

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES SÓLIDAS PRODUCIDAS POR VÍA AÉREA EN EL INCENDIO FORESTAL DE UN ECOSISTEMA MEDITERRÁNEO

JOSÉ LUIS DÍAZ-HERNÁNDEZ¹

RESUMEN

A partir de los datos obtenidos en el incendio forestal ocurrido en agosto de 1999 en la Sierra de la Almirajara (Granada), se determinaron las emisiones sólidas producidas por vía aérea fuera del sistema en condiciones de observación favorables. El volumen de cenizas proyectadas al suelo del entorno se estima en 252 Tm (0.168 gr/m²), cantidad equivalente al 35% de la biomasa seca producida en el ecosistema. Las esférulas minerales rosáceas, microscópicas, posiblemente relacionadas con el vapor de agua desprendido en el incendio, aglutinan las partículas minerales suspendidas en el aire y aceleran su depósito.

El incendio originó un incremento del 50% de la tasa de polvo atmosférico depositado en condiciones normales, para el mismo período de observación.

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

SUMMARY

Fly ash projected from the Sierra de la Almirajara 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 possibly 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. Furthermore, the aforementioned quantity is equivalent to 35% of the dry biomass produced in this ecosystem.

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

INTRODUCCIÓN

Los frecuentes incendios forestales del entorno mediterráneo proporcionan, especialmente en la época estival, un flujo de materia que degrada el

paisaje y ocasiona importantes pérdidas de recursos. La combustión de la biomasa de éstos ecosistemas genera productos sólidos y gaseosos que, tras evacuarse a la atmósfera, dan lugar a una masa que se traslada desde el punto de incinera-

¹ Junta de Andalucía. Centro de Investigaciones Agrarias. Apartado 2027. 18080 Granada.

Recibido: 14/03/00.

Aceptado: 10/10/00.

ción a otro emplazamiento: las partículas sólidas liberadas (fly ash, JONES & OLSON 1990) se depositan en el suelo más o menos próximo, y los productos gaseosos se difunden en la atmósfera.

Hasta el presente se han realizado pocas evaluaciones de los flujos emitidos y de su representatividad, debido en parte a la dificultad que implica el seguimiento de un evento de estas características al ser impredecible el momento, lugar y evolución del mismo, unido a la ausencia general de datos necesarios para contrastar los resultados obtenidos. Los esfuerzos realizados hasta el presente se han concentrado más bien en estudios como los de DEBANO *et al.* 1979, MARION & BLACK 1988, MARION *et al.* 1991, CARREIRA 1992, que determinan el efecto del fuego en la dinámica de los nutrientes liberados en el ecosistema mediterráneo, y otros trabajos, en fin, se detienen en aspectos de índole erosiva, variaciones en los componentes de los suelos, manejo de estos suelos, etc. CARREIRA 1992, 1998 realizó trabajos de dinámica vegetal perturbada por incendios en el marco de la Sierra de la Almijara.

El objetivo propuesto en este trabajo fue establecer la influencia cuantitativa y cualitativa que ejerce un incendio forestal en la tasa de deposición de polvo atmosférico en el entorno. Para ello se obtuvieron datos a raíz 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, dada las condiciones relativamente favorables para efectuar el seguimiento. La superficie quemada fue en este caso de 2400 ha, cubierta principalmente de matorral mediterráneo, que afectó en menor medida una pequeña zona ocupada con pinos de repoblación.

MATERIAL Y METODOS

Características del lugar

La Sierra de la Almijara ha sido objeto de reiterados incendios en épocas precedentes. En esta ocasión el incendio se produjo en un punto situado a 700 m.s.n.m., y progresó por la ladera S hasta alcanzar la divisoria atlántica, a 1500 m.s.n.m. (foto 1). El área es de litología dolomítica y relieve

ve abrupto, cuyos suelos predominantes son (ICONA 1986): Litosoles, Regosoles litosólicos, Regosoles calcáricos y, ocasionalmente, Phaeozems y afloramientos de rocas (éstos 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 anterior no se alcanzaron los 200 mm. La mayor parte de la vegetación estaba formada por matorral mediterráneo esclerófilo y subesclerófilo de elevado porte y con densidad de cubrición del 50 al 60%. Según datos facilitados por la Delegación Provincial de Medio Ambiente (1999), 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 se trasladaron por el aire hasta el punto de coordenadas geográficas 37° 10' N-3° 31' W, a 640 m.s.n.m.: este lugar de muestreo está situado dentro de la Depresión de Granada, distante del incendio unos 40 km en línea recta (foto 2). La disposición de los relieves que rodean la depresión condiciona en parte que el régimen de vientos sea marcadamente de componente Sur, debido al régimen de brisas. Este régimen, junto con la situación meridional de la Sierra de la Almijara, hacen que el punto de muestreo fuera idóneo para efectuar las observaciones (figura 1).



Foto 1. Aspecto del incendio y dirección de las masas de humo durante las tareas de extinción. [View of fire and direction of smoke clouds during fire-fighting.] (Foto facilitada por Alfredo Aguilar).

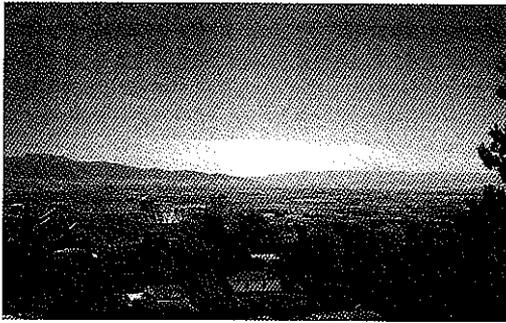


Foto 2. Panorámica de la evolución del penacho de cenizas originado en el incendio, tomado el día 17 de agosto de 1999, a las 5 de la tarde, desde el Mirador de San Cristóbal (Granada). [Panoramic view of the evolution of the ash column caused by the fire, taken on August 17th 1999 at 15:00 from the Mirador de San Cristóbal (Granada)].

Sin embargo, las circunstancias que rodean un evento de estas características no permite habitualmente planificar un muestreo más riguroso.

Los datos meteorológicos medios seculares registrados en el Observatorio de la Cartuja son: 459.7 mm de precipitación media anual, y 15.3 °C de temperatura media anual. En la zona son frecuentes las sequías periódicas, como la que viene soportando desde los dos años precedentes. 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.

Para determinar la dinámica del aire en las capas más inferiores de la atmósfera se utilizaron los datos aerodinámicos de la estación de Armilla, perteneciente a la red del Instituto Nacional de Meteorología. Las condiciones de circulación de las capas altas, en especial a 3200 m.s.n.m., se establecieron con el modelo HIRLAM.

Método de Muestreo

La recogida del polvo atmosférico se realizó en el punto indicado conforme al método de DÍAZ & MIRANDA (1997), consistente en recolectar sema-

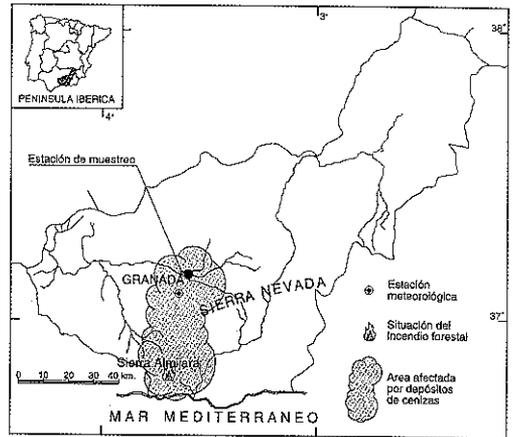


Fig. 1. Situación del incendio, del área afectada por el depósito de cenizas, del punto de muestreo y de la estación meteorológica. [Location of forest fire, area affected by ash deposits, sampling point and meteorological station].

nalmente 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; 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 suceso, 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 está motivada por la corta duración del incendio.

2. Separación de fracciones. Para mejorar la separación de componentes se introdujo otra innovación: en vez de recoger una sola fracción mecánica se desglosó ésta, a la vista de sus componentes, en otras tres submuestras: a) la integrada casi exclusivamente por restos vegetales quemados muy lábiles (cenizas); b) la que presentaba composición algo más compleja, pero definida en base a la presencia de esférulas minerales rosáceas, 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 fue en él donde se recogieron las cenizas. Se prestó atención especial a la inusual presencia de esférulas minerales rosáceas. 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* grandes errores. 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 estuvo causada 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 (figura 2). La superficie afectada por los depósitos de cenizas se obtuvo por encuestas realizadas en los Ayuntamientos afectados.

Para establecer el influjo que el incendio ejerce en los aportes de polvo atmosférico del entorno, es necesario conocer los patrones de distribución y composición a lo largo de un año. Se dispone, para ello, de los datos obtenidos en el año 1992 para la Depresión de Granada (DÍAZ & MIRANDA 1997), en el mismo lugar y en las mismas condiciones en las que también se realizó el muestreo durante el incendio. Ambos años presentan, además, rasgos de sequía similares.

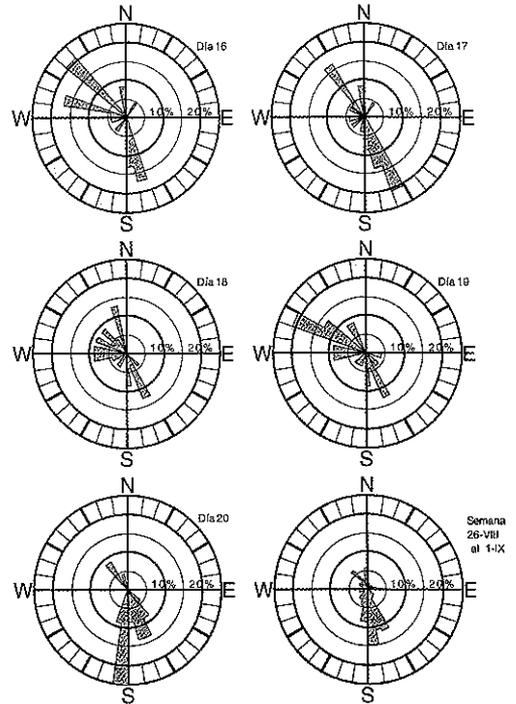


Fig. 2. Diagrama de rosas de vientos de los días del incendio y de los días posteriores. Se indica el porcentaje de horas en que el viento tiene una determinada dirección, computando sólo los vientos superiores a 10 km/h (datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología). [Wind rose diagram for duration of fire and subsequent days, with indication of time percentage of wind from any one direction, only including winds above 10 km/h (based on data from the Instituto Nacional de Meteorología)].

La estimación de la biomasa cuyo incendio originó el volumen de cenizas emitido, se hizo tras determinar la tasa de deposición de cenizas, y después de definir mediante consultas a las poblaciones, el área afectada por estos depósitos. Con esta finalidad también fue necesario determinar el material residual que queda después de las transformaciones originadas por su incineración. Para ello se recogieron muestras de las partes aéreas del matorral predominante, que son las más susceptibles de ser calcinadas y dar partículas que pueden ser emitidas al aire, y de una especie arbórea. Estas muestras se recogieron en la época estival, en un estado de humedad similar al caso que se analiza, para realizar la deshidrata-

ción en estufa a 70 °C, y después calcinarlo en horno a 500 °C.

RESULTADOS

Condiciones meteorológicas

Con los datos aerodinámicos a nivel del suelo se confeccionaron los diagramas de la figura 2, que expresan el % de horas en las que el viento proviene de una determinada dirección. De los diagramas realizados por días se concluye, como es habitual para la época de verano a partir de media mañana, que los vientos de componente S siempre están presentes, acompañados también de vientos de componente NW. Sólo en los días 18 y 19 tienen más representación las componentes NW. El resto de los días siguen pautas similares a las del día 20, como se comprueba en el promedio de la semana del 26 de agosto al 1 de septiembre.

Las horas con rachas de viento inferiores a 10 km/h (2.8 m/seg) suelen distribuirse entre las 21 horas de un día y las 9 horas del día siguiente (figura 3). Para el período estudiado estas rachas ocupan una media del 60% de las horas del día.

Las condiciones meteorológicas a distintos niveles de altitud se estimó con el modelo de predicción HIRLAM (HIGH Resolution Local Area Model), ya que la zona del incendio está alejada de los Observatorios de Gibraltar y Murcia, en donde se realizan sondeos aerológicos. Entre los niveles disponibles se eligió el de 700 Hp (que corresponde a unos 3200 m.s.n.m.) por ser el que

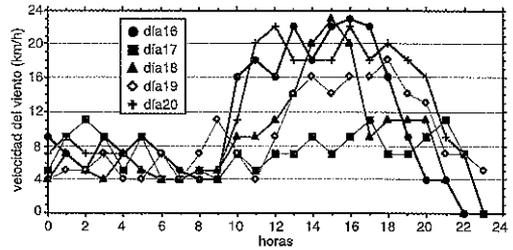


Fig. 3. Distribución horaria de las rachas de viento durante los días del incendio y días posteriores (según datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología). [Time distribution of gusts during fire days and subsequent days (based on data from the Instituto Nacional de Meteorología)].

más se aproxima a la parte superior del penacho de humo que se aleja del foco del incendio impulsado por el viento. Se comprueba (figura 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 presentan las estimaciones porcentuales de cada uno los componentes recogidos en cada fracción, 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

TABLA 1
COMPONENTES DEL POLVO ATMOSFÉRICO RECOGIDO DURANTE EL PERÍODO DE MUESTREO INDICADO, Y ESTIMACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE ABUNDANCIA RELATIVA. SE RESALTA EL MOMENTO DEL INCENDIO. PARA MÁS DETALLES VER EL TEXTO.
[COMPONENTS OF ATMOSPHERIC DUST COLLECTED DURING THE INDICATED SAMPLING PERIOD AND ESTIMATE OF RELATIVE ABUNDANCE PERCENTAGES. MOMENT OF FIRE IS UNDERLINED]

Período de muestreo (año 1999)	Fracción mecánica								Fracción decantada		Fracción evaporada
	a	b		c				PM	EC	PM	
	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

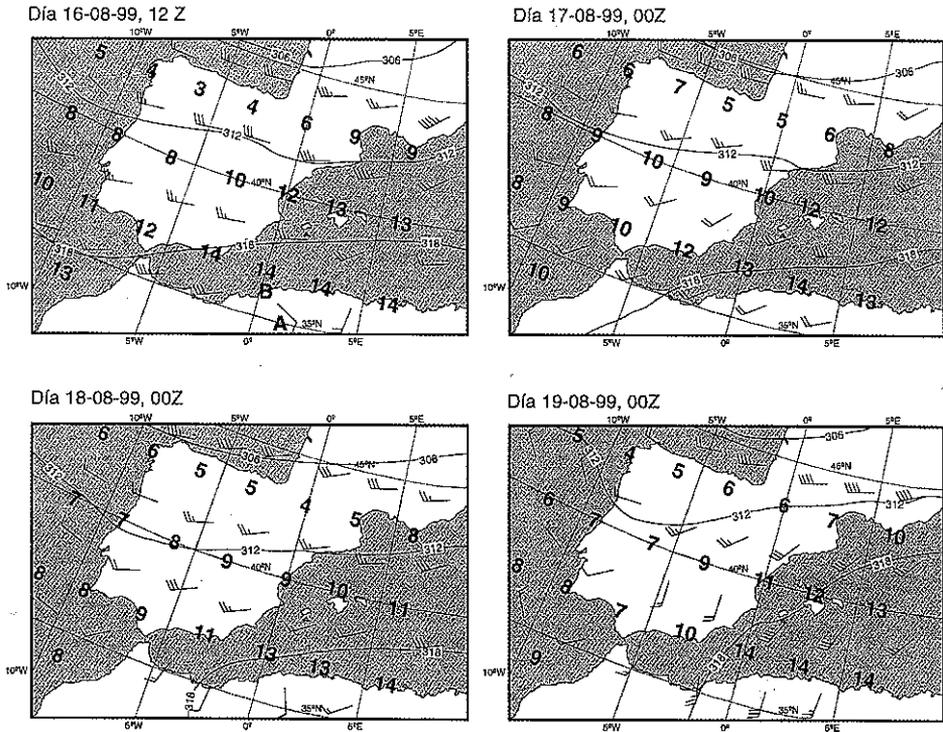
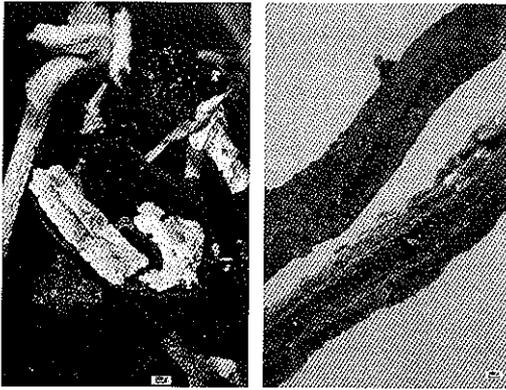


Fig. 4. Diagramas de predicción del modelo High Resolution Local Area (HIRLAM), para 700 Hp y malla de 0,5, en los días y horas indicados. Las cifras de los cuadrantes señalan la temperatura del aire a la altura indicada por la isolínea en Hm. Las flechas marcan la dirección del viento y su fuerza cada 10 nudos (según datos facilitados por el Instituto Nacional de Meteorología). [High Resolution Local Area Model (HIRLAM) prediction diagrams for 700 Hp and 0.5 mesh on the days and hours indicated. Numbers in quadrants show air temperature at height indicated by the isoline in Hm. Wind direction and strength is marked by arrows for every 10 knot (based on data from the Instituto Nacional de Meteorología)].

estructura vegetal (fotos 3 y 4). El tamaño de éstas 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, siendo característicos de la submuestra «a». Se observa que la máxima abundancia en la submuestra «c»

corresponde con los momentos más intensos del incendio, y esta presencia disminuye a medida que transcurre el tiempo desde la extinción del incendio.

- Esférulas Minerales Rosáceas (EMR). Son esférulas de tamaño homogéneo (en torno a 100 μ), que generalmente presentan una incisión puntual a modo de poro. En ocasiones están asociadas a restos vegetales filamentosos. Estas esférulas se desmenuzan fácilmente bajo presión en fragmentos minerales inferiores a 10 μ . No se han observado habitualmente en un depósito convencional de polvo atmosférico: por ello se ha individualizado la submuestra «b» de la fracción mecánica, en donde es el componente mayoritario (fotos 5 y 6). En la



Fotos 3 y 4. Aspecto que presenta la submuestra «a» (cenizas): las partículas todavía conservan la estructura vegetal. [View of subsample «a» (ash): the particles still retain their vegetable structure].

submuestra «c» se observa que las EMR, al igual que los RVQ, acentúan su presencia en las muestras correspondientes al momento más intenso del incendio, pero tienden más rápidamente a disminuir que aquellas (tabla 1). No se ha encontrado descripción de algo similar en la bibliografía consultada.

- Esférulas Carbonosas (EC). Es un componente muy característico de áreas contaminadas, citado por algunos autores (HUFFMAN & HUGGINS 1986 (in JONES & OLSON 1990), JONES & OLSON 1990, DEL MONTE *et al.* (in PYE 1992)). Consisten en esférulas negruzcas, perforadas,

huecas, con brillo vítreo y diversos tamaños (DÍAZ & MIRANDA 1997). Para JONES & 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 a un consumo de carbón que es prácticamente inexistente en la actualidad: de momento su procedencia concreta es incierta, aunque parece ligada al consumo de combustibles fósiles. Estas EC aparecen propiamente en la submuestra «c» de la fracción mecánica, sobretudo en la recogida en el período 21 al 23 de Agosto de 1999. Excepcionalmente se observan EC en la fracción decantada, y la fracción evaporada carece de ellas. Su ausencia en los momentos iniciales del incendio, cuando hay más productos de combustión, indica que no están originadas por 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 (tabla 1), siempre en pequeñas cantidades: estas cantidades disminuyen progresivamente a partir de la extinción del incendio, indicando que las tur-

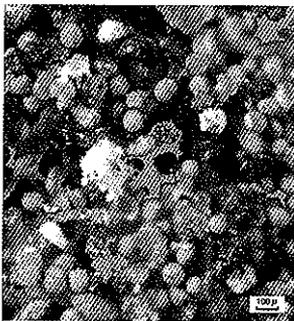


Foto 5. Principales componentes de la submuestra «b»: esférulas minerales rosáceas y restos vegetales quemados. [The main ingredients of subsample «b»: the pinkish mineral spherules and burnt vegetable remains].



Foto 6. La rotura de una esférula mineral rosácea permite comprobar que está constituida por fragmentos minerales muy pequeños (< 10 µ). [A broken pinkish mineral spherule shows that it is made up of very small mineral fragments (< 10 µ)].

bulencias 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 suben espectacularmente las EC. En la fracción decantada es el componente principal, que excepcionalmente puede dar paso a otros. En la fracción evaporada es el componente único, 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, muchas veces inferior a 10 µ, y el de las partículas de la fracción evaporada es microcristalino, como consecuencia de una evaporación rápida a 100 °C.

La tasa de deposición de polvo atmosférico para cada período de muestreo (en mg.m⁻².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 de agosto indica la tasa de ese período sin la submuestra «a», que corresponde prácticamente a la tasa sin aportes de cenizas (en rigor se debería restar también la parte correspondiente de RVQ de las submuestras «b» y «c», que representan en realidad pesos muy pequeños).

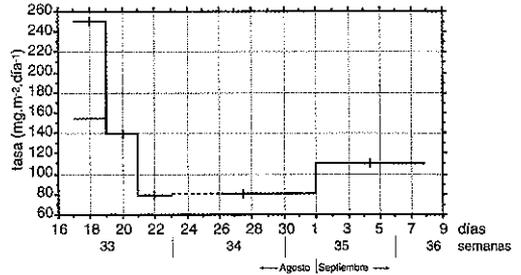


Fig. 5. Distribución de tasas de deposición de polvo atmosférico en los días del incendio y posteriores (agosto-septiembre 1999). La línea de trazos significa ausencia de datos. La línea de puntos indica la tasa de polvo atmosférico sin computar la fracción de cenizas. Para más detalles, ver el texto. [Distribution rates of atmospheric dust deposit during the fire and subsequent days (Agost-September 1999). Dotted line indicates atmospheric dust rate excluding ash fraction. See text for more details].

La tabla 2 expresa los resultados de calcinar en horno muestras procedentes de la biomasa vegetal del lugar, tras previa deshidratación. Los valores extremos de pérdida de peso por deshidratación están entre el 25% (*Ulex*), y el 50% (*Pinus*); sus respectivas pérdidas en tallos y en hojas son muy parecidas. La calcinación proporciona en la especie *Ulex* los menores residuos, y presenta valores similares tanto en hojas como en tallos. El valor máximo es más errático, según se consideren hojas o tallos. El valor TOTAL evalúa a la vez la deshidratación y la calcinación: se observa que la especie *Ulex* presenta el menor residuo, tanto para hojas como para tallos; el romero muestra el máximo residuo para hojas, y la especie *Pinus* se diferencia notablemente por dejar residuos muy altos en tallos y hojas. El comportamiento de la

TABLA 2

PORCENTAJES DE RESIDUOS TRAS DESHIDRATAR Y CALCINAR HOJAS Y TALLOS DE DIFERENTES ESPECIES DE MATORRAL Y DE PINO DE LA ZONA INCENDIADA. AL FINAL SE EXPRESA LA PÉRDIDA TOTAL QUE PRODUCE EL PROCESO DESHIDRATACIÓN+CALCINACIÓN. [RESIDUAL PERCENTAGES AFTER DEHYDRATION AND CALCINATION OF LEAFS AND STEMS OF SEVERAL SHRUB AND PINE SPECIES OF THE BURNT AREA. TOTAL LOSS DUE TO DEHYDRATION AND CALCINATION IS INDICATED AT THE END]

	Deshidratación		Calcinación		TOTAL	
	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Tallos
<i>Rosmarinus officinalis L.</i>	53,4	63,5	9,1	3,4	17,0	5,4
<i>Thymus sp.</i>	61,9	68,1	6,4	3,1	10,3	4,6
<i>Ulex sp.</i>	74,1	77,1	2,8	2,2	3,8	2,9
<i>PINUS HALAPENSIS</i>	49,8	49,2	7,4	6,1	14,9	12,4

especie *Ulex* es el más homogéneo y diferenciable, debido en parte a la escasa distinción entre los elementos morfológicos analizados.

DISCUSIÓN

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 3100 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 relativo gran número de horas con vientos de baja velocidad en superficie (figura 3) facilita que las partículas en suspensión en niveles próximos al suelo (centenares de metros de altitud) se depositen en los períodos horarios ya referidos.

Composición

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

El proceso de extinción del incendio, y en menor medida la propia combustión, pueden producir eventualmente emisiones de partículas sólidas desde el suelo, de naturaleza mineral y también vegetal; pero estos aportes están inmersos en el conjunto de datos obtenidos, sin que se pueda discriminar su valor.

Otro componente son las esférulas: las esférulas carbonosas, como se ha comentado, son ajenas al incendio. Sin embargo las esférulas minerales rosáceas parecen estar ligadas a la evolución de la fase gaseosa originada en el incendio: los gases y vapores emitidos son, fundamentalmente, el CO₂, óxidos de nitrógeno y el vapor de agua (también el producido por la evaporación del

agua arrojada desde los aviones que colaboran en la extinción). El dióxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, una vez desprendidos en la combustión, abandonan el ecosistema, y se incorporan a la atmósfera en la que se difunden. El agua se emite como vapor a la temperatura de combustión; sin embargo al pasar a la atmósfera, cambia de fase en niveles más altos: se condensa al descender la temperatura. 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) al cargarse eléctricamente; al ganar peso, descienden de altitud, y al acercarse al suelo e incrementarse la temperatura, se evapora de nuevo el agua a través del pequeño cráter (poro) que queda impreso en la esférula mineral residual, y acaban cayendo a la superficie del suelo. Esta hipótesis explica 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. Sin embargo no se pueden descartar otros mecanismos ajenos al incendio.

Tasas de deposición

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 & 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; pero no tiene por qué representar un año medio, y por tanto no tiene carácter de patrón, aunque sirve para delimitar los órdenes de magnitud de las tasas referidas a este caso. Así se comprobó que los valores que pertenecen al período del incendio experimentaron un incremento del orden del 50% de la tasa normal en esa época del año. La tasa remanente después del incendio fue 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 responde a valores propios de ese año, o bien a ambas causas.

Las cenizas se extendieron en una superficie de 1500 km² (figura 1). Sobre esta superficie posiblemente existió un gradiente deposicional, motivado fundamentalmente por el peso de las partículas: las más pesadas son las que cayeron antes, en las proximidades del foco de emisión. Esto motiva, entre otras razones, 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/m²), la cantidad total de cenizas arrojadas al aire y depositadas en el entorno fué de 252 Tm.

Las esférulas minerales rosáceas, por el contrario, ya que requieren mecanismos de condensación, nucleación, evaporación y caída, necesitan trayectos más largos, dotados de unas condiciones especiales para completar su formación, y probablemente no se pueda establecer en el área definida un gradiente deposicional similar al de las cenizas, y por tanto no se puede asegurar que, por esta causa, los valores determinados sean mínimos. La tasa de esférulas depositadas debe ser sensiblemente próxima a 0.038 gr/m², ya que si bien en la submuestra «b» hay un 30% de RVQ, se debe añadir el correspondiente peso de esférulas de la submuestra «c» en la que se computó del orden de un 5%; se debe tener presente también que la densidad aparente de las esférulas debe ser relativamente superior que la de los RVQ, y que parte de las PM de la submuestra «c» proceden de la disgregación de las EMR.

El área de procedencia de las cenizas son las 2400 ha quemadas, de las que se deben descontar un 10% perteneciente a roca desnuda (en la que dominan fuertes escarpes cuya superficie se minimiza al proyectarse en un plano horizontal). Es decir, el área cubierta de vegetación era originalmente de 2160 ha. En consecuencia se han emitido 117 kg/ha de cenizas. Este material calcinado representa un 2.5% de la biomasa inicial seca (valor promedio del residuo de calcinación de tallos y hojas de matorral tipo *Ulex*); por tanto la biomasa equivalente a las cenizas exportadas es del orden de 4680 kg/ha.

Existen algunas evaluaciones de la biomasa producida por el matorral de este ecosistema. Así, en las inmediaciones del lugar del incendio se realizaron evaluaciones en parcelas de 10x10 m², con cubrición y portes algo inferiores a la del área quemada, arrojando valores medios del orden de 8500 kg/ha (TRAGSA, comunicación personal). Para un aulagar silicícola de *Ulex parviflorus*, con una densidad de 53.571 individuos/ha y una cubrición del 58%, FERNÁNDEZ (1995) obtuvo una fitomasa total de 13.117 kg/ha (la fitomasa forrajera fue de 168 kg/ha, que se considera despreciable a efectos que ahora interesan); esta fitomasa incorpora también las partes más leñosas de la planta. Por tanto, una cifra aproximada de la masa fotosintética del aulagar, con la cubrición del lugar, es de 13.000 kg/ha. Es decir, se ha exportado por vía aérea al entorno del incendio del orden de un 35% de la biomasa producida en el ecosistema.

CONCLUSIONES

Los incendios forestales, además de ocasionar un gran impacto en el área quemada, originan modificaciones mensurables, no necesariamente negativas, en el entorno del mismo, a distancias que dependen de la magnitud y condiciones del incendio, pero que fácilmente alcanzan varias decenas de kilómetros de distancia.

Estos eventos se caracterizan, sobre todo, por su aleatoriedad espacio-temporal, y su estrecha dependencia del régimen de vientos: por ello la principal dificultad al efectuar un seguimiento como el realizado, es reunir todas las condiciones necesarias para efectuar un muestreo riguroso. No obstante, se estima que el incendio de un ecosistema mediterráneo de magnitud media, pero de intensidad severa, como el referido, introduce importantes variaciones cualitativas y cuantitativas de la tasa de deposición de polvo atmosférico en el entorno. En el estadio de plena ignición se emiten a la atmósfera cenizas y restos vegetales quemados; asociado al vapor producido durante el mismo, se generan esférulas minerales rosáceas, que caen a las pocas horas en el suelo más o menos distante según la dirección e intensidad del viento. Los fenómenos anejos a la creación y

posterior deposición de estas esférulas, aceleran la deposición de las partículas minerales atmosféricas que aglutinan, cuyos tamaños son inferiores a 10 μ .

La tasa de cenizas depositadas en el entorno del presente incendio se estimó en 0.168 gr/m², equivalente a un peso total de 252 Tm de cenizas emitidas durante el incendio. La biomasa inicial seca que originó estas cenizas se valoró en 4680 kg/ha, es decir, se exportó por vía aérea al entorno del incendio del orden del 35% de la biomasa producida en este ecosistema. La tasa de esférulas depositadas debe ser del orden de 0.038 gr/m².

Si se tienen en cuenta las tasas semanales, y se comparan 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 D. Guillermo Ballester, del Instituto Nacional de Meteorología, por los datos y comentarios proporcionados, y a los Drs. Ana B. Robles y José L. Guardiola por las facilidades y consejos ofrecidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARREIRA, J.A. 1992. Biogeoquímica y disponibilidad de N y P en una cronosecuencia de suelos semiáridos dolomíticos asociada a distintos regímenes de incendios. Tesis doctoral. Universidad de Málaga.
- CARREIRA, J.A. & LIETOR, J. 1998. Intensidad del régimen de perturbación por incendios y balance entre producción y acumulación de hojarasca en matorrales mediterráneos semiáridos. *Ecología* 12: 187-197.
- DEBANO, L.F., EBERLEIN, G.E. & DUNN, P.H. 1979. Effects of burning on chaparral soils: I. Soil nitrogen. *Soil Science Society of American Journal* 43: 504-509.
- DÍAZ HERNÁNDEZ, J.L. & MIRANDA HERNÁNDEZ, J.M. 1997. Tasas de deposición de polvo atmosférico en un área semiárida del entorno mediterráneo occidental. *Estudios Geológicos* 53: 211-220.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, P. 1995. Aprovechamiento silvopastoral de un agrosistema mediterráneo de montaña en el SE ibérico. Evaluación del potencial forrajero y la capacidad sustentadora. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- ICONA 1986. Proyecto LUCDEME, Mapa de suelos a escala 1:100.000, n.º 1041.
- INM 1999. Datos meteorológicos de la base aérea de Armilla.
- JONES, R.L. & OLSON, K.R. 1990. Fly ash use as a time marker in sedimentation studies. *Soil Science Society of American Journal* 54: 855-859.
- MARION, G.M. & BLACK, C.H. 1988. Potentially available nitrogen and phosphorous along a chaparral fire cycle chronosequence. *Soil Science Society of American Journal* 52: 1155-1162.
- MARION, G.M., MORENO, J.M., & OECHEL, W.C. 1991. Fire severity, ash deposition, and clipping effects on soil nutrients in chaparral. *Soil Science Society of American Journal* 55: 235-240.
- PYE, K. 1992. Aeolian dust transport and deposition over Crete and adjacent parts of the Mediterranean sea. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 271-288.