

LA RADIACIÓN SOLAR Y EL ÍNDICE ULTRAVIOLETA (UVI)

Las actividades del INM en torno a la medida de la radiación solar

Alberto Cansado Auría. Instituto Nacional de Meteorología

La radiación procedente del Sol que llega a la superficie de la Tierra es generalmente beneficiosa. Es la fuente de energía que gobierna nuestro planeta y gracias a ella se dan las condiciones necesarias para hacer posible la vida en el mismo. Por otra parte hay que recordar que el Sol es la fuente de la que procede toda la energía de la que dispone el hombre. No sólo la solar, sino también la eólica y la hidroeléctrica están determinadas, en último término, por la radiación que

indica que, al igual que la mayoría de las estrellas, pertenece a la denominada *secuencia principal* lo que significa que obtiene su energía a partir de la fusión del hidrógeno para formar helio.

El Sol convierte en energía cada segundo el equivalente de 4 millones de toneladas de masa ($E=mc^2$) y continuará haciéndolo los próximos cuatro o cinco mil millones de años hasta que entre en la fase de gigante roja. En dicha fase, el volumen del Sol aumentará hasta que su radio abarque la órbita de Marte y la Tierra será engullida y se evaporará. A continuación, la mayor parte de la masa del Sol se expandirá creando una nebulosa planetaria en el centro de la cual permanecerá una estrella de tipo enana blanca como recuerdo de la estrella G2V de la secuencia principal que hubo allí algún día.

La radiación solar es energía radiante emitida por el Sol y es producida por los procesos de fusión nuclear que tienen lugar

en el núcleo de nuestra estrella. En las reacciones de fusión los núcleos de hidrógeno (protones) se combinan para formar núcleos de helio.

El defecto de masa se transforma en energía y la energía se transfiere por radiación a la zona convectiva desde donde se transfiere a la fotosfera que es el lugar donde se emite la

llega de él. Además, la energía almacenada en los combustibles fósiles procede, vía fotosíntesis, de la luz del sol.

Sin embargo, no toda la radiación que alcanza la superficie terrestre es inocua o beneficiosa. La exposición a la radiación ultravioleta puede entrañar riesgos y se hace necesario realizar un seguimiento de la misma. El Instituto Nacional de Meteorología dispone de unas redes de medida de la radiación solar y de parámetros relacionados que se extiende por todo el territorio y calcula el llamado índice ultravioleta (UVI) observado y previsto para diferentes localidades de nuestro país. Conozcamos más de cerca todo lo relacionado con la radiación procedente de nuestra estrella.

El Sol

El Sol es la estrella que se encuentra en el centro del sistema solar. La Tierra y otros planetas orbitan alrededor del Sol que, por sí mismo, posee el 99,8 % de la masa del sistema solar. La energía emitida por el Sol es la que hace posible la vida en la Tierra a través de la fotosíntesis y es también la que gobierna el tiempo y el clima terrestres.

El Sol es una estrella de tamaño y masa típicos que se encuentra alrededor de la mitad de su ciclo de vida. Nació hace unos cuatro mil quinientos millones de años. Su composición es de un 74% de hidrógeno y un 25% de helio, siendo el resto cantidades traza de otros elementos químicos. El Sol, de acuerdo a la clasificación estelar, pertenece a la clase espectral G2V. G2 implica que el Sol es una estrella blanca, que vemos amarilla por efecto de la dispersión de la luz en la Atmósfera (que extrae la componente azul de la luz solar). V



Figura 1 - Ciclo de vida del Sol

Actualmente nos encontramos aproximadamente en la mitad de su vida en la secuencia principal. Después pasará por las fases de gigante roja y de enana blanca.

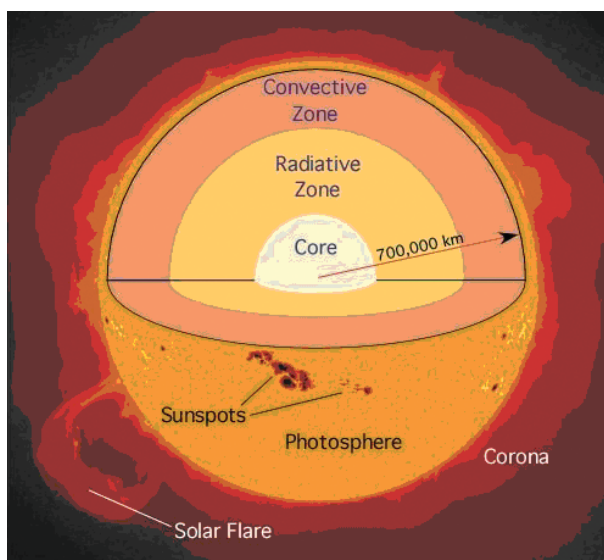


Figura 2 - Estructura del Sol

El núcleo en el centro, la zona radiativa, la zona convectiva, la fotosfera donde se encuentran manchas solares y la corona. Ocasionalmente se producen fulguraciones solares.

(Cortesía de SOHO/ ESA & NASA)

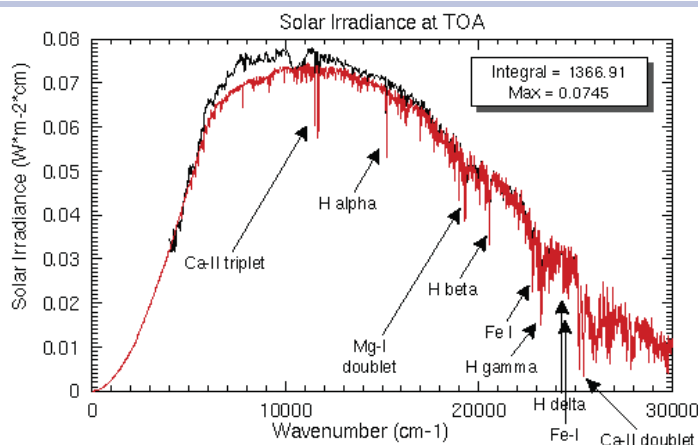


Figura 3

Espectro de la irradiancia solar que alcanza el tope de la atmósfera

Se muestra la mejor estimación del espectro disponible a fecha de hoy, realizada por Bob Kurucz, del Harvard-Smithsonian Observatory, en el año 1992 mediante cálculos línea a línea. En rojo se muestra los resultados de los cálculos realizados en el año 1992. En negro, la mejor estimación disponible hasta entonces. Los datos originales han sido degradados a 20 cm⁻¹ de resolución. (Fuente: NASA)

energía al espacio en forma de radiación electromagnética. En la fotosfera existen zonas más frías conocidas como manchas solares. Por último la corona solar, es la parte superior de la atmósfera del Sol.

En la corona se pueden producir las denominadas eyecciones de material coronal, también llamadas fulguraciones solares, que son emisiones de plasma y que provocan las tormentas solares (alteraciones de la magnetosfera terrestre) capaces de paralizar las comunicaciones por satélite y de dañar los circuitos eléctricos en el planeta. La actividad solar también es responsable del fenómeno de las auroras, al quedar atrapadas en la magnetosfera terrestre las partículas cargadas procedentes del Sol (viento solar).

La Radiación Solar

El espectro de la radiación del Sol coincide aproximadamente con el de un cuerpo negro que tiene una temperatura de unos 5800 K.

Alrededor de la mitad de la radiación electromagnética emitida se encuentra en la zona visible del espectro. La otra mitad de la radiación solar cae principalmente en la zona del infrarrojo próximo (NIR) aunque también tiene una componente en el ultravioleta. La radiación que emite el Sol se ve modificada por la absorción de ciertas longitudes de onda ocasionada por

la presencia de gases en su atmósfera, de manera que la radiación que llega al tope de la atmósfera terrestre (Figura 3) no es ya la de un cuerpo negro. A su vez, los gases y partículas que contiene la atmósfera terrestre son capaces de absorber, reflejar y/o dispersar parte de esta radiación, de modo que la radiación que alcanza la superficie terrestre (Figura 4) no es la misma que la que llega al tope de la atmósfera.

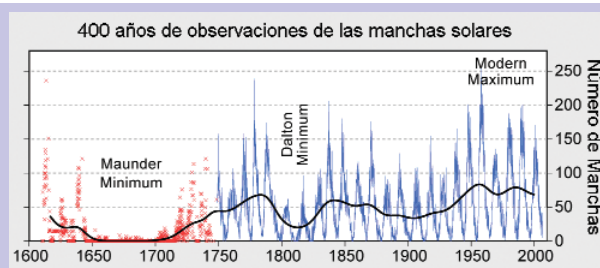


Figura 5

Se muestra la actividad solar desde 1610 (midiendo el número de manchas solares). Junto a los ciclos solares de aproximadamente once años, observamos los mínimos de Maunder y de Dalton y el máximo de actividad que se está produciendo actualmente.

Fuente: Global Warming Art.

http://www.globalwarmingart.com/wiki/Image:Sunspot_Numbers_png

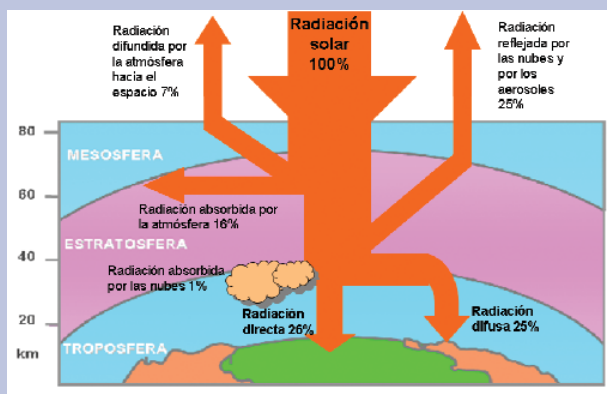


Figura 4

Esquema en el que se muestra el porcentaje de radiación solar que alcanza la superficie terrestre

Variabilidad solar

Cuando se observa la superficie del Sol a través de un telescopio proyectando su imagen sobre una pantalla (hay que recordar que bajo ningún concepto hay que mirar al Sol directamente ya que hay riesgo de ceguera temporal o permanente), lo primero que llama la atención es la presencia de las llamadas manchas solares. Las manchas solares son zonas de la fotosfera que aparecen más oscuras debido a que tienen una temperatura inferior al entorno y presentan una intensa actividad magnética estando por ello la convección inhibida en esas zonas. El campo magnético crea temperaturas elevadas en la corona que dan lugar a fulguraciones solares y eyecciones de materia coronal. Como curiosidad hay que decir que las manchas solares aparecen siempre en pares en posiciones simétricas sobre el Sol de modo que si vemos una mancha solar, habrá otra equivalente en las antípodas solares con la polaridad magnética invertida.

El número de manchas solares no es constante, sino que varía en un ciclo de periodo medio igual a once años aproximadamente que se conoce con el nombre de ciclo solar.

En un mínimo solar típico, muy pocas o ninguna mancha solar es visible y suelen estar en latitudes elevadas. Conforme avanza el ciclo, el número de manchas solares aumenta y se concentran en el ecuador.

El ciclo solar tiene una gran influencia en el tiempo espacial (space weather) y, por supuesto, influye significativamente en el clima terrestre. La actividad solar mínima se correlaciona con bajas temperaturas y ciclos más largos que el periodo medio se relacionan con periodos de temperaturas más cálidas. Durante el siglo XVII el ciclo solar aparentemente se detuvo durante varias décadas en lo que se conoce como *mínimo de Maunder* o *pequeña edad del hielo* y que se caracterizó por temperaturas extremadamente bajas en Europa.

La Radiación Solar y sus efectos biológicos

La intensidad de la radiación solar que se recibe sobre una superficie (horizontal) de la superficie terrestre en condiciones de cielo despejado depende de la altura del sol sobre el horizonte. A mayor altura del Sol, mayor será la radiación solar que recibe esta superficie. La altura del Sol sobre el horizonte viene determinada por la época del año, la hora del día y por la latitud del lugar, produciéndose el máximo diario al mediodía local (no coincide con el mediodía civil) y el máximo anual el día del Solsticio de Verano (21 junio en hemisferio norte y 21 de diciembre en el hemisferio sur).

Como hemos mencionado antes, la radiación solar no sólo es beneficiosa, sino imprescindible para que la vida, tal y como la conocemos, se desarrolle en nuestro planeta. La fotosíntesis, es decir, la generación de glucosa y oxígeno a partir de CO₂ y agua en presencia de luz, que realizan algunos seres vivos (plantas superiores pero también algas, fitoplancton y algunas bacterias) constituye la base de la vida en la Tierra. Para llevar a cabo la fotosíntesis, los organismos emplean unos pigmentos que son los encargados de absorber la luz. El color que vemos es la parte del espectro menos eficiente para la fotosíntesis en cada planta. Así, las plantas verdes son verdes porque la clorofila contenida en los cloroplastos absorbe la mayor parte de la luz azul y roja que es la que emplea la planta para sintetizar la glucosa.

Sin embargo, una parte de la radiación solar que nos llega es radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta se suele dividir en 3 zonas: La radiación UVC corresponde a longitudes de onda comprendidas entre los 100 y los 280 nm. UVB la radiación con longitud de onda entre 280 y 315 nm y la radiación UVA con longitud de onda entre 315 y 400 nm. La radiación UV puede resultar dañina para el hombre. La parte más peligrosa, la radiación UVC es eliminada totalmente por la atmósfera antes de alcanzar la superficie, principalmente en la capa de ozono. Los rayos UVB y UVA también son atenuados por la atmósfera, pero parte de ellos llegan a alcanzar la superficie.

La cantidad de radiación ultravioleta que llega a alcanzar la superficie dependerá, además de la altura del sol sobre el horizonte, de la concentración de ozono en la atmósfera y de la altitud del lugar donde nos encontremos, entre otros factores. A menor concentración de ozono y mayor altitud sobre el nivel

del mar, más cantidad de radiación ultravioleta será capaz de llegar a la superficie terrestre.

Los humanos necesitamos recibir con moderación sobre nuestra piel radiación solar para sintetizar vitamina D. Somos sensibles a esta radiación gracias a la presencia en nuestra piel de un pigmento llamado melanina y respondemos a ella cambiando el color de dicho pigmento. La piel responde a la radiación solar de diferente forma en función de la cantidad de melanina de la que dispone y, dependiendo de su respuesta a la radiación, se consideran distintos tipos de piel o fototipos. Las personas con una pequeña cantidad de melanina en su piel (personas pelirrojas, o rubias) pueden sufrir quemaduras (eritema solar). Además, los efectos de la radiación solar sobre la piel son acumulativos: produce envejecimiento prematuro y puede llegar a provocar cáncer de piel, cuya incidencia está aumentando mucho en los últimos años.

La disminución de la capa de ozono debido a la presencia en la atmósfera de sustancias destructoras del ozono hará, probablemente, empeorar esta situación debido a que aumentará la exposición de la población a la radiación ultravioleta, especialmente a la radiación UVB.

La exposición a los rayos ultravioletas también puede provocar lesiones oculares. Enfermedades como la fotoqueratitis o la fotoconjuntivitis son efectos agudos de la exposición a la radiación ultravioleta. Asimismo, la exposición a la radiación UVB parece ser el factor de riesgo más importante en la formación de cataratas.

También se ha comprobado que puede modificar la respuesta inmunitaria, haciéndonos más sensibles a infecciones de carácter vírico, bacteriano, parasitario o fúngicas.

El Índice Ultravioleta ó UVI

El índice ultravioleta fue introducido por científicos de "Environment Canada" en 1992. Tras Canadá fueron varios los países que definieron índices similares, cada uno con su propio método de cálculo. En la actualidad existe un índice ultravioleta estándar definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Comisión Internacional para la Protección frente a Radiaciones No Ionizantes.

El Índice Ultravioleta (UVI) se basa en el espectro de acción de referencia para el eritema inducido por la radiación UV, definido por la Comisión Internacional de Iluminación (ISO 17166/CIE S007/E-1998). Se aplica a una superficie horizontal. El UVI es un índice adimensional que viene definido por

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250\text{nm}}^{400\text{nm}} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda$$

donde E_{λ} es la irradiancia espectral solar, $s_{er}(\lambda)$ el espectro de acción de referencia para el eritema y k_{er} , una constante de normalización, que convierte al índice en adimensional y que toma el valor de 40 m²/W. Tiene un valor mínimo teórico de 0 y no tiene valor máximo. Existe un código de colores para estandarizar las predicciones de UVI en todo el mundo.

Viendo la fórmula y teniendo en cuenta que el espectro de acción de referencia para el eritema nos mide la respuesta estándar de la piel humana a longitudes de onda situadas en

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUV
BAJA	< 2
MODERADA	3 A 5
ALTA	6 A 7
MUY ALTA	8 A 10
EXTREMADAMENTE ALTA	11+

Tabla 1 - Código de colores utilizados para indicar el UVI.
(Fuente: OMS, OMM).

la zona ultravioleta del espectro (250 a 400 nm), nos podemos dar cuenta de que lo que nos proporciona el UVI es una medida de la intensidad de la radiación que alcanza la superficie dando un mayor peso a aquellas longitudes de onda que provocan un mayor daño en la piel humana. Dicho de otro modo, lo que nos indica el UVI es la peligrosidad de la radiación que estamos recibiendo en un momento dado.

El UVI no permanece constante a lo largo del día sino que depende por definición de la radiación que llega a la superficie y por tanto presenta un máximo diario al mediodía y un máximo anual en el día del solsticio de verano.

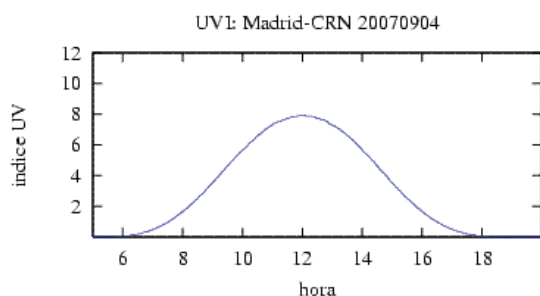


Figura 6: Evolución diaria del Índice Ultravioleta en Madrid el día 4 de septiembre de 2007. (Fuente: INM)

Por supuesto, esto puede verse modificado por las condiciones atmosféricas como, por ejemplo, por la presencia de nubosidad o por variaciones en el contenido total de ozono sobre la columna atmosférica.

La vigilancia de la radiación solar en el INM

El Instituto Nacional de Meteorología dispone de diferentes redes radiométricas operativas que permiten realizar un seguimiento permanente de la radiación solar en España. Cuenta para ello con instrumentos radiométricos en banda ancha, para la medida de la radiación integrada en una zona del espectro solar. Piranómetros y pirheliómetros, que permiten medir la radiación global solar incidente y



Figura 7

Diferentes instrumentos de medida de la radiación solar en la terraza del Centro Radiométrico Nacional del INM. (INM)

sus componentes directa y difusa, pirgeómetros para la medida de la radiación infrarroja atmosférica y terrestre, radiómetros que miden la radiación UVB eritémica global y difusa, y radiómetros que miden la radiación UVA y la radiación fotosintéticamente activa (PAR). Además, el año pasado el INM ha desplegado y puesto en operación una red nacional de fotómetros solares CIMEL, cuyas medidas permiten estimar el contenido y características de los aerosoles atmosféricos que atenúan la radiación solar que alcanza la superficie terrestre. Esta red complementa la actual red nacional de espectrofotómetros BREWER del INM, para la medida de la radiación UV espectral y la estimación, entre otros, del contenido total de ozono en la columna atmosférica. Asimismo, el INM dispone de espectrorradiómetros de alta precisión que miden la radiación espectral solar global, y sus componentes directa y difusa en un amplio rango de longitudes de onda (desde el UV hasta el IR).



Figura 8

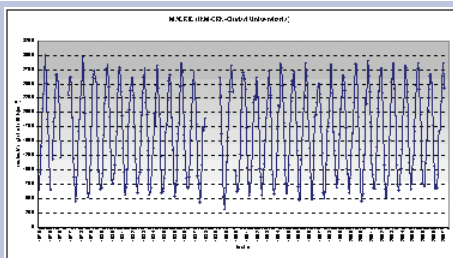
Mapa de la Red Radiométrica del Instituto Nacional de Meteorología. (Fuente: INM)

Actualmente, 56 estaciones constituyen las redes radiométricas del INM, aunque no en todas ellas se miden todas las variables que hemos mencionado anteriormente. La figura 8 muestra un mapa de la Red Radiométrica Nacional en banda ancha que ya se está pensando en ampliar añadiendo algunos puntos de medida en estaciones de montaña en el Pirineo o el Sistema Central (Navacerrada). El Centro Radiométrico Nacional (CRN) del INM es el encargado de la calibración, mantenimiento y revisión de los instrumentos de medida de la Red Radiométrica Nacional desplegada por todo el país. El sistema de gestión de calidad de las redes radiométricas del INM ha obtenido el certificado ISO 9001:2000.

Los datos medidos en las estaciones de la Red Radiométrica Nacional del INM permiten, entre otras aplicaciones, la realización de estudios para vigilar el estado y la evolución del clima a través de la radiación solar. Por ejemplo, las figuras 9 y 10 presentan la evolución temporal de la radiación global solar en Madrid y el número de días que se superaron ciertos umbrales de UVI en las diferentes estaciones de la Red en el año 2006.

La función principal de los espectrofotómetros BREWER es la obtención de medidas continuas del contenido total de ozono de la columna atmosférica y la medida de radiación global ultravioleta.

Figura 9 - Evolución de la radiación solar global mensual en Madrid desde 1975 hasta la actualidad. (Fuente: INM)



leta espectral. La red radiométrica del INM posee 7 espectrofotómetros BREWER que forman parte del sistema observación del ozono del programa de Vigilancia Atmosférica Global de la OMM. El Observatorio Atmosférico de Izaña del INM ha sido designado por la OMM como centro de calibración regional para los espectrofotómetros BREWER de Europa y forma parte de la red de detección del cambio de la composición atmosférica (NDACC). Los datos registrados en todas las estaciones de medida se envían al Centro Mundial de Datos de Radiación Ultravioleta y Ozono (WOUDC) con sede en Environment Canada. Asimismo, semanalmente se realizan ozonosondeos en Madrid y Santa Cruz de Tenerife, cuyos datos también son enviados al WOUDC, en los que se obtiene el perfil atmosférico de ozono desde el suelo hasta superar los 30 km.

El contenido total de ozono en la columna atmosférica es uno de los principales factores que influye en la cantidad de radiación ultravioleta que alcanza la superficie, junto a la altura del sol sobre el horizonte y la altitud del lugar sobre el nivel del mar. El contenido total de ozono es muy variable y depende en gran medida de la llegada de perturbaciones atmosféricas, pero un valor medio en nuestras latitudes podría estimarse en 300 UD (unidades Dobson).

Pero el INM no sólo mide el UVI sino que también prevé el UVI máximo previsto en condiciones de cielo despejado para los próximos dos días para todas las localidades. Las predicciones

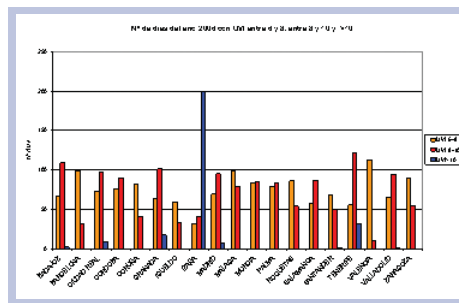


Figura 10 - Número de días que se superaron ciertos umbrales de UVI en las diferentes estaciones de la Red Radiométrica Nacional en el año 2006. (INM)

se publican en la página web del INM (<http://www.inm.es>). A lo largo del pasado año el INM ha venido desarrollando un nuevo método para calcular UVI máximos previstos en condiciones de cielo despejado hasta D+5 para las capitales de provincia, ciudades autónomas e islas, utilizando los valores previstos de ozono total en columna por el modelo del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio como entrada de un modelo de transferencia radiativa.

El laboratorio de calibración

El INM dispone también de un laboratorio para la calibración de los sensores radiométricos. En sus instalaciones es posible caracterizar radiómetros, especialmente los de banda ancha cuyos rangos de longitud de onda van desde 280 a 320 nm (UVB) y de 280 a 400 nm (UVA). La calibración abarca la respuesta espectral relativa, global y angular.

La respuesta espectral relativa se calibra mediante la utilización de un haz colimado de luz procedente de un doble monocromador Bentham DMc150. Permite comparar la respuesta del sensor con espectro de acción de referencia para el eritema inducido por la radiación UV. La respuesta angular mide la desviación de la respuesta del radiómetro a la ley coseno de Lambert mediante control goniométrico desde -90° a +90° frente a una fuente colimada de luz procedente de una lámpara de Xenon de 400 vatios que emite en el rango de 190 a 2600 nm. Todo el sistema descansa sobre un banco óptico donde se integran todos los instrumentos junto con dos cáma-

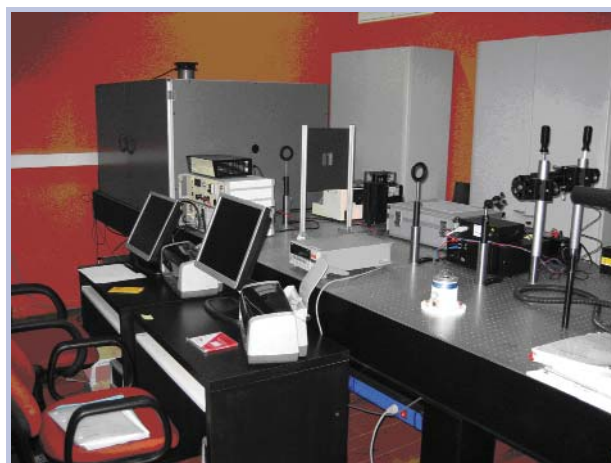


Figura 11 - Instalaciones del laboratorio de calibración de radiómetros del INM. (Fuente: INM)

ras para el radiómetro bajo prueba. La técnica de calibración que se está implementando sigue las recomendaciones de los expertos en este tema de la Organización Meteorológica Mundial, y tiene en cuenta no sólo las caracterizaciones de laboratorio sino que se complementa con medidas del instrumento simultáneas a un espectrorradiómetro Bentham utilizando el sol como fuente, además de las salidas de un modelo de transferencia radiativa.

... y para saber más

Historia del Sol y del cambio climático. Manuel Vázquez Abeledo. Editorial McGraw-Hill. Colección Divulgación Científica. 2006.

<http://en.wikipedia.org>. Artículos Sun, Sun Radiation, Action Spectrum.

<http://spaceweather.com>



...hablemos
del tiempo,

por

Lorenzo García de Pedraza

Atmósfera y Aviación

A lo largo del siglo XX –condicionada por dos guerras mundiales (1914-18) y (1939-45)- la aviación logró un espectacular desarrollo en sus vuelos a través de las distintas capas de la atmósfera: aviones de hélice, helicópteros, reactores,... apoyados por los más modernos medios de comunicación: telégrafo, radio, teletipo, etc. Ello supuso un notable avance para la aviación militar y comercial.

La Meteorología presta su valiosa colaboración al tránsito de aviones en dos vertientes: i) protección del vuelo, con predicciones del tiempo actual y previsto tanto en los puntos de despegue y aterrizaje, como durante la ruta de crucero; ii) emplazamiento de aeropuertos, estudio climático local y explotación de las líneas aéreas de uso diario.

En este artículo vamos a tratar de forma concisa, de incidencias de aviones en vuelo: estelas de condensación, engelamiento y turbulencia. Todo ello en plan de divulgación.

Estelas de condensación: Se producen cuando las toberas de los aviones a reacción emiten una mezcla de gases cálidos a alta presión con gran cantidad de vapor de agua y corpúsculos. Este chorro de vapor e impurezas, al encontrar el aire frío y seco de altos niveles, se descomprime bruscamente reduciendo rápidamente su temperatura para condensarse, si el descenso es suficiente, formando hileras de nubes artificiales blancas del tipo cirrus. Observadas desde tierra, las estelas de condensación marcan claramente la trayectoria del avión en vuelo. En zonas que bordean un potente anticiclón,

suelen verse en las proximidades de los aeropuertos numerosas estelas dibujadas como pinceladas blancas que, en ocasiones, se cruzan recordando las pinturas murales. A veces son persistentes e indican el avance de un frente cálido y húmedo hacia la región.

Engelamiento: Son depósitos de hielo que se crean en vuelo sobre ciertas partes del avión. Ello ocurre cuando atraviesa nubes densas subfundidas, con temperaturas entre 0º y 15º C. El hielo se puede formar sobre el morro del fuselaje, los cristales del parabrisas, las antenas, el borde de ataque de las alas, etc. En los turborreactores el hielo puede formarse en las tomas de aire y en el núcleo del compresor. Para reducir el engelamiento, se usan medios mecánicos como el revestimiento neumático del borde de ataque de las alas y alerones, que se hinchan y deshinchan a intervalos con ayuda de aire comprimido; entonces el hielo se rompe y cae. También se utilizan medios térmicos caldeados por los motores. En algunas ocasiones, se han encontrado en tierra bloques de hielo de hasta 3 Kg, procedentes de engelamiento.

Turbulencia: Las corrientes de aire al chocar contra las laderas de las montañas transforman el régimen laminar del viento en fuertes remolinos de aire que afectan al avión en vuelo y someten al pasaje a incómodos vaivenes. En otras ocasiones, las capas de aire inestable se disparan hacia arriba creando corrientes convectivas. Hay, pues, turbulencias de origen dinámico o térmico.

En fin, podríamos vulgarizar lo divulgado así:

*Tiempo estable de anticiclón,
favorece el vuelo del avión.*

*La turbulencia causa gran preocupación,
tanto en el pasaje como en la tripulación.*

Y para terminar, señalemos que con los datos de observación del tiempo presente: presión atmosférica, temperatura, humedad, viento, nubes, visibilidad, etc., se realizan los estudios del clima, como estadística del tiempo, es decir que conviene no olvidar que con la observación del tiempo de los abuelos, se construye el clima de los nietos.