular, en este caso Madrid.

El día 21 de febrero, la baja se desplazó ligeramente en dirección noroeste, permitiendo que el flujo de aire de origen sahariano y cargado de polvo, entrase por el sureste peninsular,

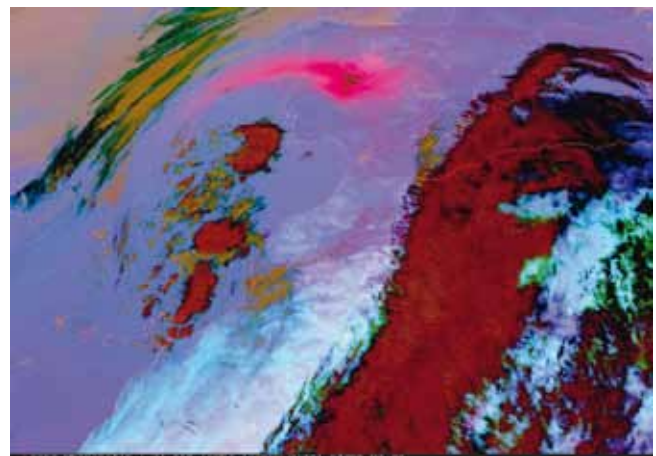
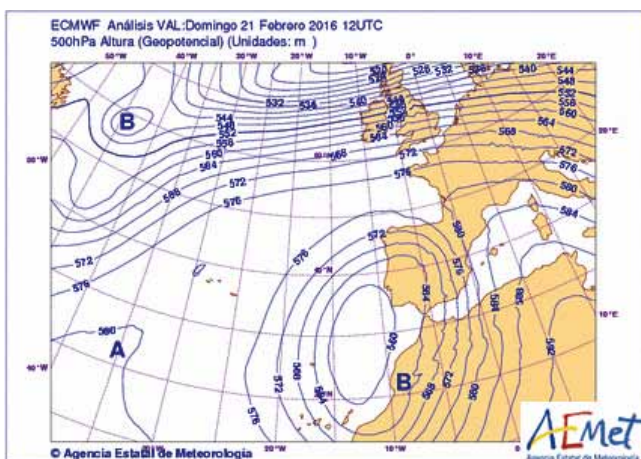


Figura 5.- Izquierda: Campo de geopotencial en 500 hPa del modelo del ECMWF correspondiente a la pasada del día 21 de febrero de 2016 a las 12 UTC, alcance H+00. Derecha: Imagen "Dust RGB" correspondiente al 21 de febrero de 2016 a las 12 UTC. Se puede identificar la intensidad de la intrusión de polvo mediante la intensa franja de color magenta sobre el centro peninsular.

El episodio de polvo de febrero de 2016

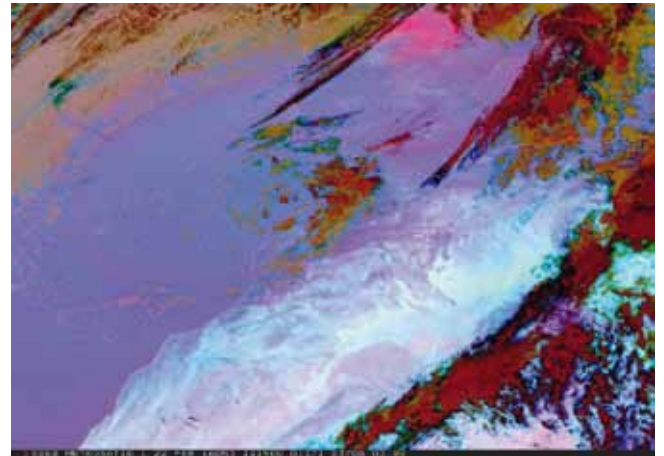
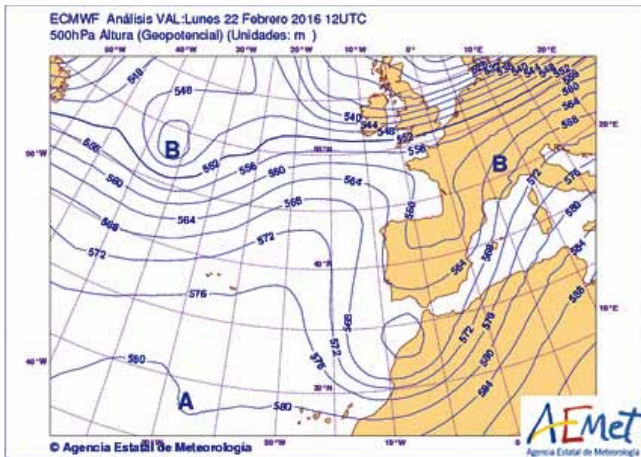


Figura 6.- Izquierda: Campo de geopotencial en 500 hPa del modelo del ECMWF correspondiente a la pasada del día 22 de febrero de 2016 a las 12 UTC, alcance H+00. Derecha: Imagen “Dust RGB” correspondiente al 22 de febrero de 2016 a las 12 UTC.

atravesando la Península de oeste a este, como se puede apreciar en la imagen de satélite por el intenso color magenta sobre el centro peninsular.

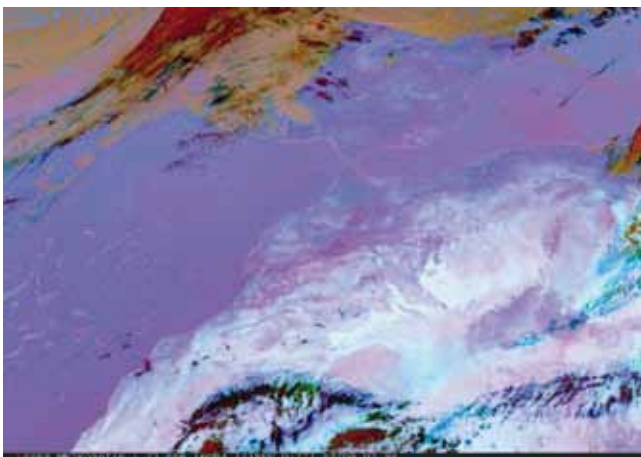
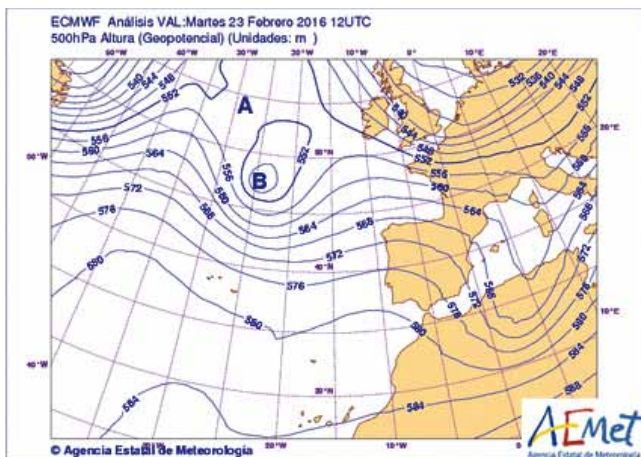


Figura 7.- Arriba: Campo de geopotencial en 500 hPa del modelo del ECMWF correspondiente a la pasada del día 23 de febrero de 2016 a las 12 UTC, alcance H+00. Abajo: Imagen “Dust RGB” correspondiente al 23 de febrero de 2016 a las 12 UTC.

El día 22 de febrero, la baja se debilitó, por lo que finalizó el influjo de la masa de aire africana sobre la Península, aunque, como se puede apreciar en la imagen de satélite, la presencia de polvo sobre Península persistía en concentraciones aún apreciables debido a la persistencia de los restos de la masa de aire africana de los días anteriores.

El día 23 de febrero, el episodio finalizó debido a la llegada de un frente por el noroeste que desplazó los restos de la masa de aire sahariana fuera de la Península hacia el norte de África.

DATOS RADIOMÉTRICOS DURANTE EL EPISODIO

A continuación mostramos la gráfica de la evolución de la radiación solar en sus tres componentes (global, directa y difusa) en la estación radiométrica de Madrid a lo largo de todo el episodio de polvo: desde el día previo a la intrusión, 20 de febrero, hasta el final del episodio el 23 del mismo mes.

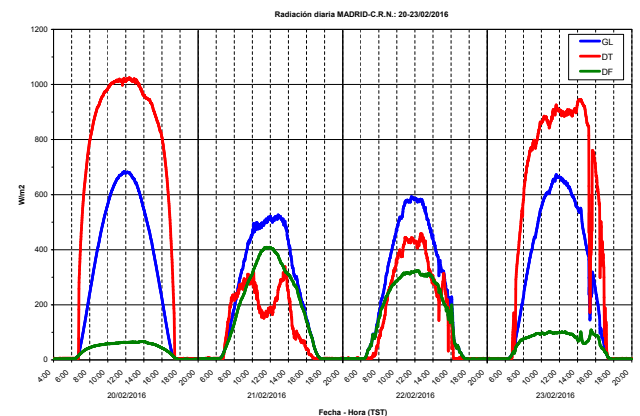


Figura 8.- Evolución de la radiación solar global (azul), directa (roja) y difusa (verde) en la estación del Centro Radiométrico Nacional en la sede central de la AEMET en Madrid (Ciudad Universitaria) desde el día 20 hasta el día 23 de febrero de 2016. Datos en Hora Solar Verdadera (True Solar Time).

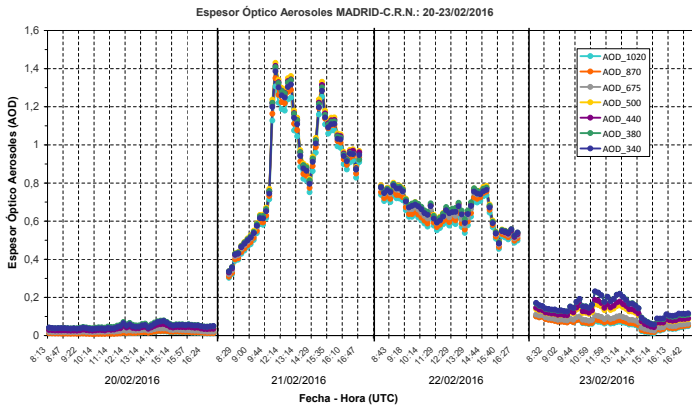


Figura 9.- Evolución del espesor óptico de aerosoles en 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm y 340 nm, medidos en la estación del Centro Radiométrico Nacional en la sede central de la AEMET en Madrid (Ciudad Universitaria) desde el día 20 hasta el día 23 de febrero de 2016. Datos en hora UTC.

Como vemos en la Figura 8, el día 20 de febrero muestra la campana característica de radiación global y directa para un día despejado, acompañado de valores de espesor óptico inferiores a 0,1 propios de días con una baja concentración de aerosoles (Figura 9).

A efectos cuantitativos, si comparamos en la Tabla 1 el valor diario total de irradiancia global registrado el día 20 de febrero, con el valor medio y máximo para ese mismo día de la serie histórica de la estación (1975-2015), vemos que los registros del día 20 son próximos a los valores del máximo histórico, constituyendo el segundo registro más elevado para ese día de toda la serie, sólo por detrás del máximo registrado en 2012.

RADIACIÓN DIARIA GLOBAL MADRID-CRN (10KJ/M2) REGISTRADA CADA 20 DE FEBRERO. SERIE 1975-2015		
2016	MEDIA SERIE	MÁX. SERIE (2012)
1.592	1.134	1.676

Tabla 1.- Comparativa del valor total diario de radiación solar global (10*kJ/m²) registrado el 20 de febrero de 2016 en la estación del Centro Radiométrico Nacional en Madrid (Ciudad Universitaria) con respecto al valor medio y máximo de radiación global registrado ese mismo día a lo largo de toda la serie de operación de estación (1975-2015).

De este modo parece razonable el poder considerar el día 20 como un día despejado y limpio de aerosoles, a efectos de tomarlo como referencia con respecto a los días sucesivos cuando tuvo lugar la intrusión de polvo.

Por otro lado, para poner en contexto los valores de espesor óptico que vamos a tratar, mostramos a continuación la climatología de espesores ópticos registrados en la estación de Madrid desde el 2012, cuando la estación se incorporó a AERONET.

A raíz de éstos podemos ver que febrero, así como el resto de meses de invierno, es cuando se registran los niveles mínimos anuales con valores inferiores a 0,1 en todas las longitudes de onda de medida (por regla general las longitudes de onda más

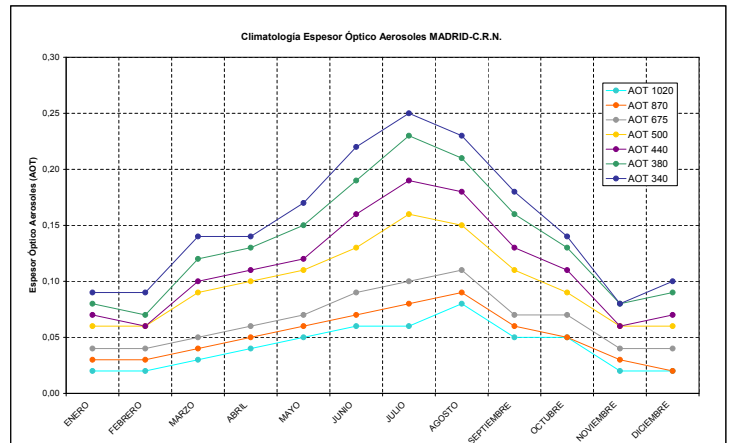


Figura 10.- Climatología del espesor óptico de aerosoles en 1020 nm, 870 nm, 675 nm, 500 nm, 440 nm, 380 nm y 340 nm, en la estación del Centro Radiométrico Nacional en Madrid (Ciudad Universitaria). Serie climatológica correspondiente al período 2012-2015 en la que se han descartado todas aquellas medidas afectadas por nubes.

corta están asociadas a espesores ópticos más altos, esto es, son más atenuadas por la presencia de partículas en la atmósfera, aunque esta dependencia se difumina en los casos de partículas gruesas como es el caso de polvo desértico), por ese motivo lo extraordinario de este episodio por lo inusual de la época. Igualmente, en la cuantificación de la intensidad de la intrusión de polvo, cabe observar que la climatología de los meses de verano (la época del año donde hay una mayor presencia de aerosoles, tanto debido a la mayor sequedad del suelo como por la mayor influencia en nuestras latitudes de flujos de aire de origen sahariano) presentan un máximo en julio de hasta 0,25, muy inferiores a los valores registrados durante el episodio.

Durante las primeras horas del día 21 se produce la entrada de polvo que se observa de forma clara en el truncamiento de la radiación directa a partir de las 9:00 T.S.T. (Hora Solar Verdadera), equivalente en esta época del año a las 9:30 UTC. Ese truncamiento en la radiación directa, se extiende a lo largo del día, y se intensifica más si cabe durante las horas centrales, coincidiendo con los máximos de espesor óptico de todo el episodio, valores de hasta 1,4, volviendo a recuperarse levemente a primeras horas de la tarde. Para poner en contexto estos valores de espesor óptico, el espesor óptico asociado a una capa de cirroestratos lo suficientemente espesa como para ocultar el sol, aunque permitiendo observar el disco solar a través de ella, está aproximadamente entre 1.5 y 2.

Un buen ejemplo de la correlación inversa existente en las medidas provenientes de los radiómetros, concretamente en la medida de radiación directa, y en las proporcionadas en la red CIMEL, se puede observar en una comparativa de ambas gráficas si superponemos la línea roja de radiación directa (Figura 8), con la gráfica de espesor óptico (Figura 9).

El día 22, como se puede observar en el gráfico de radiación (Figura 8), persiste la atenuación de la radiación, aunque en menor medida, principalmente en la radiación directa (volveremos

El episodio de polvo de febrero de 2016

sobre este hecho posteriormente), lo cual está en estrecha relación con la obtención de espesores ópticos entre 0.6-0.8, propios de una concentración elevada de aerosoles, aunque inferior a los valores de hasta 1.4 registrados en el día anterior.

Finalmente, el día 23 de febrero, como mostramos en la evolución sinóptica, la llegada de aire atlántico limpió la atmósfera de aerosoles, disminuyendo a valores de 0.2 de espesor óptico (valor propio de presencia de ligeras brumas), y que se reflejó en la recuperación de los registros de radiación similares a los del día 20, salvo por la presencia de algunas nubes altas.

Mientras que si con la entrada de polvo, la radiación directa fue la que más sufrió una reducción de su intensidad, con registros inferiores a los de la radiación global (recordamos que las componentes global y directa de la radiación se registran en planos diferentes: mientras la radiación directa se mide en un plano normal a la radiación solar, la global se registra en un plano horizontal), al "limpiarse" la atmósfera, la radiación directa recuperó su intensidad volviendo a registrarse valores absolutos superiores a la global.

A continuación mostramos en números (totales diarios y porcentajes con respecto al día 20 de febrero) lo mostrado en el gráfico anterior con respecto a la radiación global, directa y difusa.

TOTALES DIARIOS MADRID-CRN	Radiación GLOBAL Unid: 10kJ/m2	Radiación DIRECTA Unid: 10kJ/m2	Radiación DIFUSA Unid: 10kJ/m2	Radiación UV Eritema. Unid: J/m2	Máximo UVI
Día 20	1.592	3.275	177	1.48	3,4
Día 21	1.220	638	921	981	2,1
Día 22	1.300	905	824	1.092	2,5
Día 23	1.550	2.707	287	1.556	3,6

Tabla 3.- Totales diarios de radiación solar Global, Directa y Difusa (10kJ/m2), radiación UV Eritémica (10kJ/m²) e índice UVI registrados en la estación del Centro Radiométrico Nacional en Madrid (Ciudad Universitaria) entre los días 20 y 23 de febrero de 2016.

% RESPECTO AL DÍA 20 MADRID-CRN	Radiación GLOBAL	Radiación DIRECTA	Radiación DIFUSA	Radiación UV Eritema.	Máximo UVI
Día 20	100%	100%	100%	100%	100%
Día 21	77%	19%	520%	66%	62%
Día 22	82%	28%	466%	74%	74%
Día 23	97%	83%	162%	105%	106%

Tabla 4.- Valores porcentuales del total de radiación solar Global, Directa, Difusa, UV Eritémica e índice UVI registrados en la estación del Centro Radiométrico Nacional en Madrid (Ciudad Universitaria) entre los días 20 y 23 de febrero de 2016, referenciados a los valores registrados el día 20 (100%).

Centrándonos en la tabla de valores relativos (Tabla 4), comprobamos lo mencionado anteriormente respecto al diferente grado de atenuación de la componente global y directa. Mientras la primera, con respecto al día 20, muestra valores totales diarios de un 77% y 82% con respecto a la radiación total diaria (esto es, una atenuación del 27% y 18% respectivamente), la directa registra un total diario de un 19% y 28% con respecto a lo registrado el día 20 (una atenuación del 81% y del 72%).

Es decir, la presencia de polvo en la atmósfera, tiene un gran efecto en la disminución de la radiación que recibimos directamente del sol (que es la utilizada entre otras por las plantas de aprovechamiento de la energía solar denominadas de concentración), pero su efecto atenuador sobre la radiación global incidente sobre la superficie no es tan elevada, como sería por ejemplo para el caso de una capa espesa de cirroestratos con un valor de espesor óptico similar.

También, y como se puede observar en la Tabla 4, otro factor a tener en cuenta es la atenuación de la radiación ultravioleta (medida en una superficie horizontal de forma similar a la radiación global), la cual, siguiendo el mismo comportamiento de la radiación global, no sufre una notoria disminución, y por lo tanto, puede conducir a una interpretación errónea por parte la población en el sentido que la presencia de polvo en la atmósfera, traducido en ese aspecto brumoso y pesado del cielo, nos protege de forma efectiva de la radiación UV, concluyendo erróneamente que nos puede eximir de utilizar los correspondientes métodos de protección (cremas solares, sombreros, utilización de espacios a la sombra,...) cuando estos fenómenos ocurren durante los meses de primavera o verano, época cuando dicha radiación alcanza valores peligrosos para la salud.

LA INTERACCIÓN AEROSOL-RADIACIÓN SOLAR

La explicación del diferente grado de atenuación entre la radiación directa y la global ante la presencia de polvo desértico viene dado por los procesos de dispersión (o *scattering* en el término en inglés) que dominan en la presencia de aerosoles en la atmósfera.

La presencia de polvo (o aerosoles atmosféricos), como cualquier componente material, interacciona con los rayos solares,

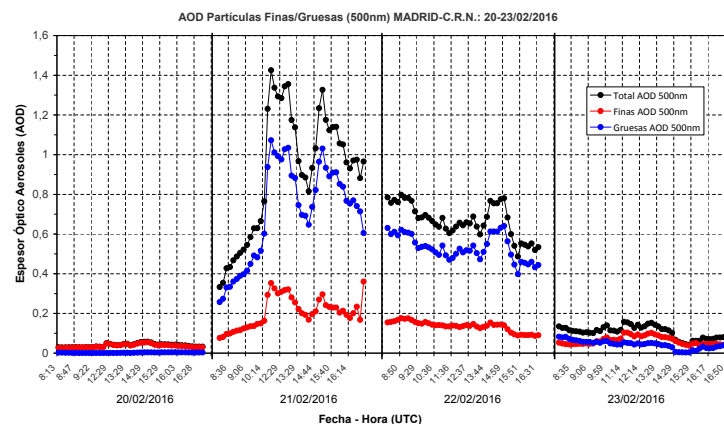


Figura 11.- Evolución del AOD en 500 nm medidos en la estación del Centro Radiométrico Nacional (en negro), expresado junto con la contribución debida a la presencia de partículas finas (en rojo) y a las partículas gruesas (azul). En aquellos puntos donde no se observa el espesor óptico total (en negro), este coincide con la línea de AOD para partículas finas.

ya sea mediante la simple desviación del rayo (proceso de dispersión o *scattering*) o mediante la absorción selectiva de parte del espectro solar, atenuando su intensidad. En el caso de los aerosoles de origen desértico hay un claro predominio de los procesos de dispersión sobre los de absorción, así, un porcentaje cercano al 90% de la atenuación total de la radiación, en estos episodios, se debe a procesos dispersión.

Además, también entra en juego el modo en que los aerosoles dispersan la radiación, factor que depende principalmente del tamaño de los mismos. El denominado polvo atmosférico, constituido por aerosoles de origen desértico son, dentro de los diferentes tipos de aerosoles, partículas denominadas gruesas (aerosoles con un diámetro aproximadamente igual o superior a $1\mu\text{m}$), a diferencia de los aerosoles provenientes de actividades de combustión que entran dentro de la clasificación de partículas finas (diámetro inferior a $1\mu\text{m}$), y que son los propios de atmósferas urbanas con cierto grado de contaminación (tráfico, calefacciones, industrias,...).

Esta dualidad en el tamaño de los aerosoles según su origen, se puede observar claramente en la Figura 11 donde se muestra la contribución al espesor óptico total medido en 500 nm de partículas finas y gruesas.

Así, mientras el día anterior a la intrusión de polvo (20 de febrero) la mayor contribución al espesor óptico total en 500 nm es debida a la presencia de partículas finas provenientes principalmente de procesos de combustión, los días de la intrusión de polvo sahariano (21 y 22 de febrero) ese patrón se revierte y la principal atenuación se debe a la presencia de partículas gruesas propias de los aerosoles desérticos. Por último, y si nos fijamos en el día 23 de febrero, podemos ver que la finalización del episodio de polvo coincide con una vuelta al final de la mañana (con el cruce de las líneas azules y rojos) a una estructura similar a la existente el día 20, propia de un entorno urbano en ausencia de intrusiones de polvo desértico.

Volviendo a la importancia del tamaño de los aerosoles en el modo de interactuar con la radiación solar, la presencia de estas partículas gruesas, que en el caso de los aerosoles de origen desértico pueden presentar un diámetro entre 1 y $10\mu\text{m}$, significa que su tamaño sea del mismo orden o superior que la longitudes de onda propias de la radiación solar (entre 0.2 y $4\mu\text{m}$). Este hecho hace que el modelo de dispersión de la radiación siga el modelo denominado *scattering* de Mie, el cual a grandes rasgos viene caracterizado por una menor influencia con la longitud de onda que el *scattering* de Rayleigh (motivo por el que desaparece el color típico azul del cielo en un día despejado) y una mayor predominancia en la dispersión de la radiación hacia delante, entre un 80%-90% del total de la radiación dispersada (a efectos comparativos, las moléculas gaseosas que nos rodean presentan un tamaño de $10^{-4}\mu\text{m}$, y su interacción con la radiación solar sigue el modelo de *scattering* de Rayleigh en el que la radiación que incide sobre la molécula es dispersada en partes iguales hacia delante y hacia atrás).

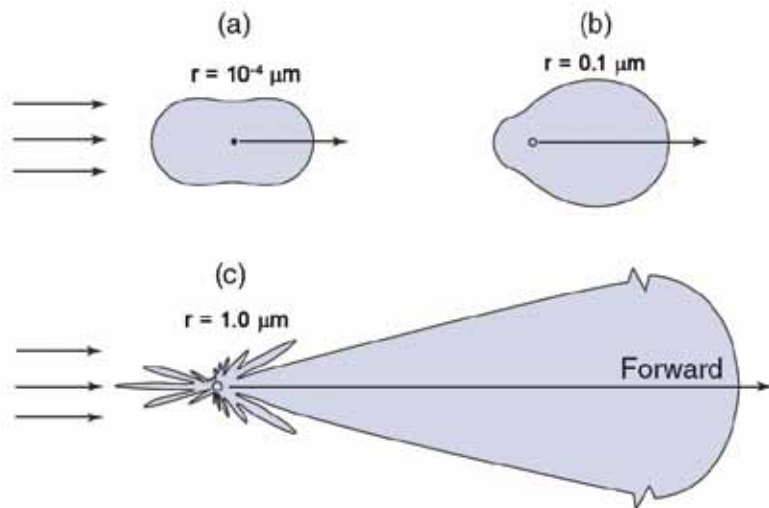


Figura 12.- Gráfico en coordenadas polares que representa de forma proporcional la cantidad de radiación dispersada en cada dirección en función del diámetro de la partícula. Las escalas de cada caso son independientes:

- a) $r = 10^{-4}\mu\text{m}$ \rightarrow Molécula gaseosa (dispersión Rayleigh)
- b) $r = 0,1\mu\text{m}$ \rightarrow Aerosol fino (dispersión Mie)
- c) $r = 1\mu\text{m}$ \rightarrow Aerosol grueso (dispersión Mie)

Se evidencia, que a un mayor tamaño de la partícula, la proporción de radiación dispersada hacia delante es mayor (pasamos de un 50% para $r = 10^{-4}\mu\text{m}$, dispersión de Rayleigh, hasta un 80%-90% para $r = 1\mu\text{m}$, dispersión de Mie. Además también se puede observar que con el aumento del tamaño de la partícula, se estrecha el lóbulo delantero hacia donde se concentra la radiación dispersada.

En conclusión, la conjunción de la no absorción de la radiación y de que la dispersión sea mayoritariamente hacia el sentido de avance, produce que tras numerosos procesos continuados de dispersión de la radiación con las partículas de polvo, una gran parte de esa radiación desviada de su trayectoria inicial (radiación directa atenuada), sí terminen su camino óptico en la superficie, y por tanto contribuyan a la radiación global que recoge el total de la radiación hemisférica incidente.

Por último, mencionar brevemente el comportamiento de la radiación difusa, que engloba a toda aquella radiación proveniente de la bóveda celeste, excluida la radiación directa, y que sigue un comportamiento inverso al de esta. Esto es, aumentando en los días de mayor concentración de polvo desértico, y disminuyendo el último día con la finalización del episodio.

En Madrid, debido a su altitud y en condiciones de cielos limpios (sin nubes y sin altos niveles de contaminación) como fue el día 20, la radiación difusa es del orden de un 10% del total de radiación. En cambio, los días de mayor intensidad de la intrusión de polvo (21 y 22) la radiación difusa aumentó su valor total diario entre 4 y 5 veces por las razones expuestas anteriormente relativas a la no absorción de la radiación y a una predominancia de la dispersión hacia adelante.