

FILTROS PARA OBSERVACIÓN SOLAR

José Luis Morán López

Instituto de Física
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Hugo Navarro Contreras

Instituto de Física "Luis Rivera Terrazas"
Universidad Autónoma de Puebla

Se discuten los valores de intensidad luminosa debajo de los cuales se puede efectuar observación continua de fuentes de luz sin riesgo para la vida humana. Se presenta un estudio comparativo de resultados experimentales de la transmitancia de algunos materiales que alguna vez han sido propuestos como filtros para observación solar segura y se discuten cuáles resultan ser más idóneos para este propósito.

I. Introducción

El Sol, como cualquier cuerpo caliente, emite radiaciones electromagnéticas características de la temperatura a que se encuentra. La intensidad de la radiación depende tanto de la temperatura del cuerpo emisor como de la longitud de onda. La dependencia de la intensidad de radiación con la longitud de onda tiene una forma de campana y el máximo está determinado por la temperatura del emisor. En particular, la temperatura de la superficie del Sol es aproximadamente 5,900 grados Kelvin. Esto hace que la radiación solar esté principalmente localizada en el rango de longitudes de onda entre los 250 y los 3,000 nanómetros (10^{-9} metros), con un máximo cerca de los 500 nanómetros. En la parte superior de la Figura 1 se grafica la intensidad de la radiación solar como función de la longitud de onda medida fuera de la atmósfera terrestre¹. En el eje horizontal, medido en micras (10^{-6} metros) y en escala logarítmica, se marcan las regiones de radiación ultravioleta (UV), visible (V) e infrarrojo (IR).

La radiación solar antes de llegar a la superficie terrestre tiene que atravesar la atmósfera formada principalmente por nitrógeno, oxígeno y trazas de argón, vapor de agua, dióxido de carbono y ozono. Excepto el nitrógeno y el argón todos estos gases son opacos en bandas diversas en el UV e IR princi-

palmente. Éstos sirven como filtros naturales y atenúan una parte de la radiación que incide sobre la Tierra. En la parte intermedia de la Figura 1, se muestra la absorción atmosférica medida al nivel del mar^{2,3}. En esta gráfica una absorción de 1.0 significa que la radiación de esa longitud de onda no llega a la superficie terrestre, y por el contrario, una absorción 0.0 significa que esa radiación llega con toda su intensidad al nivel del mar.

De esa figura se ve claramente que la mayor parte de la radiación solar llega a la superficie de la Tierra, con excepción de la radiación ultravioleta con longitudes de onda menores que 280 nanómetros (debido a la absorción del O_2 molecular y del ozono O_3), y partes del infrarrojo cercano con longitudes de onda mayor que 700 nanómetros. En la Figura 2 se muestran con más detalle las curvas de distribución de energía solar con la longitud de onda incidentes a nivel del mar para iluminación solar directa, y para iluminación solar difusa con cielos claro y nublado, después de sufrir los procesos de absorción mencionados.

En la parte inferior de la Figura 1 se muestra la sensibilidad relativa del ojo humano a la radiación. Ésta define la región del espectro electromagnético llamada visible que va desde 400 a 700 nanómetros. El ojo humano no percibe las radiaciones fuera de este rango espectral, aunque puede ser dañado por

ellas; más aún, al ser insensible a estas longitudes de onda el ojo humano no tiene manera de percatarse de que está expuesto a intensidades de radiación dañinas al observarse una fuente intensa de éstas, tal como lo es el Sol. Ésta es la razón por la cual, para la observación del Sol se debe ser extremadamente cuidadoso en la elaboración y el uso de filtros de observación solar.

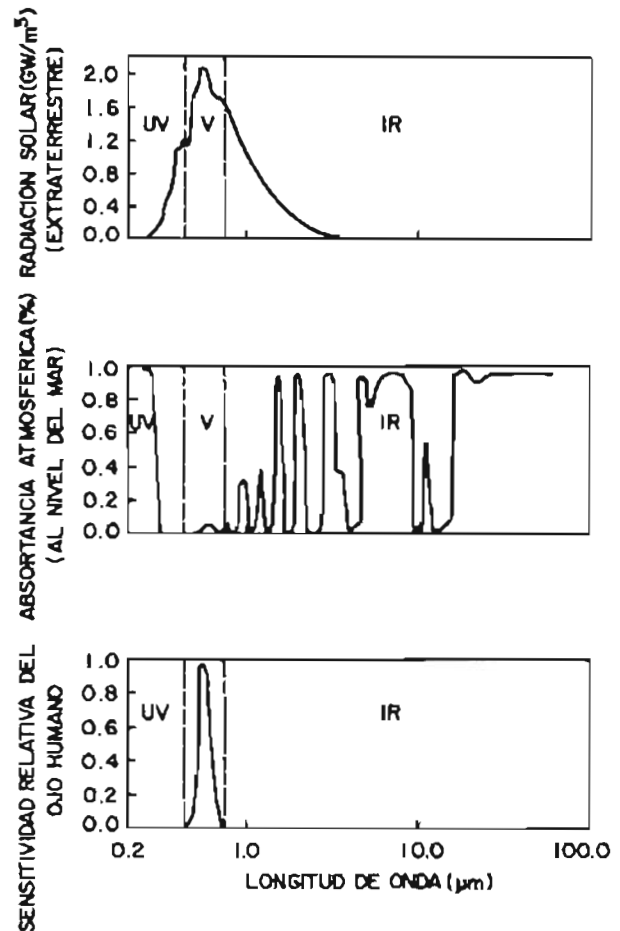
II. Riesgos por la observación de radiación

En la Antigüedad se ignoraba que la observación directa del Sol producía ceguera parcial o total. Se dice que el astrónomo Galileo Galilei sufrió de visión reducida debido a la intensa observación solar que realizó a lo largo de su vida. Durante los tres siglos siguientes a la invención del telescopio, se han desarrollado muchos dispositivos y técnicas de protección para la observación solar. Sin embargo, el uso de filtros adecuados para la población durante eclipses solares ha causado grandes discusiones durante los últimos años. Uno de los ejemplos más recientes es lo que ocurrió durante el eclipse de Sol que se observó en el estado de Oaxaca, México, en 1970. En esa ocasión se reportó un número muy alto de personas dañadas de los ojos, algunas de ellas con lesiones irreversibles.

Para evitar la repetición de esta lamentable situación el Gobierno Federal, en febrero de 1991, encargó a la Secretaría de Salud del país se fijara normas para los filtros de observación solar que con motivo del eclipse del 11 de julio de 1991, varias empresas deseaban producir y comercializar. En términos generales, estos filtros deben dejar pasar radiación dentro de los márgenes o umbrales de intensidad, en dependencia de su longitud de onda, debajo de los cuales se pueda observar una fuente luminosa sin riesgo alguno.

La intensidad total de radiación proveniente del Sol a la distancia de la órbita terrestre y fuera de la atmósfera es de $135.3 \pm 2 \text{ mW/cm}^2$ (miliWatts por centímetro cuadrado). A esta cantidad

FIGURA 1



a) La radiación solar fuera de la atmósfera terrestre (en gigawatts/ m^2) como función de longitud de onda de la radiación (en micras, 10^{-6}m). b) La absorción atmosférica de la radiación solar al nivel del mar. c) La sensibilidad del ojo humano a la radiación. En las tres gráficas se marcan las regiones del ultravioleta, visible e infrarrojo y las unidades del eje horizontal están dadas en escala logarítmica. Figura tomada de la referencia [3]

se le denomina "Constante Solar" (CS), y ha sido medida en varios de los programas de satélites de observación solar de la NASA, principalmente durante los años setenta⁴. En las Figuras 1 y 2 se ve que la atmósfera remueve parte de esta radiación y al nivel del mar inciden cerca de 95 mW/cm^2 con el Sol en el zenit. A la altura del altiplano mexicano (en promedio alrededor de 2,000 metros) la cantidad de radiación solar incidente en las mismas condiciones es mayor que al nivel del mar. Para propósitos de las discusiones de este artículo

tomaremos como valor representativo 100 mW/cm^2 como intensidad de la radiación solar incidente en cualquier punto del país (de México). Como discutimos más adelante, los umbrales de observación segura son dependientes de la longitud de onda, variando desde $0.1 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ (microWatt por centímetro cuadrado) hasta del orden de 1 mW/cm^2 . Entonces, de manera burda se ve que la intensidad de radiación solar que nos llega en México es de 100 a 1,000 veces mayor que los umbrales tolerables por el ojo humano. A continuación discutimos los umbrales para las diferentes regiones espectrales definidos por diversos investigadores⁵.

III. Umbrales de riesgo por el ultravioleta

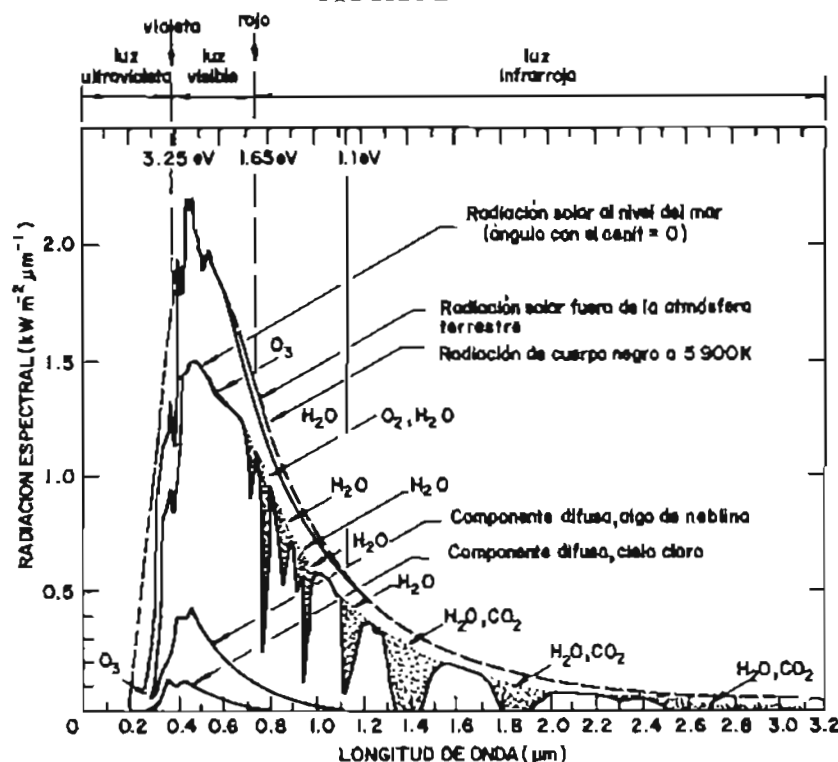
La luz ultravioleta en altas intensidades puede causar daños en el ojo ocasionando lesiones fotoquímicas que se producen por el calor que se genera en las células de la retina al incidir sobre

ellas la luz UV. Los umbrales de daño (o seguridad para intensidades menores) fotoquímico publicados por diferentes grupos de investigación biomédica muestran una fuerte dependencia con la longitud de onda del UV⁵.

La comisión Internacional de la Iluminación (CIE por sus siglas en francés) ha definido tres bandas espectrales en el UV para discutir los efectos biológicos de la radiación UV: 1) UV-A que es la banda de 315-400 nm, 2) UV-B para la banda de 280-315 nm, y 3) UV-C de 100-280 nm. De la referencia 4 vemos que estas bandas contienen el 2.22%, el 5.42% y el 6.65% respectivamente, de la intensidad luminosa total de la radiación solar incidente fuera de la atmósfera terrestre⁵.

Se ha mencionado ya anteriormente, cómo el O_2 y el ozono O_3 absorben prácticamente toda la radiación UV solar de longitudes de onda menores a 280-290 nm. Es decir, la atmósfera terrestre nos protege de la radiación del UV-C. Sin embargo, en la banda del UV-B se encuentran algunas de las longitudes de onda con los umbrales más bajos de reactividad biológica del ojo humano: del orden de $1 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$ para exposición continua a 290 nm. Sin embargo, este umbral crece exponencialmente para longitudes de onda mayores, siendo 300 veces mayor para longitudes de onda de 315 nm^{5,6}. Las bandas UV-B y UV-C provocan en el ojo humano la dolorosa afección denominada keratoconjuntivitis, ya que esta radiación es absorbida en la córnea y en la conjuntiva. Esto explica asimismo el bajo umbral de daño por radiación de algunas longitudes de onda en estas bandas, éste se debe a que al ser éstas las membranas más externas del ojo humano y carecer de la protección que el lente y el humor vítreo ofrecen a la retina y a la fovea. Los bajos umbrales de afectación para radiación de longitudes de onda en estas bandas UV-C y UV-B demandan que los filtros de radiación solar que se aprueben para distribución comercial, o fabricación casera, para observación del Sol deben atenuar drásticamente la radiación para longitudes de onda desde 280 hasta 320

FIGURA 2



El mismo espectro de radiación solar en escala lineal para las longitudes de onda, indicando las bandas de absorción resultantes debido a los diferentes gases de la atmósfera indicados. Figura tomada de la referencia 9.

nm, por lo menos en un factor de 10,000 veces, ya que en esta región espectral el Sol nos hace incidir intensidades 100 a 1,000 veces mayores a los máximos tolerables.

Niveles excesivos de radiación UV han sido sugeridos como agentes causales de cataratas⁵, incluyendo radiación de las longitudes de onda en la banda UV-A. En la referencia 6 se recomienda un límite de 1 mW/cm² para exposición continua a radiación de la banda UV-A. Como se mencionó, incide radiación solar en esta banda con un factor de aproximadamente 1,000 veces mayor al del valor umbral recomendado.

IV. Riesgos de quemaduras retinales (400-1,500 NM)

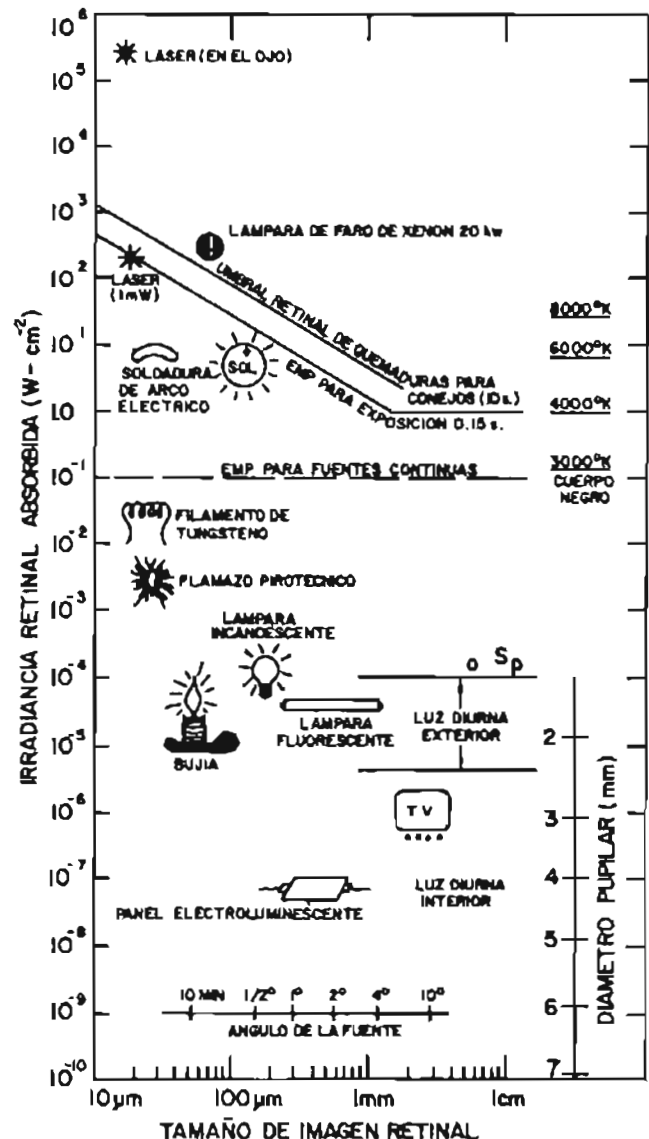
Las quemaduras retinales resultan en cicatrices con completa destrucción de las células fotorreceptoras (bastones y conos) lo que ocasiona disminución de la vista o ceguera total dependiendo de la magnitud del área dañada. Se produce un daño térmico permanente cuando la temperatura de los fotorreceptores se incrementa en 23° Celsius por encima de la temperatura del cuerpo. Sin embargo, el daño fotoquímico mencionado en el contexto de los efectos del UV sucede con sólo un incremento de 2° Celsius de la temperatura de los fotorreceptores por encima de la normal del cuerpo humano^{5,7}.

La popularización del láser como herramienta científica e industrial obligó a la realización de amplios estudios sobre el efecto de lesiones retinales térmicas⁵. En este caso se debe tener en cuenta lo siguiente: para radiación en el visible el reflejo del parpadeo ofrece una buena protección que instintivamente obliga a desviar la vista de fuentes excesivamente luminosas. Asimismo, la contracción pupilar es un mecanismo adicional de protección ante la luminosidad excesiva.

El tamaño pupilar determina la cantidad de energía radiante que entra al ojo. La energía admitida es proporcional al área de la pupila. Asimismo, el ángulo subtendido por la fuente lumi-

nosa juega un papel muy importante en la cuantificación de los umbrales para daño retinal. La razón de esto es el hecho de que el tamaño de la imagen en la retina influye de la siguiente manera: una imagen grande, impide que las células que se han calentado en el centro disipen, por conducción, el calor a las células vecinas, ya que éstas se

FIGURA 3



Irradiancia retinal absorbida debido a fuentes luminosas diversas, en función del tamaño que forman en la retina, para ángulos de subtendido promedio para los objetos emisores en una observación típica. La línea horizontal denominada diámetro pupilar indica el tamaño que ésta adquiere para el nivel de iluminación ambiental indicado en la escala vertical. Figura tomada de la referencia 5.

encontrarán a la misma temperatura. Una imagen pequeña sí permite esta disipación, aun para intensidades de radiación que ocasionarían daño instantáneo en imágenes extendidas. Esta dependencia en el tamaño de la imagen en la retina de la fuente luminosa es lo que explica la posibilidad del ojo humano para ver instantáneamente al Sol sin dañarse; el Sol visto directamente sustituye una imagen de aproximadamente $160\ \mu\text{m}$ en la retina. Sin embargo, la observación del mismo Sol a través de binoculares o un telescopio aumentan el tamaño de la imagen formada en la retina, lo que hace más probable una quemadura retinal.

Los resultados de diversos estudios en monos sugieren que el umbral de generación de lesiones retinales debido a exposición continua es de $0.2\ \text{W}/\text{cm}^2$ ^{25,8}. En la Figura 3 se resumen de manera gráfica las irradiancias retinales esperadas debido a diferentes fuentes luminosas. La línea inclinada que empieza entre las intensidades de 10^2 y $10^3\ \text{W}/\text{cm}^2$ etiquetada como EMP (exposición máxima permitida) para exposiciones de 0.15 segundos ilustra la dependencia de este umbral con el tamaño de la imagen retinal formada por la fuente. Los umbrales han sido fijados por la Agencia de Higiene Ambiental del Ejército de los Estados Unidos con un factor de seguridad de 2.5⁵.

En la Figura 3 se ve que el Sol tiene una irradiancia 100 veces mayor que la EMP para esta zona espectral, la cual contiene 72.34% de la energía de la constante solar, aunque a nivel del mar una cantidad significativa de esta energía es removida por la absorción del agua y del CO_2 , Figura 2. Para ofrecer un buen margen de seguridad, un filtro deberá atenuar por un factor de 1,000 por lo menos en esta zona espectral.

Por último, para la región espectral del infrarrojo de longitudes de onda de 1,500 a 1,900 nm se ha determinado que la córnea y el medio del lente absorben toda radiación incidente.

Después de 1,900 nm la córnea absorbe sola la radiación. Los nervios sensores terminales en la córnea son extremadamente sensibles a pequeños incrementos de la temperatura produciendo una respuesta muy dolorosa en los humanos⁵. Ocupacionalmente se ha definido una intensidad de $0.1\ \text{W}/\text{cm}^2$ como segura, para esta radiación infrarroja que contiene el 13.86% de la energía de la constante solar. Aunque de nuevo existe una absorción significativa de parte de esta radiación en varias bandas espectrales por el agua y el CO_2 de la atmósfera.

V. Características necesarias para filtros solares

La Secretaría de Salud fijó como normas de protección que los filtros para observación solar para el eclipse del 11 de julio de 1991 deberían tener un factor de atenuación mínimo de 1/50,000 en cualquier parte del espectro entre 285 y 1,500 nm. De lo discutido anteriormente se ve que el margen de seguridad exigido era bastante adecuado y ofrecía márgenes de protección que van de 50 a 5,000 veces los mínimos requeridos. El siguiente aspecto a considerar es el de qué tipo de materiales pueden satisfacer estas normas.

Esto no es un asunto trivial, ya que los filtros que se han usado hasta ahora, películas veladas, papel mylar platea-

FIGURA 4

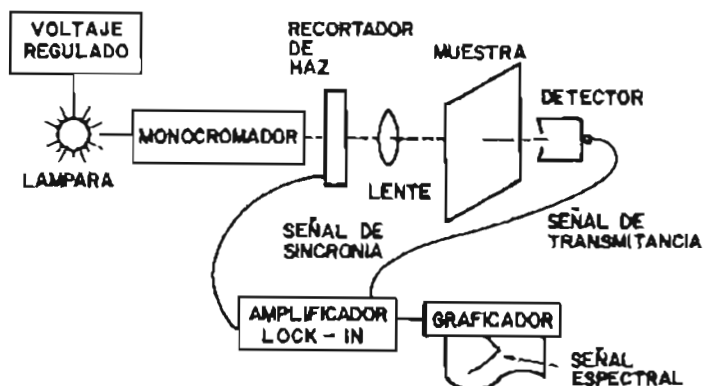


Diagrama esquemático de un sistema modular de equipo para medición de la transmitancia de materiales.

do, etc., sólo filtran una parte del espectro solar. Por lo general son parcialmente transparentes a la radiación ultravioleta, donde el ojo humano tiene sus umbrales de daño más bajos. Además de esto, tienen el defecto, principalmente el papel mylar, de que no son homogéneos y permiten el paso de radiación sin atenuar a través de gran parte del filtro.

Estas conclusiones las hemos obtenido después de estudiar las mediciones de transmitividad de algunos de esos materiales realizadas en el Instituto de Física de la Universidad Autónoma de Puebla. A continuación describimos la forma de caracterización.

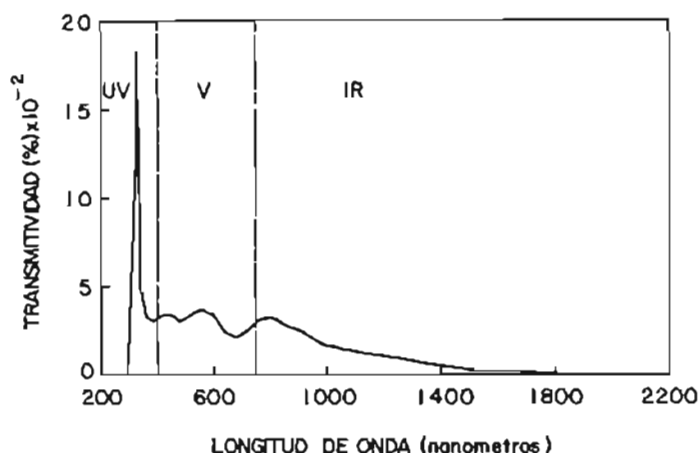
VI. Caracterización óptica

Para caracterizar la transmitancia de un material, se mide primero (o simultáneamente) la fuente de luz en la ausencia del material para tener esta señal como referencia. Una vez calibrada, se interpone el material a medir entre la fuente y el detector. Es aconsejable, mas no indispensable, medir simultáneamente ambas señales; el haz de referencia y el que se mide a través de la muestra. Esto corrige cualquier fluctuación instantánea de la fuente luminosa. En caso de medirse secuencialmente estas dos señales, se repiten varias veces esas mediciones y se promedian los espectros respectivos. La transmitancia se obtiene dividiendo la señal transmitida entre la señal de referencia. Este procedimiento se hace para cada longitud de onda.

La forma más sencilla de efectuar estas mediciones es por medio de un espectrofotómetro tipo Beckmann o Perkin Elmer, que cubra desde 200-250 nanómetros hasta 1-2 micras. Estos equipos tienen un canal o área donde se coloca la muestra y se pueden medir los dos haces de luz simultáneamente.

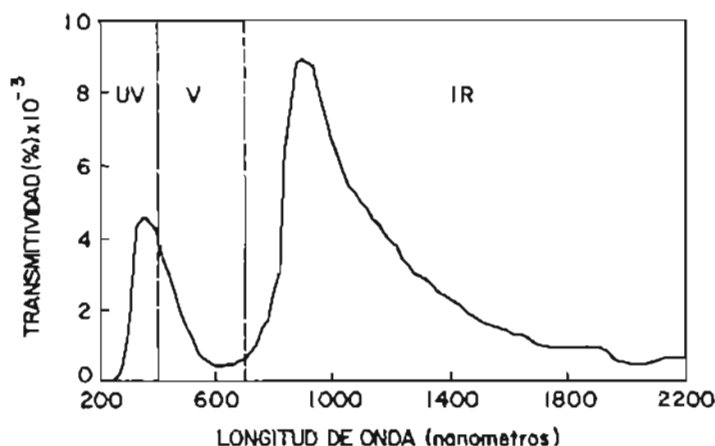
Si no se cuenta con ese equipo, otra opción es trabajar con elementos modulares, Figura 4: lámpara de mercurio-xenón como fuente de luz ultravioleta, visible y cercano infrarrojo, monocro-

FIGURA 5



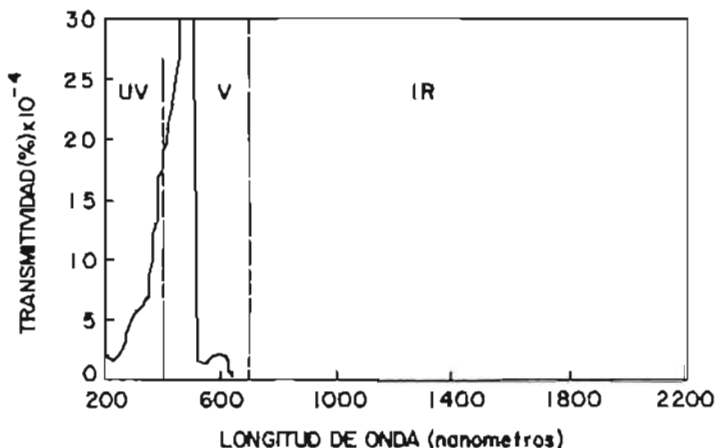
Transmitividad característica de una película, blanco y negro, velada y procesada por técnicas convencionales, como función de la longitud de onda de la radiación.

FIGURA 6



Transmitividad de un filtro formado por dos capas de papel mylar, como función de la longitud de onda de la radiación. Este filtro tiene la característica de no ser homogéneo.

FIGURA 7



Transmitividad de un vidrio de soldador del número 12, como función de la longitud de onda de la radiación.

mador de luz con mecanismo de relojería o controlado por computadora para efectuar el barrido espectral, recortador de haces de luz con generador sincrónico de señal de referencia para detección y amplificación de la señal sensible a fase (*lock-in amplification*) y registrador o computadora en línea para registrar los datos y procesarlos.

VII. Transmitividad de algunos materiales

A continuación se presentan los resultados de algunos materiales medidos en nuestros laboratorios. En la Figura 5 se presenta la transmitancia de una película fotográfica, blanco y negro, velada y procesada por medio de las técnicas convencionales. El grado de atenuación de la intensidad de la luz depende del tiempo de velado y revelado, y de las características particulares de la película. Aunque estos filtros dan una protección adecuada en el visible, e infrarrojo, todas tienen la propiedad de permitir el paso de radiación ultravioleta en una banda de 300-350 nanómetros. Esta radiación no la percibe el ojo humano, y el uso de sólo este tipo de materiales para ver el Sol puede producir lesiones graves en los ojos.

La transmitancia característica de un filtro hecho por dos capas de papel

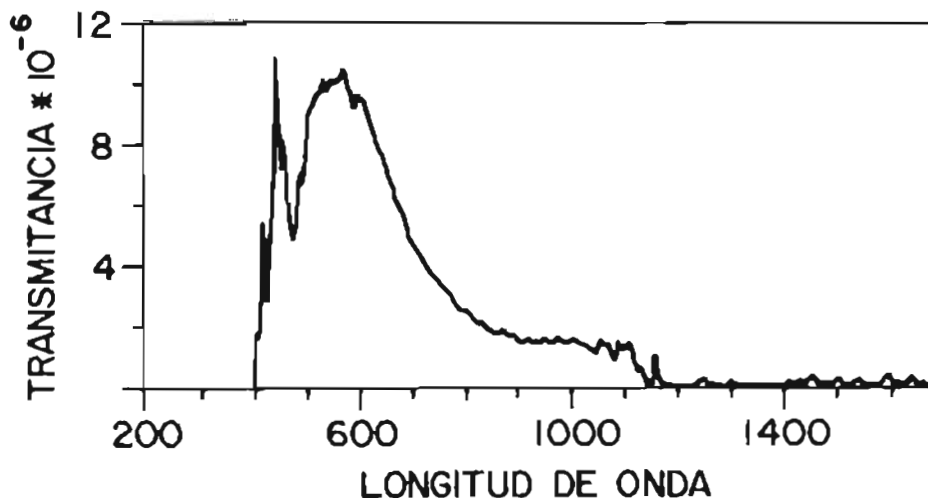
mylar aluminizado se muestra en la Figura 6. Este filtro, aunque atenúa considerablemente en el rango de luz visible, tiene dos ventanas muy grandes, una en el ultravioleta y otra en el infrarrojo cercano. Otro defecto, tal vez el más grave, es que no es homogéneo, lo cual se percibe mediante una simple observación visual poniéndolo enfrente de una lámpara o foco cualquiera, lo que permite el paso de la radiación sin atenuar, lo cual es extremadamente peligroso para el ojo.

Otro tipo de dispositivo que se usa para la observación del Sol son los vidrios de soldador. En la Figura 7 mostramos la transmitividad de un vidrio de soldador número (o "sombra") 12. En esta Figura se ve que el material tiene una ventana muy amplia que abarca el ultravioleta y el visible; en particular permite el paso de la luz cerca del azul con poca atenuación. La radiación infrarroja es atenuada casi completamente.

De estos resultados se puede concluir lo siguiente:

- i) La transmitividad óptica de un material depende de la longitud de onda de la luz.
- ii) Ninguno de los materiales estudiados atenúa en forma constante, en todo el espectro requerido, la transmisión de radiación.

FIGURA 8



Transmitividad de un filtro óptico construido a base de varios materiales [10], como función de la longitud de onda de la radiación.

iii) Todos los materiales estudiados tienen ventanas de transmisión (regiones del espectro donde la atenuación es mucho menor que en el resto). Consideramos que el uso de aquellos que permiten el paso de la luz ultravioleta, son los de mayor riesgo, dado que es la radiación que con más bajas intensidades puede ocasionar daño al ojo humano.

VIII. Nuevos materiales

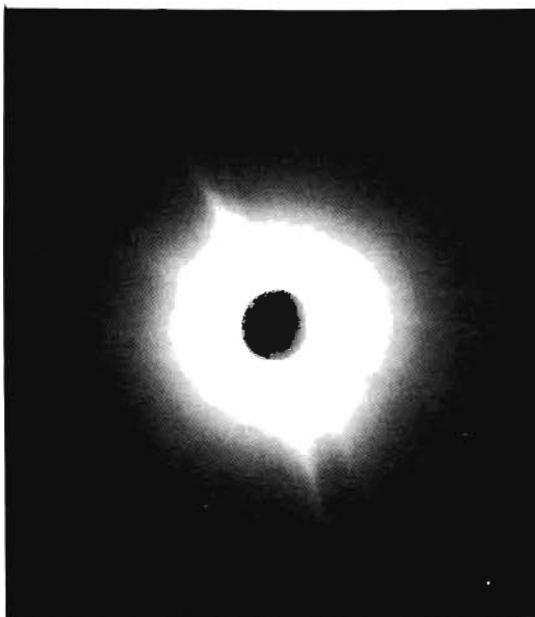
El estudio de las propiedades ópticas de materiales llevó a investigadores del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí al desarrollo de un filtro para observación solar (patente en trámite)¹⁰. Este filtro, está construido con una combinación de materiales con características ópticas complementarias. Como se puede apreciar en la Figura 8, éste tiene la propiedad de atenuar la radiación en todo el rango del espectro solar por factores mayores que los mínimos exigidos por la Secretaría de Salud. En la Figura 8 se muestra la curva de transmitancia de este filtro, denominado Eclipsol. Se ve que muestra transmisiones inferiores a una parte por millón en toda la región espectral requerida de 200 a 1,800 nm, que se debe comparar con la exigida por la SS de 2 partes por cien mil. Se ve que el margen de seguridad ofrecido por este filtro es muy adecuado para la protección de la vista humana.

Uno de los materiales que forman el filtro elimina toda la radiación ultravioleta con longitudes de onda menor de 368 nanómetros y la atenuación de la radiación en el resto del espectro se logra con película velada blanco y negro. Las características de este filtro permiten una observación solar sin los riesgos mencionados anteriormente.

IX. Conclusiones

La observación del Sol durante eclipses es un asunto delicado que requiere de filtros apropiados. El uso de filtros no adecuados puede traer como consecuencia daños importantes en los ojos. Hasta hace poco no se conocía ningún filtro

que brindara protección visual en todo el espectro de radiación solar. La investigación científica de nuevos materiales ha permitido el diseño de dispositivos que protegen la vista durante la observación solar. Estos filtros garantizan una observación segura del bello espectáculo que nos proporciona el Sol, particularmente durante los eclipses como el del pasado 11 de Julio de 1991.



Referencias

- ¹ Thekaekara, M.P., *Appl. Opt.*, Vol. 15, 1976, p 915.
- ² Kondratiev, K.Y., *Radiation in the Atmosphere*, Academic Press, New York, 1969, p. 107.
- ³ Granqvist, C.G., *Appl. Opt.*, Vol. 20, 1981, p. 2606.
- ⁴ *Handbook of Chemistry and Physics 66th Edition*, CRC Press, Boca Raton, Flida., 1986, p. F-146.
- ⁵ Sliney, D.H. and Freasier, B.C., *Appl. Opt.*, Vol. 12, 1973, p. 1297.
- ⁶ *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*, "Threshold Limit Values of Physical Agents Adopted by ACGIH for 1971" (ACGIH, Box 1937, Cincinnati, Ohio, 1971).
- ⁷ Chou, B.R., *Sky and Telescope*, Vol. 119, 1981.
- ⁸ Kuwabara, T. and Gorn, R.A., *Arch Ophthalmol.* Vol. 79, 1968, p. 69.
- ⁹ Sánchez Sinencio, F., *Ciencias*, Vol. 31, 1980, p. 91.
- ¹⁰ Mejía-Lira, F., Morán-López, J.L. y Villaseñor-González, P., patente en trámite, expediente 24384, folio 11916.