

El Leoncito, ¿un Centro de Referencia alternativo para radiación solar y ozono en Argentina?

B.A. de la Morena⁽¹⁾, M. Mosert⁽²⁾, J.M. Vilaplana⁽¹⁾

1) INTA/Estación Sondeos Atmosféricos El Arenosillo, Huelva (España)

2) CASLEO, San Juan, Argentina

Abstract.

Los efectos de la radiación UV sobre los seres vivos son muy diversos y su estudio ha merecido una atención considerable en los últimos años. Pueden referirse a la acción sobre la piel, sobre los ojos, sobre las plantas, etc. También el ADN se ve afectado, habiéndose localizado la acción de la radiación UV a nivel de las bases pirimidinas de la doble hélice del ADN, produciendo efectos que son oncogénicos y específicos en fotocarcinogénesis

El ozono de la estratosfera es una pantalla protectora contra los rayos ultravioleta solares, preserva nuestro medio ambiente y es esencial para la biosfera. Por debajo de los 240nm estamos protegidos por el oxígeno molecular, pero para longitudes de onda mayores es el ozono el responsable de la absorción de la radiación ultravioleta.

Este hecho justifica la gran proliferación de redes mundiales de medida de ozono y radiación ultravioleta desde tierra y desde satélite. La WMO y otros organismos internacionales están llevando a cabo un gran esfuerzo orientado a controles de QA/QC de la instrumentación y las bases de datos, haciéndose necesaria la calibración e intercomparación de forma regular de la instrumentación en centros de calibraciones reconocidos para ello, utilizando instrumentos patrón y laboratorio de calibraciones, de modo que las medidas de los diferentes instrumentos sean comparables entre si y utilicen la misma escala de referencia.

Periódicamente los espectroradiómetros y fotómetros que la Comunidad internacional dispone para observar y evaluar el contenido de ozono total y la radiación solar UV, deben ser calibrados e intercomparados. El Arenosillo es un centro de referencia internacional para este tipo de eventos desde el año 1999, debido a los 300 días de cielo despejado, uniforme albedo, infraestructura adecuada, instrumentación precisa y formación de su personal científico y técnico.

Se estima que estas condiciones ambientales y de infraestructura son también representativas del Observatorio de El Leoncito, pues está perfectamente dotado para ofrecer un servicio a la Comunidad en un área de alto interés científico y social.

El motivo de esta comunicación es pues el presentar las actividades que un Centro de este tipo requiere, con el objeto de que se evalúe el interés de una posible propuesta de El Cásleo a la Comunidad internacional para convertir a El Leoncito en un centro de referencia.

El ozono y la radiación UV. Descripción general.

Una parte considerable de la radiación UV procedente del Sol es absorbida a su paso por la atmósfera. El ozono es el principal responsable, impidiendo, de esta forma, que dicha radiación especialmente dañina para los organismos biológicos, alcance la superficie terrestre.

Conviene indicar, sin embargo, que la radiación UV también tiene efectos beneficiosos para animales y plantas, ya que una parte de dicha radiación interviene en la función fotosintética de los vegetales y en la síntesis de la vitamina D, elemento fundamental para el adecuado desarrollo de la estructura ósea en los vertebrados y especialmente en el hombre. Por lo tanto, su presencia en la atmósfera se presenta en un equilibrio crítico, en el que cualquier desplazamiento en uno u otro sentido podría llevar a resultados igualmente impredecibles.

En los últimos años, parece que se han acumulado suficientes evidencias para concluir que este equilibrio está siendo destruido por diversas actividades industriales, y que está teniendo lugar una destrucción generalizada de ozono sobre todo el planeta, presentando un especial dramatismo en la Antártida.

Para discutir los efectos que puede tener esta disminución del ozono en la radiación UV, es práctica habitual subdividir esta parte del espectro en tres zonas cuyo comportamiento ante una disminución de ozono es muy distinto (figura 1): la *UV-A* (320-400 nm), que es la más cercana a la región visible del espectro; la *UV-B* (280-320 nm) y la *UV-C* (para longitudes de onda inferiores a 280 nm).

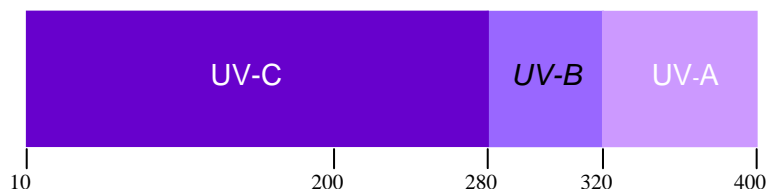


Figura 1.- Región ultravioleta del espectro electromagnético

El ozono prácticamente no absorbe la radiación UV-A, por lo que no se prevén incrementos en la intensidad como consecuencia de la disminución del ozono. Algo parecido ocurre con las radiaciones UV-C, que son completamente absorbidas por el ozono, hasta tal punto que sería necesario que se destruyese el 90% de la capa de ozono para detectar alguna variación significativa. Por el contrario, las radiaciones UV-B son extraordinariamente sensibles a cambios en el contenido de ozono de la atmósfera y serán estas radiaciones las que experimente un mayor incremento en los próximos años, con un grave impacto biológico sobre los seres vivos. En lo que respecta al ser humano, existe una relación entre la dosis de radiación UV-B recibida y la aparición de lesiones oculares y cutáneas, desde la simple quemadura solar, hasta el cáncer de piel. Esta relación no está cuantificada con precisión, pues la incidencia depende de una serie de factores, como son el color y tono de la piel, los hábitos de vida y el lugar de residencia. El estudio de los efectos de la radiación UV es un tema de investigación del máximo interés donde se están focalizando hoy en día una gran cantidad de recursos por su enorme repercusión. Sin embargo es un requisito imprescindible la correcta medida de esta magnitud, a fin de conocer su evolución espacial y temporal teniendo bien en cuenta los factores que la afectan, sin lo cual será muy difícil obtener resultados realistas y extraer conclusiones veraces sobre los efectos de la misma.

Se ha demostrado estadísticamente que en igualdad respecto a otros factores, el número de casos de cáncer de piel disminuye con la latitud. Ello es debido a la mayor inclinación de los rayos solares en las altas latitudes, lo que implica un mayor recorrido de la radiación a través de atmósfera y, por lo tanto, una mayor absorción. Así, a 30° de latitud se recibe en verano en el medio día una radiación UV-B aproximadamente tres veces superior a la que, en las mismas condiciones, alcanzaría una región situada a 60° de latitud.

Un efecto parecido tiene la altitud, ya que una parte importante de la radiación UV-B se absorbe en los niveles más bajos de la atmósfera (se estima que en las regiones que están a 1000 m de altura se recibe una intensidad de radiación UV-B entre el 10 y el 20% superior a la que llega al nivel del mar).

En cualquier caso, se estima que una disminución de ozono de un 1%, acarreará (según diversos autores) un aumento en el número de casos de cáncer de piel del orden del 4 y del 10%. De todas formas, hay que resaltar que existen otros factores (costumbres y hábitos) que pueden distorsionar la relación de causa-efecto, además de tener efectos acumulativos que no se manifiestan hasta pasados varios años, siendo mucho más sensibles los colectivos que están expuestos ocasionalmente a la radiación pero de forma muy intensa.

Las macromoléculas orgánicas, y en particular el ADN, que son las portadoras del código genético, son muy sensible al incremento de estas radiaciones, por lo que una disminución en la concentración de ozono en la atmósfera podría tener efectos mutágenos sobre muchas especies, cuyas consecuencias para el ecosistema mundial no están suficientemente estudiadas. La fotosíntesis vegetal también podría ser ligeramente inhibida, con la grave repercusión que podría tener para el equilibrio *oxígeno/dióxido de carbono* de la atmósfera. Asimismo, la producción agrícola se vería afectada, aunque unos vegetales en mayor medida que otros. En el medio marino las consecuencias podrían ser igualmente trágicas, ya que afectaría tanto a los organismos unicelulares como a los peces a través de la destrucción de ciertos microorganismos que son la base de la cadena alimentaria en el mar, aunque los efectos negativos se verían atenuados porque la capa de agua superficial constituye un filtro para algunas de las radiaciones más peligrosas.

Los componentes o elementos que afectan a la radiación UV son, por orden de importancia, la absorción del ozono. Como ya se ha mencionado, la dispersión por moléculas y la debida a aerosoles. Debemos también mencionar el albedo del suelo, que aunque para el caso de la radiación UV se suele considerar constante con la longitud de onda tiene mucha importancia en altas latitudes (nieve y hielo) y también debido a la gran variabilidad de los albedos sobre la superficie de la Tierra.

La mayor cantidad de ozono se produce en zonas Ecuatoriales, debido a la mayor insolación. Desde allí, los movimientos circulatorios (ondas de gravedad) lo transportan a latitudes mayores que en esa época estén en invierno, de tal forma que, pese a ser la zona donde mayor es la producción de ozono, es donde éste se encuentra en menores cantidades.

Los valores máximos de ozono en una zona determinada se encuentran al comienzo de la primavera y los mínimos en otoño, debido a que el régimen de vientos estratosféricos está dirigido hacia el hemisferio de invierno, haciéndose más intensos al finalizar esta estación y disminuyendo hacia el final de la primavera. Esta es la razón por la que la distribución del ozono tenga un marcado carácter cíclico con periodicidad anual.

Los efectos de la radiación UV sobre los seres vivos son muy diversos y su estudio ha merecido una atención considerable en los últimos veinte años. Los primeros estudios sobre el eritema se abordaron hace más de 70 años y pronto quedó establecido que el espectro de acción del eritema humano muestra un máximo absoluto en los 297 nm y un mínimo relativo en los 280 nm. La CIE (Comisión Internacional de l'Eclairage) adoptó en 1987 una "Curva Estándar de Eritema" propuesta originariamente por Coblentz y Stair (1934) y establecida de forma definitiva por Mc Kinley y Diffey (1987). Esta curva es la más utilizada actualmente para la determinación de las dosis eritemáticas.

El análisis de la influencia eritemática se realiza a partir de la dosis mínima necesaria para producir un enrojecimiento apreciable en una piel normal (MED, Minimal Erythema Dose). En muchas ocasiones, en vez de dosis mínima se emplea el tiempo necesario para producir dicho enrojecimiento, dado en minutos. La MED siempre está referida a un cierto tipo de piel considerada como normal, y por lo tanto, será necesario modificar esta MED en función de otros factores como puede ser el color de la piel, los posibles medicamentos fotosensibilizadores o simplemente la posición relativa de la superficie irradiada respecto a la radiación incidente, utilizando parámetros como la latitud.

Desde hace varios años, algunos países han introducido diferentes estrategias para cuantificar la irradiación ultravioleta eritémica en un número que pueda ser fácilmente entendible por el público en general. El punto de partida de esta acción fue la evidencia de que el aumento de la irradiación UV.B incrementa significativamente el riesgo de contraer cáncer de piel, afecciones oculares y toda una serie de patologías de las cuales la población debería ser informada adecuadamente. Así pues, este índice ultravioleta será útil a la hora de planear actividades al aire libre y prevenir sobreexposiciones al sol.

Las definiciones usadas para calcular este "índice UV" varía de un país a otro y se hace necesario definir un método común estándar único.

Tras diferentes congresos internacionales la comunidad científica llegó a un acuerdo en 1966. El estándar índice UV UVI (UV-Index) se define de la siguiente manera:
1 UVI corresponde a una irradiancia de $1/40 \text{ W/m}^2 = 25 \text{ mW/m}^2$ de radiación UV.B efectiva.

La dosis eritémica mínima MED (Minimal Erythemal Dose) se define como la dosis de radiación capaz de producir un enrojecimiento apreciable en una persona de piel catalogada como Tipo II. 1 MED = 210 J/m^2 de irradiancia UV efectiva. No obstante, se puede definir igualmente cual sería la dosis mínima necesaria para producir un eritema en una persona con tipo de piel III ó IV.

Situación geográfica de los observatorios.

Los observatorios de El Arenosillo y El Leoncito cuentan con situaciones geográficas privilegiadas para la observación de la atmósfera debido a una excelente climatología en cuanto a número de días de cielo despejado, un gran número de horas de sol y albedo estable espacial y temporalmente.

Observatorio de El Arenosillo.

La Estación de Sondeos Atmosféricos (ESAt) de “El Arenosillo”, dependiente del Departamento de Observación de la Tierra, Teledetección y Atmósfera del Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica del INTA, está situada en el Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA) en Mazagón - Moguer (Huelva), España. La ESAt, está localizada en el Suroeste de Europa ($37.1 \text{ N} - 6.7 \text{ W}$) y a 20 metros sobre el nivel del mar. Es un Observatorio dedicado a la investigación de la atmósfera desde el año 1969, y que está integrada en el Ionosphere International Network con el código EA-036 y con el número 213 de la red mundial de vigilancia de ozono GO_3OS y de radiación UV. Cuenta con la serie de medidas de ozono total en columna más larga de España con datos del único espectrofotómetro Dobson en España desde 1980. Desde 1994 se cuenta con datos de irradiancia UV con diversa instrumentación espectral, de banda ancha y de banda estrecha (YES UVB-1, Brewer MK-III, YES MFR-7, Eldonet, Kipp&Zonen CM-11, cámara de todo cielo, etc).

Dadas las excelentes condiciones geográficas, orográficas, climatológicas (300 días de sol al año) y dotación tanto instrumental como humana, se llevan a cabo de forma regular, campañas de calibración-Intercomparación de instrumentos para la medida de ozono total y radiación UV desde 1999, como resultado a numerosos acuerdos de colaboración con organismos nacionales e internacionales.

El Arenosillo cuenta en la actualidad con el único laboratorio de calibraciones radiométricas en UV operativo en España y con trazabilidad al *World Radiation Centre*. Fruto de la labor investigadora en este ámbito son la tesis doctoral “*Medida y análisis del ozono y radiación solar ultravioleta en El Arenosillo-INTA*”, un gran número de publicaciones, presentaciones a congresos y desarrollo de trabajos de fin de carrera y suficiencia investigadora.

Las principales líneas de investigación de la ESAt son:

1. Monitorización continuada de: Ozono total, ozono troposférico, aerosoles, irradiancia espectral UV, irradiancia integrada en UV.B, UV.A, y PAR.
2. Control de calidad de las bases de datos y distribución a centros internacionales de datos como y grupos de investigación el como Centro Europeo y a los Centros Mundiales de Datos A (EEUU) C1 (UK) y C2 (Japón), y con una intensa participación en la Acciones COST 238, 251, 271, 296 y 726 de la UE.

3. Calibración, caracterización y desarrollo de instrumentación para la medida de radiación solar ultravioleta y ozono.
4. Desarrollo de modelos de transferencia radiativa y predicción de índice ultravioleta y ozono.
5. Estudio del comportamiento del ozono superficial y sus precursores en la provincia de Huelva.
6. Caracterización del aerosol atmosférico en la región del Golfo de Cádiz por detección remota e *in situ* y diseño de instrumentación para toma de muestra.



Figura 2.- Situación geográfica del observatorio El Arenosillo

Observatorio de El Leoncito.

El CASLEO se encuentra a 2552 m sobre el nivel del mar, en las estribaciones occidentales de la cadena del Tontal, en la precordillera sanjuanina, 30 km al sur de la localidad de Barreal, en el Dto. Calingasta de la Provincia de San Juan (Argentina). Todo el complejo se halla dentro de una Reserva Astronómica de 70.000 hectáreas, lo que garantiza la preservación de la calidad de su cielo. A partir de 1995 esta área fue declarada Reserva Natural Estricta. Las estadísticas sobre un intervalo de 20 años indican que el lugar goza de 270 a 300 noches despejadas por año.

En el sitio se dispone de comodidades hoteleras para unas 20 personas, con comedor y habitaciones. Se cuenta además con talleres de electrónica, mecánica y sala de computación. Se encuentra en servicio una línea eléctrica comercial, pero el Observatorio cuenta con una usina propia para casos de emergencia.

El Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) fue formalmente creado el 10 de mayo de 1983 por un acuerdo firmado entre las siguientes instituciones:

Secretaría para la Tecnología, la Ciencia y la Innovación productiva ([SEPCyT](#)).

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas ([CONICET](#)).

Universidad Nacional de La Plata ([UNLP](#))
Universidad Nacional de Córdoba ([UNC](#)).
Universidad Nacional de San Juan ([UNSJ](#)).

Inaugurado el 12 de septiembre de 1986, comenzó su operación efectiva el 1 de marzo de 1987.

El CASLEO es una institución que brinda sus servicios a la comunidad científica a efectos de que los astrónomos puedan llevar a cabo sus programas de observación. En este sentido, sus principales funciones son la operación, el mantenimiento, y el desarrollo de instrumental astronómico, proveyendo además apoyo técnico, administrativo y de infraestructura a los científicos autorizados a hacer uso del servicio.



Figura 3.- Situación geográfica del observatorio El Leoncito

Descripción de la instrumentación.

Espectrofotómetro Dobson



Figura 4.- Fotografía del espectrofotómetro Dobson#120 en “El Arenosillo”

La medida del contenido total de ozono con el espectrofotómetro Dobson se basa en medir la diferencia relativa de la intensidad con la que nos llega la radiación ultravioleta emitida directamente por el Sol o la Luna en distintos pares de longitudes de onda, conforme a ley de Beer y, de forma indirecta, por la luminosidad del cenit.

Estos pares de longitudes de onda son los que citamos anteriormente como A, C, C' y D, que expresados en manómetros corresponden a:

| A | C | C' | D |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 305.5 – 325.4 | 314.4 – 332.4 | 332.4 – 453.6 | 317.6 – 339.8 |

Tabla 1.- Pares de longitudes de onda empleados por el espectrofotómetro Dobson

El par A, por ejemplo, consta de 305.5 nm, que es fuertemente absorbida por el ozono, y de 325.4 nm, que llega a nosotros con mayor intensidad por presentar una leve absorción por el ozono. En el exterior de la atmósfera las intensidades que se registran en estas dos longitudes de onda son esencialmente iguales. En el recorrido de ambos haces a través de la atmósfera ambos rayos se ven atenuados por el *scattering* de las moléculas de aire (Rayleigh) y por los aerosoles; adicionalmente, $\lambda = 305.5$ nm es fuertemente atenuada al atravesar la capa de ozono, mientras que la atenuación registrada por este motivo a $\lambda = 325.4$ nm es relativamente pobre. Así pues, un incremento del contenido total de ozono presente en la atmósfera se traduce en una mayor absorción en $\lambda = 305.5$ nm con su consiguiente pérdida de intensidad, mientras que $\lambda = 325.4$ nm permanece prácticamente inalterable.

Las observaciones se realizan atendiendo a las recomendaciones de la OMM a unos ángulos solares determinados. En la práctica todos los observatorios equipados con este sistema realizan cinco observaciones diarias a unas λ prefijadas siempre que las condiciones meteorológicas lo permitan.

Espectrofotómetro Brewer



Figura 4.- Fotografía del espectrofotómetro Brewer MK-III #150 en “El Arenosillo”

El espectrofotómetro Brewer está diseñado para la medida del contenido total del ozono y SO₂ (NO₂ opcional), determinar perfiles verticales de ozono en la atmósfera por el método Umkehr y el espectro de irradiancia ultravioleta. Este sistema funciona de forma totalmente automática ejecutando a una serie de comandos prefijados en una rutina de trabajo (*schedule*) atendiendo al criterio de ángulos cenitales y está diseñado para trabajar a la intemperie.

El sistema completo está constituido por un trípode, un *tracker* o sistema de seguimiento azimutal sobre el que se monta la caja sellada que alberga al espectrofotómetro y un ordenador PC desde el que se controla el sistema y almacena la información registrada.

El espectrofotómetro consta de un sistema óptico de entrada, en el que tenemos dos posibilidades, a través de un receptor coseno (domo) o a través de un prisma que apunta directamente al sol. La elección del receptor se hará en función del tipo de observación (sol directo, luz cenital, global ultravioleta o lámparas de calibración). El seguimiento del sol así como la atenuación del haz mediante dos ruedas de filtros para adaptar la señal al nivel óptimo de operación del sistema sin que se sature, se hacen de forma automática (Kerr et al, 1985).

El espectrofotómetro es un Elbert modificado, que en el caso del Brewer MK-III está constituido por un doble monocromador, que opera con una red holográfica de difracción. El primer monocromador dispersa la luz en el plano focal donde están posicionadas seis rendijas de salida para las correspondientes longitudes de onda ($\lambda = 302.2$ nm empleada en la calibración con lámpara de mercurio, $\lambda_1 = 306.6$ nm, $\lambda_2 = 310.1$ nm, $\lambda_3 = 315.5$ nm, $\lambda_4 = 316.8$ nm y $\lambda_5 = 320.1$ nm) con una resolución aproximada de 0.6 nm. El segundo monocromador tiene la función de filtrar la *stray light*.

El instrumento tiene dos posibilidades de funcionamiento: una rápida, empleada para la medida del contenido total de ozono (3 min a sol directo, 4 min al cenit) midiendo cíclicamente las cinco longitudes de onda mientras la red de difracción permanece fija, y otro lento (4 min) en la medida ultravioleta, en la que es la red de difracción la que se mueve realizando un barrido entre 286.5 nm y 363 nm.

La luz procedente del segundo monocromador es focalizada mediante una lente de Fabry al fotomultiplicador (low noise EMI 9789QA). El PC comunica con el espectrofotómetro mediante un enlace RS-232.

La calibración del instrumento se mantiene igualmente de forma automática mediante una lámpara interna halógena de tungsteno y las líneas espectrales de otra lámpara, también interna, de mercurio.

Se comercializan tres modelos de espectrofotómetros Brewer, dos de ellos de un solo monocromador (Brewer MK-II y Brewer MK-IV) y otro de doble monocromador (Brewer MK-III), que es el que venimos tratando.

Piranómetro YES UVB



Figura 5.- Fotografía del piranómetro YES UVB-1 en “El Arenosillo”

El Piranómetro UVB-1 es un instrumento de precisión para la medida de la radiación UV-B biológicamente activa. La técnica de medida empleada por este instrumento utiliza filtros de vidrio coloreado y un fósforo fluorescente sensible UV-A con el fin de cancelar toda la luz visible del sol y convertir la UV-B en luz visible, la que, a su vez, se mide mediante un fotodetector de estado sólido. El piranómetro UVB-1 es un instrumento robusto, diseñado para proporcionar la máxima estabilidad de funcionamiento a largo plazo en estaciones remotas desatendidas.

El Piranómetro UVB-1 mide la irradiación solar eritemática global. La radiación global incluye la luz transmitida directamente a través de la atmósfera, así como la dispersada por los gases presentes y los sólidos en suspensión. Al contrario que la luz visible, la UV-B dispersada es un componente principal y, bajo ciertas condiciones, el dominante de la radiación global. El diseño del Piranómetro UVB-1 asegura la medida adecuada de ambos componentes.

El Piranómetro UVB-1 emplea un filtro de fósforo fluorescente para convertir la luz UV-B a luz visible que, a su vez, se mide por un fotodetector de estado sólido.

La radiación solar, directa y dispersa, se transmite a través de la cúpula de vidrio (intemperie). La luz visible, excepto una pequeña fracción de la luz roja, se absorbe por el primer filtro, un filtro de vidrio negro transmisor UV. La luz transmitida a través de este filtro alcanza el fósforo sensible UV-B. Este material absorbe la luz UV-B y la reemite como luz visible, predominantemente en las longitudes de onda correspondientes al verde. Un segundo filtro, de vidrio verde, permite pasar la luz fluorescente del fósforo, mientras bloquea la porción roja procedente del vidrio negro. La intensidad de la luz fluorescente se mide por un fotodiodo de estado sólido de GaAsP. Un amplificador térmicamente estable comanda otro lineal para proporcionar una señal de salida a baja impedancia de 0-5 Vcc. Los filtros de vidrio, fósforo y fotodiodo se mantienen a +45 C para asegurar que la salida no es sensible a cambios en la temperatura ambiental

Descripción intercomparaciones.



Figura 3.- Campaña de intercomparación El Arenosillo 2007.

Dentro de las actividades de la ESA, para el control de la calidad en la medida de ozono y radiación ultravioleta, se programan regularmente campañas de calibración en cooperación con organismos nacionales e internacionales desde 1999, en las que participan tres tipos de instrumentos: Espectrofotómetros Dobson para medida de O₃ total con el *Regional Dobson Calibration Centre-Europe* (RDCC RA-VI); Espectrorradiómetros Brewer para la medida de O₃ total e irradiancia espectral UV, con el *Regional Brewer Calibration Centre-Europe* operado por el INM-Izaña y el Brewer itinerante de referencia mundial para ozono de *International Ozone Services INC.*; e Instrumentos de Banda Ancha para la medida de Radiación Eritemática, en colaboración con la *Universidad de Extremadura* y el *World Radiation Center*.

Los espectrofotómetros Dobson y Brewer son en la actualidad los dos instrumentos reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial como más adecuados para la medida del contenido total de ozono en columna. Existen amplias comunidades científicas asociadas a estos dos instrumentos, Dobson y Brewer, las cuales constituyen los foros más relevantes a nivel mundial en la investigación del ozono estratosférico. El evento organizado en El Arenosillo en verano de 2007 fue la primera ocasión en la que se calibraron e intercompararon conjuntamente instrumentación de estas dos comunidades y sus respectivos instrumentos patrón. Así mismo, constituyó un foro científico sin igual para el encuentro de las dos comunidades científicas.

De este modo, la campaña de intercomparación-calibración de espectrofotómetros Dobson, se llevó a cabo en cooperación con el *Regional Dobson Calibration Centre-Europe* (RDCC RA-VI), con sede en el Meteorological Observatory Hohenpeissenberg (Alemania). Participaron de un total de seis instrumentos procedente de distintos países europeos.

La campaña de intercomparación-calibración de espectrorradiómetros Brewer, se llevó a cabo en cooperación con el *Regional Brewer Calibration Centre-Europe* operado por el INM-Izaña y contó adicionalmente con la participación del espectrorradiómetro Brewer itinerante de referencia mundial para ozono perteneciente al *International Ozone Services INC.* Participaron un total de 16 Brewer y 2 Bentham.

Por otra parte, dado el gran número de instrumentos de Banda Ancha, para la medida de radiación eritemática y de redes de medida de UVI operativas, tanto a escala nacional como internacional, basadas en estos instrumentos, se convocó una campaña de calibración, simultánea a las citadas anteriormente, en colaboración con la *Universidad de Extremadura* y el *World Radiation Centre (WRC, Davos, Suiza)*. La simultaneidad de las campañas posee un gran interés, pues permitió que la campaña de instrumentos de banda ancha se beneficiase de la presencia de instrumentos espectrales patrón procedentes de instituciones internacionales, los cuales constituyen los patrones de referencia mundial para la medida de radiación ultravioleta.

Además, esta campaña estuvo muy ligada a algunos de los objetivos de la Acción COST-726 (“Long term changes and climatology of the UV radiation over Europe”, vigente en el periodo 2004-2009), en la cual participa España junto con otros 22 países de la Unión Europea y dos extracomunitarios. Concretamente, uno de los objetivos es la “mejora de la homogeneización de las medidas de radiación UV realizadas con instrumentos de las diversas redes europeas para que puedan ser comparables entre sí”.

En este sentido, el INTA / El Arenosillo cuenta con un delegado nacional en la Acción COST-726 que ha colaborado activamente en las actividades del WG4. Concretamente, ha participado recientemente en la campaña de calibración internacional de instrumentos de banda ancha para la medida de radiación eritemática, llevada a cabo en el verano de 2006 en el WRC (Davos, Suiza), en cooperación con el INTA / El Arenosillo. A tenor de ésta y dado el gran número de instrumentos operativos en territorio español que no pudieron ser atendidos en dicha campaña, se convocó esta campaña de calibración en INTA / El Arenosillo. Esta campaña puede considerarse el punto de arranque que permita a las distintas redes de medida españolas la adquisición de los protocolos de calibración y medida recomendados por la Acción COST-726, lo que redundará en una mejora generalizada de la calidad de las medidas que se realizan actualmente sobre territorio español.

Esta campaña de calibración implicó tanto actividades de campo como de laboratorio. Las actividades de campo se llevaron a cabo coincidiendo con las campañas de Dobson y Brewer, periodo en el que estuvo operativo el espectrorradiómetro de referencia para Europa, unidad QASUME del WRC.

Laboratorio de calibraciones radiométricas “El Arenosillo”.

El laboratorio de Calibraciones Radiométricas, está situado en la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo” (ESAt).

Para poder controlar y asegurar la calidad de las medidas que se realizan es necesario disponer de un lugar cuyas condiciones sean adecuadas para la calibración y caracterización de los instrumentos que se usan para la medida de la radiación solar ultravioleta y visible.

En este sentido la ESAt se sitúa en un lugar privilegiado en cuanto a climatología y albedo se refiere, contando con unos 300 días de cielo despejado y un horizonte prácticamente plano, no en balde se encuentra inmersa en un bosque de pinos que no experimenta cambios sensibles de color a lo largo del año, constituyendo un albedo constante y uniforme en espacio y tiempo, de 0.1 en la región visible y 0.05 en la región ultravioleta. Todo esto permite definir el emplazamiento de la ESAt como una zona privilegiada para la medida de la radiación solar, existiendo en la misma, una dotación instrumental amplia y de gran utilidad a numerosos organismos e institutos nacionales e internacionales, los cuales aprovechan las óptimas condiciones como observatorio de la atmósfera de la ESAt temporalmente o de forma continuada para la observación de diferentes parámetros atmosféricos.



Fig. 4 Zona de control del laboratorio

El laboratorio radiométrico de la ESAt consta de dos zonas: una de calibración y otra de control. Ambas zonas están separadas entre sí, de modo que se evita el paso de luz parásita desde la zona de control a la de calibración, mediante una densa cortina negra, asegurando también la protección de los operarios de la luz UV de las lámparas que se utilizan durante el proceso de calibración.

La calibración frente a un estándar, fuente con irradiancia y propiedades geométricas perfectamente conocidas, es necesaria para la exactitud absoluta, así como disponer de un instrumento estable y bien caracterizado. Asegurar la calidad de los datos que se obtienen dependerá de un buen mantenimiento y caracterización del instrumento.

En el laboratorio es necesario controlar la temperatura y la humedad a la que se van a realizar las calibraciones. Mediante un equipo de aire acondicionado, y una sonda de temperatura y humedad, se mantiene el laboratorio a una temperatura de 23 ± 3 °C, y a una humedad relativa no superior al 60%. La estabilización en temperatura y humedad debe realizarse al menos cinco horas antes del comienzo de la calibración, con el instrumento dentro del laboratorio para asegurar su correcta estabilización a las condiciones ambientales del laboratorio.

La zona de calibración se encuentra separada mediante una densa cortina negra de la zona de control, evitando el paso de luz parásita hacia la zona de calibración y asegurando la protección de los operarios frente a la luz UV de las lámparas que se utilizan en el laboratorio.



Fig IV.2: Columna de calibración y sistema de rotación

El laboratorio debe acondicionarse para la eliminación de la denominada straylight, radiación proveniente de otras fuentes o reflejada de la misma lámpara de calibración. La straylight se evita pintando las paredes de color negro mate, y se cubre el espacio entre el receptor del instrumento y la lámpara para evitar reflejos debidos, sobre todo, a las partes metálicas del propio instrumento, para ello se utilizan diafragmas limitadores de campo o telas negras muy tupidas.

El acceso al laboratorio se realiza por la zona de control del mismo. En esta zona se encuentran instalados todos los equipos necesarios para el control de las calibraciones: ordenador, fuentes de alimentación, multímetro, etc., cuyos LEDs deben mantenerse fuera de la zona de calibración,

además del mobiliario y las herramientas necesarias para el trabajo desarrollado en el laboratorio.

En la zona destinada a las calibraciones se encuentra la columna de calibración, ésta consiste en un eje central (tubo cilíndrico) de 50 Kg que presenta dos brazos perpendiculares a éste, con geometría en forma de L, los cuales pueden desplazarse en la dirección vertical mediante unos volantes dispuestos a tal efecto en cada uno de ellos.

En el brazo superior de la columna se dispone de un puntero láser para el alineamiento de la óptica de entrada de la instrumentación a calibrar con la lámpara de calibración, y en el segundo brazo se sitúa el sistema de sujeción de la lámpara de calibración (housing). Tanto el láser de apuntamiento como la lámpara de calibración se sitúan sobre un desplazador micrométrico XY, estos servirán para el alineamiento de ambos haces.

El láser de nivelación es un láser de diodo de haz cilíndrico garantizado a 635 nm, y la lámpara de calibración es una lámpara estándar de irradiancia espectral (200 A-H) de cuarzo halógena de tungsteno de 1000 W, con filamento horizontal en espiral, certificada por NIST.

Bajo la columna de calibración se sitúa un trípode con un equipo diseñado para controlar el giro de los instrumentos de banda ancha en la calibración en respuesta angular de los mismos. Este sistema de rotación se controla mediante un software que permite la adquisición de todos los datos necesarios para la calibración en respuesta angular de forma automática, presentando los datos en formato de texto y en hoja de cálculo, y permitiendo que el control de la validez de la calibración se pueda llevar en tiempo real y de forma simultánea a la calibración. El software permite observar la gráfica de calibración instantáneamente, tanto la curva teórica como la experimental, permitiendo observar la simetría entre las mismas, así como los valores que se van obteniendo para las diferentes medidas.

En la zona de calibración también se dispone de una fuente de Xenón de 450 W, una mesa sobre la que se sitúa un doble-monocromador, un banco óptico, y una esfera integrante con un fotodiodo de referencia y salida al instrumento, para poder realizar la calibración en respuesta espectral relativa, de los instrumentos de banda ancha. Para esta calibración también se ha creado un software de control que permite controlar el instrumento y el fotodiodo utilizado para la calibración durante la misma.

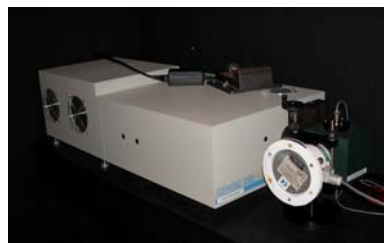


Fig IV.3: Doble-monocromador y esfera integrante

Centros de referencia e instrumentos master.

Para la realización de estas campañas de intercomparación y para el desarrollo de un laboratorio de calibraciones radiométricas, la intervención de estándares internacionales, que los procedimientos estén conforme a las recomendaciones de la WMO (*World Meteorological Organization*), que los detectores usados en el laboratorio tengan trazabilidad a centros de referencia y que la intercomparación se realice frente a los instrumentos Standard itinerantes de los centros regionales de calibración.

La WMO publica regularmente documentos técnicos con las principales recomendaciones y protocolos a seguir en la operación, calibración y procesado de datos de instrumentos para la medida de ozono, radiación UV espectral y de banda ancha. Del mismo modo, la WMO auspicia la creación de centros regionales de calibración sobre las diferentes regiones del planeta, la región VI corresponde a Europa y la región III a Sudamérica.

El World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC) del servicio meteorológico de Canadá, gestiona la base de datos mundial de radiación solar UV y Ozono al tiempo que realiza análisis de calidad de las series de datos recibidas, comunicando a los centros que envían los datos resúmenes periódicos sobre la comparación de sus datos con otros observatorios y con satélites, alertando al proveedor sobre posibles errores en sus datos y recomendaciones sobre la calibración de la instrumentación y procesado de datos. Las personas de contacto en el WOUDC son Tom McElroy (tom.mcelroy@sympatico.ca) y Ed Hare (ed.hare@ec.gc.ca).

El Servicio meteorológico de Canadá, opera y mantiene la triada mundial de referencia de espectrorradiómetros Brewer, y es la empresa Internacional Ozone Services (IOS Inc) (<http://www.io3.ca/>) la responsable de transferir la calibración de referencia de esta triada a todos los observatorios del mundo. Esta transferencia de calibración se hace a los patrones secundarios de los diferentes centros regionales de calibración para que a su vez estos sirvan como patrones para los instrumentos existentes dentro de su región. Estas calibraciones suelen realizarse en campañas de calibración en observatorios con buenas condiciones atmosféricas y con infraestructura adecuada para atender un gran número de instrumentos e investigadores, como es el caso de El Arenosillo y como podría ser el caso de El Leoncito.

Para las calibraciones en irradiancia espectral ultravioleta, se hace necesario un laboratorio de calibraciones radiométricas que cuente con lámparas certificadas por algún laboratorio acreditado como puede ser NIST, PTB, Optronix o PMOD/WRC. Una vez transferida la escala de calibración de estas lámparas los instrumentos, se hace igualmente necesaria una campaña de intercomparación de campo frente a un instrumento patrón, ya que debido al fuerte gradiente del espectro solar en la región UV y sus estructuras rápidas, es normal que instrumentos calibrados frente al mismo patrón presenten grandes deficiencias en medidas de campo debido a características intrínsecas a cada instrumento como el rango dinámico, umbral de detección, precisión en longitud de onda, resolución espectral, repetitividad, etc.

La referencia europea para irradiancia espectral ultravioleta es la unidad QASUME (Quality Assurance of Spectral Ultraviolet Measurements in Europe), actualmente operada por el World Radiation Centre en Davos (Suiza) bajo la responsabilidad de Julian Gröbner (julian.groebner@pmodwrc.ch).

Como se ha comentado anteriormente, en la actualidad, están proliferando rápidamente redes de medida de irradiancia espectral ultravioleta, para informar a la población de los niveles de índice ultravioleta relativos a efectos eritemáticos sobre la población, basadas en instrumentos de banda ancha del tipo UV-B-1. La calibración de estos instrumentos combina una caracterización de laboratorio en la que es preciso determinar el error angular y respuesta espectral relativa de los instrumentos y una calibración absoluta en campo frente a un espectrorradiómetro de referencia debidamente calibrado conforme a lo descrito en el apartado anterior. Los

procedimientos de instalación, mantenimiento, procesado de datos y calibración de estos instrumentos aparecen descritos en el report de la WMO TD N° 884.

Los laboratorios utilizados para la caracterización de instrumentación espectral y de banda ancha también son intercomparados regularmente al igual que los instrumentos utilizados como master, para garantizar la trazabilidad entre ellos (Incluir referencia)

Los espectrofotómetros Dobson son los instrumentos primarios reconocidos por la WMO para la medida del contenido total de ozono en columna. En ellos están basadas las series climatológicas mas largas de observaciones de la capa de ozono. Estos instrumentos han de ser calibrados regularmente frente a un patrón de referencia mediante intercomparación de campo. En Europa se cuenta con un Centro Regional de Calibraciones para Dobson (RDCC) en Hohenpeissenberg, Alemania. Las calibraciones absolutas a los instrumentos operativos en Europa son transferidas mediante intercomparación directa en campañas organizadas en los observatorios de Hohenpeissenberg (Alemania), Arosa (Suiza) y El Arenosillo (España).

Para el caso de América, se cuenta con el patrón de referencia mundial del World Dobson Calibration Centre perteneciente a la NOAA, en Boulder, Colorado; siendo Robert B. Evans el responsable de la referencia mundial (Robert.D.Evans@noaa.gov , <http://www.cmdl.noaa.gov/ozwv/dobson/>)

Bibliografía.

G. Hülsen, J. Gröbner, A. Bais, M. Blumthaler, P. Disterhoft, B. Johnsen, K. O. Lantz, C. Meleti, J. Schreder, J. M. Vilaplana Guerrero, and L. Ylianttila. "Intercomparison of erythral broadband radiometers calibrated by seven UV calibration facilities in Europe and the USA". Atmospheric Chemistry and Physics Discussion. Vol.8, PP:2249-2273, Germany, 2008

Madronich, S. and F. R. de Grujil, Stratospheric Ozone Depletion between 1979 and 1992: Implications for Biologically Active Ultraviolet-B Radiation and Non-Melanoma Skin Cancer Incidence, Photochem. Photobiol. 59, 541-546, 1994.

McKinlay, A. F. and B. L. Diffey, A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, in Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations, W. R. Passchler and B. F. M. Bosnjakovic, (eds.), Elsevier, Amsterdam, 1987.

Seckmeyer, G., A. Bais, G. Bernhard, M. Blumthaler, C.R. Booth, P. Disterhoof, P. Erikse, R.L. McKenzie, M. Miyauchi, and C. Roy. "Instruments to measure solar ultraviolet radiation, Part 1, Spectral instruments", WMO/GAW rep. 125, World Meteorol. Org, Geneva, 2001.

Webb, A.R., B.G. Gardiner, T.J. Martin. "Guidelines for Site Quality Control of UV Monitoring". World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch. Report N°126. WMO TD N° 884. 1998.

Vilaplana, J.M., E. Luccini, B.A. de la Morena, Preliminary study of the uv.b irradiance sensitivity to the total ozone content variations, Proceedings, European Conference on Atmospheric UV Radiation. Helsinki, Finland. 29 Jun– 2 Jul 1998.