MINISTERIO DEL AIRE
SUBSECRETARIA DE AVIACION CIVIL

SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL

Publicaciones
Serie A (Memorias) núm. 41

PRIMER CICLO DE CONFERENCIAS

DESARROLLADO
EN EL
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA
DURANTE EL AÑO 1962

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA
(CIUDAD UNIVERSITARIA)
MADRID, 1966

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

AEMET-BIBLIOTECA
1013050
© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

R.º 4.796

SUMARIO

Prólogo, por el Excmo. Sr. don Luis de Azcárraga, Director General del Servicio Meteorológico Nacional.

Discurso pronunciado por el Excmo. Sr. don Luis de Azcárraga, Director General del Servicio Meteorológico Nacional, en el acto de inauguración del edificio del Instituto de Meteorología.

Discurso del Excmo. Sr. Ministro del Aire.

I.—La Meteorología y algunas de sus aplicaciones a la Aeronáutica, por M. A. Viaut.

II.—La organización, para investigación científica, del Servicio Meteorológico del Reino Unido, por Sir Graham Sutton, C. B. E., F. R. S.

III.—Los diagramas mixtos en Meteorología, por don José María Jansá Guardiola.

IV.—Métodos de análisis y predicción aeronáutica para la zona próxima a la Tropopausa, por don Rafael Cubero Robles.

V.—Meteorología Aeronáutica del Valle del Ebro, por don Lorenzo García de Pedraza.

VI.—Meteoropatología, por don José María Mantero.

VII.—Los métodos de diferencias finitas y su aplicación en Meteorología, por don Miguel Azpiroz Yoldi.

VIII.—El papel del Air Weather Service en las investigaciones espaciales, por el Dr. Norman L. Peterson.

IX.—La participación de la Organización Meteorológica Mundial en los programas de asistencia técnica de las Naciones Unidas, por M. D. A. Davies.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA
BIBLIOTECA

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018



© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

PROLOGO

Desde su inauguración en 1962, el Instituto Nacional de Meteorología organiza todos los años un ciclo de conferencias sobre temas meteorológicos. Con estos ciclos dicho Centro de Enseñanza e Investigación les proporciona ocasión a los investigadores, para que comuniquen los resultados de sus estudios al personal del Servicio Meteorológico, así como también a los universitarios no profesionales y al público en general, que no deja de interesarse por muchos de los temas.

El presente tomo contiene las conferencias del primer ciclo. Fueron desarrolladas en la primavera de 1962, por destacados especialistas nacionales y extranjeros. A todos ellos les damos las gracias de nuevo desde aquí, por la brillantez con que en su día nos presentaron los valiosos frutos de sus investigaciones.

Dedicamos aquí un emocionado recuerdo al conferenciante de este ciclo don Miguel Azpiroz Yoldi (q. e. p. d.), Meteorólogo y Catedrático de la Universidad de Barcelona. Su reciente fallecimiento, en plena juventud y madurez intelectual, ha causado honda pena en el Servicio Meteorológico donde, como en todas partes, era muy querido por sus inmejorables cualidades, científicas y humanas.

De los conferenciantes extranjeros, bastará citar los ilustres nombres para que resulte innecesario todo elogio: Mr. Viaut, Presidente entonces de la O. M. M., que inauguró el ciclo, Sir Grahan Sutton, Dr. Peterson y D. A. Davies, Secretario General de la O. M. M., que dió la conferencia de clausura.

Este primer volumen publicado por el Instituto, responde en su formato a la ya larga tradición de las publicaciones del Servicio Meteorológico. Irá seguido en fecha próxima de las conferencias de los ciclos siguientes, y de los trabajos de investigación que se han ultimado y sigan ultimándose en este Centro.

LUIS DE AZCÁRRAGA,
Director General del Servicio
Meteorológico Nacional.

Madrid, enero 1966.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Discurso pronunciado por el Excmo. Sr. D. Luis de Azcárraga, Director General del Servicio Meteorológico Nacional, en el acto de inauguración del edificio del Instituto de Meteorología

Mi General: Está hoy ante ti y ante tus invitados, a quienes agradezco el honor que nos hacen con su presencia, está hoy ante ti el Servicio Meteorológico Nacional, en las personas de los miembros de su Oficina Central y de los Jefes de los Centros Regionales, para agradecer al Jefe del Estado, al Gobierno y a ti, mi General y nuestro Ministro, este nuevo edificio y expresarte la satisfacción por recibirlo de tu propia mano y el estímulo que ello supone.

Cuando ordenaste la organización de un nuevo Centro de Análisis que pudiese satisfacer las crecientes necesidades nacionales y autorizaste que para ello se utilizasen las facilidades que ofrecía la Misión Americana, se planteó para todos nosotros un problema de responsabilidad. La de planear el Centro de modo que, con un estricto criterio funcional, pudiese satisfacer el desarrollo de una ciencia que, como la Meteorología, está en pleno período de formación y de progreso, cuya evolución no es fácil estimar. Aunque hemos dado con este nuevo edificio un salto gigantesco frente a las modestas instalaciones que el Servicio tiene en el Retiro, temo que no nos sobrará margen para cubrir contingencias futuras. Porque el hecho significativo del momento presente es, que a lo largo de estos últimos años, la humanidad—necesitada de obtener mayor rendimiento de los recursos que Dios nos dió en la Naturaleza—la humanidad, repito, está aprendiendo a conocer lo mucho que la Meteorología representa para la vida y cuánto puede mejorarse la economía de los países con un adecuado conocimiento—y en lo posible aprovechamiento—de los factores meteorológicos.

Cuando el Ministerio del Aire se hizo cargo del Servicio Meteorológico Nacional, en el año 1940, los anteriores cuadros de personal y de equipo apenas existían, llevados en gran parte por el vendaval de nuestra Guerra de Liberación. El Decreto que organizó el Servicio como único del Estado para el cultivo de la Meteorología, venía a sustituir la múltiple existencia legal de varios

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Servicios, todos ellos modestos, que en aquella fecha apenas tenían vida. Las Fuerzas Aéreas Nacionales durante nuestra guerra, habían improvisado, con buen resultado y gracias al gran esfuerzo de algunos antiguos meteorólogos, un Servicio que llenó las necesidades de los movimientos aéreos durante la campaña. Aquello fué la base del actual Servicio Nacional, y, por ley inexorable, del transcurso de los años, los jóvenes licenciados y doctores en Ciencias que se iniciaron en aquella tarea, entre 1936 y 1940, están hoy aquí como Jefes actuales de las Secciones de la Oficina Central y de los Centros Regionales.

Pero si el Servicio Meteorológico fué colocado por el Gobierno en el ámbito del Ministerio del Aire, porque la Aviación era y sigue siendo el principal usuario y el más exigente, no nos hemos olvidado nunca—ni queremos olvidarnos—de que se trata de un Servicio Nacional, que tiene que satisfacer las necesidades todas de los diversos usuarios y organismos del país en materia de Meteorología. Lo que sucede es que junto al obligado crecimiento del Servicio para restablecer lo antiguo partiendo casi de la nada, ha sido preciso también atender al enorme, y bien podría decirse insospechado, progreso de la Meteorología, como ciencia y como técnica en el resto del mundo. Se nos ha pedido, en suma, un doble esfuerzo: el de restablecer un esquema maltrecho y, a la vez, ampliarlo inmensamente. Y algunas veces y en algunos aspectos nos hemos quedado cortos. Lo cual no puede extrañar, porque la técnica meteorológica emplea hoy—y cada día más—instalaciones y equipos de gran importancia presupuestaria. Y también necesita el Servicio mayor número y mejor calidad de meteorólogos que no se forman sólo en el curso escolar, sino que necesitan larga práctica, porque la Meteorología, pese a su riguroso fundamento científico, tiene aún en la práctica tanto de arte como de ciencia.

Necesitamos, como cualquier otro Servicio, la amistosa comprensión del usuario, el estímulo, el aplauso a veces y, por supuesto, también la crítica. Por su parte, el Servicio reconoce sus deficiencias y los meteorólogos habrán de hacer por mejorarlas y por mejorarse; por conocer mejor las necesidades del usuario y por explicar a éste lo que de verdad puede esperar de la Meteorología. Para ello, precisamente, pide el Servicio los medios materiales que le permitan colocar su trabajo a tono con lo que se exige.

Desde el año 1940 el Servicio Meteorológico ha crecido ciertamente de modo notable y está planificado un nuevo desarrollo según programa ya presentado. Por no referirse más que al período de los últimos diez años, he aquí algunas cifras significativas.

Además de la Oficina Central a la que corresponde la planificación general del Servicio y la explotación final de las observaciones, exis-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ten 17 Centros Meteorológicos Regionales, que desarrollan trabajos sobre Meteorología Sinóptica, Hidrometeorología, Aerología, Climatología y Meteorología Agrícola, aparte de la información directa al público. De esos 17 Centros, siete trabajan, además, directamente para la Aeronáutica y ocho para la navegación marítima y pesquera. Hay que conseguir que estos Centros Regionales vivan más estrechamente el pulso de las necesidades en sus respectivas zonas de actividad.

En estos diez años hemos pasado de tres Observatorios, con servicio permanente, a 34 que hoy existen y precisamos llegar rápidamente a 52. En cambio, deberán disminuir los observatorios que hoy realizan servicio exclusivamente diurno, porque la evolución atmosférica también se produce de noche.

Para observaciones climatológicas existe hoy una red de 5.380 estaciones; de ellas 130 estaciones completas, 850 termo-pluviométricas, 3.700 pluviométricas y 700 fenológicas. Esta red publica un Boletín mensual y un Resumen anual, además de responder a numerosas consultas públicas; en el año 1961 se extendieron 2.050 certificados e informes escritos. Pero como la densidad de estaciones aconsejable depende de la orografía y la nuestra es bien compleja, necesitaremos aún doblar el número de las estaciones actuales.

La red especial aeronáutica complementaria de la red general, ha ido creciendo a medida que se han puesto en servicio nuevos aeropuertos y nuevas Bases Aéreas militares, y a medida también en que los aeródromos han ido abriéndose al tráfico nocturno. Pero esta red no consiste sólo de las oficinas informativas de aeródromo, sino también de las oficinas que preparan mapas para planear los vuelos, de las que hay siete que producen mapas del tiempo cada tres horas y otras diez estaciones que los producen cada seis horas. En fin, hay 35 estaciones especiales que producen informaciones presentes y previsiones de tiempo futuro para los aeródromos, que divulgan por radio para que puedan escucharlas desde el aire los pilotos a lo largo de sus vuelos.

La red de aerología, que está calando la atmósfera en altura, ha doblado en estos diez años el número de sondeos diarios por globo piloto, es decir, los que permiten conocer el viento en la troposfera. En cuanto a radiosondas, que nos permiten conocer no sólo el viento, sino también la temperatura, la presión y la humedad, en las primeras capas de la estratosfera, en estos diez años hemos pasado de una estación, con un lanzamiento diario, a cinco estaciones con nueve lanzamientos al día. Y ha sido preciso crear una industria para fabricar en España las propias sondas, que de otro modo habría que importar.

Para la navegación marítima, ocho Centros situados en el litoral producen informaciones especiales para la navegación en general y para los buques de pesca. Esta información se divulga a través de estaciones

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de comunicación—estaciones costeras—, que no pertenecen al Servicio Meteorológico, sino a la Marina de Guerra o Mercante.

En fin, en cuanto a estudios especiales de investigación, en estos años se ha instalado una estación de sondeos de la ionosfera aprovechando el Observatorio del Ebro, en Tortosa. Y se está montando una red especial de observación de tormentas por la detección e identificación de parásitos atmosféricos.

Al incremento de las estaciones y medios de trabajo han respondido los meteorólogos con su propio perfeccionamiento profesional, que es hoy día un motivo de orgullo por el prestigio que tienen internacionalmente. Con gran frecuencia vienen participando como profesores en cursos en Universidades extranjeras, como directores y expertos en los programas de Asistencia Técnica de las Naciones Unidas en muy diversos países, principalmente de habla española; y, en fin, en la organización de Servicios extranjeros de Meteorología y de Hidrología. Meteorólogos españoles participan hoy en lugares tan diversos como el Polo Sur y el Congo.

Todo indica, sin embargo, que se está produciendo en estos años una evolución aún más importante. De ello es prueba la atención que a su Servicio Nacional dedican algunos países, de lo que son buenos ejemplos los programas de lanzamiento de satélites y cohetes con fines exclusivamente meteorológicos, con presupuestos realmente astronómicos. Precisamente esta tarde, el Presidente de la Organización Meteorológica Mundial y Director del Servicio francés, M. Viaut, que nos honra aquí con su presencia, va a dar la primera lección de un curso que hoy se inicia y su tema es el del aprovechamiento de cohetes y satélites para la investigación de la muy alta atmósfera.

Pero todavía es, a mi juicio, más significativo al respecto la importancia que se presta a la Meteorología a través de organismos internacionales. Y no tan sólo por el hecho de que entre los organismos especializados de las Naciones Unidas, que son relativamente pocos, haya uno dedicado exclusivamente al tema, como es la Organización Meteorológica Mundial, sino también por el lugar que a la Meteorología dedican otros organismos como son la UNESCO, la FAO y, muy en particular, la OACI.

La previsión del tiempo atmosférico es una ciencia de grandes espacios, que necesita la sincronización de observaciones entre estaciones repartidas en enormes distancias terrestres. De aquí la organización con carácter mundial, no sólo de redes combinadas para observaciones, sino también el intercambio de datos por medio de complejas redes especiales de telecomunicación.

Desde su creación en 1944, la Organización Internacional de Aviación Civil ha venido imponiendo crecientes obligaciones. Los sucesivos

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

aumentos y mejoras de la red de sondeos de alta cota, que en estos días culminan en España, con la adquisición de una nueva red de estaciones de radio-sondas y de radio-viento, capaces de obtener datos por encima de los veinte mil metros de altura, son un ejemplo entre muchos. Al que hay que añadir por ser igualmente significativo de interés no sólo aeronáutico, sino general, la mayor precisión, extensión y frecuencia de los análisis de las cartas sinópticas, base de la previsión de la evolución atmosférica.

Otro ejemplo dentro de la Organización Internacional de Aviación Civil, es nuestra participación en la red de estaciones oceánicas, que mediante relevo frecuente de buques especialmente acondicionados, establece un constante cuadriculado de observaciones en pleno Atlántico Norte, como protección y apoyo de los vuelos trasatlánticos militares y comerciales, así como también de la navegación marítima en general.

Para colaborar con la navegación marítima, en el año 1951 y de acuerdo con el Ministerio de Marina, se creó una Comisión Interministerial que tiene por objeto seleccionar buques de transporte regular que realizan observaciones meteorológicas en alta mar, para completar la red de estaciones fijas. A su vez, se reorganizó también la Sección de Meteorología Marítima de la Oficina Central, dando entrada en la misma a la colaboración de Jefes Técnicos representando al Estado Mayor de la Armada. Estamos ahora en vías de dar satisfacción a otras peticiones de la Marina, en cuanto a una más estrecha colaboración con los Departamentos Navales, así como una mejora sustancial en la previsión del tiempo para la navegación pesquera y de cabotaje. En este orden de ideas no solamente es necesaria una predicción ajustada a la situación, lo cual está siempre sujeto a posible error humano, sino que también es indispensable una buena red de comunicaciones y el estímulo de los usuarios para que procuren escuchar con asiduidad los avisos meteorológicos, precaución que se olvida con frecuencia cuando no parece inminente el riesgo de una situación peligrosa.

En el año 1954 y por acuerdo también con el Ministerio de Agricultura, se creó la Comisión Interministerial de Meteorología Agrícola a fin de mejorar la explotación de los trabajos producidos por la Sección de Meteorología Agrícola de la Oficina Central del Servicio Meteorológico. La colaboración con los agricultores tiene un doble sentido. De una parte, la previsión de situaciones de riesgo catastróficas para el cultivo, lo cual es una consecuencia del análisis y previsión general de la evolución atmosférica. De otra parte, el mejor conocimiento del clima en determinadas regiones y aún en pequeños terrenos de cultivo, con objeto de adaptar las especies de cultivo más provechoso. El primero de los dos aspectos se deduce del análisis general del tiempo; el segundo, en cambio, es un lento trabajo de climatología y es in-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dispensable para ello una estrecha colaboración con el Instituto de Investigaciones Agronómicas del Ministerio de Agricultura. En el año último, con evidente buen resultado, se desarrolló una campaña especial en Levante para proteger el cultivo de la naranja y de otros productos cítricos, cuya repetición habría que estimular convenientemente.

La Organización Meteorológica Mundial, en su III Congreso en el año 1959, decidió la creación de la Comisión Técnica de Hidrometeorología y recomendó, a su vez, la creación de los correspondientes organismos nacionales que en cada país procedan al estudio de los factores meteorológicos que condicionan la reserva hidrológica y su aprovechamiento. Se ha creado en el Servicio Meteorológico español la correspondiente Sección de Hidrología y el Servicio forma parte del Instituto Nacional de Hidrología, creado dentro del Consejo de Investigaciones Científicas, junto con otros organismos interesados como son el Ministerio de Obras Públicas y el de Agricultura, así como la agrupación de Empresas eléctricas. Ya es muy antigua la excelente colaboración que el Servicio Meteorológico viene teniendo con las Confederaciones Hidrográficas y nuestro deseo es que esa colaboración se intensifique.

A través de la Organización Meteorológica Mundial y en relación con Organizaciones Internacionales, tales como la de Alimentación y Agricultura, se está procediendo intensamente en muchas regiones del mundo a estudiar los problemas de intensificación de cosechas y de revalorización de terrenos áridos o semi-áridos. En gran parte ello constituye la llamada "campaña contra el hambre mundial". Tenemos en nuestro país zonas áridas y semi-áridas, para las que la Meteorología constituye un factor esencial, no sólo en cuanto al mejor aprovechamiento de los fenómenos naturales y en particular las energías solar y del viento, sino también en cuanto a la posible activación artificial de algunos de esos fenómenos, como por ejemplo, la producción de lluvias. Es este otro de los aspectos donde es necesaria una gran colaboración de los usuarios con el Servicio Meteorológico; porque no pueden pedirse a éste milagros, sino el constante aprovechamiento de las posibilidades naturales, lo cual es fruto de un lento progreso técnico y científico.

A dar satisfacción a esta necesidad de nuevos desarrollos del Servicio, viene, pues, este Centro de Análisis e Instituto Nacional de Meteorología. No es este edificio un sustituto de las modestas instalaciones que el Servicio tiene en el Retiro, es un complemento de ellas. Las del Retiro no sólo deben continuar por tradición, sino porque aquí—en este nuevo edificio—no se ha proyectado trasladar más que una parte de los elementos del Servicio, aquéllos que no era ya posible mantener en la vieja casa solariega.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Residen aquí el Centro de Análisis y el Instituto Nacional de Meteorología; en resumen, pues, existen en este edificio concentrados tres de los aspectos más destacados en cualquier Servicio Meteorológico, como son la previsión del tiempo, la investigación y la formación de personal. Con este Centro de Análisis tratamos de concentrar en un solo lugar todos los elementos necesarios para el estudio de las cartas meteorológicas y la previsión del tiempo. Será así posible dotar al Centro de mejores medios y principalmente de más numeroso y mejor personal, concentrando lo que de otro modo habría de dispersarse entre varios Centros de Análisis repartidos en diversos lugares del territorio nacional. La idea es, pues, que se proceda aquí a una gran concentración de datos, al análisis de ellos y de las cartas resultantes y, en fin, a la previsión básica que será repartida a todo el territorio nacional y a los Centros extranjeros, por diversos medios de comunicación y especialmente por el facsímil, es decir, la repetición a distancia de las cartas dibujadas. Es justamente este progreso de la técnica el que ha permitido en otros países la creación de Centros de Análisis similares a éste.

A su vez, en este edificio se traslada, formando parte del Instituto Nacional de Meteorología, la ya antigua Sección de Investigaciones de la Oficina Central del Servicio Meteorológico. Queremos dar así mayor capacidad de trabajo a los investigadores, no sólo dotándolos de medios más adecuados, sino también poniéndoles en contacto con el propio ambiente universitario donde pueden encontrar adecuadas colaboraciones.

Finalmente y formando parte también del Instituto Nacional de Meteorología, residen en este edificio los equipos de enseñanza que, recogiendo a personal inicialmente formado en la Universidad y en las Escuelas Técnicas Superiores, lo transforma en Meteorólogos y Ayudantes Técnicos de Meteorología. Querríamos ir algo más lejos en esta medida, de tal modo que no solamente se forme el personal que va a encuadrarse inmediatamente en las Escalas del Servicio Meteorológico, sino que querríamos también formar personal facultativo y técnico, aunque no vaya a encuadrarse forzosamente en el Escalafón del Estado. La antigua Sección de Enseñanza de la Oficina Central del Servicio ha venido ya admitiendo en sus cursos de formación a personas nacionales y extranjeras, que no aspiraban a formar parte del Escalafón del Estado. La Organización Meteorológica Mundial está, a su vez, tratando de impulsar este tipo de Centros de Enseñanza, para que puedan servir a personas procedentes de países menos desarrollados, que adquieran así la enseñanza necesaria para sus propios Servicios nacionales. Ya hemos recibido algunos alumnos procedentes de Marruecos y de Repúblicas hispano-americanas, y nuestro deseo es que este Centro de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Enseñanza atraiga precisamente por ser de habla española a aquellas personas de nuestra misma lengua, que deseen formarse en estos campos de actividad y que ahora utilizan con frecuencia Centros de Enseñanza en otros idiomas.

Y con esto acabo mi exposición. Mi General, en nombre de todos los componentes del Servicio Meteorológico Nacional, te ruego que hagas patente al Jefe del Estado nuestra lealtad y nuestra admiración. Y a ti, te digo que los Meteorólogos desean trabajar con éxito y que el Servicio Nacional desea servir y servir a todas las necesidades del país. Estamos a tus órdenes, y sólo pedidos a Dios acierto al ejecutarlas, para beneficio de nuestra Patria.

Madrid, 23 de marzo 1962.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Discurso del Excmo. Sr. Ministro del Aire

Tengo una especial satisfacción—que estoy seguro que comparte todo el Ministerio del Aire—, al inaugurar hoy el nuevo edificio del Centro de Análisis y del Instituto Nacional de Meteorología. Desde que en 1940 se hizo cargo el Ministerio del Aire del Servicio Meteorológico Nacional, se han producido en éste una gran evolución y un desarrollo. Y, sin embargo, aún son necesarias nuevas mejoras, para que la meteorología sea aprovechada en la forma que hoy permiten los conocimientos técnicos y científicos.

En 1940 encontramos un Servicio Meteorológico Nacional prácticamente deshecho. Muchas de las instalaciones y la mayor parte de su antiguo personal habían desaparecido. Paralelamente y por fortuna, se habían iniciado aportaciones de nuevo personal dentro de las Fuerzas Aéreas nacionales, que atendieron con brillantez a las necesidades de nuestros movimientos aéreos durante la guerra de Liberación. Pero la Meteorología estaba—y sigue—en vías de una intensa evolución científica y técnica, en todo el mundo, en gran parte empujada por las fuertes demandas de la aviación. Nuevos equipos técnicos que mejoran día a día, permiten obtener datos cada vez con mayor precisión y en regiones hasta ahora inaccesibles como es, por ejemplo, la estratosfera. A su vez, la exploración de esas regiones ha permitido construir nuevas teorías científicas en que se basa la previsión del tiempo atmosférico.

Así que la evolución de nuestro Servicio Meteorológico Nacional se ha visto obligada a realizar un doble esfuerzo. De una parte, ha sido necesario reconstruir la red mínima para subsistir y reemplazar el personal antiguo, curando las cicatrices de nuestra guerra. Y cuando apenas se iba logrando sustituir lo que se había perdido fué necesario, de otra parte, crecer y desarrollar las redes, dotándolas de nuevos equipos y aumentando el personal en forma que no era inicialmente previsible. No es, pues, de extrañar que, pese al gran esfuerzo ya hecho, aún estemos cortos. Las instalaciones actuales, particularmente cuando se trata de observaciones de la alta atmósfera, son muy costosas. Y el personal, sobre todo el facultativo de meteorólogos, precisa tiempo para formarse y para adquirir la experiencia indispensable a su función.

El esfuerzo, sin embargo, merece la pena. Los vuelos, tanto militares como civiles y comerciales, se realizan hoy a niveles de crucero muy

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

altos; por otra parte, la economía de consumo de los actuales motores de reacción exige conocer con precisión y a esos altos niveles de crucero, datos—como la densidad del aire—que anteriormente no entraban en juego. Pero gracias a estos datos y al conocimiento más preciso de la situación atmosférica general y en particular la llamada "corriente de chorro", es posible realizar hoy con notable seguridad vuelos de larga distancia con gran aprovechamiento de la carga útil; mejorando así no sólo la seguridad de las vidas humanas—resultado que ya sería suficiente—, sino más aún, la economía del transporte y la regularidad de los vuelos.

A su vez, la Organización Meteorológica Mundial, desde 1947, en que, por el Convenio de Wáshington, dejó de ser reunión de Servicios para convertirse en Organización de Estados, viene también obligando a nuevos esfuerzos, para que el estudio y la explotación de la meteorología tengan el carácter y la extensión internacional que verdaderamente necesitan.

La previsión del tiempo atmosférico es una ciencia de grandes espacios, que necesita la sincronización de observaciones entre estaciones repartidas en enormes distancias terrestres. De aquí la organización mundial, no sólo de redes de observación combinadas, sino también de intercambio de datos por medio de complejas redes especiales de telecomunicación. Y al progreso de la meteorología conviene también—y aún más que en el caso de otras ciencias—un frecuente intercambio de ideas y de métodos, pues la Meteorología tiene aún tanto de arte como de ciencia y una gran parte de su progreso se obtiene por la confrontación mutua de resultados.

Esta concentración internacional que significa la Organización Meteorológica Mundial y las obligaciones gubernamentales que la misma comporta, llaman a su vez a concentraciones nacionales en cada país. La eficacia de los Servicios Meteorológicos reside cada día más, en una gran densidad de medios de observación que son, por otra parte, relativamente costosos. Por eso, y a partir del Decreto del año 1940, no hay en España más que un solo servicio meteorológico, el Servicio Nacional. El Ministerio del Aire es —como en otros muchos países—el principal usuario y el depositario del Servicio, porque así lo exigen las cuantiosas necesidades meteorológicas de la navegación aérea. Pero el Ministerio del Aire desea, y habrá de procurar siempre, que el Servicio sea verdaderamente Nacional, recogiendo y tratando de dar satisfacción a las necesidades todas del país en materia de meteorología. Y a su vez desea y pide que en la mejora del Servicio le ayuden los demás Ministerios interesados, aportando sus ideas, concretando sus pe-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ticiones y, en fin, dando a los problemas del Servicio el concepto nacional que les corresponde.

Precisamente es para nosotros un motivo de satisfacción el alto grado de capacitación intelectual y profesional de nuestros meteorólogos. Vienen siendo requeridos con mucho frecuencia para participar en los programas de Asistencia Técnica de las Naciones Unidas, a través de la Organización Meteorológica Mundial. Nuestros meteorólogos han participado y están participando hoy, en dicho Programa, en países y Universidades, tales como Irlanda, Puerto Rico, Santo Domingo, Perú, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Marruecos y Congo, así como también trabajan en el propio Secretariado de la Organización Meteorológica Mundial.

Repito, pues, que es para mí una satisfacción inaugurar hoy este Centro del Servicio Meteorológico Nacional. Agradezco al Ministro de Educación Nacional la colaboración que nos prestó y la comprensión con que entendió nuestros problemas al cedernos terrenos dentro de la propia Ciudad Universitaria de Madrid. Esta edificación se ha hecho en un ejemplo de colaboración con los Servicios Técnicos de la Ciudad Universitaria. Agradezco también a la Misión Económica de los Estados Unidos en España su colaboración al permitirnos que una gran parte del dinero necesario para este Centro salga de los Fondos del Programa de Ayuda Mutua entre Estados Unidos y España. Agradezco aquí la presencia de las Autoridades que nos honran hoy con su compañía en esta inauguración y, muy en particular, la de los Ministros y representantes de los diversos Ministerios, cuya colaboración es indispensable para el buen resultado del Servicio Meteorológico. Agradezco, en fin, la oportunidad que nos ha permitido hoy contar entre nosotros al Presidente de la Organización Meteorológica Mundial, que precisamente esta tarde, y en este mismo lugar, va a desarrollar la primera conferencia de un ciclo que se ha preparado inicialmente como primera tarea de trabajos en este nuevo Instituto.

Pido, en fin, al señor Arzobispo de Sión que proceda ahora a la bendición de este edificio, implorando la ayuda de Dios Todo poderoso para que el Servicio Meteorológico Nacional encuentre en esta nueva instalación un nuevo motivo de estímulo para su trabajo.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

CONFERENCIAS

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

I

LA METEOROLOGIA Y ALGUNAS DE SUS APLICACIONES A LA AERONAUTICA

Conferencia pronunciada en Madrid el día 30 de abril de 1962

por

M. A. VIAUT

Presidente de la Organización Meteorológica Mundial

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

LA METEOROLOGIA Y ALGUNAS DE SUS APLICACIONES A LA AERONAUTICA

La Organización Meteorológica Mundial tiene tareas extremadamente variadas. Si no cabe duda que la Meteorología ha visto su magnífico desarrollo asociado al de la Aeronáutica, no es menos cierto que esta ciencia joven encuentra cada vez más aplicaciones en todos los terrenos.

Pero voy a tranquilizar a mi auditorio: no está en mi intención entrar en el detalle de cada uno de estos terrenos; por el contrario, deseo no alejarme demasiado de un objetivo concreto: la aplicación de la Meteorología a la Aeronáutica.

Séame permitido indicar, sin embargo, cómo el campo de acción de la Organización Meteorológica Mundial se extiende a diferentes ramas, muchas de las cuales tocan, por cierto, a la Aeronáutica. Por eso, recordaré brevemente las respectivas atribuciones de tres Comisiones Técnicas de la O. M. M. (Ver fig. 1 al final.)

Sólo citaré para recordar, las tres comisiones muy especializadas, que representan:

— La Comisión de Meteorología Marítima, encargada de la observación en el mar y de la protección de la navegación marítima.
— La Comisión de Meteorología Agrícola, encargada de todas las aplicaciones de la Meteorología a la Agricultura.
— Y, la última creada, la Comisión de Meteorología Hidrológica, encargada de las aplicaciones de la Meteorología a la Hidrología y al problema crucial del agua.

Insistiré más sobre la Comisión de Aerología, cuyas atribuciones se extienden de año en año. Es, en efecto, la competente en materia de investigaciones en Meteorología, y todos conocen el desarrollo adquirido por este dominio durante el curso de esta última década por el advenimiento de medios nuevos, tales como el calculador electrónico para el análisis y la previsión numérica del tiempo, o los satélites meteorológicos para la observación a nueva escala de nuestro planeta.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Un desarrollo semejante de los métodos y los medios de investigación se aplica a ramas extremadamente diversas, tales como la estructura de las nubes, la química atmosférica, la distribución vertical del ozono, la radiación o la previsión a largo plazo. La Meteorología, arrastrada por la corriente que conduce a la ciencia hacia regiones inexploradas, debe jugar allí un papel constantemente creciente. En la escala internacional, es la O. M. M. la que está llamada a unificar y coordinar esta acción; tal vez sea inducida a establecer, con este fin, un nuevo órgano más restringido que la Comisión de Aerología y orientado hacia la puesta a punto de un verdadero programa de investigaciones.

Otra Comisión Técnica, cuya importancia es capital para todo lo concerniente a la explotación meteorológica, es la Comisión de Meteorología sinóptica. Es a ella a quien incumbe, entre otras, las tareas de poner a punto los códigos internacionales, de reglamentar a escala mundial los problemas de las transmisiones meteorológicas y, en fin, establecer las redes de estaciones de observaciones en superficie y en altitud, teniendo en cuenta las necesidades generales y las expresadas por la OACI. Estas tareas tienen una aplicación directa a la Aeronáutica, de la que se hablará más adelante.

Quiero nombrar a continuación otra Comisión de Instrumentos y métodos de observación que trata de cuestiones relativas a los instrumentos, tanto desde el punto de vista de las características de sus calibrados, como de la precisión de las medidas y de las prácticas internacionales de observación. Aquí también aparece una aplicación a la Aeronáutica, en lo que concierne a las observaciones más especializadas necesarias a los aeródromos internacionales, como las de visibilidad o de altura de la base de las nubes.

En cuanto a la Comisión de Climatología, cuya misión es manejar los datos climatológicos, es evidente que está llamada a ocuparse de la climatología aeronáutica, tanto si se trata de Climatología de Aeródromos como de rutas aéreas.

En fin, llego a una VIII Comisión Técnica, que cito en último término, porque desearía extenderme un poco más detalladamente sobre ella. Se trata de la Comisión de Meteorología Aeronáutica, que tiene como misión estudiar las aplicaciones de la Meteorología a la Aeronáutica, así como los medios para satisfacer las necesidades meteorológicas de la Aeronáutica.

Tocamos aquí problemas comunes a la Meteorología y a la Aeronáutica. Una necesidad aparece rápidamente: la colaboración de la Organización Meteorológica Mundial con otra Institución especializada de las Naciones Unidas: la Organización de la Aviación Civil Internacional. Por colaboración debe entenderse no sólo las relaciones amis-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tosas de pura fórmula, sino una verdadera distribución de responsabilidades basada en "Convenios de trabajo", establecidos entre las dos Organizaciones. Tales convenios, largamente preparados, han sido aprobados en 1953 y, actualmente, van a ser objeto aún de algunas modificaciones.

La Meteorología constituye una de las "ayudas" a la Navegación Aérea Internacional. La OACI, encargada de asegurar una explotación segura, regular, económica y eficaz, debe expresar sus necesidades en Meteorología, necesidades que varían en función de la evolución de la Aeronáutica. La O. M. M., una vez en conocimiento de estas necesidades, establece entonces las redes de las estaciones meteorológicas, llamadas "redes de base" y estudia los medios técnicos que pueden seguirse en el terreno de la Meteorología.

Queda luego a ambas Organizaciones el promulgar los reglamentos y especificaciones relativas a la ayuda meteorológica a la Navegación Aérea Internacional. Es aquí donde intervienen las reuniones conjuntas entre los dos órganos respectivos de ambas organizaciones: la Comisión de Meteorología Aeronáutica de la O. M. M. y la División Meteorológica de la OACI. Este tipo de reunión se mantiene aproximadamente cada cuatro años; tal periodicidad es satisfactoria si se tiene en cuenta a la vez la evolución de las técnicas y la necesidad de cierta estabilidad de los reglamentos. Las decisiones tomadas son inmediatamente estudiadas y eventualmente promulgadas en el escalón ejecutivo, de una parte, por el Comité Ejecutivo de la O. M. M. y, de otra, por el Consejo de la OACI.

Como ustedes pueden comprobar, he desarrollado hasta aquí un aspecto general de la colaboración de la O. M. M. y de la OACI. Pero creo necesario subrayar también ciertos aspectos prácticos de esta colaboración de la que la más tangible me parece ser la organización en común de ciclos de estudios sobre problemas de la Meteorología Aeronáutica. Es así como el empleo de aeronaves que vuelan a altitudes cada vez más elevadas, plantea a la aviación problemas nuevos, en los cuales el elemento meteorológico es, quizá, más importante tanto en lo que concierne a la observación y el análisis de los fenómenos como a su previsión. Los ciclos de estudios regionales organizados en común sobre tales temas—pienso en los recientemente celebrados en El Cairo o en Nicosia—han permitido a los especialistas reunirse, trabajar juntos en las condiciones de la explotación, comparar sus métodos y discutir, bajo la dirección de consultores muy calificados, sobre los mejores métodos utilizables.

Dejaré a estos especialistas reintegrados a su lugar habitual de trabajo, el cuidado de proseguir la tarea, a la vez oscura y apasionante, de la protección aeronáutica.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Mi objetivo, en general, será poner en evidencia ciertos progresos bastante espectaculares realizados en estos últimos años en el terreno de las medidas de los elementos meteorológicos en altura: estas medidas interesan a las investigaciones, puesto que permitirán mejores conocimientos de la atmósfera y su circulación general. Igualmente conciernen a la Aeronáutica, pues un conocimiento mejor de la atmósfera y de su evolución representa para ella un sostén indispensable y mejores posibilidades de rendimiento de la explotación, tanto en el plan técnico como en el comercial.

Desde el momento en que el avión a reacción navega corrientemente en el límite superior de la estratosfera o de la baja estratosfera (10.000 a 12.000 metros), y a poco que el avión supersónico se lance hacia capas más elevadas (15.000 a 25.000 metros), se puede uno preguntar si las nociones clásicas de la Meteorología conservarán en el futuro todas sus aplicaciones.

Conviene, sin embargo, advertir que para alcanzar las altas capas de la atmósfera es preciso atravesar antes las capas inferiores perturbadas. Este franqueamiento debe, por supuesto, hacerse lo más rápidamente posible en consideración a las servidumbres propias de los aviones sometidos a difíciles pruebas y, especialmente, por su gran consumo de carburantes en las capas bajas de la atmósfera. Pero, para los aviones supersónicos, intervendrá otro fenómeno que tiende a disminuir la velocidad de franqueo de las capas bajas: es aquél del efecto sonoro llamado "detonación balística", que es engendrada por las ondas de choque producidas cuando el avión vuela a una velocidad superior a la del sonido.

Citemos a este respecto algunas cifras reveladas en un estudio realizado por la OACI; se calcula que un avión supersónico deberá volar a velocidad subsónica o a poca velocidad supersónica hasta alrededor de 12.000 metros, no debiendo ser alcanzada una velocidad de mach 2 hasta alrededor de 15.000 metros y una velocidad de crucero de mach 3, hasta prácticamente los 18.000 metros.

De estas observaciones sacaremos dos enseñanzas importantes: por una parte, es indispensable el conocimiento meteorológico de las bajas capas de la atmósfera, tanto para los aviones clásicos como para los rápidos; por otra parte, la Meteorología debe extender sin demora el campo de sus investigaciones hacia las capas superiores de la atmósfera.

Antes de considerar las condiciones meteorológicas particulares reinantes en los niveles que no serán atravesados más que por los aviones de muy eespeciales características, pasemos una rápida revista a los medios corrientes de investigación en altura de que disponen los meteorólogos.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Algunos de los procedimientos de medida, de casi treinta años de antigüedad y explotados en redes desde hace más de quince, son bien conocidos:

El radiosonda, minúscula estación meteorológica automática enganchada a un globo, transmite durante su ascensión la presión, la temperatura y la humedad cada 150 metros de elevación; es demasiado familiar para que describamos el funcionamiento y destaquemos sus méritos. Subrayemos, sin embargo, que la precisión de las medidas disminuye sensiblemente por encima de una quincena de kilómetros de altura, lo que obliga a una cierta reserva en cuanto al empleo de resultados obtenidos entre los 15 a 30 kilómetros de altitud y a que sean necesarios perfeccionamientos en la instrumentación.

No me extenderé sobre los otros aparatos que permiten medir la visibilidad (medidores de visibilidad), altura de las nubes (telémetro de nubes) o la detección de las células nubosas (radar panorámico), y que son de una gran utilidad para los aterrizajes, la subida a nivel de crucero o el descenso e incluso la ayuda meteorológica en ruta.

Por el contrario, insistiré aquí sobre la observación del viento, siendo primordial el conocimiento de este parámetro a cualquier altura para la determinación de las rutas óptimas.

La observación del viento se hacía por el radioteodolito, pero éste se encuentra poco a poco reemplazado por el radar, que da una precisión superior.

Uno y otro de estos aparatos permiten, como ustedes saben, seguir la trayectoria de un globo provisto de emisor o de un simple reflector y, en consecuencia, conocer la trayectoria, de donde se deduce la velocidad y la dirección de los vientos que arrastran al globo en las diversas altitudes de su recorrido.

La fuerza de los vientos al nivel de la tropopausa ha sido medida desde hace mucho tiempo; el estudio de los primeros resultados de los radiosondeos efectuados sobre el Atlántico por la nave meteorológica francesa "Carimaré", complementando los datos facilitados por el Centro Aerológico de Lindenberg (Alemania), y de Trappes (cerca de París), habían permitido escribir, en 1938, en colaboración con Mironovitch, que la subestratosfera y la estratosfera estaban lejos de presentar la calma que se les atribuía.

Conviene ante todo subrayar, que la rentabilidad de los vuelos comerciales, a cualquier nivel que sean efectuados, depende muy ampliamente de las corrientes aéreas y de su evolución.

Es indispensable determinar, antes de la salida del avión, no la ruta más corta kilométricamente, es decir, la ortodrómica, sino la ruta óptima, teniendo en cuenta los vientos, es decir, el camino que une los puntos de partidas y llegadas que el avión empleará el mínimo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de tiempo en recorrer. El método de determinación de la ruta de tiempo de vuelo mínimo, debido a dos meteorólogos franceses, Bessemoulin y Pône, se emplea ahora por todas las Compañías Aéreas. Está basado en el conocimiento del campo isobárico a diversos niveles, conocimiento que sólo hace posible una red suficientemente densa de radiosondeos y una frecuencia razonable de medidas. Estas medidas son tan indispensables en las regiones oceánicas y desérticas como en las zonas pobladas; es por esto por lo que los meteorólogos insisten a las Compañías Aéreas para obtener observaciones de aeronaves necesarias para completar las lagunas de una red y cuyo mayor beneficio revierte, finalmente, a esas mismas compañías. No se debe perder de vista, en efecto, que el precio de la hora de vuelo de los aviones modernos alcanza cifras considerables y que la ganancia de varias decenas de minutos, que puede aportar la Meteorología por el conocimiento de los vientos en altura, representa una economía apreciable.

Una de las formas más conocidas de corrientes aéreas, que pueden ayudar o contrariar el vuelo de aviones de elevadas características, está constituída por lo que se llama la corriente en chorro, en inglés, "jet stream".

Los mapas y cortes de la atmósfera en que figuran las capas de velocidades iguales de las corrientes en chorro, hacen aparecer una zona central llamada núcleo, donde las velocidades son máximas. Este núcleo puede ser simple o doble o incluso triple; en sección presenta, generalmente, la forma de una elipse de gran eje horizontal. El chorro tiene, pues, el aspecto de un tubo aplastado presentando sinuosidades y, a veces, ramificaciones. (Ver fig. 2.)

La corriente en chorro más conocida en nuestras latitudes, está constituída por un tubo de vientos fuertes, soplando generalmente de Oeste a Este, sobre una longitud que puede alcanzar 4.000 kilómetros, pero sobre una anchura de sólo algunas centenas de kilómetros. La amplitud de la banda de velocidades superiores a 190 km/hora es, lo más frecuente, del orden de 200 kilómetros, siendo la altitud del núcleo de cerca de 9 a 10 kilómetros.

Igualmente existe en nuestras altitudes una corriente en chorro estratosférica, que se sitúa en alturas comprendidas entre 25 y 30 kilómetros.

Citemos, además, la corriente en chorro subtropical situada entre 10 y 15 kilómetros de altitud, pero cuya posición oscila generalmente en invierno entre los paralelos 20° Norte y 40° Norte. Esta corriente puede, pues, interesar, de vez en cuando, el sur de España.

Un estudio realizado en el Centro Meteorológico de Trappes (cerca de París), por el Ingeniero Barbe, ha dado resultados muy interesantes sobre la estructura de las "corrientes en chorro" y la circulación

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

en la alta atmósfera. El estudio ha sido garantizado con la ayuda de un radar francés de 10 cm. de longitud de onda, de persecución automática. Hasta 1957, las medidas no pasaban prácticamente los 20 kilómetros de altitud; han sido llevadas en seguida a 35 kilómetros para alcanzar los 40 kilómetros en 1961. Este estudio ha permitido interesantes comprobaciones sobre el perfil característico de las curvas respectivas de dirección y de velocidad del viento en función de la altitud. (Ver figs. 3 y 4.)

Los gráficos que han sido presentados demuestran la variabilidad de la circulación atmosférica con la altitud. Vamos a demostrar ahora cómo esta variación se efectúa también con el tiempo. (Ver figs. 5, 6, 7 y 8.)

Entre 1957 y 1960, las medidas del viento por el radar han sido proseguidas en las capas que se extienden de los 12 a los 35 kilómetros de altitud. En 1961, estas medidas se han hecho entre los 25 y 40 kilómetros. La capa situada entre *19 y 20 kilómetros* parece ser una capa de transición importante entre la baja estratosfera y la estratosfera media, que se puede considerar como extendiéndose de 20 a 25 kilómetros. Es en esta capa donde se observa la inversión estacional de la dirección del viento que, generalmente, desde principios de mayo hasta agosto, pasa al sector Este.

Igualmente, es en esta capa donde se observa el mínimo absoluto de la velocidad del viento; excepto en invierno, no se encuentra allí viento superior a 70 km/hora.

En fin, esta capa, en la que los vientos predominantes son del Sureste a Este, en verano, y de Oeste a Noroeste, en invierno, deja aparecer menos del 20 por 100 de vientos meridianos (principalmente del Sur, en verano, del Norte, en invierno). (Ver figs. 9 y 10.)

Entre 20 y 25 kilómetros de altura, o sea, en la estratosfera media, las velocidades del viento son máximas en invierno, estación durante la cual la dirección del sector Oeste predomina en el 80 por 100 de los casos. Al contrario, estas velocidades son débiles en verano, estación durante la cual las direcciones del Este y del Sureste predominan, soplando solamente el 5 por 100 de los vientos del sector Oeste. (Ver figuras 11 y 12.)

En la estratosfera superior, o sea, entre *25 y 30 kilómetros* de altitud, se comprueban velocidades de viento máximas en invierno, en relación con la "corriente en chorro" estratosférica; estas velocidades se hacen débiles en verano, con un mínimo muy marcado en julio.

En cuanto a las direcciones de viento, se hallan sensiblemente como en la estratosfera media, pero el predominio de los vientos zonales del sector Este es aún más marcado en verano, donde aparece el 80 a 90 por 100 de los casos en julio, mientras que el de los vientos

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

del sector Oeste sobrepasa el 90 por 100 de los casos en invierno. (Ver figuras 13 y 14.)

En fin, la capa situada entre *30 y 35 kilómetros* de altitud es menos conocida. El reparto de las velocidades y de las direcciones del viento durante el año, aparece allí sensiblemente igual que en la capa precedente, pero con caracteres aún más marcados, en lo que respecta a las velocidades y una frecuencia mayor de los vientos del sector Oeste. (Ver figs. 15 y 16.)

Todo lo que se ha dicho y mostrado sobre los gráficos, pone en evidencia la relativa complejidad de la estructura de los vientos en la atmósfera en un instante dado. La previsión del estado futuro de esta estructura constituye igualmente un problema delicado. Pero el aprovechamiento óptimo de esta estructura por las aeronaves es evidente: en los límites impuestos por las servidumbres técnicas de la navegación, la elección del nivel de vuelo tendrá consecuencias inmediatas sobre la duración del recorrido y, por tanto, sobre el consumo de carburante.

Así, las corrientes en chorro podrán ser evitadas o, al contrario, utilizadas por el avión, según su punto de destino. Esto se hace corrientemente por los aviones de línea a reacción, cuyo nivel de crucero está generalmente próximo al nivel de la corriente en chorro.

Un problema idéntico se va a presentar dentro de pocos años, cuando los aviones supersónicos sean explotados comercialmente. Como hemos dicho más arriba, su nivel medio de crucero no está aún determinado, no habiendo sido fijadas todavía las características técnicas de estos aparatos ni aún se ha elegido el orden de magnitud de velocidad entre mach 1 y mach 3.

Si se admite a "groso modo" que el nivel de crucero se establecerá entre 18.000 y 25.000 metros, será preciso tener en cuenta, para establecer los planes de vuelo, la importante capa de transición, situada hacia los 19.000-20.000 metros, que ha sido descrita anteriormente. Entre los 20.000 y los 25.000 metros, será menester igualmente tener en cuenta la corriente en chorro estratosférica que, aunque situada en la estratosfera superior, deja ya sentir su influencia en esta capa.

En fin, los constructores de aviones deberían por sí mismos tener en cuenta las condiciones meteorológicas que reinan en los diversos niveles de vuelo de los futuros aviones supersónicos y, especialmente, en la capa de transición situada hacia los 19.000-20.000 metros que será, probablemente, la más rentable desde el punto de vista de la economía de los vuelos.

Después de haber examinado la estructura de los vientos a todos los niveles utilizados hasta ahora, o a emplear en un futuro próximo por la navegación aérea, vamos a hablar sobre otro medio de investi-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

gación de la atmósfera del que los meteorólogos esperan mucho: la observación por medio de los satélites meteorológicos.

Es la serie de satélites artificiales americanos "Tiros" la que anuncia las nuevas posibilidades en el terreno de las investigaciones aplicadas. "Tiros" es, en efecto, el primer satélite concebido para una explotación sistemática para beneficio de diversos usuarios, que son, en primer lugar, los servicios meteorológicos, pero también los organismos de investigaciones o laboratorios interesados en el conocimiento del estado global de la atmósfera en un momento dado.

"Tiros I", el primero de la familia, fué lanzado desde Cabo Kennedy, el 1 de abril de 1960; llevaba dos cámaras de televisión de pequeño y gran angular, cuyas imágenes eran retransmitidas a Ft. Monmouth, en New Jersey. Se revelaron como de excelente calidad y constituyeron la primera comprobación experimental en gran escala de la morfología de las perturbaciones meteorológicas. La vida activa de "Tiros I" debía durar dos meses y medio, período en el cual fueron registrados 23.000 clichés.

Para los satélites siguientes, "Tiros II" y "Tiros III", lanzados, respectivamente, el 23 de noviembre de 1960 y el 12 de julio de 1961, el aparato científico comprendía, además de los dispositivos de la televisión, instrumentos de radiometría de baja y media resolución, que han permitido suministrar resultados excepcionalmente interesantes, de los que hablaremos más adelante.

Por último, "Tiros IV", lanzado el 8 de enero de 1962, llevaba una instalación idéntica a la de los dos precedentes; gira actualmente todavía alrededor de nuestro globo y continúa transmitiendo informes que son rápidamente explotados.

Veamos cómo se presenta este satélite "Tiros". En todo lo que sigue voy a referirme a "Tiros III", prototipo poco más o menos definitivo de la serie que, después de "Tiros IV", debe comprender otros tres satélites cuyo lanzamiento está previsto en 1962-63. (Ver fig. 17.)

Sobre la superficie exterior del satélite, una cubierta regular de 9.200 células solares aseguran una potencia instantánea del orden de algunas decenas de watios, suficientes para el funcionamiento de la máquina, principalmente de sus cámaras de televisión.

En el interior del satélite se encuentra un conjunto completo de aparatos que comprende, además de las dos cámaras y los dos radiómetros ya citados, un detector de horizonte infrarrojo y los dispositivos asociados, registro sobre cinta magnética, medios electrónicos de amplificación y de transmisión, alimentación de los sistemas electromecánicos.

La cámara gran angular de "Tiros" le permite operar, sea en directo, sea sobre registro magnético, con retransmisión diferida. Su eje

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

óptico es paralelo al eje del satélite. A 800 kilómetros de altitud puede fotografiar totalmente un cuadro de unos 1.200 kilómetros de lado, con un poder resolutivo de 3 kilómetros. La exploración de la imagen se hace sobre 500 líneas, a la cadencia de una imagen cada dos segundos. Es notable la extrema ligereza de esta cámara, cuyo peso total apenas pasa de 2 kilogramos. La porción de tierra explorada es de 7.000 kilómetros de largo y la anchura cubierta alcanza unos cincuenta grados de latitud.

En cuanto a los dos radiómetros montados a bordo de "Tiros", son de diferentes tipos:

— El primero, llamado radiómetro de baja resolución, permite separar de una parte la radiación térmica tierra-atmósfera y, de otra parte, la fracción de la radiación solar difundida por la tierra y la atmósfera. La superficie explorada por el aparato está incluída en el campo de la cámara.
— El segundo, llamado radiómetro de media resolución, restringe la medida a ciertos tipos de longitudes de onda y para superficies de suelo más reducidas (de 60 kilómetros de ancho aproximadamente). Las radiaciones incidentes son observadas en cinco amplias bandas.
— La banda de absorción del vapor de agua.
— La "ventana de transparencia" de la atmósfera.
— El albedo.
— La emisión térmica de la tierra y de la atmósfera.
— Una banda de control de las pruebas de la cámara.

Este segundo radiómetro está montado a 45° de inclinación del eje de rotación del satélite, lo que asegura un barrido a rotación continua durante el desplazamiento de aquél.

Vamos a decir ahora algunas palabras sobre la órbita del "Tiros".

Esta órbita es casi circular: siendo la altitud media del satélite de 800 kilómetros, dura cada revolución alrededor de cien minutos.

Desgraciadamente, a causa de la inclinación del plano de la órbita sobre el Ecuador, las regiones de latitud superior a unos 55°, es decir, las regiones polares, están excluídas del campo de explotación del "Tiros".

Además, el satélite, girando sobre sí mismo a una velocidad de cerca de 100 vueltas/minuto, su cámara no ve la tierra más que sobre 1/3 de la órbita. En realidad, el eje del "Tiros" no es absolutamente estable en el espacio, lo que necesita un reglaje continuo de la altitud verdadera del satélite, para permitir la programación de las tomas de vista.

Es evidente, asimismo, que aquéllas se encuentran limitadas al

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

hemisferio iluminado por el sol. Como la posición de este último respecto al plano de la órbita no es fija, la cámara puede solamente fotografiar una banda de latitudes que, durante ciertos períodos, se desplaza alternativamente del hemisferio Norte al hemisferio Sur y viceversa. En la práctica, esto se traduce en la imposibilidad de obtener fotografías sobre uno u otro hemisferio durante un período cuya duración puede alcanzar varias semanas.

Por último, aparte de estas limitaciones de origen astronómico, otras limitaciones, ligadas a la tecnología propiamente dicha del satélite, vienen a reducir aún más el campo de investigación.

Todo esto demuestra que no es posible, para un satélite meteorológico, efectuar una observación constante y extensa de nuestro planeta. En total, de las 14 órbitas diarias realizadas por "Tiros", solamente de 7 a 8 dan sin restricción informaciones fotográficas y radiométricas; además, ciertas regiones, como el Oriente Medio y el Sureste del Pacífico, se encuentran seriamente desfavorecidas. Los datos dados por "Tiros" son actualmente recibidos en dos puntos de los Estados Unidos, uno situado sobre la Costa del Este, en Wallops Island (Virginia) y, el otro, sobre la Costa Oeste, en Point Mugu (California), pero como se deduce de lo anteriormente citado, estos datos no son directamente utilizables. El primer problema que se presenta es el de la reconstitución geográfica de las fotografías. No es posible, dentro del marco de esta conferencia, desarrollar los métodos utilizados por el detector de horizonte y por la fotogrametría. Digamos solamente que la primera necesidad que se impone es la marcación minuciosa de la posición del satélite, marcación realizada gracias a una red de estaciones llamada red Minitrack.

Se admite actualmente que la precisión media en el cálculo de la posición del eje del satélite es de tres grados, lo que asegura una precisión de 35 a 40 kilómetros en visión vertical, pero se hace rápidamente insuficiente a partir de cierta oblicuidad.

Una vez las imágenes restituídas sobre mapas geográficos, las masas nubosas son interpretadas y transcritas bajo la forma de esquemas llamados Nephanalyses. Este trabajo de interpretación y de transcripción, efectuado por los equipos de meteorólogos, requiere unas tres horas después de la escucha del satélite.

Los Nephanalyses así puestos a punto, son primero difundidos por facsímil en el interior del Servicio Meteorológico Americano, y luego distribuídos a los otros servicios por medio de la red mundial de Telecomunicaciones Meteorológicas.

En esta fase, la Organización Meteorológica Mundial interviene eficazmente en la promulgación de los códigos de las reglas de transmisiones.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Indiquemos rápidamente el proceso utilizado para que todos los Servicios Meteorológicos del mundo que lo deseen puedan participar en la explotación de los "Tiros". Señalemos, ante todo, que los mensajes Tiros Alert, cifrados en forma simbólica, son difundidos por el Servicio Americano desde el lanzamiento del satélite y durante la duración de su vuelo. Indican las zonas que serán sobrevoladas por el satélite a horas determinadas, de manera que los países atravesados puedan en el mismo momento hacer observaciones meteorológicas especiales que vendrán a completar las observaciones del "Tiros". La difusión se efectúa sobre la red meteorológica de intercambios del hemisferio Norte; es retransmitida desde Honolulú, Miami y Offenbach, sobre los circuitos de estación a estación o por radioteletipo.

Por lo demás, los Nephanalyses establecidos por el Servicio Americano son difundidos por medio de mensajes cifrados bajo la forma simbólica NEPAN. Esta forma permite transmitir los datos sobre la cantidad, el tipo y la descripción de los sistemas nubosos por encima de una región. Las vías utilizadas para la difusión de los NEPAN son las mismas que para los TIROS ALERT.

Desde el 15 de abril, y a título de ensayo hasta final de junio, los nefanálisis son difundidos por facsímil para determinar si este sistema de ensayo deberá ser proseguido y mejorado en cuanto a frecuencias utilizadas actualmente. (Ver fig. 18.)

Finalmente vemos que, tanto para los datos obtenidos por satélites meteorológicos como para las otras observaciones, se ha establecido muy rápidamente una cooperación internacional eficaz, bajo la égida de la Organización Meteorológica Mundial.

No puede suceder lo mismo para los datos radiométricos que, en razón de su enorme volumen y de la complejidad de las correcciones a efectuar, son analizados en diferido por el centro de cálculo americano de Greenbelt (Maryland), que utiliza potentes calculadoras electrónicas, pero que ha empezado, sólo al final de 1961, a editar datos utilizables.

Como hemos visto, no es suficiente obtener fotografías por satélites. Es menester también interpretarlas y es esa una tarea delicada, a veces insegura y, en gran parte, subjetiva.

Sin embargo, la manipulación de decenas de millares de clichés, sistemáticamente confrontados con las observaciones meteorológicas clásicas, permite a los técnicos entrenados, comparables en cierta medida a los radiólogos, interpretar las imágenes con una aproximación suficiente, permitiendo determinar el género y el nivel de las nubes.

Para gran satisfacción de los meteorólogos, los primeros clichés de "Tiros" han aportado una confirmación experimental directa de los esquemas de los sistemas nubosos de la escuela francesa, definidos

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

desde 1923 y de los modelos teóricos de perturbaciones de la llamada teoría noruega. (Ver fig. 19.)

Los frentes cálidos, caracterizados por importantes formaciones de nubes estratiformes, son fácilmente identificables sobre las imágenes donde aparecen bajo un aspecto denso y amorfo. Los frentes fríos, que constan de una acumulación de nubes de desarrollo vertical, se identifican igualmente sobre las fotografías, en las que las nubes tienen un aspecto brillante, compacto y de contornos muy definidos.

Los dos clichés que van a proyectarse, ilustran bien la identificación por la imagen del esquema clásico de una perturbación. (Ver figuras 20 y 21.)

Mostremos en seguida un cliché en el que aparecen netamente importantes formaciones tormentosas, comprendiendo cúmulonimbos muy desarrollados. (Ver fig. 22.)

En otros casos, las nubes aparecen mejor organizadas. (Ver figuras 23, 24, 25, 26 y 27.)

Por otra parte, se conocen los estragos producidos por los ciclones que han atacado, durante el curso de los últimos años, territorios como Madagascar y la Reunión, los parajes del Mar del Caribe y las Costas de la Luisiana y de la Florida.

Importantes redes meteorológicas han sido puestas en marcha para detectarlos. Pero estas redes no son siempre suficientemente densas, y los ciclones, por razón de sus pequeñas dimensiones, pasan a menudo por lo menos al comienzo de su formación, entre sus mallas. El empleo simultáneo de aviones de reconocimiento y de radares panorámicos no permite tampoco resolver el problema completamente. Es aquí donde el satélite meteorológico aporta un medio de investigación tan eficaz como revolucionario: con uno o dos cichés solamente, el torbellino ciclónico y su centro pueden situarse con precisión. (Ver figuras 28 y 29.)

Como hemos visto, el ciclón, en las primeras fases de su desarrollo, es compacto, aproximadamente circular y las bandas espirales del torbellino comienzan apenas a formarse sobre la periferia.

Seguidamente, las bandas espirales se destacan más netamente, desarrollándose entre ellas alternativas de cielo despejado. En el centro del ciclón se forma lo que se llama "ojo", zona circular prácticamente sin nubes. (Ver fig. 30.)

Llegado a esta fase, el ciclón se desplaza sobre grandes distancias, siguiendo leyes aún en parte misteriosas; es por eso por lo que los nefanálisis de los satélites son todavía más valiosos. (Ver fig. 31.)

Vamos en seguida a proyectar un nefanálisis hemisférico, sobre el cual figuran 5 ciclones localizados por "Tiros". Gracias a esta locali-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

zación, los ciclones han podido ser seguidos eficazmente con los medios clásicos, es decir, con los aviones y radares. (Ver fig. 32.)

Este ejemplo de localización de ciclones por "Tiros" es particularmente espectacular. Verdaderamente este ejemplo hay que unirlo a otros muchos, y podemos decir que desde ahora es posible evaluar el importe, por valor de varios cientos de millones de dólares, de la riqueza ahorrada gracias a la acción del satélite, sin hablar, por supuesto, de las numerosas vidas humanas.

Tales cifras merecen ser citadas, porque, aparte del interés teórico de la experiencia, justifica ampliamente la importancia de los presupuestos consagrados a los satélites.

Digamos, para terminar, algunas palabras de los resultados suministrados por los radiómetros, de los que hemos hablado bastante, y particularmente por el radiómetro de resolución media.

Hasta el momento, la mayor parte de los estudios se han dirigido, sobre todo, hacia el dominio de 8 a 12 μ, generalmente calificado de "ventana de transparencia" atmosférica. Se trata, en efecto, de una zona de transparencia máxima, cuyo coeficiente es próximo a la unidad.

La emisión en esta banda puede expresarse por una "temperatura equivalente del cuerpo negro", haciendo referencia a la emisión teórica del cuerpo negro, según la ley de Planck.

La temperatura equivalente es, en este caso, un dato susceptible de una interesante interpretación. En efecto, en ausencia de nubes, el radiómetro recoge la emisión térmica directa de la superficie terrestre y la temperatura equivalente es, pues, aproximadamente la del suelo.

Si, por el contrario, existen nubes de espesor suficiente, el flujo radiativo recibido tiene por origen la parte superior de estas nubes radiando casi como un cuerpo negro.

Se obtiene, en estas condiciones, una temperatura equivalente que es, aproximadamente, la de la cima de las nubes, de donde puede uno deducir con una precisión suficiente *la altitud de la cima de las nubes.*

Es este un primer resultado, cuyo interés, tanto para la Meteorología como para la Aeronáutica, no escapará a nadie.

Por otra parte, si nos imaginamos sobre un mapa geográfico el conjunto de los datos radiométricos de la banda 8-12 μ, comprobaremos que los puntos de baja temperatura se reparten geográficamente, siguiendo los "thalwegs" que coinciden con las zonas de acumulación de nubes, o sea, con los *frentes.*

Este nuevo resultado representa una notable confirmación experimental del trazado de mapas frontológicos.

Pero podemos ir más lejos todavía y sustituir la noción de frente por la más general de límite de masas de aire. Se llega así a identi-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ficar las discontinuidades térmicas del mapa radiométrico en los límites de las *masas de aire* que evolucionan en la troposfera. (Ver fig. 33.)

Tenemos de este modo un resultado de gran interés, ya que permite en alguna forma la visualización de las masas de aire.

En fin, en lo que precede, no he mostrado más que los aspectos más directamente utilizables de los resultados radiométricos suministrados por "Tiros". Es por esto por lo que tengo que recordar lo que señalé anteriormente, es decir, la importancia de las medidas radiométricas para la investigación del problema de la circulación general.

Tales son, a grandes rasgos, las posibilidades de "Tiros" y los primeros resultados obtenidos.

Durante el curso de mi exposición he indicado algunas imperfecciones del aparato o las dificultades de interpretación de los datos; si hay aún algunos fallos e inexactitudes serán pronto remediados.

A pesar de todo, el balance de explotación de "Tiros" es ampliamente positivo; la existencia de los sistemas nubosos, la estructura de las nubes cumuliformes, se encuentran confirmados por las fotografías, así como la estructura de los ciclones cuya marcación resulta de gran utilidad.

En cuanto a las aplicaciones de las medidas radiométricas, autorizan a los meteorólogos a fundar sobre ellas las mayores esperanzas.

Estructura de los vientos, estructura de las nubes, estructura de las masas de aire... Desde hace algunos años los nuevos instrumentos, tales como el radar y el satélite, nos han permitido en ciertos casos confirmar las teorías ya antiguas, en otros casos revisarlas o precisarlas, pero, de un modo general, aumentar nuestros conocimientos de la atmósfera meteorológica y de su estructura, por lo menos, hasta 35 kilómetros de altitud.

Los nuevos y espectaculares medios de investigación no deben, sin embargo, autorizar una reducción de la densidad de la red de estaciones de observación convencionales, que pueden dar una masa regular y continua de observaciones meteorológicas sobre todo el Globo. Todo nuevo sistema de observación no hace sino completar el sistema ya existente. Aún diremos más: este sistema básico debe continuar mejorándose, especialmente en ciertas regiones donde existen lagunas, cuyas consecuencias son extremadamente molestas, en particular para el entudio de los climas o para la protección de la Aeronáutica.

Es por esto por lo que el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas ha aprobado una Resolución el 1 de agosto de 1961, por la cual los Gobiernos son invitados "a tomar medidas, aislada o colectivamente, con miras a crear estaciones meteorológicas de observaciones en las regiones en que la red mundial presenta graves lagunas". Con este fin, la ECOSOC aprobó igualmente "los esfuerzos desplega-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dos por la O. M. M. para elaborar un plan de red mundial de estaciones meteorológicas y para ayudar a los Gobiernos a poner en ejecución ese plan".

Simultáneamente, los nuevos medios deben ser fomentados y explotados. Abundando en esto las Naciones Unidas, han tomado una sensata decisión, el 20 de diciembre de 1961, durante el curso de la XVI Asamblea General, adoptando, por una gran mayoría, una Resolución sobre la cooperación internacional referente a la utilización pacífica del espacio extra-atmosférico.

Entre otras cosas, esta resolución encarga a la Organización Meteorológica Mundial presentar a la ECOSOC un informe sobre las disposiciones administrativas y financieras a tomar para favorecer el desarrollo de las investigaciones en Meteorología derivadas de la utilización de satélites.

Si tales programas pueden ser llevados a buen término bajo la égida de la Organización Meteorológica Mundial y gracias a la más amplia cooperación internacional, se habrá realizado un gran progreso en el desarrollo del conocimiento de los diversos campos de aplicación de la Meteorología en beneficio de todos sus usuarios.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

FIGURAS

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

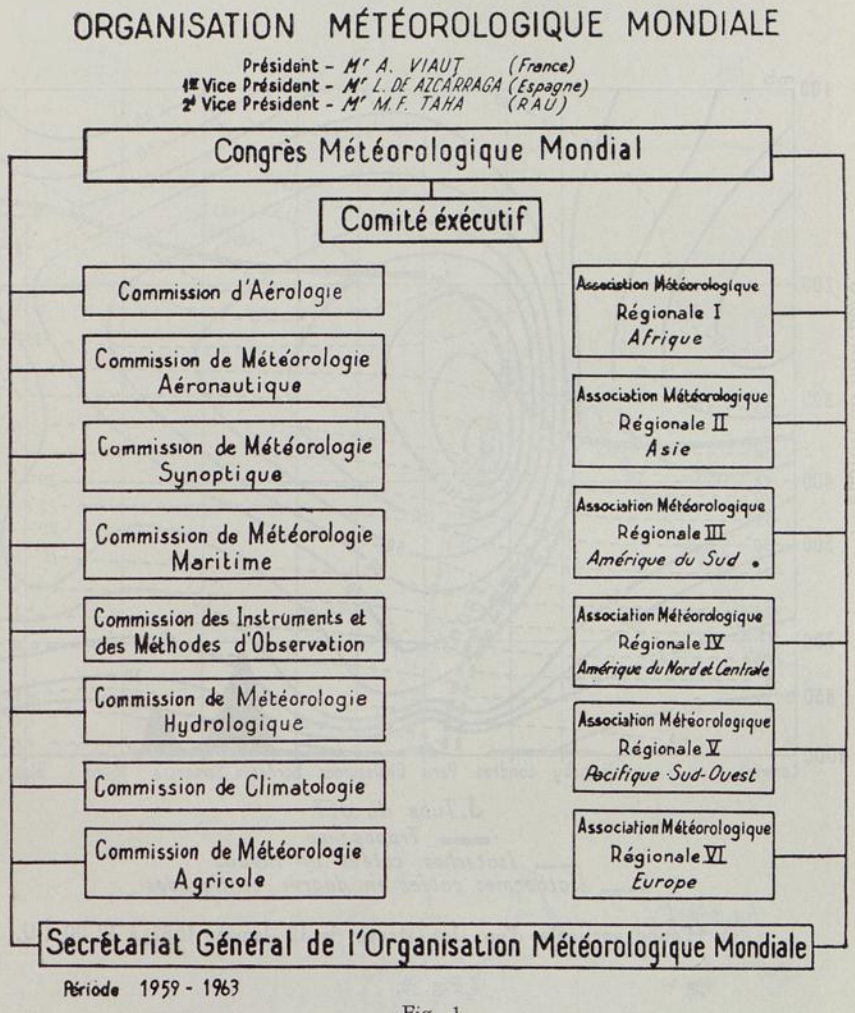
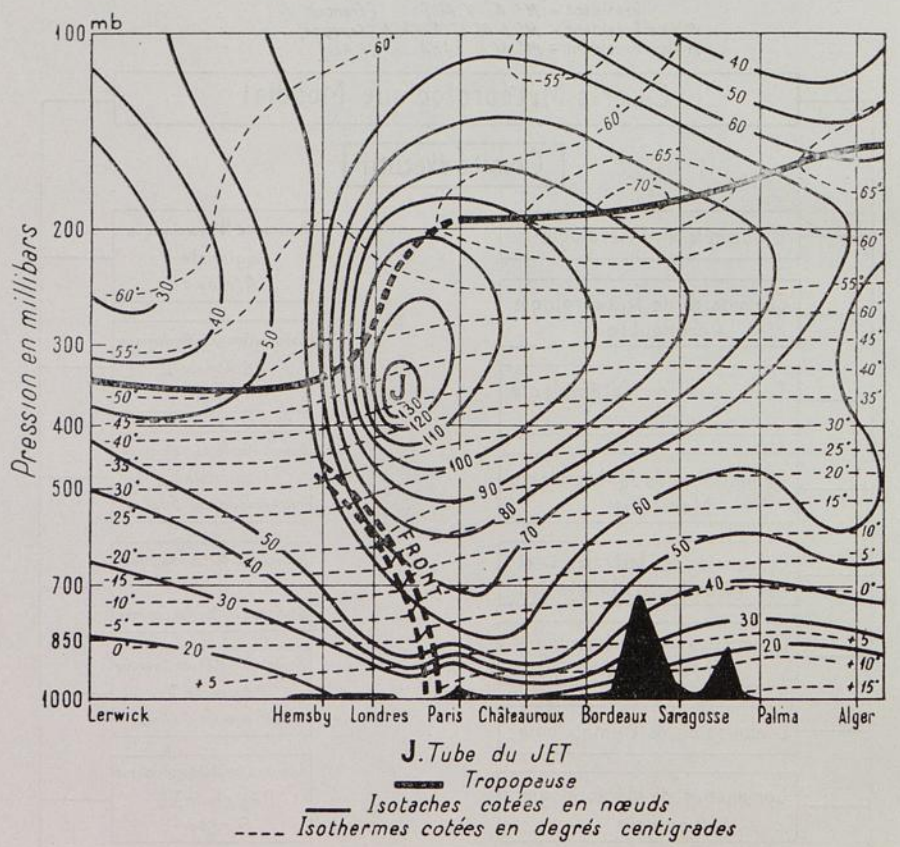


Fig. 1

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018



Coupe verticale d'un Jet-stream le 12 Janvier 1962 à 12.00 T U.

Fig. 2.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

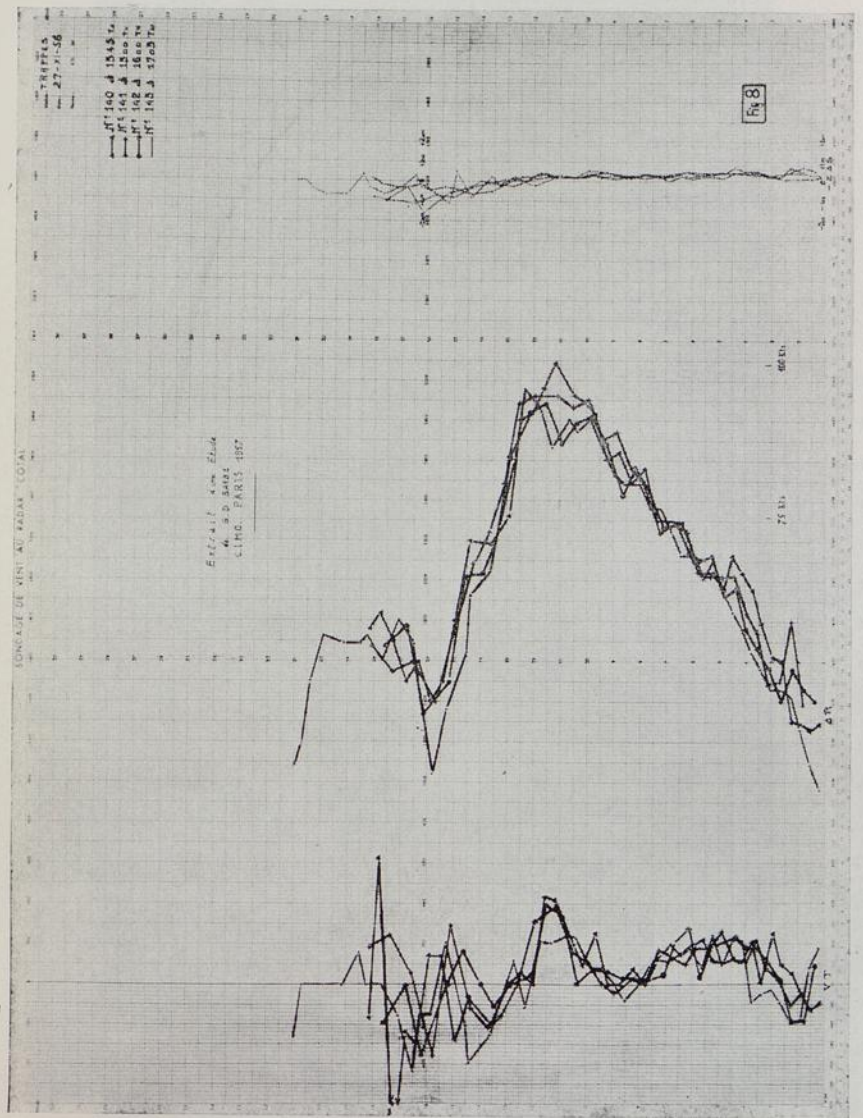


Fig. 3.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

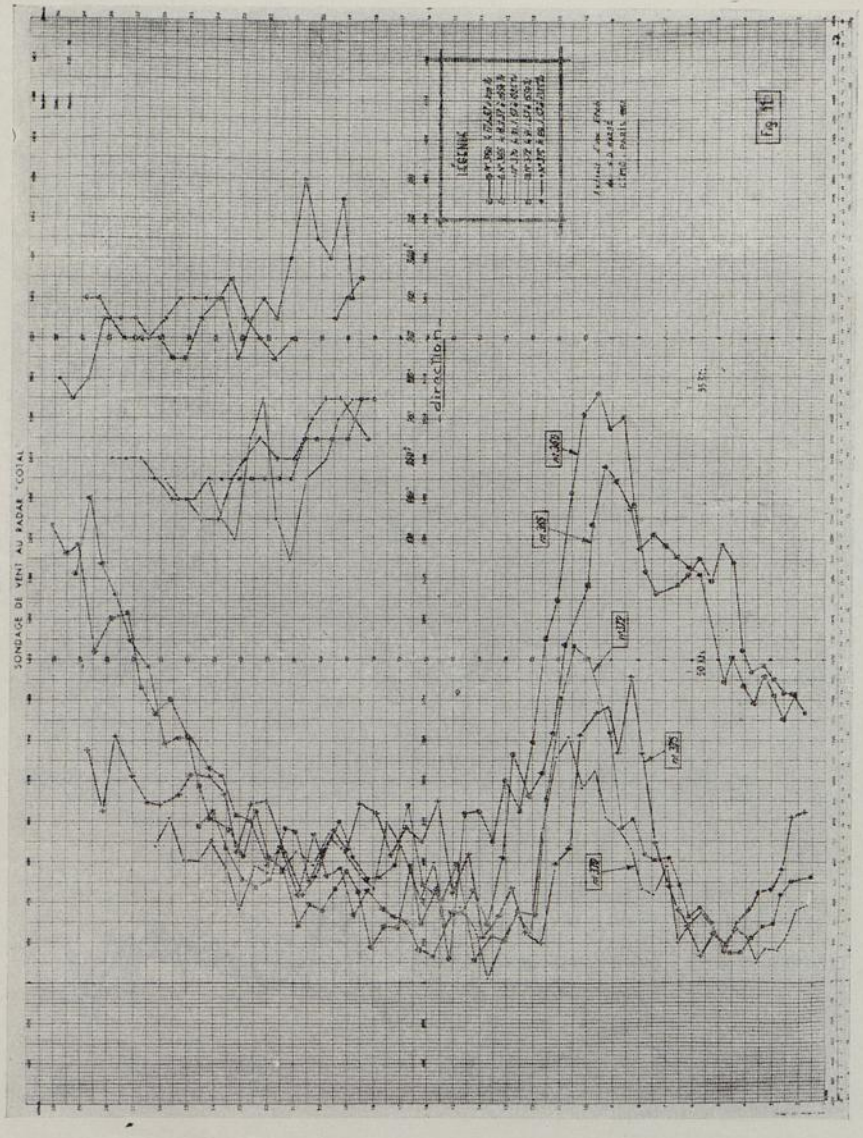


Fig. 4.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

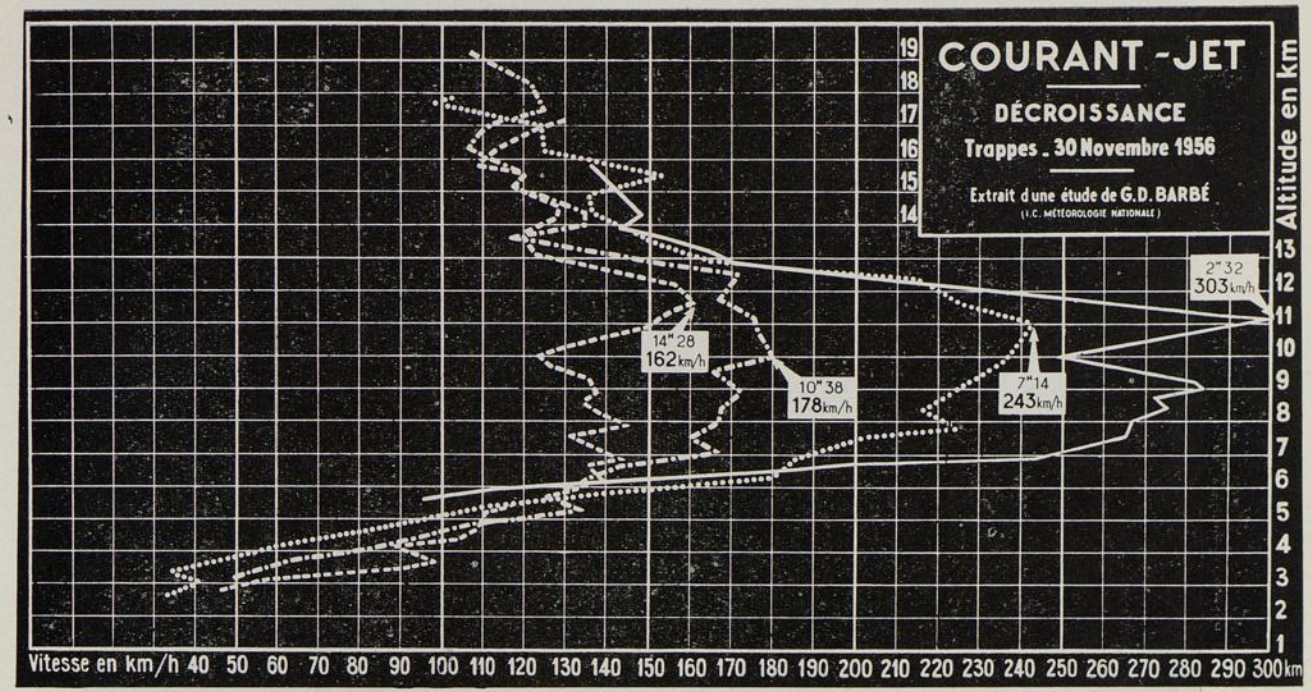


Fig. 5.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

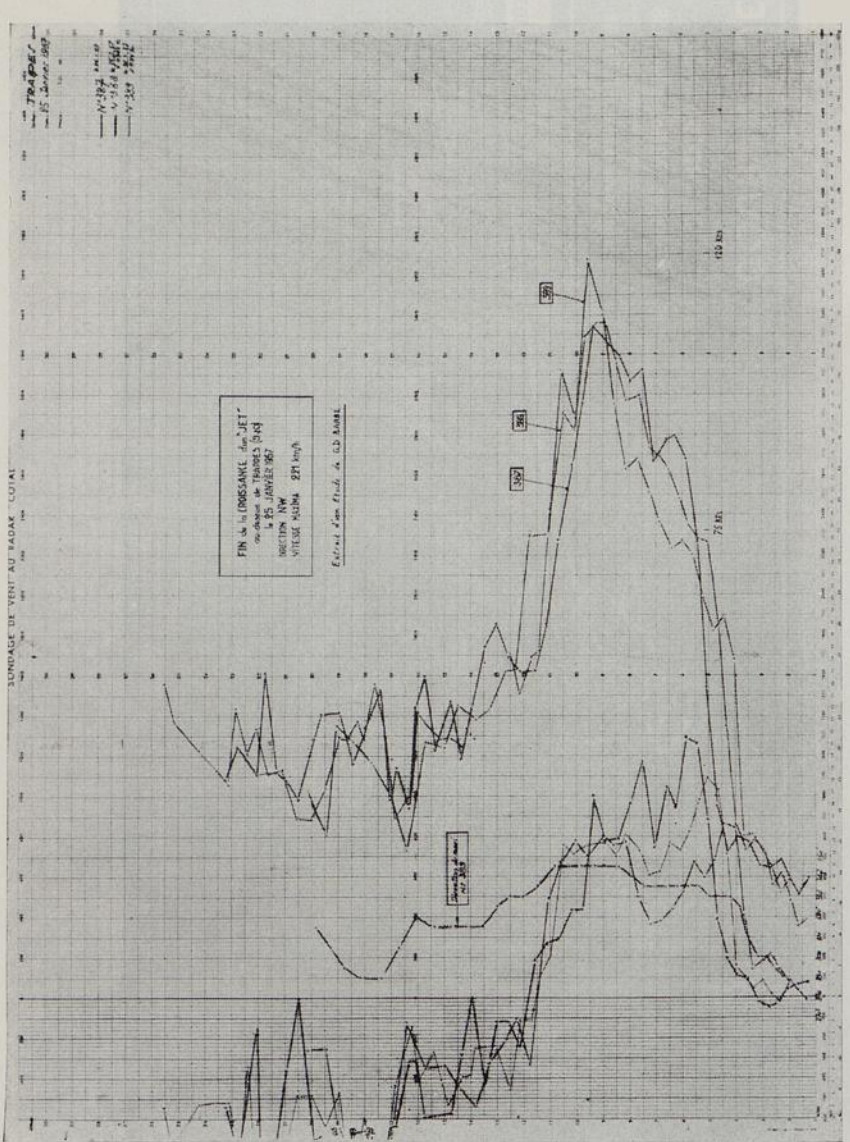


Fig. 6.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

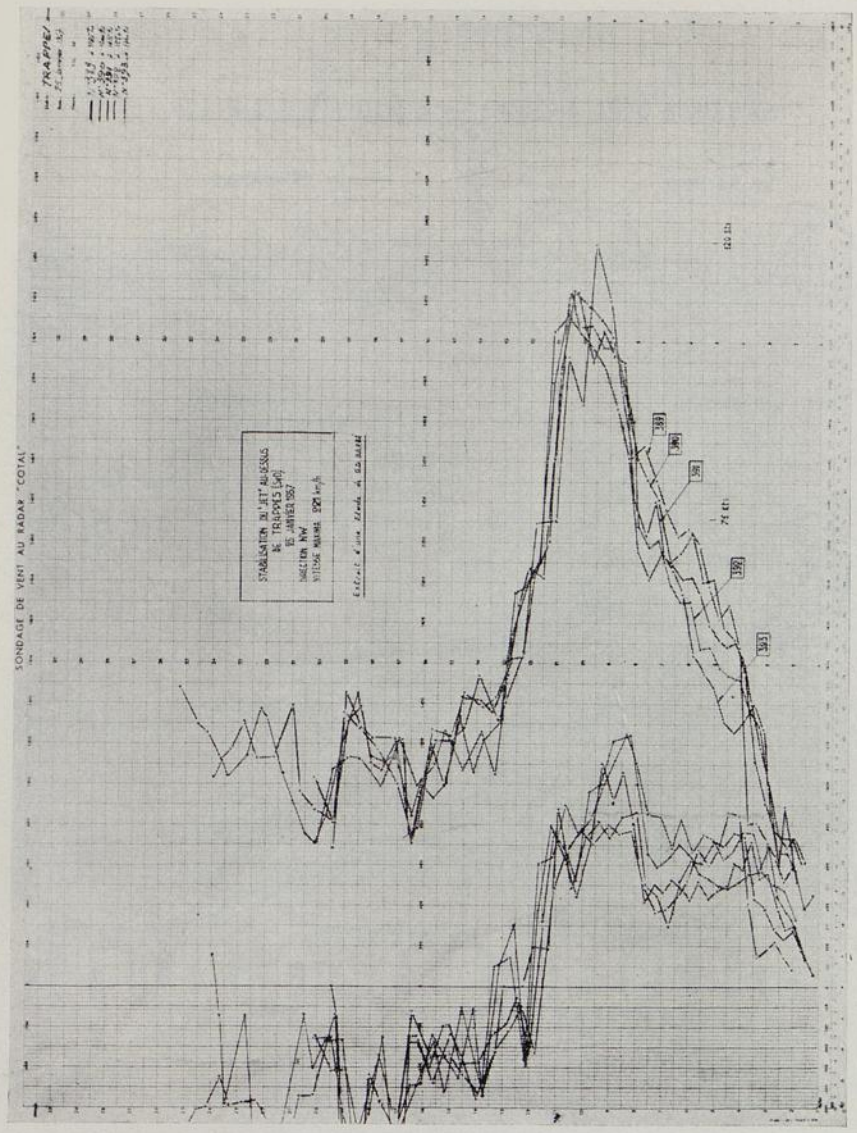


Fig. 7.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

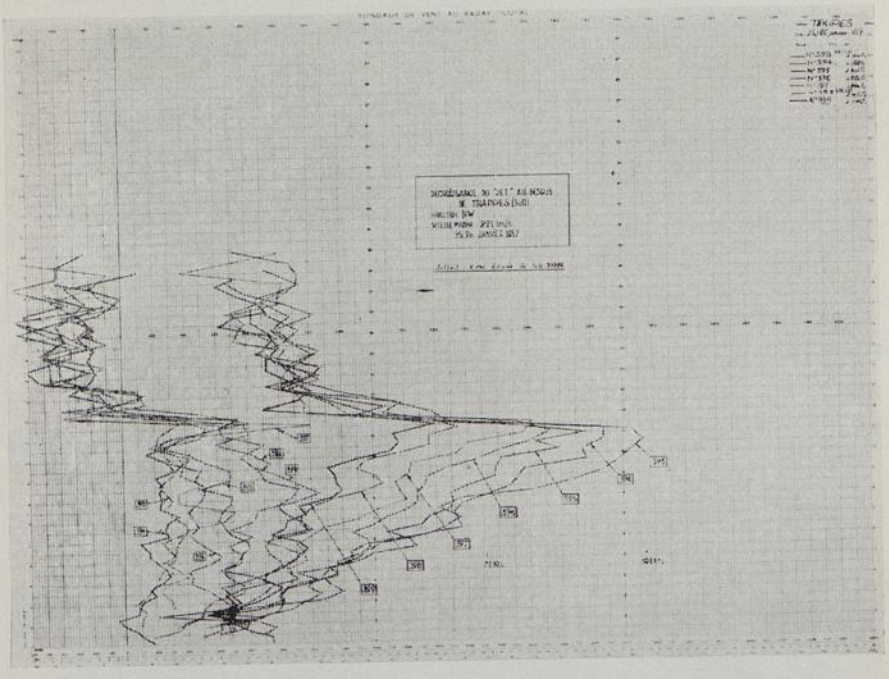


Fig. 8.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

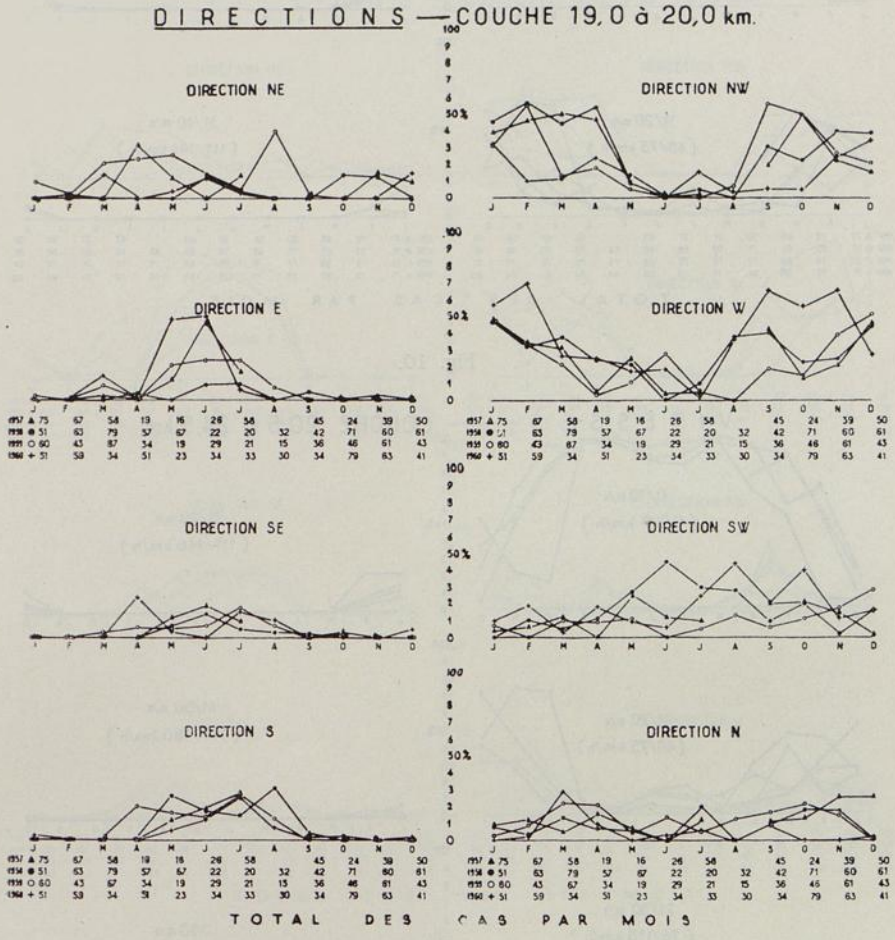


Fig. 9.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

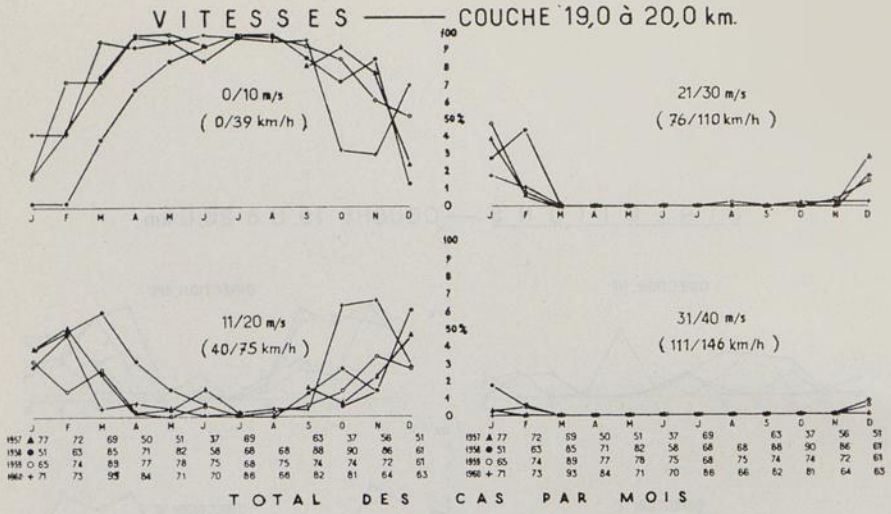


Fig. 10.

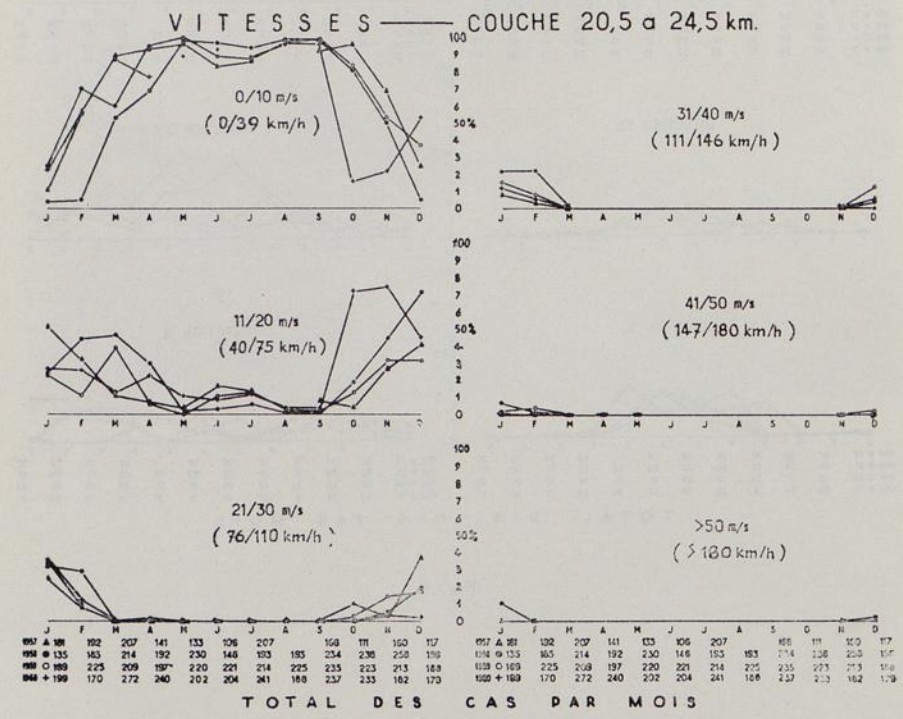


Fig. 11.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

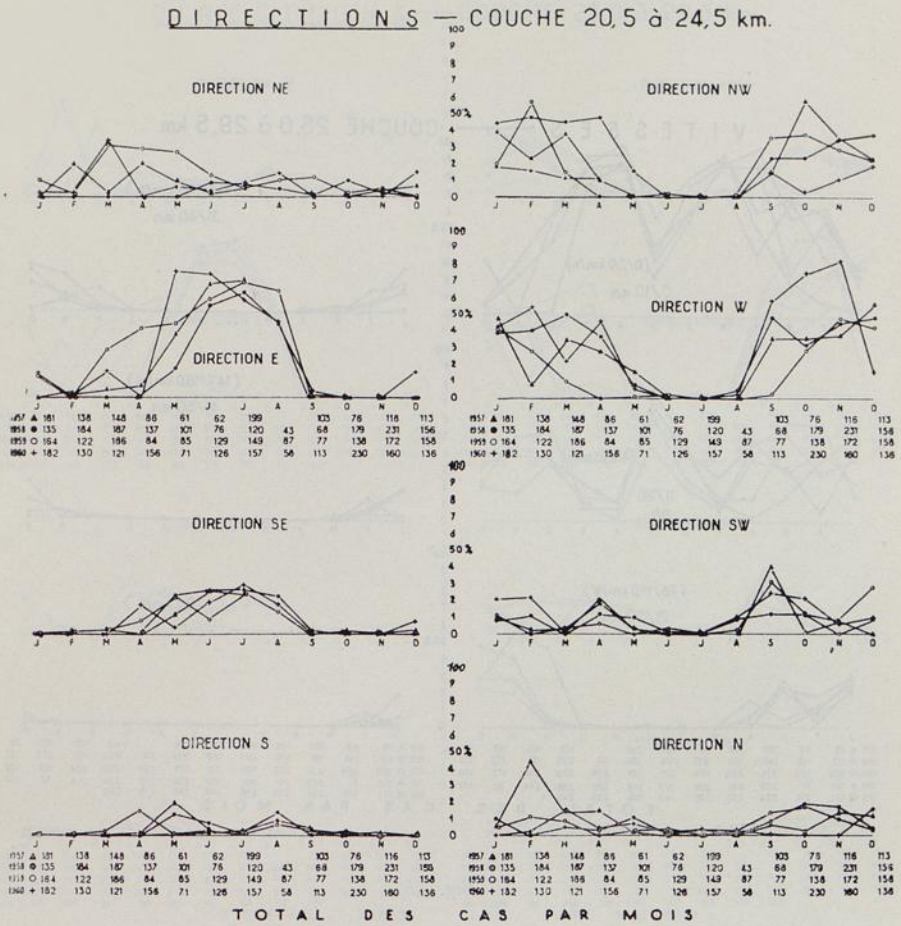


Fig. 12.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

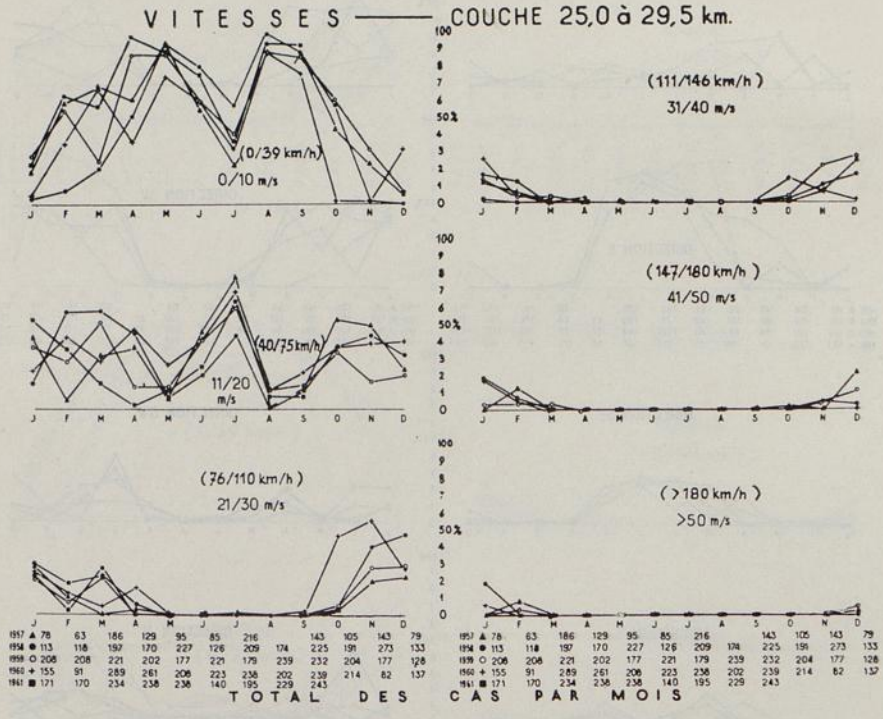


Fig. 13.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

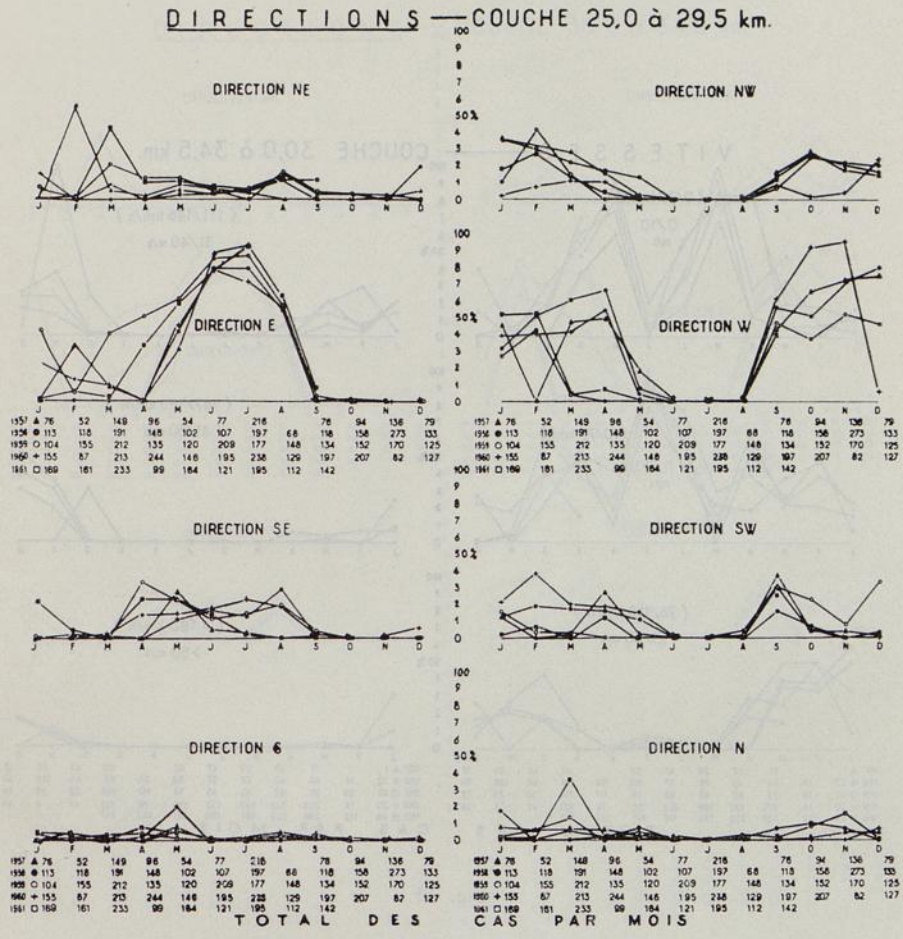


Fig. 14.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

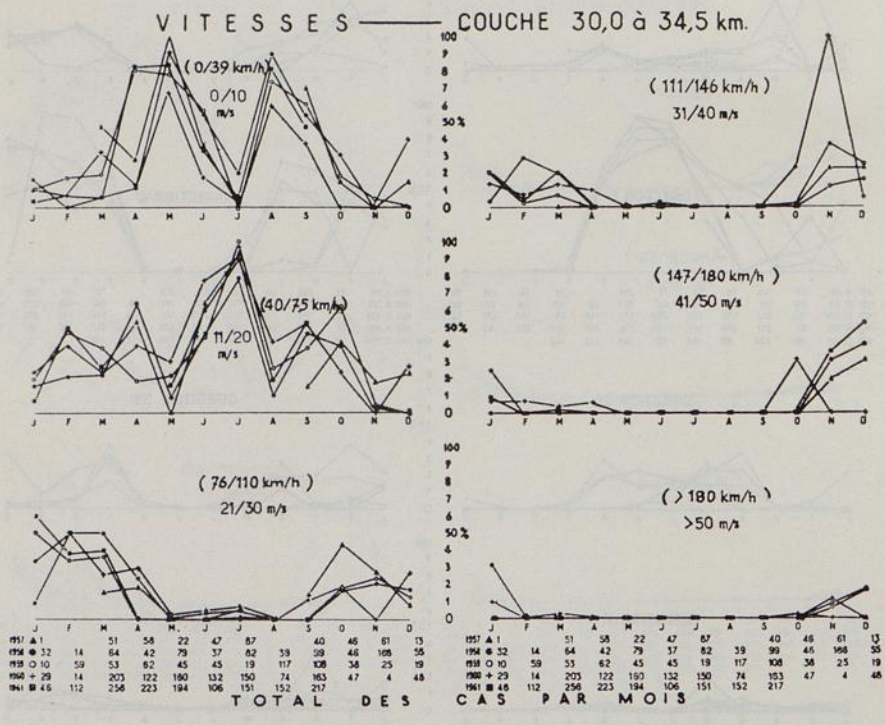


Fig. 15.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

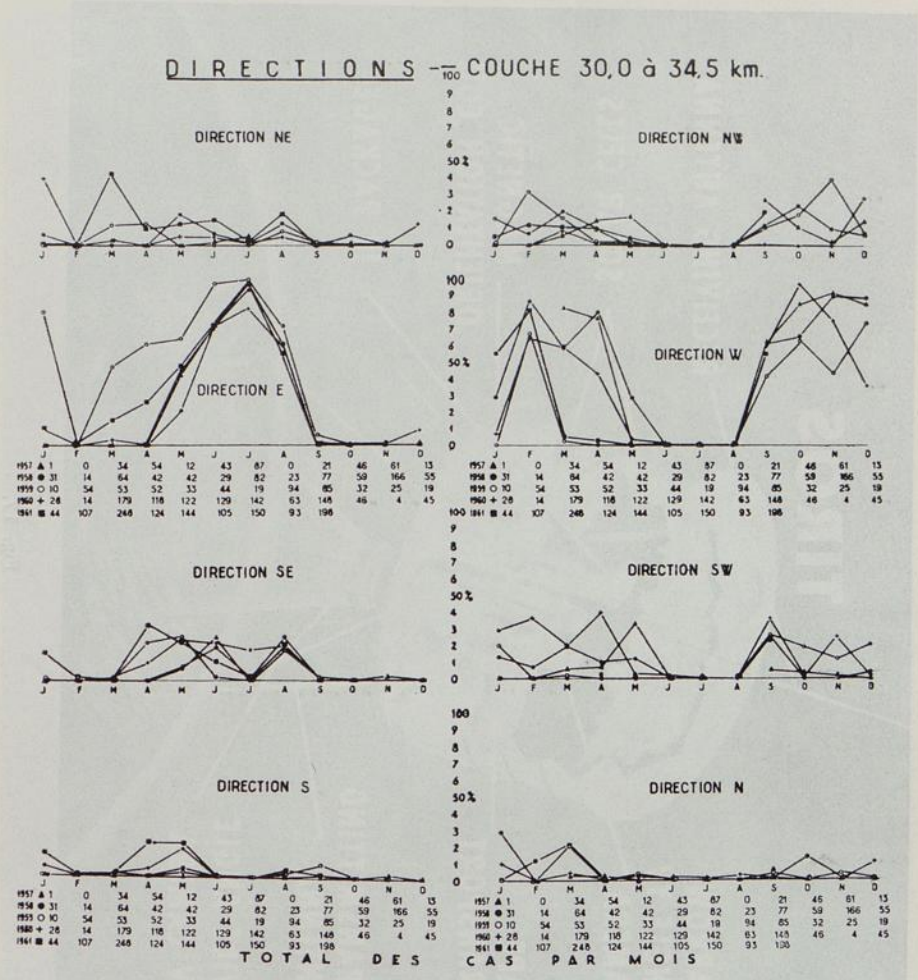


Fig. 16.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

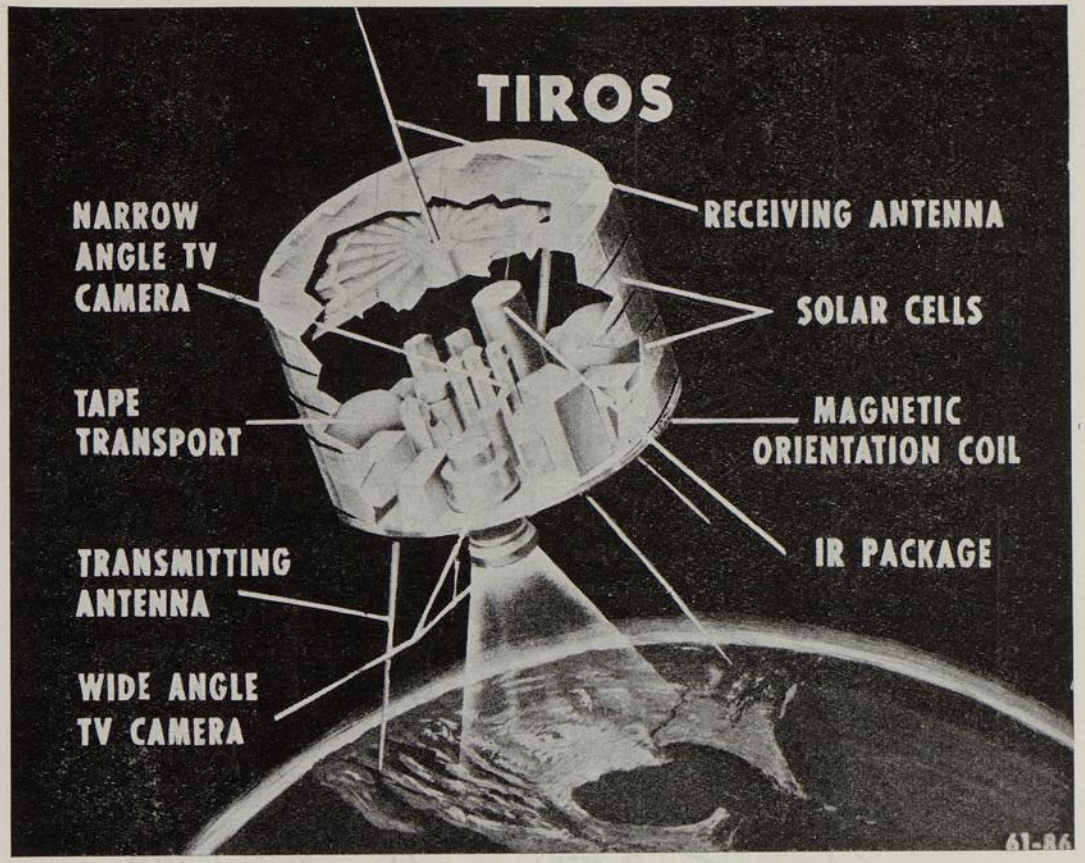


Fig. 17.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

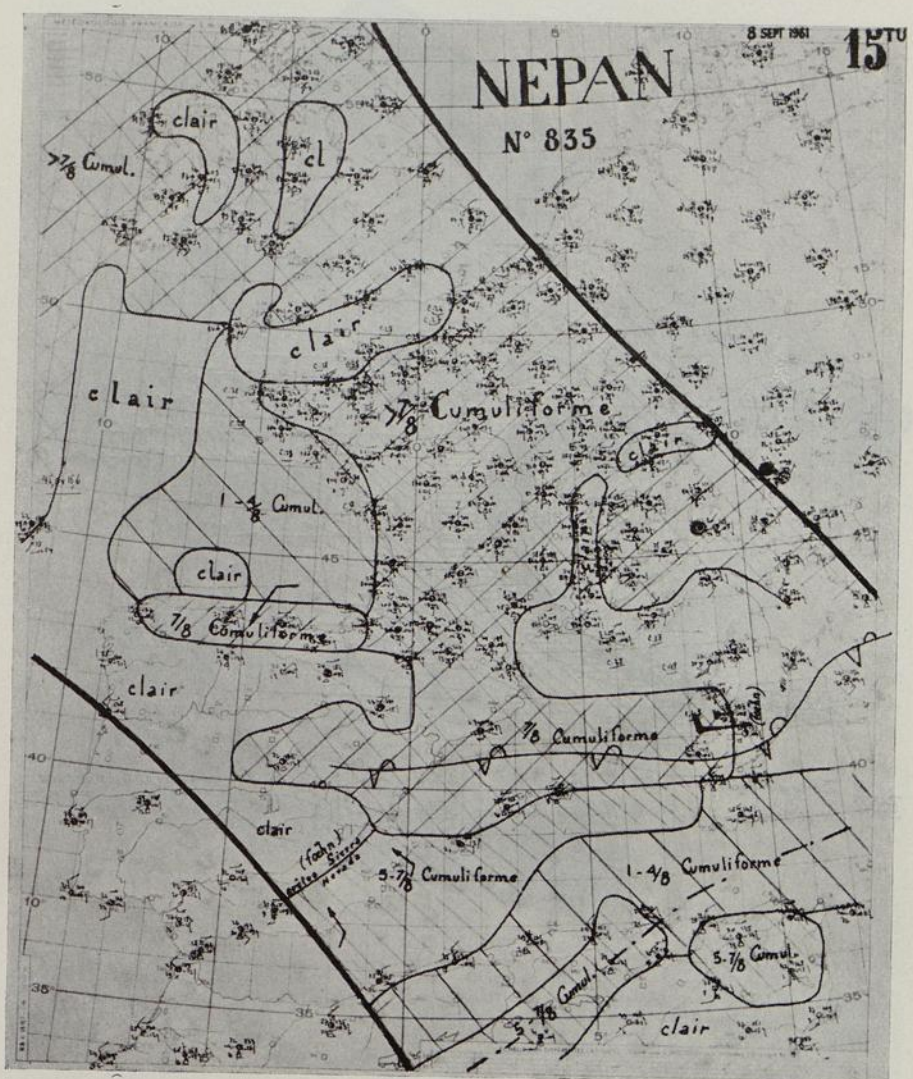


Fig. 18.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

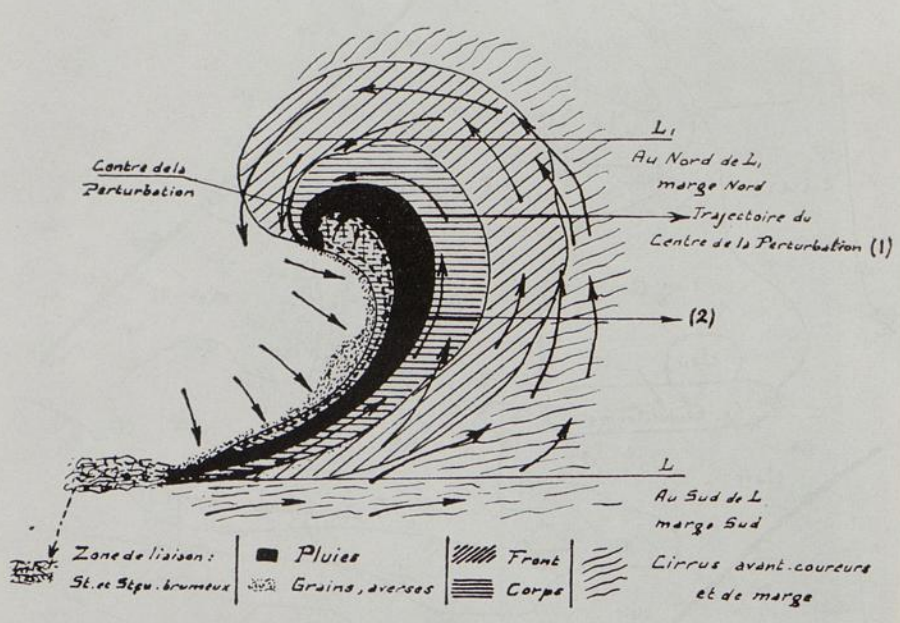


Fig. 19.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

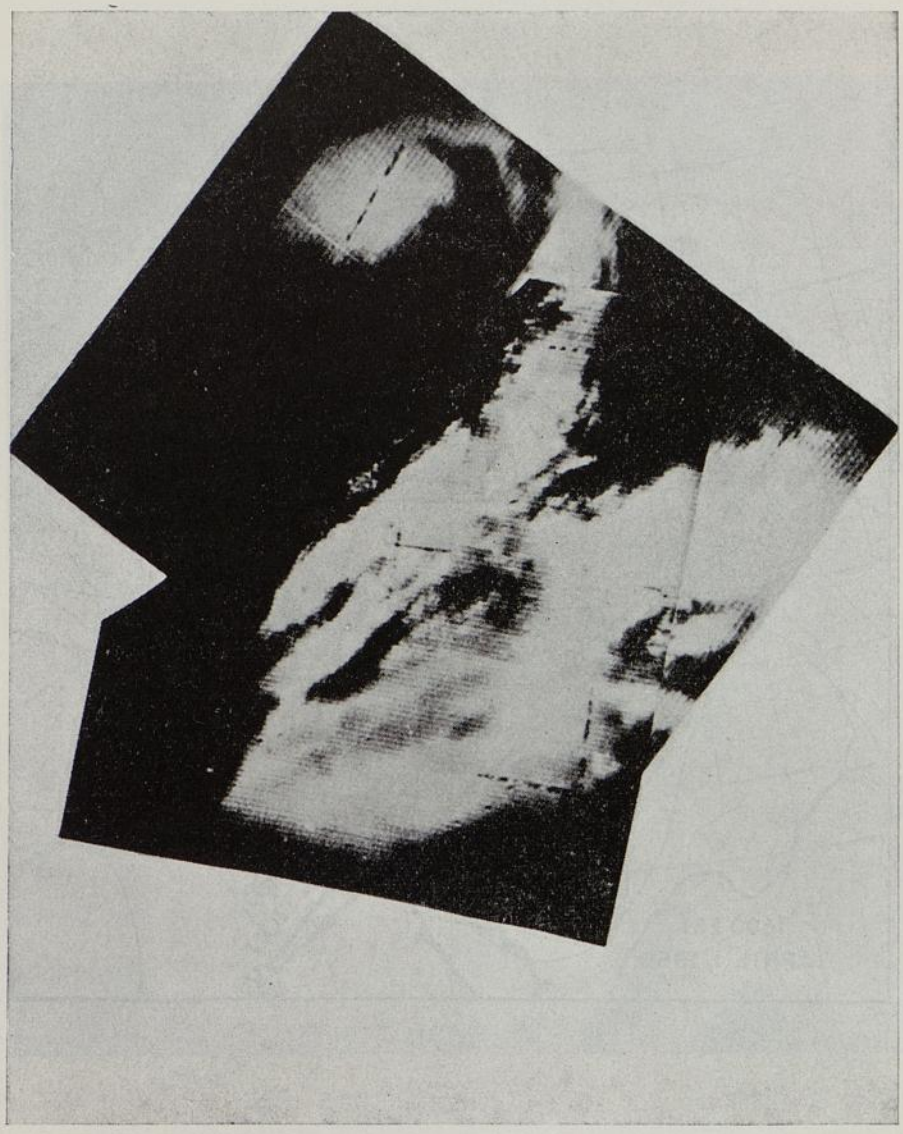


Fig. 20.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

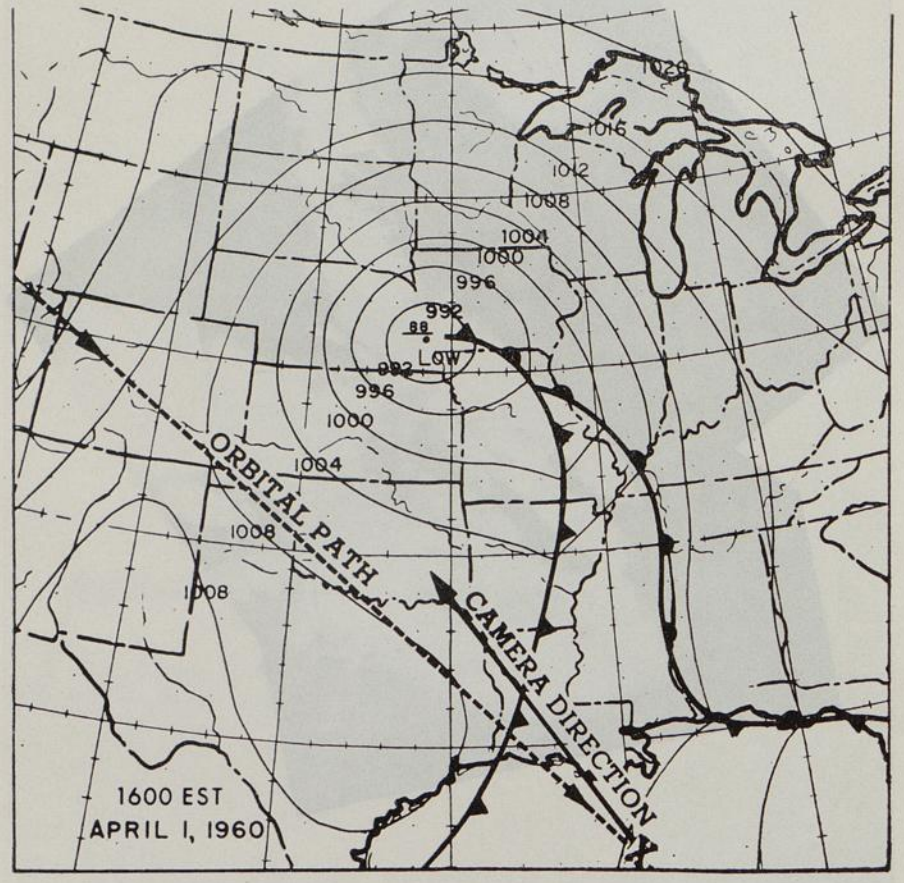


Fig. 21.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018



Fig. 22.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018



Fig. 23.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

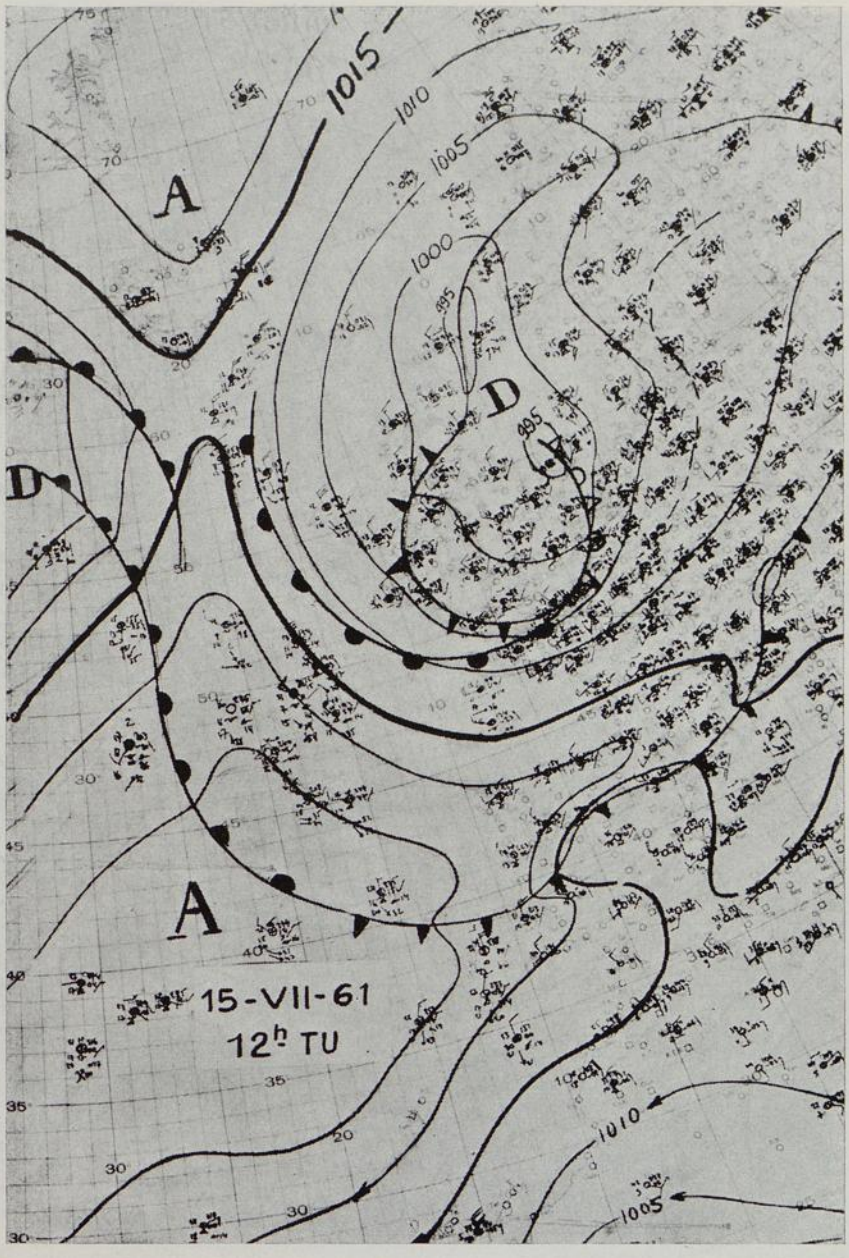


Fig. 24.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

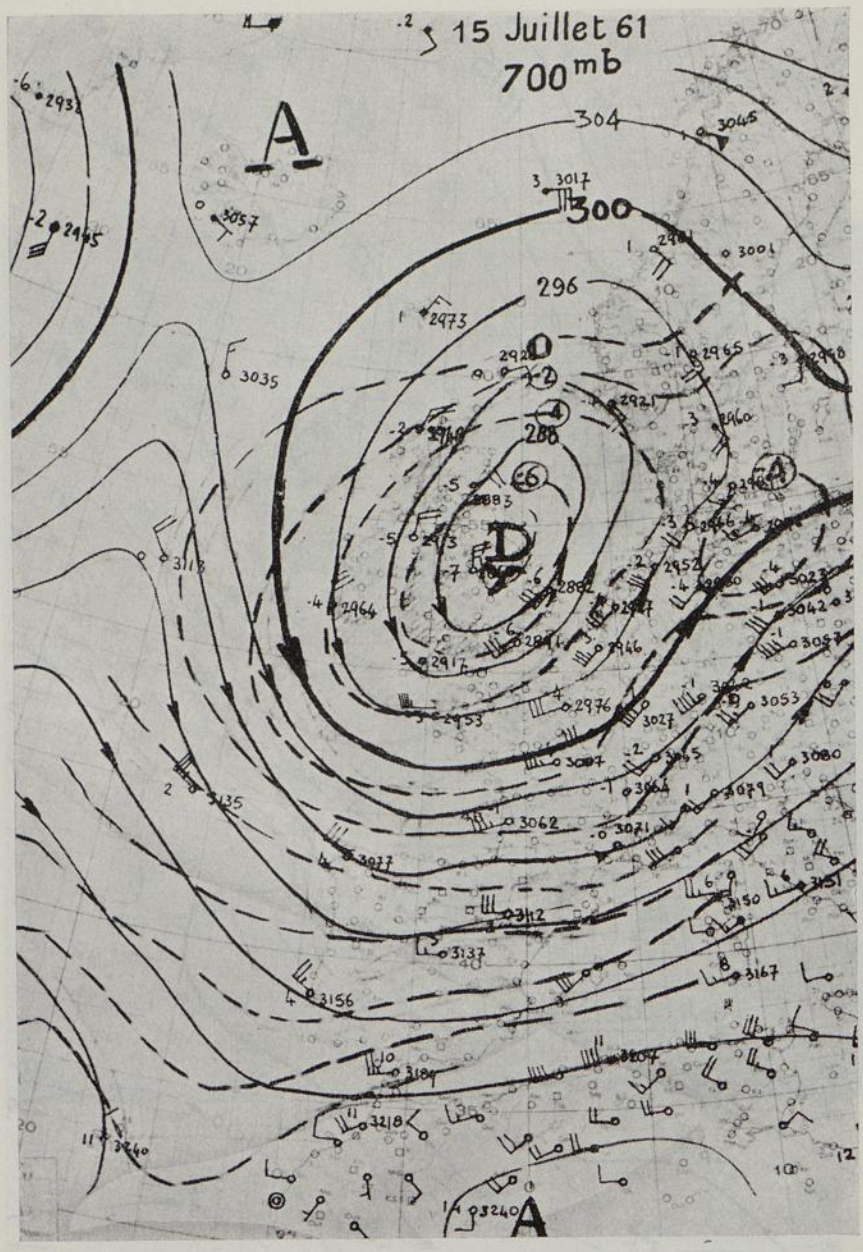


Fig. 25.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

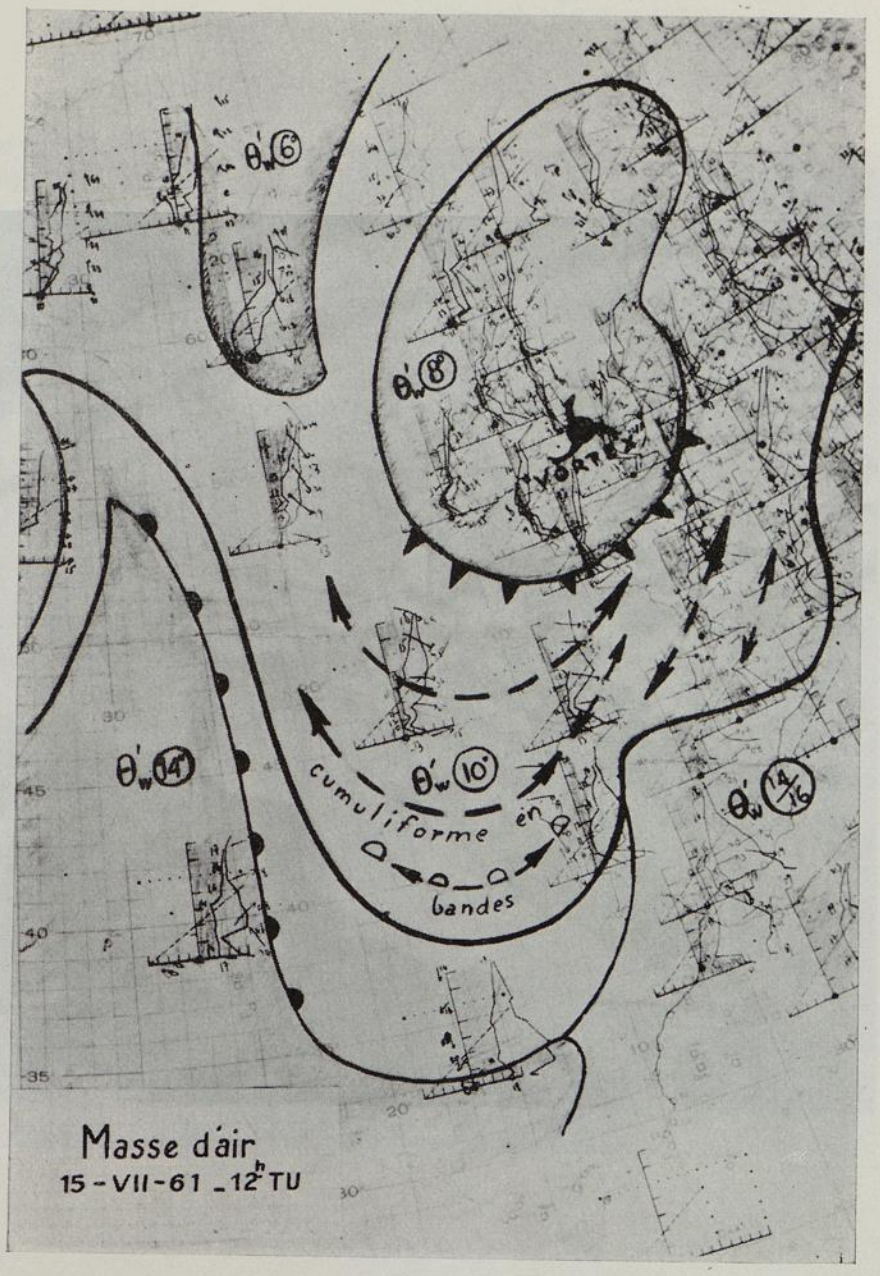


Fig. 26.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

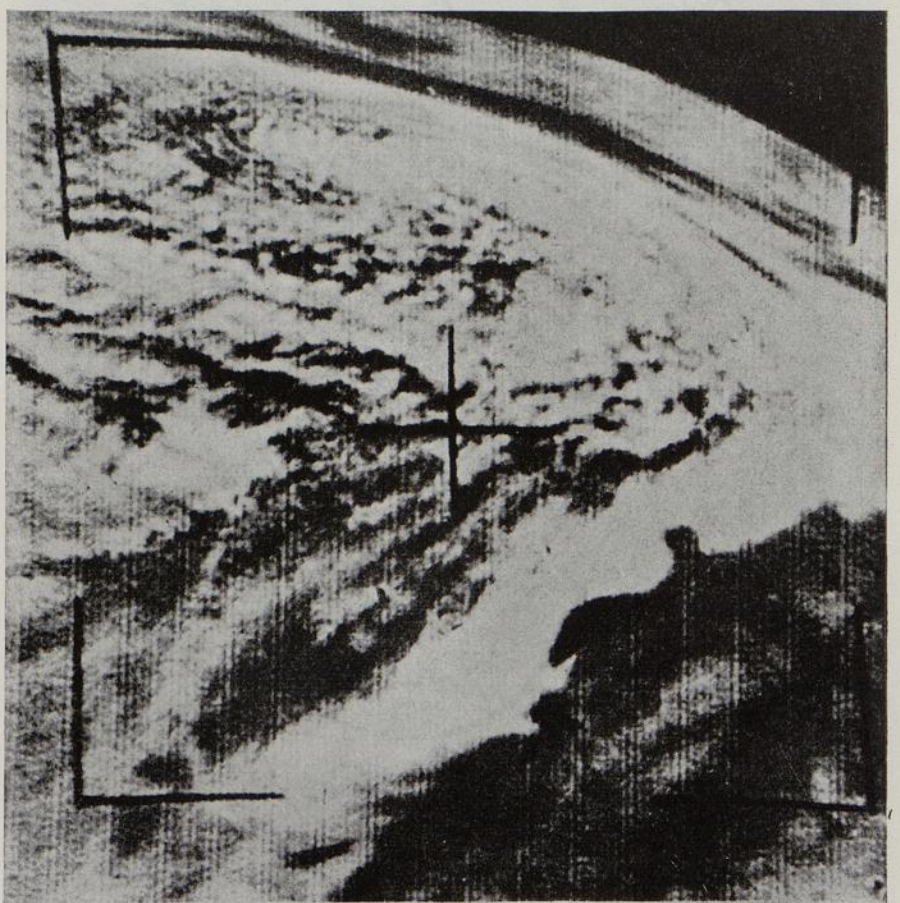


Fig. 27.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

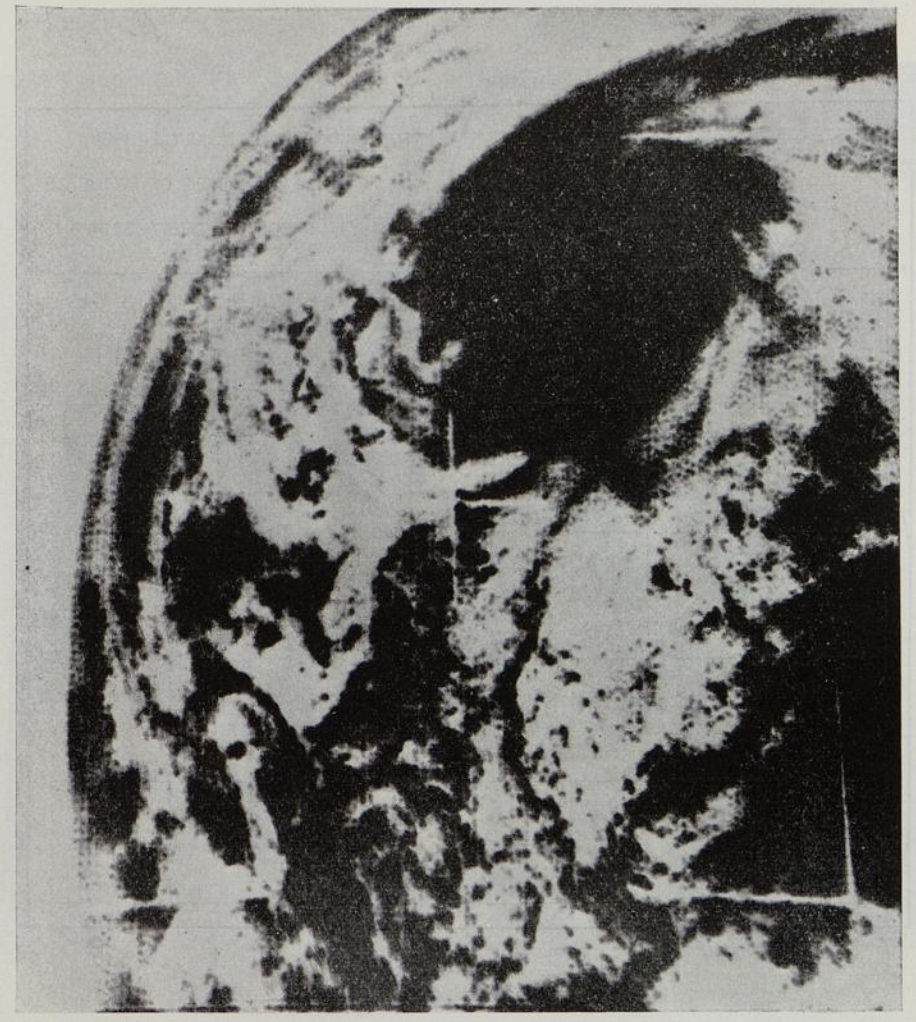


Fig. 28.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

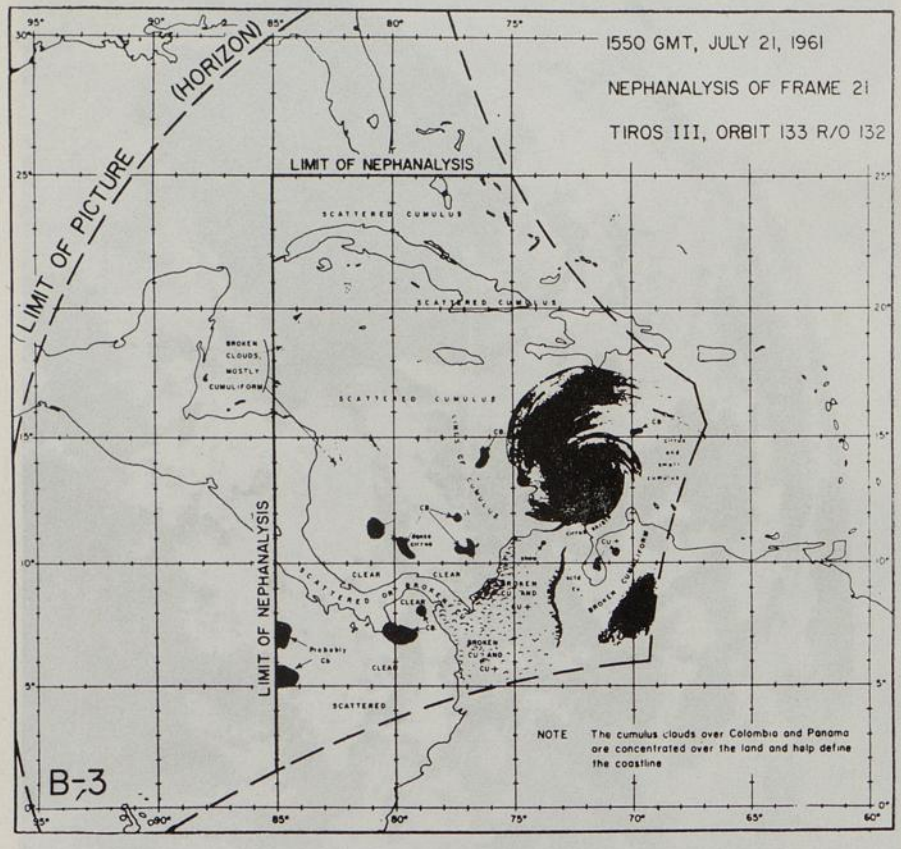


Fig. 29.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

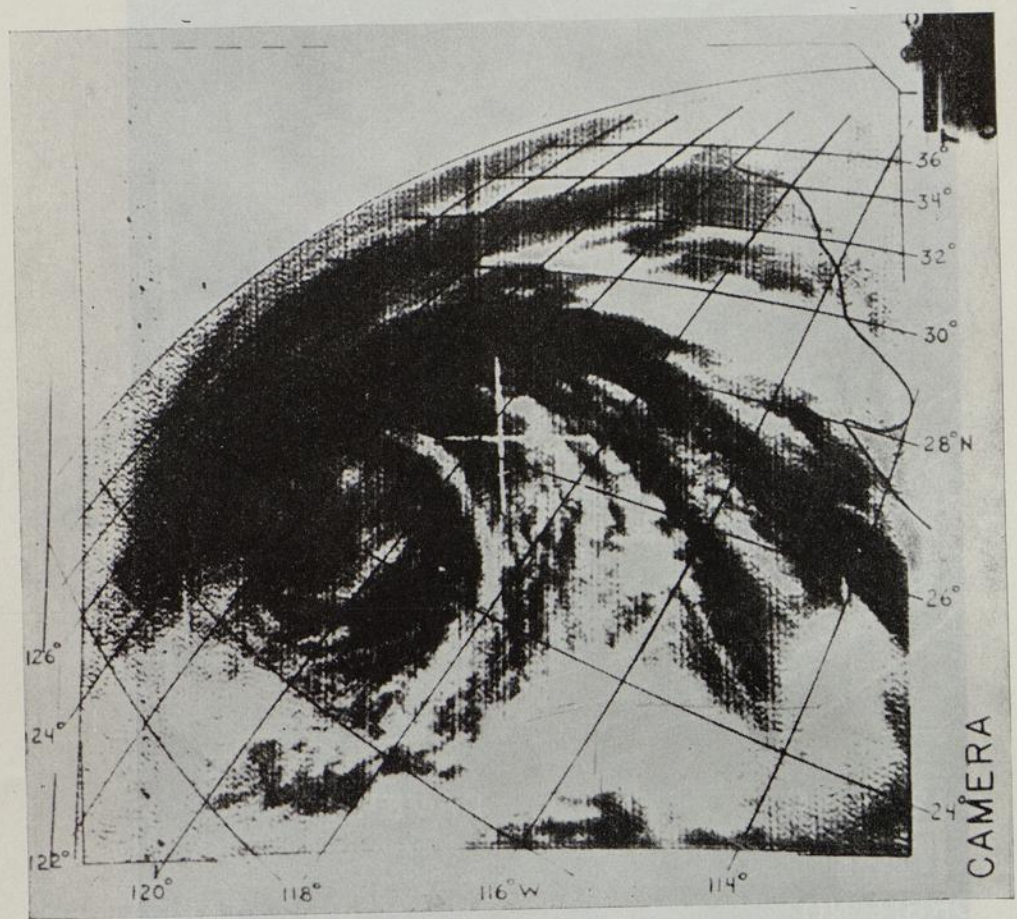


Fig. 30.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

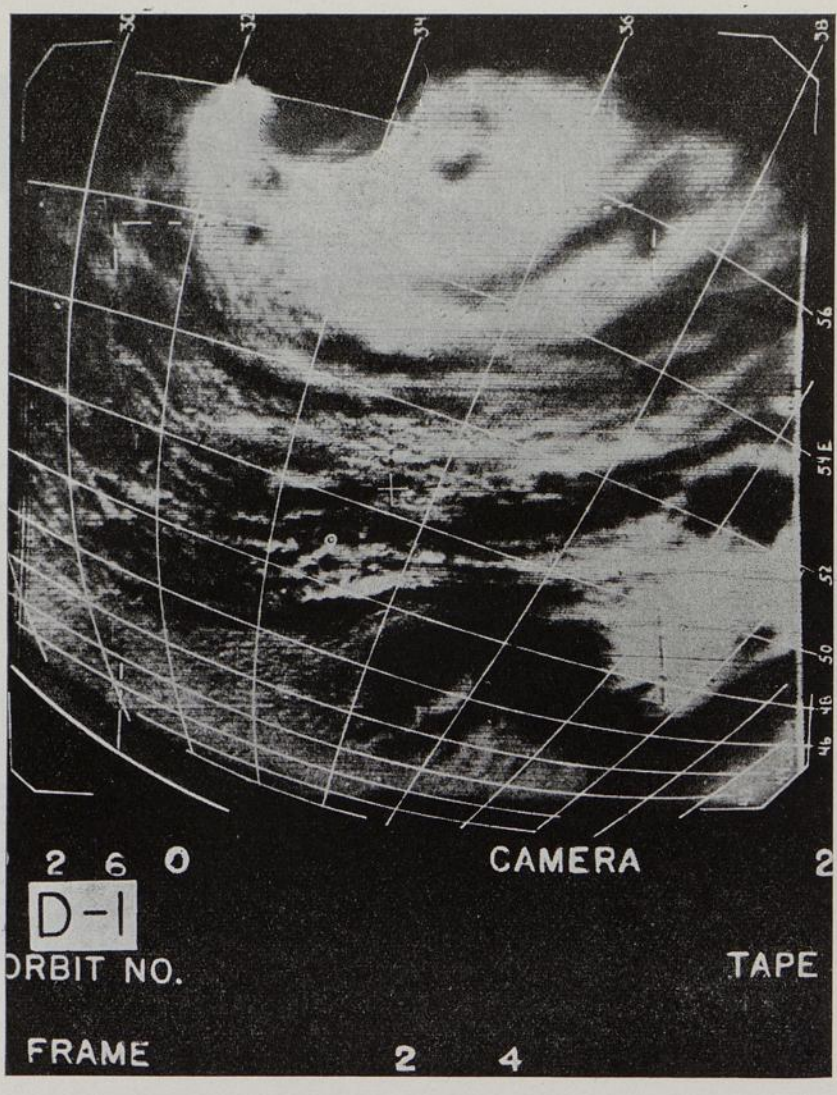


Fig. 31.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

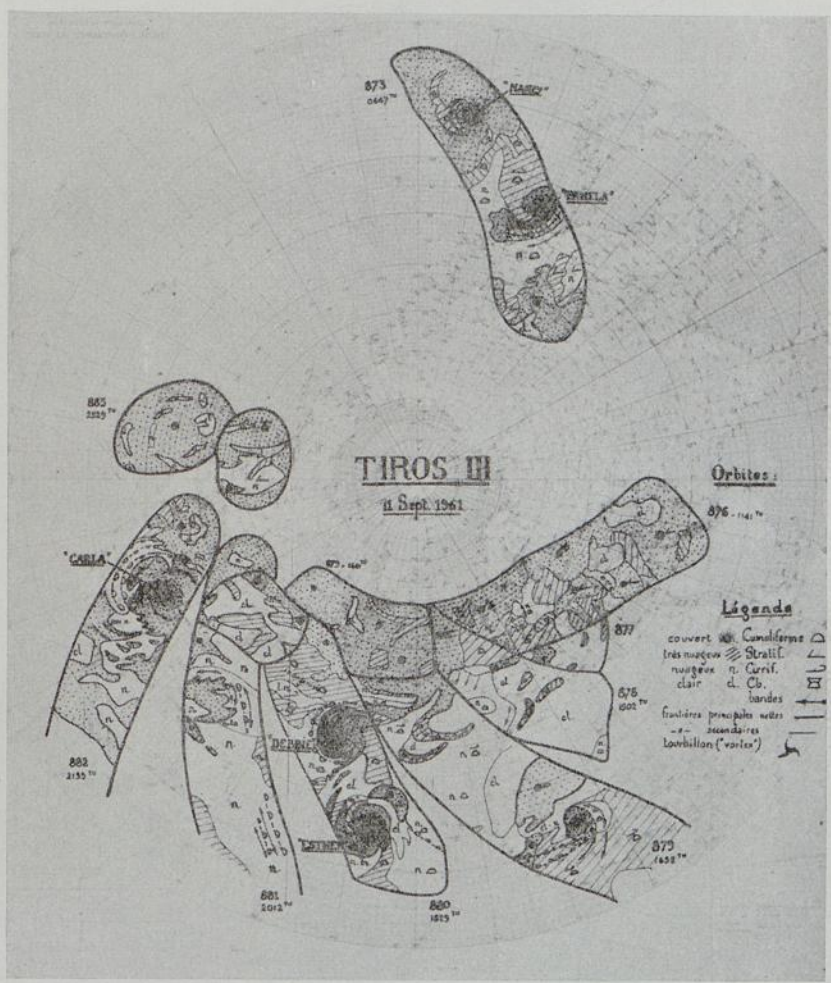


Fig. 32.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

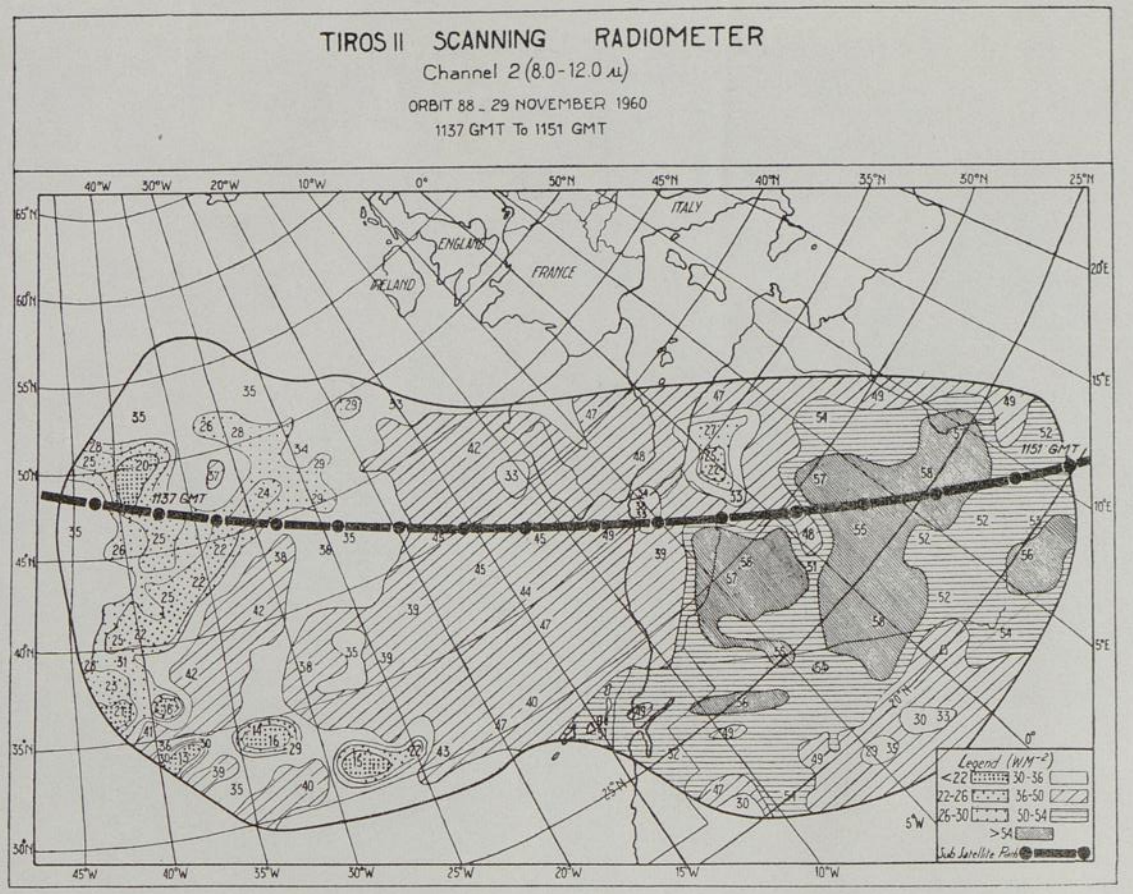


Fig. 33.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

II

LA ORGANIZACION, PARA INVESTIGACION CIENTIFICA, DEL SERVICIO METEOROLOGICO DEL REINO UNIDO

Conferencia pronunciada en Madrid el día 4 de mayo de 1962

por

Sir GRAHAM SUTTON, C. B. E., FRS.

Director General del Meteorological Office, U. K.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

LA ORGANIZACION, PARA INVESTIGACION CIENTIFICA, DEL SERVICIO METEOROLOGICO DEL REINO UNIDO

1. *Prólogo.*—"Meteorological Office" es el nombre del Servicio Meteorológico Estatal del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte. Fué fundado en 1855, siendo el primer Director el Almirante Robert Fitz-Roy. El Office forma parte, hoy día, del Ministerio del Aire, siendo el Director General responsable ante el Ministro del Aire, a través de la Subsecretaría permanente del Ministerio del Aire. El Secretario del Estado del Aire es un Ministro de la Corona y cambia con bastante frecuencia, generalmente, cuando se forma un nuevo Gobierno, después de unas elecciones generales, pero pocas veces durante la vida de un Gobierno ordinario. El Subsecretario permanente, por otra parte, es un funcionario civil y normalmente conserva su cargo durante muchos años. No abandona su puesto por cambio del Gobierno y su situación, como la del Director General del Servicio Meteorológico, no está afectada por cambios políticos.

2. El Servicio Meteorológico es uno de los más importantes de entre los muchos organismos científicos estatales del Reino Unido. Su plantilla es de 3.500 personas y el presupuesto anual es alrededor de unos 5 millones y medio de libras (o sea, 900 millones de pesetas al cambio actual).

Este dinero forma parte del total asignado por el Parlamento al Ministerio del Aire.

Las funciones generales del Servicio Meteorológico son:

(I) la prestación de servicios meteorológicos a la Armada, Reales Fuerzas Aéreas, Aviación Civil, Marina, Departamentos civiles del Gobierno, corporaciones públicas, prensa y radiodifusión y al público en general;

(II) la organización de las observaciones meteorológicas en el Reino Unido y en ciertos sitios del extranjero;

(III) la recolección, distribución y publicación de información meteorológica de todas las partes del mundo;

(IV) el mantenimiento de ciertos Observatorios británicos y la publicación y distribución de su información magnética y sismológica;

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

(V) investigación en meteorología, geomagnetismo y sismología.

3. De las funciones arriba expuestas, las comprendidas en los capítulos (I) a (III) constituyen los que, en términos amplios, pueden ser llamados "servicios". Hoy intento concentrar mi atención en los dos últimos de la lista que pueden calificarse como "investigación". Esta división está reconocida en la estructura del Servicio Meteorológico, que tiene dos directores, de servicios y de investigación respectivamente, responsables ante el Director General.

Es, sin embargo, importante reconocer que no hay división rígida entre ambas funciones y, en la práctica, el personal operacional (servicios) y el de investigación, es libremente intercambiable y, en su mayoría, trabajan en el mismo edificio.

4. Antes de tratar de los objetivos y métodos de las investigaciones, debo hacer una breve referencia a la estructura de la organización del personal. El Servicio civil científico del Gobierno británico tiene tres clasificaciones principales:

(a) Funcionarios científicos.
(b) Funcionarios experimentales.
(c) Ayudantes científicos.

La *clase del funcionario científico* está compuesta de graduados en Matemáticas y Ciencias. Se les considera como los cerebros "directivos y creadores" del Servicio y los puestos científicos más elevados se nutren, sin excepción, de sus filas. Los nombramientos se hacen normalmente como resultado de entrevistas realizadas por la Comisión del Servicio Civil (en presencia de representantes del Office), de aspirantes que han alcanzado las calificaciones académicas necesarias, pero a veces, el Office recluta a su personal directamente, al principio, de forma eventual. La mayoría de los puestos son permanentes y con derecho a pensión.

La *clase de funcionarios experimentales* está formada, en parte, por licenciados y, en parte, por aquéllos que ingresaron con el nivel normal de enseñanza superior y han recibido posteriormente instrucción en el Office. Los *Ayudantes* son no licenciados pero con enseñanza adecuada. La mayoría de estos puestos son, además, permanentes y tienen derecho a pensión. La investigación está dirigida principalmente por funcionarios científicos, con ayuda de los oficiales experimentales y de los ayudantes. En el Servicio Meteorológico existen hoy día unos 150 funcionarios de la clase de personal científico y alrededor de 750 funcionarios experimentales.

5. *Organización.*—La investigación absorbe una parte proporcionalmente grande del esfuerzo científico de Office. Como es obvio, no todas las ramas de la Meteorología están atendidas en la misma me-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dida. Debe hacerse alguna selección. Se demostró que es preferible dividir los estudios de investigación en dos amplios grupos, dinámico y físico, cada uno de los cuales está dirigido por un comisario-director, responsable ante el Director de Investigación. Por debajo de estos comisarios-directores hay varios departamentos que se ocupan de tareas especializadas. La organización se indica abajo (diapositiva).

DIRECTOR DE INVESTIGACION

COMISARIO-DIRECTOR (INVESTIGACION DINAMICA)

Investigación dinámica	Investigación sinóptica	Investigación climatológica	Investigaciones especiales

COMISARIO-DIRECTOR (INVESTIGACION FISICA)

Observatorios y Micrometeorol.	Física atmosférica	Estudio de la alta atmósfera	Desarrollo de instrumental

La mayoría de los nombres se explican por sí mismos, pero algunas notas adicionales pueden hacer la división más clara.

La "Investigación dinámica" cubre investigaciones matemáticas en sistemas atmosféricos en media y gran escala. Actualmente, el esfuerzo principal de esta rama está concentrado en el desarrollo de la predicción numérica, empleando un moderno calculador de alta velocidad. Más adelante, empezará el trabajo sobre la dinámica de la circulación general utilizando un calculador aún mayor.

El departamento de estudios sinópticos trata principalmente de los problemas del predictor, en particular, de la discriminación de los procesos dinámicos y termodinámicos, asociados a los sistemas elaboradores del tiempo en la atmófera.

El departamento de investigaciones especiales se dedica a los problemas de Meteorología aplicada, tales como los que surgen en aviación. polución atmosférica y similares.

"Observaciones y Micrometeorología" trata principalmente de geomagnetismo y sismología y también de los grupos que estudian problemas de la atmósfera inferior relacionados con la Agricultura.

6 *Desarrollo de la investigación.*—Los temas elegidos para Investigación caen dentro de dos grupos: I) los seleccionados por el Office y II) los que han sido propuestos por organismos ajenos al Office. De estos dos grupos el primero es, con mucho, el más amplio, La Meteorología operacional crea muchos problemas y no hay nunca falta de material para los equipos de investigación. La dificultad está

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

en hacer una selección. Durante muchos años, hemos dividido nuestros problemas según su prioridad. Los problemas más urgentes son clasificados como PX; éstos deben ser dotados de equipo completo en todo tiempo. Los menos urgentes, pero, sin embargo, importantes, se designan como PI; éstos están dotados de equipo tanto como es posible, pero pueden descartarse por algún tiempo, si un problema PX particularmente urgente exige atención. Los de la clase de reserva se llaman P2; estos son problemas reconocidos como dignos de estudio, pero que están en expectativa mientras no haya posibilidades o de personal o de equipo.

Actualmente 29 problemas están clasificados como PX, 115 como PI y 38 como problemas P2. La responsabilidad principal de la selección y clasificación de los problemas, corresponde al Director de Investigaciones, pero el Office es asistido por el Comité de Investigación Meteorológica. Este organismo está compuesto por científicos ajenos al Office y por antiguos directores. Tiene dos subcomités, uno de los cuales se ocupa principalmente de los instrumentos, observaciones e investigación física, y el otro, de los problemas dinámicos y sinópticos.

La M. R. C. es un eficaz organismo que dedica la mayor parte de su tiempo a discutir y valorar los documentos de investigación que proceden de la Superioridad. Informa a la Secretaría del Estado del Aire, pero sólo de un modo consultivo; no tiene poderes ejecutivos y la responsabilidad final del programa de investigación recae en el Director General.

En la práctica, este esquema que fué creado por el difunto Sir Nelson Johnson en 1943, ha funcionado muy bien. Proporciona al Servicio no sólo el beneficio de un valioso consejo en su trabajo ordinario, sino que también le facilita contacto con las universidades y otros organismos científicos. En la M. R. C., se ha mantenido, desde su creación, una tradición de discusión libre y franca y el Comité de Investigación es ahora considerado como una parte indispensable de la estructura del Servicio.

Además de la estructura regular, anteriormente esbozada, el Servicio Meteorológico tiene otros recursos en materia de investigación. En el Servicio Civil Británico es posible conseguir investigadores para casos extraordinarios contratados eventualmente.

Tales especialistas tienen libertad para dedicarse a los trabajos que se les ha encomendado, facilitando el Office el personal y ayuda necesarios. Actualmente hay tres puestos semejantes en el Servicio Meteorológico: uno referente a micrometeorología, otro a investigaciones estadísticas y otro a la aplicación de la Meteorología a problemas de la Agricultura.

Una segunda corriente de investigación es suministrada por sub-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

venciones extraordinarias. A los que trabajan en universidades y desean realizar investigaciones para el Servicio, se les pueden conceder subvenciones o becas para períodos que varían desde uno hasta tres años. Normalmente tales subvenciones permiten a los catedráticos y profesores universitarios, becar a estudiantes para doctorarse en alguna rama de la Ciencia atmosférica. Finalmente, el Servicio, a través del Ministerio del Aire, sostiene económicamente a uno de los Comités de la Real Sociedad que se ocupan de asuntos que por ahora no son de gran interés directo para los Meteorólogos, pero que pueden llegar a serlo en el futuro, tales como los procesos fotoquímicos en el límite de la atmósfera.

La investigación del geomagnetismo y sismología ha figurado desde hace mucho, entre las funciones del Servicio Meteorológico, a pesar de que muchas veces tienen poca o indirecta relación con la atmósfera. Han trabajado en esta materia dos investigadores contratados que informan al Director de Investigación. No están sujetos a programas específicos, sino que se les deja seleccionar libremente sus propios temas facilitándoles lo que necesitan por cuenta de los recursos oficiales.

7. *Ayudas.*—Los principales laboratorios de investigación del Servicio Meteorológico, están en Bracknell, a unos 50 kilómetros al oeste de Londres. Un ala del edificio principal está dedicado especialmente a investigación instrumental y física. Además de un taller principal de ingeniería mecánica hay dos túneles de aire, cámaras frigoríficas y oficinas de diseño. Los laboratorios individuales, generalmente a cargo de determinados oficiales científicos, están bien dotados de energía eléctrica en varios voltajes y frecuencias, agua, gas y aire comprimido. En otra parte del edificio está instalado el computador digital de alta velocidad (un Ferranti Mercury), y la Biblioteca Meteorológica Nacional está en otro bloque. A unos 5 kilómetros del edificio principal está el Centro Experimental, en un área a campo abierto, con laboratorios y oficinas adyacentes.

Tal es el sistema por el que el Office lleva a cabo sus investigaciones. A simple vista la estructura parece compleja y diversa; en la práctica trabaja fácil y, creo que, eficientemente. A un científico joven, que ingresa en el Servicio, se le da un entrenamiento de seis meses en nuestra escuela sobre los aspectos más profesionales del trabajo, seguido de otros seis meses de breves períodos en puestos de investigación y estaciones experimentales. Después de esto, si lo desea, se le permite ingresar en el departamento de investigación donde debe permanecer durante los cuatro o cinco años siguientes. Los meteorólogos, sin embargo, deben permanecer algún tiempo en el "banco de pruebas" con el fin de prepararse para puestos de mayor responsabilidad en la predicción, y esto se consigue por medio de un destino en una unidad operacional espe-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

cializada después del período de investigación. Más adelante el oficial puede volver a la investigación o también pasar a otros servicios de acuerdo con su preparación y preferencias. De esta forma es de esperar que se reduzcan al mínimo los peligros de que el investigador pierda el contacto con la realidad o de que el meteorólogo efectivo permanezca ignorante de los últimos avances.

En el planteamiento de la organización se ha tenido muy en cuenta un principio: el de evitar la creación de dos partes separadas del Office, que rara vez llegan tener contacto entre sí. Es tan necesario para el investigador apreciar las dificultades del meteorólogo en funciones, como lo es para los predictores o climatólogos impedir el adocenamiento. Otra medida de seguridad ha sido tomada para crear un departamento de enlace, llamado de "técnicas y entrenamiento" que, además de supervisar el trabajo de la Escuela de Información, se preocupa por llevar los adelantos técnicos a aquellos que trabajan en las estaciones de fuera (generalmente, campos de aviación) y también para alentar a los meteorólogos que trabajan fuera del Centro a que emprendan, por su propia iniciativa, algún trabajo de investigación.

8. *Temas de investigación.*—Los problemas de investigación del Servicio Meteorológico están clasificados en tres apartados principales:

(I) Instrumentos.
(II) Meteorología sinóptica y dinámica, incluída Climatología.
(III) Meteorología Física.

Lo que sigue son ejemplos de diferentes apartados:

(I) Desarrollo del nuevo radiosonda M. O.

Diseño y desarrollo de un tipo de higrómetro automático de punto de congelación para su empleo en aviación.

Diseño de instrumentos sensibles para cohetes y satélites.

(II) Cálculo y predicción de vientos hasta alrededor de 35 kilómetros de altura.

Predicción de nieblas de radiación.

Resolución numérica (empleando calculadores de alta velocidad), de las ecuaciones dinámicas de determinadas situaciones sinópticas.

Variaciones en los modelos a gran escala de la circulación en la troposfera con períodos hasta de un mes.

El intercambio de energía entre la atmósfera y los océanos.

(III) Estructura física de las nubes que producen lluvia.

Estudio experimental de la difusión de la materia en la atmósfera.

Exploración de la alta atmósfera por medio de cohetes.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Observación y estudio de ozono en la atmósfera por medio de satélites.

Estos son unos pocos ejemplos del total de problemas del tipo 29 PX. En éstos el trabajo se está realizando a la mayor velocidad posible, pero también se presta atención a otros (PI), problemas.

Me propongo dedicar el resto de esta disertación a considerar tres puntos de investigación para demostrar cómo trabaja en la práctica el sistema que he descrito antes. Las materias seleccionadas son:

(I) Investigación de la alta atmósfera.
(II) Predicción numérica.
(III) Desarrollo de registradores automáticos de base de nubes.

9. Investigación de la alta atmósfera.

La investigación de la alta atmósfera puede ser ampliamente dividida en:

A. Una prolongación hacia arriba de las medidas hechas por radiosondas (vientos y temperatura).

B. Medidas de las concentraciones de materias como ozono y polvo, que son importantes, no sólo respecto a estudios de balance de radiación, sino también como trazadores atmosféricos.

A. *Prolongación ascendente de las medidas de radiosondas.*

Para esto proponemos el empleo de cohetes relativamente pequeños que lleven una sonda, no distinta a nuestro primitivo globo radiosonda, sujeto a un paracaídas grande. La sonda y el paracaídas son expulsados del cohete a una altura de 60 kilómetros. El paracaídas se abre y desciende, inicialmente a unos 100 m/s., y es arrastrado por el viento. Puede ser seguido por medio de radar, y así, se determinan los vientos. Al mismo tiempo la sonda está transmitiendo medidas de temperatura.

B. *Medida de ozono y polvo.*

Cualquier materia, cuya concentración varía de lugar en lugar y de nivel a nivel, puede emplearse como un "elemento trazador", para determinar el movimiento del aire, tanto horizontal como verticalmente. La radiactividad producida artificialmente, se emplea a menudo de este modo. Hay, no obstante, variadas materias que se producen por vía natural y que pueden usarse. Tales son: el polvo y el ozono.

(a) *Polvo.*—El polvo está atravesando continuamente la atmósfera terrestre como restos de meteoritos. Una medida de la cantidad de polvo, puede conseguirse midiendo la cantidad de luz dispersada de un proyector, colocando un receptor a unos 40 kilómetros de distancia. Son indispensables, noches despejadas, claras, sin luna, y éstas ocurren, en las Islas Británicas, sólo unas 10 veces al año. Así que, aunque se han hecho

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

medidas en los dos últimos años, no podemos aún sacar conclusiones, excepto que, efectivamente, se producen grandes variaciones de polvo.

(b) *Ozono.*—Medidas de la distribución vertical del ozono, pueden hacerse por medio de globos hasta unos 35 kilómetros, y el Servicio Meteorológico está planeando el establecimiento de una red de estaciones para determinación de ozono. Se pueden hacer medidas a alturas de más de 35 kilómetros desde un satélite. Un experimento del Servicio Meteorológico, planeado para realizar esto, se ha incluído en el segundo satélite de la serie "Scout" UK/USA, previsto para ser lanzado el próximo año. En este experimento se miden cambios en la atenuación de la radiación solar u/v dos veces sobre cada órbita: cuando el satélite entra y, otra vez, cuando sale de la sombra de la Tierra.

Puesto que la atenuación es ampliamente debida al ozono, puede determinarse la cantidad de ozono y la distribución vertical.

El material debe ser, por supuesto, extremadamente robusto y de confianza y debe estar perfectamente calibrado para todas las posiciones posibles del sol relativo en el eje de giro del satélite.

10. *Predicción numérica del tiempo.*

El estudio de la dinámica de los movimientos de aire en gran escala, recibió un importante impulso después de la segunda guerra mundial a partir de dos factores: a) la utilización regular de una red de sondeos de aire superior suficiente para definir el movimiento del aire en gran escala y b) los estudios teóricos de Rossby [1] y Sutoliffe [2] que habían demostrado, cómo las ecuaciones del movimiento atmosférico proporcionan expresiones del cambio de vorticidad en gran escala (sobre un eje vertical), que puede aplicarse a los modelos sinópticos individuales del movimiento del aire.

Sutcliffe y Forsdyke [3] proporcionaron reglas cualitativas por las que las ecuaciones dinámicas podían aplicarse como un instrumento de predicción a determinados mapas de aire superior de los contornos de superficies isobáricas y del espesor de capas específicas entre ellas. Sin embargo, era natural hacer lo posible por calcular los términos individuales de las ecuaciones dinámicas a partir de mapas sinópticos por medio de métodos gráficos y diferenciales finitos, proporcionando la *razón geostrófica,* el eslabón entre el geopotencial y el viento.

Los cálculos aislados no fueron difíciles, pero cuando tenían que repetirse varios cientos de veces en diferentes puntos para construir un mapa, el trabajo con lápiz, papel y calculadoras pronto llegó a ser demasiado laborioso. En esta etapa (en 1951), se pudo alquilar en Londres un calculador electrónico comercial con el que se hicieron algunos de los cálculos. Los cálculos se extendieron pronto a la determinación del *grado de intercambio* a la altura de la superficie de 500 mb.,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

siguiendo los métodos ideados por Charney [4] en los Estados Unidos; no obstante, los cálculos se extendieron a cambios en el espesor de 1.000-500 mbs. Se hizo evidente que era prácticamente posible el cálculo, paso a paso, de los cambios en las veinticuatro horas por determinación del grado de intercambio cada hora, y en 1954 se habían ultimado diez cálculos experimentales de cambios en veinticuatro horas a 500 mbs. y en un espesor de 1.000-500 mbs.

Resultó indudable, a la vista de los resultados, que siguiendo estas líneas podía llegarse a un método práctico de predicción del campo de 500 mbs. y 1.000-500 mbs. de espesor, pero todavía quedaban por hacer otras muchas determinaciones experimentales. Se consideró que sería necesario realizar series de unos 100 cálculos sobre la base de una variedad de fórmulas matemáticas y físicas, para elegir el método más adecuado para la aplicación práctica. Esto fué irrealizable por la imposibilidad de compartir el trabajo de una calculadora que en principio fué prevista para otro trabajo y se decidió adquirir una calculadora para este fin. La máquina estuvo disponible en enero de 1959. Mientras tanto se continuaron otros experimentos con una calculadora electrónica en Manchester, durante los cuales se consiguió mejorar los resultados por la introducción en los cálculos del efecto de algunos factores, tales como el calentamiento, por el océano, de las masas de aire frío y por la admisión de ciertas *divergencias del movimiento rigurosamente geostrófico*. El esfuerzo había sido también extendido al problema de analizar las observaciones de radiosonda y del uso de la calculadora para preparar los datos iniciales para hacer una predicción directa a partir del radiosonda y otras observaciones, como las recibidas por los teletipos en cinta perforada.

Con la instalación en el Office de la calculadora electrónica se iniciaron, con base actual, unas series de predicciones numéricas de la superficie de 500 mbs. y espesor de 500 a 1.000 mbs. Se partió de los datos de 00,00 T. M. G. y se extendió hasta las 00,00 y 06,00 T. M. G. del día siguiente. Salían a última hora de la mañana.

Dos series de 92 de tales predicciones, usando técnicas ligeramente diferentes basadas en una representación de la atmósfera con 2 parámetros, fueron completadas durante 1959. Se alcanzó un nivel de aciertos casi igual al conseguido por los métodos de predicción subjetiva de mapas de aire superior y ligeramente inferior respecto a los de superficie. (Ver Knighting y otros [5]). Fué, sin embargo, evidente, que el pronosticador convencional tenía la ventaja del acceso a los últimos mapas que, aunque incompletos, proporcionaban datos más recientes que los utilizables por la calculadora. Ensayos más recientes han intentado eliminar esta diferencia empleando como datos básicos las observaciones de superficie de 06,00 T. M. G., así como las de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

aire superior de medianoche para la predicción numérica que quedaba ultimada a las 09,30 T. M. G. Este programa más ajustado trajo consigo, sin embargo, ligeras dificultades prácticas provinentes de faltas ocasionales del calculador, errores en su manejo y, lo que es más importante, de graves errores, no descubiertos, en los datos iniciales. Como consecuencia, la predicción sólo fué acertada en un 50 por 100 de los casos.

Una comparación subjetiva de los mapas isobáricos de predicción al nivel del mar preparados por métodos subjetivos y numéricos demostró que las predicciones numéricas fueron iguales o mejores que los mapas subjetivos en 37 de 85 ocasiones, ligeramente peores en 26 y notablemente inferiores en 22 ocasiones. En 9 de las ocasiones clasificadas como "ligeramente peores", ambas predicciones fueron consideradas como "buenas". Se llegó a la conclusión de que sólo se precisaba una pequeña mejora en la exactitud general de las predicciones numéricas para proporcionar un útil suplemento a los métodos subjetivos, ambos en cuanto a la predicción de mapas isobáricos al nivel del mar y mapas de aire superior. El pequeño equipo de 6 científicos comprometido en los ensayos de predicción numérica prosigue sus experiencias para mejorar el nivel de las predicciones. Estas comprenden la inclusión de más niveles en los datos iniciales, perfeccionamiento en la aproximación geostrófica, mejoras en la técnica matemática y la inclusión de efectos, tales como la elección de la superficie de fricción, topografía y procesos no adiabáticos. En la esperanza de que este trabajo conduzca a una técnica que mejore los métodos corrientes de preparación de mapas previstos, se están tomando medidas para reemplazar en pocos años el calculador existente por una máquina más rápida y menos sujeta a averías ocasionales. Se confía también en que el equipo de investigación será capaz de dedicar algún esfuerzo para aplicar similares técnicas numéricas, tanto a fenómenos en escalas algo más pequeñas como algo mayores, especialmente a frentes y líneas de turbonada por una parte y a la circulación general por otra. En ambos terrenos la aplicación del pronóstico del tiempo no será inmediata, pero la posibilidad de un creciente conocimiento de los fenómenos justificaría el esfuerzo y las aplicaciones definitivas no podrán ser precisadas hasta que se haya conseguido el conocimiento completo.

El registrador de la base de nubes M. O.

El desarrollo de instrumentos meterológicos nuevos o mejorados proyectado para su empleo en amplio campo presenta ciertas dificultades que rara vez alcanzan el mismo grado respecto a otros instrumentos científicos.

Estas dificultades suceden en parte por la escasez frecuente, en Me-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

teorología, de definiciones completas en términos adecuados para la aplicación instrumental y, en parte, por las condiciones adversas bajo las cuales serán empleados los instrumentos.

La escasez de definiciones precisas y adecuadas respecto a las medidas meteorológicas más frecuentes no es en modo alguno achacable a descuido por parte de los meteorólogos. La Organización Meteorológica Mundial ha tenido este problema bajo continuo y constante estudio durante muchos años, pero queda mucho que hacer todavía.

En ciertos casos las dificultades surgen a causa de los variados usos a los que una simple observación puede más tarde ser aplicada, usos que no son conocidos ni en el momento de diseñar el equipo de medida ni siquiera en el de hacer la observación. Las mediciones forman parte de la reserva general de conocimientos meteorológicos y encuentran más adelante una gran variedad de aplicaciones.

Mientras está haciéndose cualquier medida individual de condiciones atmosféricas, el mismo parámetro estará, frecuentemente, en un estado de cambio rápido. La inercia instrumental o constante de tiempo es por esto de importancia obvia, pero de nuevo falta frecuentemente una firme definición en cuanto a lo que ésta debiera ser. Al mismo tiempo se producirán cambios a otras condiciones ambientales, con lo que queda bien demostrado lo difícil que resulta aislar el efecto de estos cambios de la medida del parámetro deseado.

Para ilustrar el desarrollo del instrumento es de interés seguir las etapas del diseño, por el Servicio Meteorológico, de un aparato para observar continuamente la altura de la base de la nube más baja, el "registrador de base de nubes". Al describir este desarrollo no se pretende que la solución británica de este problema sea la única, ya que de hecho trabajos muy similares se han llevado a cabo en varios países simultáneamente. Se cree, sin embargo, que el Reino Unido fué uno de los primeros en empezar en este terreno y, aunque no el primero en producir un modelo utilizable comercialmente, realizó, quizá, las más exhaustivas investigaciones experimentales en lo que respecta a la importancia de las mediciones.

Durante muchos años la altura de la base de las nubes ha sido determinada soltando pequeños globos dotados de velocidad ascensional aproximadamente conocida o, por la noche, usando un proyector y observando visualmente. Ambos métodos tienen serios inconvenientes, aunque el último es notablemente mejor tanto por precisión como por comodidad. Un método de proyector que puede ser usado tanto de día como de noche, y "observado" constante y automáticamente, fué preparado con el fin de ofrecer considerables ventajas, especialmente en los grandes aeropuertos.

El método atrajo alguna atención ya en 1936, pero los equipos y téc-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

nicas adecuados no estaban entonces preparados y, después de algunas investigaciones particulares, la idea pasó. No fué hasta 1943, en que un firme requerimiento oficial fué dispuesto y el trabajo fué ejecutado en otro laboratorio del Gobierno. La prioridad dada a la tarea fué poca y, sólo en 1951, se empezó realmente un activo desarrollo dentro del Servicio Meteorológico.

Fueron tenidos en consideración tres sistemas posibles de medida. Uno enfocó el empleo del radar de muy alta frecuencia, el segundo un método análogo al radar, pero usando luz pulsada, mientras el tercero fué basado en la triangulación de un rayo de proyector, visto desde distancia.

Teniendo en cuenta que para fines corrientes meteorológicos y de aviación, la base de las nubes es definida por un concepto de observación visual, se consideró que el radar, usando longitudes de onda muy largas comparadas con las de la luz, pudiese dar resultados discrepantes de los observados visualmente. El método de luz pulsada fué primeramente elegido, pero aunque se vencieron las mayores dificultades y se sometió a prueba un instrumento adecuado, el método fué abandonado en 1958 a causa del coste y complejidad.

Por aquella fecha se había avanzado ya mucho en un método de triangulación, básicamente similar en principio al aceptado proyector nocturno visualmente observado, y en 1958 se decidió proseguir con este sistema exclusivamente.

El fundamento del método es bastante simple. A un rayo de luz de un proyector se le hace describir, continuamente desde arriba hacia abajo, un arco en un plano vertical que produce una señal luminosa móvil en la base de la nube. El receptor, que consiste en una célula fotoeléctrica colocada en el foco de un visor similar al proyector, se coloca a una distancia conocida de éste en el plano del arco. Puesto que el rayo de luz incide desde la nube inmediatamente sobre el receptor, la altura de la nube puede determinarse por el ángulo formado por el rayo luminoso y la distancia de la línea base entre proyector y receptor. Esta información se transmite automáticamente al receptor.

Para hacer posible que el sistema opere tanto de día como de noche, es necesario que la luz del proyector pueda distinguirse del fondo más constante de la luz del día. Con ese fin se modula el rayo del proyector o se interrumpe en un intervalo controlado, por medio de un obturador giratorio. Gran parte del esfuerzo de investigación fué dedicado a la selección de un intervalo de modulación adecuado, a la elección de motores de velocidad constante y de un diseño de obturador que suministrara una modulación realmente constante. Un intervalo de modulación de 900 ciclos por segundo fué finalmente elegido.

El trabajo ulterior fué dirigido hacia la unidad fotocélula y al ampli-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ficador de gran aumento, necesario para amplificar la pequeñísima cantidad de luz dispersa recibida a un nivel en el que pueda ser empleada útilmente.

Esto resultó de tanto éxito que, aunque el sistema se había pedido para trabajar con alturas de nubes de hasta 1.200 metros, el diseño final fué capaz de detectar el rayo del proyector a alturas considerablemente mayores, probablemente de hasta 2.500 metros.

El movimiento angular del proyector se transmite continuamente al soporte de la plumilla del receptor por medio de un platillo magnético, interponiendo una leva para transformar el ángulo actual en la altura verdadera. El soporte de la plumilla está, por eso, en movimiento continuo y en contacto constante con el papel de registro, pero no se registra ningún trazo, excepto cuando la luz modulada procedente del proyector es detectada por el receptor, indicando que el rayo está cayendo desde la nube justamente sobre el receptor. La señal desde el receptor cierra entonces un relé y se permite a la corriente atravesar el soporte de la plumilla y quema un trazo sobre el papel electrolítico especial empleado para registro. Como se requiere un movimiento angular limitado para que el rayo del proyector se mueva por el área de cielo observado por la fotocélula receptora, el registrador dibuja una línea sobre la banda, demostrando que, a pesar del amplio intervalo cubierto por la línea, se recibe una luz de suficiente potencia para hacer funcionar el sistema. La base de cada línea se considera como la altura de la base de la nube. Cada línea corresponde a un "barrido" del proyector, siendo aquellos alternativamente hacia arriba y hacia abajo con una observación cada medio minuto.

De acuerdo con estos datos fué construído un prototipo en el laboratorio y se ensayó en el aeropuerto de Londres durante cerca de tres años. El modelo no resultó particularmente de confianza respecto a la construcción mecánica, pero en esta etapa esto no era esencial—la finalidad era investigar el significado exacto de las observaciones.

Se encontró que, comparado con un observador experto, que hacía lecturas independientes con un proyector visual nocturno, hubo ocasiones en que no se obtuvo registro instrumental de capas delgadas consideradas por el observador como nubes. Como, sin embargo, hubo una cantidad casi igual de casos en los que se obtuvo un registro de capas que el observador había rechazado como neblina o calima, se consideró que esta diferencia era debida a la naturaleza subjetiva de la observación visual y que el registrador era, por lo menos, consecuente.

Más notablemente, los resultados demostraron que, por término medio, el observador dió un valor de la base de las nubes alrededor del 10 por 100 más alto que el aparato, a pesar de las cuidadosas confrontaciones de la geometría del sistema. Si el amplio disco de luz producido

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

por el proyector, incidía realmente sobre la base de una nube claramente bien definida, de la misma forma que una luz es reflejada por una pared sólida, fué difícil ver qué cantidad de luz, suficiente para operar el receptor, se podía obtener de esa amplia mancha. La duda procedía de si la amplia mancha se producía realmente dentro de la misma nube. Para comprobar esto se modificó temporalmente el registro de la base de la nube, para dar un registro de la efectiva intensidad de luz recibida de la nube.

Se encontró que, mientras el rayo no producía virtualmente luz dispersa debajo de la nube, la dispersión en pequeñas cantidades empezaba tan pronto era alcanzada la base y continuaba aumentando hasta su máximo valor, la "mancha brillante", que podría estar de 50 a 100 metros sobre el nivel. La luz difundida decrecía en seguida en intensidad a medida que era atenuada por la misma nube. El actual nivel de sensibilidad del registrador de base de nube obligaba al equipo de registro a operar un poco por debajo del máximo valor luminoso, *teniendo en cuenta así las diferencias observadas*. Como la diferencia estaba a favor del registrador de base de nubes, en consideración a la seguridad de los aviones, sus registros fueron aceptados como más aproximados a los verdaderos valores de la base de las nubes.

De acuerdo con estos ensayos del *fundamento de la operación*, el instrumento fué totalmente rediseñado y reconstruído por el equipo de desarrollo del Servicio Meteorológico. Aunque se conservaron las características fundamentales del sistema, se prestó mucha atención a un adecuado diseño mecánico y electrónico y a los modernos sistemas instrumentales como construcción, resistencia a las inclemencias del tiempo y accesibilidad.

El receptor original fué construído en el laboratorio con los materiales y componentes adecuados que se tenían a mano.

La nueva versión proporcionó accesibilidad para mantenimiento, resistencia a inclemencias del tiempo y mejoras en el diseño general.

La versión del laboratorio del registrador era completamente primitiva y sin atractivo. La nueva versión diseñada sigue las normas modernas en cuanto a diseño y aspecto.

El modelo original de construcción del mecanismo del proyector, mostrado aquí sin su cubierta fué, mecánicamente, bastante pobre. El largo eje que accionaba la pantalla era una fuente de debilidad, a la vez que el mecanismo del proyector de exploración era completamente exterior. La versión final fué hecha mucho más compacta.

Todo el mecanismo puede fácilmente ser encerrado en una sola cubierta, y la pantalla, de rápido giro ahora, toma la forma de un disco de plástico con pequeñas fuerzas centrífugas.

Prosiguiendo la construcción del modelo mejorado, se realizó otro

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

breve ensayo, esta vez casi exclusivamente para asegurar que se había conseguido el grado requerido de confianza y utilidad operacional, se confirmó esto y se firmó un contrato con un fabricante particular, para producir un cierto número de equipos del mismo diseño, usando el modelo del Servicio Meteorológico como patrón. Durante toda la etapa de fabricación, el equipo de desarrollo permaneció en estrecho contacto con la construcción, aconsejando cuando era preciso y teniendo en cuenta las propuestas hechas por los fabricantes sobre pequeños cambios respecto a detalles. Cuando se fabricaron los equipos el personal del Servicio Meteorológico realizó las pruebas de admisión necesarias y emprendió los aspectos más técnicos de la instalación. Las versiones finales fabricadas seguían muy fielmente el diseño de nuestro propio modelo, aunque les fueron incorporados cierto número de pequeñas mejoras y algunos cambios para conseguir una mejor fabricación en serie.

El instrumento está ahora en uso corriente en cierto número de estaciones y va a hacerse un pedido aún mayor de aparatos. A la luz de la experiencia obtenida en la práctica, el equipo de desarrollo incorporará algunas modificaciones en cuanto a la escala, y están ahora trabajando sobre los requisitos, tanto de un modelo para uso en los trópicos como para telemetrar las observaciones, con el fin de que las medidas puedan hacerse remotamente en campos de aterrizaje a lo largo de la línea de aproximación del avión.

BIBLIOGRAFIA

1. Rossby, C. G., 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere. Quart. Jour. Roy. Met. Soc. (Suppt), pág. 68.

2. Sutcliffe, R. C., 1947. A contribution to the theory of development. Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 73, pág. 370.

3. Sutcliffe, R. C. and Forsdyke, A. G., 1950. The Theory and use of upper air thickness patterns in forecasting. Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 76, pág. 189.

4. Charney, J. G., 1949. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. J. Met. Vol. 6, pág. 371.

5. Knighting E., Corby, G. A., Bushby, F. H. and Wallington, C. E., 1961. An experiment in numerical forecasting. London, Meteorological Office, Scientific Paper N.º 5.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

III

LOS DIAGRAMAS MIXTOS EN METEOROLOGIA

Conferencia pronunciada el día 12 de mayo de 1962

por

D. JOSE M.ª JANSA GUARDIOLA

Meteorólogo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

LOS DIAGRAMAS MIXTOS EN METEOROLOGIA

Todos nosotros estamos acostumbrados a manejar diagramas: el mapa sinóptico, las topografías, los cortes verticales, las bandas de los aparatos registradores son diagramas; nada digamos de los diagramas termodinámicos, las curvas de evolución... En una palabra, podríamos afirmar que nuestro principal instrumento de trabajo es el *diagrama*. Por esto llama la atención que casi en ningún texto sea abordado el problema de la fundamentación teórica de este instrumento de trabajo, y por esto me ha parecido oportuno traerlo aquí, aunque sólo sea en forma muy incompleta.

Ante todo, se observa que todos los diagramas citados se pueden clasificar en tres grupos: diagramas puramente geométricos, en los cuales todas las coordenadas son magnitudes de naturaleza geométrica y, en particular, longitudes; tales son los mapas sinópticos y los cortes verticales; 2.°, diagramas físicos, en los que ninguna de las coordenadas es de naturaleza geométrica, sino que todas representan magnitudes físicas, como ocurre, por ejemplo, con las bandas de los aparatos registradores y con los diagramas termodinámicos; y, por último, 3.°, diagramas que tienen unas coordenadas que son longitudes puras y otras representan magnitudes físicas; éstos son los denominados por nosotros *diagramas mixtos*. De una manera más particular todavía, llamaremos *diagrama mixto* en sentido estricto, aquél que tiene todas sus coordenadas geométricas, excepto una, que es de tiempo. El diagrama mixto completo tendrá cuatro dimensiones, por tener tres el espacio real.

Los problemas matemáticos que plantean los espacios de cuatro dimensiones son demasiado complicados; por esto me ha parecido prudente empezar y limitarme de momento a una de sus secciones tridimensionales, tomando en cuenta dos dimensiones geométricas y una de tiempo. Veamos lo que se puede hacer y empecemos por estudiar los

Vectores mixtos.—Consideremos un espacio representado, como decía, por dos coordenadas de espacio y la de tiempo. Las coordenadas de espacio son las clásicas, que designaremos por x y; la de tiempo la

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

vamos a designar por $u = kt$. El coeficiente k tiene mucha importancia porque está destinado a transformar el tiempo en longitud, pues de lo contrario, no podría introducirse en una representación geométrica. Tiene dimensiones físicas: las de la velocidad. Es arbitrario y característico de cada diagrama en particular. No hay que confundirlo con un simple factor de escala. Factor de escala lo tienen necesariamente todos los diagramas, pero el factor de escala de tipo geométrico carece de dimensiones físicas; es un número abstracto. En cambio, k tiene dimensiones físicas y juega un papel distinto. En el campo geométrico, el factor de escala puede incluso reducirse a la unidad (escala natural); respecto de k no ocurre nada parecido; no hay valor privilegiado para k, no tiene sentido hablar de escala natural sobre el eje de los tiempos. Tampoco hay que confundir la arbitrariedad de k, que nos permite darle el valor que queramos, con la posibilidad que tenemos, en un diagrama puramente geométrico, de elegir factores de escala diferentes; es sabido, por ejemplo, que en la representación de un corte vertical no suele emplearse la misma escala para abscisas y para ordenadas, pero esto se hace a sabiendas de que se altera la realidad, de que se introduce una deformación; en cambio, si el diagrama es mixto no se puede hablar de deformación, pues ninguna forma existe antes de la elección de k.

Cuando un punto se mueve, está claro que su posición en cada momento queda determinada por sus dos coordenadas de espacio y la de tiempo y en el diagrama mixto le corresponde un solo punto de coordenadas x, y, u. El movimiento del punto queda representado en forma estática por una curva, que podemos denominar *trayectoria mixta*. Su proyección sobre el plano xy es la trayectoria ordinaria.

Los puntos de la trayectoria mixta pueden individualizarse mediante su *vector de posición*; la proyección de este vector sobre el plano espacial es el vector de posición ordinario, su proyección sobre el eje u es, como veremos después, una función universal (lineal) del tiempo, que es la misma para todos los móviles.

Ahora bien, hemos usado la palabra *vector*, y para tener derecho a ello es necesario definirla de nuevo, porque la definición euclidiana clásica no es estrictamente aplicable. Llamaremos *vector mixto*, o mejor *vector en el diagrama mixto*, a un ente compuesto de tantos elementos como coordenadas tenga el diagrama (en este caso de tres), y que se comportan como las diferencias de coordenadas de dos puntos en toda transformación *permitida* de coordenadas. Aquí cargamos el acento sobre la palabra *permitida*. En el diagrama mixto no están permitidas todas las transformaciones posibles, sino únicamente aquellas que dejan invariantes las distancias espaciales y los intervalos de tiempo, es decir, los cambios de origen, que corresponden a cambios

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de origen geométrico y de momento inicial, las rotaciones alrededor del eje temporal y los cambios de escala sobre este eje (fig. 1).

No escribimos las fórmulas que corresponden a la parte puramente geométrica de la transformación, que son las clásicas (1); la parte que

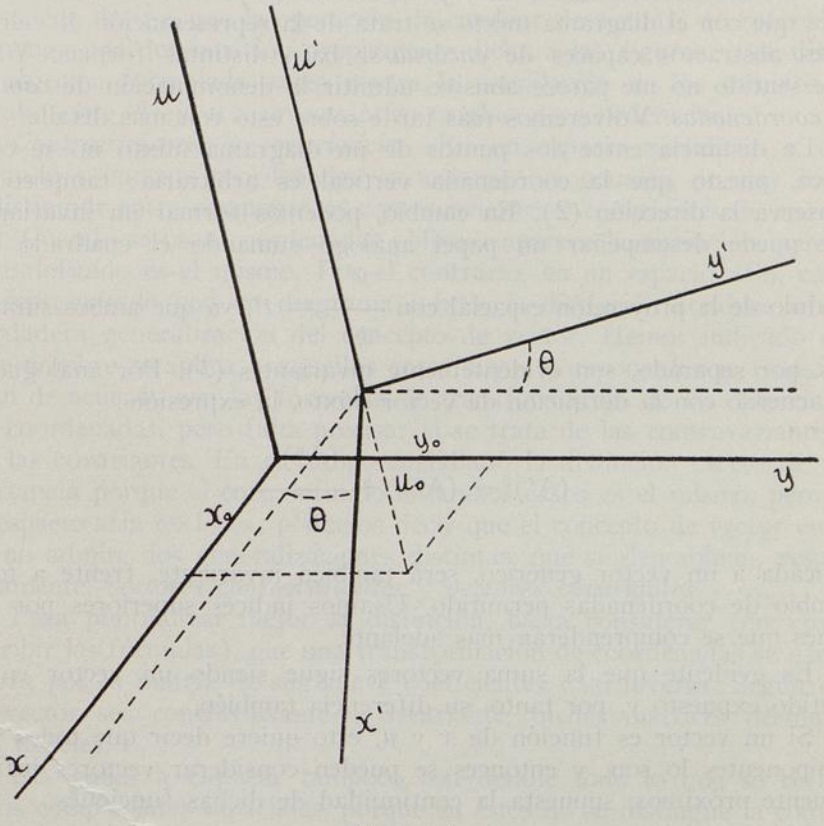


Figura 1.ª

afecta al eje temporal es sencillamente $u = \gamma\, u'$. Evidentemente, el coeficiente γ equivale a la razón entre los coeficientes de escala, es decir:

$$\gamma = \frac{k}{k'}$$

Es interesante señalar que mientras las transformaciones puramente geométricas dejan invariante la *forma* de las figuras, las de tipo temporal las *deforman:* una circunferencia situada en el plano $x\ y$ sigue

NOTA.—Las llamadas entre paréntesis se refieren a las notas que figuran al final del texto.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

siendo circunferencia en el $x'\ y'$; en cambio, si está sobre el plano $x\ u$, se convierte en elipse al pasar al $x'\ u'$. Tal vez no sea muy ortodoxo llamar *cambio de coordenadas* a una transformación que hace cambiar la forma de las figuras, pero ya hemos indicado que antes de atribuir a k un valor determinado, las *figuras* no tienen *forma*, y veremos después que con el diagrama mixto se trata de la representación de ciertos entes abstractos capaces de *encarnarse* bajo distintas formas. Y en este sentido no me parece abusivo admitir la denominación de *cambio de coordenadas*. Volveremos más tarde sobre esto con más detalle.

La distancia entre dos puntos de un diagrama mixto no se conserva, puesto que la coordenada vertical es arbitraria; tampoco se conserva la dirección (2). En cambio, podemos formar un invariante, que puede desempeñar un papel análogo sumando el cuadrado del módulo de la proyección espacial con $\frac{u^2}{k^2} = t^2$, ya que ambos sumandos, por separado, son evidentemente invariantes (3). Por analogía, y de acuerdo con la definición de vector mixto, la expresión:

$$(A^x)^2 + (A^y)^2 + \frac{(A^u)^2}{k^2}$$

aplicada a un vector genérico, será también invariante, frente a todo cambio de coordenadas permitido. Usamos índices superiores por razones que se comprenderán más adelante.

Es evidente que la suma vectores sigue siendo un vector en el sentido expuesto y, por tanto, su diferencia también.

Si un vector es función de x y u, esto quiere decir que todos sus componentes lo son, y entonces se pueden considerar vectores infinitamente próximos, supuesta la continuidad de dichas funciones.

Métrica del diagrama mixto.—El diagrama mixto carece de métrica intrínseca, pues ésta cambia para cualquier cambio de coordenadas que no implique $\gamma = 1$. Dicho con otras palabras, la métrica la introducimos nosotros mediante el artificio de multiplicar el tiempo t por el coeficiente dimensional k. El espacio abstracto $x\ y\ t$ es un espacio de conexión afín y los diagramas mixtos $x\ y\ u$ son imágenes métrica de dicho espacio abstracto, que cambian al cambiar el valor de k. Las propiedades del diagrama que sean independientes de k son propiedades afines y pertenecen al espacio afín; la más importante es el paralelismo: como es sabido, en un espacio afín se puede definir la equipolencia de vectores, según Levy-Civitta, aunque no se pueden definir sus módulos. Es muy fácil demostrar elementalmente que el paralelismo, en sentido euclidiano, entre dos vectores del diagrama mixto,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

se conserva para cualquier cambio permitido de coordenadas, incluso con $\gamma \neq 1$. Los distintos diagramas mixtos, que difieren entre sí por los respectivos valores de k, se transforman mutuamente por una transformación afín de razón γ; dos figuras que se transforman una en otra mediante dicha afinidad se considerarán iguales; en este sentido no puede decirse que la operación de cambiar de sistema de referencia imponga una deformación propiamente dicha a las figuras, y se disipa la objeción formulada antes contra la asimilación de los cambios de escala sobre el eje u a un auténtico cambio de coordenadas.

Contravariancia y covariancia.—En un espacio euclidiano y empleando solamente coordenadas cartesianas ortogonales, no hay lugar a distinguir entre componentes contravariantes y covariantes de un vector. Cuando se usan coordenadas oblícuas aparece la distinción, pero el ente definido es el mismo. Por el contrario, en un espacio afín, como el representado por un diagrama mixto, la distinción conduce a una verdadera generalización del concepto de vector. Hemos indicado que este nombre se aplica a aquellos entes cuyos componentes se transforman de acuerdo con las fórmulas de transformación de las diferencias de coordenadas, pero falta precisar si se trata de las contravariantes o de las covariantes. En el campo euclidiano la distinción carece de importancia porque el ente definido en ambos casos es el mismo, pero en el espacio afín no lo es; podemos decir que el concepto de vector euclidiano admite dos generalizaciones distintas, que se denominan, respectivamente, *vectores contravariantes* y *vectores covariantes*.

Para puntualizar mejor la distinción, basta considerar (no voy a escribir las fórmulas), que una transformación de coordenadas se caracteriza por la matriz de sus nueve coeficientes y su inversa. Según que el vector sea contravariante o covariante, dichas matrices permutan sus papeles.

No vamos a explicar tampoco con detalle todo lo que se refiere a los componentes espaciales, porque en éstos no se distingue la contravariancia de la covariancia. Sólo vamos a fijarnos en la coordenada temporal: si el vector es contravariante, las fórmulas de transformación serán (4):

$$A^u = \gamma A^{u'}$$

$$A^{u'} = \frac{1}{\gamma} A^u$$

y si es covariante:

$$B_u = \frac{1}{\gamma} B_{u'}$$

$$B_{u'} = \gamma B_u$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Pongamos un ejemplo de cada clase. Un par de puntos ordenados determinan un vector contravariante (el segmento que los une). Esto se demuestra inmediatamente suponiendo que uno de los puntos coincide con el origen de coordenadas, pues entonces sus componentes se identifican con las coordenadas del segundo. Por tanto, la contravariancia de este vector es indiscutible.

Análogamente, la imagen geométrica de un vector covariante la tenemos considerando la figura formada por un par de planos paralelos (5). Si uno de ellos pasa por el origen se demuestra que los recíprocos de los segmentos que el segundo determina sobre los ejes son efectivamente componentes de un vector covariante. El módulo de este vector es el recíproco de la distancia del origen al plano, o en general, el recíproco de la distancia entre los dos planos; en este caso los componentes del vector son, naturalmente, los recíprocos de las diferencias entre los segmentos determinados sobre los ejes. El módulo tampoco se conserva, pero se puede formar un invariante análogo al que corresponde a los vectores contravariantes, y que ahora es:

$$(B_x)^2 + (B_y)^2 + k^2 (B_u)^2$$

Es curioso observar que si dos vectores, de variancia opuesta, son perpendiculares en un diagrama determinado, lo siguen siendo después de cualquier transformación permitida, como se comprueba aplicando la transformación a la condición de perpendicularidad. En particular, un vector situado en un plano y el vector del plano son siempre perpendiculares (6). La figura lo demuestra intuitivamente (fig. 2).

Todo esto se puede obtener también haciendo uso del Algebra vectorial. No voy a hacerlo para no repetirme, pero en cambio es necesario fijar nuestra atención sobre uno de los resultados más importantes que pueden conseguirse por dicho método: la definición de los tensores métricos. El tensor métrico covariante se relaciona con el invariante de los vectores contravariantes; su último componente vale: $g_{33} = \frac{1}{k^2}$; los demás son iguales a la unidad si tienen sus dos subíndices iguales y a cero si son desiguales. Análogamente, el tensor métrico contravariante, enlazado con el invariante de los vectores covariantes, tiene por componente $g^{33} = k^2$ (7).

Con esto se puede pasar de los componentes contravariantes de un vector a los covariantes (8); el único componente que cambia es, naturalmente, el temporal, en la forma:

$$A_u = \frac{1}{k^2} A^u$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

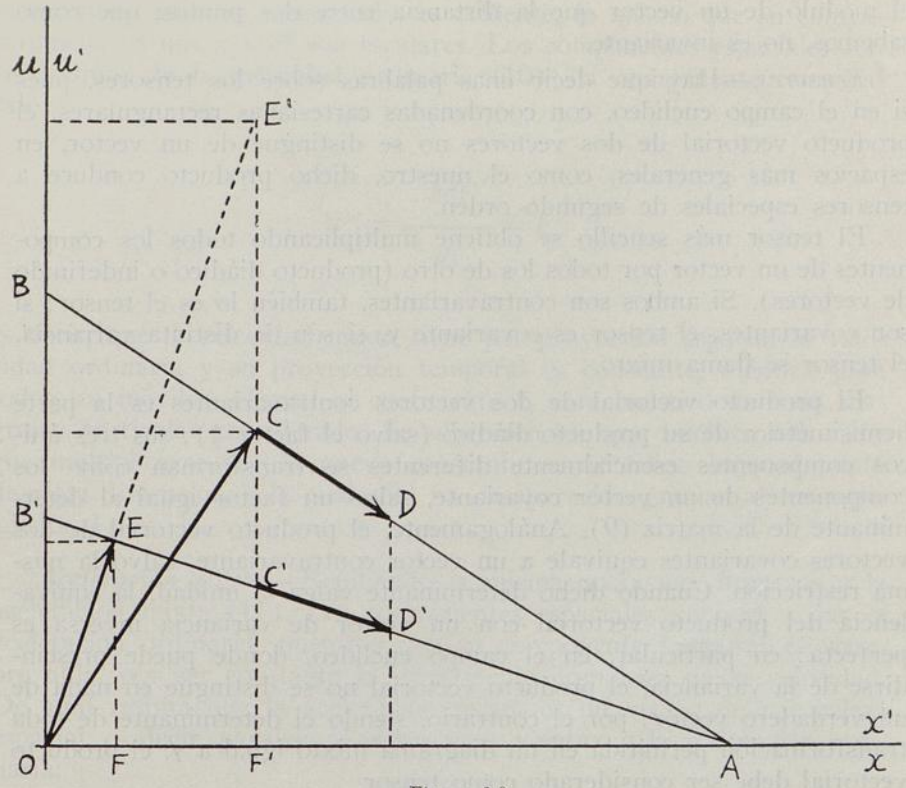


Figura 2.ª

Escribimos, como es costumbre, los índices en la parte superior para indicar la contravariancia, y en la inferior, para indicar la covariancia. Del mismo modo se transforman los componentes covariantes en contravariantes, mediante la fórmula:

$$B^u = k^2 B_u$$

Ahora es posible definir el producto escalar de dos vectores de distinta variancia:

$$A \,.\, B = A_x B^x + \ldots \quad = A^x B_x + \ldots$$

y el módulo de un vector multiplicándolo escalarmente por sí mismo:

$$A^2 = (A^x)^2 + (A^y)^2 + \frac{1}{k^2}(A^u)^2 = (A_x)^2 + (A_y)^2 + k^2 (A_u)^2$$

donde se reconocen los mismos invariantes obtenidos antes; este invariante, en cualquiera de sus dos formas, representa, pues, mejor

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

el módulo de un vector que la distancia entre dos puntos, que como sabemos, no es invariante.

Tensores.—Hay que decir unas palabras sobre los tensores, pues si en el campo euclídeo, con coordenadas cartesianas rectangulares, el producto vectorial de dos vectores no se distingue de un vector, en espacios más generales, como el nuestro, dicho producto conduce a tensores especiales de segundo orden.

El tensor más sencillo se obtiene multiplicando todos los componentes de un vector por todos los de otro (producto diádico o indefinido de vectores). Si ambos son contravariantes, también lo es el tensor; si son covariantes, el tensor es covariante y, si son de distinta variancia, el tensor se llama mixto.

El producto vectorial de dos vectores contravariantes es la parte hemisimétrica de su producto diádico (salvo el factor $\frac{1}{2}$); sus tres únicos componentes esencialmente diferentes se transforman como los componentes de un vector covariante, salvo un factor igual al determinante de la matriz (9). Análogamente, el producto vectorial de dos vectores covariantes equivale a un vector contravariante, salvo la misma restricción. Cuando dicho determinante valga la unidad, la equivalencia del producto vectorial con un vector de variancia inversa es perfecta; en particular, en el campo euclídeo, donde puede prescindirse de la variancia, el producto vectorial no se distingue en nada de un verdadero vector; por el contrario, siendo el determinante de toda transformación permitida en un diagrama mixto igual a γ, el producto vectorial debe ser considerado como tensor.

Vectores fundamentales.—Es necesario repetir aquí las consideraciones que hicimos al principio respecto de la posibilidad de la representación geométrica: cuando queremos representar un vector de naturaleza física, tenemos que multiplicar previamente por un coeficiente apropiado, que transforme dicha magnitud en otra geométrica; en el caso particular de querer representar velocidades, tenemos que multiplicar por un coeficiente de dimensión tiempo. Esto lo está haciendo todo el mundo instintivamente.

Y dicho esto, pasemos a definir los vectores fundamentales de la Cinemática.

Velocidad mixta.—Multiplicando por $\frac{n}{dt}$ los componentes del vector diferencial de posición, se obtienen los componentes de un vector finito (y que me perdonen los matemáticos la falta de rigor expositivo), que podemos denominar *velocidad mixta.* El factor n es el factor de transformación, que tiene las dimensiones del tiempo; se puede omitir si se conviene en tomarlo igual a la unidad. El carácter

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

vectorial del ente así constituído, es evidente, lo mismo que su contravariancia, ya que n y dt son escalares. Los componentes espaciales son los mismos de la velocidad ordinaria (10); la componente temporal vale:

$$V^u = \frac{kdt}{dt} = k$$

es decir, que la velocidad mixta tiene por proyección espacial la velocidad ordinaria y su proyección temporal es constante, idéntica para todos los móviles, e igual al coeficiente k, característico de cada diagrama particular considerado. Se sobreentiende que también ella tiene que multiplicarse por la nueva constante n, necesaria bajo el punto de vista dimensional, la cual sólo ha desaparecido gracias al convenio adicional $n = 1$.

Aceleración mixta.—Repitiendo la misma operación, llegamos a la aceleración mixta (11). Los componentes espaciales vuelven a dar la aceleración ordinaria, mientras que su componente temporal es siempre nula, por ser constante la componente homóloga de la velocidad. De aquí resulta que la aceleración mixta es un vector de naturaleza espacial, es decir, paralelo al plano xy, e idéntico a la aceleración ordinaria.

Trayectorias mixtas.—Si eliminamos el tiempo entre las tres ecuaciones paramétricas del movimiento de un punto (la última, común a todos los móviles, es sencillamente $u = kt$), obtendremos dos nuevas ecuaciones que relacionan las tres variables x y u; la curva representada por ellas es la que hemos llamado al principio *trayectoria mixta;* su proyección sobre el plano xy es la trayectoria ordinaria, cuya ecuación resulta de eliminar u entre las dos ecuaciones que definen la trayectoria mixta. La trayectoria mixta representa, por sí sola, la ley completa del movimiento.

Vamos a dar algunas ilustraciones elementales, escogiendo los movimientos más sencillos y conocidos. En el movimiento uniforme la trayectoria mixta es una línea recta (fig. 3). En general, cualquier movimiento rectilíneo posee una trayectoria mixta plana, contenida en un plano paralelo al eje u, que puede identificarse con uno de los planos coordenados; aquí tenemos la representación del movimiento uniforme acelerado (fig. 4), su trayectoria mixta es una parábola, y con ella puede comprobarse que la aceleración, que es sensiblemente proporcional a la diferencia de velocidades correspondientes a puntos

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

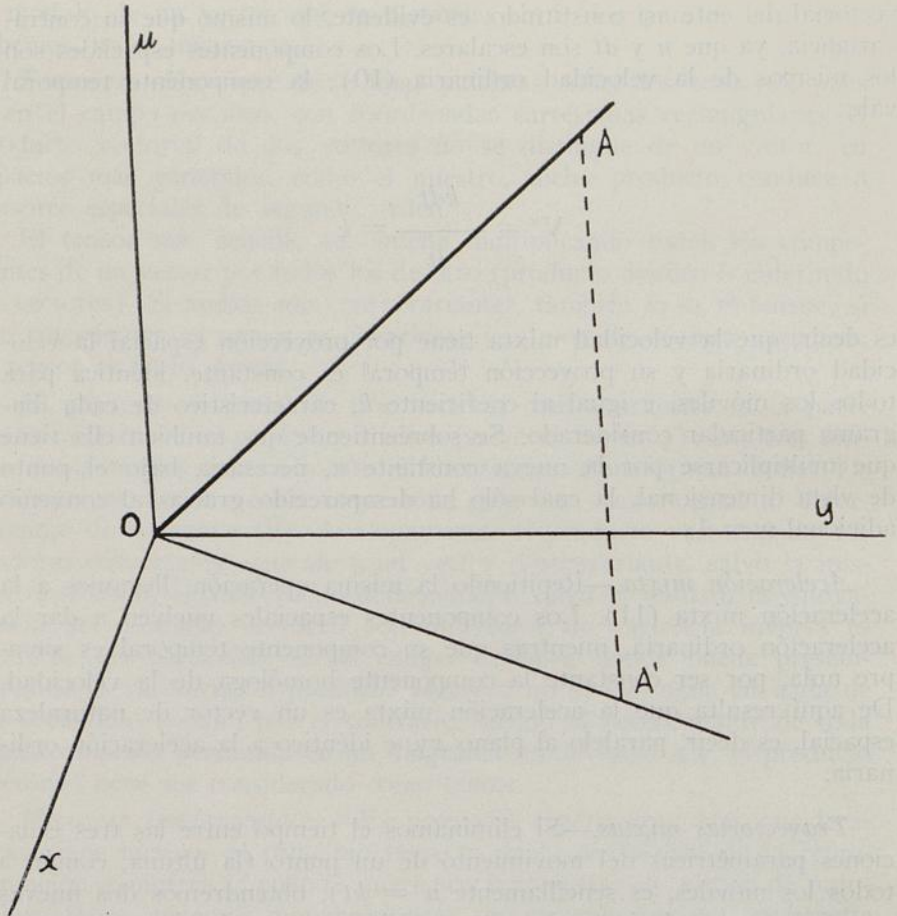


Figura 3.ª

equidistantes sobre el eje *u*, es un vector de longitud constante y dirección horizontal, de acuerdo con lo dicho antes sobre la naturaleza espacial de la aceleración mixta (12). Otro ejemplo lo obtenemos del movimiento circular uniforme (fig. 5). La trayectoria mixta es una hélice de paso constante; la proyección horizontal es, naturalmente, la circunferencia-trayectoria; el módulo de la velocidad mixta y la pendiente de la curva son constantes; la aceleración es un vector horizontal de módulo constante y dirigido siempre hacia el eje *u* (13).

Medios continuos. Gradiente mixto.—Si consideramos un campo escalar definido por una función uniforme de *x y u*, podemos llamar *gradiente mixto* al ente definido por las derivadas parciales con rela-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

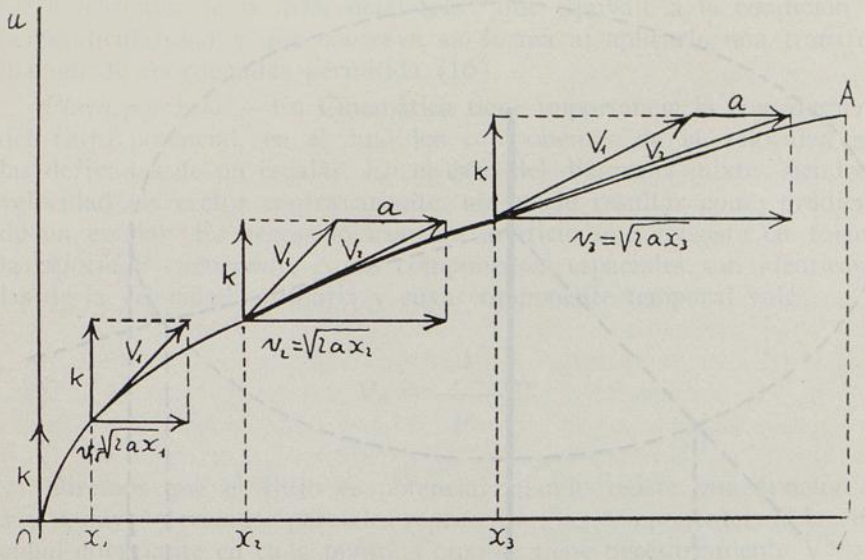


Figura 4.ª

ción a las tres coordenadas. Las derivadas con relación a x y, nos vuelven a dar el gradiente ordinario; la derivada con relación a u vale:

$$\frac{\delta m}{\delta u} = \frac{1}{k} \frac{\delta m}{\delta t}$$

y representa lo que en Meteorología llamamos la *tendencia* (14). Nos parece muy interesante esta posibilidad de refundir en el gradiente mixto los dos operadores independientes *gradiente* y *tendencia* y consideramos que esta posibilidad revela las más prometedoras ventajas del diagrama mixto.

La magnitud definida es un vector covariante (15), como es fácil comprobar atendiendo a la fórmula de transformación aplicable a su componente temporal:

$$\frac{\delta m}{\delta u} = \frac{1}{\gamma} \frac{\delta m}{\delta u'}$$

Es evidente e importante que la perpendicularidad se conserva, es decir, que el gradiente mixto es perpendicular a cualquier vector contenido en la superficie equiescalar que pasa por su origen; basta escri-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

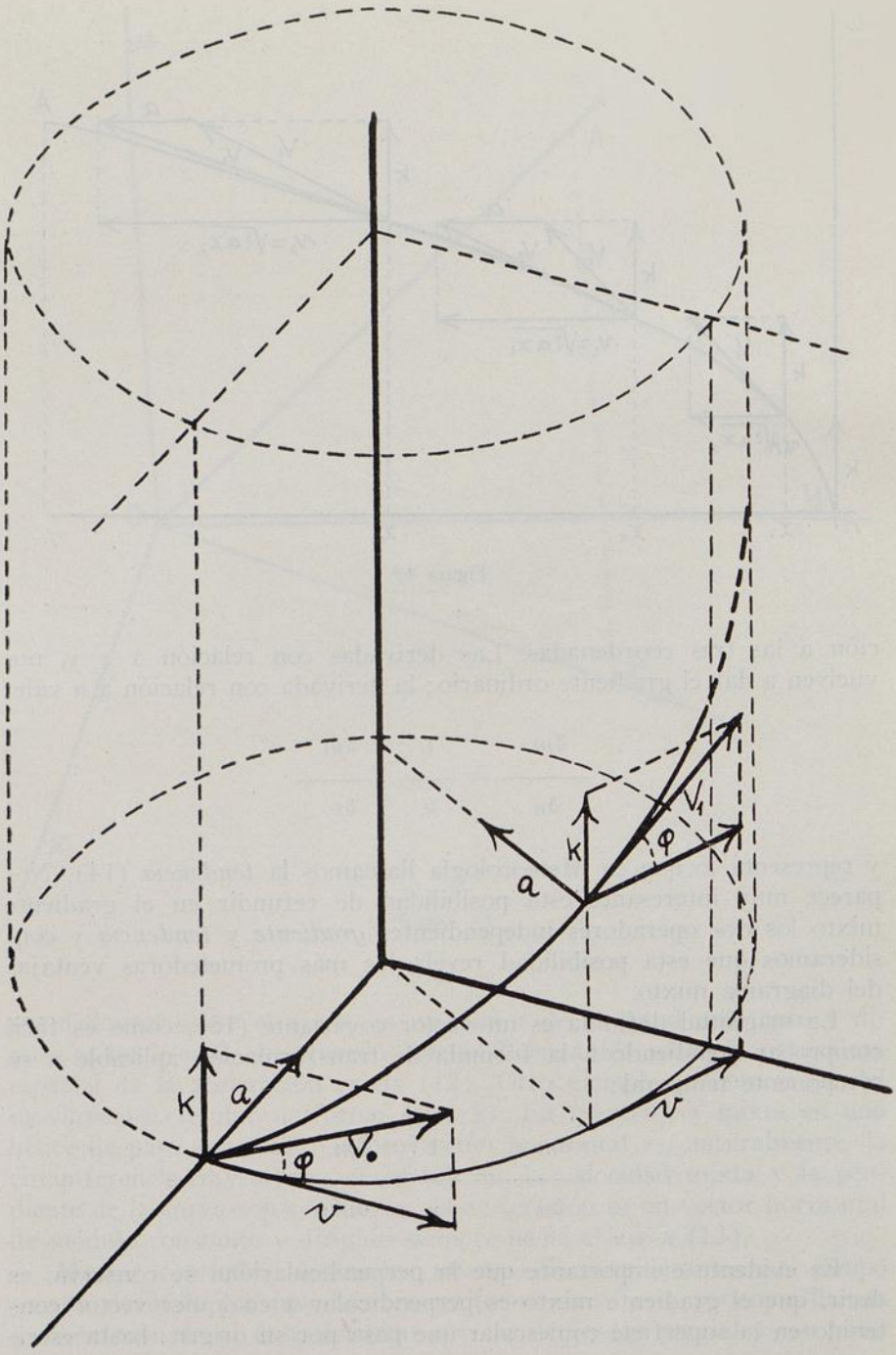


Figura 5.ª

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

bir la fórmula de la diferencial total, que equivale a la condición de perpendicularidad y que conserva su forma al aplicarle una transformación de coordenadas permitida (16).

Flujo potencial.—En Cinemática tiene importancia la consideración del flujo potencial, en el cual los componentes de la velocidad son las derivadas de un escalar. En el caso del diagrama mixto, siendo la velocidad un vector contravariante, no puede resultar como gradiente de un escalar. Es necesario usar un artificio que consiste en formar la *velocidad covariante,* cuyas componentes espaciales son idénticas a las de la velocidad ordinaria y cuya componente temporal vale:

$$V_u = \frac{1}{k^2} V^u$$

Diremos que el flujo es potencial cuando existe una función de x y u, cuyas derivadas parciales representan las componentes de la velocidad covariante en cada punto. Como se tiene necesariamente $V^u = k$ y, por tanto, $V_u = \frac{1}{k}$ las únicas funciones que pueden desempeñar el papel de potencial de velocidades son del tipo:

$$\Phi = \varphi (x\, y) + \frac{u}{k}$$

que corresponde al régimen permanente. Recíprocamente, el flujo estacionario potencial es también potencial en el diagrama mixto, y la función potencial se forma sumando sencillamente al potencial ordinario (que no depende del tiempo y, por tanto, tampoco de u), el término $\frac{u}{k}$. Si el potencial de velocidad en el espacio espacial depende del tiempo, el flujo en el diagrama mixto no es potencial.

Divergencia mixta.—El operador ∇ generalizado funciona como un vector covariante y, por tanto, se puede multiplicar escalarmente por un vector contravariante, como lo es la velocidad, siendo el producto un escalar, que se denominará *divergencia mixta.* Su invariancia está asegurada formalmente siguiendo el camino clásico, que es válido. Ahora bien, como la componente temporal de la velocidad es constante, su derivada es nula y, por tanto, la divergencia mixta coincide completamente con la divergencia ordinaria (17). El teorema de Gauss no

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

añade nada nuevo, ya que el flujo de la componente temporal a través de una superficie cerrada es también nulo y el teorema no trasciende del espacio espacial.

Rotacional mixto.—Análogamente, la multiplicación vectorial del operador ∇ generalizado por un vector covariante, produce un tensor hemisimétrico que se designa por *rotacional mixto*. Es necesario que el vector sea covariante porque el vector simbólico lo es. Si se desea formar el rotacional de un vector contravariante, es preciso preparar previamente sus componentes covariantes. En realidad, basta tener en cuenta el componente temporal, pues el cambio de variancia no afecta a los componentes espaciales. Si se trata de la velocidad, ni siquiera hace falta esto, pues dicha componente temporal es constante (18).

Los componentes espaciales del rotacional representan la tendencia de la velocidad, o sea, su variación con relación al tiempo, mientras que su componente temporal se identifica con el rotacional ordinario. Aquí se repite la fusión de dos operadores que hasta ahora habían permanecido independientes: el *rotacional* ordinario y la *tendencia* de la velocidad. Lo que el gradiente mixto es para un escalar, es el rotacional mixto para un vector.

El teorema de Stokes es válido en el diagrama mixto. Para convencerse basta proyectar el circuito de integración sobre los tres planos coordenados; la proyección sobre el plano espacial da la circulación de la velocidad ordinaria y el flujo del rotacional, también ordinario, es decir, agota el contenido del teorema clásico; las proyecciones sobre los planos mixtos conducen a identidades. Por otra parte, como la contribución de la componente temporal a la integral es nula, se puede prescindir de ella, y enunciar el teorema en términos que parecen a primera vista algo contradictorios: *la circulación de la velocidad ordinaria a lo largo de un circuito cerrado es igual al flujo del rotacional mixto de la velocidad mixta que atraviesa el área limitada por el circuito.* Este enunciado posee un valor prognóstico por incluir términos que dependen del tiempo junto con otros que no. Lo mismo ocurre con el gradiente mixto.

Líneas de corriente.—En los medios continuos las líneas de corriente instantáneas se relacionan estrechamente con las trayectorias de las partículas, y coinciden con ellas cuando el régimen es permanente. Este enlace se hace evidente con el uso del diagrama mixto.

Las líneas de corriente están contenidas en planos paralelos a x y, es decir, son de naturaleza espacial pura, mientras que las trayectorias atraviesan dichos planos. Por un punto cualquiera del diagrama pasa una línea de corriente y una trayectoria mixta. Aquí tenemos un ejemplo simplificado (fig. 6). Se trata de un torbellino móvil, sin variación intrínseca. La línea inclinada representa la trayectoria mixta del

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

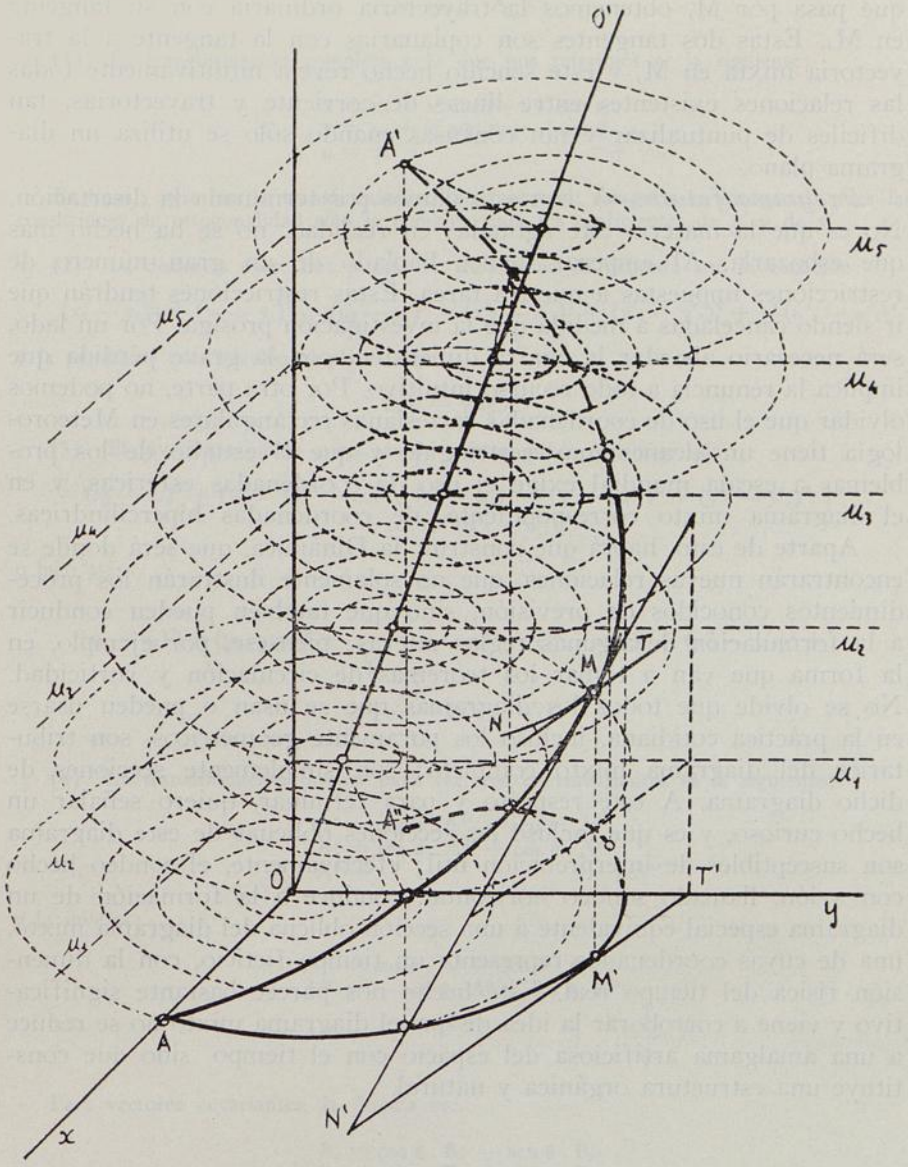


Figura 6.ª

centro. Consideremos un punto cualquiera M, que está situado en el tercer plano de los aquí representados; la línea de corriente que pasa por M está contenida en dicho plano; su tangente, también; en cambio, si proyectamos sobre el plano espacial inicial la trayectoria mixta

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

que pasa por M, obtenemos la trayectoria ordinaria con su tangente en M_1. Estas dos tangentes son coplanarias con la tangente a la trayectoria mixta en M, y este sencillo hecho revela intuitivamente todas las relaciones existentes entre líneas de corriente y trayectorias, tan difíciles de puntualizar y tan confusas cuando sólo se utiliza un diagrama plano.

Programa futuro.—Y con esto damos por terminada la disertación. No es que la materia esté agotada; en realidad, no se ha hecho más que esbozarla. Al empezar hemos hablado de un gran número de restricciones impuestas a nuestra tarea. Estas restricciones tendrán que ir siendo canceladas a medida que la investigación prosiga. Por un lado, será necesario abordar la cuarta dimensión, con la grave pérdida que implica la renuncia a todo recurso intuitivo. Por otra parte, no podemos olvidar que el uso de coordenadas cartesianas rectangulares en Meteorología tiene un alcance muy restringido y que el estudio de los problemas a escala mundial exige el uso de coordenadas esféricas, y en el diagrama mixto correspondiente, de coordenadas hipercilíndricas.

Aparte de esto, habrá que construir la Dinámica, que será donde se encontrarán nuevas relaciones, que no solamente ilustrarán los procedimientos conocidos de previsión, sino que también pueden conducir a la formulación de algunas reglas nuevas; piénsese, por ejemplo, en la forma que van a tomar los teoremas de circulación y vorticidad. No se olvide que todos los diagramas que se usan o pueden usarse en la práctica cotidiana, incluso los puramente geométricos, son tributarios del diagrama mixto completo; son simplemente secciones de dicho diagrama. A este respecto y para terminar, quiero señalar un hecho curioso, y es que incluso las secciones oblícuas de este diagrama son susceptibles de interpretación útil; efectivamente, el sondeo hecho con avión, llamado sondeo horizontal, conduce a la formación de un diagrama especial equivalente a una sección oblícua del diagrama mixto, una de cuyas coordenadas representa un tiempo ficticio, con la dimensión física del tiempo real. Este hecho nos parece bastante significativo y viene a corroborar la idea de que el diagrama mixto no se reduce a una amalgama artificiosa del espacio con el tiempo, sino que constituye una estructura orgánica y natural.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

(1) La transformación completa a la que nos referimos es la siguiente:

$$\begin{aligned} x &= x_o + x' \cos\theta - y' \operatorname{sen}\theta \\ y &= y_o + x' \operatorname{sen}\theta + y' \cos\theta \\ u &= u_o + \gamma u' \end{aligned}$$

Es lineal, pero no la transformación lineal general; tampoco es ortogonal, pues las condiciones de ortogonalidad sólo se cumplen para los coeficientes de x' y de y'.

(2) La distancia entre dos puntos se transforma de acuerdo con la ecuación:

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (u_2 - u_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + \gamma^2 (u'_2 - u'_1)^2$$

y la pendiente con relación al plano $x\ y$:

$$tg\ \varphi = \gamma\ tg\ \varphi'$$

(3) El invariante ligado a un par de puntos puede escribirse así:

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \cot^2\varphi\,(u_2 - u_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + \cot^2\varphi'\,(u'_2 - u'_1)^2$$

o bien así:

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{k^2}(u_2 - u_1)^2 = (x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + \frac{1}{k'^2}(u'_2 - u'_1)^2$$

(4) La transformación directa para vectores contravariantes es la siguiente:

$$\begin{aligned} A^x &= \cos\theta \,.\, A^{x'} - \operatorname{sen}\theta \,.\, A^{y'} \\ A^y &= \operatorname{sen}\theta \,.\, A^{x'} + \cos\theta \,.\, A^{y'} \\ A^u &= \gamma\, A^{u'} \end{aligned}$$

y la inversa:

$$\begin{aligned} A^{x'} &= \cos\theta \,.\, A^x + \operatorname{sen}\theta \,.\, A^y \\ A^{y'} &= -\operatorname{sen}\theta \,.\, A^x + \cos\theta \,.\, A^y \\ A^{u'} &= \frac{1}{\gamma} A^u \end{aligned}$$

Para vectores covariantes, la directa es:

$$\begin{aligned} B_x &= \cos\theta \,.\, B_{x'} - \operatorname{sen}\theta \,.\, B_{y'} \\ B_y &= \operatorname{sen}\theta \,.\, B_{x'} + \cos\theta \,.\, B_{y'} \\ B_u &= \frac{1}{\gamma} B_{u'} \end{aligned}$$

y la inversa:

$$\begin{aligned} B_{x'} &= \cos\theta \,.\, B_x + \operatorname{sen}\theta \,.\, B_y \\ B_{y'} &= -\operatorname{sen}\theta \,.\, B_x + \cos\theta \,.\, B_y \\ B_{u'} &= \gamma\, B_u \end{aligned}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Estas fórmulas son un caso particular de las que corresponden a la transformación lineal general caracterizada por las matrices:

$$\begin{matrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{matrix} \qquad \begin{matrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{matrix}$$

siendo los términos de la segunda los adjuntos de sus correspondientes de la primera divididos por el determinante de la matriz, es decir, la matriz inversa. Es de notar que la primera es, a su vez, inversa de la segunda.

Los vectores contravariantes se transforman de acuerdo con las fórmulas:

$$\begin{aligned} A^x &= \alpha_{11} A^{x'} + \alpha_{12} A^{y'} + \alpha_{13} A^{u'} \\ &\cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ A^{x'} &= A_{11} A^x + A_{21} A^y + A_{31} A^u \\ &\cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \end{aligned}$$

y los covariantes, de acuerdo con estas otras:

$$\begin{aligned} B_x &= A_{11} B_{x'} + A_{12} B_{y'} + A_{13} B_{u'} \\ &\cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \\ B_{x'} &= \alpha_{11} B_x + \alpha_{21} B_y + \alpha_{31} B_u \\ &\cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \end{aligned}$$

(5) La ecuación de un plano en función de los segmentos m, n, p, que determina sobre los ejes, tiene la forma:

$$\frac{x}{m} + \frac{y}{n} + \frac{u}{p} = 1$$

Apliquemos un cambio de ejes (conservando el origen); la ecuación del plano, según (1), será:

$$\frac{\cos\theta \cdot x' - \operatorname{sen}\theta \cdot y'}{m} + \frac{\operatorname{sen}\theta \cdot x' + \cos\theta \cdot y'}{n} + \frac{\gamma u'}{p} = 1$$

o bien:

$$\left(\frac{\cos\theta}{m} + \frac{\operatorname{sen}\theta}{n} \right) x' + \left(\frac{-\operatorname{sen}\theta}{m} + \frac{\cos\theta}{n} \right) y' + \frac{\gamma}{p} u' = 1$$

de donde:

$$\frac{1}{m'} = \cos\theta \cdot \frac{1}{m} + \operatorname{sen}\theta \cdot \frac{1}{n}$$

$$\frac{1}{n'} = -\operatorname{sen}\theta \cdot \frac{1}{m} + \cos\theta \cdot \frac{1}{n}$$

$$\frac{1}{p'} = \gamma \frac{1}{p}$$

que corresponde al esquema (4) para vectores covariantes, quedando con esto demos-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

trado que $\frac{1}{m}$, $\frac{1}{n}$, $\frac{1}{p}$, son efectivamente los componentes covariantes de un vector.

(6) Si a^x, a^y, a^u son los componentes de un vector (contravariante) situado en el plano de coordenadas m, n, p, la condición de perpendicularidad se escribe así:

$$\frac{a^x}{m} + \frac{a^y}{n} + \frac{a^u}{p} = 0$$

y después de aplicar cualquier transformación permitida:

$$(a^{x'} \cos\theta - a^{y'} \operatorname{sen}\theta)\left(\frac{1}{m'}\cos\theta - \frac{1}{n'}\operatorname{sen}\theta\right) + (a^{x'} \operatorname{sen}\theta + a^{y'}\cos\theta) \cdot$$

$$\cdot\left(\frac{1}{m'}\operatorname{sen}\theta + \frac{1}{n'}\cos\theta\right) + \gamma \cdot a^{u'} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{p'} = \frac{a^{x'}}{m'} + \frac{a^{y'}}{n'} + \frac{a^{u'}}{p'} = 0$$

(7) El invariante ligado a un par de puntos (vector contravariante) es:

$$x^2 + y^2 + \frac{u^2}{k^2}$$

(por comodidad uno de ellos se ha hecho coincidir con el origen) y de aquí se deduce el tensor métrico covariante:

$$\begin{array}{lll} g_{11} = i_x^2 = 1 & g_{12} = i_x \cdot i_y = o & g_{13} = i_x \cdot i_u = o \\ g_{21} = i_y \cdot i_x = o & g_{22} = i_y^2 = 1 & g_{23} = i_y \cdot i_u = o \\ g_{31} = i_u \cdot i_x = o & g_{32} = i_u \cdot i_y = o & g_{33} = i_u^2 = \dfrac{1}{k^2} \end{array}$$

(i_x, i_y, i_u son los vectores unitarios ligados a los ejes).

(8)

$$\begin{aligned} A_x &= g_{11} A^x + g_{12} A^y + g_{13} A^u = A^x \\ A_y &= g_{21} A^x + g_{22} A^y + g_{23} A^u = A^y \\ A_u &= g_{31} A^x + g_{32} A^y + g_{33} A^u = \frac{1}{k^2} A^u \end{aligned}$$

(9) El producto vectorial de A por B (contravariantes) es el tensor hemisimétrico:

$$A \wedge B = \begin{pmatrix} 0 & S_{yu} & S_{ux} \\ -S_{yu} & 0 & S_{xy} \\ -S_{ux} & -S_{xy} & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{xy} = \frac{1}{2}(A^x B^y - A^y B^x)$$

$$S_{yu} = \frac{1}{2}(A^y B^u - A^u B^y)$$

$$S_{ux} = \frac{1}{2}(A^u B^x - A^x B^u)$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Sus elementos se transforman según el esquema:

$$S_{xy} = S_{x'y'} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{vmatrix} + S_{x'u'} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{23} \end{vmatrix} + S_{u'y'} \cdot \begin{vmatrix} \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{22} & \alpha_{23} \end{vmatrix}$$

en todo cambio lineal de coordenadas, esquema que sólo se diferencia del correspondiente a un vector covariante por la falta del divisor

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}$$

Cuando sea $\Delta = 1$ el tensor queda asimilado totalmente a un vector covariante.

(10)

$$V = \frac{dR}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} V^x = \dfrac{dx}{dt} \\ V^y = \dfrac{dy}{dt} \end{array} \right\} = v$$

$$V^u = \frac{du}{dt} = \frac{k\,dt}{dt} = k$$

(11)

$$A = \frac{dV}{dt} = \frac{d^2R}{dt^2} = \left\{ \begin{array}{l} A^x = \dfrac{dV^x}{dt} = \dfrac{d^2x}{dt^2} \\ A^y = \dfrac{dV^y}{dt} = \dfrac{d^2y}{dt^2} \end{array} \right\} = a$$

$$A^u = \frac{dV^u}{dt} = \frac{dk}{dt} = o$$

(12) La ecuación de la trayectoria mixta que corresponde a un movimiento uniformemente acelerado es:

$$u^2 = \frac{2k^2}{a} x$$

El módulo de la velocidad mixta vale:

$$|V| = \sqrt{k^2 + 2ax} = \sqrt{k^2 + \frac{a^2u^2}{k^2}}$$

y su inclinación sobre el eje x:

$$tg\,\varphi = \frac{k}{\sqrt{2ax}} = \frac{k^2}{au}$$

(13) Paso de la hélice $= kT$ (T = período).

Módulo de la velocidad mixta:

$$V = \sqrt{v^2 + k^2} = \text{constante}$$

Inclinación:

$$tg\,\varphi = \frac{k}{v} = \text{constante}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

(14) Siendo $m = m\,(x,\ y,\ u)$ se tiene:

$$\overline{\text{grad.}}\ m = -\overline{\nabla}\, m = \left\{ \begin{array}{c} -\dfrac{\delta m}{\delta x} \\ -\dfrac{\delta m}{\delta y} \\ -\dfrac{\delta m}{\delta u} \end{array} \right\} = -\nabla m = -\frac{1}{k}\frac{\delta m}{\delta t}$$

Sobrerrayamos los símbolos $\overline{\text{grad.}}$ y $\overline{\nabla}$ para distinguirlos de los que se usan para designar el gradiente ordinario.

(15) Sea una transformación definida por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} x &= x\,(x'\ y'\ u') \\ y &= y\,(x'\ y'\ u') \\ u &= u\,(x'\ y'\ u') \end{aligned}$$

donde $x,\ y,\ u$ son funciones de $x',\ y',\ u'$, sin más restricciones que las de ser uniformes y el sistema resoluble con relación a $x',\ y',\ u'$. Esta transformación es más general que la considerada en la nota (4). Las dos matrices inversas ligadas a esta transformación son:

$$\left| \begin{array}{ccc} \dfrac{\delta x}{\delta x'} & \dfrac{\delta x}{\delta y'} & \dfrac{\delta x}{\delta u'} \\ \dfrac{\delta y}{\delta x'} & \dfrac{\delta y}{\delta y'} & \dfrac{\delta y}{\delta u'} \\ \dfrac{\delta u}{\delta x'} & \dfrac{\delta u}{\delta y'} & \dfrac{\delta u}{\delta u'} \end{array} \right| \qquad \left| \begin{array}{ccc} \dfrac{\delta x'}{\delta x} & \dfrac{\delta y'}{\delta x} & \dfrac{\delta u'}{\delta x} \\ \dfrac{\delta x'}{\delta y} & \dfrac{\delta y'}{\delta y} & \dfrac{\delta u'}{\delta y} \\ \dfrac{\delta x'}{\delta u} & \dfrac{\delta y'}{\delta u} & \dfrac{\delta u'}{\delta u} \end{array} \right|$$

El carácter contravariante de un vector está ligado al esquema:

$$A^x = A^{x'}\frac{\delta x}{\delta x'} + A^{y'}\frac{\delta x}{\delta y'} + A^{u'}\frac{\delta x}{\delta u'}$$

$$A^y = A^{x'}\frac{\delta y}{\delta x'} + A^{y'}\frac{\delta y}{\delta y'} + A^{u'}\frac{\delta y}{\delta u'}$$

$$A^u = A^{x'}\frac{\delta u}{\delta x'} + A^{y'}\frac{\delta u}{\delta y'} + A^{u'}\frac{\delta u}{\delta u'}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

y a su recíproco:

$$A^{x'} = A^x \frac{\delta x'}{\delta x} + A^y \frac{\delta x'}{\delta y} + A^u \frac{\delta x'}{\delta u}$$

... ...

y el covariante a estos otros:

$$B_x = B_{x'} \frac{\delta x'}{\delta x} + B_{y'} \frac{\delta y'}{\delta x} + B_{u'} \frac{\delta u'}{\delta x}$$

$$B_y = B_{x'} \frac{\delta x'}{\delta y} + B_{y'} \frac{\delta y'}{\delta y} + B_{u'} \frac{\delta u'}{\delta y}$$

$$B_u = B_{x'} \frac{\delta x'}{\delta u} + B_{y'} \frac{\delta y'}{\delta u} + B_{u'} \frac{\delta u'}{\delta u}$$

$$B_{x'} = B_x \frac{\delta x}{\delta x'} + B_y \frac{\delta y}{\delta x'} + B_u \frac{\delta u}{\delta x'}$$

... ...

El vector infinitesimal ds (elemento de línea), es contravariante, pues se tiene evidentemente:

$$dx = \frac{\delta x}{\delta x'} dx' + \frac{\delta x}{\delta y'} dy' + \frac{\delta x}{\delta u'} du'$$

$$dy = \frac{\delta y}{\delta x'} dx' + \frac{\delta y}{\delta y'} dy' + \frac{\delta y}{\delta u'} du'$$

$$du = \frac{\delta u}{\delta x'} dx' + \frac{\delta u}{\delta y'} dy' + \frac{\delta u}{\delta u'} du'$$

mientras que el gradiente es covariante, pues se tiene:

$$\frac{\delta m}{\delta x} = \frac{\delta m}{\delta x'} \frac{\delta x'}{\delta x} + \frac{\delta m}{\delta y'} \frac{\delta y'}{\delta x} + \frac{\delta m}{\delta u'} \frac{\delta u'}{\delta x}$$

$$\frac{\delta m}{\delta y} = \frac{\delta m}{\delta x'} \frac{\delta x'}{\delta y} + \frac{\delta m}{\delta y'} \frac{\delta y'}{\delta y} + \frac{\delta m}{\delta u'} \frac{\delta u'}{\delta y}$$

$$\frac{\delta m}{\delta u} = \frac{\delta m}{\delta x'} \frac{\delta x'}{\delta u} + \frac{\delta m}{\delta y'} \frac{\delta y'}{\delta u} + \frac{\delta m}{\delta u'} \frac{\delta u'}{\delta u}$$

En el caso particular de la transformación, nota (1), resulta:

$$\frac{\delta x'}{\delta x} = \cos . \theta \qquad \frac{\delta y'}{\delta x} = -\operatorname{sen} \theta \qquad \frac{\delta u'}{\delta x} = o$$

$$\frac{\delta x'}{\delta y} = \operatorname{sen} \theta \qquad \frac{\delta y'}{\delta y} = \cos \theta \qquad \frac{\delta u'}{\delta y} = o$$

$$\frac{\delta x'}{\delta u} = o \qquad \frac{\delta y'}{\delta u} = o \qquad \frac{\delta u'}{\delta u} = \frac{1}{\gamma}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

y, por tanto,

$$\frac{\delta m}{\delta x} = \frac{\delta m}{\delta x'}\cos\theta - \frac{\delta m}{\delta y'}\operatorname{sen}\theta$$

$$\frac{\delta m}{\delta y} = \frac{\delta m}{\delta x'}\operatorname{sen}\theta + \frac{\delta m}{\delta y'}\cos\theta$$

$$\frac{\delta m}{\delta u} = \frac{1}{\gamma}\frac{\delta m}{\delta u'}$$

(16) Si el vector ds se encuentra situado sobre la superficie equiescalar, la identidad:

$$\frac{\delta m}{\delta x}dx + \frac{\delta m}{\delta y}dy + \frac{\delta m}{\delta u}du = dm = o$$

expresa la condición de perpendicularidad entre dicho vector y el vector gradiente. Aplicando un cambio de coordenadas permtido resulta:

$$\frac{\delta m}{\delta x}dx + \frac{\delta m}{\delta y}dy + \frac{\delta m}{\delta u}du = \frac{\delta m}{\delta x'}dx' + \frac{\delta m}{\delta y'}dy' +$$

$$+ \frac{1}{\gamma}\frac{\delta m}{\delta u'}.\,\gamma\,du' = \frac{\delta m}{\delta x'}dx' + \frac{\delta m}{\delta y'}dy' +$$

$$+ \frac{\delta m}{\delta u'}du' = o$$

y los nuevos vectores ds' y $\overline{\nabla} m$ siguen siendo perpendiculares.

(17) La divergencia mixta ($\overline{\text{div.}}$) del vector contravariante A está definida por la operación:

$$\overline{\text{div.}}\ A = \frac{\delta A^x}{\delta x} + \frac{\delta A^y}{\delta y} + \frac{\delta A^u}{\delta u}$$

y en el caso particular de la velocidad, por ser $\dfrac{\delta V^u}{\delta u} = o$:

$$\overline{\text{div.}}\ V = \frac{\delta V^x}{\delta x} + \frac{\delta V^y}{\delta y} = \frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} = \text{div. } v$$

(18) El operador rotacional mixto ($\overline{\text{rot.}}$) está definido por las fórmulas siguientes:

$$\overline{\text{rot.}}\ B = \overline{\nabla} \wedge B = \begin{vmatrix} \dfrac{\delta B_u}{\delta y} - \dfrac{\delta B_y}{\delta u} \\ \dfrac{\delta B_x}{\delta u} - \dfrac{\delta B_u}{\delta x} \\ \dfrac{\delta B_y}{\delta x} - \dfrac{\delta B_x}{\delta y} \end{vmatrix}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

En el caso de la velocidad, recordando que $V_x = V^x$, $V_y = V^y$, $V_u = \text{const.}$ resulta:

$$\left.\begin{aligned} \overline{(\text{rot. V})}_x &= -\frac{\delta V^y}{\delta u} = -\frac{1}{k}\frac{\delta V^y}{\delta t} \\ \overline{(\text{rot. V})}_y &= \frac{\delta V^x}{\delta u} = \frac{1}{k}\frac{\delta V^x}{\delta t} \end{aligned}\right\} = -\frac{1}{k}\,.\,\text{tend. } v$$

$$(\text{rot. V})_u = \frac{\delta V^y}{\delta x} - \frac{\delta V^x}{\delta y} = -\,\text{rot. } v$$

De las dos primeras, derivando respectivamente con relación a x y con relación a y, y sumando se deduce:

$$\frac{\delta}{\delta x}\overline{(\text{rot. V})}_x + \frac{\delta}{\delta y}\overline{(\text{rot. V})}_y = \frac{1}{k}\frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta V^x}{\delta y} - \frac{\delta V^y}{\delta x}\right) = \frac{1}{k}\frac{\delta}{\delta t}\,\text{rot. } v$$

o bien:

$$\frac{\delta}{\delta x}\overline{(\text{rot. V})}_x + \frac{\delta}{\delta y}\overline{(\text{rot. V})}_y = -\frac{1}{k}\frac{\delta}{\delta t}\overline{(\text{rot. V})}_u = -\frac{\delta}{\delta u}\overline{(\text{rot. V})}_u$$

es decir:

$$\overline{\text{div.}}\ \overline{\text{rot.}}\ \text{V} = o$$

de acuerdo con una fórmula clásica de cálculo vectorial. Recíprocamente, partiendo de esta fórmula podía haberse establecido la anterior.

Fig. 1.—Transformaciones permtidas: desplazamiento del origen, rotación alrededor del eje temporal; cambio de escala sobre este eje.

Fig. 2.—Perpendicularidad de vectores.
Si se hace $u = 2u'$, el vector CD se transforma en C'D', mientras que OC, considerado como distancia de la recta AB al origen, se transforma en OE.

$$\text{OA} = m$$

$$\text{OB} = p$$

$$\left.\begin{aligned} \text{OF}' &= \frac{p^2}{m^2 + p^2}\,.\,m \\ \text{F}'\text{C} &= \frac{m^2}{m^2 + p^2}\,.\,p \end{aligned}\right\} \quad \frac{\text{F}'\text{C}}{\text{OF}'} = \frac{m}{p}$$

$$\text{OA} = m' = m$$

$$\text{OB}' = p' = \frac{p}{2}$$

$$\left.\begin{aligned} \text{OF} &= \frac{p^2/4}{m^2 + p^2/4}\,.\,m \\ \text{FE} &= \frac{m^2}{m^2 + p^2/4}\,.\,\frac{p}{2} \end{aligned}\right\} \quad \frac{\text{FE}}{\text{OF}} = 2\frac{m}{p} = \frac{\text{F}'\text{E}'}{\text{OF}'}$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Fig. 3.—Movimiento rectilíneo uniforme.

OA, trayectoria mixta

OA′, trayectoria ordinaria

Fig. 4.—Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

OA, trayectoria mixta

OA′, trayectoria real

V_2, es la resultante de V_1 y del vector constante horizontal a.

Fig. 5.—Movimiento circular uniforme.

V_o, V_1, velocidad mixta

v, v, velocidad real

a, aceleración.

Fig. 6.—Líneas de corriente y trayectorias.

OO′, trayectoria mixta del centro

AA′, trayectoria mixta de un punto

AA″, trayectoria real del mismo punto

Líneas de puntos, líneas de corriente para distintos valores de u (momentos sucesivos).

MN, línea de corriente que pasa por el punto M, situado en el plano $u = u_2$

MN′, tangente a la trayectoria mixta

MT, tangente a la línea de corriente

N′T′, tangente a la trayectoria real.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

IV

Métodos de análisis y predicción aeronáutica para la zona próxima a la tropopausa

Conferencia pronunciada en Madrid el día 21 de mayo de 1962

por

D. RAFAEL CUBERO ROBLES

Meteorólogo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

METODOS DE ANALISIS Y PREDICCION AERONAUTICA PARA LA ZONA PROXIMA A LA TROPOPAUSA

Introducción.

El objeto de este artículo es exponer un procedimiento operativo para el análisis y predicción en la capa de la atmósfera comprendida entre las superficies isobáricas de 300 y 150 mb. (aproximadamente, entre 30.000 y 45.000 pies).

El interés de esta zona de la atmósfera se hace de día en día más grande, ya que en ella tienen lugar los vuelos de los aviones comerciales a reacción, que ya acaparan el tráfico aéreo en todas las rutas intercontinentales.

Se da el caso de que, entre estos dos niveles, el campo de viento y temperatura adopta características muy complejas, por alojarse entre ellos dos elementos de naturaleza discontinua y que, a su vez, tienen una máxima importancia en las operaciones de los aviones a reacción, a saber: *la tropopausa* y *la corriente del chorro.*

Mientras los aviones operaban por debajo del nivel de 300 mb. y a una altura-presión constante, el estudio del campo de viento y temperatura a diversas superficies isobáricas (700, 500, 400 mb.) era suficiente para las necesidades y la interpolación de los valores de cualquier variable entre estos niveles estaba plenamente justificada.

Similarmente, para definir la distribución de viento y temperatura en la capa 300-150 mb. se puede hacer el análisis y la predicción a los niveles de 300, 250, 200 y 150 mb. Pero la experiencia demuestra que—excepto quizá en las regiones tropicales y áreas de vientos relativamente flojos—surgen grandes dificultades, por ser muy difícil diferenciar la estructura del campo de los diferentes elementos en estos niveles tipos o, en otras palabras, que las topografías relativas entre estos niveles están mal definidas desde el punto de vista del análisis, presentan gran dificultad en mantener continuidad y, por consiguiente, no se prestan a una predic-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ción razonablemente exacta. Se llega a la conclusión de que no resulta práctico atacar el problema por medio del análisis y predicción de un número más o menos grande de niveles isobáricos tipos.

La solución se ha encontrado con un método que se basa en la representación horizontal de la distribución vertical de temperatura y viento, con la introducción del mapa combinado de tropopausa y gradiente vertical del viento (TVWSC: del inglés Tropopause Vertical Wind Shear Chart) que, junto con el mapa de 300 mb., nos definen todos los valores de viento y temperatura en cualquier punto a cualquier nivel.

Insistiremos en que lo que sigue es únicamente una técnica o procedimiento operativo o de aplicación, utilizando conceptos que son bien conocidos por los especialistas en Meteorología Aeronáutica y que han sido formulados o admitidos por meteorólogos de muchos países.

Tienen el principal valor de ser una recopilación de la experiencia recogida durante un período de años de servicio de los aviones de reacción comerciales sobre el Atlántico Norte.

Los Centros Meteorológicos de New York y del aeropuerto de Shannon (Irlanda), a ambos lados del Atlántico, han dedicado gran atención al problema que presenta no sólo el análisis y predicción de esta capa, sino la forma más adecuada de presentar los resultados de manera que sean de la máxima utilidad práctica para las compañías aéreas interesadas en utilizar las rutas y niveles de vuelo más favorables en cada ocasión.

Ha habido numerosos intercambios de información entre estos Centros, y aunque aún las técnicas utilizadas por ambos para el análisis y predicción varían en detalles, han unificado el sistema de presentación de los resultados comprendidos en una pareja de cartas previstas de tal manera que recientemente han podido repartirse el área de interés comprendida entre la costa del Pacífico y Europa Central y entre las latitudes 30º N y 70º N, quedando cada Centro Meteorológico encargado del estudio de una mitad de esta zona separadas por el meridiano 30º W, intercambiándose los resultados de forma que las cartas son yuxtaponibles.

A continuación haremos una descripción de los fundamentos generales en que se basa el método para luego explicar con más detalles las simplificaciones introducidas en lo que llamaremos el método irlandés, por haber sido desarrollado y adoptado, después de numerosas modificaciones, por los meteorólogos del aeropuerto de Shannon, donde el autor ha tenido la oportunidad de trabajar hasta fecha reciente.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Problemas analíticos generales al estudio de la capa 300-150 mb.

1. Densidad de observaciones.

Las redes densas de observatorios de radiosondas están limitadas a cierta zona terrestre, como Estados Unidos y Europa Occidental, y en estas áreas la cantidad de datos es, en general, suficiente para hacer posible un detallado análisis de la tropopausa y corriente de chorro, con sus campos asociados de temperatura y viento, que asegure una razonable continuidad de una carta a la siguiente. Desgraciadamente, las áreas donde los datos son escasos son las más extensas, lo que origina que en estas regiones sea difícil o imposible localizar la tropopausa y conocer las características de la corriente de chorro. Solamente se dispone de esta información en puntos aislados (barcos meteorológicos, estaciones situadas en islas, datos de aviones) y, excepto haciendo uso de «modelos» físicos o estadísticos de estos elementos, es difícil hacer un análisis detallado partiendo de los datos de observación.

2. Identificación de la tropopausa.

En su sentido más puro, la tropopausa separa la estratosfera de la troposfera. Las dificultades que aparecen en su identificación son debidas a que los criterios que se utilizan para definirlas cuantitativamente son inadecuados. En la generalidad de los casos, estos criterios definen la tropopausa perfectamente, pero, desgraciadamente, los casos restantes se presentan con suficiente frecuencia y en áreas críticas del análisis (corriente del chorro, vaguadas frías troposféricas, etc.) para constituir un problema.

La discrepancia de la curva de temperatura de un sondeo determinado con la clásica inversión del gradiente de temperatura en la tropopausa adquiere formas diferentes. En ocasiones aparecen «tropopausas múltiples», que a veces se complican con intersecciones frontales en la alta troposfera. En otros casos, el gradiente de temperatura a todos los niveles es de tipo troposférico, con lo que apropiadamente se llama estratosfera fría.

Estos problemas de identificación están casi siempre relacionados con la tropopausa polar y ártica y sólo en raras ocasiones con la tropopausa tropical (excepto cuando existe el chorro subtropical).

Por otra parte, la distribución espacial y el «gradiente» de las isohipsas de la tropopausa, trazadas sobre un plano horizontal, representa un desafío para el analista en las áreas de pocos datos. Como veremos más adelante, por medio de los métodos indirectos se puede llegar a cierta exactitud en el trazado de la topografía de la tropopausa.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Se introducen más dificultades, también, por los métodos de cifrar los datos de temperatura del radiosonda por encima de los 300 mb., que, si bien están justificados considerando la inherente falta de exactitud de las observaciones de temperaturas a estas alturas, pueden causar omisiones de puntos que pueden ser importantes para la determinación de la tropopausa.

3. Nivel de viento máximo.

El problema de la determinación del nivel y magnitud del viento máximo es también difícil y viene agravado, naturalmente, en las regiones de pocos datos. Las causas que mencionamos para la tropopausa son también válidas en este caso, además de que existen efectos de aceleraciones de poca duración y efectos de fricción que son imposible de ser traducidos a una escala sinóptica.

Limitación de la exactitud de las observaciones y predicciones.

El error de las observaciones de viento a la altura de la capa 300-150 mb. en el intervalo 80-100 Kts. o superiores, es del orden de magnitud ± 10/20 Kts. y unos 10º en la dirección.

La exactitud de las predicciones de viento es aproximadamente la misma.

El error de las temperaturas medidas por el radiosonda a niveles superiores a los 300 mb. es del orden de magnitud de ± 2º C., mientras que el orden de magnitud de la exactitud de la predicción de temperatura es de ± 4º C.

La exactitud de las observaciones de presión a estos niveles es del orden de magnitud ± 5/10 mb., es decir, unos 500/1.000 pies.

La distribución espacial de las observaciones sobre áreas oceánicas y algunas áreas terrestres es tal que los errores de análisis de viento y temperatura son del mismo orden de magnitud que los arriba mencionados.

Suposiciones o simplificaciones en que se basa el método.

En vista de los mencionados problemas analíticos y limitación de la exactitud de las observaciones, será justificable hacer una serie de suposiciones en cuanto a la estructura vertical en las proximidades de la tropopausa, al objeto de simplificar su estudio y aproximarnos a un cierto «modelo» para uso operativo.

1. En primer lugar, suponemos que el gradiente horizontal de temperatura en la troposfera al nivel de los 300 mb. es conservativo para niveles inferiores hasta el nivel de la tropopausa y análo-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

gamente en la estratosfera al nivel de los 200 mb. para niveles inferiores hasta el nivel de la tropopausa, es decir, que dentro de la troposfera el campo de temperaturas a cualquier nivel isobárico por encima de los 300 mb. tendrá la misma forma, aunque el valor de las isotermas sea diferente, naturalmente, y lo mismo podremos decir del campo de temperaturas estratosféricas. Esto conduce a:

a) Suposición respecto a la temperatura troposférica.

Lo anterior implica que el gradiente vertical de temperatura de la troposfera superior, por encima de los 300 mb., es aproximadamente conservativo con respecto a su distribución espacial. Excepto en el caso de marcadas inversiones de tipo frontal, la experiencia muestra que, *sobre áreas limitadas*, esta suposición es operacionalmente válida. Esta suposición implica también que, una vez propiamente delineado el campo de temperaturas a los 300 mb. dentro de la troposfera, se pueden numerar las isotermas en unidades de espesor y así nos describiría el gradiente vertical de la velocidad del viento para esta capa por encima de los 300 mb.

b) Suposición respecto a la temperatura estratosférica.

Aquí se implica que, delineando propiamente el campo de temperaturas estratosféricas a 200 mb., éste nos describiría la distribución vertical del gradiente de velocidad de viento en la estratosfera.

Ahora bien, es cierto que los gradientes estratosféricos tienen una variación mayor, tanto en tiempo como en espacio, que los gradientes troposféricos. Por consiguiente, la suposición aquí no es tan buena como la correspondiente a la trosposfera. Sin embargo, los procedimientos analíticos que veremos más adelante tienen en cuenta este error y se hacen las correcciones oportunas.

2. Suposiciones respecto a la tropopausa.

Admitiremos que la tropopausa polar forma una superficie inclinada continua y, por consiguiente, no se consideran las «fallas» (breaks) de la tropopausa.

La tropopausa tropical constituye una excepción que trataremos separadamente. La distribución espacial de las observaciones en regiones de pocos datos es tal que impide un análisis y pronóstico de este fenómeno de la «falla» de la tropopausa. Además, la importancia operacional del fenómeno es limitada y ciertamente cuestionable.

3. Suposición referente a la inter-relación de la tropopausa y el nivel de viento máximo.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Dejando aparte el caso de la tropopausa tropical y el chorro subtropical, que se tratarán separadamente, supondremos también —ya que el nivel de viento máximo y la tropopausa polar están muy próximos entre sí, dentro de los límites anteriormente establecidos—que se pueden considerar como coincidentes. Esto implica que la topografía de la tropopausa y el análisis de altitudes de viento máximo son similares y se deben complementar entre sí: En aquellos puntos donde falten datos de viento en las proximidades de la corriente del chorro deberá usarse el nivel de la tropopausa para fijar el nivel de viento máximo y viceversa.

Suponiendo balance de gradiente de viento, el nivel de viento máximo indicará un cambio de signo del gradiente horizontal de temperatura. La tropopausa también viene caracterizada por indicar un cambio del gradiente horizontal de temperatura en sentido vertical y de aquí que exista esta relación íntima entre ella y el nivel de viento máximo.

Dentro de las anteriormente mencionadas limitaciones, estas suposiciones operacionales están ciertamente dentro de los límites de observación, análisis y prognosis. Nótese, por ejemplo, que si al analizar o predecir el nivel de viento máximo o la altura de la tropopausa, se comete un error de 2º ó 3º de latitud, esto equivaldría a varios miles de pies de elevación. Hay que reconocer, ciertamente, que los errores de predicción en tiempo y espacio pueden alcanzar este orden de magnitud y, en tal caso, es evidente que la validez operacional de la suposición será razonable.

4. Dirección del viento en la capa 300-150 mb.

Por último suponemos que la dirección del viento en la capa 300-150 mb. es constante. Es interesante saber en qué grado se sacrifica la exactitud al introducir esta simplificación. Se han hecho estudios estadísticos (Three Dimensional Analysis of the Jet Stream Though Shear Charts., by Karl R. Johannssen, Hdgts, AWS. Washington, D. C., Dec. 1956) que indican que vientos de más de 60 Kts. no se desvían más de 10º en un 83 por 100 de los casos, y para vientos en exceso de 100 Kts., el tanto por ciento aumenta a 92 por 100 para vientos en esta capa. En el caso de vientos relativamente flojos es cuando la desviación es mayor, pero éstos no serán críticos en este tipo de operaciones; por consiguiente, resumiendo: La tropopausa y el nivel de viento máximo se suponen coincidentes. Además, el gradiente vertical medio de velocidad de ciento estratosférico (MVSS) y el gradiente vertical medio de velocidad de viento troposférico (MVTS) implicarán también, respectivamente, el gradiente por encima y por debajo del viento má-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ximo. El gradiente vertical medio de velocidad de viento es la media aritmética de los dos.

Consideraciones matemáticas.

1. Relación del campo de temperaturas isobáricas y el gradiente vertical de viento.

Indicando el subíndice 0 la superficie isobárica en la que se realiza el análisis de temperatura, y con el subíndice 1 otra superficie isobárica, y siendo ΔH la distancia vertical entre estas superficies, tendremos, escogiendo el eje X a lo largo de las isotermas y el eje Y perpendicular a ellas:

Viento térmico:

$$\Delta V = V_1 - V_0 = \frac{g}{\lambda} \cdot \frac{1}{T_M} \cdot \frac{\partial T_M}{\partial y} \Delta H$$

donde

$$\lambda = 2\,\omega \,\text{sen}\, \varphi$$

Ahora bien, teniendo en cuenta la simplificación establecida de que el gradiente horizontal de temperatura se conserva con la altura:

$$\frac{\partial T_M}{\partial y} = \frac{\partial T_0}{\partial y} = \frac{\partial T_1}{\partial y}$$

y podemos escribir:

$$\Delta V = \frac{g}{\lambda} \frac{1}{T_M} \frac{\partial T_0}{\partial y} \Delta H \qquad [1]$$

que nos da el valor del gradiente vertical del viento en función del gradiente de temperatura sobre la superficie isobárica.

Esta ecuación nos permitirá construir una escala semejante a la del viento geostrófico que nos dé la separación de las isotermas trazadas de 5º en 5º C. en términos del gradiente vertical de viento en Kts./1.000 pies.

Es evidente que tal escala sólo sería válida para un determinado valor de T_M, pero teniendo en cuenta la zona en que va a ser empleada, si la construimos para el valor T — 55º C., sólo introducirá un error del 10 por 100 en el intervalo entre — 35º C. y — 75º C.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

2. Cálculo de la inclinación de la tropopausa.

La diferencial total de la temperatura en la tropopausa y estratosfera se puede expresar, respectivamente:

$$dT_T = \left(\frac{\partial T_T}{\partial x}\right) dx + \left(\frac{\partial T_T}{\partial y}\right) dy + \left(\frac{\partial T_T}{\partial z}\right) dz$$

$$dT_s = \left(\frac{\partial T_s}{\partial x}\right) dx + \left(\frac{\partial T_s}{\partial y}\right) dy + \left(\frac{\partial T_s}{\partial z}\right) dz$$

Restando:

$$d(T_T - T_s) = \left(\frac{\partial T_T}{\partial x} - \frac{\partial T_s}{\partial x}\right) dx + \left(\frac{\partial T_T}{\partial y} - \frac{\partial T_s}{\partial y}\right) dy + \left(\frac{\partial T_T}{\partial z} - \frac{\partial T_s}{\partial z}\right) dz$$

En la tropopausa, la discontinuidad del gradiente de temperatura es de primer orden, pero la temperatura en sí es continua, luego:

$$d(T_T - T_s) = 0.$$

Además, escogiendo un sistema coordenado tal que el eje X es paralelo a la tropopausa y el eje Y perpendicular a ella y positivo hacia el polo Norte, se tendrá que:

$$\frac{\partial T_T}{\partial x} - \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$$

y, por consiguiente:

$$\left(\frac{\partial T_T}{\partial z} - \frac{\partial T_s}{\partial z}\right) dz = -\left(\frac{\partial T_T}{\partial y} - \frac{\partial T_s}{\partial y}\right) dy$$

o bien:

$$\frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{\dfrac{\partial T_T}{\partial y} - \dfrac{\partial T_s}{\partial y}}{\dfrac{\partial T_T}{\partial z} - \dfrac{\partial T_s}{\partial z}} \qquad [2]$$

Ahora bien, la ecuación [1] aplicada a una capa en la troposfera o en la estratosfera nos dará:

$$\Delta V_T = \frac{g}{\lambda} \frac{1}{T_M} \frac{\partial T_T}{\partial y} \Delta h \qquad \Delta V_s = \frac{g}{\lambda} \frac{1}{T_M} \frac{\partial T_s}{\partial y} \Delta h$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ya que entonces:

$$\left(\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)_T = \frac{\partial T_T}{\partial y}\ ;\ \left(\frac{\partial T_m}{\partial y}\right)_S = \frac{\partial T_s}{\partial y}\ ,$$

teniendo en cuenta las anteriores suposiciones.

Haciendo:

$$\frac{1}{K} = \frac{g}{\lambda}\,\frac{1}{T_M}$$

obtendremos:

$$\frac{\partial T_T}{\partial y} = K\frac{\Delta V_T}{\Delta h}\ ;\ \frac{\partial T_s}{\partial y} = K\frac{\Delta V_s}{\Delta h}$$

que, llevadas a la ecuación [2], nos darán:

$$\frac{\partial z}{\partial y} = -K\,\frac{\dfrac{\Delta V_T}{\Delta h} - \dfrac{\Delta V_s}{\Delta h}}{\dfrac{\partial T_T}{\partial z} - \dfrac{\partial T_s}{\partial z}} \qquad [3]$$

que nos dará la inclinación de la tropopausa en función del gradiente vertical medio de velocidad de viento y del gradiente vertical medio de temperatura troposférica y estratosférica.

La tabla (I) da las variaciones de K con la latitud.

TABLA I

LATITUD	K
30 N	9×10^{-4}
40 N	12×10^{-4}
50 N	15×10^{-4}
60 N	17×10^{-4}
70 N	18×10^{-4}

Hay evidentes errores y limitaciones en el uso de esta ecuación. Además de los errores inherentes a la ecuación del viento geostrófico, está la limitación:

$$\frac{\partial T_T}{\partial x} - \frac{\partial T_s}{\partial x} = o$$

que, si bien es válida para distancias infinitesimales de la tropopausa, será menos cierta a medida que nos separamos de ella.

Puesto que en la práctica deberemos usar valores finitos, los erro-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

res de aplicación se reducirán midiendo los parámetros lo más cerca posible de la tropopausa. Se debe también tener cuidado en no hacer la medida a una escala tan pequeña que se introduzcan errores de medida aún más grandes. Se sugieren las siguientes reglas:

1. La medida de los gradientes de temperatura troposférica y estratosférica, así como los gradientes verticales de viento, deben limitarse a un valor medio de 3.000 pies por encima y por debajo de la tropopausa.

2. Aplicar la fórmula solamente cuando la separación entre la tropopausa y el nivel de viento máximo es menor de 3.000 pies.

Examinando la ecuación [3] vemos que tanto el numerador como el denominador serán siempre positivos, aunque hay dos excepciones en lo que respecta al numerador: una, cuando el gradiente de viento es nulo en la troposfera y en la estratosfera, y otra, en el caso de que el gradiente estratosférico de viento sea del mismo signo y magnitud igual o superior al gradiente troposférico. En estos casos, la ecuación no será aplicable.

Aplicación de la ecuación.

En la aplicación de esta ecuación convendremos en que el aumento de viento con la altura y la disminución de la temperatura con la altura se consideran variaciones positivas y viceversa.

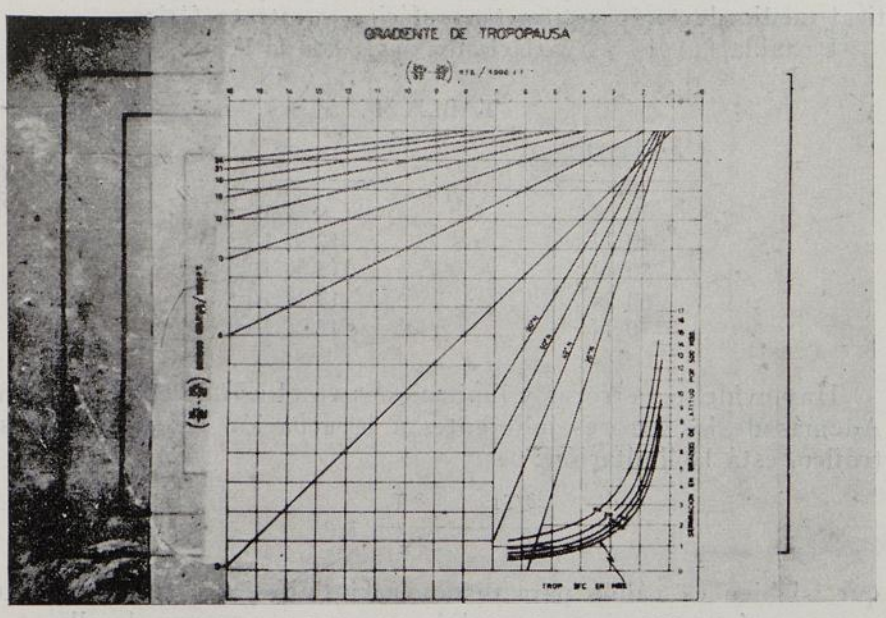


Gráfico II.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

A fin de obtener resultados razonables, es natural que la medida de los diferentes parámetros la hagamos donde existan datos de observación. Esto nos limitará los cálculos a los puntos donde se hagan observaciones con radiosondas, y los resultados se usarán posteriormente para ayudarnos en la representación espacial.

El gráfico (II) es la resolución gráfica de la ecuación [3]. Las líneas inclinadas de la parte superior izquierda son la solución de:

$$\frac{\partial V_T}{\partial z} - \frac{\partial V_g}{\partial z} \qquad \frac{\partial T_T}{\partial z} - \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

y las líneas inclinadas de la parte derecha representan una solución de la constante K en función de la latitud, mientras que las curvas en la parte inferior derecha indican las alturas de la tropopausa.

Ejemplo:

$$\frac{\partial V_T}{\partial z} = 2 \text{ Kts/1.000 FT} \; ; \; \frac{\partial V_g}{\partial z} = -5 \text{ Kts/1.000 FT} \; ; \; \frac{\partial V_T}{\partial z} - \frac{\partial V_g}{\partial z} =$$

$$= 7 \text{ Kts/1.000 FT}$$

$$\frac{\partial T_T}{\partial z} = 8^\circ \text{ C/3.000 FT} \; ; \; \frac{\partial T_g}{\partial z} = -2^\circ \text{ C/3.000 FT} \; ; \; \frac{\partial T_T}{\partial z} - \frac{\partial T_g}{\partial z} =$$

$$= 10^\circ \text{ C/3.000 FT.}$$

Entraremos en el diagrama con los valores anteriores. Desde el punto de intersección de las correspondientes líneas se traza una recta horizontal hasta la latitud correspondiente, y a partir de esta intersección, una perpendicular hasta la intersección con la correspondiente altura de tropopausa (en mb.). A la derecha de este punto leeremos la inclinación de la tropopausa dada en grados de latitud por 50 mb.

Pasamos a continuación al estudio de las diferentes etapas del análisis y la predicción.

Análisis.

Análisis de elementos.

No es posible realizar una buena predicción si no se parte de un buen análisis. Esto es algo elemental que con frecuencia se olvida. Es, por consiguiente, fundamental realizar un análisis detallado y cuidadoso teniendo en cuenta la interdependencia y correlaciones de las diferentes variables que se analizan.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Los meteorólogos están bien familiarizados con las técnicas analíticas empleando lo que los americanos llaman el «synoptic smoothing», que nosotros podemos calificar de «método de aproximación sinóptica» en superficies isobáricas constantes. Se reconoce que las observaciones de viento están sujetas a ciertos errores y que, además, existen efectos de aceleraciones y fricciones en el campo de vientos que no son fáciles de tenerse en cuenta al analizar el gradiente vertical del viento, por lo que este método de «aproximación sinóptica», aplicado al perfil vertical del viento, es una práctica aceptada. Este concepto de «rectificación» del perfil vertical del viento ha sido objeto de muchas investigaciones y aún no es apliamente aplicado en la práctica operacional de los centros meteorológicos. Sin embargo, estudios realizados en diferentes países indican que el presente estado de las observaciones de viento de la alta atmósfera en las proximidades de la corriente del chorro es tal, que errores inherentes del orden de magnitud de ± 20 Kts. no son raros, como anteriormente se ha indicado; en estas circunstancias, la «rectificación» del perfil vertical del viento aparece justificada.

1. Rectificación del perfil del viento.

Examinando perfiles de viento se descubre la presencia de considerables fluctuaciones, en la vertical, de los valores absolutos de la velocidad del viento. No es siempre posible determinar si estas fluctuaciones son debidas a errores en las observaciones o el resultado de remolinos de circulación de pequeña escala o componentes de aceleración o de fricción, que no son representativas del flujo. medio.

En general, estas fluctuaciones erráticas del perfil vertical del viento, no son contínuas en tiempo o en espacio. Estos sistemas, a pequeña escala, cuando existen, encontrarán dificultad en mantenerse en la atmósfera, por lo que si el analista pretende tenerlas en cuenta, tropezará con grandes dificultades para mantener la continuidad de carta a carta y, aún más para predecirlas con un cierto grado de exactitud. Por consiguiente, se llega a la conclusión de que la eliminación de estas características o irregularidades por medio de las técnicas de «rectificación» están plenamente justificadas en el análisis del gradiente vertical de viento.

En la práctica se escogen una serie de estaciones que llamaremos «estaciones seleccionadas», de tal forma que estén regularmente distribuídas sobre la superficie a analizar. Incluiremos, entre ellas, todos los barcos meteorológicos y estaciones insulares, y de entre las estaciones continentales seleccionaremos las más convenientes por su

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

posición y aquéllas que nos merezcan más confianza por la regularidad y exactitud de sus observaciones.

Para cada una de ellas se transcribirá en un gráfico apropiado (fig. 1), las velocidades de viento desde aproximadamente 500 mb.

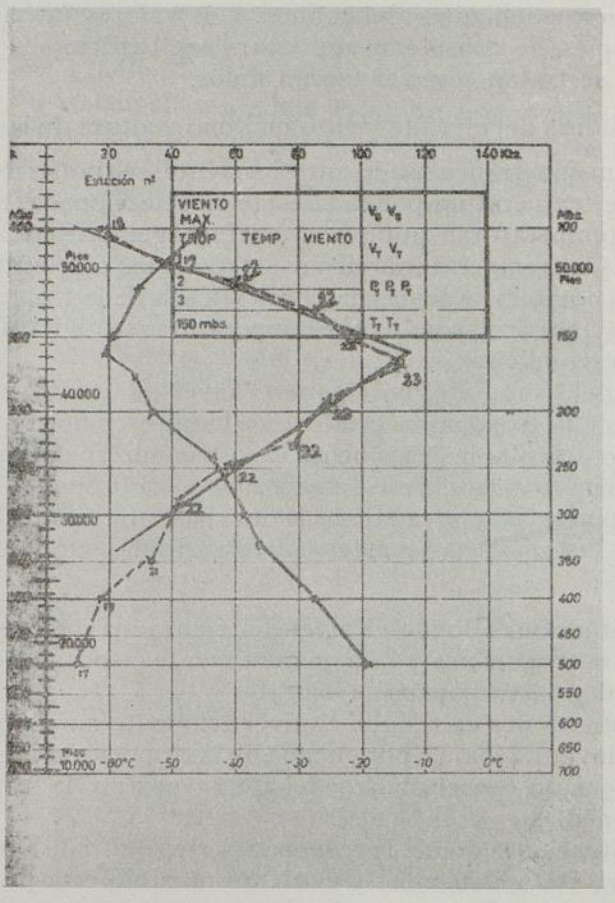


Fig. 1.

hasta los 100 mb. para todos los niveles en que éste viene cifrado, con arreglo a la escala de velocidades de viento que figura en la parte superior del gráfico. La dirección del viento se transcribirá también en decenas de grado junto a los correspondientes puntos. Luego se calcula el perfil de viento medio usando el método de igualdad de áreas sustituyendo el perfil real por líneas rectas. Esto nos dará un nivel y un valor para el viento máximo, que normalmente no coincidirá con el viento cifrado en el parte. Luego, por medio de una

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

escala apropiada trazada sobre un transparente, se calculará la pendiente de estos perfiles «rectificados», que serán los gradientes medios de la velocidad vertical del viento por encima y por debajo del viento máximo expresados en Kts/1.000 pies o gradiente vertical del viento en la troposfera y en la estratosfera. Estos valores se entran en las casillas correspondientes del gráfico. Los valores inferiores a ± 1 Kt/1.000 pies, se consideran de naturaleza barotrópica y, por consiguiente, se tratan como si fueran nulos.

2. Análisis del nivel de viento máximo y altura de la tropopausa.

En el mismo gráfico usado anteriormente, se transcribirá también el perfil de temperatura por cada estación seleccionada, utilizando la escala de temperaturas qu figuren en el margen inferior. Se transcribirán todas las temperaturas cifradas, tanto a los niveles tipo como en los puntos notables. Además, la altura cifrada de la tropopausa o tropopausas y sus correspondientes temperaturas se anotarán en el casillero correspondiente.

El modelo sugerido, en el que el nivel de viento máximo y la elevación de la tropopausa están considerados como muy próximos, ha causado dificultades en muchos casos cuando se aplica a los datos reales de viento y tropopausa dados por el radiosonda.

La experiencia y el análisis de muchas situaciones ha indicado que estas discrepancias pueden ser clasificadas en tres categorías principales:

1.ª Situaciones donde el nivel del viento máximo está muy por debajo de la tropopausa y está, generalmente, asociado con el chorro subtropical y la tropopausa tropical.

2.ª Situaciones en las que el nivel del viento máximo está varios miles de pies por debajo o por encima de la tropopausa y está, generalmente, asociado con el chorro del frente polar y la tropopausa de latitudes medias.

3.ª Situaciones donde la tropopausa viene cifrada a un nivel muy bajo (entre 500 y 400 mb.) y el viento máximo está por encima de esta tropopausa. Esto ocurre muy frecuentemente en profundas vaguadas en altura donde las zonas frontales se extienden hasta las capas altas de la troposfera.

Las principales dificultades en evaluar correctamente la información de este nivel tropopausa-viento máximo, son debidas a datos insuficientes, a que el criterio usado para determinar la tropopausa donde se usa sólo la temperatura y se ignoran los datos de viento, es inadecuado, a inexperiencia en el manejo de los datos por parte del analista y, por último, a la imperfección intrínseca del modelo.

Teniendo en cuenta las mencionadas limitaciones de la exactitud

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de las observaciones, se sugieren las siguientes soluciones para las situaciones arriba indicadas:

En las situaciones del tipo primero predominan dos casos: En el primer caso no hay duda de que el nivel de viento máximo está completamente divorciado del de la tropopausa (diferencias de 10.000 a 12.000 pies). Este caso se tratará separadamente en relación con el chorro subtropical. El segundo caso es aquel en que la estabilización del gradiente de temperatura ocurre por debajo del valor cifrado de la tropopausa. Esta estabilización coincide con el nivel de viento máximo. En muchos casos, esta estabilización baja puede hacerse bastante fuerte doce horas más tarde para que ya satisfaga el criterio actual para definir la tropopausa, y entonces es cifrada como tal, mientras que la tropopausa cifrada anteriormente está todavía claramente en evidencia. Al mismo tiempo, el nivel de viento máximo ha cambiado muy poco en ese intervalo de tiempo. Esta oscilación vertical del nivel de la tropopausa con el tiempo, mientras que el nivel del viento máximo permanece casi constante, tiene poco sentido meteorológico. Por consiguiente, en los casos en que hay un nivel definido de un viento máximo por debajo de la tropopausa cifrada, el perfil de la curva de temperatura se deberá investigar en busca de una posible estabilización más baja de la temperatura que coincida con el nivel del viento máximo y pueda ser identificada y analizada como la verdadera tropopausa.

El tipo I de la figura 2 es un caso tipo de esta categoría: La línea de puntos es la curva de temperaturas doce horas antes o después y representa criterio suficiente para que la tropopausa sea trasladada a 40.000 pies. Otras características del perfil de viento y temperatura no han cambiado.

Las situaciones del tipo segundo son las que se presentan con más frecuencia: Tanto la tropopausa como el nivel de viento máximo pueden ser ajustados, dentro de los límites de los errores de observación, para hacerlos coincidir con el modelo. En la mayoría de los casos, esto se consigue más fácilmente observando el nivel de la tropopausa y tratando de que el perfil «rectificado» de velocidad de viento nos dé el viento máximo al, o ligeramente por debajo del, nivel de la tropopausa. Normalmente, esto se puede hacer con facilidad cuando se tiene en consideración que la exactitud de las observaciones de viento a niveles altos y velocidades grandes deja mucho que desear. Como ya hemos mencionado, es difícil establecer la exactitud de las observaciones de estos vientos. Por tanto, cuando se ajuste el perfil real del viento para llevar el nivel del viento máximo a coincidir con el modelo, este orden de mag-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

nitud del error de observación puede ser usado con liberalidad. La exactitud del elemento de presión del radiosonda a los niveles de la tropopausa puede llegar a ser, como hemos visto, de ± 10 mb., equivalentes aproximadamente ± 1.000 pies. Este error probable deberá también tenerse en cuenta al ajustar el nivel de la tropopausa para contribuir a la similitud con el modelo y al trazar las isohipsas de altura de la tropopausa para conseguir una configuración «rectificada» del campo que puede seguirse por continuidad en el tiempo. El tipo II de la figura 2 ilustra la categoría 2.ª y la manera en que debe resolverse. Nótese que el perfil «rectificado» del viento se ha trazado de forma que indique un viento máximo al nivel de la tropopausa, aunque el viento más alto cifrado está por encima del nivel de la tropopausa.

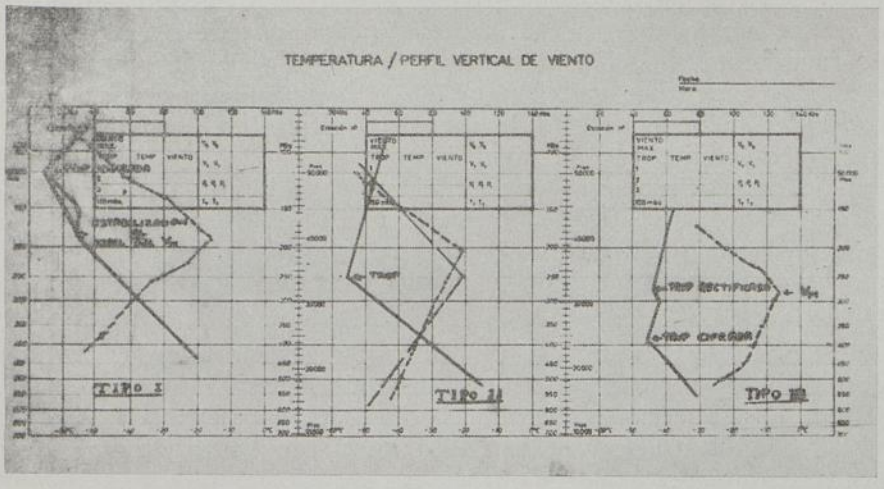


Fig. 2.

La situación del tipo III de la figura 2 puede resolverse a menudo cuando se recuerda que la definición internacional de tropopausa está todavía basada solamente en características de temperatura. Según esto, es fácil confundir inversiones a altos niveles troposféricos con la tropopausa verdadera. En general, es posible distinguir entre la tropopausa verdadera y zonas estables troposféricas a niveles altos (generalmente, zonas frontales), considerando las características del gradiente de viento a través de estas zonas estables: Si la velocidad del viento aumenta francamente a través de la zona estable, ésta debería ser identificada como de tipo frontal y no como la tropopausa. Por esta razón es necesario investigar todos los valores cifrados de altura de tropopausa en las proximidades o por de-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

V

METEOROLOGIA AERONAUTICA DEL VALLE DEL EBRO

Conferencia pronunciada en Madrid el día 28 de mayo de 1962

por

D. LORENZO GARCIA DE PEDRAZA

Meteorólogo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

METEOROLOGIA AERONAUTICA DEL VALLE DEL EBRO

La Meteorología, por lo que a la predicción del tiempo se refiere, tiene parte de Ciencia y, también, bastante de Arte. La Ciencia es la que marca la pauta del camino a seguir (fórmulas, reglas, investigación...), mientras que el Arte es la manera de interpretar y ejecutar lo que la Ciencia le dicta.

El "tiempo teórico", tal como lo expresan los libros de texto, es en la realidad muy distinto de unas a otras comarcas, pues la orografía, altitud, ríos, orientación, influyen de manera muy compleja en la evolución y comportamiento del tiempo atmosférico.

El tiempo no está prefabricado, se hace a cada instante, cada día, sobre cada lugar de la superficie terrestre—pocas cosas envejecen más rápidamente que un mapa del tiempo—y la meteorología y clima de una región natural adquiren una personalidad indiscutible. Los fenómenos atmosféricos son tan solidarios que *todo* influye en todo y el meteorólogo ha de poseer una buena porción de conocimientos técnicos y empíricos, unido a un profundo conocimiento de la topografía y climatología del lugar.

Así como un piloto necesita bastantes horas de vuelo para estar suelto, el meteorólogo necesita analizar muchos mapas del tiempo hasta hacerse un experto y poder dominar "de verdad" aquellas cuestiones que "teóricamente" aprendió en pocos días.

Por otra parte, cuando se trata de una predicción para una zona relativamente pequeña—caso de la cuenca del Ebro— hay que pasar de generalizar a concretar, y ello implica un aumento de dificultades que el meteorólogo predictor ha de saber vencer para salir airoso de su cometido. Así, el éxito de los pronósticos va muchas veces vinculado a un aprendizaje experimental, en el que es preciso saber sacar la resultante de la situación atmosférica general y de los factores locales, estableciendo sus relaciones y consecuencias.

Esta conferencia va a versar sobre "la experiencia meteorológica" acumulada a través de los años por un predictor estacionado en Zaragoza.

El objeto encierra un doble fin: proporcionar una especie de TAF

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

(todo tiempo) para los meteorólogos que algún día pudieran venir a esta región (facilitándoles, en lo posible, el período de adaptación para *ver* y *decir* el tiempo futuro); también, exponer aquí las conclusiones obtenidas—a merced de la crítica profesional—para aprovechar sus valiosas sugerencias.

Por lo tanto, esta conferencia va a ser más bien de orden práctico, destacando la influencia que sobre situaciones meteorológicas dadas ejerce el valle del Ebro y la doble barrera montañosa que lo flanquea.

Por lo cual, vamos a rehuir, deliberadamente, todo cálculo teórico, haciendo un breve estudio de situaciones típicas por medio de mapas de superficie y/o altura.

Como resulta difícil desglosar de una Meteorología general las nociones que más interesan al aviador, optamos por el estudio de algunas de las variables meteorológicas de mayor influjo en los vuelos: viento, tormentas, nieblas, nubes y precipitaciones, haciendo especial mención de los fenómenos especiales: turbulencia, engelamiento, granizo, onda de montaña, estancamiento, föhn, etc. a ellas asociados.

1) *Aspecto geográfico de la cuenca del Ebro.*

A la vista de un mapa de la cuenca del Ebro, resalta inmediatamente una gran depresión de forma triangular (que estuvo ocupada por el mar en la Era Secundaria) cuya altitud media es pequeña: si las aguas del Mediterráneo se elevasen 300 metros, desaparecería bajo ellas gran parte del valle.

Este valle del río Ebro está encajado entre una doble muralla montañosa: los Pirineos al Norte, con su altos picos (Midi, Vignemale, Monte Perdido, Aneto...) y orlados por sierras paralelas (Alcubierre, la Peña, Guara). Cerrando la cuenca por el otro flanco aparecen las sierras de Albarracín, Cucalón y San Justo en la zona de Teruel, y las estribaciones septentrionales del Ibérico, con los macizos de Urbión, Demanda y Moncayo. Las Sierras de Andía y Aralar forman por arriba la cabecera del Ebro, que constituye un marcado escalón respecto al valle. Separando el Mediterráneo del bajo Ebro aparecen, en la zona de Mequinenza, estrechas y sinuosas gargantas, entre cuyos farallones discurre el río hasta llegar al delta.

Los Pirineos son un magnífico "almacén" natural de nieve del que se surten los afluentes de la orilla izquierda del Ebro que bajan encajonados entre abruptas sierras: Arga, Aragón, Gállego, Cinca, Segre... Por la margen derecha vierten al Ebro ríos mucho menos importantes, con bruscas avenidas o largos estiajes: Jalón, Mesa, Huerva, Martín, Guadalope...

Estos sistemas montañosos que circundan la honda depresión del

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

valle del Ebro, actúan como una especie de "pantalla" que la aislan de los benéficos influjos de la lluvia, intensificando, por otro lado, la velocidad del viento. Son muy abundantes las nubes de estancamiento en las laderas de barlovento; por otra parte, los vientos que soplan río abajo, encajonados entre las dos cordilleras marginales, barren las nubes y dejan marcados sus efectos en las esteparias tierras y pobre vegetación de la cuenca media: Cinco Villas, Bárdenas, Monegros..., al Norte del Ebro; zonas de Borja, Calanda y bajo Aragón, al Sur. La figura 1.ª es un esquema del valle del Ebro, rodeado por una "herradura orográfica".

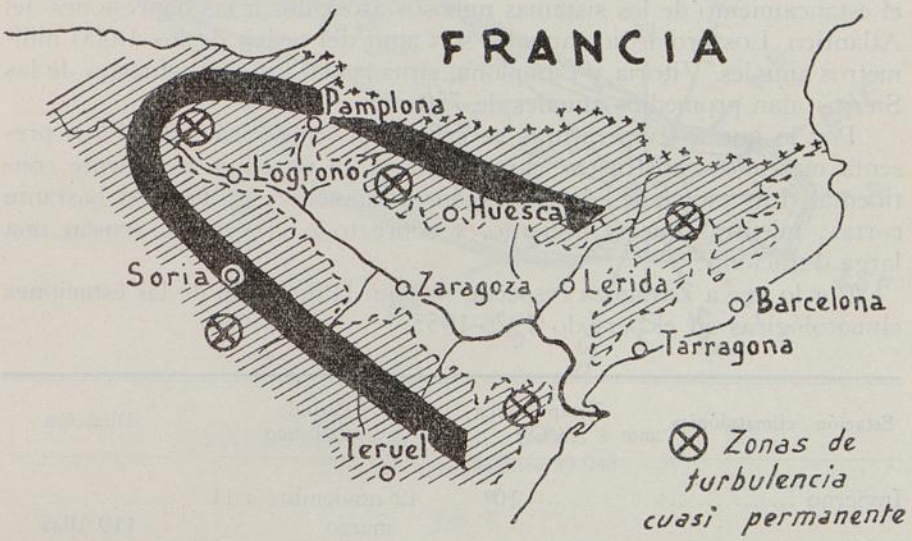


Fig. 1.

Una «herradura orográfica» bordea el valle del Ebro, aislándose de los vientos húmedos del N., W. y S. Ello implica la escasez de precipitaciones en la cuenca. La complicada orografía crea zonas de turbulencia semi-permamente, muy interesantes para efectos aeronáuticos.

Como contraste aparecen cerca las altas y nevadas cumbres de los Pirineos y el Moncayo, con sus encantadores valles, cuya particular orientación da lugar a un verdadero "mosaico" de climas.

2) *Breve resumen climatológico.*

El estudio pluviométrico de la cuenca del Ebro indica que las precipitaciones disminuyen bruscamente desde las cordilleras marginales hacia el valle. Este, con una altitud media de 200 metros, acusa una escasa pluviosidad, del orden de los 300 mm. de promedio anual. Zaragoza,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Lérida, Calatayud, Belchite, Híjar, Alcañiz, Caspe, Fraga, Sariñena quedan dentro de una acusada zona de sequía bordeada por la isoyeta de 400 mm.

Es muy digno de resaltar que los temporales de lluvia, con dos y tres días de duración, que se presentan en el valle del Ebro, vienen casi siempre asociados a vientos del SE; es decir, que las mismas nubes que entran por Tortosa riegan luego Caspe, Zaragoza, Tudela y Logroño—marchando aguas arriba del Ebro—para detenerse luego contra la cara Sur de las Sierras de Vitoria y Urbasa.

La cuenca alta tiene un régimen pluviométrico distinto, influída por el estancamiento de los sistemas nubosos asociados a las depresiones del Atlántico. Los promedios anuales son aquí del orden de los 1.000 milímetros anuales. Vitoria y Pamplona, situadas en los contrafuertes de las Sierras, dan promedios anuales de 750 mm.

Por lo que a temperaturas se refiere, el valle medio del Ebro presenta marcados constrastes, característicos de un clima netamente continental. Las estaciones de transición, primavera y otoño, son bastante cortas; mientras que el invierno, y sobre todo el verano, acusan una larga duración.

Por lo que a Zaragoza respecta, he aquí la duración de las estaciones climatológicas en el período 1926-1955.

Estación climatológica	Temp. media (ºC.)	Período estadístico	Duración
Invierno	10º	12 noviembre a 11 marzo.	119 días
Primavera	10º a 17º	11 marzo a 9 mayo.	59 días
Verano	17º	9 mayo a 6 octubre.	150 días
Otoño	17º a 10º	6 octubre a 12 noviembre.	37 días

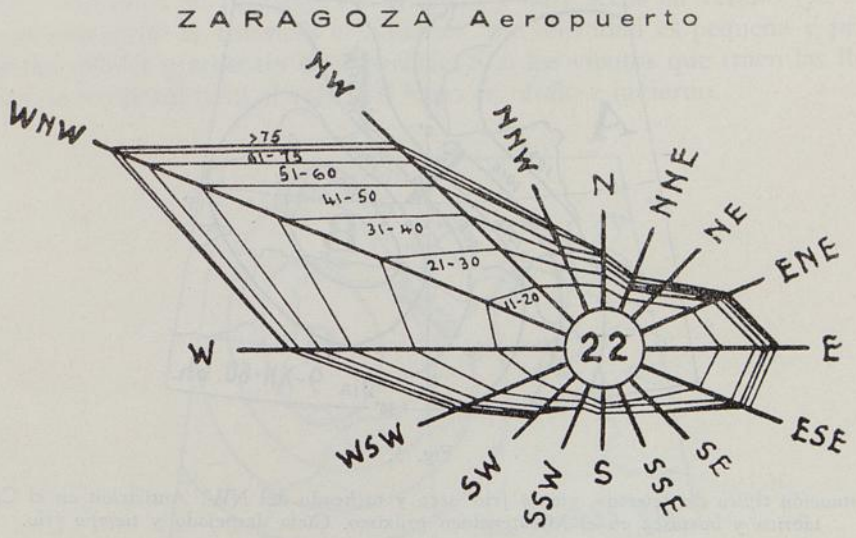
Los meteoros más característicos del valle son las nieblas de irradiación en invierno, los chubascos tormentosos de los meses de estío y, en especial, los vientos racheados y secos del NW, en cualquier época del año.

3) *Flujo de vientos.*

La especial orientación geográfica del valle del Ebro hace que los vientos dominantes de la cuenca presenten dos direcciones privilegiadas:

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Aguas abajo—viento del NW—frío y seco, y aguas arriba viento del SE—cálido y húmedo. Consecuentemente con ésto, la rosa climatológica de vientos para Zaragoza aparece notablemente deformada en el sentido NW-SE.



VIENTO. Frecuencia % Escala. 3 mm. = 1 %
Núm. de observaciones 97.045

Fig. 2.

Rosa climatológica de vientos para Zaragoza. Obsérvese el marca-dominio de los rumbos NNW (cierzo) y SSE (bochorno) y su acusada orientación siguiendo el Valle del Ebro.

a) Viento del NW.—Son los vientos más fuertes en superficie (excluyendo las turbonadas asociadas a las tormentas de verano).

El viento del NW—el popular *Cierzo*—es el dueño y señor de la comarca, siendo una de las más genuinas características climatolológicas de Aragón.

Zaragoza, "La novia del viento» (como la bautizara Eugenio D'Ors), conoce muy bien la machacona persistencia de este predilecto de Eolo, que presenta su actividad más acusada en la cuenca media, desde Tudela hasta Caspe, barriendo las nubes y dejando bien marcados los efectos de la sequía en las esteparias tierras de las Bárdenas y los Monegros.

El proceso meteorológico que determina este viento del NW está vinculado a un anticiclón situado sobre el Golfo de Vizcaya y el Cantábrico, mientras por las Baleares se intensifica una borrasca. Se establece

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

así un flujo de aire de las altas a las bajas presiones, actuando en los bajos niveles el valle del Ebro como cañería de conducción, al ejercer la doble muralla montañosa que flanquea al río un "efecto de embudo" que acelera e intensifica la velocidad de las rachas. Este régimen de

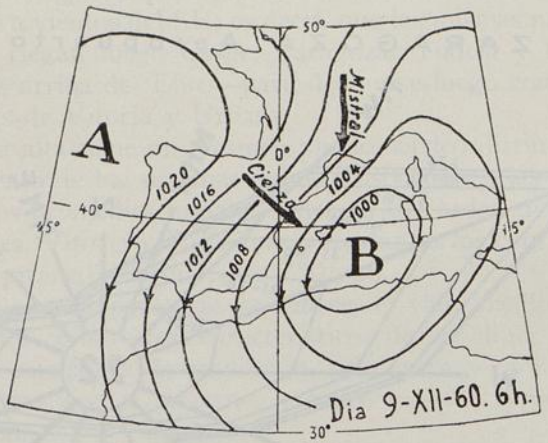


Fig. 3.

Situación típica de «cierzo», viento frío, seco y racheado del NW. Anticiclón en el Cantábrico y borrasca en el Mediterráneo próximo. Cielo despejado y tiempo frío.

viento del NW viene asociado a un tipo de circulación "celular": anticiclón centrado sobre las Islas Británicas que envía vientos del Norte (en el sentido de los meridianos) por su borde oriental. Si el eje del anticiclón bascula en los mapas de altura, cambiando la dirección N-S por la E-W, se restablece una circulación "zonal" (en el sentido de los paralelos) se refuerzan las altas presiones sobre la cuenca y cesa, casi automáticamente, el régimen de "cierzo" en el valle del Ebro.

El estudio de los mapas de altura, especialmente el Análisis y Prog de la topografía de 500 mbs., dan un buen indicio para predecir el viento del NW en el valle medio del Ebro, basado en el ángulo que forman las líneas de corriente en altura con la orientación geográfica del valle: Mientras las isohipsas aparezcan dentro del sector NW-N-NE hay muchas probabilidades de viento en superficie.

Otra regla que da buen resultado (y se complementa con la anterior), se basa en la diferencia de presión en superficie entre Bilbao y Tortosa. Si ésta es de 3 a 5 mbs. (en verano) o de 2 a 3 mbs. en (invierno), es muy probable viento racheado del NW en el valle medio del Ebro: 290 grados/30 nudos. La velocidad prevista puede darse así:

Velocidad media: $\Delta p \times 3$ Ejemplo $\Delta p = 8$ mbs. Sale $8.3 = 24$ nudos.
Rachas (Q. N. T.): $\Delta p \times 4$ Sale $8.4 = 32$ nudos.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Este viento del NW está, a veces, desfasado hasta 90° con el flujo general del gradiente, presentando un efecto "engañoso", pues no sigue la dirección de las isobaras en superficie, sino que las atraviesa.

b) Viento del SE.—Este grupo de vientos de componente Sur, conocidos en la región con el nombre genérico de "bochornos" son templados y húmedos en primavera e invierno y muy secos en verano (su región manantial es entonces el Sahara). Su velocidad es pequeña y presentan débiles gradientes en superficie. Son los vientos que traen las lluvias de temporal para el valle del Ebro en otoño e invierno.

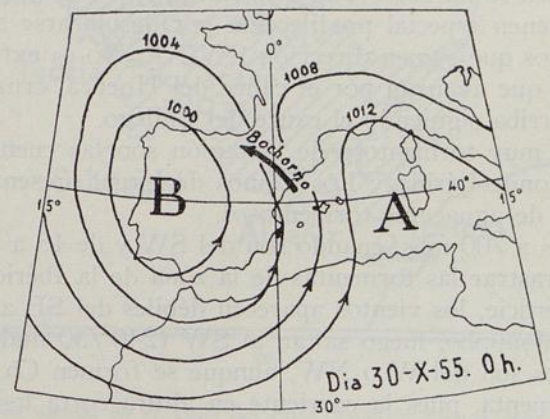


Fig. 4.

Situación típica de «bochorno», viento templado y húmedo del SE. Anticiclón en el Mediterráneo occidental y depresión sobre Portugal. Tiempo nuboso y lluvioso.

La situación que establece los vientos del SE obedece también a una diferencia de presión entre uno y otro extremo del valle: anticiclón sobre el Mediterráneo oriental y bajas presiones sobre el Cantábrico, pero ahora el flujo de viento aparece cortado por las sierras de Aralar y Andía y el efecto föhn es muy marcado por la zona Bilbao y San Sebastián, donde los vientos bajan muy secos y turbulentos.

Los vientos del SE van siempre asociados a un empeoramiento en el techo nuboso y la visibilidad y suelen ser los acompañantes de los temporales de lluvia. Por el contrario, los vientos del NW son racheados, barren las nubes y se presentan fríos y secos.

4) *Tormentas de masa cálida.*

Los dos sistemas orográficos situados a ambos lados del río Ebro favorecen en verano la inestabilidad convectiva y la formación de tormentas.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Las tormentas que cruzan el valle del Ebro proceden siempre de las sierras del Sistema Ibérico (Moncayo, La Muela, Albarracín, Gúdar...). Se presentan en los meses de mayo a septiembre, y van asociadas a flujo moderado del SW por los altos niveles persistentes por períodos de veinticuatro a treinta y seis horas. Así se da el caso curioso de que las tormentas de calor formadas en los Pirineos *no afectan nunca* al valle del Ebro. Si una tormenta "viene de arriba" puede afirmarse, sin más, que es de tipo frontal, asociada a un frente frío que penetró por la cabecera y Pirineos.

En Zaragoza se ha observado con mucha frecuencia que los núcleos tormentosos tienen especial predilección por desplazarse a lo largo del curso de los ríos que siguen dirección SW-NE. No es extraño observar cúmulonimbos que avanzan por el cauce del Huerva, cruzan el Ebro y toman hacia arriba siguiendo el cauce del Gállego.

Otra zona muy tormentosa de la región son las cuencas del Cinca y del Segre, donde Lérida y Los Llanos de Urgel presentan una notable frecuencia de aguaceros tormentosos.

Los vientos a 700 mbs. cuando son del SW y de 15 a 25 nudos, son propicios a arrastrar las tormentas de la zona de la Ibérica al valle del Ebro. En superficie, los vientos aparecen débiles del SE antes de la llegada del cúmulonimbo, luego saltan al SW (240°/30 nudos). Si en altura los vientos son del W o NW, aunque se formen Cb. no hay posibilidad de tormenta, pues la corriente en altura corta los movimientos convectivos, "segando" materialmente la cima de las nubes.

Las gotas de aire frío en altura desencadenan una enorme inestabilidad en el bajo Ebro en los meses de equinoccio. Las isotermas a 700 milibares y 500 mbs. dan una buena idea—con su gradiente—de los contrastes y el contorno de estas gotas de aire frío.

5) *Restricciones a la visibilidad. Nieblas.*

Los potentes y fríos anticiclones invernales determinan en el valle del Ebro persistentes bancos de niebla, en especial durante los meses de noviembre-diciembre-enero ("trimestre de las nieblas" para Zaragoza).

Estas nieblas son del tipo de irradiación + advección, reforzadas por los humos industriales de las fábricas de Zaragoza y la humedad de los tres ríos (Huerva, Ebro y Gállego), del Canal Imperial de Aragón y de las acequias de regadío.

En la honda depresión natural del valle del Ebro y en las cuencas del Jalón y del Segre—especie de "cazuela orográfica» cerrada por la inversión de irradiación y de subsidencia del anticiclón, que actúa de "tapadera" anulando toda turbulencia—es donde se refuerzan e intensifican las nieblas, favorecidas por una ligera brisa del SE que arrastra los bancos de bruma Ebro arriba. Bajo estas condiciones, el valle com-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

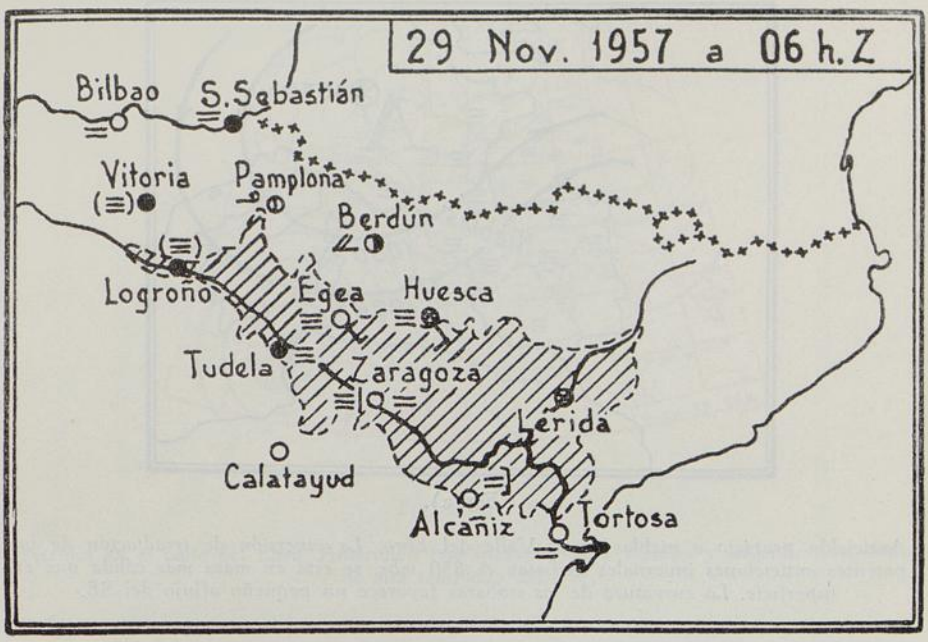


Fig. 5.

Situación típica de nieblas en el Valle del Ebro. Toda la cuenca—por debajo de la línea de nivel de 300 metros—aparece cubierta por un extenso banco de niebla.

pleto se "rellena" de niebla que persiste durante extensos períodos (¡hasta quince días consecutivos sin ver el sol!)

La curvatura de las isobaras en superficie y el tipo de aire e isotermas a 850 mbs. es fundamental para diferenciar los ciclos de niebla o helada.

Nieblas.—Flujo muy débil de viento del SE que trae aire húmedo del Mediterráneo. Núcleo cerrado de isotermas *cálidas* (5° a 10°) a 850 milibares sobre Francia.

Heladas.—Anticiclón sobre el centro de España. Aire frío y seco represado en la cuenca del Ebro. Calma. Núcleo cerrado de isotermas *frías* (—6° a —10°) sobre Pirineos a 850 mbs.

En invierno, vientos de 6 a 8 nudos del rumbo E o SE, temperatura entre 3° C. y 5° C. a la madrugada y una marcada inversión térmica en el Temp de la 00h Z, son los ingredientes ideales para formar espesos bancos de niebla con visibilidad del orden de 100 a 200 metros. (Las horas de más pobre visibilidad suelen ser entre 09 y 11 h. T. M. G.). Si la temperatura es baja, alrededor de los 0° C., la niebla es muy espesa y persistente y el termógrafo marca una raya horizontal, sin oscilación diurna apreciable.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

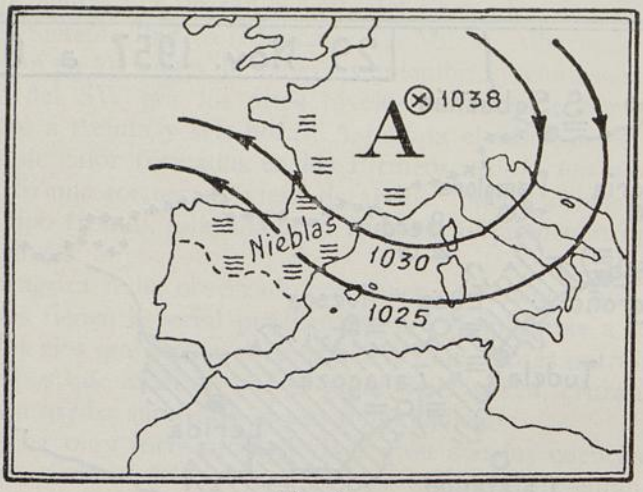


Fig. a).

Anticiclón propicio a nieblas en el Valle del Ebro. La inversión de irradiación de los potentes anticiclones invernales es bajas A 850 mbs. se está en masa más cálida que en superficie. La curvatura de las isobaras favorece un pequeño aflujo del SE.

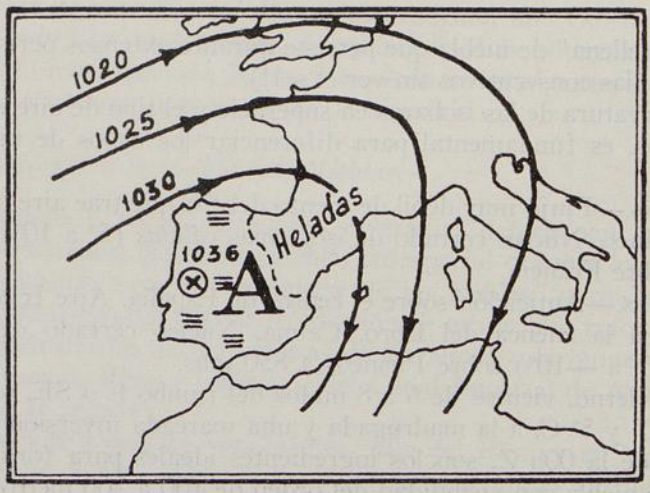


Fig. b).

Anticiclón propicio a las heladas en el Ebro. Por encima de 850 mbs. el aire continúa frío (no hay inversión de irradiación). Por Guadalquivir y Extremadura hay abundantes nieblas, favorecidas por un ligero aflujo del SW.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

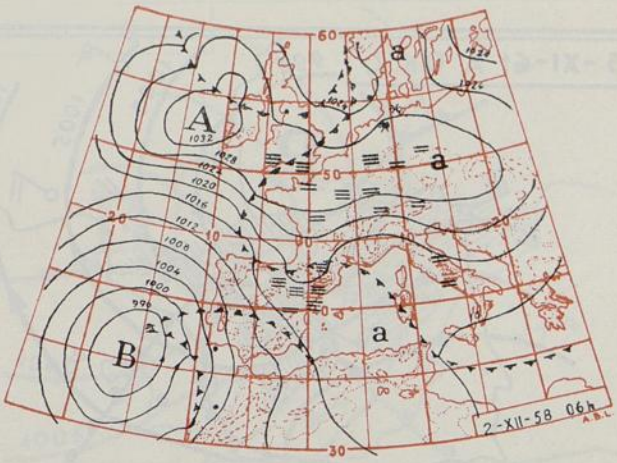


Fig. II c) - 6.

Nieblas en el valle del Ebro. Anticiclón frío invernal sobre Europa y advección en altura de aire templado del SW.

En mayo y octubre pueden formarse algunas nieblas matinales que levantan en el centro del día.

6) *Precipitaciones en general. Lluvia y nieve.*

La cuenca del Ebro está "de espaldas" a los temporales de Poniente procedentes del Atlántico, pues los sistemas orográficos de la cabecera y Pirineos actúan de "pantalla orográfica" deteniendo las nubes y la lluvia. También las sierras de la Ibérica y los núcleos montañosos de la Demanda y el Moncayo actúan de barrera contra el viento "ábrego» o llovedor asociado al flujo del SW de las borrascas que penetran por las costas portuguesas.

Así, pues, el viento que trae los temporales de lluvia suele ser el SE, que penetra por la desembocadura del Ebro y va asociado a las borrascas situadas en el Golfo de Cádiz y SE de España. Es decir, los temporales de Levante, procedentes del Mediterráneo, son los más importantes para el valle del Ebro.

Si una corriente general del SW llega a las estribaciones de la Ibérica se forma abundante nubosidad de estancamiento y lluvias en la zona del Jalón, la cordillera de La Muela hace pasar las nubes altas por encima de Zaragoza (As. y Sc.), el efecto föhn deja sin efectividad las precipitaciones en el valle medio del Ebro y al volver a detenerse las nubes en los contrafuertes del Pirineo vuelve a llover en Huesca.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

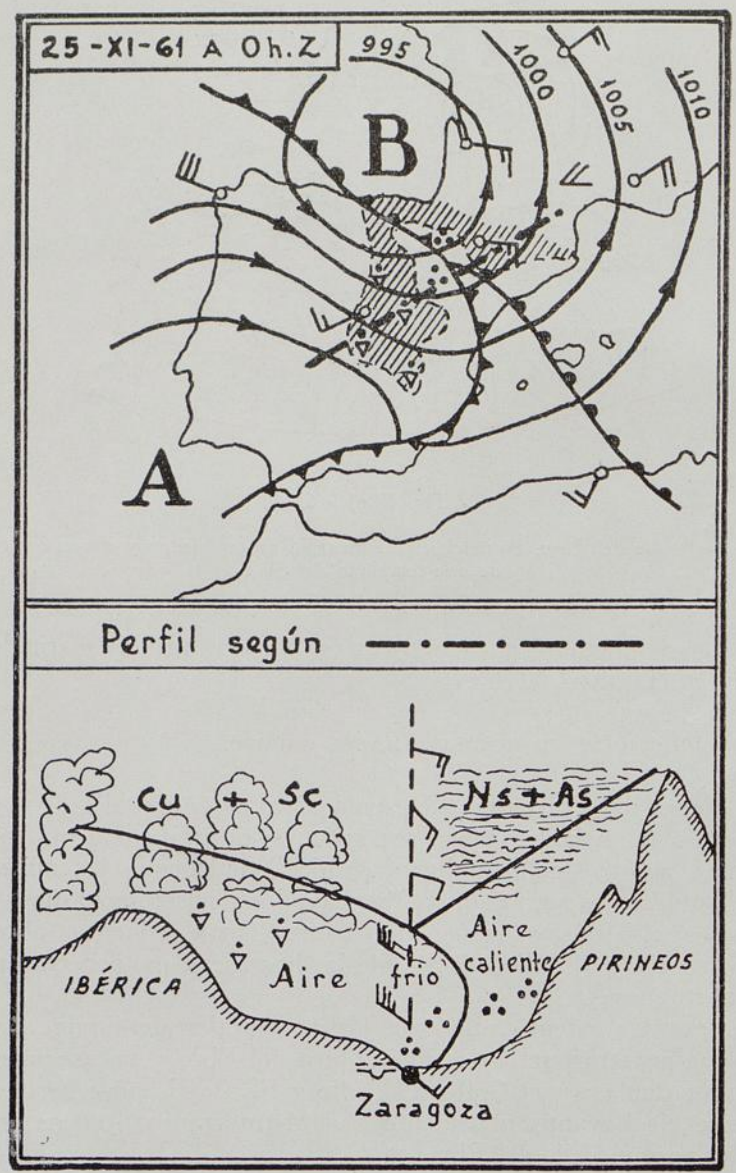


Fig. 7.

Ochusión «atrapada» en el Valle del Ebro. Se registran copiosas y persistentes lluvias que duran de doce a dieciocho horas. Hay chubascos aislados por el Sistema Ibérico y no llueve en la cabecera y Pirineos.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

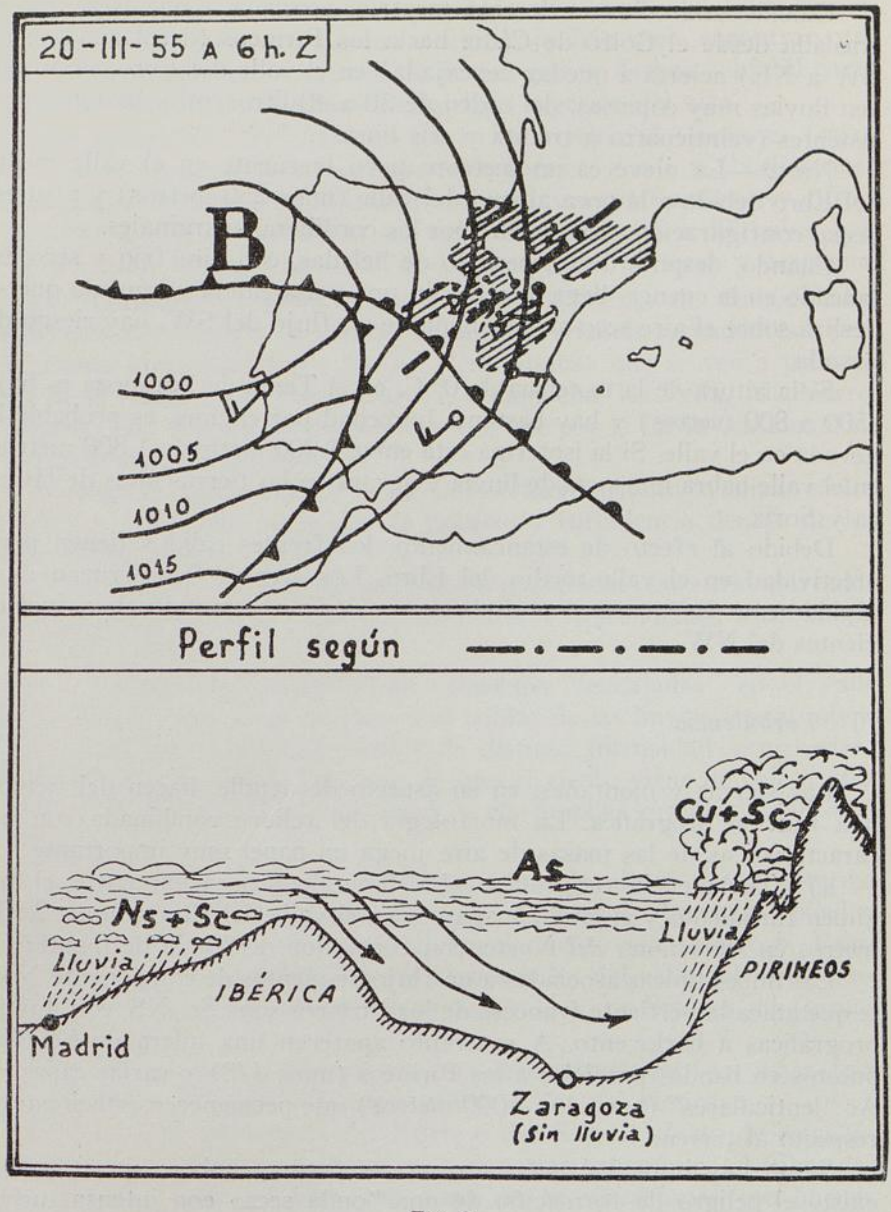


Fig. 8.

Esquema gráfico de abundantes lluvias en la cuenca del Jalón. Hay estancamiento en las vertientes meridionales de la Ibérica y Moncayo. El valle medio se cubre de una capa de nubes medias estratificadas, sin lluvias apreciables.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Cuando una oclusión de carácter frío, asociada a una baja que se traslada desde el Golfo de Cádiz hacia los Pirineos (desplazándose de SW a NE) acierta a quedar "encajada" en el valle del Ebro, se producen lluvias muy copiosas, del orden de 30 a 40 litros/m^2 y bastante persistentes (veinticuatro a treinta y seis horas).

Nieve.—La nieve es un meteoro poco frecuente en el valle medio del Ebro debido a la poca altitud del valle (unos 250 metros) y a su especial configuración, "arropado" por las cordilleras marginales.

Cuando, después de un período de heladas, con aire frío y seco estancado en la cuenca, llega a la región una masa cálida y húmeda que se desliza sobre el aire seco acompañada de un flujo del SW, hay riesgo de nevada.

Si la altura de la isoterma de 0° C. en el Temp de Zaragoza es baja (500 a 800 metros) y hay bastante humedad por encima, es probable la nevada en el valle. Si la isoterma está entre 1.200 metros a 1.800 metros, en el valle habrá temporal de lluvia y nevará en las tierras altas de Huesca y Soria.

Debido al efecto de estancamiento, los frentes cálidos tienen poca efectividad en el valle medio del Ebro. Los frentes fríos cruzan muy rápidamente la cuenca, con chubascos aislados, empujados por fuertes vientos del NW.

7) *Turbulencia.*

Las sierras y montañas, en su aspecto de detalle, hacen del tiempo una función orográfica. La morfología del relieve combinada con las características de las masas de aire juega un papel muy importante.

a) Turbulencia orográfica.—La zona de separación entre el régimen turbulento y el laminar aparece en el valle del Ebro a unos 2.500 metros en *situaciones del Norte,* con formación de "onda de montaña".

Las nubes típicas asociadas a un flujo de vientos de componente Norte que ataca la vertiente francesa de los Pirineos son: Sc. NS. con lluvias orográficas a barlovento. A sotavento aparecen una hilera de Sc. dispuestos en bandas paralelas a los Pirineos (unos 4/8) y varias capas de Ac "lenticulares" (hacia los 4.000 metros) que permanecen estacionarios respecto al terreno.

Si no hay humedad suficiente, no se forman nubes; sin embargo, existe el peligro de formación de una "onda seca» con intensa turbulencia.

La nube *rotor* aparece, a veces, a sotavento de los Pirineos (hacia la sierra de Guara), pero por regla general es difuminada y englobada en las turbulencias asociadas al flujo de vientos del NW, que sopla aguas abajo del Ebro.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

El efecto föhn es muy poco apreciable en el valle del Ebro con situaciones del Norte, pues aunque el aire baja frío suele encontrar otro más frío represado en la cuenca, de forma que se desliza sobre él como un rodillo "mordiendo" solamente la capa superior del aire.

Con situaciones del Norte en los bajos niveles, el viento es "rebotado" en el Moncayo y las sierras de la Ibérica y sale a "borbotones" aguas abajo del Ebro. La veleta entonces es muy inconstante en dirección (290° a 340°) y las rachas son del orden de los 20 a 30 nudos. Los pilotos acusan fuertes "meneos" en las maniobras de toma y despegue.

b) Turbulencia convectiva.—En las cordilleras de ambos lados de la cuenca se forman en verano acusadas corrientes ascendentes (perfectamente identificadas por los Ac. "castellatus» que se ven a primera hora de la mañana en el área Daroca, Calamocha, La Peña, Alcubierre, etcétera). Son el presagio de potentes Cb. que por la tarde ocasionan intensa actividad tormentosa.

El radar de aproximación es un valioso auxiliar para localizar en los brillos de la pantalla las zonas de granizo y turbulencia dentro de los núcleos tormentosos.

En el valle del Ebro se han registrado por aviones en vuelo marcadas "cizalladuras" entre los vientos ascendentes y descendentes asociados a los Cb. tormentosos.

c) Turbulencia frontal.—Las oclusiones "encajadas" en el valle del Ebro, a las que antes aludíamos al hablar de las lluvias, crean intensa turbulencia al enfrentar vientos de distinta intensidad y procedencia. El avión pasa así de una zona en que el viento viene de cola a otra en que viene de morro (o viceversa), y ello implica grandes ascensos o desplomes.

Es muy interesante para el piloto asociar la altura de la isoterma de 0° C. al grado de turbulencia, pues los fuertes "meneos" pueden forzarle a volar en zonas donde el engelamiento sea peligroso. Principalmente en la zona montañosa de ambos lados del valle del Ebro donde las nubes de estancamiento crean favorables condiciones de formación de hielo.

A veces, se observa el caso curioso de estancamiento en masa fría al Norte de los Pirineos y de masa cálida al Sur del Moncayo.

Bien sea con situaciones del Norte o del Sur, el efecto de estancamiento de las cordilleras marginales y su efecto antagónico el föhn, determinan en el valle del Ebro una zona *sin precipitaciones,* con buenas condiciones de vuelo a lo largo del valle.

Y para no cansarles más, damos por terminadas nuestras disquisiciones atmosféricas para esta zona de grandes contrastes del valle medio del Ebro, de la cual bien pudiéramos decir que "tiene por norma la anormalidad"—Valga la redundancia—.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

VI

METEOROPATOLOGIA

Conferencia leída en Madrid el día 4 de junio de 1962

por

D. JOSE MARIA MANTERO

Meteorólogo

Dr. Ingeniero Geógrafo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

METEOROPATOLOGIA

Excmo. señor, señoras, señores:

Esta charla, que no conferencia, tiene por objeto nada más, pero también nada menos, que despertar el interés de la clase médica y la meteorológica por los problemas bioclimáticos, por lo cual no hemos de presentar cuadros, gráficos, fórmulas ni cálculos, ni hemos de entrar a fondo en la cuestión, desde el punto de vista meteorológico, se entiende, porque en el médico, aún cuando quisiéramos, no podríamos hacerlo, por falta de competencia. Existe ya una abundante bibliografía sobre esta materia y a ella remitimos a quines quieran documentarse o a quienes se hallen particularmente interesados en esta clase de investigaciones tan apasionantes, y cuya repercusión en la vida no sospechamos los alcances que en lo futuro pueda tener. Complemento indispensable de esta breve exposición es aludir, aún a la ligera, a los problemas de Micrometeorología, objeto de especial investigación en Servicios Meteorológicos extranacionales. No olvidemos que el hombre se nutre, directa o indirectamente de las plantas, y la mayor parte de las que constituyen nuestra despensa son de poca altura, es decir, viven junto al suelo, donde las condiciones son muy diferentes a las de la atmósfera media y alta. Y también los animales portadores de agentes patógenos, especialmente insectos, viven en las capas bajas de la atmósfera: no hay que justificar el valor que tiene el conocimiento de su propio medio ambiente.

Tampoco hemos de razonar la pertinencia de esta clase de investigaciones bioclimáticas; si la Medicina tuvo una época en que parecía haber vuelto la espalda a Hipócrates, hoy vuelve a la lógica irrebatible de quien consideraba al hombre no como ente aislado y viviendo de sí mismo, sino como formando parte del medio que le rodea, siguiendo, por ende, las variaciones de este último y adaptando su economía animal a las exigencias del mismo; y es tan manifiesta esta relación entre ambiente y salud, rayana en dependencia, que asombra que la humanidad no se haya ocupado de ella seria y continuamente, ni la mayoría de los hombres de ciencia tampoco, no obstante el enorme interés práctico y científico que encierra. ¿Por qué la aparición simultánea de epidemias en lugares tan distantes entre sí que no puede pensarse en una propaga-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

ción ordinaria? ¿Por qué las *rachas* de defunciones o de crisis de determinada enfermedad con períodos de ocurrencia casi nula? ¿No nos dicen nada las muertes *en serie* por ángor péctoris? ¿Y el aumento de suicidios, crímenes pasionales, accidentes de circulación, aglomeración de partos, para determinados valores y clases de perturbaciones del campo eléctrico de la atmósfera? ¿Está bastante estudiado el efecto de las emanaciones y radiaciones terrestres sobre nuestro organismo? ¿Es la Radiestesia algo más que el zahorismo? ¿Y el efecto de los rayos cósmicos? ¿Y las crisis de asma bronquial al paso de frentes fríos, tan claramente puestas de manifiesto por el profesor Cruz Auñón?

Las acciones de las ondas hertzianas sobre los organismos, probadas por D'Arsonval: el ritmo estacional de las enfermedades infecciosas; la diferente frecuencia respiratoria y la diversa profundidad de inspiración según la estación del año; la notable variación estacional del contenido en vitaminas de los alimentos..., y tantas y tantas otras relaciones o influencias deben mover a médicos, físicos, meteorólogos y estadísticos a emprender seriamente una labor de conjunto, para echar los cimientos de un futuro edificio donde las generaciones venideras han de encontrar leyes de trascendencia insospechada por nosotros, que llegarán a evitar en muchos casos, y a atenuar en otros, los desastrosos efectos de epidemias y de ciertas enfermedades hasta hoy imbatidas.

La Bioclimatología estudia el efecto de los agentes físicos naturales sobre los organismos vivos, y a su vez, el efecto que estos organismos pueden ejercer sobre un medio ambiente y sobre el mundo que los rodea. El primer hombre que se ocupó de la influencia del clima sobre la vida fué Hipócrates. En su libro titulado "Aires, Tierras y Lugares", con una admirable intuición y una capacidad de observación y de asimilación singulares, resumió en estas tres palabras todo el mundo físico y todas las circunstancias influyentes sobre la salud; la atmósfera, con todos sus elementos y alteraciones; y la composición, estado, orientación del terreno, con sus aguas corrientes, estancadas, subterráneas o de lluvia. Durante mucho tiempo estos factores externos fueron los únicos tenidos en cuenta para explicarse las enfermedades: el descubrimiento de Pasteur, en el siglo XIX, desvió la atención de los investigadores hacia la bacteriología y ciencias afines. Hace poco ha vuelto el hombre a estudiar el medio ambiente como compuesto de factores influyentes en la salud humana. Al mismo tiempo, la técnica meteorológica y la física en general han progresado tanto que en la actualidad puede valorarse con gran precisión la acción de ciertos agentes físicos sobre determinados fenómenos fisiológicos y patológicos.

El problema general sobre Bioclimatología, en su aspecto meteoropatológico, debemos considerarlo planteado en esta forma, en cuanto concierne al meteorólogo: determinación cuantitativa de la relación entre

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

elementos climatológicos y manifestaciones patológicas simultáneas o subsiguientes; para ello hay que disponer de un gran número de datos de ambas clases, y desechar, por cálculo de correlaciones, los casos en que sólo se trate de simple coincidencia, es decir, que del catálogo de ocurrencias simultáneas así obtenido habrá que seleccionar aquéllas con más elevado coeficiente de correlación, base para la ulterior investigación de causalidad. Al médico corresponde después investigar esta posible causalidad y el mecanismo o proceso meteorotrópico, descartando aquellas correlaciones que acusen una simultaneidad natural y utilizando las demás para complemento o ayuda en diagnósticos, profilaxis y métodos activos u operantes cuando sea el caso.

Pero hay que tomar con cierta precaución los resultados obtenidos estadísticamente; casi todos los factores biológicos en el hombre tienen un período anual y otro diario, como casi todos los elementos meteorológicos. Toda correlación simple entre unos y otros prueba, en principio, que las respectivas alteraciones tienen lugar en el transcurso de la rotación y de la traslación de la Tierra.

Ahora bien, estos resultados estadísticos constituyen muchas veces el primer paso para llegar a la verdad. El agente causal es, en general, desconocido y, a veces, insospechado, pero su existencia puede quedar de manifiesto por algunos de los métodos que más adelante reseñaremos brevemente.

En esta clase de investigaciones se encuentran muchas dificultades; se carece de datos estadísticos significativos referentes a muchos fenómenos, cuyo estudio es necesario; además, las facilidades de experimentación son muy limitadas, porque no se pueden separar fácilmente unos de otros los distintos elementos climatológicos naturales, de tal modo que podemos controlar una situación o un fenómeno en su conjunto, pero sin saber si hay factores desconocidos que escapan a nuestra observación y registro. Más difícil aún es disponer, en la actualidad, de suficientes datos para el estudio del Microclima, entendiendo por tal el clima de espacios reducidos que comprende, desde el estudio del clima junto al suelo hasta dos metros de altura, hasta el clima de envoltura de cada individuo, pasando por el clima de las habitaciones, de los bosques, sembrados, etc. Sólo como cita obligada digamos unas palabras sobre Microclima.

De todos son conocidos los abrigos meteorológicos (garitas) que utilizan los Servicios Meteorológicos oficiales para proteger los instrumentos de observación contra los rayos solares y las precipitaciones. Estos instrumentos se encuentran a la altura de unos dos metros sobre el suelo, altura que se fijó cuando a fines del siglo pasado se comprobó, como resultado de largas series de observaciones, que a tal altura

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

no quedaban los instrumentos afectados por las variaciones del suelo sobre el que se hallaban instalados.

La composición del suelo, su estado, la vegetación que crece sobre el mismo, no ejercen efecto alguno apreciable sobre los instrumentos. Esto quiere decir, que una de las tales estaciones meteorológicas es "representativa" para una gran extensión a su alrededor. El clima que se observa a dicha altura corresponde, además, al existente en la altura aproximada de una persona, es decir, al "clima humano" o clima del hombre, como suele designarse al estado atmosférico a la altura de 1,5 a 2 metros. Los valores obtenidos en estaciones distantes entre sí, 20, 50 y hasta 100 kilómetros, representan el clima de la zona comprendida entre aquéllas, llamado actualmente "Macroclima". Precisamente fué elegida esta altura para las medidas climatológicas, por el hecho de existir por bajo de la misma una zona de grandes perturbaciones.

Mientras más cerca se está del suelo, mayor es el rozamiento del aire (menor velocidad del viento, y mejor la mezcla de masas diferentes de aire). Por otra parte, la superficie del suelo absorbe las radiaciones solares y emite calor; también en ella se encuentra el origen del vapor de agua, y asimismo es la fuente del polvo y de gases que, al desprenderse, ascienden por el aire superior. Las condiciones especiales que se observan en la capa de aire junto al suelo interesan grandemente, en primer término, al meteorólogo, por tener lugar en la capa límite de separación de tierra y aire, sin cuyo conocimiento no se pueden interpretar ni analizar cumplidamente los fenómenos atmosféricos en general. Pero, además, en esta capa inferior es donde viven las plantas y los animales, y ya hemos apuntado la importancia que su estudio tiene para la economía vegetal y animal; esta es la razón de que al estudio del clima junto al suelo, se le designe como "climatología económica".

Vemos, pues, que en primer término, de los datos obtenidos en las garitas de los servicios oficiales no se pueden deducir, sin más, las condiciones atmosféricas en que se desarrollan las plantas. Un ejemplo bien elocuente es el observado en Munich durante un mes de mayo; la estación meteorológica de la red nacional sólo acusó una noche de helada, con —1,8° C; pero en el mismo mes, en unos 20 kilómetros alrededor de la ciudad y en observaciones hechas junto al suelo, se observaron veintitrés noches de heladas, con temperaturas hasta —14,4° C. El agricultor, el botánico en general, el ganadero y todos los que de alguna manera tratan con plantas, se interesan en alto grado por estas circunstancias y condiciones especiales de la capa más baja de la atmósfera; pero es que también es por el suelo por donde discurren las carreteras asfaltadas, las vías férreas y donde el ingeniero y

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

el arquitecto proyectan los cimientos de sus obras. Estas diferencias entre los elementos meteorológicos observadas en sentido vertical, también tienen lugar en sentido horizontal, o sea, en el mismo suelo de un punto a otro, diferencias que se deben principalmente a la distinta clase de composición y humedad del terreno, a ligeros cambios de pendiente y a las diversas clases de vegetación.

La diferencia entre Macro y Microclima fué puesta de manifiesto de modo ejemplar por las observaciones en el valle de Neotoma (Ohio), efectuadas por Wol, Warcham y Schofield, al estudiar las condiciones meteorológicas en relación con el desarrollo de distintas plantas.

En las capas de aire junto al suelo pueden haber condiciones o fenómenos peculiares, que no existen en las capas superiores, como, por ejemplo, las nieblas vespertinas a ras de suelo en los bosques, o la arena que barre el suelo de las estepas.

El comienzo de la Micrometeorología data de medio siglo atrás, con los trabajos de Homén, en Finlandia (1893), y como verdadero fundador de tal disciplina debe considerarse al botánico Gregorio Kraus, y sus más entusiastas propugnadores fueron Schmidt, en Viena, y Schmass, en Munich.

Esbozada así la importancia que el estudio del Microclima supone para botánicos, zoólogos, agrónomos, técnicos de la construcción, meteorólogos, médicos y economistas, pasemos a considerar someramente algunos problemas fundamentales de la investigación biometeorológica.

No puede negarse que muchas molestias y dolores, tanto en personas enfermas como en individuos sanos, su estado de ánimo, su gana o desgana de trabajar, su capacidad de concentración, etc., y todo lo que suponga reacción al ambiente o a la sociedad dependen considerablemente del tiempo (clima) y sus variaciones. Pero dada la complejidad del tiempo meteorológico y la del organismo humano, con sus reacciones más o menos personales, resulta difícil la aplicación de los métodos estadísticos ordinarios, que requieren una cierta generalización.

A partir de las investigaciones básicas de Linke y Rudder, los elementos meteorológicos que más interesan en las relaciones bioclimáticas son las alteraciones o cambios de las masas de aire y los pasos de frentes; pero aún siendo muchos los progresos realizados en este campo queda mucho camino que recorrer; un gran avance en este sentido se debe a la introducción del análisis armónico, debido a Linke, que hace intervenir un gran número de elementos meteorológicos independientes, así como su evolución; por este método se pone de manifiesto el efecto de un determinado elemento, componente de este complejo, sobre una cierta reacción fisiológica.

Las primeras investigaciones estadísticas y las primeras determi-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

naciones de los retardos o pérdidas de los reflejos fueron hechas por los señores Düll, que dedujeron que la frecuencia de defunciones y suicidios depende de las erupciones cromosféricas solares, con el aumento simultáneo de las perturbaciones electromagnéticas de mayor longitud de onda. Se ha observado, además, que mientras más frecuentes son las erupciones solares, no sólo se producen más perturbaciones de tal clase, sino también otras muy intensas de onda corta, y hasta radiaciones en el extremo ultravioleta (Lyman), es decir, débiles rayos X. El aumento de intensidad de las radiaciones de onda corta puede, en las erupciones, llegar a ser 10^8 veces la intensidad normal en estos campos de ondas (Schulza). Cabe preguntarse si las radiaciones de esta clase intervienen en las reacciones biológicas de tipo cósmico.

Ya en 1929 señalaba Dorno que, debido a perturbaciones atmosféricas, se producían ondas electromagnéticas que obraban sobre el sistema vegetativo. Análogos resultados obtuvieron después Mörikoffer, Dias, Linke, De Rudder y Düll. Ultimamente ha observado Curry este problema, dando a conocer el hecho, interesante, referente a las ondas largas, de que ciertos individuos sometidos a observación, no experimentaban variación alguna al ser encerrados en jaulas de Faraday, resultado que no anula la acción bioclimática comprobada de las perturbaciones de onda corta.

Cauer ha puesto de relieve el efecto de las oscilaciones estáticas del campo eléctrico de la atmósfera sobre la movilidad de las bacterias. Merece señalarse el peligro de propagación de la gripe en espacios de aire estancado (sin circulación ni movimiento vertical alguno), especialmente en inversiones pertinaces, como ocurrió en 1951 en Inglaterra, donde se registró una grave epidemia de gripe durante un largo período de inversión.

Dignos de mención son los trabajos que, sobre relaciones entre fenómenos de electricidad atmosférica y ciertas enfermedades y reacciones fisiológicas, realiza el Dr. Reiter en la estación bioclimática de Farchant-bei-Garmisch (Baviera), que visitamos no hace mucho, en la que se estudian los siguientes elementos:

1.° Perturbación del campo electrostático de la atmósfera y sus variaciones en función del tiempo.
2.° Ondas largas (descargas electromagnéticas, o atmosféricos) de frecuencia comprendida entre 10 y 50 kHz y entre 1 y 12 kHz.
3.° Corriente aire-tierra.
4.° Determinación y recuento de pequeños iones.
5.° Radiactividad en el aire, en la nieve y en las plantas.
6.° Visibilidad cenital.

Los datos obtenidos en este observatorio se comparan con las reacciones fisiológicas de personas normales y de individuos especialmente

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

sensibles. Este estudio se aplica a los dolores de amputaciones o cicatrices, a las lesiones cerebrales, neuralgias, así como a la natalidad y a la frecuencia de suicidios, crímenes pasionales y violaciones. También se ha encontrado experimentalmente una relación muy estrecha entre el retardo en los reflejos durante ciertas situaciones meteorológicas biotrópicas y también entre el aumento del número de accidentes de circulación y la aparición de descargas atmosféricas, aún a gran distancia del punto de observación.

Como orientación consignamos, muy resumidas, algunas variaciones electrónicas y sus efectos fisiológicos, comprobadas por el Dr. Reiter.

Oscilaciones del campo, sólo positivas.—Neuralgias, dolor de amputaciones y cicatrices, lesiones cerebrales, gripe, trastornos circulatorios.

Oscilaciones del campo, positivas y negativas alternando con rapidez. Neuralgias, crisis de enfermedades nerviosas, fenómenos espasmódicos, epilepsia, asma, ataques cardíacos, reúma, pérdida de reflejos.

Variaciones del campo, especialmente negativas.—Embolias, fenómenos de depresión, neuralgias poco agudas.

Atmosféricos.—Neuralgias, trastornos cerebrales, hiperestesia a corto plazo, reúma, ataques cardíacos, retardo en los reflejos, acumulación de partos, aumentos de accidentes de circulación e industriales, cólicos.

Queda por determinar si los atmosféricos son solamente un elemento más del complejo "tiempo" o si actúan directamente en algún modo sobre el organismo humano.

Dessauer ha comprobado los efectos que los grandes iones artificiales ejercen sobre el hombre; un ambiente cargado negativamente es beneficioso para la salud, al contrario de lo que ocurre con la carga positiva. Cabe preguntarse si los iones naturales producen el mismo efecto que los artificiales y si ello explica ciertas enfermedades "meteorológicas".

Morden y Thomson han registrado el aumento en la proliferación de células vivas expuestas "in vitro" a iones negativos. Kornbluch ha tratado varios pacientes afectados de fiebre del heno con iones pequeños procedentes de focos radiactivos o de descargas eléctricas, eliminando los de un mismo signo mediante un campo eléctrico. Durante la época de polinización, los síntomas se exacerban con iones negativos, pero no se alteran o disminuyen con iones positivos.

Unas palabras nada más sobre la acción de los rayos cósmicos.—La penetración en la atmósfera terrestre y la desintegración de los protones cósmicos da origen a la formación de mesones *pi,* de mesones *mu,* de electrones, neutrinos, fotones gamma, de pares negatrón-positrón y de iones. Al entrar las partículas de rayos cósmicos en materia densa

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

se produce un flujo de electrones, una radiación secundaria. Digamos únicamente que a 20 kilómetros de altura se encuentran núcleos pesados, que forman parte de la radiación cósmica primaria, dotados de la enorme energía de 2×10^9 electron-volt por número atómico. El mecanismo de absorción de estos proyectiles por la materia orgánica es de la misma clase que para las partículas *alfa,* pero en escala mucho mayor. La profundidad de penetración de núcleos pesados en tejidos vivos llega hasta los 100 milímetros, mientras que para las partículas *alfa* es sólo de 0,05 milímetros (es decir, 2.000 veces menor).

Se han realizado numerosos experimentos en Suiza, Noruega, Rusia y Estados Unidos para investigar la acción biológica de los rayos cósmicos, sin que se hayan obtenido hasta ahora resultados francamente apreciables.

Más numerosos y de mayor alcance han sido los experimentos realizados para el estudio del efecto biológico de los rayos cósmicos secundarios, que han dado resultados positivos en Alemania, Austria, Estados Unidos, Hungría, Suiza e Inglaterra. Eugster ha comprobado la imposibilidad de obtener una reproducción normal en conejos expuestos al flujo secundario de rayos cósmicos. También se ha comprobado que en los ratones blancos se produce el cáncer cuatro veces con más frecuencia en los animales expuestos al flujo secundario que en los situados fuera del mismo. Análogamente ha puesto Figge de manifiesto el efecto acelerador que los rayos cósmicos secundarios tienen sobre el cáncer en ratas inyectadas con un agente carcinógeno.

Los métodos más empleados en la investigación meteoropatológica son los siguientes:

Método de las periodicidades.—En este método se atribuye la causa de casi todas las crisis a la temperatura, aunque algunas se supone que obedecen a cambios de humedad.

Método geográfico.—Consiste en comparar mapas de enfermedades con mapas climatológicos. Según Suettner, el mapa de frecuencia de nubes ofrece cierta semejanza con el de frecuencia de defunciones por cáncer y por enfermedades del corazón.

Método meteorológico.—Es el más antiguo y el más empleado, y consiste en correlacionar el viento, el foehn, los frentes, las subsidencias y otros elementos meteorológicos con defunciones o con crisis de determinadas enfermedades. Son muchas las enfermedades que presentan crisis al paso de frentes; también de los escritos antiguos se desprende que los dolores de las cicatrices y los artríticos tenían lugar con tiempo de tipo frontal. El influjo evidente de los efectos térmicos e higrométricos en estas situaciones ha inducido a muchos a no atribuir estas crisis a ningún otro factor desconocido; pero ya no parece

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tan lógico que personas resguardadas de tales cambios padezcan estas crisis en situaciones frontales. De este modo se pueden ir eliminando posibles agentes, limitando así el campo de investigación.

Llama también la atención que en el SW de Alemania, por ejemplo, según Buettner, hay días de máximo número de defunciones, de accidentes, de crisis epilépticas y trastornos mentales, sin que se verifique cambio notable en ningún elemento geofísico de superficie. Pero los mapas de 500 y de 225 mb. acusan un anticiclón alto al SW o al S y una corriente de chorro al N de la estación. En general, hay ciclogénesis al SW o al W. En esta situación, el nivel C-17 de ketosteroide es irregular y alto en pacientes completamente en reposo; el nivel de ketosteroide es bajo cuando el aire frío ocupa la troposfera media y baja. Esta situación, llamada de foehn libre, y el foehn de los Alpes, constituyen el núcleo del problema.

Método de los agentes causales.—En este método se consideran ciertos elementos, aparte los *clásicos,* relacionados con las enfermedades sólo de un modo estadístico, los cuales, como las descargas electromagnéticas (atmosféricos) y los iones han entrado hace poco en el campo de la investigación bioclimática.

Método del tubo de ensayo para el estudio del efecto de los atmosféricos (parásitos).—Si estas descargas electromagnéticas afectan realmente al organismo humano, es natural que el punto más afectado habría de ser el sistema coloidal. Para comprobar esta hipótesis se ha operado con un coloide sintético, análogo a la sangre, contenido en un tubo precintado, cuya temperatura se controlaba cuidadosamente; su dispersión Tyndall era mucho mayor cerca de los frentes o con gran vorticidad ciclónica (al nivel de 500 mb.). También se han estudiado influencias cósmicas sobre coloides inorgánicos, iniciándose así una nueva era cosmobiológica en nuestras investigaciones.

Pero no terminaremos la exposición de métodos sin citar la aportación valiosísima de la Sociedad Geográfica Americana, que ha organizado el estudio de la correlación entre factores geográficos en su más amplio sentido y fenómenos patológicos, habiendo iniciado su programa de investigaciones a fines de 1948 con un triple objetivo: 1.°, definición y exposición del problema; 2.°, censo de todos los datos posibles; 3.°, proyecto de investigación para un posterior estudio de la cuestión.

De una parte, los elementos climáticos, y de otra, los patológicos, que la Sociedad Americana de Geografía divide en dos grandes grupos, a saber: enfermedades contagiosas y enfermedades degenerativas o no contagiosas. En cuanto a las primeras, pueden considerarse como la manifestación clínica de un complejo, a cuyos componentes se les llama en general "patógenos". El complejo bipatógeno es el más sencillo,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

formado por un hombre o un animal y por un agente infectivo. El estudio geográfico de un complejo de esta clase ha de comprender el análisis del medio ambiente y de su acción tanto sobre el agente activo como sobre el hombre patógeno. Claro está que no basta siempre la unión de un agente infectivo y de un animal para producir una enfermedad. El clima, en un momento dado, puede hacer que el organismo receptor no responda al ataque del agente patógeno o que este mismo no tenga la virulencia necesaria para producir la infección activa.

El cólera, la poliomielitis, el sarampión, la escarlatina, son enfermedades bipatógenas.

En algunos casos la introducción del agente activo en un organismo animal sólo se produce mediante un agente portador, como sucede con el paludismo, que sólo tiene lugar cuando el agente causante (un plasmodium), penetra en el organismo por la picadura de un mosquito. Este es un complejo tripatógeno, cada uno de cuyos componentes está afectado por el medio ambiente: es evidente la importancia que la lluvia y la temperatura tienen sobre la capacidad infectiva del mosquito.

Citemos, como ejemplo de complejo polipatógeno, el tifus exantemático, que no puede producirse a menos que concurran en un mismo lugar el hombre, la rata, la rickettsia y el ácaro.

El plan de investigación en este sentido consiste en cartografiar las diversas zonas en que viven o se desarrollan los elementos componentes de un complejo patógeno: la parte común a todas estas zonas es donde puede presentarse la enfermedad de que se trate. Pero siempre teniendo en cuenta la influencia del ambiente: por ejemplo, se sabe que una epidemia de peste se produce así: una rata infectada lleva en sí el bacilo "Pasteurella pestis"; las pulgas pican a la rata y después al hombre: la concurrencia de estos cuatro elementos es necesaria pero no suficiente, ya que depende del grado de convivencia de ratas y personas, y de las circunstancias (principalmente meteorológicas), que favorecen o entorpecen la multiplicación de las pulgas.

Los factores geográficos que hay que tener en cuenta son:

1. *Factores físicos.*—Clima (comprensivo de observaciones de radiación, electricidad atmosférica e ionización), latitud, relieve y composición del terreno, hidrografía y magnetismo terrestre.

2. *Factores humanos y sociales.*—Densidad y distribución de población. Nivel de vida (vivienda, alimentación, vestidos, higiene, renta). Comunicaciones, religión, supersticiones, drogas.

3. *Factores biológicos.*—Vida vegetal, vida animal, parasitismo humano y animal, enfermedades predominantes y grupos de sangre más frecuentes.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

En cuanto a las enfermedades degenerativas, se entiende por tales todos los fenómenos patológicos que se cree no son transmisibles directa o indirectamente (excepto el trauma), sin que ello se oponga a que algún día pueda catalogarse alguna de estas enfermedades entre las contagiosas. Según May, de la Sociedad Geográfica Americana, se conocen, por ejemplo, las siguientes distribuciones geográficas referentes al cáncer: el cáncer primario de hígado es relativamente más frecuente en Africa, Indochina, Malaya, Indonesia y en las Islas Filipinas, que en las demás partes del mundo; el cáncer de estómago es poco frecuente en Java; el cáncer de lengua es frecuente en ciertas zonas de la India; el cáncer de cuero cabelludo es muy frecuente en el Africa francesa del norte; el de piel de las piernas en Africa e Indonesia, y el de piel del tronco en la India; en Uganda se ha registrado gran número de casos de cáncer de páncreas; en Indonesia y en la India se ha dado un número extraordinario de tumores malignos de linfa cervical, etc., etc. Esta lista de distribución geográfica de esta enfermedad puede completarse con otras muchas enfermedades causadas por alimentación defectuosa o inadecuada que, a su vez, está íntimamente ligada con factores físicos, meteorológicos y sociales.

Pasemos ya a enumerar las relaciones conocidas y comprobadas entre ciertos elementos meteorológicos y sus alteraciones y determinadas reacciones fisiológicas, empezando por la noticia más antigua que se tiene del aspecto legal de estas relaciones. En el siglo IX la "lex Frisiorum" imponía un castigo mayor al causante de alguna herida si quedaba cicatriz sensible al tiempo.

En la relación siguiente citaremos el autor o autores a quienes corresponde la comprobación:

Alergia en general.—Hausen ha observado crisis agudas en enfermos de fiebre del heno en las caídas de presión atmosférica; en otras manifestaciones alérgicas se encuentra siempre, como factor simultáneo o precedente, el paso de frentes (Joch, Albinger).

Amputaciones (dolores de las).—Aparte de la cita anterior sobre la ley de los Frisios, en el siglo XIV se encuentran escritos que se refieren a estos dolores, agudizados en los cambios de tiempo. Miller observó que pacientes aquejados de tales dolores encontraban alivio al caer las primeras gotas de lluvia. Reiter ha comprobado la agudización de los dolores de cicatrices y amputaciones ante el cambio del campo eléctrico de la atmósfera.

Ataques apopléticos y epilépticos.—Caída de presión (Burger, Schmidt, Ruhemann). Foehn (Jellinek, Sharfetter). Tormentas, lluvias (Halley, Brummer). Frente frío (Lichka).

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Angina de pecho.—Caída de potencial eléctrico de la atmósfera (Morana, Reiter).

Apendicitis.—Paso de frentes (Rapperts).

Asma bronquial.—Paso de frente frío (Cruz Auñón, Storm). Subida de presión (Baar). Frente frío con turbulencia, inestabilidad (Amelung).

Dispepsias.—Al finalizar largos períodos de sequía (Amelung).

Embolias.—Raetig y Nehs registraron 489 casos en diez años, y con los datos meteorológicos correspondientes en los días en que aquéllos ocurrieron, comprobaron la mayor frecuencia de casos en días con paso de frente frío o cálido y en días de tormenta con el siguiente resultado:

8 por 100 de días con frente cálido: 17 por 100 de casos de embolia.

15 por 100 de días con frente frío: 28 por 100 de casos de embolia.

3 por 100 de días de tormenta: 8 por 100 de casos de embolia.

También Reiter ha observado la mayor frecuencia de embolias en los días de grandes oscilaciones del campo eléctrico atmosférico.

Eclampsia de embarazo.—Linzenmaker ha comprobado que se acumulan estos casos entre dos depresiones consecutivas o al paso de una borrasca. Jacob ha deducido, de 666 casos, la relación entre la aparición de éstos con la llegada de frentes fríos. También Pugliatti ha observado que de 202 casos de eclampsia de esta clase el 51 por 100 tuvieron lugar en días de tormenta.

Eclampsia infantil.—Cambios bruscos de tiempo (Moro). Según Gyorgy se acumulan los casos en días calurosos y despejados de primavera con baja presión atmosférica.

Glaucoma agudo.—Según Löffler existe una relación significativa entre la acumulación de casos y el paso de frentes, con las tormentas (aún con las llamadas tormentas de calor) y, sobre todo, con el paso de frente cálido después de un largo período de frío seco invernal, y con el paso de frente frío en verano. También se acumulan los casos en las subidas extraordinarias de presión (Ahorn).

Infartos de miocardio.—De los trabajos de Schmidt, Beljiajew, Pfeiffer y Baur, se desprende de modo certísimo que las crisis graves están relacionadas con el paso de frentes. Esta relación ha sido comprobada por Amelung; en las horas sin perturbaciones atmosféricas sólo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

se observó el 12,7 por 100 de todos los infartos, mientras que en las horas con perturbaciones se observó el 87,3 por 100. También Reiter ha comprobado la acumulación de casos de infartos en días con cambios bruscos de polaridad en el campo eléctrico de la atmósfera.

Gripe.—Paso de frentes (Lederer). Perturbaciones positivas del campo eléctrico (Reiter).

Iritis reumática.—En el borde anterior de los frentes (Enroth).

Nefrolitiasis.—Paso de frentes, sector cálido y oclusiones (Hauck). Este autor ha observado que en un día de paso de frente se produjeron 316 casos, con una diferencia de 149 respecto a los dos días anteriores.

Neumonía.—Senfft, en una grave epidemia de 1883, observó un gran paralelismo entre la curva representativa del número de casos diarios con la banda del barógrafo de los mismos días. Recientemente, Bech y Knovenagd han comprobado la relación entre las invasiones de neumonías con ciertos cambios del tiempo, en que la presión varía siguiendo una curva semejante a la de casos de tal enfermedad.

Poliomielitis.—Petersen y Benell presumen que el estado preparalítico comienza con un frente frío, evolucionando a la parálisis al frente frío siguiente. También estos investigadores han encontrado que, en Chicago, se acumulan los casos de poliomielitis en días de descenso de temperatura, siendo muy raro en días de elevación de la misma.

Reflejos.—Atenuación o abolición. Radiación solar (Tamaka, Murasogi). Oscilaciones rápidas, en ambos sentidos, del campo eléctrico de la atmósfera (Reiter, Kampik).

Reuma.—La relación entre cambio de tiempo y dolores reumáticos es quizá la más popular y la más conocida de todas las concomitancias meteoropatológicas. Es copiosa la literatura sobre tiempo y reuma y son muchos los pronosticadores de cambios atmosféricos que sólo disponen de sus dolores más o menos reumáticos como medio de información. Según Feige y Freund, los pacientes "meteorológicos" de esta clase sólo presienten los fenómenos inherentes a un frente próximo, pero no a las situaciones prefrontales. Según Kohler y Flach, en tiempo de chubascos se agudiza el dolor de modo sincrónico con estos últimos. Pero desde el punto de vista meteorológico no existen tales pronósticos; según Frank, el aire caliente llega de dos a cuatro horas antes (y el frío de cinco a diez horas), de ser acusado por los reumáticos. Se ha comprobado la relación entre tales dolores y el paso de frentes, la caída de presión, las oscilaciones rápidas del campo eléctrico atmosférico y las descargas electromagnéticas (Reiter), de 10 a 50 kHz.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Suicidios.—Aunque no se trate propiamente de una enfermedad en el concepto clásico de la palabra, no hay duda de que se trata de una reacción anormal del hombre. No se ha encontrado correlación alguna entre la frecuencia de suicidios y la presión, la temperatura, la duración de la insolación, la humedad, ni las precipitaciones, pero sí, y muy significativa, con el paso de frentes y con las descargas electromagnéticas de 1 a 12 kHz (Reiter).

También los crímenes pasionales presentan una notable acumulación ante las grandes variaciones del campo eléctrico de la atmósfera y ante las descargas electromagnéticas de 1 a 12 kHz.

Profilaxis meteorológica.—No puede el hombre actuar sobre los meteoros según convenga a su aplicación; los utiliza o los soslaya, pero no puede producirlos ni alterarlos. Otra cosa será el día, que creemos cercano, en que el hombre pueda provocar o producir artificialmente la lluvia, pueda despejar un cielo nublado o nuboso, nublar un cielo despejado, alterar a voluntad el potencial eléctrico de la atmósfera, etcétera, pero, mientras tanto, el papel humano ante el elemento meteorológico es puramente defensivo, o cuando más, lucrativo, y como tanto la defensa como la utilización requieren el conocimiento del fenómeno o agente de que se trate, no sólo en el espacio, sino en el tiempo, de ahí que el hombre se haya preocupado, a fuerza de observación y de estadísticas, de situar en cada punto su clima (conjunto de valores atmosféricos), pero no de la manera que se pudiera llamar clásica, que consideraba al clima como algo propio y peculiar de cada sitio, como nacido en cada lugar, sino con una concepción dinámica; no es el fenómeno en sí lo que interesa, sino su estado en el tiempo, su evolución y su tendencia. El clima en un punto no es una planta nacida en su terreno, es la resultante de un conjunto de fenómenos nacidos, algunos a millares de kilómetros de distancia, que al pasar por aquel punto ocasionan, en un momento dado, variaciones características, resultado, muchas de ellas, de la historia de su procedencia.

Con el actual sistema de comunicaciones, de observaciones y de intercambio de datos, se hacen predicciones a corto y largo plazo, cuyas características varían según la aplicación de cada pronóstico. De este modo, en el campo de la meteoropatología puede, por ejemplo, el cirujano tener en cuenta la mejor situación meteorológica para las intervenciones no urgentes; el paso de frentes, que va acompañado de crisis en determinadas enfermedades y en ciertas reacciones en el hombre, se predice con gran seguridad, proporcionando así al médico un gran medio de prevención. La importancia de las llamadas "neurosis del tiempo", tanto para el paciente como para el operador, la influencia de las erupciones solares, la previsión de los cambios en el campo eléctrico de la atmósfera..., todo ello constituye un elemento cierto de alerta,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

que en muchos casos permitirá al médico tomar precauciones para aliviar dolencias, para anticipar o adelantar intervenciones, para sustraer al enfermo a la acción nociva del elemento perviamente anunciado, etc.

En resumen, todos los trabajos realizados hoy sobre causas de enfermedades meteorotrópicas, conducen al encuadramiento de las situaciones atmosféricas en dos tipos virtualmente perjudiciales. Uno es el tiempo frontal, y otro el foehm libre, con aire subsidente subtropical en toda la troposfera. A cada tipo corresponde una serie de reacciones clínicas y fisiológicas. Menor rango ocupan los elementos de superficie (presión, temperatura, humedad o viento). Las descargas electromagnéticas parece que son indicadores de situaciones atmosféricas más que agentes causales de enfermedades o de accidentes. El tratamiento, con éxito, de la fiebre del heno con electricidad negativa, puede abrir el camino para la explicación de los efectos del clima sobre la salud del hombre.

Terminamos este apuntamiento con la esperanza de que sea cada vez mayor el interés en las clases médicas y meteorológicas, para emprender conjuntamente una labor que sólo Dios sabe a qué consecuencias prácticas puede conducir, si se lleva a cabo con todo el celo y con todo el entusiasmo que merece la vida humana.

Y nada más.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

VII

LOS METODOS DE DIFERENCIAS FINITAS Y SU APLICACION EN METEOROLOGIA

Conferencia pronunciada en Madrid el día 11 de junio de 1962

por

MIGUEL AZPIROZ YOLDI

Meteorólogo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

LOS METODOS DE DIFERENCIAS FINITAS Y SU APLICACION EN METEOROLOGIA

METEOROLOGIA Y MATEMATICAS

Se acostumbra a decir que una Ciencia natural es exacta cuando admite tratamiento matemático, es decir, cuando sus principales problemas se pueden formular, y a veces, resolver, con recursos suministrados por las Matemáticas. Luego en esta Ciencia se ha superado la etapa puramente descriptiva, cuando sólo era un conjunto más o menos ordenado, cuantitativo o no, de conocimientos obtenidos por simple observación. Así consideradas, las ciencias naturales exactas no son más que porciones de lo que se ha llemado Física Matemática. En esta breve charla vamos a considerar algunos aspectos de la evolución de la Meteorología durante los últimos años, en un esfuerzo sostenido y tenaz por convertirse en ciencia exacta, y en particular el referente a la aplicación de le teoría matemática de diferencias finitas.

Empecemos por fijarnos en el motivo por el que las matemáticas son fundamentales en toda ciencia que pretenda cuantitavizar sus conocimientos. La base de la matemática pura es el concepto de número, que es en sí una de las creaciones más notables de la inteligencia humana. Obtenido por abstracción, al introducirse en los razonamientos ha sido origen de las matemáticas que, así consideradas, no tienen conexión alguna con el mundo de objetos concretos que conocemos por los sentidos. No hay, "a priori", razón para que exista conexión entre un fenómeno natural cualquiera—por ejemplo, la lluvia que va a caer o la probable velocidad del viento—y aquella ciencia. Es más, a antepasados nuestros, e incluso a gente de nuestro tiempo puede parecer incluso irracional y absurdo intentar predecir cualquiera de estos fenómenos.

Sin embargo, sabemos por experiencia que existe una relación muy notable entre los números y ciertos aspectos del universo inanimado revelado por observaciones. Toda la Ciencia occidental está basada en esta idea. La relación fué intuida y captada por los grandes matemáticos griegos, y realizada progresivamente varios siglos después por Galileo, Newton y sucesores. Ellos pusieron las bases de la Ciencia moderna, postulando que los fenómenos observables del Universo inanimado son

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

manifestaciones, simples o complicadas, de ciertas propiedades que se presentan con regularidad en la materia y que pueden observarse, a veces incluso mediante manipulaciones de laboratorio. Es decir, que la primitiva causalidad, relacionada frecuentemente con espíritus benignos o malignos, cambiaba de aspecto por completo y permitía, considerada de este modo, dar una nueva ordenación, más asequible, a las respuestas con que la naturaleza contestaba a las preguntas que, consciente o inconscientemente, formulábamos.

Este nuevo enfoque ha permitido ver, cada vez con mayor claridad, una doble utilidad de las Matemáticas en ciencia aplicada. En primer lugar, nos suministra un medio objetivo de resumir nuestra experiencia, es decir, actúa como una memoria. Esto es, por ejemplo, lo que hacemos cuando empleamos una fórmula empírica para representar la velocidad de evaporación del agua de un lago o pantano o cuando se pone en forma de serie de Fourier la onda diurna de temperatura. Este aspecto del empleo de fórmulas matemáticas es muy importante, porque de otro modo, con frecuencia, el conjunto total de datos de observación oscurecería el proceso físico que se estudia. En segundo lugar, permite hacer predicciones. Ello lleva consigo distintas etapas, comunes a todas las ciencias con pretensión de exactas:

1) Formulación de una teoría o hipótesis de trabajo respecto a la naturaleza del proceso físico que se estudia.
2) El planteamiento de un problema idealizado que lleve consigo la aplicación de la hipótesis a una situación dada.
3) La solución del problema idealizado por matemáticas.
4) La comparación de la solución matemática con los resultados obtenidos.

Es esencial, y más para las cuestiones meteorológicas que nos interesan, fijarnos en la naturaleza crítica del paso 2.º Nosotros no resolvemos problemas reales de Física por Matemáticas; podemos resolver algunos problemas ideales que presentan cierta afinidad con el problema real. En muchos problemas de Física el acuerdo existente entre la solución matemática y las observaciones cuantitativas es tan grande que nos hacemos la ilusión de haber resuelto un problema real. En otros la distancia entre la situación real y los datos teóricos es mayor. Pero la diferencia es siempre de grado de aproximación, nunca de principio.

Para que una ciencia pueda considerarse como exacta se suelen exigir dos condiciones. En primer lugar, ha de ser posible hacer observaciones de precisión respecto al estado del sistema de que se ocupa. Y en segundo, ha de poder demostrarse que la solución de los problemas matemáticos sugeridos por ella está íntimamente relacionada con aquellas observaciones. El grado de aproximación que ha de existir es, como decimos,

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

cuestión de criterio, basado en la precisión y objetividad de las observaciones. Evidentemente, ha de ser mucho más severo en espectroscopia, por ejemplo, que en cualquier teoría meteorológica.

Porque en Meteorología, cuando se trata de plantear los problemas idealizados importantes que indica el paso 2), nos encontramos con que la atmósfera, ya en primera aproximación, ha de considerarse como una capa fluida sometida a intensa radiación solar, de la que una parte es devuelta al espacio, pero otra calienta la tierra. Esto sugiere el estudio de las características de un sistema convectivo, calentado por debajo; pero ni aún para problemas de laboratorio ha sido resuelta satisfactoriamente esta cuestión. Y téngase en cuenta que hemos prescindido de que el sistema se halla sobre la tierra, en rotación uniforme.

Pero, además, se ve inmediatamente que esta primera aproximación, aun resuelta, no nos hubiera permitido obtener resultados comparables a los datos de observación. La presencia del vapor de agua en sus tres estados, con calores latentes importantes, absorbiendo y reemitiendo radiación, complica extraordinariamente el sistema convectivo indicado, que puede difícilmente aislarse del resto del Universo. Se trata de un sistema abierto, fuertemente entrelazado, y la no linealidad, enemigo principal de las soluciones matemáticas, es regla y casi nunca excepción.

Se comprende, a la vista de estas sencillas consideraciones, las enormes dificultades que presenta el planteamiento de un problema idealizado que tenga en cuenta las características más importantes de los movimientos atmosféricos. Se han ido teniendo, eso sí, datos de observación en número creciente que, colocados sobre mapas y diagramas adecuados permiten, tras análisis detenidos, representaciones del estado de la atmósfera en un instante dado. Pero estos análisis, además de ser siempre parciales, han resultado con excesiva frecuencia que no estaban desprovistos de apreciaciones subjetivas características de quienes los hacían. Y los procesos predictivos hechos a partir de ellos son mezcla de distintos factores, entre los que figuran cierta experiencia subjetiva acumulada y razonamientos físicos lo más cuantitativos posible. A veces, incluso, no es capaz el predictor de dar un conjunto de razones que justifiquen sus juicios respecto al comportamiento futuro de la atmósfera. Además, estas predicciones no están basadas en ningún modelo idealizado general. El predictor, aunque puede conocer, "a posteriori", los errores que comete, es incapaz de detectar sus orígenes, y, en consecuencia, de corregirlos sistemáticamente.

Sin embargo, no puede decirse que en ningún momento, ni aun en tiempos pasados, se abandonara la idea de hacer con la Meteorología una ciencia exacta. El desarrollo de la Astronomía y la Mecánica racional, primeros éxitos de la Ciencia occidental, y que siguen siendo el paraíso de las matemáticas, aunaron a sus cultivadores a tratar de com-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

prender, dentro de esquemas físicos idealizados, la mayor cantidad posible de fenómenos observables, y entre ellos, naturalmente, a los meteorológicos. Los progresos de la Hidrodinámica teórica, Euler, Lagrange, podían hacer pensar en probables éxitos, siquiera fuere en aspectos parciales del problema. Pero la atmósfera no exhibe periodicidades que permitan predecir el tiempo, como se hizo pronto, por ejemplo, con las mareas. Y, además, no se veía ningún conjunto simple de relaciones causales que permitieran relacionar el citado estado de la atmósfera en un instante dado con el estado en otro posterior. Era preciso, en consecuencia, formular el problema de modo completamente general, a base de las ecuaciones newtonianas del movimiento para un fluido, junto con la ecuación de continuidad, la ecuación que expresa el primer principio de la Termodinámica y la ecuación de estado. Este conjunto de seis ecuaciones con seis incógniatas, temperatura, presión, densidad, y las tres componentes de la velocidad, forma un sistema completo que en principio debe permitirnos, al menos teóricamente, predecir todos los movimientos de la atmósfera, a partir de un estado inicial y haciendo hipótesis, no excesivamente complicadas, en cuanto sepa integrarse este sistema de ecuaciones no lineal.

Este punto de vista fué ya considerado por Helmholtz a mediados del pasado siglo, pero se abandonó ante la extrema complejidad que presentaba el problema. En efecto, como cuestión matemática, era preciso completar el sistema de ecuaciones añadiéndole unas condiciones iniciales y de contorno que determinasen la unicidad de las soluciones. Los teoremas de existencia y unicidad sobre ecuaciones en derivadas parciales se desarrollaban progresivamente, pero se referían, casi sin excepción, a problemas geométricos interesantes desde el punto de vista matemático, sin que alcanzasen a cubrir los aspectos teóricos que podían interesar en Meteorología. Y, por otra parte, muchos de estos teoremas de unicidad, desarrollados con recursos de funciones continuas que habían alcanzado un desarrollo casi monstruoso, no podían tener interés alguno en ciencia aplicada, pues formulaban las soluciones de los problemas bajo forma de desarollos en serie de débil convergencia. Todavía hoy se carece de métodos generales que permitan relacionar explícitamente las soluciones del conjunto de ecuaciones planteado en Meteorología, a condiciones generales iniciales y de contorno.

En 1904 Bjerknes volvió a considerar el problema desde un punto de vista teórico general. Pero el primer intento de resolverlo por el método de diferencias finitas, sobre el que nos ocuparemos en seguida, fué de Richardson, en 1922. Reemplaza las derivadas por diferencias finitas en intervalos de espacio y tiempo arbitrarios, y calculaba los incrementos de las variables meteorológicas en un intervalo de tiempo Δt. Introducía estos valores en las ecuaciones y repetía la operación cuantas

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

veces era preciso; es decir, hacía lo que se llama una integración numérica. El trabajo era penosísimo, y llegó a pensar en emplear miles de calculadores si se quería calcular con suficiente rapidez. Pero la experiencia fué un completo fracaso, pues tras seis meses de cálculos, hechos por calculadores suyos, halló variaciones en las variables meteorológicas en total desacuerdo con la realidad. Por ejemplo, resultaban variaciones de presión del orden de 70 mb/3 h., y sólo habían sido de 3 mb. para el mismo intervalo de tiempo.

Aunque el trabajo fué, como hemos dicho, decepcionante, dirigió la atención de meteorólogos, físicos y matemáticos hacia las dificultades que podía presentar la solución de problemas físicos con teoría de diferencias finitas. La menor de ellas resultaba ser lo penoso del trabajo, dificultad hoy resuelta casi por completo con calculadoras electrónicas que trabajan a velocidades del orden 10^6 más de prisa que el hombre. Las otras se referían a las verdaderas posibilidades del cálculo con diferencias finitas. Courant, Friedrich y Levy, en 1928, aclararon algunos aspectos fundamentales de la cuestión planteada, y a partir de entonces se puede decir que ha entrado el problema en rápida evolución, habiendo llegado a formar un cuerpo de doctrina dentro de las matemáticas, con sus esquemas teóricos complejos y sus temas de investigación. Este cuerpo de doctrina ha contribuído de modo básico a los progresos teóricos de la predicción meteorológica, llamada predicción numérica del tiempo. Veamos algunas de sus principales características en relación con este problema.

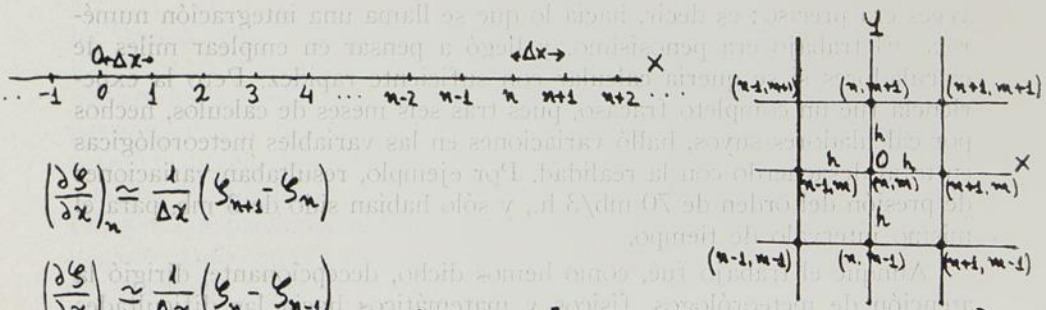
METODOS DE DIFERENCIAS FINITAS

La idea básica del cálculo con diferencias finitas consiste en aproximar las derivadas que figuran en fórmulas matemáticas por expresiones en esas diferencias que contengan los valores de las funciones en conjuntos discretos de puntos de entornos más o menos amplios de aquel en que se considera la derivada. Por ejemplo: (Ver fig. 1.ª).

De este modo, cualquier expresión diferencial queda convertida en otra manejable, con recurso de operaciones elementales. Cada derivada admite varias expresiones aproximadas dependientes de distintos factores y, entre otros, del número de puntos por expresión.

Así presentada la teoría, parece que no han de presentarse dificultades en la solución de los problemas. Sin embargo, un estudio detenido ha llevado a construir toda una teoría matemática de las cuestiones que se presentan y de los errores que pueden cometerse, a los que se llama de truncación por motivos evidentes. Vamos a ver, con ejemplos sencillos, sus dos aspectos más importantes:

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018



$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_n \simeq \frac{1}{\Delta x}\left(\zeta_{n+1} - \zeta_n\right)$$

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_n \simeq \frac{1}{\Delta x}\left(\zeta_n - \zeta_{n-1}\right)$$

$$\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)_n \simeq \frac{1}{2\Delta x}\left(\zeta_{n+1} - \zeta_{n-1}\right)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial y}\right)_{m,n} = \frac{1}{4h^2}\left[\zeta_{n+1,m+1} + \zeta_{n-1,m-1} - \zeta_{n-1,m+1} - \zeta_{n+1,m-1}\right]$$

$$\left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}\right)_n \simeq \frac{1}{\Delta x}\left[\frac{1}{\Delta x}\left(\zeta_{n+1} - \zeta_n\right) - \frac{1}{\Delta x}\left(\zeta_n - \zeta_{n-1}\right)\right] =$$

$$= \frac{1}{(\Delta x)^2}\left(\zeta_{n+1} - 2\zeta_n + \zeta_{n-1}\right)$$

Fig. 1.ª

a) *Inestabilidad de cálculo.*

Partamos de una ecuación de conservación, lo más sencilla posible, para movimiento en una dimensión:

$$\frac{d\zeta}{dt} = 0, \qquad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + U\frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

con velocidad U constante. Tiene soluciones de la forma

$$\zeta = A\, e^{i\alpha\,(x - Ut)}$$

y por superposición de ellas se obtiene cualquier solución general. Puesta en diferencias finitas, centradas en espacio y tiempo, resulta

$$\frac{1}{2\Delta t}\left(\zeta_{n,\,m+1} - \zeta_{n,\,m-1}\right) + \frac{U}{2\Delta x}\left(\zeta_{n+1,\,m} - \zeta_{n-1,\,m}\right)$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Por analogía con la solución continua, ahora ζ ha de valer

$$\zeta = \mathrm{A} e^{ia\,(km\,\Delta\,t\,+\,a\,n\,\Delta\,x)}$$

expresión que sustituída en la ecuación da

$$e^{i\,k\,\Delta\,t} - e^{-i\,k\,\Delta\,t} + \frac{\mathrm{U}\,\Delta\,t}{\Delta\,x}\left(e^{i\,a\,\Delta\,x} - e^{-i\,a\,\Delta\,x}\right) = 0$$

o, por Euler,

$$\operatorname{sen} k\,\Delta\,t + \frac{\mathrm{U}\,\Delta\,t}{\Delta\,x}\operatorname{sen} a\,\Delta\,x = 0.$$

Ahora bien, k no ha de tener parte imaginaria, porque esto implicaría en ζ un factor creciente indefinidamente con m. Luego es preciso, para evitar esto, que

$$\frac{\mathrm{U}\,\Delta\,t}{\Delta\,x} \leqslant 1$$

y entonces nos aproximaremos tanto más a la solución continua cuanto menores sean $\Delta\,x$ y $\Delta\,t$, e incluso puede acortarle el error que se comete. Como consecuencia, no se pueden elegir los intervalos de espacio y de tiempo arbitrariamente, por muy pequeños que se consideren. Es preciso que satisfagan, para cada problema, a una relación similar a la hallada, que recibe el nombre de condición de estabilidad de cálculo. Esto fué lo demostrado por Courant, Friedrich y Levy en 1928, para un caso particular. En problemas de propagación de ondas, por ejemplo, se puede ver que esta condición equivale a decir que el incremento $\Delta\,t$ debe ser menor que el tiempo empleado por la onda en ir de un punto a otro del retículo o malla que se considere. Y recibe una interpretación física semejante en todos los casos. En el caso de los movimientos atmosféricos que nos interesan, las ondas de Rossby, su velocidad es del orden de 100 Km/h. Pero las ecuaciones hidrodinámicas que han de satisfacer tienen también como solución la propagación de ondas sonoras y de ondas de gravitación, cuyas velocidades son del orden de 1200 y 340 kilómetros/hora; respectivamente, y los intervalos $\Delta\,x$ y $\Delta\,t$ empleados por Richardson presentaban inestabilidad de cálculo para estas ondas. Porque no importa que prescindamos de ondas sonoras o gravitatorias en las condiciones iniciales del problema, pues las ecuaciones no distinguen entre datos físicos reales y erores que podemos introducir, inadvertidamente, en las condiciones iniciales. Por ejemplo, para $\Delta\,x \simeq 400$ ki-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

lómetros es preciso tomar $\Delta t \leqslant 20$ minutos, y Richardson tomó estos intervalos de 3 horas.

Imaginemos que podemos modificar las ecuaciones hidrodinámicas de modo que no dejen de ser solución de ellas las ondas meteorológicas de Rossby y sí, en cambio, las ondas sonoras y de gravitación. Habremos conseguido eliminar una de las fuentes de dificultad del problema mediante esa operación a la que se llama "filtrado" de las ecuaciones. O, en otras palabras, con terminología de Charney, a quien se debe lo fundamental de estas ideas, habremos suprimido los "ruidos" meteorológicos. Este "filtrado" o supresión de ruidos se puede conseguir de muy diversas maneras. Una de ellas, por ejemplo, obtenida por Charney, utiliza la aproximación hidrostática y el viento geostrófiico.

A pesar de todo, parece actualmente mejor solución, aunque mucho más trabajosa, utilizar las ecuaciones primitivas. Se vencen difícilmente todas las dificultades que se presentan, y por ello apenas se ha intentado, hasta hoy, hacer predicciones numéricas con ellas.

b) *Velocidad de fase y ondas parásitas.*

Con la estabilidad de cálculo nos aseguramos la no amplificación indefinida de las soluciones que se obtengan por diferencias finitas. Pero quedan por estudiar las velocidades de fase, o situación de las ondas individuales componentes. Para el caso estudiado, la velocidad de fase U_α vale

$$U_\alpha \frac{k}{\alpha} = \frac{1}{\alpha \Delta t} arc\ \text{sen} \left[\frac{U \Delta t}{\Delta x} \text{sen}\ \alpha \Delta x \right]$$

y si $\dfrac{U \Delta t}{\Delta x} = 1$, $U_\alpha = U$, y tendríamos la velocidad exacta de fase del movimiento. Pero como, en general, la solución completa se obtiene por superposición de ambas componentes, y U depende de α, este resultado no puede aplicarse simultáneamente a todas las componentes del espectro de la solución. En consecuencia, se ve que es preciso elegir, en el caso general, Δt ligeramente inferior al cociente de Δx por la velocidad de fase de la componente más rápida del espectro solución. Es decir, hay que conocer previamente algunas características importantes del problema que se pretende resolver. Esto no es nuevo en Ciencia, porque incluso en la solución de problemas clásicos de Física, por ejemplo, de conducción del calor, hay incluído un proceso de selección y adaptación de la forma de las soluciones. Volviendo a la Meteorología y a las ecuaciones filtradas, como las ondas de Rossby, para longitudes de onda del orden de 4.000 kilómetros tienen velocidades máximas algo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

superiores a los 100 Km/m., cuando Δx sea de unos 400 kilómetros, resultan Δt del orden de unas dos horas y media, aunque en la práctica se reduzcan a su tercera o cuarta parte.

En cuanto a las llamadas ondas parásitas, vamos a ver cómo se presentan, con recursos de funciones continuas, empleando ecuaciones en diferencias y diferenciales a la vez.

Partimos de la ecuación de conservación

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + U \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0,$$

con U constante

y ponemos

$$\zeta_k = \zeta (k\,h, t) \quad , \quad k = 0, \pm 1, \pm 2 \ldots \quad , \qquad h = \Delta x$$

queda

α) en diferencias centradas

$$\frac{d}{d\tau} \zeta_k = \frac{1}{2} (\zeta_{k-1} - \zeta_{k+1})$$

$$\tau = \frac{U\,t}{h}$$

β) en diferencias hacia atrás

$$\frac{d}{d\tau} \zeta_k = \zeta_{k-1} - \zeta_k$$

Estudiemos la propagación de un impulso unidad,

$$\zeta (x, 0) = \begin{matrix} 1 & |x| \leqslant 3/2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{matrix}$$

La solución real es

$$\zeta (x, t) = \begin{matrix} 1 & |x - U\,t| \leqslant 3/2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{matrix}$$

Las soluciones de α) y β), a base de funciones continuas, son:

α) $\qquad \zeta_k (\tau) = \sum_{p \pm -1}^{1} J_{k-p} (\tau)$ con funciones Bessel

β) $\qquad \zeta_k (\tau) = \dfrac{e^{-\tau\tau\ k+1}}{(k+1)\ !} \left[1 + \dfrac{k+1}{\tau} + \dfrac{k\,(k+1)}{\tau^2} \right]$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

y en las figuras pueden verse los conjuntos de oscilaciones parásitas que acompañan a la señal principal.

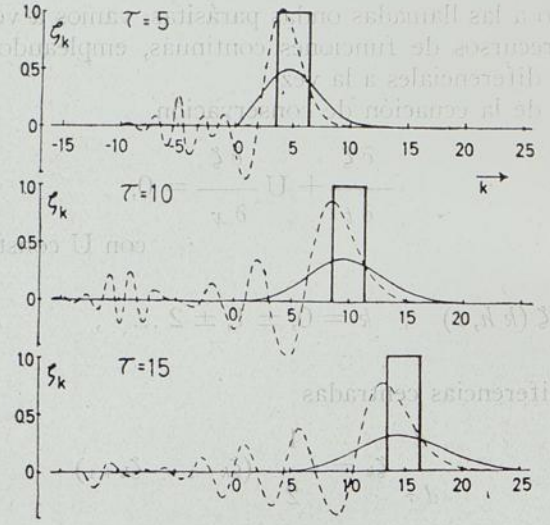


Fig. 2.ª

Estamos, sin embargo, en un caso extremo. En Meteorología, el suavizado previo que es preciso hacer con los datos de observación tiende a hacer desaparecer estas oscilaciones parásitas. He aquí un ejemplo teórico, a base de impulsos unidad, para verlo gráficamente.

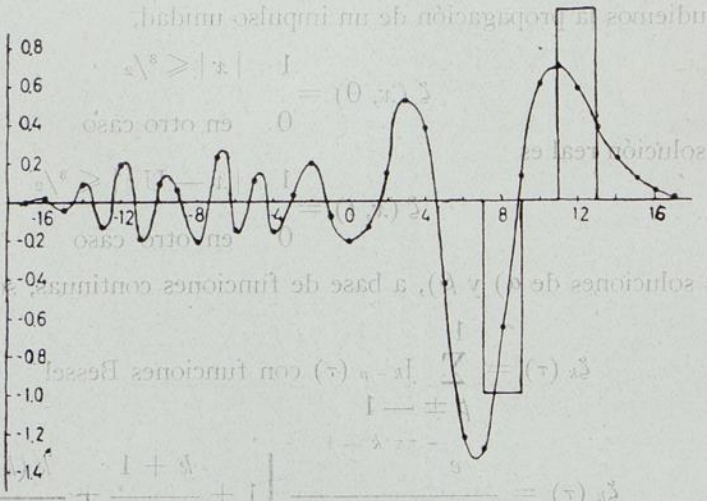


Fig. 3.ª

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

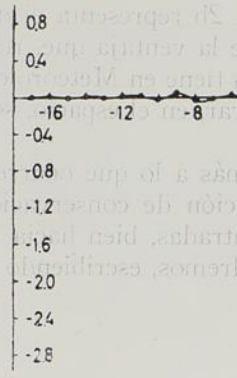


Fig. 4.ª

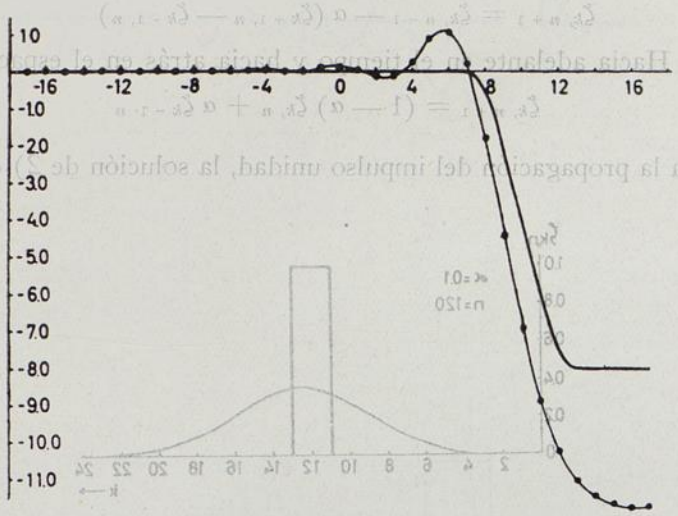


Fig. 5.ª

El suavizado ha consistido en pasar de la primera a la segunda curva por medio de la integración

$$V_\kappa = \sum_{p=-\infty}^{k} \zeta_p$$

y de la segunda a la tercera mediante

$$\Psi_\kappa = \sum_{p=-\infty}^{k} V_p$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Si 2a representa el campo de vorticidad, 2b representa el de velocidades y 2c el de alturas de topografía. Se ve la ventaja que, respecto al amortiguamiento de las oscilaciones parásitas tiene en Meteorología interesarse por valores que se obtengan de integrar, en el espacio, soluciones directas de las ecuaciones del movimiento.

Se puede, también, para aproximarnos más a lo que ocurre en problemas de Meteorología, considerar la ecuación de conservación totalmente puesta en diferencias finitas, bien centradas, bien hacia adelante, en el tiempo y hacia atrás en el espacio. Tendremos, escribiendo

$$\alpha = \frac{U \Delta t}{\Delta x}$$

1) Centradas

$$\zeta_{k,\, n+1} = \zeta_{k,\, n-1} - \alpha \, (\zeta_{k+1,\, n} - \zeta_{k-1,\, n})$$

2) Hacia adelante en el tiempo y hacia atrás en el espacio

$$\zeta_{k,\, n+1} = (1 - \alpha) \, \zeta_{k,\, n} + \alpha \, \zeta_{k-1,\, n}$$

Para la propagación del impulso unidad, la solución de 2) es

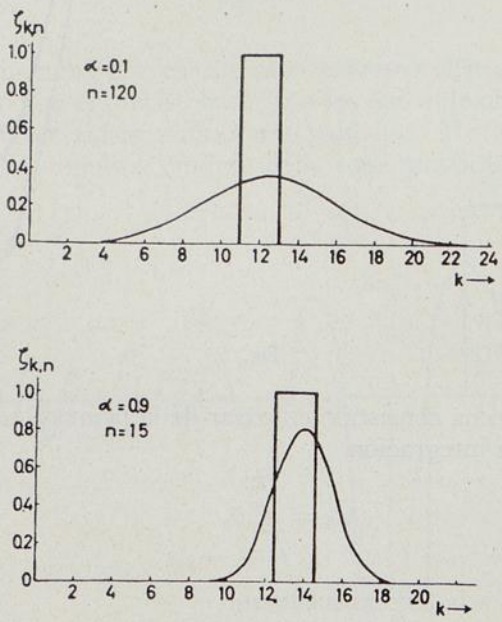


Fig. 6.ª

2) no tiene solución en funciones continuas conocidas, y es preciso calcular paso a paso por diferencias finitas. He aquí los resultados.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

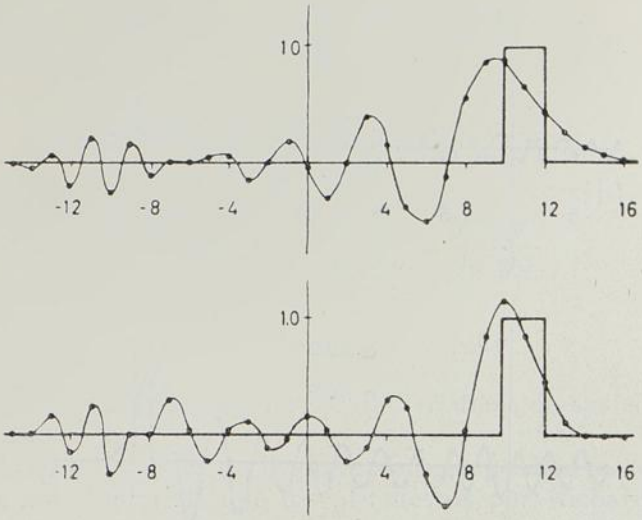


Fig. 7.ª

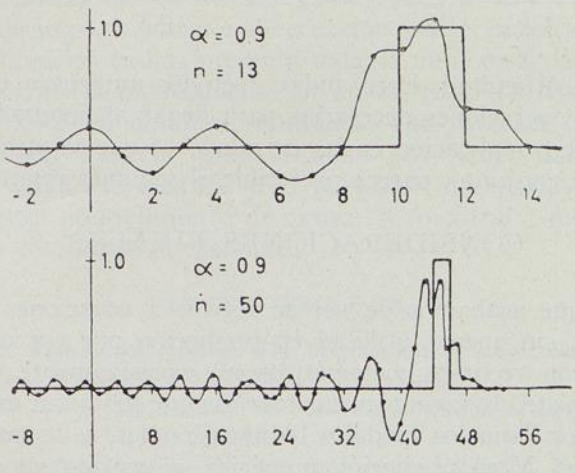


Fig. 8.ª

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

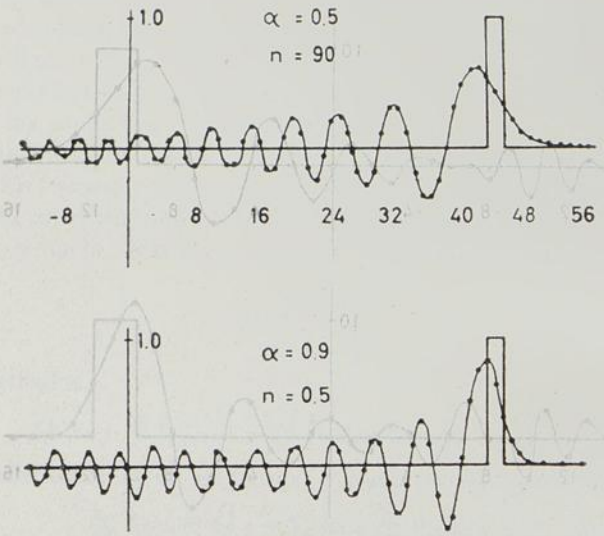


Fig. 9.ª

Como remedio para evitar estas ondas parásitas se pueden sugerir dos métodos. O bien se aumenta el número de puntos de división, es decir, se disimnuye Δx, o bien se utilizan otras expresiones para las derivadas, con intervención de más puntos. Por ejemplo, para la derivada primera,

$$\left(\frac{\delta}{\partial x}\right)_k = \frac{2}{3\,\Delta x}\,\zeta_{i+1,\,k} - \zeta_{i-1,\,k}) - \frac{1}{12\,\Delta x}\,(\zeta_{i+2,\,k} - \zeta_{i-2,\,k})$$

se obtiene sin dificultad. Pero ambos métodos aumentan enormemente el número de operaciones necesarias para llegar al resultado final, con la consiguiente complicación en las calculadoras que se utilicen y en sus memorias. En conjunto, parece preferible el segundo remedio.

CONSIDERACIONES FINALES

Todo lo que acabamos de ver se refiere a ecuaciones de modelos muy sencillos, sin apenas utilidad en predicción por esa causa, fáciles de manejar con recursos matemáticos no excesivamente complicados. Aún así, no existen todavía técnicas teóricas que permitan extender estos resultados a los llamados modelos bidimensionales, o de mayor número de dimensiones. Y en predicción numérica se utilizan ya modelos que se rigen por ecuaciones de la forma

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla_p^2 z + \frac{g}{f}J(z,\nabla^2 z) + \beta\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{f^2}{g}\frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \qquad (1a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial z}{\partial p}\right) + \frac{g}{f}J\left(z, \frac{\partial z}{\partial p}\right) - \sigma\omega = 0. \qquad (1b)$$

$$\sigma = \frac{\alpha}{g} - \frac{\partial \ln \Theta}{\partial p}; J(z, z') = \frac{\partial z}{\partial x}\frac{\partial z'}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y}\frac{\partial z'}{\partial x}$$

Fig. 10.

de los que es necesario conocer las características de sus soluciones por diferencias finitas.

Los esfuerzos actuales de la Meteorología predictiva se dirigen a objetivos más limitados que los propuestos por Richardson. En lugar de intentar trabajar con la atmósfera en toda su complicación se trabaja con modelos que, de más simple a más complicado, van incorporando mayor número de particularidades características. Entre ellas resulta extremadamente interesante el conocimiento del mecanismo íntimo cuantitativo, a través del cual la energía solar pasa directa o indirectamente a la atmósfera y contribuye a mantener la circulación general. Sólo cuando esto se haya logrado, y se trabaja en ello muy intensamente, será posible conseguir predicciones numéricas a largo plazo con grandes probabilidades de acierto.

Pero, a la vez, es también necesario el progreso continuado de los recursos matemáticos que se utilizan en la solución de esos problemas, porque, como decimos, la solución de ecuaciones diferenciales de modelos físicos por diferencias finitas presenta todavía numerosas lagunas.

Aunque se trabaja intensamente en ambos aspectos, físico y matemático, y se consiguen notables resultados, que parecían inalcanzables hace pocos años, todavía queda mucho por hacer hasta que las predicciones tengan el alcance y la precisión necesarias. El doctor Sutton, con gran conocimiento de causa, se mostraba muy optimista, y hemos de compartir su esperanza.

BIBLIOGRAFIA

O. G. Sutton. Presidencial Address. The development of meteorology as an exact Science. Quat. Journ. of Roy. Met. Soc. Vol. 80, pág. 345.

J. G. Charney. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. Jour. of Met. 6, 6, 1949.

Philip O. Thompson. Numerical Weather Analysis and Prediction. New York, 1961.

M. G. Wartele. On the problem of truncation error. Tellus. Vol. 13, núm. 3, 1961.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

bajo de los 400 mb., usando el correspondiente perfil de viento para determinar la verdadera naturaleza de estos puntos. Si la tropopausa cifrada resulta ser de tipo frontal, entonces se deberá seleccionar una diferente zona estable claramente asociada con el nivel de viento máximo como nivel de tropopausa.

La figura 3 ilustra el tipo de distribución de viento y temperatura típico de esta categoría. Notad especialmente el bajo nivel de la tropopausa cifrada y el fuerte y bien definido gradiente vertical del viento a través de la inversión. Hay que insistir en que casos de este tipo están limitados a niveles de la tropopausa cifrada a 400 mb. o por debajo.

Mientras que la mayoría de las situaciones pueden ser incluídas en alguna de las tres mencionadas y resueltas según procedimientos que acabamos de indicar, todavía quedan algunos casos que no pueden ser adaptados con facilidad al modelo operacional. Estos pueden ser clasificados en dos tipos basándose principalmente en la extensión del área geográfica en que se producen.

Tipo a) Este ocurre cuando situaciones del tipo 3 se presentan simultáneamente en áreas geográficas relativamente pequeñas. Cuando el analista encuentra dificultades para resolver el problema según se ha indicado para esta situación, el caso deberá tratarse como una anomalía. Si la extensión del área afectada y el valor del error se considera operacionalmente importante, la extensión de la excepción deberá anotarse en el análisis para tenerla en cuenta en la predicción. Si no es operacionalmente importante, entonces se despreciará y no se considerará en absoluto.

Tipo b) Este tipo ocurre en extensas áreas geográficas. El campo sinóptico está definido, generalmente, por las siguientes características: Un cinturón de fuertes vientos que se extienden en una considerable extensión vertical en la troposfera alta, o baja estratosfera, exhibiendo un perfil de viento obtuso (por ejemplo, velocidades de 80/100 Kts. en una capa de 10/12.000 pies de altura), o varios posibles niveles de viento máximo, o también un cinturón de fuertes vientos afectando una gran extensión geográfica en el sentido horizontal (500/1.000 millas de ancho y 1.000/2.000 millas de longitud), y, por último, la coexistencia de todas o cualquiera de las combinaciones de la tropopausa polar y tropical, zonas frontales a niveles altos y del chorro polar y subtropical, que se traducirán en posibles múltiples inversiones en el perfil de temperatura.

La resolución de este tipo b) es un procedimiento difícil que exige un cuidadoso estudio de los correspondientes perfiles de viento y temperatura. La clasificación de las inversiones, como frontales, de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tropopausa o subsidencia, debe basarse en continuidad pasada, situaciones sinópticas y experiencia. Más adelante, al tratar del trazado de la topografía de la tropopausa, enunciaremos algunas correlaciones que también pueden ser de utilidad para este caso.

En cuanto a la determinación del nivel de viento máximo cuando existe un perfil obtuso de viento, se sugiere trazar una línea vertical de manera que indique gradiente vertical nulo, con una desviación mínima a cualquier nivel de la capa. Esto implicaría una situación barotrópica dentro de los límites especificados. Desde luego, que en los casos más difíciles hay que contar con el ingenio del analista para su resolución.

3. Análisis del perfil de temperatura estratosférica.

Puesto que los niveles de las operaciones actuales de los aviones a reacción comerciales están restringidos al espacio aéreo limitado superiormente por aproximadamente 42.000 pies (175 mb.), las técnicas aquí sugeridas se basan en esa limitación, y se toma el nivel de 150 mb. como límite superior de estas operaciones.

Si la tropopausa está a, o por encima de 150 mb., no hay necesidad de análisis de gradientes de temperatura estratosférica. En otro caso se rectificará el gradiente de temperatura desde la tropopausa (o los 300 mb., según cuál sea más alto) hasta los 150 mb. usando el método de igualdad de áreas.

El objeto del análisis de gradiente medio estratosférico es determinar la variación de temperatura media vertical en los niveles de operación con un mínimo de desviación con respecto a las variaciones observadas. Al mismo tiempo es necesario tener un plano de referencias en la estratosfera, a partir del cual se puede hacer una interpolación lineal con la temperatura de la tropopausa. Si en el ajuste de este gradiente medio para conseguir una interpolación lineal en la capa desde la tropopausa hasta 150 mb. aproximadamente, con una sola línea, es posible encajar la temperatura cifrada a 150 mb. sin desviarnos más de ± 2/3º C. de ninguno de los puntos por encima de la tropopausa, entonces esta línea constituirá el gradiente medio. Si al ajustar este gradiente medio se necesita una desviación de más de ± 2/3º C. para incluir la temperatura de los 150 mb., se sugiere el siguiente procedimiento: ignorar la temperatura a 150 mb. y ajustar una curva media que tenga una desviación mínima desde la tropopausa hasta los 175 mb. Esto no proporcionará el mejor análisis de la temperatura a 150 mb., pero dará una mejor interpolación lineal en los niveles que más interesan (por debajo de los 175 mb.).

Una vez así analizados los perfiles individuales de viento y tem-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

peratura de las estaciones seleccionadas de forma que se ajusten a un modelo ideal, estamos en condiciones de transcribir los resultados en un mapa para realizar un análisis de área que constituirá el mapa de tropopausa y gradiente vertical de viento.

Los elementos que se transcriben para cada estación son:

Altura de la tropopausa en mb. enteros. (Debe ser convertida en mbs. cuando viene cifrada en pies o metros.)

Viento a la altura de la tropopausa.

Temperatura a los 150 mb. cuando la tropopausa está a, o por encima de 150 mb., o bien la diferencia de temperatura entre los 300 y 150 mb., según se ha determinado por medio del gradiente medio cuando la tropopausa está por debajo de los 300 mb., o bien, por último, la diferencia entre la temperatura de la tropopausa y la temperatura a 150 mb. cuando la tropopausa está a, o por encima de 300 mb.

Magnitud del gradiente vertical de viento en la troposfera y en la estratosfera.

Análisis de área.

1. En primer lugar, trazaremos las isohipsas de 300 mb. con la ayuda de la escala de viento geostrófico, así como haciendo uso de la información de aviones en vuelo a este nivel. Luego se trazará el campo de temperaturas a 300 mb. A este respecto, el gradiente vertical troposférico del viento en estaciones individuales nos servirá de ayuda para el trazado del gradiente horizontal de temperatura, es decir, nos indicará la separación de las isotermas, que se trazarán de 5º en 5º C., basándose en la fórmula [1].

2. Análisis espacial del gradiente de temperatura estratosférica.

Hemos visto que la representación en el mapa del gradiente de temperatura estratosférica podía hacerse bien por medio del gradiente medio expresado en ºC/1.000 pies o como una diferencia de temperatura entre la temperatura de la tropopausa y la temperatura «ajustada» a 150 mb. (diferencias positivas indicarán temperaturas a 150 mb. superiores que las de la tropopausa).

La variación espacial de este gradiente de temperatura estratosférica es difícil de determinar y predecir, especialmente a una escala sinóptica.

Se han hecho interesantes estudios estadístico-climatológicos basados en la experiencia operacional sobre el Atlántico Norte. En general, valores positivos de la diferencia entre la tropopausa y los 150 mb., se presentan sobre la tropopausa ártica y sobre los valores altos de la altura de tropopausa (por ejemplo, 200 mb.).

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Sobre bajas frías troposféricas que se han movido hacia regiones lejanas de sus áreas de formación o que se han desarrollado originalmente a partir de campos baroclínicos, ese valor es nulo, o bien una magnitud positiva o negativa muy pequeña.

3. Topografía de la tropopausa.

La configuración de la tropopausa observada sobre las áreas terrestres donde la densidad relativa de observaciones es alta, está en manifiesto contraste con la configuración analizada sobre las áreas oceánicas donde estas observaciones son escasas.

En general, el análisis de la configuración de la tropopausa muestra fuertes gradientes sobre las zonas terrestres en contraste con una relajación del campo sobre los océanos. Mientras que parte de esta relajación del gradiente de la tropopausa puede atribuirse a modificación, es lógico pensar que buena parte de ello puede ser debido a la falta de información y a la tendencia del analista promediar. En regiones de gran densidad de datos se determinan dos zonas principales de fuertes gradientes de tropopausa en la atmósfera. Una de estas zonas está asociada con la «falla» tropical y puede ser reconocida por la proximidad de las intersecciones con 100 mb. y 200 mb. (a menudo, dentro de un grado o dos de latitud). La segunda de estas zonas, asociada con la «falla» polar, se reconoce por un fuerte gradiente desde 200 mb. hacia abajo, a veces hasta los 500 mb., y también aquí, en el trazado, estas intersecciones pueden estar contenidas en uno o dos grados de latitud.

El gradiente de la troposfera está relacionado con los vientos del chorro y los frentes en la superficie de 300 mb., de tal manera que las isohipsas de tropopausa estarán muy juntas sobre esos elementos. El valor cuantitativo de este gradiente depende en gran parte de la disponibilidad de datos y la continuidad. Existe, sin embargo, una correlación muy buena entre esta configuración y la topografía relativa de 500-300 mb. y hasta un cierto grado entre valores determinados del espesor de esta capa; además, hay una buena correlación entre el campo de temperatura estratosférica a 200 mb. y una particular intersección de la tropopausa. Por ejemplo, la intersección con los 200 mb. se encuentra a lo largo del eje de las temperaturas más frías a 200 mb. con casi inmediato agrupamiento del campo de temperaturas estratosféricas hacia valores más bajos de las alturas de la tropopausa. El examen de una limitada serie de cartas indica también la posibilidad de que una determinada isoterma, más o menos unos cuantos grados, en la estratosfera a 200 mb., indique la intersección con 250 mb. Aunque la continuidad juegue también un papel importante en el análisis de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tropopausa, hay que hacer los ajustes oportunos para tener en cuenta los cambios importantes de intensidad de los sistemas.

En general, no hay problema para el trazado de la topografía de la tropopausa en aquellas áreas donde la densidad de datos es alta; la dificultad aparece en zonas donde, como el Atlántico, esa densidad es baja. El problema se resuelve entonces son ayuda de la fórmula que nos da la correspondencia entre el gradiente de tropopausa y el gradiente vertical medio de velocidad de viento (fórmula [3]) en un punto determinado y por medio de correlaciones de las configuraciones de la tropopausa con características sinópticas del campo en superficie y a 500 mb. que pueden conocerse con un buen grado de exactitud.

Ya hemos visto cómo con ayuda de un ábaco es fácil determinar el gradiente de la tropopausa en los puntos donde el gradiente vertical medio de velocidad de viento es conocido, y a continuación exponemos algunas de las mencionadas correlaciones:

Correlación de la tropopausa; y

a) Sistemas frontales y centros de acción en superficie.

Altas cálidas que se extienden hasta los 500 mb. indican, generalmente, una altura de tropopausa alrededor del nivel de los 200 milibares. Un sistema frontal en superficie que separa aire semitropical de aire polar delineará el punto más meridional en el que se puede esperar que la tropopausa descienda a 200 mb.

En bajas frías que se extienden hasta los 500 mb. no deberá esperarse encontrar una tropopausa muy por encima del nivel de los 250 mb.

b) Topografía relativa 500/300 mb.

Hay una buena correlación entre el gradiente de espesor y el gradiente de la tropopausa. Un fuerte gradiente de espesor implica un fuerte gradiente de tropopausa y viceversa.

c) Las isotermas de —20º C. y —30º C. a 500 mb.

Hay una íntima relación entre la posición de la intersección de la tropopausa con los 250 mb. y la posición de los —20º C. a 500 milibares. Parece que la tropopausa a 250 mb. coincide o está en la región fría de esta isoterma de —20º C. Hay también una directa relación entre la proximidad de las isotermas de —20º C. y de —30º C. y el gradiente de la tropopausa: mientras más próximas están estas isotermas, mayor será el gradiente.

d) Región del chorro a 300 mb.

La concentración de las isohipsas de tropopausa se encuentra en la región fría de la intersección con los 200 mb. y a lo largo del límite de la corriente de chorro a 300 mb. por el lado del aire frío.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

e) Por último, cuando la tropopausa se encuentra por debajo de los 300 mb., habrá, generalmente, un fuerte gradiente de tropopausa alrededor de esta zona de baja estratosfera.

3. Campo de isohipsas de gradiente vertical medio de velocidad del viento (MVWS).

El concepto de mapas de gradiente vertical de viento no es nada nuevo: Las topografías relativas entre dos superficies isobáricas, que representan la distribución vertical media del viento entre estas superficies, se han utilizado desde hace mucho tiempo y han demostrado ser de gran utilidad en regiones donde existen pocos datos. Este mapa engloba toda la información referente a la variación vertical del viento en una representación horizontal para facilidad del análisis y la predicción.

Para la determinación del campo del gradiente vertical medio de velocidad de viento se pueden seguir dos procedimintos:

En primer lugar, una vez establecida la relación entre los campos de temperaturas troposféricas y estratosféricas y los respectivos gradientes verticales de viento por medio de la fórmula [1], se puede trazar separadamente el campo de temperaturas en la troposfera y en la estratosfera, como hemos indicado, y a partir de ellos, delinear, también separadamente, el campo de gradientes verticales de viento troposféricos y estratosféricos, apoyándose, como es lógico, en los valores actuales de este parámetro calculados para las estaciones seleccionadas. Una simple adición gráfica de estos dos campos nos dará el campo de gradiente vertical medio de viento.

Es más simple, sin embargo, calcular directamente el campo del gradiente vertical medio del viento utilizando la topografía de la tropopausa que ya hemos trazado, basándonos de nuevo en la relación dada por la fórmula [3], que relaciona el gradiente de la tropopausa con el gradiente vertical medio de velocidad de viento. Aquí, de nuevo, se utilizarían estos valores medios calculados para cada estación.

Resumiendo, los elementos que quedan analizados en esta carta son:

a) Configuración de la tropopausa a intervalos de 50 mb. para todos los niveles inferiores a 150 mb.

b) Temperatura de la tropopausa con suficiente densidad a lo largo de las diferentes intersecciones para indicar variaciones de $\pm$ 5º C.

c) El gradiente horizontal de temperaturas a los 200 mb. en la estratosfera a intervalos de 5º C.; y

d) El gradiente vertical medio de velocidad de viento.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Chorro subtropical.

El chorro subtropical de viento del Oeste alcanza un máximo en la troposfera a los 200 mb., aproximadamente, que están bien por debajo de la tropopausa tropical. Esto conduce a un cambio de signo del viento térmico en la troposfera y, consecuentemente, el gradiente horizontal de temperatura a 300 mb. no describe adecuadamente la distribución vertical de viento en la tropopausa. Esto puede ocasionar grandes errores en la determinación del viento en altura. Donde se dispone de esta información, el valor actual del viento máximo y su altitud se deberá anotar en el mapa de tropopausa y gradiente vertical de viento, de forma que puedan hacerse consideraciones cualitativas en la predicción final para estas áreas.

En estos casos donde hay un cambio de signo del viento térmico debajo de la *tropopausa tropical* y donde el gradiente vertical medio de viento es igual o mayor que 2 Kts./1.000 pies, se utiliza el siguiente procedimiento:

La altura a que este cambio de signo de viento térmico tiene lugar (viento máximo), se anotará en números rojos en el mapa sobre la estación de que se trate. Hay que tener en cuenta que sólo es necesario en aquellas áreas donde la tropopausa está por encima del nivel de los 200 mb.

Desde el punto de vista de la predicción se puede obtener luego un valor medio de las anteriores alturas y anotarlo en la carta prevista.

Deberá tenerse en cuenta en la carta de tropopausa/gradiente vertical de viento prevista que, para aquella área en la parte troposférica de la isohipsa de 200 mb., el gradiente vertical medio de viento será aditivo hasta, por ejemplo, 250 mb., y sustractivo a partir de ahí hacia arriba, aunque todo el volumen hasta los 150 mb. esté en la troposfera.

Se ha observado que el chorro subtropical de viento del Oeste, cuando existe, está asociado con el cinturón formado por las isotermas de — 35º C. a — 38º C. en el nivel de los 300 mb.

A 500 mbs., las isotermas que delimitan el chorro subtropical son las de —8º C. a —11º C., aunque raramente el campo de fuertes vientos se manifiesta a 500 mb. en este intervalo de temperaturas.

Correlaciones con estos campos de temperaturas son una ayuda y guía para determinar la extensión horizontal del chorro subtropical. Su extensión vertical sólo puede determinarse por información directa o por medios estadísticos.

Por ejemplo, si hay varios datos a lo largo del chorro, que indican un nivel de viento máximo con una diferencia entre ellos de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

unos miles de pies, se toma una altura *media* que se indica en el análisis y en la predicción.

Cuando la extensión vertical no se conoce por observaciones, entonces se puede utilizar una altura estadística o climatológica como medio de determinar el punto en que se produce este cambio de signo del viento térmico.

Predicción.

Viento.

Las técnicas de predicción en la capa por encima de los 300 mb. se reducen, por ahora, a lo que se llama «conservación de la correlación actual». En otras palabras, se supone que la interdependencia entre las configuraciones de la tropopausa y gradiente vertical de viento y los 300 mb., chorro a 300 mb. y topografía relativa 500-300 mb. en un momento determinado se conserva en el período de las veinticuatro horas siguientes.

Sin embargo, en situaciones en las que se están produciendo cambios rápidos de intensidad de los sistemas, se deben tener en cuenta, de una forma cualitativa, los cambios que se prevean en estas inter-dependencias. En cuanto a la valoración cuantitativa de estos cambios, hay que depender de un criterio subjetivo y es de suponer que, con suficiente experiencia, la exactitud de estos valores estimados sea la misma que la que actualmente se logra a niveles de la baja troposfera.

Una vez que se ha hecho la predicción de tropopausa, se construye el campo asociado de gradiente vertical medio de viento usando la continuidad del movimiento y de la correlación actual de los centros de acción de este campo con respecto a los campos correspondientes en el nivel de los 300 mb.

Temperatura.

Se indica la temperatura media de las isohipsas de la tropopausa, a menos que varíe en más de 5º, en cuyo caso la variación se expresará por medio de uno o varios valores de temperaturas en puntos críticos a lo largo de estas isohipsas. La predicción se basa principalmente en la continuidad de la relación observada entre temperatura y tropopausa.

El gradiente de temperatura estratosférica se predice en términos de valores de temperaturas en una serie de puntos a los 150 mb., derivados del gradiente medio de temperatura estratosférica, teniendo en cuenta la conservación en tiempo y en espacio de la interrelación actual de las diferentes características del campo con la situación sinóptica de la tropopausa.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Las mismas consideraciones se hacen con respecto a la predicción de los elementos representados en la carta de tropopausa/gradiente vertical de viento.

Tenemos, pues, representados todos los elementos previstos necesarios, desde el punto de vista aeronáutico en la capa 300-150 mb., en sólo dos mapas:

El mapa previsto de 300 mb. es de tipo convencional y comprende el campo de vientos con isohipsas, isotacas y temperaturas en puntos importantes. En cuanto al mapa previsto de tropopausa y gradiente vertical de viento, comprende los siguientes elementos:

Configuración de la tropopausa cada 50 mb.; las temperaturas medias de la tropopausa para las intersecciones con las superficies de 350, 300, 250, 200 y 150 mb.; el gradiente vertical medio de viento en Kts./1.000 pies; temperatura en una serie de puntos a 150 mb.

Uso operacional de estos mapas.

Puesto que la configuración de las isohipsas a los 200 mb. se asemeja en un alto grado al campo de 300 mb., la desviación de la ruta de tiempo mínimo entre dos puntos calculada en una u otra carta, es muy pequeña y, en general, despreciable. Por consiguiente, la ruta de tiempo mínimo para cualquier nivel entre 300 y 200 milibares puede calcularse en la carta de 300 mb.

En la práctica, pues, todo se reduce al cálculo de la ruta de tiempo mínimo a 300 mb. y luego se determinan los vientos y temperaturas a los diferentes niveles a lo largo de la ruta seleccionada por medio de carta de tropopausa/gradiente vertical de viento, a saber:

Determinación de viento.

Para el espacio aéreo en la troposfera por encima de los 300 mb., el viento a cualquier nivel se determina por una simple adición aritmética del viento a 300 mb. y el gradiente vertical del viento en el punto en cuestión.

Para el espacio aéreo en la estratosfera por encima de los 300 milibares, el viento a cualquier nivel se obtiene por sustracción aritmética del viento a 300 mb. y el gradiente vertical de viento en el punto en cuestión.

Para cualquier punto en la estratosfera a 150 mb. o inferior, y debajo del cual los 300 mb. están en la troposfera, el viento se obtendrá también a partir del viento a 300 mb. sumando el gradiente vertical del viento hasta la tropopausa, restándolo desde la tropopausa hasta el punto en cuestión (fig. 3).

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

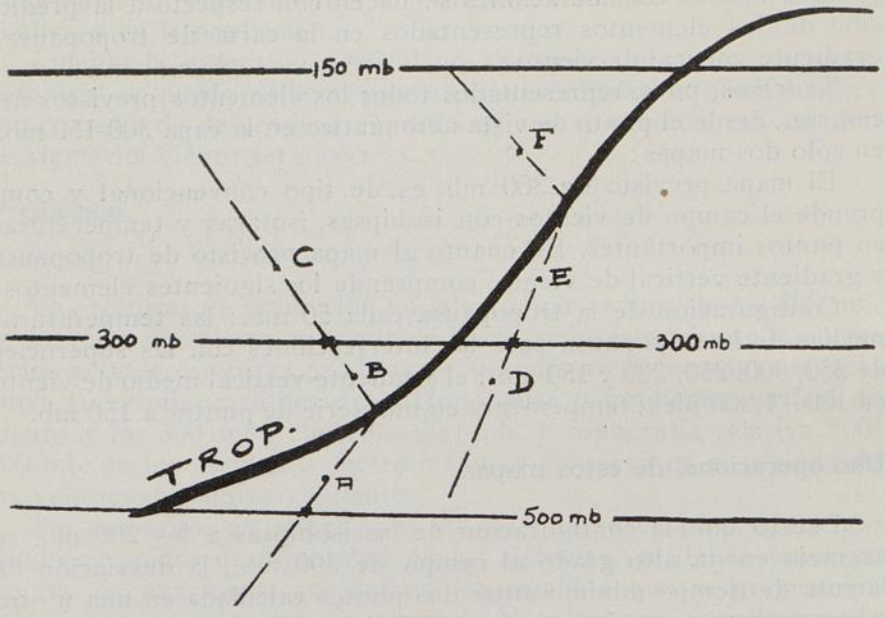


Fig. 3.

Determinación de temperaturas.

En la troposfera, interpolar entre la temperatura entre 300 mb. y la tropopausa para cualquier nivel intermedio.

En la estratosfera, interpolar entre la temperatura de la tropopausa y 150 mb. para cualquier nivel intermedio.

Método irlándes.

En este método se hacen nuevas suposiciones al objeto de simplificar más el modelo usado, lo que trae como consecuencia facilitar todos los procesos del análisis y predicción.

En primer lugar, se admite que el gradiente vertical de temperatura en la troposfera por encima de los 300 mb. es constante con respecto al tiempo y al espacio, y de un valor de —2,5º C./1.000 pies.

Por otra parte, suponemos que todos los posibles gradientes estratosféricos quedan reducidos a tres valores: 0,5º C./1.000 pies, 0,0º C./1.000 pies y —0,5º C./1.000 pies, con lo que hemos reducido todos los posibles perfiles de temperatura a uno de los tres tipos del gráfico primero de la figura 4, que designaremos, respectivamente, por tipo A, B y C.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

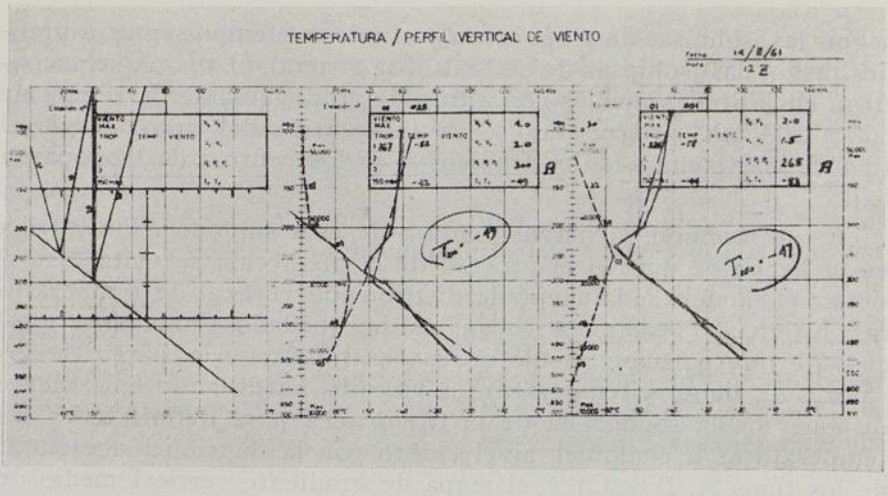


Fig. 4.

Todo lo dicho para el ajuste de los perfiles reales de la temperatura estratosférica se aplicará en este caso, sólo que aquí se usará un transparente en el que están grabados los tres perfiles ideales o tipos A, B y C y que ahora hay que prestar gran atención al hecho de que el perfil real y el tipo que escojamos para representarlo coincidan en los 300 y 150 mb. Se llevará el transparente sobre el perfil real y se buscará el tipo que mejor ajuste a él, y que al mismo tiempo nos dé una altura de la tropopausa próxima al nivel del viento máximo.

Se encuentra en la práctica que los errores introducidos con esta simplificación no son, en general, importantes: El gradiente de temperatura estratosférica es siempre muy similar a uno de los tres seleccionados y análogamente el gradiente troposférico por encima de los 500 mb. se desvía, en general, muy poco del valor —2,5º C./1.000 pies, excepto en zonas de inestabilidad con formación de cúmulonimbos.

Esto implica que el campo vertical de temperaturas, incluyendo temperaturas de la tropopausa, queda definitivamente determinado a partir del campo de temperaturas a 300 mb., complementado con una indicación de la distribución espacial de los tipos A, B y C (nótese que esta distribución espacial de los tipos A, B y C sustituye al campo de temperaturas estratosféricas en el método anterior).

Al delinear las regiones en donde se producen los diferentes tipos de gradientes estratosféricos en áreas de pocos datos, hay que tener en cuenta que los límites de las diferentes áreas deben

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

seguir las isohipsas de tropopausa y al mismo tiempo seguir a grandes rasgos las isohipsas de 300 mb. En general, el tipo A se encontrará en latitudes medias con altura de tropopausa en la región de 300 a 200 mb., progresando a través de áreas del tipo B hacia el tipo C, más común en los trópicos y en los centros de tropopausa baja.

En mi opinión, la mayor ventaja de esta simplificación estriba en el hecho de que en el proceso de la predicción se evita distorsionar el modelo o la aceptada distribución vertical de temperaturas. En efecto, insistamos en que así ha quedado eliminado el proceso de interpolación y sólo se usa extrapolación a partir de los valores de viento y temperatura a 300 mb., necesitando únicamente disponer de la topografía de la tropopausa para definir todas las temperaturas a cualquiel nivel (junto con la distribución espacial de los tipos A, B y C) y el mapa de gradiente vertical medio de viento para que queden definidas todas las velocidades de viento a cualquier capa. Esto nos garantiza que una cuidadosa predicción al nivel de los 300 mb. y de la tropopausa, que guarde la debida correlación entre sí, nos conducirá a distribuciones verticales de viento y temperatura que no estén en discrepancia con las que se pretende representar. No hay posibilidad de errores de correlación vertical y esto debería ser suficiente para justificar la introducción de los errores intrínsecos a la simplificación introducida con los tipos A, B y C. Los errores quedan así limitados a lo que pudiéramos llamar «errores controlados», aparte, claro está, de los errores propios de toda predicción en el sentido de que los sistemas no se desplacen o modifiquen su intensidad exactamente como se ha previsto.

Nótese que esta ventaja no se tiene por el método anterior (método americano), que exige interpolación de temperaturas en sentido vertical desde la tropopausa hacia arriba y hacia abajo, para lo que necesitábamos analizar y predecir el campo de temperaturas a tres niveles diferentes. Al hacer la predicción, por muy meticulosamente que se realice el desplazamiento de isotermas en sentido horizontal para tratar de mantener la posición relativa entre ellas a tres niveles diferentes, no puede evitarse que, al no desplazarse «en bloque» toda la capa aérea en estudio, se produzcan discrepancias involuntarias al contemplar el perfil de temperaturas provisto para un punto determinado.

Quede claro que esto no dará rigidez al método, ya que el meteorólogo puede siempre, de una forma voluntaria, cambiar el perfil previsto de temperatura sin más que modificar o cambiar convenientemente las áreas de los tipos A, B y C, siempre que tenga

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

razones para ello. Por ejemplo, en el análisis puede aparecer el área ocupada por una depresión en formación como de tipo A, mientras que en la predicción puede indicarse un cambio de gradiente estratosférico como consecuencia de la profundización de esa depresión, definiendo el área correspondiente en el mapa previsto como de tipo B o C.

Resumiendo expongamos para finalizar los diferentes pasos del proceso de análisis y predicción de la capa 300/150 mb. por este método:

Análisis.

1.º Analizar los perfiles de vientos y temperaturas de las estaciones mencionadas por medio del transparente en el que vienen grabados los tres tipos A, B y C, así como una escalita para medida de los gradientes verticales de vientos. En el caso de que no sea posible hacer coincidir la temperatura a 300 ó 150 mb. con la línea del perfil ideal, anotar al margen la temperatura «ajustada» a cualquiera de estos dos niveles, que deberá ser usada al transcribir los datos en el mapa, en vez de la temperatura cifrada en el sondeo. Véanse los sondeos que se acompañan. (figs. 4, 5, 6 y 7).

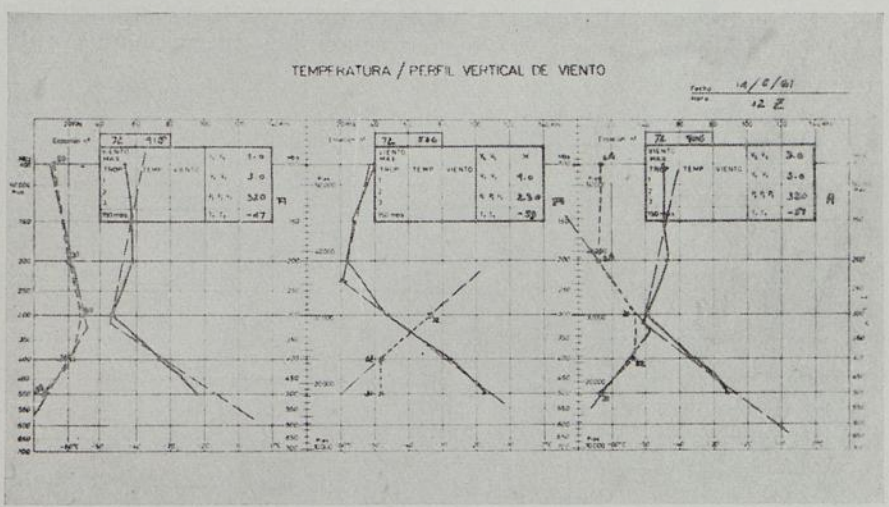


Fig. 5.

2.º Transcribir los resultados del análisis en el mapa, con arreglo a la siguiente disposición:

$$T_{150}\ T_{150}\ V_s\ V_s$$
$$T_T\ T_T\ P_T\ P_T\ P_T\ (X)$$
$$V_T\ V_T$$

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

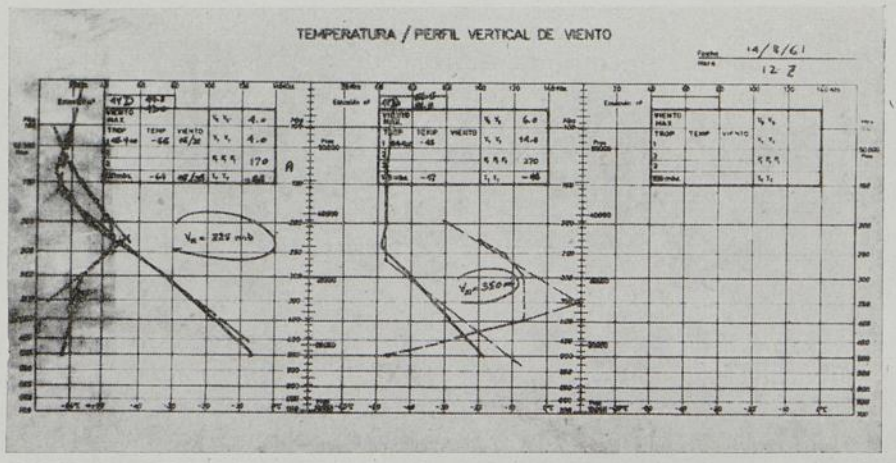


Fig. 6.

3.º Trazar las isohipsas en el mapa de 300 mb.

4.º Trazar las isohipsas de topografía en asociación con las de 300 mb., manteniendo la misma dirección, siempre que sea posible. La separación de isohipsas se determinará a partir de los valores del gradiente vertical *medio* de velocidad de viento en cada punto, así como teniendo en cuenta las correlaciones mencionadas anteriormente.

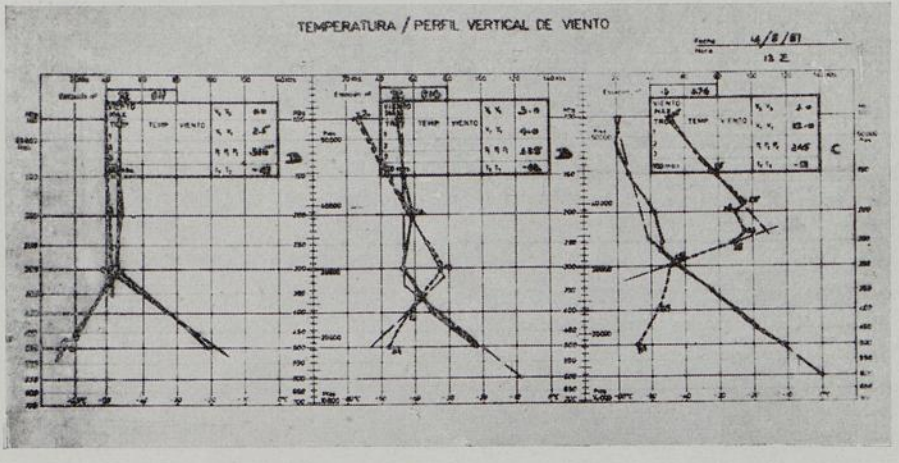


Fig. 7.

5.º Delinear las áreas donde se producen los diferentes tipos A, B y C.

6.º Campo de temperatura a 300 mb. Trazar la isohipsa de

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

la topografía a 300 mb. sobre este mapa, al objeto de delinear las zonas de esta superficie isobárica que están en la troposfera y en la estratosfera. Trazar las isotermas a lo largo de las isohipsas, siempre que esto sea posible, y observar que las isotermas deben acusar un punto de inflexión al atravesar la tropopausa, que puede ser tanto hacia el aire cálido como hacia el aire frío, aunque el primer caso es lo más frecuente, y la inflexión, mucho más pronunciada (ver formas típicas de las isotermas al atravesar la tropopausa en las figuras 8, 9 y 10).

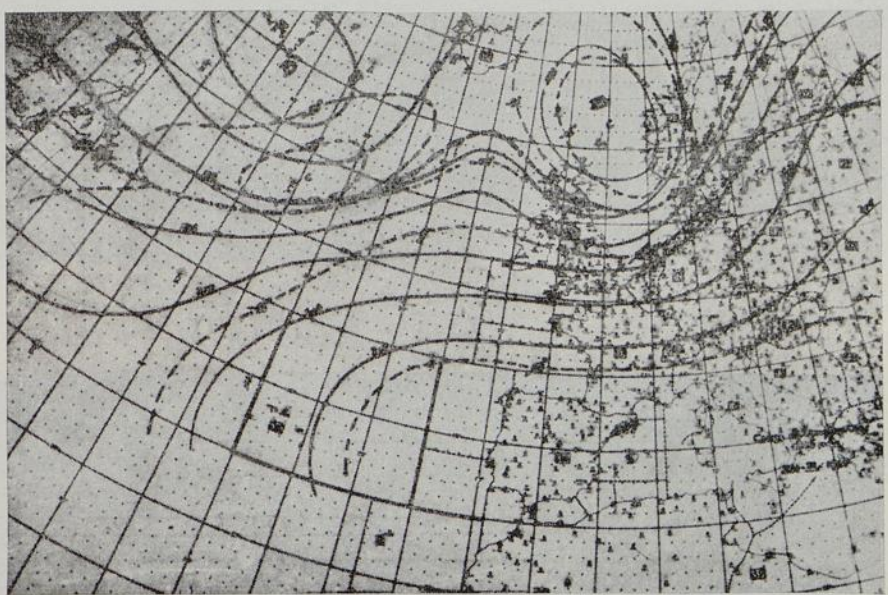


Fig. 8.

En aquellos puntos donde haya sido necesario «ajustar» el valor de la temperatura a 300 mb., este valor «ajustado» es el que debe utilizarse en el trazado, teniendo en cuenta esta diferencia al considerar los valores de las temperaturas en las estaciones vecinas no seleccionadas. En cualquier caso los datos de las estaciones no analizadas deberán ser tomados con precaución.

7.° Trazar el campo de gradiente vertical medio de velocidad de viento a partir de los valores actuales y del gradiente de tropopausa.

Obtenemos así los dos mapas de las figuras 11 y 12.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

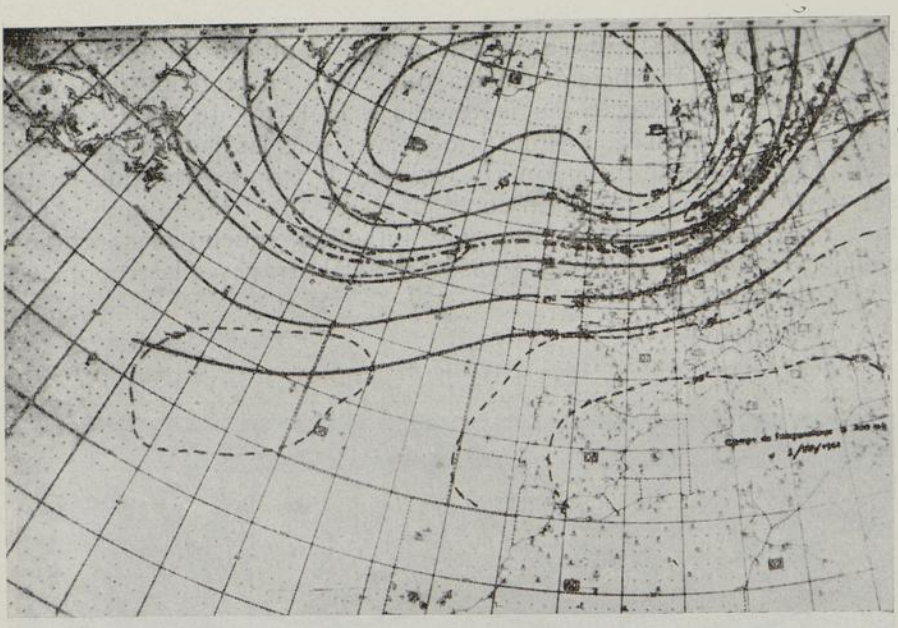


Fig. 9.

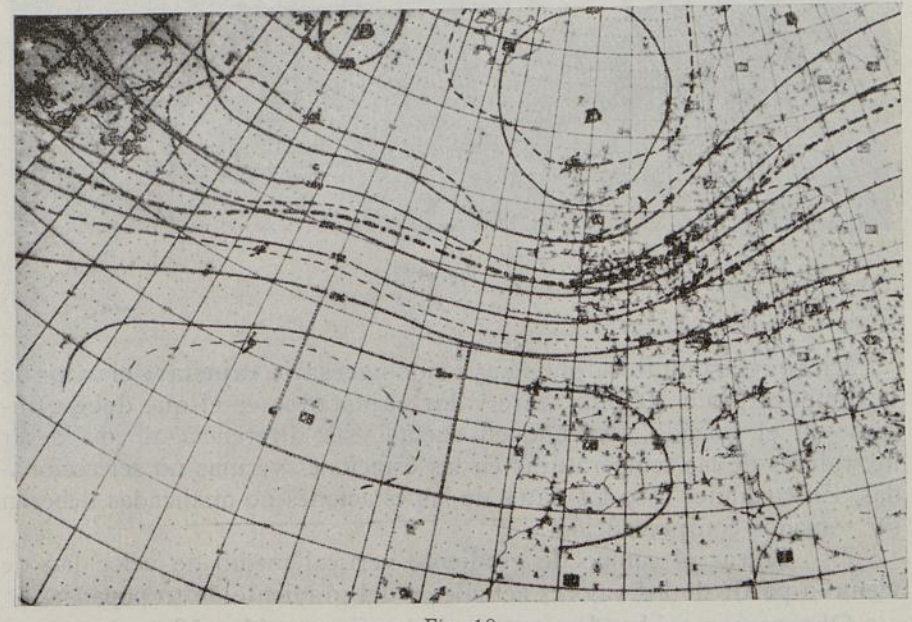


Fig. 10.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

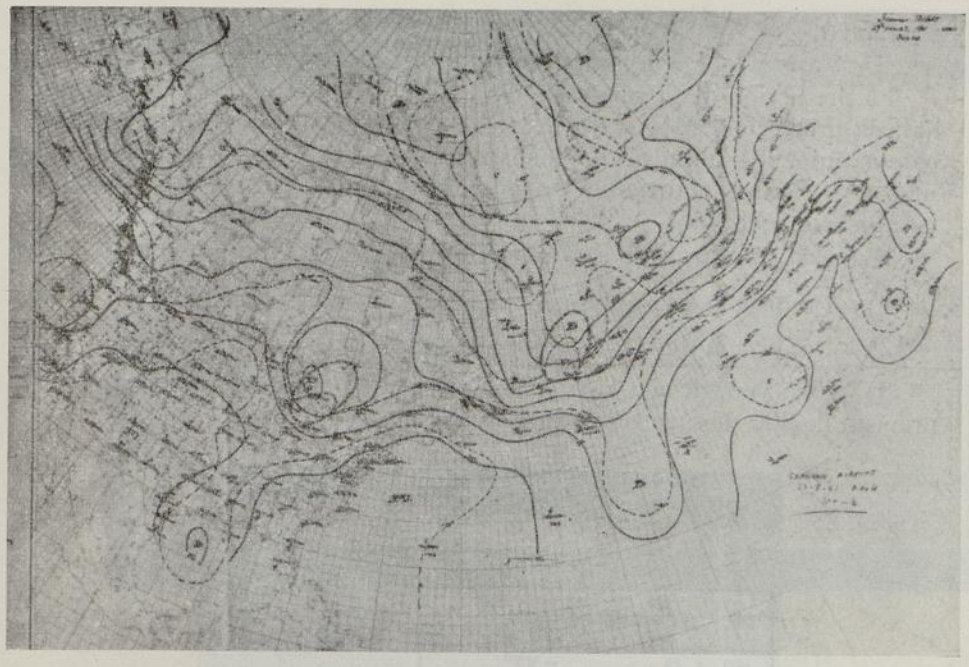


Fig. 11.



Fig. 12.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Predicción.

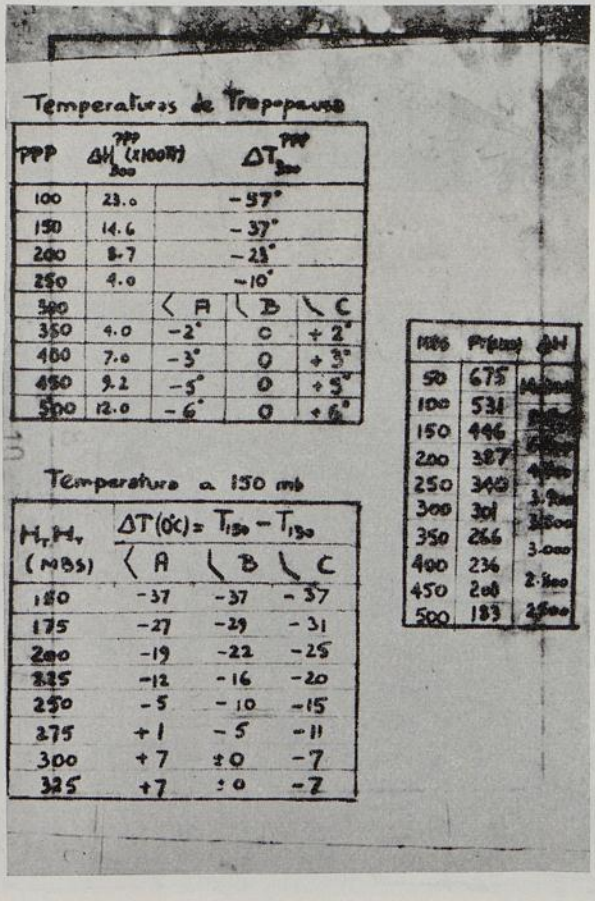
La predicción de la superficie de los 300 mbs. se toma como base de toda la predicción. Mientras que no se disponga de más experiencia en este campo, se supondrá que las isohipsas de tropopausa y las isotermas a 300 mbs. mantienen su posición relativa con respecto a las isohipsas de 300 mbs.

El orden en el trazado será el siguiente:

1) Predicción de isohipsas de 300 mbs. y trazado de isotacas.

2) Predicción de las isohipsas de topografía.

3) Una vez trazada la isohipsa prevista de 300 mbs. sobre la carta prevista de 300 mbs. se trazarán las isotermas sobre esta carta.



Temperaturas de Tropopausa

PPP	ΔH^{PPP}_{300} (x100m)	ΔT^{PPP}_{300}		
100	23.0	-57°		
150	14.6	-37°		
200	8.7	-23°		
250	4.0	-10°		
300		< A	\ B	\ C
350	4.0	-2°	0	+2°
400	7.0	-3°	0	+3°
450	9.2	-5°	0	+5°
500	12.0	-6°	0	+6°

Temperatura a 150 mb

H_1H_2 (MBS)	$\Delta T(^0C) = T_{150} - T_{130}$ < A	\ B	\ C
150	-37	-37	-37
175	-27	-29	-31
200	-19	-22	-25
225	-12	-16	-20
250	-5	-10	-15
275	+1	-5	-11
300	+7	±0	-7
325	+7	±0	-7

mbs	P(pies)	ΔH
50	675	
100	531	
150	446	
200	387	
250	340	
300	301	
350	266	
400	236	
450	208	
500	183	

Fig. 13.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

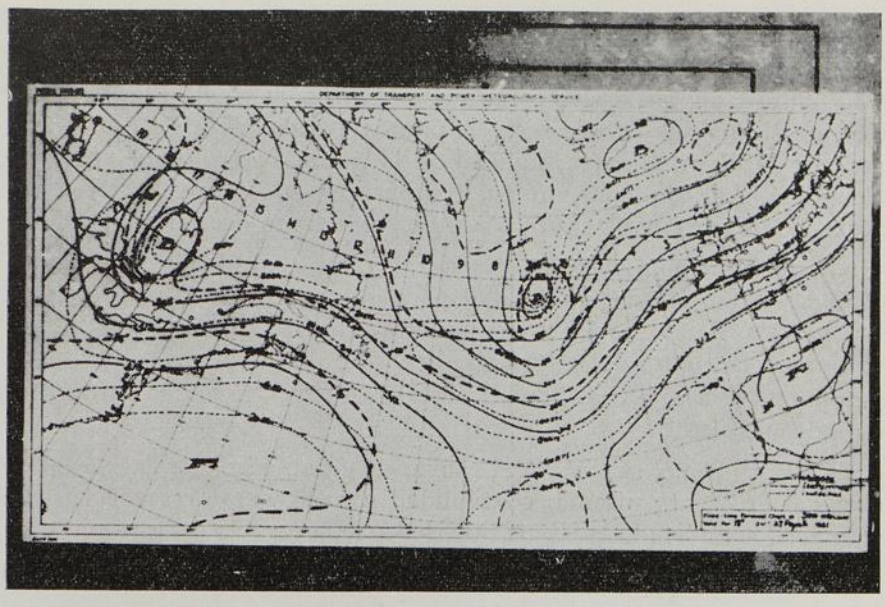


Fig. 14.

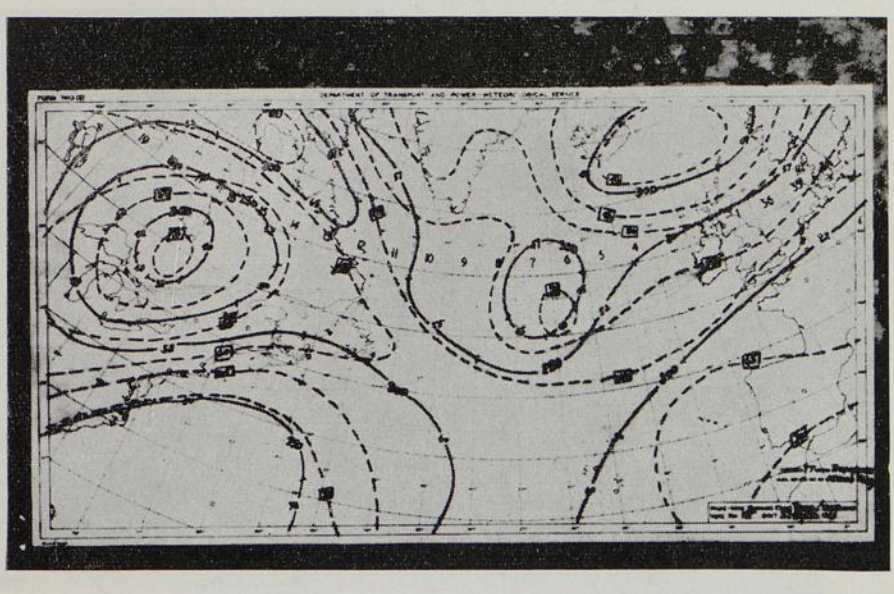


Fig. 15.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

4) Delinear las áreas previstas de los diferentes tipos A, B y C.

5) Superponer la predicción de tropopausa sobre la predicción de 300 mbs. y anotar las temperaturas de la tropopausa a lo largo de las diferentes isohipsas, en una serie de puntos, para facilitar lo cual puede usarse la tabla de la parte superior de la figura 13 en la que ya están calculadas las diferencias entre la temperatura a 300 mbs. y la temperatura de la tropopausa para los diferentes tipos de perfiles.

6) Igualmente superpuestas estas dos cartas, calcular la temperatura a 150 mbs. con suficiente densidad para que sea fácil trazar isotermas de 5 grados. Análogamente nos ayudaremos de la tabla de la parte inferior de la figura 13, en la que han sido calculadas las diferencias de temperatura entre 300 mbs. y 150 milibares para los diferentes tipos de perfiles.

7) Por último, se trazará el campo de grandiente vertical medio de velocidad de viento, usando continuidad con el campo correspondiente del análisis y midiendo la separación de las isohipsas de tropopausa.

Obtenemos así los mapas de las figuras 14 y 15.



© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

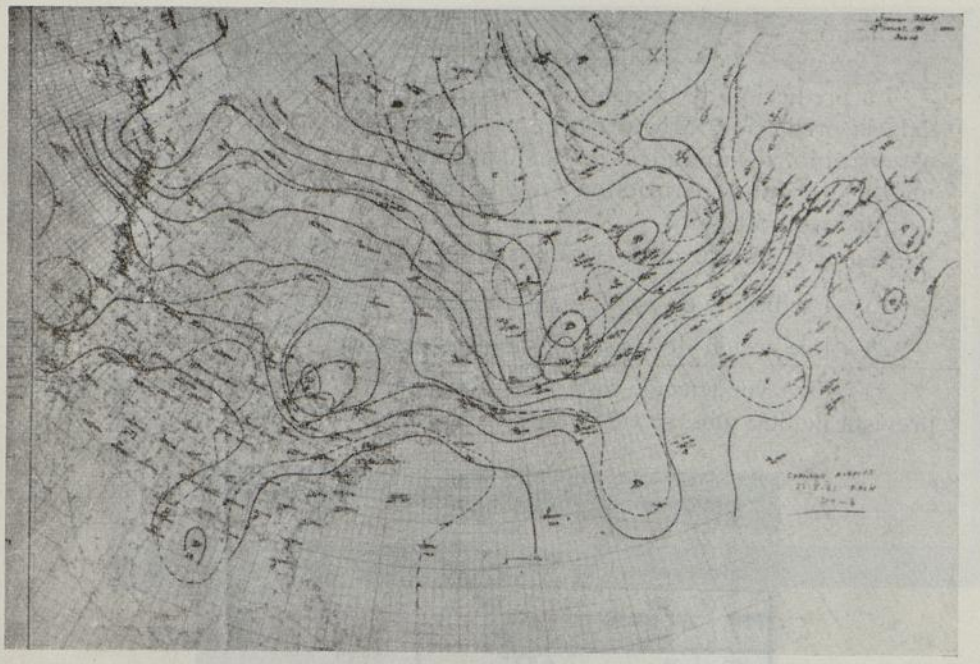


Fig. 11.

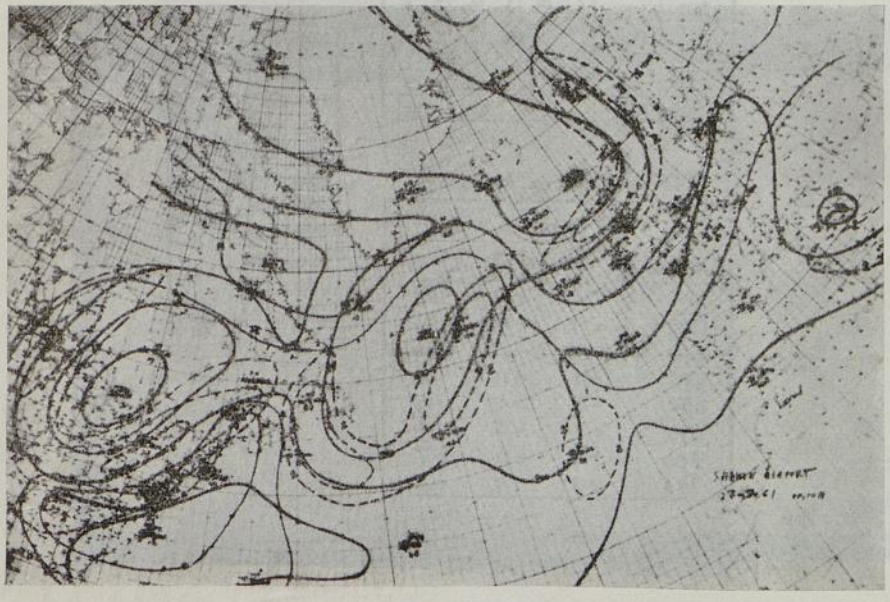


Fig. 12.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Predicción.

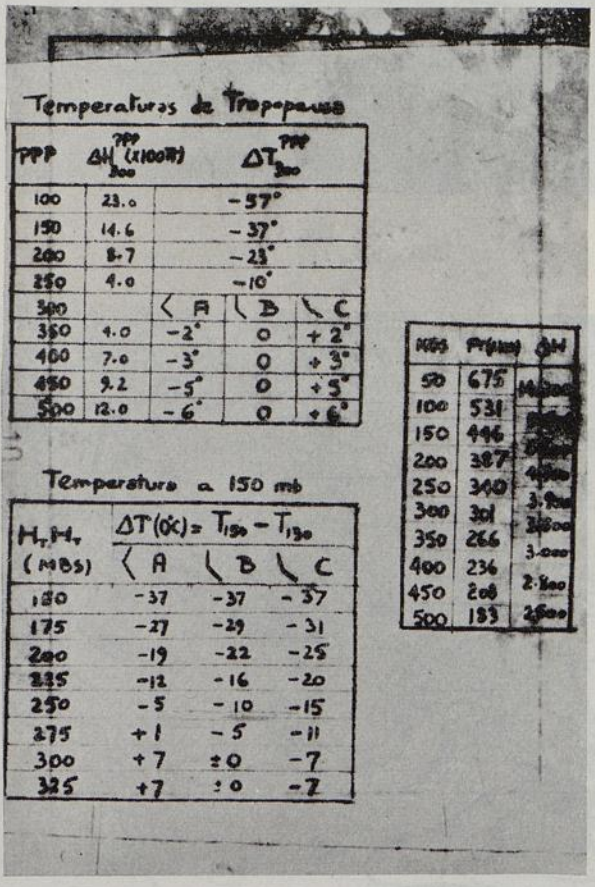
La predicción de la superficie de los 300 mbs. se toma como base de toda la predicción. Mientras que no se disponga de más experiencia en este campo, se supondrá que las isohipsas de tropopausa y las isotermas a 300 mbs. mantienen su posición relativa con respecto a las isohipsas de 300 mbs.

El orden en el trazado será el siguiente:

1) Predicción de isohipsas de 300 mbs. y trazado de isotacas.

2) Predicción de las isohipsas de topografía.

3) Una vez trazada la isohipsa prevista de 300 mbs. sobre la carta prevista de 300 mbs. se trazarán las isotermas sobre esta carta.



Temperaturas de Tropopausa

PPP	ΔH^{PPP}_{300} (x100m)	ΔT^{PPP}_{300}		
100	23.0	-57°		
150	14.6	-37°		
200	8.7	-23°		
250	4.0	-10°		
300		< A	< B	< C
350	4.0	-2°	0	+2°
400	7.0	-3°	0	+3°
450	9.2	-5°	0	+5°
500	12.0	-6°	0	+6°

Temperatura a 150 mb

$H_T H_{150}$ (MBS)	$\Delta T(^0K) = T_{150} - T_{130}$		
	< A	< B	< C
180	-37	-37	-37
175	-27	-29	-31
200	-19	-22	-25
225	-12	-16	-20
250	-5	-10	-15
275	+1	-5	-11
300	+7	±0	-7
325	+7	±0	-7

MBS	Press	ΔH
50	675	
100	531	
150	446	
200	387	
250	340	
300	301	
350	266	
400	236	
450	208	
500	183	

Fig. 13.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

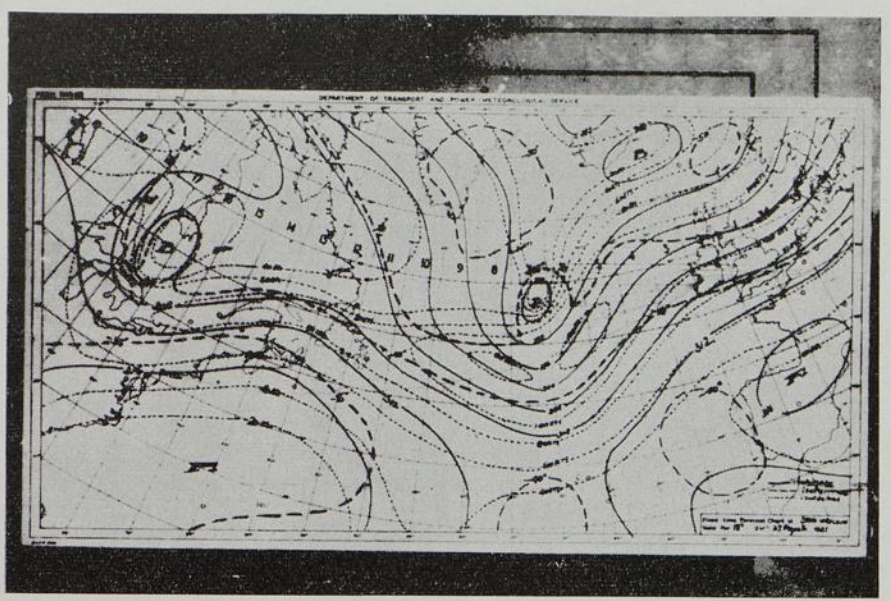


Fig. 14.

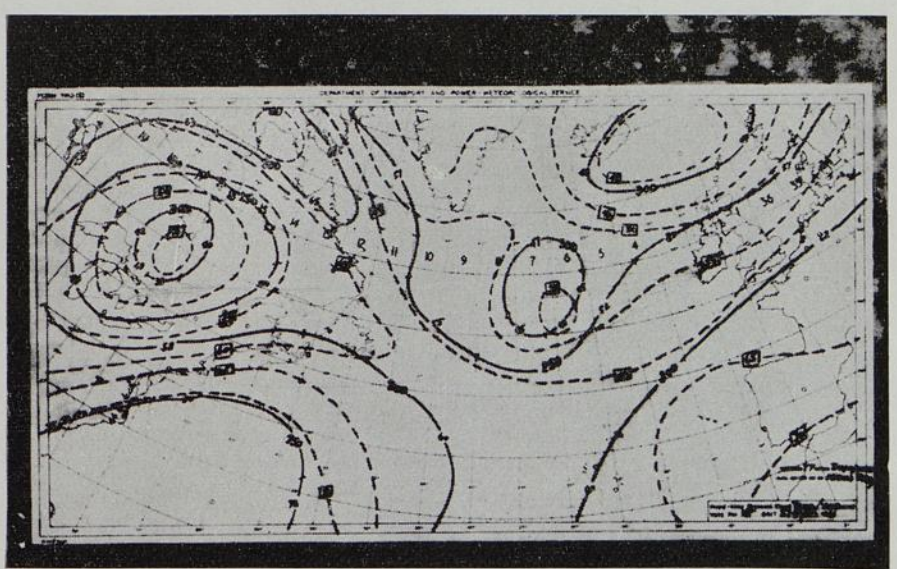


Fig. 15.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

4) Delinear las áreas previstas de los diferentes tipos A, B y C.

5) Superponer la predicción de tropopausa sobre la predicción de 300 mbs. y anotar las temperaturas de la tropopausa a lo largo de las diferentes isohipsas, en una serie de puntos, para facilitar lo cual puede usarse la tabla de la parte superior de la figura 13 en la que ya están calculadas las diferencias entre la temperatura a 300 mbs. y la temperatura de la tropopausa para los diferentes tipos de perfiles.

6) Igualmente superpuestas estas dos cartas, calcular la temperatura a 150 mbs. con suficiente densidad para que sea fácil trazar isotermas de 5 grados. Análogamente nos ayudaremos de la tabla de la parte inferior de la figura 13, en la que han sido calculadas las diferencias de temperatura entre 300 mbs. y 150 milibares para los diferentes tipos de perfiles.

7) Por último, se trazará el campo de grandiente vertical medio de velocidad de viento, usando continuidad con el campo correspondiente del análisis y midiendo la separación de las isohipsas de tropopausa.

Obtenemos así los mapas de las figuras 14 y 15.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

VIII

EL PAPEL DEL AIR WEATHER SERVICE EN LAS INVESTIGACIONES ESPACIALES

Conferencia pronunciada en Madrid el día 19 de junio de 1962

por

NORMAN L. PETERSON

Brigadier General USAF

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

EL PAPEL DEL AIR WEATHER SERVICE EN LAS INVESTIGACIONES ESPACIALES

INTRODUCCION

Sólo voy a tratar hoy de una de las muchas misiones del "Air Weather Service" (Servicio Meteorológico Aeronáutico). Consiste dicha misión en suministrar ayuda especial en Astrofísica y Geofísica a las operaciones aero-espaciales.

Sin duda, todos ustedes se dan cuenta de que el soporte ambiental de las operaciones aero-espaciales no está limitado a parámetros totalmente nuevos y exóticos, sino que comprende el apoyo del tiempo convencional, tal y como está siendo previsto actualmente para las operaciones militares.

Por ejemplo, durante las fases de preparación, pre-lanzamiento, lanzamiento y recogida en el vuelo del coronel John Glenn, las condiciones de tiempo y cielo, visibilidad, vientos y temperaturas fueron pronosticadas con gran exactitud.

Fué necesario hacer predicciones exactas para el área de lanzamiento, entre otros fines para conocer las condiciones óptimas para el seguimiento visual. También para la operación de recogida eran deseables óptimas condiciones atmosféricas para el aterrizaje en tres lugares posibles. Las predicciones fueron controladas por medio de observación continua no sólo a través de observaoiones de superficie de tipo sinóptico corriente, sino también por medio del satélite meteorológico Tiros IV y por reconocimiento aéreo. Ambos suministraron valiosos datos para la predicción en el área de recogida.

Nota de Redacción. — La conferencia del Brig. Gen. Norman L. Peterson, en el Instituto de Meteorología, se realizó aprovechando la coyuntura de su paso por Madrid; ello indica que no se había programado previamente y que no fue factible el quedarnos con las diapositivas que se proyectaron. Así, pues, el lector notará que se hace referencia en el texto a gráficos que, lamentándolo mucho, no es posible incluir ahora en esta adaptación.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Los aviones de reconocimiento meteorológico volaron un total de doscientas seis horas en el mes de febrero en las áreas de recogida, y esto sólo en apoyo del proyecto Mercurio. El día anterior y el mismo día del vuelo de Glenn, el 20 de febrero de 1962, se efectuaron intensas operaciones.

Incidentalmente fueron empleados en esta operación aviones de tipo convencional W-50. Como parte del programa de modernización del "AWS", estamos en vías de convertir en reactores los aviones de reconocimiento. Con los aviones de reacción podremos realizar un servicio de reconocimiento mucho más rápido y mejor, de acuerdo con las exigencias de las operaciones espaciales.

IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACION DE AMPLIO ALCANCE DEL "AWS"

En nuestra exhaustiva planificación para facilitar el mejor apoyo posible a futuras operaciones, ponemos de relieve los siguientes puntos interesantes:

1.—Mejora de los procedimientos internos, equipo, técnicas y entrenamiento para facilitar una más efectiva colaboración de la oficina de estudios del contorno aeroespacial en apoyo de las USAF, USA y de los mandos unificados.

2.—Fluidificación de la estructura administrativa y de los procedimientos empleados en la preparación de nuevas ayudas ambientales aeroespaciales requeridas durante las fases operativas de los nuevos sistemas y armas de defensa.

3.—Mantenimiento de flexibilidad funcional en un área de rápida variación de las estructuras de las fuerzas militares y de cambios revolucionarios en los sistemas de mando y control.

4.—Evolución de la capacidad para proporcionar, en la medida necesaria, conocimientos acerca del amplio contorno aeroespacial en apoyo de las operaciones y de la planificación militar en la "era del espacio".

Algunas necesidades actuales de ayuda meteorológica en la "era espacial":

Las necesidades preliminares de ayuda meteorológica en la era espacial han sido ya determinadas y están siendo puestas en práctica. Actualmente, el AWS está suministrando una activa ayuda especializada a las actividades en el campo de los cohetes. Presentaré brevemente un ejemplo de ayuda mesometeorológica especializada en dichos campos, durante el pre-lanzamiento, en el lanzamiento y en las fases iniciales del vuelo de los cohetes.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Sin embargo, previamente desearía hacer constar que esta ayuda meteorológica especializada se extiende a las operaciones de los centros de ensayo de vuelos y a los de investigación y desarrollo. Este último está provisto de un cuerpo especial de meteorólogos que reconocen, identifican y acopian conocimientos meteorológicos para su empleo en sistemas (sean de mando y control, armamento, reconocimiento o apoyo) antes de que el sistema sea operacional. Debemos ocuparnos también de un sistema completo de reconocimiento para el máximo apoyo al mecanismo militar de resolución.

La fuente proveedora de material para una gran parte de este apoyo, especialmente en las fases de diseño y operacional de sistemas de armamento, es obtenida de nuestro Centro Climatológico de Wáshington, DC, donde nos hemos especializado en el diseño de aplicaciones meteorológicas a la ingeniería. Proseguiré mi ejemplo de un tipo de ayuda a las operaciones en el campo de los cohetes con dos breves casos de apoyo climatológico aplicado.

Ejemplo corriente de apoyo en la era espacial (campo de los cohetes):

Durante varios años el apoyo total meteorológico en el campo de los cohetes ha sido una de las misiones más importantes de las asignadas al AWS. Un requisito previo obligatorio es el conocimiento exacto de la estructura de la atmósfera y sus efectos con el fin de obtener estadísticas más precisas para la construcción de motores para operaciones con cohetes.

Ejemplo corriente de ayuda en la era espacial (campo de los cohetes):

PROBLEMAS:

En Patrick y Vandenberg resultó evidente que un problema apremiante era el de medir las variaciones en pequeña escala de la atmósfera y presentarlas con suficiente detalle para predecirlas. Considérese el efecto que las variaciones de la brisa marina tienen sobre el índice de refracción; esta información es necesitada por los precisos instrumentos de seguimiento en los primeros segundos después del lanzamiento. O considérese el efecto que las móviles estelas de niebla pueden tener sobre la cubierta de la cámara.

Las causas de otros problemas a pequeña escala son originadas por el uso de materiales propulsores almacenables. Los efectos del viento y de la temperatura sobre los derrames (spills) de fuel, más la traslación y difusión de la nube efluente, sólo pueden ser calculados por métodos a escala normal. Los productos de la combustión de un cohete averiado

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

o de la voluntaria destrucción de uno errante son transportados hacia las capas inferiores y diluídos en la atmósfera. La magnitud exacta de este efecto debe ser calculada antes de una operación con el fin de adoptar las adecuadas medidas de seguridad. Esto sólo puede hacerse por medio del uso inteligente de información a gran escala.

UN EJEMPLO CORRIENTE DE AYUDA EN LA ERA ESPACIAL *(Los cohetes):*

Pruebas:

Con el Mando Aéreo Estratégico, el AWS, realizó una serie de ensayos controlados en la Base de Vandenberg, con objeto de mejorar las técnicas a base de controlar los movimientos de las bajas capas atmosféricas. La prueba se realizó a base de usar columnas de humo y generadores con objeto de conocer la verdadera dirección del viento. Fotografías de estas estelas de humo fueron hechas desde varios ángulos, a fin de mostrar claramente los efectos tanto en la horizontal como en la vertical. Al mismo tiempo que se encendieron los generadores de humo se hicieron registros detallados de la velocidad y dirección del viento. Una prueba de esos resultados es la ilustración que se proyecta. Sin una red extensa no se hubiera podido controlar la marcha del viento y la predicción no hubiera sido muy precisa.

Observaciones favorables de viento hechas en la Base de Vandenberg:

Existe una regla que permite calcular el viento en superficie y que es válida para realizar pronósticos, a base de calcular el flujo medio en un área de cien millas cuadradas.

Se concluye, a base de las pruebas hechas con estelas de humo, que para llevar a cabo un lanzamiento es preciso determinar las constantes de difusión en gran escala y diseñar e instalar una red de medidas específicamente propuesta para las características propias de cada una de las dos áreas de lanzamiento—Patrick y Vandenberg.

Ampliación de factores:

Además de las directrices de investigaciones geofísicas y de las aportadas por los técnicos de cohetes, nosotros hemos instalado una red de trabajo permanente con instrumentos meteorológicos adecuados, un calculador especializado y lectores y registradores apropiados. Así vamos prestando ayuda, según lo van requiriendo las circunstancias. Al mismo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tiempo vamos adquiriendo capacidad operacional para acometer todos los problemas atmosféricos a distintas escalas.

Ejemplo de ayuda del Centro Climatológico del AWS:

Creo conveniente exponer ahora dos ejemplos muy breves de ayuda climatológica a las operaciones espaciales, tal y como lo había anticipado.

En primer lugar suministrábamos únicamente datos resumidos de nubosidad y temperatura para su uso en los estudios de proyectos para la construcción del subsistema de registro horizontal de los satélites Agena. Esta información era también usada en la resolución de muchos problemas de detección de cohetes y de otros de estabilización de satélites y concernía a la absorción de la radiación infrarroja por las nubes, vapor de agua y precipitación.

El segundo ejemplo consiste en la recopilación de los datos de densidad para todas las alturas hasta 80 kilómetros (aproximadamente 260.000 pies).

Hemos podido comprobar la importancia que las variaciones de la densidad de la atmósfera tiene en la ascensión de los cohetes, en la determinación de la trayectoria orbital y en la reentrada de los mismos. Se ha utilizado información de este tipo por los ingenieros para proyectar el diseño más adecuado en el manejo de varios de los elementos componentes de los cohetes, tales como los de reentrada de la cabeza del cohete.

Ultimamente este análisis se ha extendido hasta una altura de 400.000 pies para la región de Cabo Cañaveral. Se prosigue el trabajo y están siendo estudiados los datos para todas las alturas de la atmósfera (incluyendo las densidades), determinados gracias a la información facilitada por los satélites.

He presentado solamente dos ejemplos. Nuestros científicos están examinando los efectos de todos los posibles parámetros espaciales con el fin de determinar la mejor y más detallada distribución que pueda ser útil en el estudio de los problemas aeroespaciales.

Algunas de las futuras necesidades climatólogicas de la era espacial.

A la vista de la medida en que se avanza en la era espacial podemos prever ya futuras necesidades. La primera y más evidente es el anormal desarrollo de las ayudas meteorológicas necesarias. Esto se refiere a las informes cantidades de datos periódicos básicos precisos, no ya a escala mundial, sino de vastas áreas del espacio. La adquisición, elaboración y presentación definitiva de los resultados finales exigirá los más avanza-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dos sistemas de comunicaciones y la máxima capacidad, así como procesos electrónicos de datos, todo ello con el mayor grado posible de automatización.

Además, con el aumento creciente del tráfico de vehículos espaciales que abandonan o entran en nuestra atmósfera, se incrementarán nuestras misiones geofísicas y astrofísicas. Los parámetros que afectan a las operaciones están siendo constantemente puestos de manifiesto con los vuelos de los X-15, satélites y cohetes. Algunos de los parámetros citados se necesitan actualmente para las operaciones de los aviones y pasarán a ser corrientes y a integrarse en las ayudas a los vehículos espaciales. No voy a tratar de esta clase de parámetros, sino sólo de los que afectan a las operaciones aeroespaciales.

Señalaremos la creciente importancia de la observación y predicción de ciertos parámetros, cuyo conocimiento y efectos previstos se describen a continuación:

a) *Turbulencia óptica.*—Cuando se intenta obtener fotografías de gran resolución a muy elevadas altitudes, la refracción de la luz, debida a las variaciones del índice de refracción, puede producir efectos de degradación por distorsiones, a causa de la escintilación y del movimiento de la imagen.

b) *Protuberancias solares y chubascos de protones.*—Las protuberancias solares se producen en las proximidades de las manchas solares y, generalmente, con más intensidad durante los períodos en que aquéllas alcanzan un máximo. Las protuberancias emiten electrones, protones y otras partículas. Algunas protuberancias producen interferencias momentáneas en las emisiones de radio que duran desde pocos minutos hasta varias horas, seguidas a veces por tormentas magnéticas que interrumpen las comunicaciones por radio y por hilo durante varios días. Unas pocas de las mayores protuberancias emiten protones de suficiente intensidad como para ofrecer un peligro a los vuelos espaciales tripulados que se realizan por encima de las capas de Van Allen. Se han hecho medidas de la intensidad de las protuberancias solares, con el fin de determinar la protección adecuada para defender a las tripulaciones. Se han hecho otros estudios para el desarrollo de técnicas para la predicción de grandes protuberancias, con el fin de limitar los vuelos espaciales a los períodos seguros.

c) *Ozono.*—La presencia de ozono en la estrastosfera en concentraciones que son tóxicas para la vida humana, creó un problema en el diseño de los vehículos estratosféricos supersónicos. Los proyectistas de estos vehículos deben emplear filtros u otros artificios para destruir el ozono antes de que el aire sea introducido en la cabina presurizada. La absorción de la energía solar en el ultravioleta por el ozono, produce

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

amplias variaciones de la temperatura estratosférica en verano e invierno. Durante los meses de invierno existen fuertes gradientes de temperatura y presión entre las regiones iluminadas y oscuras de cada hemisferio. Esto produce la formación del "jet" polar nocturno con vientos de 150 a 200 nudos a unos 30 kilómetros de altura (ó 100.000 pies). En esas regiones de fuertes vientos, parece que existen cizalladuras que pueden afectar seriamente a las características aerodinámicas de los aviones o cohetes que penetran en la estratosfera.

d) *Plasmas o capas ionizadas.*—Un vehículo que vuelve a penetrar (reentrar) en la atmósfera procedente del espacio, se calienta mucho, y libera así tanta energía, que ioniza la capa de aire circundante al navío. Esta ionización es tan intensa que puede absorber todas las señales de radio. El Coronel Glenn, perdió el contacto por radio con la Tierra, en el intervalo de varios minutos, durante su reentrada. Es de esperar que con frecuencias de radio más adecuadas y con suficiente potencia de transmisión, se podrán mantener las comunicaciones bajo esas condiciones. Se están haciendo estudios en ese sentido.

e) *Meteoritos.*—El espacio que envuelve a la Tierra está continuamente sometido a bombardeo de meteoritos que producen erosión en los vehículos espaciales. Pueden perforar la cubierta del vehículo e incluso, si son de gran tamaño, producir la explosión del mismo. El flujo de meteoritos y su composición, precisa ser conocido todavía mucho más a fondo con vistas a los vuelos espaciales prolongados.

f) *Intensidades de radiación.*—Los vehículos espaciales deben atravesar las capas de radiación de Van Allen cuando abandandonan la Tierra. La radiación de las capas (especialmente de la interna) es suficientemente intensa como para dañar al personal de un vehículo no protegido. Sin embargo, las medidas hechas en las proximidades indican que es perfectamente factible la protección contra la intensidad de la radiación de las capas de Van Allen.

g) *Campo magnético.*—El campo magnético de la Tierra decrece rápidamente con la altura y es despreciable a altitudes por encima de la capa de Van Allen. Los vehículos espaciales adquieren una carga durante sus recorridos orbitales y entonces el campo magnético terrestre tiene una ligera influencia sobre el movimiento del satélite. Con el envío de una corriente eléctrica a través de un conductor arrollado en espiral e incrustado alrededor del satélite, se crea un par entre los campos magnéticos terrestre y del satélite. Este momento puede usarse para orientar al vehículo.

En lo que respecta a los vientos de la alta atmósfera, sabemos que afectan a la posición del recorrido orbital y a la reentrada de los

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

vehículos espaciales. Los vientos por encima de los 30 kilómetros de altitud sólo son vagamente conocidos y, más arriba de los 100 kilómetros, prácticamente desconocidos.

Esfuerzos del AWS.

Para alcanzar nuestros objetivos en la ayuda espacial, los esfuerzos inmediatos del Air Weather Service han sido concentrados en tres áreas:

1.ª Puesto que la conquista del espacio dependerá del grado en que haya sido educado el personal para hacer frente al desafío del espacio, deberá acentuarse la instrucción y desarrollo del entrenamiento de ciencias físicas relacionadas con la Meteorología y el contorno aeroespacial.

2.ª El AWS está modernizándose y automatizando su sistema meteorológico ordinario. El sistema 433 L es una parte de esta modernización y automatización. Estamos convirtiendo en aparatos de tipo más moderno los de la flota de reconocimiento del AWS.

Por último, estamos desarrollando algunos de nuestros programas ordinarios, tales como climatología aplicada, empleo de datos de satélites, programas de valoración nacional y desarrollo y consultas técnicas. Además, investigamos en nuevos temas y medios para suministrar apoyo a futuras operaciones, como ya he indicado.

REALIZACIONES ACTUALES

Enseñanza.

En lo que respecta a los esfuerzos desarrollados en el campo de la enseñanza, esta foto presenta sólo lo que en la enseñanza superior ha sido autorizado para el año fiscal 1963. A esto hay que añadir la parte correspondiente a la enseñanza meteorológica fundamental a doscientos cincuenta oficiales.

Quiero hacer notar que este programa de entrenamiento y enseñanza ha sido una función de continuidad. Hemos ingresado un promedio de trescientos veinticinco oficiales por año, durante los cinco últimos, en centros civiles de enseñanza.

Desde 1958 hemos dirigido a algunos de los graduados al estudio de las ciencias relacionadas con la Física. Actualmente, hemos asignado a veintidós oficiales, titulados con grados de doctor o "master", para el estudio de esas ciencias, diez más serán asignados en agosto de 1962 y 13 más recibirán enseñanza de materias espaciales durante 1963.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Para cumplimentar estas peticiones el Cuartel General de las USAF ha seleccionado los cincuenta oficiales de entre todos los candidatos de las Fuerzas Aéreas. Los trece seleccionados para las especialidades espaciales eran oficiales meteorológicos.

Problemas en curso de resolución.

Ya que el tiempo no lo permite trataré solo brevemente sobre nuestros programas de cálculo, desarrollo y asesoramiento técnico. En cuanto a cálculo y desarrollo se refiere, he seleccionado un ejemplo ilustrativo de cómo hombres y máquinas pueden trabajar unidos en la resolución de problemas demasiado complejos para ser resueltos separadamente por cada uno. La máquina es segura y eficaz, pero "torpe". El ser humano, a pesar de su menor eficacia en la integración de grandes cantidades de datos, es efectivo para encontrar soluciones en áreas abstractas.

Ejemplo-Charleston AFB.

La vasta memoria o capacidad de almacenamiento de los calculadores de uso corriente en la actualidad, permite las integraciones objetivas de muy grandes cantidades de datos. Por ejemplo, en la confección de un pronóstico para veinticuatro horas el calculador parte de los datos actuales y hace veinticuatro predicciones distintas (una cada hora) hasta que llega a la de veinticuatro horas. El personal del AWS ha preparado un programa para extraer, de la memoria de la máquina, estos datos horarios y elaborarlos para cualquier elemento conservativo de cualquier localidad del hemisferio Norte. Al calculador se le pide que construya centenares de imaginarias parcelas de aire en tiempo y espacio tridimensionales, que identifique cuál de ellas está sobre una determinada estación en un tiempo prefijado y que indique los valores de su temperatura, punto de rocío, vorticidad, etc. (Para ilustración sobre esto se mostró una transcripción, obtenida en la forma citada y relativa a las predicciones horarias, de diferencia entre temperatura y rocío en Charleston, a 850 milibares.) Este es solamente uno de los muchos parámetros, para una de entre muchas localidades y para una de las varias alturas que podrían ser seleccionadas.

Las líneas gruesas indican la humedad prevista hora a hora a 850 milibares y significan que el aire relativamente seco que hay sobre Charleston, a 5.000 pies de altura a la hora de observación, se hará más húmedo (se prevé que la diferencia de temperatura antes citada decrecerá continuamente) durante el período de veinticuatro horas. Por tanto, la diferencia entre las temperaturas del termómetro seco y del

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

punto de rocío y la nubosidad están en estrecha correlación, y diferencias superiores a 8° a 850 milibares indican cielos claros; entre 5 y 8°, cielos nubosos; entre 2° y 5°, muy nubosos, y de menos de 2°, cubiertos. Estos intervalos están sombreados en el diagrama. Este ejemplo indica que las condiciones en Charleston empeorarán, esperándose cielos cubiertos a 5.000 pies durante las próximas doce horas, sin mejoría en el período restante. La comprobación, como se indica más abajo, demuestra que fué bastante buena esta predicción.

Esta breve ilustración fué elegida por dos razones. Una, para mostrar cómo hombre y máquina pueden trabajar juntos, y, la otra, para indicar cómo pueden fundirse la dinámica y la estadística para proporcionar predicciones terminales de corto alcance.

PROBLEMAS EN CURSO DE SOLUCION

Programa de asesoramiento técnico del AWS.

Nuestro programa de asesoramiento ha sido modificado con motivo de la centralización y del advenimiento de las operaciones aeroespaciales.

Antiguamente la Meteorología sinóptica se enseñaba en plan empírico. Actualmente estamos dedicando más tiempo a los problemas específicos asociados con sistemas, especialmente de defensa, y operaciones aeroespaciales.

En este aspecto ayudamos a los ingenieros al conocimiento de las variaciones atmosféricas para que puedan interpretarlas en sus proyectos. También avisamos a los planificadores militares de las limitaciones de los sistemas defensivos existentes debidas a las condiciones atmosféricas y nuestras posibilidades y limitaciones para predecir dichas condiciones.

En este aspecto se han realizado trabajos, por ejemplo, para los sistemas defensivos B-58 y B-70, y para el cohete "Atlas".

Zona de reentrada.

Un ejemplo de este tipo de servicio lo constituye la asistencia prestada en un problema de reentrada de vehículos espaciales.

El diagrama que se proyecta muestra que la velocidad de reentrada del vehículo y la densidad-altitud han sido correctamente coordinadas con el fin de asegurar el éxito en el retorno a la Tierra. Los vehículos tripulados que reentran tienen grandes limitaciones debidas a las deceleraciones impuestas (alrededor de 10 G.). Limitaciones estructurales las impone el impacto calorífico que el vehículo debe soportar. El vehículo tiene que navegar por un estrecho pasillo de reentrada entre el peligro de no llegar a la Tierra y volver al espacio en otra órbita o penetrar

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

en la atmósfera con excesiva rapidez y arder o encontrar una carga G. demasiada elevada. (VE es la velocidad de escape desde la Tierra, de unos 36.000 pies por segundo; Vs es la velocidad orbital, de unos 25.000 pies por segundo.)

El pasillo o corredor de reentrada es definido por un conjunto de densidades aceptables. Una de las tareas relacionadas con la reentrada es la de predecir dónde dicho pasillo es una función de la altura.

Resumen.

Resumiendo, he procurado darles brevemente un bosquejo o esquema general de las misiones geofísica y astrofísica del Air Weather Service, de la importancia de nuestro proyecto de largo alcance, de algunas de las actuales y futuras necesidades del apoyo a las operaciones de la era espacial y de unos pocos de nuestros esfuerzos inmediatos para suministrar dicho apoyo. Aunque sólo he citado algunos ejemplos de las ayudas que están siendo suministradas, estamos comprometidos en otros varios programas.

Así como el Air Weather Service fué el pionero de la Meteorología Aeronáutica, en principio al servicio de los aviones convencionales y más tarde al de los reactores de elevadas características, estamos ahora actuando intensamente en la identificación, medida y predicción de los elementos significativos de las operaciones espaciales.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

EL PAPEL DEL AIR WEATHER SERVICE EN LAS INVESTIGACIONES ESPACIALES

INTRODUCCION

Sólo voy a tratar hoy de una de las muchas misiones del "Air Weather Service" (Servicio Meteorológico Aeronáutico). Consiste dicha misión en suministrar ayuda especial en Astrofísica y Geofísica a las operaciones aero-espaciales.

Sin duda, todos ustedes se dan cuenta de que el soporte ambiental de las operaciones aero-espaciales no está limitado a parámetros totalmente nuevos y exóticos, sino que comprende el apoyo del tiempo convencional, tal y como está siendo previsto actualmente para las operaciones militares.

Por ejemplo, durante las fases de preparación, pre-lanzamiento, lanzamiento y recogida en el vuelo del coronel John Glenn, las condiciones de tiempo y cielo, visibilidad, vientos y temperaturas fueron pronosticadas con gran exactitud.

Fué necesario hacer predicciones exactas para el área de lanzamiento, entre otros fines para conocer las condiciones óptimas para el seguimiento visual. También para la operación de recogida eran deseables óptimas condiciones atmosféricas para el aterrizaje en tres lugares posibles. Las predicciones fueron controladas por medio de observación continua no sólo a través de observaoiones de superficie de tipo sinóptico corriente, sino también por medio del satélite meteorológico Tiros IV y por reconocimiento aéreo. Ambos suministraron valiosos datos para la predicción en el área de recogida.

NOTA DE REDACCIÓN. — La conferencia del Brig. Gen. Norman L. Peterson, en el Instituto de Meteorología, se realizó aprovechando la coyuntura de su paso por Madrid; ello indica que no se había programado previamente y que no fue factible el quedarnos con las diapositivas que se proyectaron. Así, pues, el lector notará que se hace referencia en el texto a gráficos que, lamentándolo mucho, no es posible incluir ahora en esta adaptación.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Los aviones de reconocimiento meteorológico volaron un total de doscientas seis horas en el mes de febrero en las áreas de recogida, y esto sólo en apoyo del proyecto Mercurio. El día anterior y el mismo día del vuelo de Glenn, el 20 de febrero de 1962, se efectuaron intensas operaciones.

Incidentalmente fueron empleados en esta operación aviones de tipo convencional W-50. Como parte del programa de modernización del "AWS", estamos en vías de convertir en reactores los aviones de reconocimiento. Con los aviones de reacción podremos realizar un servicio de reconocimiento mucho más rápido y mejor, de acuerdo con las exigencias de las operaciones espaciales.

IMPORTANCIA DE LA PLANIFICACION DE AMPLIO ALCANCE DEL "AWS"

En nuestra exhaustiva planificación para facilitar el mejor apoyo posible a futuras operaciones, ponemos de relieve los siguientes puntos interesantes:

1.—Mejora de los procedimientos internos, equipo, técnicas y entrenamiento para facilitar una más efectiva colaboración de la oficina de estudios del contorno aeroespacial en apoyo de las USAF, USA y de los mandos unificados.

2.—Fluidificación de la estructura administrativa y de los procedimientos empleados en la preparación de nuevas ayudas ambientales aeroespaciales requeridas durante las fases operativas de los nuevos sistemas y armas de defensa.

3.—Mantenimiento de flexibilidad funcional en un área de rápida variación de las estructuras de las fuerzas militares y de cambios revolucionarios en los sistemas de mando y control.

4.—Evolución de la capacidad para proporcionar, en la medida necesaria, conocimientos acerca del amplio contorno aeroespacial en apoyo de las operaciones y de la planificación militar en la "era del espacio".

Algunas necesidades actuales de ayuda meteorológica en la "era espacial":

Las necesidades preliminares de ayuda meteorológica en la era espacial han sido ya determinadas y están siendo puestas en práctica. Actualmente, el AWS está suministrando una activa ayuda especializada a las actividades en el campo de los cohetes. Presentaré brevemente un ejemplo de ayuda mesometeorológica especializada en dichos campos, durante el pre-lanzamiento, en el lanzamiento y en las fases iniciales del vuelo de los cohetes.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Sin embargo, previamente desearía hacer constar que esta ayuda meteorológica especializada se extiende a las operaciones de los centros de ensayo de vuelos y a los de investigación y desarrollo. Este último está provisto de un cuerpo especial de meteorólogos que reconocen, identifican y acopian conocimientos meteorológicos para su empleo en sistemas (sean de mando y control, armamento, reconocimiento o apoyo) antes de que el sistema sea operacional. Debemos ocuparnos también de un sistema completo de reconocimiento para el máximo apoyo al mecanismo militar de resolución.

La fuente proveedora de material para una gran parte de este apoyo, especialmente en las fases de diseño y operacional de sistemas de armamento, es obtenida de nuestro Centro Climatológico de Wáshington, DC, donde nos hemos especializado en el diseño de aplicaciones meteorológicas a la ingeniería. Proseguiré mi ejemplo de un tipo de ayuda a las operaciones en el campo de los cohetes con dos breves casos de apoyo climatológico aplicado.

Ejemplo corriente de apoyo en la era espacial (campo de los cohetes):

Durante varios años el apoyo total meteorológico en el campo de los cohetes ha sido una de las misiones más importantes de las asignadas al AWS. Un requisito previo obligatorio es el conocimiento exacto de la estructura de la atmósfera y sus efectos con el fin de obtener estadísticas más precisas para la construcción de motores para operaciones con cohetes.

Ejemplo corriente de ayuda en la era espacial (campo de los cohetes):

PROBLEMAS:

En Patrick y Vandenberg resultó evidente que un problema apremiante era el de medir las variaciones en pequeña escala de la atmósfera y presentarlas con suficiente detalle para predecirlas. Considérese el efecto que las variaciones de la brisa marina tienen sobre el índice de refracción; esta información es necesitada por los precisos instrumentos de seguimiento en los primeros segundos después del lanzamiento. O considérese el efecto que las móviles estelas de niebla pueden tener sobre la cubierta de la cámara.

Las causas de otros problemas a pequeña escala son originadas por el uso de materiales propulsores almacenables. Los efectos del viento y de la temperatura sobre los derrames (spills) de fuel, más la traslación y difusión de la nube efluente, sólo pueden ser calculados por métodos a escala normal. Los productos de la combustión de un cohete averiado

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

o de la voluntaria destrucción de uno errante son transportados hacia las capas inferiores y diluídos en la atmósfera. La magnitud exacta de este efecto debe ser calculada antes de una operación con el fin de adoptar las adecuadas medidas de seguridad. Esto sólo puede hacerse por medio del uso inteligente de información a gran escala.

UN EJEMPLO CORRIENTE DE AYUDA EN LA ERA ESPACIAL *(Los cohetes):*

Pruebas:

Con el Mando Aéreo Estratégico, el AWS, realizó una serie de ensayos controlados en la Base de Vandenberg, con objeto de mejorar las técnicas a base de controlar los movimientos de las bajas capas atmosféricas. La prueba se realizó a base de usar columnas de humo y generadores con objeto de conocer la verdadera dirección del viento. Fotografías de estas estelas de humo fueron hechas desde varios ángulos, a fin de mostrar claramente los efectos tanto en la horizontal como en la vertical. Al mismo tiempo que se encendieron los generadores de humo se hicieron registros detallados de la velocidad y dirección del viento. Una prueba de esos resultados es la ilustración que se proyecta. Sin una red extensa no se hubiera podido controlar la marcha del viento y la predicción no hubiera sido muy precisa.

Observaciones favorables de viento hechas en la Base de Vandenberg:

Existe una regla que permite calcular el viento en superficie y que es válida para realizar pronósticos, a base de calcular el flujo medio en un área de cien millas cuadradas.

Se concluye, a base de las pruebas hechas con estelas de humo, que para llevar a cabo un lanzamiento es preciso determinar las constantes de difusión en gran escala y diseñar e instalar una red de medidas específicamente propuesta para las características propias de cada una de las dos áreas de lanzamiento—Patrick y Vandenberg.

Ampliación de factores:

Además de las directrices de investigaciones geofísicas y de las aportadas por los técnicos de cohetes, nosotros hemos instalado una red de trabajo permanente con instrumentos meteorológicos adecuados, un calculador especializado y lectores y registradores apropiados. Así vamos prestando ayuda, según lo van requiriendo las circunstancias. Al mismo

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tiempo vamos adquiriendo capacidad operacional para acometer todos los problemas atmosféricos a distintas escalas.

Ejemplo de ayuda del Centro Climatológico del AWS:

Creo conveniente exponer ahora dos ejemplos muy breves de ayuda climatológica a las operaciones espaciales, tal y como lo había anticipado.

En primer lugar suministrábamos únicamente datos resumidos de nubosidad y temperatura para su uso en los estudios de proyectos para la construcción del subsistema de registro horizontal de los satélites Agena. Esta información era también usada en la resolución de muchos problemas de detección de cohetes y de otros de estabilización de satélites y concernía a la absorción de la radiación infrarroja por las nubes, vapor de agua y precipitación.

El segundo ejemplo consiste en la recopilación de los datos de densidad para todas las alturas hasta 80 kilómetros (aproximadamente 260.000 pies).

Hemos podido comprobar la importancia que las variaciones de la densidad de la atmósfera tiene en la ascensión de los cohetes, en la determinación de la trayectoria orbital y en la reentrada de los mismos. Se ha utilizado información de este tipo por los ingenieros para proyectar el diseño más adecuado en el manejo de varios de los elementos componentes de los cohetes, tales como los de reentrada de la cabeza del cohete.

Ultimamente este análisis se ha extendido hasta una altura de 400.000 pies para la región de Cabo Cañaveral. Se prosigue el trabajo y están siendo estudiados los datos para todas las alturas de la atmósfera (incluyendo las densidades), determinados gracias a la información facilitada por los satélites.

He presentado solamente dos ejemplos. Nuestros científicos están examinando los efectos de todos los posibles parámetros espaciales con el fin de determinar la mejor y más detallada distribución que pueda ser útil en el estudio de los problemas aeroespaciales.

Algunas de las futuras necesidades climatólogicas de la era espacial.

A la vista de la medida en que se avanza en la era espacial podemos prever ya futuras necesidades. La primera y más evidente es el anormal desarrollo de las ayudas meteorológicas necesarias. Esto se refiere a las informes cantidades de datos periódicos básicos precisos, no ya a escala mundial, sino de vastas áreas del espacio. La adquisición, elaboración y presentación definitiva de los resultados finales exigirá los más avanza-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dos sistemas de comunicaciones y la máxima capacidad, así como procesos electrónicos de datos, todo ello con el mayor grado posible de automatización.

Además, con el aumento creciente del tráfico de vehículos espaciales que abandonan o entran en nuestra atmósfera, se incrementarán nuestras misiones geofísicas y astrofísicas. Los parámetros que afectan a las operaciones están siendo constantemente puestos de manifiesto con los vuelos de los X-15, satélites y cohetes. Algunos de los parámetros citados se necesitan actualmente para las operaciones de los aviones y pasarán a ser corrientes y a integrarse en las ayudas a los vehículos espaciales. No voy a tratar de esta clase de parámetros, sino sólo de los que afectan a las operaciones aeroespaciales.

Señalaremos la creciente importancia de la observación y predicción de ciertos parámetros, cuyo conocimiento y efectos previstos se describen a continuación:

a) *Turbulencia óptica.*—Cuando se intenta obtener fotografías de gran resolución a muy elevadas altitudes, la refracción de la luz, debida a las variaciones del índice de refracción, puede producir efectos de degradación por distorsiones, a causa de la escintilación y del movimiento de la imagen.

b) *Protuberancias solares y chubascos de protones.*—Las protuberancias solares se producen en las proximidades de las manchas solares y, generalmente, con más intensidad durante los períodos en que aquéllas alcanzan un máximo. Las protuberancias emiten electrones, protones y otras partículas. Algunas protuberancias producen interferencias momentáneas en las emisiones de radio que duran desde pocos minutos hasta varias horas, seguidas a veces por tormentas magnéticas que interrumpen las comunicaciones por radio y por hilo durante varios días. Unas pocas de las mayores protuberancias emiten protones de suficiente intensidad como para ofrecer un peligro a los vuelos espaciales tripulados que se realizan por encima de las capas de Van Allen. Se han hecho medidas de la intensidad de las protuberancias solares, con el fin de determinar la protección adecuada para defender a las tripulaciones. Se han hecho otros estudios para el desarrollo de técnicas para la predicción de grandes protuberancias, con el fin de limitar los vuelos espaciales a los períodos seguros.

c) *Ozono.*—La presencia de ozono en la estrastosfera en concentraciones que son tóxicas para la vida humana, creó un problema en el diseño de los vehículos estratosféricos supersónicos. Los proyectistas de estos vehículos deben emplear filtros u otros artificios para destruir el ozono antes de que el aire sea introducido en la cabina presurizada. La absorción de la energía solar en el ultravioleta por el ozono, produce

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

amplias variaciones de la temperatura estratosférica en verano e invierno. Durante los meses de invierno existen fuertes gradientes de temperatura y presión entre las regiones iluminadas y oscuras de cada hemisferio. Esto produce la formación del "jet" polar nocturno con vientos de 150 a 200 nudos a unos 30 kilómetros de altura (ó 100.000 pies). En esas regiones de fuertes vientos, parece que existen cizalladuras que pueden afectar seriamente a las características aerodinámicas de los aviones o cohetes que penetran en la estratosfera.

d) *Plasmas o capas ionizadas.*—Un vehículo que vuelve a penetrar (reentrar) en la atmósfera procedente del espacio, se calienta mucho, y libera así tanta energía, que ioniza la capa de aire circundante al navío. Esta ionización es tan intensa que puede absorber todas las señales de radio. El Coronel Glenn, perdió el contacto por radio con la Tierra, en el intervalo de varios minutos, durante su reentrada. Es de esperar que con frecuencias de radio más adecuadas y con suficiente potencia de transmisión, se podrán mantener las comunicaciones bajo esas condiciones. Se están haciendo estudios en ese sentido.

e) *Meteoritos.*—El espacio que envuelve a la Tierra está continuamente sometido a bombardeo de meteoritos que producen erosión en los vehículos espaciales. Pueden perforar la cubierta del vehículo e incluso, si son de gran tamaño, producir la explosión del mismo. El flujo de meteoritos y su composición, precisa ser conocido todavía mucho más a fondo con vistas a los vuelos espaciales prolongados.

f) *Intensidades de radiación.*—Los vehículos espaciales deben atravesar las capas de radiación de Van Allen cuando abandandonan la Tierra. La radiación de las capas (especialmente de la interna) es suficientemente intensa como para dañar al personal de un vehículo no protegido. Sin embargo, las medidas hechas en las proximidades indican que es perfectamente factible la protección contra la intensidad de la radiación de las capas de Van Allen.

g) *Campo magnético.*—El campo magnético de la Tierra decrece rápidamente con la altura y es despreciable a altitudes por encima de la capa de Van Allen. Los vehículos espaciales adquieren una carga durante sus recorridos orbitales y entonces el campo magnético terrestre tiene una ligera influencia sobre el movimiento del satélite. Con el envío de una corriente eléctrica a través de un conductor arrollado en espiral e incrustado alrededor del satélite, se crea un par entre los campos magnéticos terrestre y del satélite. Este momento puede usarse para orientar al vehículo.

En lo que respecta a los vientos de la alta atmósfera, sabemos que afectan a la posición del recorrido orbital y a la reentrada de los

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

vehículos espaciales. Los vientos por encima de los 30 kilómetros de altitud sólo son vagamente conocidos y, más arriba de los 100 kilómetros, prácticamente desconocidos.

Esfuerzos del AWS.

Para alcanzar nuestros objetivos en la ayuda espacial, los esfuerzos inmediatos del Air Weather Service han sido concentrados en tres áreas:

1.ª Puesto que la conquista del espacio dependerá del grado en que haya sido educado el personal para hacer frente al desafío del espacio, deberá acentuarse la instrucción y desarrollo del entrenamiento de ciencias físicas relacionadas con la Meteorología y el contorno aeroespacial.

2.ª El AWS está modernizándose y automatizando su sistema meteorológico ordinario. El sistema 433 L es una parte de esta modernización y automatización. Estamos convirtiendo en aparatos de tipo más moderno los de la flota de reconocimiento del AWS.

Por último, estamos desarrollando algunos de nuestros programas ordinarios, tales como climatología aplicada, empleo de datos de satélites, programas de valoración nacional y desarrollo y consultas técnicas. Además, investigamos en nuevos temas y medios para suministrar apoyo a futuras operaciones, como ya he indicado.

REALIZACIONES ACTUALES

Enseñanza.

En lo que respecta a los esfuerzos desarrollados en el campo de la enseñanza, esta foto presenta sólo lo que en la enseñanza superior ha sido autorizado para el año fiscal 1963. A esto hay que añadir la parte correspondiente a la enseñanza meteorológica fundamental a doscientos cincuenta oficiales.

Quiero hacer notar que este programa de entrenamiento y enseñanza ha sido una función de continuidad. Hemos ingresado un promedio de trescientos veinticinco oficiales por año, durante los cinco últimos, en centros civiles de enseñanza.

Desde 1958 hemos dirigido a algunos de los graduados al estudio de las ciencias relacionadas con la Física. Actualmente, hemos asignado a veintidós oficiales, titulados con grados de doctor o "master", para el estudio de esas ciencias, diez más serán asignados en agosto de 1962 y 13 más recibirán enseñanza de materias espaciales durante 1963.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Para cumplimentar estas peticiones el Cuartel General de las USAF ha seleccionado los cincuenta oficiales de entre todos los candidatos de las Fuerzas Aéreas. Los trece seleccionados para las especialidades espaciales eran oficiales meteorológicos.

Problemas en curso de resolución.

Ya que el tiempo no lo permite trataré solo brevemente sobre nuestros programas de cálculo, desarrollo y asesoramiento técnico. En cuanto a cálculo y desarrollo se refiere, he seleccionado un ejemplo ilustrativo de cómo hombres y máquinas pueden trabajar unidos en la resolución de problemas demasiado complejos para ser resueltos separadamente por cada uno. La máquina es segura y eficaz, pero "torpe". El ser humano, a pesar de su menor eficacia en la integración de grandes cantidades de datos, es efectivo para encontrar soluciones en áreas abstractas.

Ejemplo-Charleston AFB.

La vasta memoria o capacidad de almacenamiento de los calculadores de uso corriente en la actualidad, permite las integraciones objetivas de muy grandes cantidades de datos. Por ejemplo, en la confección de un pronóstico para veinticuatro horas el calculador parte de los datos actuales y hace veinticuatro predicciones distintas (una cada hora) hasta que llega a la de veinticuatro horas. El personal del AWS ha preparado un programa para extraer, de la memoria de la máquina, estos datos horarios y elaborarlos para cualquier elemento conservativo de cualquier localidad del hemisferio Norte. Al calculador se le pide que construya centenares de imaginarias parcelas de aire en tiempo y espacio tridimensionales, que identifique cuál de ellas está sobre una determinada estación en un tiempo prefijado y que indique los valores de su temperatura, punto de rocío, vorticidad, etc. (Para ilustración sobre esto se mostró una transcripción, obtenida en la forma citada y relativa a las predicciones horarias, de diferencia entre temperatura y rocío en Charleston, a 850 milibares.) Este es solamente uno de los muchos parámetros, para una de entre muchas localidades y para una de las varias alturas que podrían ser seleccionadas.

Las líneas gruesas indican la humedad prevista hora a hora a 850 milibares y significan que el aire relativamente seco que hay sobre Charleston, a 5.000 pies de altura a la hora de observación, se hará más húmedo (se prevé que la diferencia de temperatura antes citada decrecerá continuamente) durante el período de veinticuatro horas. Por tanto, la diferencia entre las temperaturas del termómetro seco y del

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

punto de rocío y la nubosidad están en estrecha correlación, y diferencias superiores a 8° a 850 milibares indican cielos claros; entre 5 y 8°, cielos nubosos; entre 2° y 5°, muy nubosos, y de menos de 2°, cubiertos. Estos intervalos están sombreados en el diagrama. Este ejemplo indica que las condiciones en Charleston empeorarán, esperándose cielos cubiertos a 5.000 pies durante las próximas doce horas, sin mejoría en el período restante. La comprobación, como se indica más abajo, demuestra que fué bastante buena esta predicción.

Esta breve ilustración fué elegida por dos razones. Una, para mostrar cómo hombre y máquina pueden trabajar juntos, y, la otra, para indicar cómo pueden fundirse la dinámica y la estadística para proporcionar predicciones terminales de corto alcance.

PROBLEMAS EN CURSO DE SOLUCION

Programa de asesoramiento técnico del AWS.

Nuestro programa de asesoramiento ha sido modificado con motivo de la centralización y del advenimiento de las operaciones aeroespaciales.

Antiguamente la Meteorología sinóptica se enseñaba en plan empírico. Actualmente estamos dedicando más tiempo a los problemas específicos asociados con sistemas, especialmente de defensa, y operaciones aeroespaciales.

En este aspecto ayudamos a los ingenieros al conocimiento de las variaciones atmosféricas para que puedan interpretarlas en sus proyectos. También avisamos a los planificadores militares de las limitaciones de los sistemas defensivos existentes debidas a las condiciones atmosféricas y nuestras posibilidades y limitaciones para predecir dichas condiciones.

En este aspecto se han realizado trabajos, por ejemplo, para los sistemas defensivos B-58 y B-70, y para el cohete "Atlas".

Zona de reentrada.

Un ejemplo de este tipo de servicio lo constituye la asistencia prestada en un problema de reentrada de vehículos espaciales.

El diagrama que se proyecta muestra que la velocidad de reentrada del vehículo y la densidad-altitud han sido correctamente coordinadas con el fin de asegurar el éxito en el retorno a la Tierra. Los vehículos tripulados que reentran tienen grandes limitaciones debidas a las deceleraciones impuestas (alrededor de 10 G.). Limitaciones estructurales las impone el impacto calorífico que el vehículo debe soportar. El vehículo tiene que navegar por un estrecho pasillo de reentrada entre el peligro de no llegar a la Tierra y volver al espacio en otra órbita o penetrar

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

en la atmósfera con excesiva rapidez y arder o encontrar una carga G. demasiada elevada. (VE es la velocidad de escape desde la Tierra, de unos 36.000 pies por segundo; Vs es la velocidad orbital, de unos 25.000 pies por segundo.)

El pasillo o corredor de reentrada es definido por un conjunto de densidades aceptables. Una de las tareas relacionadas con la reentrada es la de predecir dónde dicho pasillo es una función de la altura.

Resumen.

Resumiendo, he procurado darles brevemente un bosquejo o esquema general de las misiones geofísica y astrofísica del Air Weather Service, de la importancia de nuestro proyecto de largo alcance, de algunas de las actuales y futuras necesidades del apoyo a las operaciones de la era espacial y de unos pocos de nuestros esfuerzos inmediatos para suministrar dicho apoyo. Aunque sólo he citado algunos ejemplos de las ayudas que están siendo suministradas, estamos comprometidos en otros varios programas.

Así como el Air Weather Service fué el pionero de la Meteorología Aeronáutica, en principio al servicio de los aviones convencionales y más tarde al de los reactores de elevadas características, estamos ahora actuando intensamente en la identificación, medida y predicción de los elementos significativos de las operaciones espaciales.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

IX

La participación de la Organización Meteorológica Mundial en los programas de asistencia técnica de las Naciones Unidas

Conferencia pronunciada en Madrid el día 27 de junio de 1962

por

D. A. DAVIES

Secretario General de la Organización Meteorológica Mundial

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

La participación de la Organización Meteorológica Mundial en los programas de asistencia técnica de las Naciones Unidas

EL PAPEL DE LA METEOROLOGIA EN EL DESARROLLO ECONOMICO

Permítanme empezar expresando mi reconocimiento por el honor de haber sido invitado por vuestro Director, señor de Azcárraga, a visitar Madrid, y hablar en este nuevo y magnífico Instituto Meteorológico.

La construcción de semejante edificio es una indicación manifiesta del gran interés que toma el Gobierno español, y realmente ha tomado siempre, por la Meteorología.

Es asimismo una indicación evidente de la importancia de la Meteorología y de sus muchas aplicaciones para España y su población, así como del progresivo interés del Gobierno en este terreno.

Es de verdad un placer dar una conferencia en una sala moderna tan bien equipada. Confío en que mis palabras serán dignas de tan excelentes facilidades.

He escogido como tema de mi charla "El papel de la Meteorología en el desarrollo económico". He hecho esto porque hay en todo el mundo un interés creciente sobre la necesidad de aplicar la Meteorología a muchos aspectos de los programas y actividades nacionales, si se quiere conseguir un decisivo avance del desarrollo económico. Esta comprensión de la importancia de la Meteorología se ha hecho más evidente, por supuesto, con los esfuerzos nacionales hacia el desarrollo económico hechos por muchos países nuevos y relativamente subdesarrollados, pero incluso en países más veteranos, incluyendo los más desarrollados, es evidente esta misma tendencia hacia el mayor uso de los conocimientos y prácticas meteorológicos.

Por eso, mucho de lo que yo digo puede que no sea de aplicación directa a España, pero creo que es conveniente presentar el tema como un conjunto. Además, un aspecto de las actividades internacionales actuales en el campo de la Meteorología es la asistencia técnica que están prestando los países muy desarrollados a los menos desarrollados

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

—principalmente, bajo los variados programas de ayuda técnica de la Organización Meteorológica Mundial— y, por tanto, es necesario para todos los países un conocimiento del aspecto general del problema.

De paso, puedo mencionar que muchos meteorólogos españoles han sido designados como expertos de la O. M. M. y han rendido valiosos servicios en muchos países, sobre todo en América Latina. En efecto, algunos están en la actualidad ocupando cargos de alta responsablilidad en las misiones de la Ayuda Técnica de la O. M. M.

La ayuda que la O. M. M. puede conceder proviene de dos importantes programas de las Naciones Unidas: el programa de expansión de Asistencia Técnica y el Fondo Especial.

Ambos programas tienen como objeto ayudar al desarrollo económico de los países beneficiarios, y por eso las actividades de la O. M. M. en este terreno proporcionan materia abundante para el tema de mi conferencia—El papel de la Meteorología en el desarrollo económico—, y daré de vez en cuando ejemplos sobre proyectos de asistencia técnica de la O. M. M. para demostrar mis puntos de vista.

Y ahora volvamos sobre mi tema:

El tiempo atmosférico y el clima afectan directa o indirectamente a casi todas las actividades humanas. Por eso, no es sorprendente encontrar que el tiempo y el clima han sido siempre fuentes de interés y estudio para el hombre. Unos trescientos años a. de J. C., ya escribió su "Meteorología" el famoso filósofo griego Aristóteles. El hecho de que la famosa Torre de los Vientos fuera construída en Atenas por los antiguos griegos, cerca de cien años a. de J. C., es otra demostración del gran interés del hombre por esta materia desde hace largo tiempo.

Sin embargo, sólo en los últimos cien años fueron realizados serios avances científicos en el estudio del tiempo. Así que la Meteorología es, en cierto sentido, una de las más antiguas ciencias geofísicas, pero en otro, una de las más jóvenes.

La principal razón de este desarrollo bastante retrasado de la Meteorología, es que, por virtud de su naturaleza, no se hicieron notables progresos hasta que se realizaron ciertos avances técnicos en otros terrenos. En primer lugar, el estudio del tiempo sobre una base de día a día no pudo empezar seriamente hasta que se desarrolló un sistema para la rápida recolección de informes meteorológicos de una amplia zona. Esto no se consiguió hasta que no se dominaron las técnicas de la telegrafía y la radio, con lo que pudo empezar lo que hoy llamamos Meteorología sinóptica. Otra razón es que los meteorólogos difícilmente pudieron empezar a estudiar la atmósfera hasta que no fué asequible el instrumental necesario para medir los diferentes elementos de la misma, especialmente, la alta atmósfera.

Ustedes todos estarán familiarizados con los enormes avances que

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

se han hecho en la ciencia y práctica de la Meteorología, como consecuencia del desarrollo de los radio-sondas. Este instrumento de observación convirtió la Meteorología de un estudio de dos-dimensiones a tridimensional.

El empleo del radar y de los más recientes cohetes y satélites artificiales con fines meteorológicos, es otro ejemplo. En efecto, el lanzamiento, recientemente efectuado con gran éxito, de satélites meteorológicos, indica que estamos en el umbral de una nueva era en Meteorología—pero como se dió recientemente una conferencia sobre este tema en esta sala, no quiero decir más sobre ello—.

Dije al principio que el tiempo afecta en muy distinta forma a las actividades humanas, y trataré de ello más adelante. Es interesante, sin embargo, observar que en las primitivas etapas del desarrollo de la que pudiéramos llamar moderna Meteorología, que es durante la segunda mitad del siglo XIX, el máximo esfuerzo se dirigía hacia la que llamamos Meteorología Marítima, y ha habido, en efecto, desde aquel tiempo, siempre un gran interés por este tema. La O. M. M. tiene aún como una de sus principales comisiones técnicas, una que se ocupa de la Meteorología Marítima. Es de interés histórico anotar que la primera conferencia internacional sobre Meteorología fué convocada en 1853 por oficiales de la marina de varios países, para discutir el intercambio de información meteorológica en diferentes zonas oceánicas mundiales. Debe tenerse en cuenta que en aquel tiempo se empleaban aún barcos de vela, y estos, por supuesto, dependían del tiempo en sumo grado.

Realmente, en aquellos días, un buen navegante tenía que ser por fuerza un buen meteorólogo. Más tarde, con el desarrollo de la aviación, se dió un gran impulso a la Meteorología. En los primeros tiempos de la aviación, una información meteorológica fidedigna era, literalmente, un asunto de vida o muerte. Desde aquellos primeros días, una gran parte del total esfuerzo meteorológico ha sido realizado en beneficio del Servicio Meteorológico para la aviación e incluso hoy el abastecimiento de tales servicios es una de las máximas aplicaciones de la Meteorología.

En años más recientes se reconoció, generalmente, que la ciencia meteorológica juega un papel en muchos otros campos de la actividad humana, de los cuales muchos son vitales para el desarrollo económico nacional.

Respecto al papel de la Meteorología en el desarrollo económico, el tema se puede dividir convenientemente en cinco encabezamientos generales como sigue:

1.° Transporte, incluyendo aviación, marina (navegación), carretera y ferrocarril.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

2.° Agricultura.
3.° Explotación de recursos hidrológicos.
4.° Industria.
5.° Servicios para el público en general, y, en las observaciones que siguen, emplearé este método de subdivisión:

Transporte.—(Aviación, navegación, carretera y ferrocarril.)

Ya he hecho una breve referencia a la aviación y al gran incremento que dió a la Meteorología el desarrollo de la aviación. En los primeros tiempos la necesidad de información meteorológica era un asunto de seguridad en vuelo, mientras que hoy día, es más un asunto de operaciones económicas y confort del vuelo. Por ejemplo, el ajuste de carga y combustible teniendo en cuenta los vientos y el tiempo en ruta, es un aspecto común hoy día de las operaciones civiles aéreas. No obstante, hay aún muchos importantes problemas meteorológicos que tienen que resolverse en conexión con las puestas en servicio de aviones comerciales de propulsión a chorro y en la aportación de servicios adecuados para la aviación en base diaria. Problemas de medir y predecir las condiciones meteorológicas a altitudes elevadas en las que estas aeronaves operan, no son de fácil resolución. Las conocidas estrechas zonas de vientos de muy elevada velocidad o corrientes en chorro, son en extremo importantes para esas aeronaves. La temperatura del aire es un factor aún más crítico para máquinas de chorro que para los tipos convencionales. La turbulencia atmosférica es importante. El muy elevado consumo de combustible a bajos niveles hace esencial que el pronóstico de condiciones en el aeropuerto de destino sea exacto, etc. No quiero, sin embargo, decir nada más sobre este tema, porque el director de vuestro Servicio Meteorológico, el señor de Azcárraga, es una persona cuyo vasto conocimiento y experiencia en esta materia es reconocida bajo todos los aspectos.

En el programa de la O. M. M. de asistencia técnica hay muchos ejemplos de expertos en Meteorología aeronáutica, enviados a países en vías de desarrollo para asegurar que se facilite a las operaciones de las líneas aéreas civiles al servicio meteorológico que necesiten. En otros casos fueron enviados Meteorólogos para recibir instrucción en otros países. Un ejemplo de otra clase de ayuda facilitada en este terreno, lo constituyen las series de seminarios regionales que han sido organizados conjuntamente por la O. M. M. y la I. C. A. O. para facilitar prácticas en aviación a los predictores para que éstos estén al día en las más recientes técnicas de predicción y análisis. Dos seminarios de este tipo se celebraron recientemente en El Cairo y Chipre, y un tercero se planea para Bangkok en breve.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Volviendo de nuevo sobre la navegación se puede mencionar que, de acuerdo con procedimientos establecidos por la Organización Meteorológica Mundial, se han hecho distribuciones de información meteorológica (incluyendo notificación de borrascas, temporales, nieblas y otras situaciones peligrosas), de forma que sea aprovechable desde adecuadas estaciones costeras para toda la navegación en todos los océanos del mundo. Este es un bello y efectivo ejemplo de colaboración internacional que, en general, no es bien conocido. En España, por ejemplo, las siguientes estaciones son responsables de la emisión de información para la navegación en las zonas marítimas que rodean el país:

Algeciras.
Alicante.
Barcelona.
Bilbao.
Cádiz.
La Coruña.
Madrid.
Palma de Mallorca.
San Sebastián.
Santander.
Valencia.

No sólo reciben los barcos mercantes información meteorológica en la mar, sino que éstos, a su vez, son muy importantes fuentes de esta clase de información, para lo cual, un número de barcos mercantes de los registros de todos los países del mundo han sido seleccionados para enviar partes meteorológicos a estaciones costeras apropiadas, mientras estén en alta mar. Estos barcos están equipados apropiadamente con los instrumentos meteorológicos necesarios e información sobre el código en vigor. Se han llevado a cabo igualmente experimentos en ciertos barcos mercantes haciendo observaciones de las altas capas de aire por radio-sonda, y estos ensayos pueden llegar a ser una fuente de información muy importante para el porvenir. Naturalmente, hay en el Océano Atlántico del Norte cierto número de barcos especiales meteorológicos, los cuales, por convenios internacionales entre los correspondientes países, mantienen continuamente ciertas posiciones fijas en el océano. La información obtenida de estos barcos es esencial para la seguridad de los muchos vuelos trasatlánticos que se realizan cada día. Son también utilizables para fines de navegación y salvamento, si es preciso.

Antes de dejar el tema de la navegación debemos mencionar los estudios recientemente hechos sobre las condiciones meteorológicas res-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

pecto de la estiba de mercancías en barcos de carga. Esto es, las condiciones de temperatura y humedad que tienen que ser mantenidas dentro de las bodegas de los barcos cuando se transportan ciertos artículos perecederos, tales como fruta, para que la carga llegue a su destino en buenas condiciones.

Volviendo ahora sobre el transporte por carretera, en muchos países subdesarrollados no han sido aún construídas carreteras adecuadamente firmes y el empleo de carreteras de "polvo" en tiempo húmedo es frecuentemente imposible. Así, pues, los servicios meteorológicos se encuentran con que las prediciones y otros avisos que dan juegan un papel esencial en el planeamiento diario del transporte por carretera. Incluso en países muy desarrollados, en los que la nieve y el hielo pueden causar grandes dificultades en las carreteras y en muchas ciudades, se han tomado medidas especiales para que la información meteorológica necesaria sea pasada rápidamente a las autoridades responsables de mantener las carreteras abiertas al tráfico.

Respecto a los ferrocarriles, éstos, por supuesto, son generalmente capaces de operar sin mucha interferencia a causa del tiempo, aunque en algunos países la formación de hielo en los raíles altera a menudo el servicio, especialmente en aquellos casos en que han sido electrificados. La niebla espesa es, naturalmente, un motivo grave de retraso en muchos ferrocarriles.

En el proyecto y construcción de carreteras y ferrocarriles es naturalmente importante que se estudien cuidadosamente los registros climatológicos. Esto es particularmente importante para asegurar qué puentes, terraplenes, alcantarillas, se deben construir, teniendo en cuenta las lluvias copiosas y posibles inundaciones que puedan ocurrir.

Agricultura.

Quisiera ahora decir algo sobre la Meteorología en relación con la Agricultura—o agrometeorología, como a veces se le llama.

Es muy sorprendente encontrar que, pese a los muchos y formidables avances que ha realizado el hombre en los dominios tecnológicos, la producción de suficientes alimentos para alimentar una creciente población mundial es todavía uno de los problemas mundiales básicos. La situación varía, por supuesto, de un país a otro. Algunos países son bendecidos con producción agrícola en exceso sobre sus propias necesidades, mientras que otros están en posición opuesta y tienen, o que importar alimentos o alimentarse con nutrición inadecuada. El objetivo de una campaña en el mundo entero titulada "Libertad de la Campaña contra el Hambre", recientemente patrocinada por la Organización de alimentación y agricultura, y sostenida por las Naciones

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

Unidas, por la O. M. M. y por otras Organizaciones, es llamar la atención sobre esta situación e impulsar un incremento de la producción.

Es también bastante sorprendente encontrar que, aunque desde los tiempos más remotos se conozca el efecto del tiempo sobre el desarrollo de las plantas y el hecho de que el progreso agrícola de cualquier país dependa en gran escala de su clima, sólo en los últimos tiempos se haya intentado afanosamente aplicar los conocimientos meteorológicos a los problemas agrícolas. Ya se han realizado, sin embargo, importantes progresos y parece cierto que se prestará atención creciente a esta materia en lo sucesivo. Es, por supuesto, un tema vasto y sólo puedo tocar los puntos principales.

Uno de los más obvios caminos que tiene el meteorólogo para ayudar a la explotación de la agricultura es publicar predicciones. Estas pueden ser de varios tipos. Los pronósticos del tiempo para varios días son inapreciables para los labradores en la organización de sus operaciones inmediatas. Pronósticos de heladas, predicciones para servicios contra incendios de bosques y pronósticos para la aviación agrícola son ejemplos de aspectos muy especializados de los servicios de predicción necesarios. Así, pues, los avances en las técnicas de predicción, ya sea en el nivel muy especializado como el pronóstico de heladas en zonas restringidas, o sea, en los pronósticos más generales para varios días para regiones más amplias, todos ayudan enormemente al agricultor.

Pero no es solamente en predicción donde puede ayudar el meteorólogo—no es éste, desde luego, el aspecto más importante de la agrometeorología—. Veamos algunos otros aspectos.

En muchos países se está estudiando el clima en relación con los cultivos para decidir si, en efecto, se están cultivando las variedades idóneas o las especies más aptas de plantas—el término inspección agroclimática se emplea algunas veces para tal estudio y la O. M. M. está de hecho actualmente realizando esta inspección, en colaboración con la FAO, en el Mediterráneo Oriental. En algunos casos se han descubierto que se pueden introducir nuevos y rentables cultivos en un país que pueden producir imoprtantes efectos sobre su desarrollo económico.

Nuevos conocimientos sobre posibilidades de riego pueden también abrir nuevos campos de desarrollo agrícola y, de esta manera, influir en la economía nacional.

Intimamente relacionados con estas actividades están los estudios sobre los micro-climas de las plantas, que están siendo realizados en varios países. Las medidas de la temperatura, humedad y flujo de aire entre las hojas de las plantas y la medida de la temperatura de la superficie de las hojas o de los frutos, han vertido mucha luz sobre muchos problemas importantes respecto al espaciamiento óptimo de las

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

plantas, condiciones para la maduración del fruto o las condiciones que producen frutos menos expuestos a ser dañados en el transporte.

Semejante trabajo de investigación tiene también una relación importante con la patología vegetal y la propagación de las enfermedades de las plantas. La O. M. M., por ejemplo, ha publicado una Nota Técnica sobre factores meteorológicos relacionados con el tizón de la patata y una de las primeras misiones de asistencia técnica de la Organización Meteorológica Mundial fué el envío de un experto en la materia a un país de América del Sur. Otra Nota Técnica de la Organización Meteorológica Mundial se refiere a los aspectos climatológicos del posible establecimiento del escarabajo japonés en Europa. Esta plaga causa mucho daño en cultivos de forrajes, plantas y árboles en América del Norte y, como precaución contra su extensión a Europa, han sido delimitadas áreas de la máxima idoneidad climatológica en Europa para el escarabajo.

En años recientes, los conocimientos meteorológicos han sido aplicados en ayuda de las operaciones de control de la langosta del desierto y en trabajos de investigación dirigidos a aumentar el conocimiento de las costumbres y movimientos de esta plaga de la agricultura en tantos países del mundo. Una misión de ayuda técnica de la O. M. M. en Africa ha estado estudiando este problema y, en consecuencia, la crianza y movimiento de enjambres de langosta del desierto se conocen ahora mucho mejor y las operaciones de control son, de este modo, más eficaces. Afortunadamente, España no padece esta peste, pues creo que muy excepcionalmente pueda llegar a España desde Africa del Norte.

Estudiando los problemas agrícolas, el de si el hombre puede controlar el tiempo artificialmente surge inmediatamente. En los últimos años se ha investigado mucho sobre la producción de lluvia artificial y se han obtenido muchos y variados resultados. Este es, ciertamente, un tema de tanta importancia como para que no sea ignorado en mi conferencia, pero el tiempo no me permite explayarme con detalle sobre él. Ustedes estarán todos, estoy seguro, familiarizados con las variadas sustancias que se han empleado para sembrar nubes con la finalidad de estimular la lluvia. Cristales de ioduro de plata, hielo seco (éste es anhídrido carbónico sólido), partículas higroscópicas, gotitas de agua menuda, etc., todo se ha intentado. No trataré de valorar los resultados de estos experimentos, pero la opinión más generalmente aceptada entre la mayoría de los meteorólogos responsables es que mientras, por el momento, hay indicios de que algunas técnicas eficaces pueden desarrollarse, es preciso investigar mucho más en los procesos físicos en la atmósfera antes de que se pueda dar una contestación definitiva al problema de si se han encontrado técnicas de utilidad prác-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

tica. Pero éste no es el único camino por el cual las condicionas naturales pueden ser modificadas en pequeña escala. En muchos países se emplean dispositivos para proteger las plantas contra las heladas intensas. El empleo de dispositivos de calefacción es uno de ellos, y la extensión de paja sobre las plantas para protegerlas, es otro. La plantación de setos o filas de árboles para actuar como rompevientos contra vientos fríos o, en ciertos casos, para desviar del área de protección el flujo nocturno inferior de aire frío, es otro ejemplo. En algunos casos las plantas son cubiertas con coberturas plásticas transparentes que cambian notablemente el microclima de las plantas y mejoran su desarrollo.

En una mayor escala, la repoblación de bosques puede producir cambios importantes en el clima sobre extensas áreas. En algunos casos se ha encontrado que cinturones de árboles colocados a intervalos apropiados han producido una elevación de los vientos secos y de gran poder desecante, reduciendo así grandemente la pérdida de humedad del suelo. Aparte de tales efectos, la plantación de árboles, especialmente en laderas montañosas, puede tener un efecto importante en el aprovechamiento de la humedad del suelo con fines agrícolas en las zonas inferiores.

Estos ejemplos que he dado sobre aplicaciones de la agro-meteorología constituyen un resumen muy breve de las actividades que se están desarrollando en este importante terreno cada vez más en aumento.

Es alentador advertir que en los países menos desarrollados se han tenido en cuenta estos factores en sus planes de desarrollo económico. El esfuerzo que se está efectuando en agro-meteorología asegura que se obtendrán progresos continuos con los consiguientes beneficios para la producción alimenticia en muchos países. El programa de ayuda técnica de la O. M. M. muestra muchos ejemplos de expertos en agro-meteorología enviados a los países menos desarrollados. Asimismo muchos han sido enviados desde estos países para recibir enseñanza en otros. Un seminario regional en agro-meteorología tropical se celebró recientemente en América del Sur y se planean otros.

Desarrollo de recursos hidráulicos.

En los últimos años ha aumentado notablemente el interés por todos los problemas relacionados con el desarrollo de los recursos hidráulicos. Por desarrollo de recursos hidráulicos entiendo el estudio de todos los aspectos de la disposibilidad y utilización de los recursos hidráulicos para el desarrollo económico. Este incremento ha sido debido a varios factores. En muchos de los países menos desarrollados se ha puesto claramente en evidencia que sólo pueden desarrollarse con

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

éxito si la reserva de agua disponible es eficientemente utilizada—particularmente con fines agrícolas—. Pero, incluso en los países más intensamente desarrollados, es evidente la necesidad de un aprovechamiento más eficaz de los recursos hidráulicos, en parte para fines agrícolas y en parte también para fines industriales. La enorme cantidad de agua que se consume normalmente por las instalaciones industriales no se hace siempre a pleno rendimiento.

Este nuevo desarrollo es de interés para los meteorólogos, porque una gran parte del ciclo hidrológico implica factores meteorológicos. El ciclo hidrológico es, por supuesto, la consecuencia de acontecimientos en la atmósfera y sobre la tierra por los que el agua es tomada de la superficie de la tierra, o por evaporación de áreas oceánicas o de otras zonas acuáticas abiertas o por transpiración de las plantas, y llevada al aire como vapor de agua. Luego queda sujeto a los procesos atmosféricos normales que implican la transformación del vapor de agua en gotitas de nubes; en el siguiente estado, las gotitas de nubes se convierten en gotas de lluvia y en esta forma vuelven a caer a tierra.

Sobre la tierra, el agua de lluvia puede, o fluir a lo largo de la superficie hacia embalses, pantanos, ríos, etc., o puede penetrar en ella para ser aprovechada por las raíces de las plantas para su crecimiento o puede filtrarse más profundamente hasta alcanzar el gran depósito de agua subterránea, que, por supuesto, es el que surte de agua a pozos y fuentes.

Así, pues, muchas fases del ciclo hidrológico tienen un significado meteorológico. El proceso de la evaporación es uno, la formación de las nubes es otro, así como la de las gotas de lluvia y también es la medida de la lluvia cuando alcanza el suelo. Realmente, excepto el agua subterránea, todas las demás fases del ciclo hidrológico están directa o indirectamente relacionadas con los procesos meteorológicos.

Por eso no es sorprendente encontrar que este aumento en el interés por el desarrollo de los recursos hidráulicos haya tenido sus repercusiones en las actividades de la O. M. M., y el tercer Congreso de 1959 autorizó la creación de una nueva comisión técnica de Meteorología hidrológica.

Volvamos a las aplicaciones prácticas de este nuevo proceso. El desarrollo de los recursos hidrológicos puede afectar a la Agricultura, la ingeniería, irrigación, planes de producción de energía, etc. Si la planificación de tales programas es seria y acertada, es fundamental que se hagan cuidadosos estudios de los factores meteorológicos e hidrológicos. Puede que parezca esto una precaución innecesaria, pero el hecho es que en algunos casos se han realizado algunos programas sin los adecuados datos meteorológicos e hidrológicos. Así, hay proyectos hidro-eléctricos que se han realizado a veces sólo para descubrir

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

que únicamente pueden ser aplicados parcialmente debido a que la reserva de agua es menor que la prevista. Igualmente importante es en muchos países conocer la probabilidad de inundaciones, especialmente donde haya áreas extensas de tierra baja. La predicción de inundaciones en estas regiones es una función importante del Servicio Meteorológico.

La base de todos esos estudios meteorológicos e hidrológicos preliminares es, naturalmente, la lluvia, y la experiencia está demostrando que la tarea oscura y no espectacular de reunir estadísticas fidedignas de precipitaciones de una buena red de estaciones pluviométricas es de la mayor importancia en todo los países. Registros de precipitaciones fidedignas para un período largo, cuando son analizados adecuadamente por medios estadísticos y de otros tipos, proporcionan una información extremadamente valiosa para muchas actividades importantes para el progreso nacional.

Como ya he dicho, tales actividades son de gran importancia para la agricultura, especialmente donde se trate de riego. La cantidad de agua que debe suministrarse por medio del riego y el tiempo en que esto debe hacerse, afecta a muchos factores agro-meteorológicos relacionados con la transpiración del agua por las plantas, así como, por supuesto, con la disponibilidad de agua para riego.

La O. M. M. trabaja en la actualidad intensamente para facilitar asistencia técnica en este terreno. En tres países de América del Sur se aprobaron amplios proyectos del Fondo Especial para establecer redes adecuadas de estaciones hidrometeorológicas y para segurar que los datos así obtenidos sean adecuadamente elaborados y analizados de tal forma que posibiliten la preparación de proyectos de pantanos hidroeléctricos y de riego sobre bases científicas, sólidas y reales. Expertos de España son en realidad los jefes de misión en dos de esos países, mientras otros han sido nombrados para otros puestos de responsabilidad. Muchos otros ejemplos de actividades de ayuda técnica en el terreno del desarrollo de recursos hidrológicos podrían fácilmente ofrecerse.

Aplicación de la Meteorología a la industria.

Quisiera volver ahora a una aplicación de la Meteorología que quizá no sea tan bien conocida como algunas de las otras, de las que he hablado. Me refiero al papel de la Meteorología en las industrias. Ya he hablado sobre la necesidad de un adecuado suministro de agua para la mayoría de las industrias y no voy a decir ya nada más sobre este punto.

Otro aspecto importante de la Meteorología en relación con la in-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

dustria es el de la contaminación de la atmósfera. Todo el que haya vivido cerca de una ciudad industrial se dará cuenta inmediatamente de la importancia de este asunto. Muchas factorías industriales y edificios expulsan a la atmósfera una gran variedad de sustancias químicas, algunas de las cuales pueden ser dañinas para plantas y animales. Además, por otra parte, estas materias tienen frecuentemente un importante efecto sobre el mismo tiempo, particularmente en lo que respecta a la visibilidad. El fenómeno generalmente conocido como "smog", en Londres, es un buen ejemplo. Aquí, en condiciones atmosféricas estables, la combinación de las partículas procedentes de las factorías industriales con las gotitas de agua de la niebla produce condiciones, no sólo de una visibilidad extremadamente reducida durante largos períodos, sino otras que se conocen también como enormemente dañinas para aquellos que padecen de enfermedades del pulmón y vías respiratorias. Estos factores son ahora bien conocidos y se tienen en cuenta en todos los proyectos de ciudades modernas. Por supuesto son también muy importantes en la selección de lugares para aeropuertos.

El problema total de la contaminación atmosférica se ha hecho todavía más importante en los últimos años por la introducción en la atmósfera de sustancias radiactivas producidas artificialmente.

La O. M. M. ha estado estudiando este asunto durante varios años y ha publicado una importante nota técnica titulada "Los aspectos meteorológicos de la seguridad y situación de las plantas de reactores atómicos". En la ubicación de tales plantas hay que tener especial cuidado con las condiciones meteorológicas, no sólo para asegurarse de que el residuo normal de tales equipos no tenga efectos dañinos, sino también para prever escapes inesperados de sustancias altamente radiactivas a la atmósfera. Es de recordar que hace unos años hubo un accidente de este tipo en Inglaterra, en Windscale. La O. M. M. ha publicado también una Nota Técnica sobre los "Factores meteorológicos que influyen en el transporte y eliminación de residuos radiactivos".

La importancia de la Meteorología en esta cuestión proviene del hecho de que una vez que tales residuos aerotransportados han sido vertidos a la atmósfera, su subsiguiente evolución depende de las condiciones meteorológicas. Su movimiento horizontal dependerá del viento; el vertical de las corrientes verticales en la atmósfera y, por tanto, de la estabilidad o inestabilidad del aire. En condiciones estables, a menudo asociadas con inversiones, las partículas tenderán a quedar bajo la inversión y se acumularán. En condiciones inestables las partículas se difundirán rápidamente hacia arriba.

Si se produce precipitación, naturalmente ésta tenderá a lavar di-

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

chas sustancias de la atmósfera y es por esto por lo que la medida de la radiactividad del agua de lluvia constituye actualmente una de las prácticas habituales de medida de la radiactividad de la atmósfera.

Dentro del capítulo de las aplicaciones de la Meteorología a la industria, deben ser citadas dos fuentes convencionales de energía—el viento y la radiación solar.

La energía cinética de la atmósfera en cualquier tiempo es, desde luego, enorme y el aprovechamiento de una fracción de esta energía sería suficiente para cubrir todas las necesidades del hombre en energía.

Desgraciadamente no es fácil transformar esta energía en una forma en la que pueda ser útilmente aprovechada. Se han empleado, naturalmente, molinos de viento durante muchos siglos, principalmente por transformaciones mecánicas directas, tales como haciendo girar unas piedras, para moler trigo y hacer harina. En algunos lugares también se utilizaron los molinos de viento para mover los elementos mecánicos de las bombas hidráulicas.

La limitación de tales sistemas es que la energía sólo puede ser aprovechada en el lugar en cuestión. Se han obtenido resultados prometedores y la obra va progresando. Se han hecho muchos esfuerzos en los últimos años poniendo en marcha molinos de viento para generar electricidad que luego puede ser fácilmente transportada a otros lugares para su aprovechamiento. Sobre esta materia se han realizado en España trabajos apreciables y el Sr. Azcárraga es bien conocido como experto en este terreno.

Dentro del programa de asistencia técnica de la O. M. M. se han enviado expertos a varios países para informar sobre la posibilidad de utilización de esta fuente de energía. En algunos casos los resultados son prometedores.

Respecto a la energía solar también se han hecho aquí efectivos progresos, pero las técnicas desarrolladas hasta ahora son más bien para uso doméstico que para fines industriales.

Servicios para el público en general.

Y ahora llego a la última de mis principales divisiones de las aplicaciones de la Meteorología: los servicios para el público en general. El meteorólogo es, en muchos casos, un científico singular. Día tras día, sea la situación meteorológica fácil o difícil, tenga o no los datos adecuados sobre su mapa sinóptico, está obligado a hacer deducciones científicas y, por tanto, pronósticos para el público, cubriendo a menudo amplias áreas del país de que se trate. Se le exige, además, expresar su predicción en pocas líneas en un periódico, o en unos pocos minutos en la radio o en la televisión. Figúrense las dificultades de describir

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de este modo incluso el tiempo conocido del día actual y, sin embargo, prácticamente todo el mundo sabrá si su predicción es buena o mala. Añádase a esto el hecho de que mucha de la gente que conoce este servicio de predicción al público, no tiene idea de las otras muchas aplicaciones de la Meteorología al desarrollo económico que ya he descrito. También parece ser una característica del "hombre de la calle" acordarse de una predicción errónea (que puede haber sido motivada por el hecho de que en tal localidad exista, por ejemplo, algún efecto topográfico especial) y olvidar las cincuenta acertadas.

Esto muestra algunas de las dificultades que se presentan para ofrecer al público en general un buen servicio de predicción. Pero, sin duda, se ha progresado y confío en que en los últimos años se haya comprendido y apreciado mejor el servicio que se proporciona al público en general.

Hasta ahora he estado hablando de aquellos países en los que los pronósticos para el público son más bien asunto de conveniencia personal que de gran importancia. Hay, por supuesto, algunas partes del mundo en las que el servicio para el público tiene mucha más importancia.

En aquellas regiones en que ocurren huracanes o tifones se han tomado, en la mayor parte de los casos, medidas adecuadas para advertir al público tales tormentas. En los Estados Unidos, por ejemplo, se ha desarrollado un sistema extremadamente eficaz y completo para detectar huracanes por medio de técnicas de radar y por reconocimiento con aviones. Los avisos dados en los últimos años han salvado, sin duda, muchas vidas y evitado mayores daños. Tan importante es este servicio para el público que los dos satélites meteorológicos "Tiros" han sido lanzados a horas o tiempos específicos y en órbitas concretas para dar información sobre formación y movimiento de huracanes. Hay un ejemplo en el que la existencia de un huracán fué detectada a la altura de las Islas de Cabo Verde dos días antes de su descubrimiento por otros medios.

En la mayoría de los países del mundo ocurren peligrosos fenómenos meteorológicos—quizá no tan frecuentemente ni de forma tan espectacular como los huracanes que afectan a los Estados Unidos—pero no menos capaces de producir grandes pérdidas de vidas humanas y materiales, si no está organizado un adecuado sistema de avisos. A veces, un Servicio Meteorológico de este tipo puede servir de instrumento para evitar daños, cuyo valor monetario puede representar varias veces el gasto que él ocasiona a la nación.

Hay, naturalmente, muchos otros casos en los que los avisos meteorológicos pueden ser de gran valor para el público en general.

He hablado tanto tiempo, que temo estar abusando de la paciencia

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

de ustedes. Permítanme terminar repitiendo lo que dije al principio. El tema que he elegido—"El papel de la Meteorología en el desarrollo económico"—es vasto, y es que se le reconoce cada vez más la importancia que tiene. No me ha sido posible más que tocar muy brevemente los principales aspectos del tema, pero como dije, creo que era preferible, dadas las circunstancias, hacer una especie de "tour d'horizon" con este importante tema a desviarlo a una charla altamente especializada sobre uno o dos aspectos del problema.

Considero un gran privilegio el haber podido dirigirme a ustedes en su nuevo Instituto, cuyas instalaciones son verdaderamente magníficas. Es un gran placer estar con ustedes.

Por último he de decir que si desean hacerme algunas preguntas haré lo posible por contestarles.

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018

GRÁFICAS VIRGEN DE LORETO

© Agencia Estatal de Meteorología. 2018