

to. Lismore (a unos 200 km al sur de Brisbane) sufrió fuertes tormentas el 13 de diciembre.

En Auckland en la North Island de NUEVA ZELANDA, el 8 de octubre una combinación de mareas altas y vientos racheados de hasta 25 m seg^{-1} causó el corte de las carreteras del litoral. Los yates rompieron sus amarras, siendo arrastrados mar adentro y dañados por los fuertes vientos.

EL POLVO ATMOSFERICO OBSERVADO DESDE EL ESPACIO

Por A.A. GRIGORYEV
y K. Ja KONDRATYEV

PARTE I — ANALISIS DE LAS FOTOGRAFIAS

Las actividades económicas del hombre que se desarrollan a una escala cada vez mayor y su expansión a regiones hasta ahora consideradas como inaccesibles, hacen necesario disponer de una mayor cantidad y variedad de información relativa al estado del medio ambiente. Por otra parte, en los últimos tiempos, se hace cada vez más patente que las actividades humanas provocan cambios en el medio ambiente que, en algunos casos, son considerables y se extienden a escala mundial. Es necesario vigilar regularmente estos cambios y estimar sus posibles consecuencias.

Con respecto a estas consecuencias, muchas predicciones pueden considerarse exageradas, como por ejemplo el anuncio de cambios climáticos catastróficos o el aniquilamiento por radiación ultravioleta de toda la vida en la Tierra como resultado de la destrucción de la capa de ozono estratosférico por los aviones supersónicos. Estas profecías sensacionalistas tienen cierta utilidad dado que llaman la atención sobre ciertos problemas, pero no resultan suficientemente convincentes, ya que se basan en modelos excesivamente simplificados y que no reflejan las condiciones reales. En los últimos años, los resultados de investigaciones teóricas serias han descartado el riesgo de tales catástrofes en un futuro próximo. Sin embargo, resulta verdaderamente necesario vigilar regularmente las condiciones ecológicas a escala mundial.

La dificultad de predecir con precisión los factores que pueden provocar cambios en el medio ambiente se debe tanto a los problemas que supone la estimación de los diversos elementos como a la carencia de información sobre los diversos parámetros ambientales. Por ejemplo, un factor importante en los cambios climáticos actuales es el creciente contenido de polvo en la atmósfera debido a las actividades humanas. Sin embargo, se considera imposible establecer una estimación fiable de la influencia de este factor debido a la ausencia de datos sobre la distribución global del polvo atmosférico y sobre las propiedades del polvo en diversas partes del mundo (Kondratyev, 1977).

Las observaciones espaciales ofrecen nuevas posibilidades para estudiar el polvo atmosférico y, en particular, las regiones donde el transporte de polvo es especialmente importante. Las tempestades de polvo y arena son fenómenos frecuentes en las regiones áridas y semi-áridas del mundo, y han llamado la atención desde hace mucho tiempo (Nalivkin, 1969); Idso, 1976). Con frecuencia son muy peligrosas; se conoce

el caso de un ejército completo que fue sorprendido en el desierto por una tormenta de arena y quedó aniquilado. Se han descubierto ruinas de ciudades antiguas parcial o totalmente enterradas por la arena o el polvo, por ejemplo Harappa y Mohenjodaro —que fueron los centros de antiguas civilizaciones hace unos 4.500 años— han sido encontradas en el desierto de Pakistán occidental. No es de extrañar que algunos investigadores piensen que el constante incremento del contenido de polvo en la atmósfera juegue un papel importante en la destrucción de ciudades rodeadas por desiertos. El polvo levantado por el viento en las regiones donde el hombre ha suprimido la vegetación hace que aumenten la aridez y la desertificación.

Recientemente, y particularmente durante la última década, el transporte de polvo a gran escala ha despertado el interés de los meteorólogos, físicos de la atmósfera, climatólogos y de otros especialistas. Fenómenos similares a los que ocurrieron en un pasado remoto, aún ocurren en la actualidad. Por ejemplo, en la región del Sahel, en África, la desertificación se está produciendo sobre extensas zonas, y las tormentas de polvo son cada vez más extensas.

La consecuencia más importante del incremento del transporte de polvo es la contaminación atmosférica, lo que va acompañado de un cambio en las propiedades ópticas de la atmósfera, lo cual a su vez, influye en el clima (Kondratyev, (1976 a), (1976 b), (1977)). La amplitud de esta influencia depende a la vez de las propiedades de la atmósfera y de la superficie terrestre, así como de la altura del sol. Los cálculos son extremadamente contradictorios, en parte debido a la falta de datos sobre la influencia de las tempestades de polvo en la contaminación general del aire. Otro aspecto del fenómeno de la tempestad de polvo es la erosión del suelo. Esto se produjo a gran escala en América del Norte durante la década de los 30 —el catastrófico “dust bowl”, con importantes transformaciones provocadas por el levantamiento de grandes cantidades de partículas superficiales del suelo por el viento. D.V. Nalivkin (1969) destacó la considerable importancia de este fenómeno.

El presente artículo se ocupa solamente del primer aspecto del problema, es decir, del polvo contenido en la atmósfera. ¿Qué contribución aportarán las observaciones de los satélites al estudio del polvo? En realidad, estas observaciones han proporcionado una información nueva e inestimable sobre la distribución, las dimensiones, la estructura, la dinámica, los orígenes y la evolución de las nubes de polvo, así como sobre su dependencia de las propiedades de la superficie terrestre.

Las observaciones visuales realizadas por los astronautas han proporcionado información valiosa sobre el polvo contenido en la atmósfera. Un análisis colorimétrico de la corona crepuscular constituye un método complementario muy efectivo de obtener información sobre la disminución vertical de los aerosoles en la estratosfera. Los aerosoles atmosféricos tienden a adoptar una estructura estratificada, en capas que están normalmente por debajo de la tropopausa (10-15 km), en la capa de Junge (20 km) y aún a alturas superiores. Esto explica la existencia de la característica capa brillante descubierta por los astronautas y las inversiones de cromatismo de la corona crepuscular que se observaron (Kondratyev, 1972).

La investigación de las capas brillantes y de otras irregularidades ópticas de la atmósfera es importante para la navegación espacial, puesto que la precisión de la orientación de los ingenios espaciales con respecto a la Tierra depende en gran parte del conocimiento de las propiedades ópticas de la atmósfera. La disminución de la luminosidad de la atmósfera en la proximidad de la superficie terrestre y la estructura del hori-

zonte del planeta se determinan principalmente por las propiedades y la distribución espacial de los aerosoles atmosféricos.

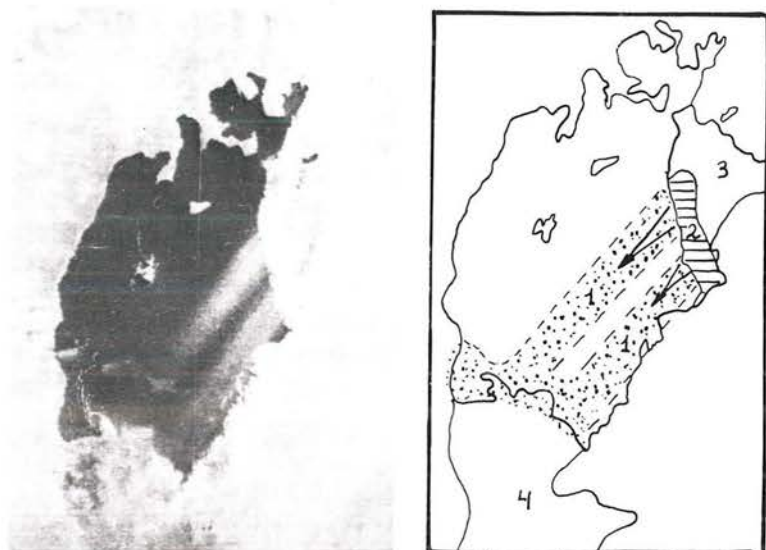


Figura 1 — Fotografía del Mar de Aral en el espectro próximo al IR (800-1.100 nm) tomada desde el satélite METEOR-18, a una altura de unos 900 km el 22 de mayo de 1975. La clave de los números en el diagrama explicativo es:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1 Flujo del polvo transportado | 3 Delta del Syr-Darya |
| 2 Banco de arena | 4 Delta del Amu-Darya |

Las observaciones espaciales han proporcionado datos excepcionales sobre la distribución de las tempestades de polvo (Griegoryev y Lipatov, 1974). En la URSS (particularmente en Kazakhstan y en Asia central), las observaciones espaciales han señalado las tres regiones más importantes en las que se desarrolla el transporte de polvo: (i) sobre las aguas del norte y la costa nor-oriental del Mar Caspio, (ii) sobre las aguas del sur y la costa sur-oriental del Mar Caspio y (iii) sobre las aguas y costa nor-oriental del Mar de Aral (Fig. 1). Las fuentes originarias del polvo son los desiertos del Asia central y las estepas de Kazakhstan. Grandes nubes de polvo pueden identificarse fácilmente en fotografías obtenidas desde el espacio. Más al sur, estas fotografías han permitido determinar que las corrientes aéreas del noroeste están frecuentemente asociadas a nubes de polvo sobre las planicies de Mesopotamia (Fig. 2). Sin embargo, el transporte de polvo en la atmósfera alcanza su máxima importancia sobre el Sahara occidental y el Atlántico adyacente.

Las fotografías obtenidas desde el espacio constituyen la más valiosa fuente de información relativa a las trayectorias de las nubes de polvo. Por ejemplo, se ha descubierto que el polvo originado en la región costera nor-oriental del Mar de Aral (normalmente con el paso de un frente frío) se desplaza sobre el agua y con bastante frecuencia cae sobre el curso inferior del río Amu Darya (Figura 1), causando la salinización del suelo fértil y produciendo efectos desfavorables sobre la vegetación, especialmente durante el período de floración.

Es frecuente que las nubes de polvo se desplacen de un continente a otro. El polvo de los desiertos del Norte de Africa puede ser transportado a través del Mediterráneo

hasta Europa y desde Africa oriental sobre el Mar Rojo hasta Asia.

Grandes cantidades de polvo son transportadas desde el Sahara occidental sobre el Atlántico. Las fotografías de los satélites han demostrado que es en esta región donde

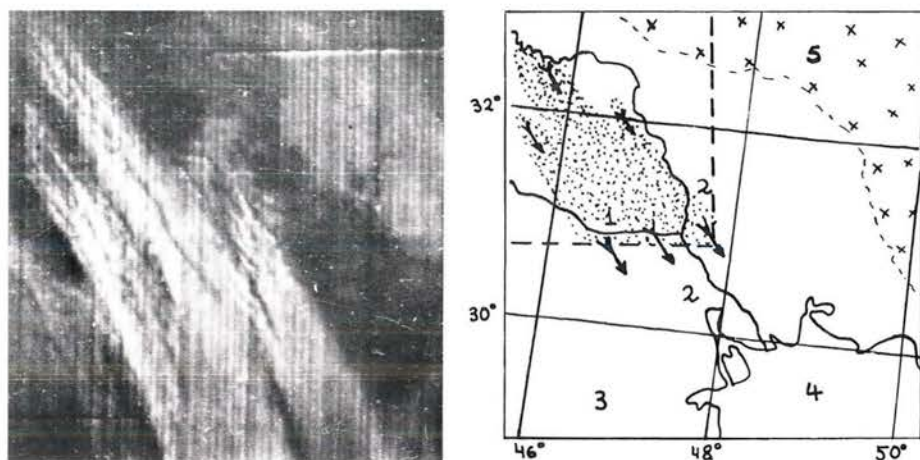


Figura 2 — Fotografía de la región de Mesopotamia tomada desde el satélite COSMOS-226 a una altura de unos 625 km el 12 de agosto de 1968. Existen tres corrientes principales de polvo compuestas de otras varias más pequeñas. La clave de los números en el diagrama explicativo es:

- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| 1 Flujo del polvo transportado | 4 Mar |
| 2 Hondonada de Mesopotamia | 5 Montañas Zagros |
| 3 Desierto | |

se encuentran las trayectorias más largas del transporte de polvo, puesto que el polvo procedente del Sahara alcanza las costas de América del Norte, de América Central y de América del Sur. El transporte de polvo a lo largo de estas grandes distancias fue descubierto por primera vez por J. Próspero *et al* (1970), cuando investigaron la trayectoria del polvo atmosférico rojizo que cayó cerca de Barbados, cuyo origen solamente pudo ser el Sahara. El análisis de las fotografías de los satélites confirmó tales desplazamientos, los cuales fueron causados por regímenes de circulación anticiclónica a gran escala. El fenómeno, caracterizado por una capa de aerosol "azucarado" en un extenso cinturón subtropical, se estudió detalladamente durante el Experimento Tropical del GARP en el Atlántico (GATE), en 1974. Con este propósito, se utilizaron las fotografías de la Tierra tomadas desde el espacio (por satélites meteorológicos en órbita polar y geoestacionarios) así como los datos procedentes de estaciones terrestres, de buques y de aeronaves.

La gran extensión cubierta por las fotografías tomadas por los satélites (desde decenas de miles a decenas de millones de kilómetros cuadrados) hizo posible obtener una idea real de las dimensiones de las nubes de polvo que pueden alcanzar desde decenas a centenares o, incluso, miles de kilómetros. Realmente, las mayores nubes de polvo solamente fueron descubiertas por observaciones realizadas desde el espacio.

Las nubes de polvo que frecuentemente se observan desde el espacio en la región del Mar de Aral pueden extenderse, como mucho, a lo largo de 200 a 400 km (Figura 1). Aquéllas que se desarrollan en la llanura de Mesopotamia pueden alcanzar de 500 a 800 km (Figura 2). Las nubes de polvo procedentes del Sahara sobre el Atlántico pueden extenderse sobre distancias entre 800 y 500 km. Según su anchura, que

varía entre decenas y centenares de kilómetros, su extensión superficial puede variar de miles a centenas de miles y hasta millones de kilómetros cuadrados. Una nube de polvo excepcional de casi seis millones de km^2 fue descubierta sobre el Atlántico y el oeste de Africa por una fotografía de satélite tomada el 30 de junio de 1974 (Kondratyev *et al*, 1976b).

Gracias a estas observaciones espaciales de las nubes de polvo se descubrieron aspectos completamente nuevos de su macroestructura. Numerosas tempestades de polvo presentan una configuración característica de líneas de corriente (Grigoryev y Lipatov, 1974; Ottermann, 1975); un flujo de polvo de algunos centenares de kilómetros de ancho puede no constituir un conjunto homogéneo sino estar subdividido en varias corrientes paralelas. Las nubes de polvo de este tipo son particularmente frecuentes en la planicie de Mesopotamia y en el Mar de Aral. El flujo de polvo en forma de chorro aparece en las fotografías de satélite como estrías que se distinguen fácilmente cuando la corriente se mueve sobre una superficie inferior sombría, como por ejemplo una lámina de agua. Las fotografías de satélites de las tempestades de polvo sobre el Mar de Aral muestran dos grandes corrientes luminosas, cada una con una anchura de 30 a 40 km, separadas por bandas oscuras. Esto se debe a las características del terreno subyacente en las proximidades de los bancos de arena costeros de donde provienen las corrientes de polvo (Grigoryev y Lipatov, 1977).

Cualquier estudio de las tempestades de polvo sería incompleto sin obtener y analizar la información de sus orígenes. ¿De dónde y por qué motivo se origina el transporte de polvo a largas distancias y qué propiedades específicas del terreno subyacente lo favorecen? Con gran frecuencia, el polvo transportado solamente es analizado en regiones muy lejanas de su origen y, por tanto, frecuentemente dicho origen permanece indeterminado (Nalivkin, 1969). Pero actualmente se observan una serie de casos de polvo rojo que se depositan sobre los Alpes en Europa occidental, así como en la URSS (por ejemplo, cerca de Novgorod, en febrero de 1972), y en diversos lugares de la costa oriental de América central. El análisis de las fotografías de los satélites demostró, sin lugar a dudas, que en todos los casos el origen del polvo estaba en el Sahara.

Las fotografías tomadas desde el espacio muestran simultáneamente, tanto la propia nube de polvo como su origen. Las imágenes a gran escala proporcionadas por los satélites meteorológicos (en las cuales las nubes de polvo son más fáciles de identificar) pueden complementarse con fotografías más detalladas (tomadas desde los satélites para el estudio de los recursos naturales de la Tierra o desde estaciones tripuladas en órbita) en las que se ve claramente la estructura de los orígenes del transporte de polvo. Comparando fotografías de diferentes escalas, amplitud y distancias, se encontraron fuentes de polvo anteriormente desconocidas en diversas partes del Sahara occidental (Kondratyev *et al*, 1976), en las regiones costeras nor-oriental y sur-oriental del Mar Caspio y en las regiones costeras nor-orientales del Mar de Aral (Grigoryev y Lipatov, 1977).

El examen de una serie de fotografías sucesivas tomadas desde satélites en 1975 hacen suponer que han aparecido nuevas fuentes de polvo transportado por el aire al bajar el nivel del Mar de Aral varios metros, principalmente a causa de una fuerte disminución de la aportación de los ríos Amu Darya y Syr Darya desde que sus aguas son utilizadas en operaciones de irrigación. Un banco de arena se ha formado en el lecho marino aflorado en la parte nor-oriental del Mar de Aral. En 1975, el banco de arena superaba los 100 km de longitud y los 20 a 25 km de anchura. Está compuesto de arena muy fina suelta y esto lo convierte en el origen de las tempestades de polvo observadas desde el espacio (*Figura 1*).

El 24 de febrero de 1977, una nube de polvo sobre los Estados Unidos de América fue identificada por el satélite meteorológico NOAA-5; la nube se extendía sobre 2.400 km desde Albuquerque (Nuevo México) hasta el Golfo de México (anon. 1977) Una tempestad de polvo tan extensa como ésta no había sido observada en esta zona desde hace 30 años, ni siquiera en la época en que las frecuentes y fuertes tempestades de polvo causaron un gran perjuicio a la economía del país. Esto era un síntoma inquietante y planteó la cuestión de si está en proceso de regeneración una gran fuente de tempestades de polvo en las planicies centrales y meridionales y en los valles de las cadenas montañosas de la parte occidental de los EE UU.

La dinámica del transporte de polvo a largas distancias sólo ha sido estudiada superficialmente. Por tanto, resulta esencial disponer de imágenes a intervalos frecuentes (preferentemente desde satélites geostacionarios). Estas imágenes proporcionan una información útil sobre la frecuencia con que tienen lugar las nubes de polvo, sobre su velocidad y otras características de su desplazamiento y sobre la evolución de su estructura. Las fotografías de satélites muestran que, en la región del Mar de Aral, el transporte de polvo a largas distancias tiene lugar de seis a nueve veces al año, durante los períodos de abril a junio y de agosto a septiembre. Un análisis regular y cuidadoso de la frecuencia y desarrollo de las tempestades de polvo a escala mundial permitirá resolver el importantísimo problema de la distribución mundial de este fenómeno.

En resumen, el análisis de las fotografías de la Tierra tomadas desde el espacio indica que el transporte de polvo a gran distancia es un fenómeno atmosférico significativo a escala planetaria, importante por su contribución a la contaminación de fondo, un hecho al que, hasta ahora, se le ha dado poca importancia.

BIBLIOGRAFIA

- ANON (1977): A new 'dust-bowl?' *Spaceflight*, 19, p. 210.
- GRIGORYEV, A.A. and V.B. LIPATOV (1974): *Pyl'nye buri po dannym kosmicheskikh issledovaniy* (Duststorms from the data of space investigations). Gidrometeoizdat, Leningrad. 31 pp.
- (1977): Duststorms in the coastal regions of the Aral Sea from space imagery. Volume 6 — Annual remote sensing of Earth resources conference (Ed. F. Shakrokhi); Technical papers, University of Tennessee.
- IDSO, S.B. (1976): Duststorms. *Scientific American*, 235, pp. 108-114.
- KONDRATYEV, J. Ya. (Ed.) (1972): *Issledovaniya prirodnoy sredy s pilotiruemymy orbital'nykh stanciy* (Investigations of the natural environment by manned orbiting stations). Gidrometeoizdat, Leningrad. 399 pp.
- (1976a): The Complete Atmospheric Energetics Experiments: Some results and perspectives. *WMO Bulletin*, 25, pp. 229-236.
- *et al.* (1976b): *Aerazol' v rajone ATEP i ego radiacionnye svoystva* (Aerosols in the GATE area and their radiational properties) *Trudy GGO*. vyp. 381, pp. 67-130.
- (1977): *Sovremennye izmeneniya klimata i opredelajushchie ih faktory (izmeneniya solnechnoj postojannoj i gazavovo i aerazol'novo sostava atmosfery)* (Present day climatic changes and the factors which determine them (variations in the solar constant and aerosol composition of the atmosphere)). *Itogi nauki i tehniki — Meteorologiya i klimatologiya*; Vol. 4. All-Union Institute for Scientific and Technological Information. Moscow. 202 pp.
- NALIVKIN, D.V. (1969): *Uragany, buri y smerchi* (Hurricanes, storms and waterspouts). Nauka, Moscow. 487 pp.
- OTTERMAN, J. (1975): Observations of wind streaklines over the Red Sea from the ERTS-1 imagery. *Remote sensing of the Environment*, 4, pp. 79-94.

PROSPERO, J.M., BONATTI, E., SHUBERT, C., and CARLSON, T.N. (1970): Dust in the Caribbean atmosphere traced to an African duststorm. *Earth and Planetary Science Letters*, 9, pp. 287-293.

LLUVIAS EN MAURICIO OCASIONADAS POR EL CICLON TROPICAL *HYACINTHE*

(Este artículo está basado en un trabajo escrito por S. N. Sok Appadu y cedido amablemente por el Representante Permanente de Mauricio ante la OMM, Sr. Y. Valadon).

La causa de que la cantidad total de precipitación caída en Mauricio durante el mes de enero de 1980 superase todos los registros anteriores correspondientes a este mes, fue el desplazamiento errático seguido por la tormenta tropical *Hyacinthe* entre el 16 y el 28 del mes en los alrededores de las Islas Mascareñas, en la parte occidental del Océano Indico.

El 12 de enero el eje del anticiclón subtropical estaba a unos ocho grados de latitud al sur de su posición estacional normal (alrededor de los 37° S). Una intensa célula anticiclónica situada sobre la península Arábiga reforzó la corriente transequatorial sobre el Océano Indico y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se instaló en las proximidades de los 16°S. Los núcleos de baja presión con movimientos erráticos fueron observados en la ZCIT.

El *Hyacinthe* nació en la ZCIT en forma de una perturbación débil el 16 de enero, con una circulación que llegaba hasta el nivel de los 700 hPa. Con vientos muy débiles

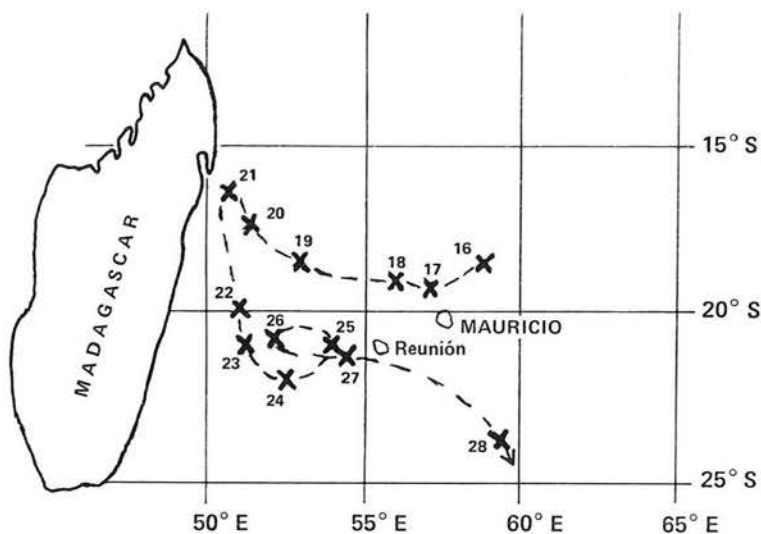


Figura 1 - La trayectoria del ciclón tropical *Hyacinthe* entre el 16 y el 28 de enero de 1980