

APORTACIONES SOLIDAS A LA ATMOSFERA ORIGINADAS POR UN INCENDIO FORESTAL EN EL AMBITO MEDITERRANEO

J. L. Díaz Hernández *

RESUMEN

El incendio forestal ocurrido en el verano de 1999 en la Sierra de la Almijara (Granada), de magnitud media pero severo, permitió determinar en condiciones de observación adecuadas las emisiones sólidas producidas por vía aérea fuera del sistema. Las partículas sólidas depositadas en su mayor parte durante los días del incendio son, fundamentalmente, cenizas y esférulas minerales rosáceas (EMR): el volumen de cenizas proyectadas al suelo del entorno se estima en 252 Tm (0,168 gr/m²); las EMR, microscópicas, originadas por el vapor de agua desprendido en el incendio, aglutinan las partículas minerales (PM) suspendidas en el aire y aceleran su depósito.

La tasa global obtenida para la semana del incendio experimentó un incremento del 50 % de la tasa de polvo atmosférico depositado en condiciones normales.

Palabras clave: *Acumulación de polvo, Cenizas volantes, Componentes del polvo, Esférulas minerales, Incendios forestales, Suelos mediterráneos, Tasas de deposición de polvo, Transporte eólico.*

ABSTRACT

Fly ash projected from the Sierra de la Almijara forest fire (Granada, August 1999) into adjacent soils were 252 Tm (0,168 gr/m²); this occurred mainly during the days of the fire. The mechanisms implied in the evolution of the gas clouds accelerate the deposition of the mineral particles suspended in the air. These mineral particles are agglutinated into microspherules by the water vapour released. The global rate of deposition obtained for the week of the forest fire underwent an increase of 50 % in comparison to the rate of atmospheric dust deposited under normal conditions.

Key words: *Aeolian transport, Dust accretion, Dust compounds, Dust deposition rates, Fly ash, Forest fires, Mediterranean soils, Mineral spherules.*

Introducción

Los incendios forestales del entorno mediterráneo proporcionan, especialmente en la época estival, un flujo de materia que degrada el paisaje y ocasiona pérdidas de recursos. La combustión de la biomasa de estos ecosistemas genera productos sólidos y gaseosos que, tras evacuarse a la atmósfera, dan lugar a una masa que se traslada desde el punto de incineración a otro emplazamiento: las partículas sólidas liberadas (*fly ash*, Jones y Olson, 1990) se depositan en el suelo más o menos próximo, y los productos gaseosos se difunden en la atmósfera.

Diversos estudios se han realizado sobre los efectos del fuego en el ecosistema edáfico mediterrá-

neo: DeBano *et al.*, 1979, Marion y Black, 1988, Marion *et al.*, 1991, entre otros, examinan, principalmente, el efecto del fuego en la dinámica de los nutrientes del sistema, ya que la combustión de la biomasa libera macro y micronutrientes que corren destinos paralelos al de las cenizas. Otros trabajos se detienen en aspectos de índole erosiva, variaciones en la estructura y en los componentes de los suelos, modificaciones mineralógicas en los horizontes, manejo de estos suelos, etc. Sin embargo, se han realizado pocos esfuerzos para determinar la influencia directa-indirecta del incendio más allá de los límites del área quemada, debido, en parte, a la dificultad que entraña el seguimiento de un evento de estas características, ya que es impredecible el

* Centro de Investigaciones Agrarias. Junta de Andalucía. 18080 Granada.

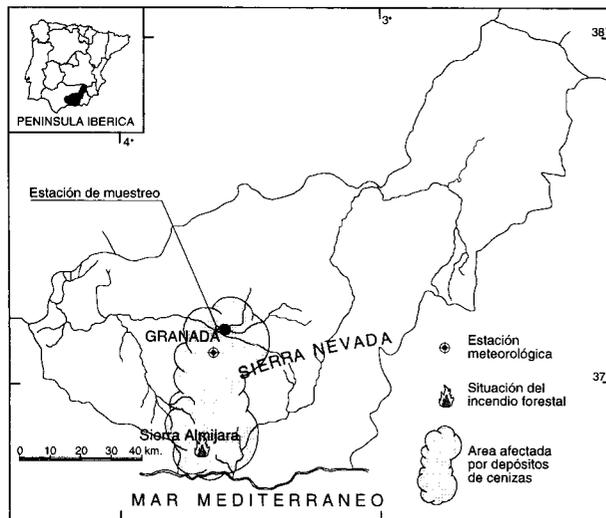


Fig. 1.—Situación del incendio y del área afectada por el depósito de cenizas con respecto al punto de muestreo y la estación meteorológica.

momento, lugar y evolución del mismo, unido a la ausencia general de datos necesarios para contrastar los resultados obtenidos.

El objetivo de este trabajo es establecer la influencia cuantitativa y cualitativa de un incendio forestal en la tasa de deposición de polvo atmosférico en el entorno. Para ello se obtuvieron datos del incendio forestal ocurrido en la Sierra de la Almijara (Granada) durante las 2 p.m. del día 16, y las 4 p.m. del día 18 de agosto de 1999. La superficie quemada en este caso afectó a 2.400 ha, cubiertas en su mayor parte con matorral mediterráneo y, en menor medida, con pinos de repoblación.

En el seguimiento de este proceso fue necesario conocer la dinámica de las masas de aire en el momento del incendio. El fondo regional de los aportes de polvo atmosférico se determinó en base a los datos obtenidos por Díaz y Miranda (1997) para la zona de estudio: estos autores determinaron patrones de distribución y composición de los aportes eólicos a lo largo de un año de características climáticas parecidas, sin incidencias especiales.

Material y métodos

Condiciones del lugar

El incendio se produjo en un punto situado a 700 m.s.n.m., y ascendió la ladera S de Sierra Almijara hasta alcanzar la divisoria atlántica, a 1.500 m.s.n.m., en un área de litología dolomítica y relieve abrupto, reiteradamente incendiada en épocas precedentes. Los suelos predominantes son (ICONA, 1986): Litosoles, Regosoles litosólicos, Regosoles calcáricos y, ocasionalmente, Phaeozems y afloramientos de rocas (estos últimos

representan del orden del 10 % del área). Entre los meses de junio a septiembre no se registraron precipitaciones. La lluvia media anual del observatorio más próximo es de 800 mm, aunque en el año precedente no se alcanzaron los 200 mm. Según datos facilitados por la Delegación Provincial de Medio Ambiente (1999), la mayor parte de la vegetación estaba formada por matorral mediterráneo esclerófilo y subsclerófilo de elevado porte, con densidad de cubrición del 50 al 60 %. Las especies principales eran: *Ulex sp.*, *Rosmarinus officinalis L.*, *Thymus sp.*, *Olea europea*, *Chamaerops humilis L.*, *Buxus sempervirens L.*, y *Daphne gnidium L.* La más abundante de todas ellas era, con diferencia, la primera.

Las partículas originadas en el incendio fueron trasladadas por el aire unos 40 km en línea recta, y se recogieron en el punto de coordenadas geográficas 37° 10' N-3° 31' W, a 640 m.s.n.m., dentro de la Depresión de Granada. Esta depresión está rodeada por relieves calizo-dolomíticos y silíceos, en uno de los cuales se produjo el incendio. La disposición de estos relieves condiciona en parte que el régimen de vientos sea marcadamente de componente Sur, sobre todo en el verano debido al régimen de brisas. Este régimen, junto con la situación meridional de Sierra Almijara, hacen que el punto de muestreo fuera idóneo para efectuar las observaciones (fig. 1).

El Observatorio de la Cartuja registra una precipitación media anual de 459,7 mm, y una temperatura media anual de 15,3° C, según datos obtenidos a lo largo del siglo xx. La zona está sujeta a periódicas sequías interanuales, como la que soportó desde los dos años precedentes al incendio. El entorno del punto de muestreo se dedica a aprovechamientos agrícolas, con regadíos en las proximidades de la estación de seguimiento, y olivar de secano y áreas forestales en las áreas más abruptas y lejanas. El reciente incremento del grado de industrialización de este punto aumenta la cantidad de agentes contaminantes en la atmósfera, que pueden interferir en las tasas obtenidas.

Con los datos aerodinámicos de la estación de Armilla, perteneciente a la red del Instituto Nacional de Meteorología, se determinó la dinámica del aire en las capas más inferiores de la atmósfera. Para establecer las condiciones de circulación de las capas altas, en especial a 3.200 m.s.n.m., se utilizó el modelo HIRLAM.

Método de Muestreo

La recogida del polvo atmosférico se realizó conforme al método de Díaz y Miranda (1997). Este método consiste, en esencia, en recolectar semanalmente el polvo atmosférico por sedimentación, mediante colectores de bandeja por vía seca, y separar después tres fracciones: una fracción mecánica (obtenida cuidadosamente con un pincel), y dos fracciones que proceden del lavado de las bandejas: fracción de decantación y fracción de evaporación. Así, la tasa de deposición de polvo atmosférico es la suma de estos tres valores. La primera fracción es la que proporciona mayor información. Todos los cálculos se realizaron rigurosamente en base al número de horas de exposición del colector. Sin embargo, dadas las circunstancias del evento, se introdujeron algunas modificaciones en el método indicado:

1. Períodos muestrales. El muestreo se inició el día 17 de agosto a las 11 a.m. (unas 20 horas después de la declaración del incendio). Durante la semana siguiente a esta fecha los períodos de toma de muestras fueron cada dos días, mientras que en las semanas segunda y tercera posteriores al incendio, los períodos de muestreo fueron semanales. Este cambio se realizó por la abundancia de sedimento recogido en los dos primeros días, y la posibilidad de establecer así discriminaciones composicionales que, pasada la primera semana, ya no existían. La causa de esta innovación es, en última instancia, la corta duración del incendio.

2. Separación de fracciones. En lugar de recoger una sola fracción mecánica se desglosó ésta, a la vista de sus componentes, en otras tres submuestras, para mejorar la discriminación composicional: a) la integrada casi exclusivamente por restos vegetales quemados (RVQ) muy lábiles (cenizas); b) la que presentaba composición algo más compleja, pero definida en base a la presencia de esférulas minerales rosáceas (EMR), así como restos vegetales escasamente quemados; c) la que correspondería a la fracción mecánica común con el método indicado, cuya composición tiene la complejidad habitual. Este desdoblamiento de muestras sólo se realizó en el primer período muestral, ya que fué en él donde se recogieron las cenizas. Se prestó atención especial a la inusual presencia de EMR. Todas estas fracciones se examinaron con lupa binocular, mediante iluminación oblicua a diferentes aumentos, y se estimaron *de visu* sus contenidos porcentuales.

Se debe indicar que entre los días 23 y 26 hubo pérdida de muestra por vuelco del captador: a estos días se adjudicó la tasa del período inmediatamente posterior, sin que ello suponga *a priori* errores importantes. No se dispone de datos de tasas de deposición de polvo atmosférico en el período inmediatamente anterior al incendio. La dilación en el inicio del muestreo fue causado por el natural retraso en la información de la existencia del incendio; esta circunstancia no debe ser determinante de inexactitud en la tasa obtenida, porque la dirección del viento desde las 8 a.m. hasta las 9 p.m. del día 16 fue de componente NW (fig. 2). Las superficies afectada por los depósitos de cenizas se obtuvo por encuestas realizadas en los Ayuntamientos afectados.

Resultados

Condiciones meteorológicas

Con los datos aerodinámicos a nivel del suelo se confeccionaron los diagramas de la figura 2, que expresan el porcentaje de horas en las que el viento proviene de una determinada dirección. De los diagramas realizados por días (días 16 al 23 de agosto) se concluye, como es habitual en la zona para la época de verano, que los vientos de componente S siempre están presentes a partir de media mañana, acompañados también de vientos de componente NW. El día 16 el incendio se desarrolló con predominio de la componente NW, con rachas superiores a 10 km/h. En el día 17 el viento predominante tuvo componente S, aunque las rachas raramente superaban los 10 km/h. El día de la extinción del incendio el viento careció de una dirección netamente predominante. El día 19 la dirección predominante del viento tuvo componente W, con rachas frecuentemente superiores a 10 km/h, y en los días 20, 21, 22 y 23 se acentuó claramente el viento de componente S. El promedio de la semana del 26 de agosto al 1 de septiembre sigue este mismo patrón: la componente NW es poco importante, y predomina la componente S.

Se comprueba en la figura 3 que las horas con rachas de viento que no superan los 10 km/h

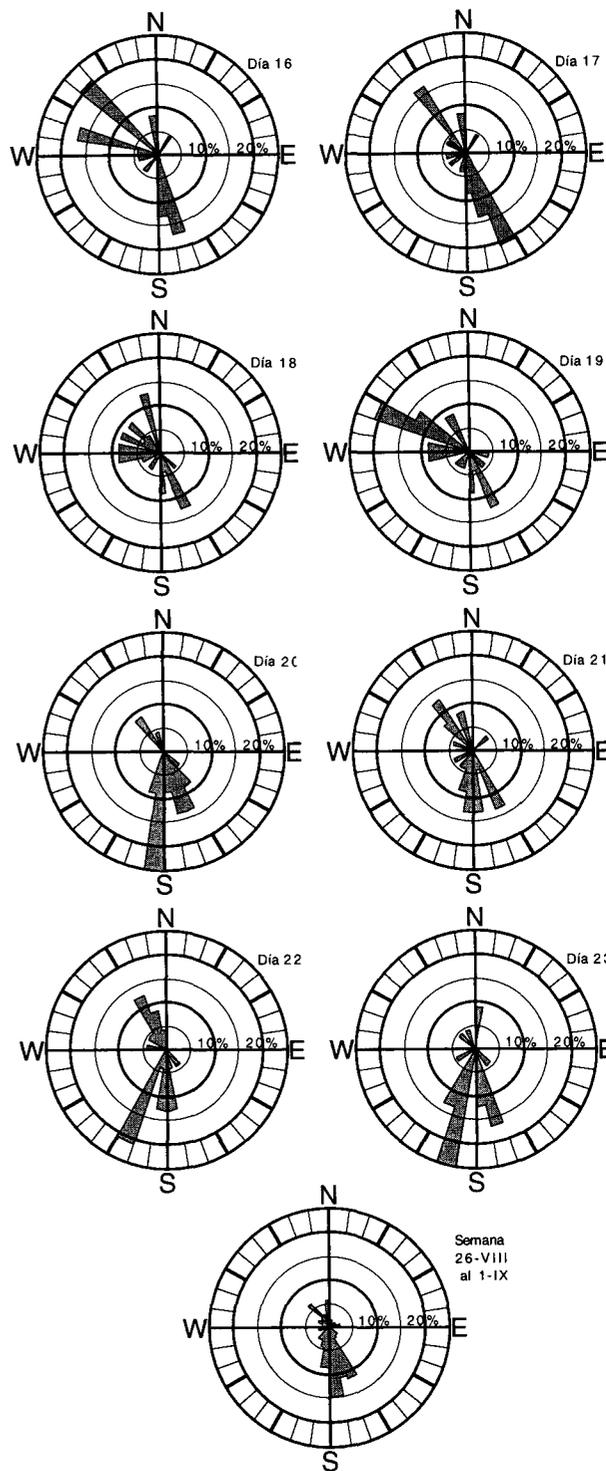


Fig. 2.—Diagramas de rosas de vientos de los días del incendio y de los días posteriores. Se indica el porcentaje de horas en que el viento tiene una determinada dirección, computando sólo los vientos superiores a 10 km/h (datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología).

Tabla 1.—Componentes del polvo atmosférico recogido durante el período de muestreo indicado, y estimación de porcentajes de abundancia relativa (% estimados). Se resalta en **negrita** el momento del incendio.

Período de muestreo	Fracción mecánica								Fracción decantada		Fracción evaporada
	a	b		c				PM	EC	PM	
(1999)	RVQ	EMR	RVQ	PM	EMR	EC	RV	RVQ	PM	EC	PM
17 al 19 (VIII)	100	70	30	85	5	—	5	5	100	—	100
19 al 21 (VIII)	—	—	—	90	1	6		3	100	—	100
21 al 23 (VIII)	—	—	—	50	—	45	3	2	98	2	100
26 al 1 (VIII)	—	—	—	95	—	4	1	—	100	—	100
1 al 8 (IX)	—	—	—	95	—	4	1	—	100	—	100

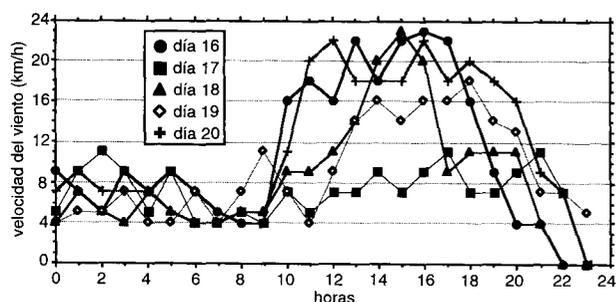


Fig. 3.—Distribución horaria de las rachas de viento durante los días del incendio y días posteriores (según datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología).

(2,8 m/seg) suelen distribuirse entre las 9 p.m. de un día y las 12 horas del día siguiente. Es decir, en el período estudiado, estas rachas ocupan una media del 60 % de las horas del día.

Dado que la zona del incendio está alejada de Observatorios donde se realizan sondeos aerológicos (los más próximos se llevan a cabo en Gibraltar y Murcia), se optó por utilizar el modelo de predicción HIRLAM (HIGH Resolution Local Area Model). Este modelo permite una estimación de las condiciones meteorológicas a distintos niveles de altitud. Entre los niveles disponibles se eligió el de 700 Hp (que corresponde a unos 3.200 m.s.n.m.) por ser el que más se aproxima a la parte superior del penacho de humo que se aleja del foco del incendio impulsado por el viento. Queda patente (fig. 4) que desde el día 16 hasta las primeras horas del día 18, los vientos a ese nivel fueron del SW, en torno a 40 km/h. El día 18 se produjo un giro a viento del S, que al final del día presentaba una fuerza de 30 km/h.

Deposición de partículas

En la tabla 1 se dan las estimaciones (en %) de cada uno los componentes recogidos en cada frac-

ción, y sus períodos muestrales. Estos componentes son:

- **Restos Vegetales Quemados (RVQ).** Son cenizas generalmente de colores grisáceos o negros, en las que se puede observar restos de estructura vegetal (lámina, fotos a y b). El tamaño de estas partículas es muy variable, a veces de algunos milímetros; son muy ligeras y extraordinariamente lábiles. Si están muy fragmentadas se pierde la relación de formas, y con ello la sensación de estructura vegetal, y puede ser difícil clasificarlas como RVQ; no obstante estos elementos suelen conservarse porosos y angulosos. Si el resto vegetal es originalmente de carácter leñoso, y está fragmentado, puede estar carbonizado y presentar cierto brillo característico (con o sin estructura vegetal): en estos casos la combustión no ha sido total. Estos RVQ se encuentran en las tres submuestras de la fracción mecánica, y es la que caracteriza la primera de ellas (submuestra «a»). La máxima abundancia en la submuestra «c» corresponde con los momentos más intensos del incendio, y disminuye su contenido a medida que transcurre el tiempo desde la extinción del incendio.

- **Esférulas Minerales Rosáceas (EMR).** Son esférulas de tamaño homogéneo, inferiores a 100 μ , que generalmente presentan una incisión puntual a modo de poro ó cráter (láminas, fotos e y d). En ocasiones están asociadas a restos vegetales filamentosos, de forma que parecen haber sido ensartadas por aquéllos (lámina, foto e). Estas esférulas son frágiles y se desmenuzan fácilmente bajo presión en fragmentos minerales menores de 10 μ (lámina, foto f); su color recuerda al del polvo sahariano (10YR6/4). Estas EMR no se observan habitualmente en un depósito convencional de polvo atmosférico, y por esta razón se separó la submuestra «b» de la fracción mecánica, en donde es el componente mayoritario; tampoco se ha encontrado descripción de algo similar a las EMR en la bibliografía consultada. Las EMR de la submuestra «c» están especialmente presentes en las muestras correspondientes

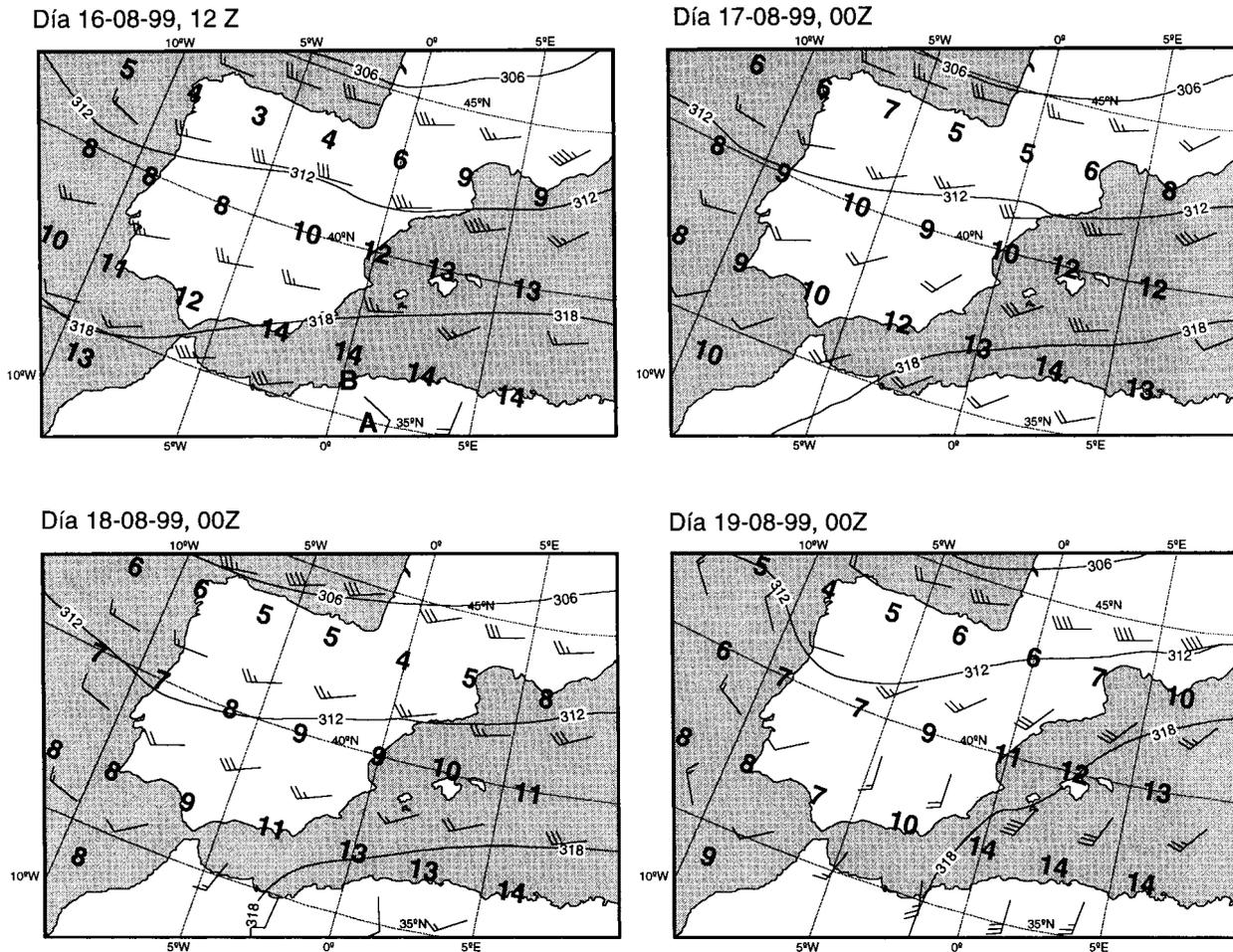


Fig. 4.—Diagramas de predicción del modelo High Resolution Local Area (HIRLAM), para una rejilla de 0,5 y 700 Hp, en los días y horas de tiempo universal indicados. Las flechas marcan la dirección del viento y su fuerza cada 10 nudos. Las cifras de los cuadrantes señalan la temperatura del aire a la altitud (en Hm) indicada por la isolínea. (Datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología.)

al momento más intenso del incendio, al igual que los RVQ, y tienden a disminuir más rápidamente que los RVQ.

- **Esférulas Carbonósas (EC).** Es un componente muy característico de áreas contaminadas, citado por algunos autores [Huffman and Huggins, 1986 (en Jones y Olson, 1990), Jones y Olson, 1990, Del Monte *et al.* (en Pye, 1992)]. Consisten (lámina, fotos d y f) en esférulas negruzcas, perforadas, huecas, con brillo vítreo y diversos tamaños (Díaz y Miranda, 1997). Para Jones y Olson (1990) estas partículas son uno de los componentes del *smoke* producido por la combustión de carbón a altas temperaturas: las impurezas que contiene el carbón le dan ese aspecto, y la presencia de minerales de hierro las hace magnéticamente susceptibles. Sin embargo las EC encontradas aquí no eran sensibles a los campos magnéticos, y su origen no se puede atribuir

al consumo de carbón: esta fuente energética es prácticamente inexistente en la actualidad. De momento su procedencia concreta es incierta. Estas EC aparecen propiamente en la submuestra «c» de la fracción mecánica, sobre todo en la recogida en el período 21 al 23 de agosto. Excepcionalmente se observan EC en la fracción decantada, y la fracción evaporada carece de ellas. No están presentes en los momentos iniciales del incendio, cuando hay más productos de combustión: esto indica que su origen no está ligado a la combustión de la biomasa del incendio.

- **Restos Vegetales (RV).** Es frecuente que se presenten estos restos como filamentos o fibras vegetales alargadas; los RV de carácter leñoso son raros. Sólo se encontraron en la submuestra «c» de la fracción mecánica, siempre en pequeñas cantidades: estas cantidades disminuyen progresivamente a par-

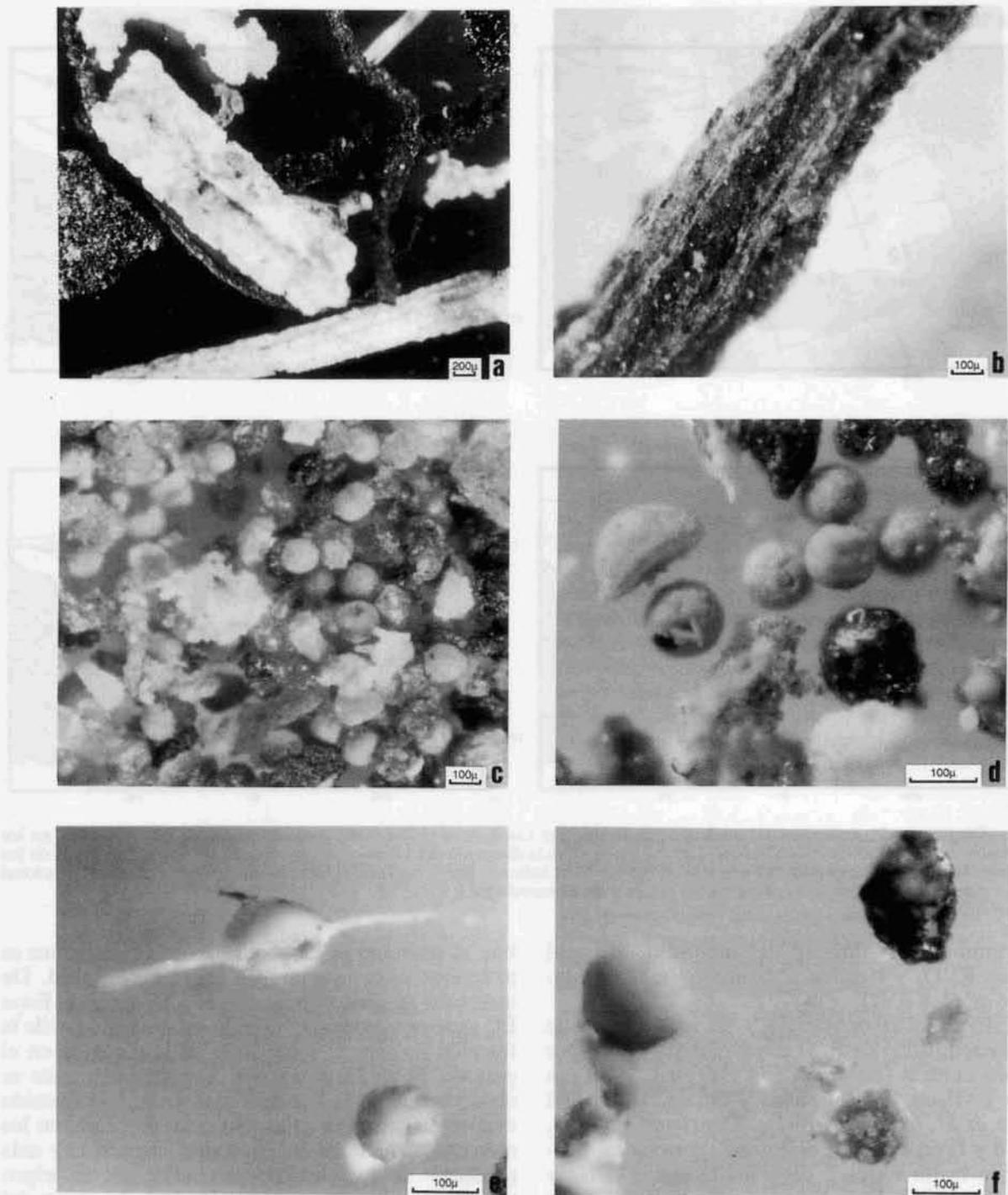


Lámina 1.—Microfotografías de diversos detalles del polvo atmosférico asociado al incendio de Sierra Almijara (Granada). Corresponden a la fracción mecánica; fueron obtenidas con lupa binocular y luz oblicua a diversos aumentos (se debe observar que el enfoque de objetos tridimensionales, a los aumentos utilizados, siempre es deficiente). a y b) Aspecto que presenta la submuestra «a» (cenizas): las partículas todavía conservan la estructura vegetal; c) La submuestra «b» está formada por restos vegetales quemados y esférulas minerales rosáceas; d) Detalle de la submuestra «b»: las esférulas minerales rosáceas aparecen con un pequeño poro (cráter). Junto a ellas aparece, en esta submuestra con carácter ocasional, una esférula carbonosa rota; e) Esférula mineral rosácea ensartada por un filamento vegetal. Se aprecia que conserva un pequeño poro (cráter); f) La rotura de una esférula mineral rosácea permite comprobar que está constituida por fragmentos minerales muy pequeños ($< 10 \mu$).

Tabla 2.—Pesos (en mg) del polvo atmosférico obtenido, desglosados en diferentes fracciones para cada período de muestreo. Se resalta en **negrita** el momento del incendio.

Período de muestreo	Fracción mecánica			Fracción decantada	Fracción evaporada
	a	b	c		
17 al 19 (VIII)	31,9	7,2	31,1	21,6	6,4
19 al 21 (VIII)	—	—	18,2	24,5	9,3
21 al 23 (VIII)	—	—	8,3	15,3	6,3
26 al 1 (VIII)	—	—	22,2	63,3	13,6
1 al 8 (IX)	—	—	89,3	35,6	13,6

tir de la extinción del incendio, indicando que las turbulencias originadas por la ignición de biomasa debió arrastrar gran parte de estos RV.

• **Partículas Minerales (PM).** Este componente está presente siempre en cantidades importantes: es el componente principal del polvo atmosférico. Los tamaños, formas y naturaleza son muy variables. Se encuentra en las tres fracciones obtenidas: en la fracción mecánica generalmente superó el 85 % en volumen de la muestra, excepto en la muestra del 21 al 23 de agosto, cuando sube espectacularmente el porcentaje de EC. En la fracción decantada es el componente principal, y excepcionalmente puede contener otras partículas. En la fracción evaporada es el único componente, al ser un precipitado procedente de una disolución. Las fracciones decantada y evaporada son muy homogéneas, ya que su composición es fundamentalmente mineral. El tamaño de las partículas de la fracción decantada es muy pequeño, raras veces superior a 10 μ , y el de las partículas de la fracción evaporada es microcristalino, como consecuencia de una evaporación rápida a 100° C. Es probable que parte de las EMR de la submuestra «c» correspondiente al período 17-19 de agosto se hayan disgregado en sus PM constituyentes, y una proporción indeterminada de PM proceda por esta vía.

La tabla 2 muestra los pesos en mg del material recogido para cada una de las fracciones y sus períodos muestrales. Como se ha comentado, la fracción mecánica del período muestral del 17 al 19 de agosto se desglosó en tres submuestras: se comprueba que la submuestra «a» (cenizas) tiene un peso equivalente al peso de la submuestra «c» (muestra convencional). Los pesos de la fracción decantada son importantes y muy variables, y la fracción evaporada siempre es la de menor peso. La tasa de deposición de polvo atmosférico para cada período de muestreo (expresada en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$) evolucionó como indica la figura 5. Esta tasa se obtuvo a partir de la suma de los pesos de las tres fracciones obtenidas en el muestreo. El segmento de puntos entre los días 17-19 indica la tasa de ese período sin la submuestra «a», que prácticamente corresponde a la tasa sin aportes de cenizas (en

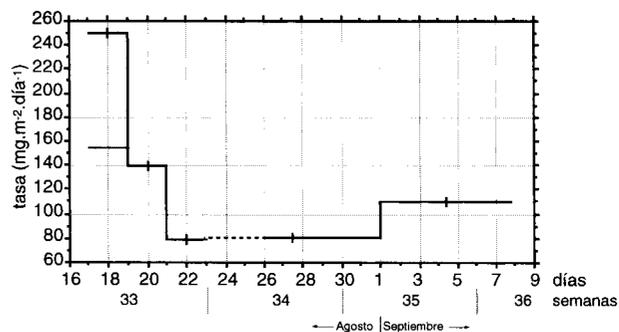


Fig. 5.—Distribución de tasas de deposición de polvo atmosférico en los días del incendio y posteriores (agosto-septiembre 1999). La línea de trazos significa ausencia de datos. La línea de puntos en el intervalo 17-19 de agosto indica la tasa de polvo atmosférico sin computar la fracción «a» (cenizas). Para más detalles, ver el texto.

rigor se debería restar también la parte correspondiente de RVQ de las submuestras «b» y «c», que representan en realidad pesos muy pequeños).

Discusión

Las tasas de deposición dependen estrechamente de los aspectos aerodinámicos y composicionales, que también se relacionan entre sí; por ello se comentarán en primer lugar.

Dinámica del aire

Desde el punto de muestreo se observó, en coherencia con los datos aerodinámicos de superficie y altura, que la masa de humo producida en el incendio ascendía hasta una determinada altura, para evolucionar a continuación lateralmente al NE, hacia Sierra Nevada (cuya línea de cumbres es del orden de 3.100 m.s.n.m.) y se estancaba en las inmediaciones de sus laderas. Los días 17 y 18 esa nube tomaba colores oscuros sobre la Depresión de Granada, con escaso desarrollo hacia poniente. El rela-

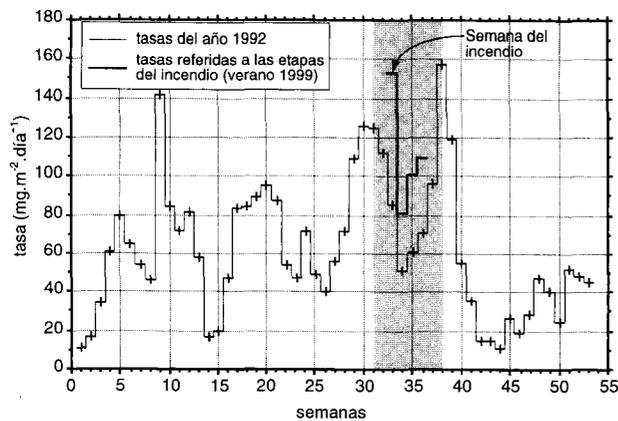


Fig. 6.—Distribución comparativa de las tasas de deposición de polvo atmosférico en el período del incendio y las obtenidas en el año 1992. Los valores se agrupan por semanas.

tivo gran número de horas con vientos de baja velocidad en superficie (fig. 3) facilita que las partículas en suspensión en niveles próximos al suelo (centenares de metros de altitud) se depositen en dichos períodos (entre las 21 horas de un día y las 12 horas del día siguiente).

Composición del polvo recogido

La combustión (generalmente parcial) de una biomasa cerrada, densa, formada sobre todo por matorral mediterráneo, aporta a la atmósfera sólidos, gases y vapores. Por tanto, los sólidos que se aportan están constituidos por cenizas, restos vegetales mal quemados, y restos vegetales livianos levantados por la violencia de la combustión.

Los trabajos de extinción del incendio que se llevaron a cabo, y en menor medida la propia combustión, pudieron producir eventualmente emisiones de partículas sólidas desde el suelo, tanto de naturaleza mineral como vegetal: aunque estos aportes están inmersos dentro de los datos obtenidos, y es difícil discriminarlos, el aporte de partículas minerales debe ser pequeño ya que la litología dominante es dolomítica, y por tanto sus partículas muy pesadas.

Otro componente son las esférulas: las EC, como se ha comentado, son ajenas a este proceso. Por el contrario, las EMR están ligadas a la evolución de la fase gaseosa originada en el incendio: los gases y vapores emitidos son, fundamentalmente, óxidos de C y de N y el vapor de agua (también el producido por la evaporación del agua arrojada desde los aviones que colaboran en la extinción). Los óxidos de C y de N, una vez desprendidos en la combustión, abandonan el ecosistema, y se incorporan a la atmós-

fera en la que se difunde. El agua se emite como vapor a la temperatura de combustión de la biomasa; sin embargo se condensa cuando pasa a niveles altos de la atmósfera, en los que la temperatura es más baja. Esta condensación genera pequeñas gotas que ocasionalmente pueden nuclearse en torno a pequeñas partículas como filamentos vegetales. Posiblemente estas gotas aglutinen partículas minerales de muy pequeño tamaño (limo y arcilla) por fenómenos electrostáticos: de este modo ganan peso, y descienden de altitud. Al acercarse a la superficie se incrementa la temperatura, y el agua se evapora de nuevo a través del pequeño poro que queda impreso en la esférula mineral residual, y acaban cayendo al suelo. Así se explicaría tanto la forma y composición de las esférulas minerales rosáceas, como su abundancia, relegada a los momentos más próximos del incendio. En definitiva, el vapor de agua desprendido en el incendio acelera la deposición de partículas minerales, aglutinándolas en esférulas.

Tasas

La Tasa obtenida a raíz de este incendio se comparó con los valores semanales obtenidos a lo largo de un año en la zona (Díaz y Miranda, 1997), una vez convertidos los valores del presente estudio a los correspondientes intervalos semanales. El año de comparación (1992) presentó un desarrollo normal, sin especiales influencias antrópicas; sin embargo no tiene por qué representar un año y medio, y por tanto no tiene carácter de patrón, aunque sirve para delimitar los órdenes de magnitud del presente evento. Se comprueba en la figura 6 que los valores que pertenecen al período del incendio experimentan un incremento del orden del 50 % de la tasa normal en esa época del año. La tasa remanente después del incendio es superior a la del año de comparación, pero no hay suficientes criterios para saber si es producto de la alteración introducida por el incendio, o si responde a valores propios de ese año, o bien si se debe a ambas causas.

Las cenizas se extendieron en una superficie de 1.500 km² (fig. 1). Sobre esta superficie posiblemente existió un gradiente deposicional, motivado por el peso de las partículas: las más pesadas son las que caerían antes, en las proximidades del foco de emisión. Esto da lugar, entre otras razones, a que la estimación que se realiza tenga matices de valores mínimos probables. No obstante, si aceptamos como tasa media de cenizas depositadas en el entorno del incendio la determinada en la estación de muestreo (0,168 gr.m⁻²), la cantidad total de cenizas arrojadas y depositadas es de 252 Tm, que es un valor relativamente importante ya que su densidad aparente es muy pequeña.

Las esférulas minerales rosáceas, por el contrario, necesitan mecanismos de condensación, nucleación, evaporación y caída, y por ello requieren trayectos más largos, dotados de unas condiciones especiales para completar su formación, y probablemente no se pueda establecer un gradiente deposicional en el área definida similar al de las cenizas. Por tanto no se puede asegurar que, por esta causa, los valores determinados sean mínimos. La tasa de EMR depositadas debe ser sensiblemente próxima a 0,038 gr.m⁻² (57 Tm), o incluso algo superior, por las siguientes razones: el peso de la submuestra «b» contiene un 70 % de EMR, pero cuya densidad aparente debe ser superior a la de los RVQ que la acompañan; por otro lado, al peso de esta submuestra se debe añadir el correspondiente peso de EMR de la submuestra «c», en la que se computó una presencia del orden de un 5 %, cantidad no despreciable porque su peso total es importante; finalmente, parte de las PM de la submuestra «c» proceden de la disgregación de las EMR.

Conclusiones

Los incendios forestales originan por vía aérea aportes mensurables, no necesariamente negativos, en el entorno del mismo, a distancias que dependen de la magnitud y condiciones del incendio, pero que fácilmente alcanzan decenas de kilómetros.

Las variaciones que introduce en el entorno el incendio de un ecosistema mediterráneo de magnitud media, pero de intensidad severa, como el referido, son de tipo cualitativo y cuantitativo, tanto por los elementos constituyentes como por la tasa de deposición de polvo atmosférico. En el estadio de plena ignición se incorporan a la atmósfera cenizas y restos vegetales quemados, y se generan EMR que se depositan a las pocas horas en el suelo más o menos distante según la dirección e intensidad del viento. Los fenómenos asociados a la creación y posterior deposición de estas esférulas, aglutinan partículas minerales de tamaños inferiores a 10 µ, y aceleran su deposición.

Las cenizas depositadas en el entorno presentan, en este caso, una tasa de 0,168 gr.m⁻², equivalente a

252 Tm de cenizas emitidas durante el incendio; la tasa de EMR depositadas debe ser sensiblemente próxima a 0,038 gr.m⁻² (57 Tm).

Si se comparan las tasas semanales obtenidas con los valores de la misma semana del año 1992 (único año en el que existe este seguimiento), se comprueba que el incendio provoca en el área circundante un incremento del 50 % respecto a la tasa de esa época, de un año considerado normal.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a la Delegación Provincial de la Consejería de Medio Ambiente en Granada, y a la empresa TRAGSA, por su desinteresado apoyo. También a don Guillermo Ballester, del Instituto Nacional de Meteorología, por los datos y comentarios facilitados, y al Dr. José Luis Guardiola de la Estación Experimental del Zaidín, por el auxilio instrumental ofrecido.

Referencias

- DeBano, L. F., Eberlein, G. E. y Dunn, P. H. (1979). Effects of burning on chaparral soils: I. Soil nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43: 504-509.
- Díaz Hernández, J. L. y Miranda Hernández, J. M. (1997): Tasas de deposición de polvo atmosférico en un área semiárida del entorno mediterráneo occidental. *Estudios Geol.*, 53: 211-220.
- ICONA (1986). Proyecto LUCDEME, Mapa de suelos a escala 1:100.000, n.º 1041.
- Instituto Nacional de Meteorología (1999). Datos meteorológicos de la base de Armilla.
- Jones, R. L. y Olson, K. R. (1990). Fly ash use as a time marker in sedimentation studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54: 855-859.
- Marion, G. M. y Black, C. H. (1988). Potentially available nitrogen and phosphorous along a chaparral fire cycle chronosequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1155-1162.
- Marion, G. M., Moreno, J. M. y Oechel, W. C. (1991). Fire severity, ash deposition, and clipping effects on soil nutrients in chaparral. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 235-240.
- Pye, K. (1992). Aeolian dust transport and deposition over Crete and adjacent parts of the Mediterranean sea. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 17: 271-288.

Recibido el 15 de marzo de 2000.

Aceptado el 24 de agosto de 2000