

Tandil, nuevo sitio de la red SAVER-Net de monitoreo de radiación solar (UV-Total) en la Provincia de Buenos Aires

Elian Augusto Wolfram^{1,2,3}, Pablo Facundo Orte¹, Raúl D'Elia¹, Marcelo Cabezas¹, Facundo Carmona^{2,4}, Raúl Rivas⁴, Eduardo Luccini⁵

¹ Unidad de Desarrollo Estratégico para la Defensa (UNIDEF) - Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (UNIDEF- CEILAP) Ministerio de Defensa - Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnica (MINDEF-CONICET), Juan Bautista de La Salle 4397, (B1603ALO), Villa Martelli, Provincia de Buenos Aires, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científica y Técnica (CONICET)

³ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamenteo de Ingeniería Electrónica, Medrano 951 (C1041AAJ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

⁴ Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Instituto de Hidrología de Llanuras, (IHLLA), Paraje Arroyo Seco, Campus Universitario, (B7000), Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina

⁵ CONICET, Centro de Excelencia en Productos y Procesos de Córdoba (CEPROCOR), Sede Santa María de Punilla, Pabellón Ceproc, (X5164), Córdoba, Argentina

⁶ Pontificia Universidad Católica Argentina, Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Av. Pellegrini 3314, (2000), Rosario, Argentina

ewolfram@citedef.gob.a

Recibido el 28 de julio de 2019, aprobado el 15 de agosto de 2019

Resumen

El Convenio firmado en 2018 entre la Facultad Regional Buenos Aires (FRBA) de la UTN, y el Instituto de Hidrología de las Llanuras dependiente de la CICPBA, el CONICET y la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, posibilitó la rápida ampliación de la red SAVER-Net con la instalación de un nuevo sitio de monitoreo de radiación solar (UV y Total) en Tandil, centro de la Provincia de Buenos Aires, en octubre de 2018, contribuyendo al interés conjunto de las instituciones en estos temas de investigación ambiental. En este trabajo se describe la instalación, las recientes calibraciones y el protocolo de medición de los instrumentos que registran irradiancia solar en el nodo SAVER-Net/Tandil, junto con una evaluación de las mediciones realizadas durante este periodo inicial.

PALABRAS CLAVE: IRRADIANCIA SOLAR UV - IRRADIANCIA SOLAR TOTAL - CALIBRACIÓN - MONITOREO - TANDIL

Abstract

The agreement signed in 2018 between the Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires, Hidrología de las Llanuras dependiente de la CICPBA, el CONICET y la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, made possible the rapid expansion of the SAVER-Net network with the installation of a new solar radiation monitoring site (UV and Total) in Tandil, center of the Province of Buenos Aires, in October 2018, contributing to the joint interest of the institutions in these environmental research topics. This paper describes the installation, the recent calibrations and the measurement protocol of the instruments that register solar irradiance in the SAVER-Net / Tandil node, together with an evaluation of the measurements made during this initial period.

KEYWORDS: UV SOLAR IRRADIANCE – TOTAL SOLAR IRRADIANCE – CALIBRATION – MONITORING - TANDIL

Introducción

Problemáticas ambientales como el deterioro de la capa de ozono, el aumento de la radiación solar UV en superficie y las erupciones volcánicas, pusieron en evidencia la necesidad de reforzar el monitoreo de estos fenómenos en nuestro país, situación que impulsó el desarrollo e instalación de una gran capacidad instrumental concretada en una Red de Monitoreo de la Atmósfera basada en técnicas de sensado remoto activo y pasivo que cuenta con siete estaciones, distribuidas estratégicamente dentro de Argentina, en el marco del proyecto SAVER-Net (www.savernet-satreps.org) con financiamiento del Ministerio de Defensa y la Agencia Internacional de Cooperación del Japón (JICA). La misma surgió de la colaboración entre científicos de CITEDEF, el Instituto de Medioambiente del Japón (NIES), el Instituto de investigaciones Medioambientales del Espacio y la Tierra (ISEE, Universidad de Nagoya, Japón) y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

En 2018, y como parte de la expansión del monitoreo de la radiación solar en superficie asociado a las actividades de investigación del proyecto PID-UTN Estudio de radiación solar, nubes y sus efectos radiativos en Argentina mediante sensado remoto terrestre y satelital (2016-2019), la Facultad Regional Buenos Aires de la UTN firmó un convenio específico de trabajo con el Instituto de Hidrología de las Llanuras, dependiente de la CICPBA, el CONICET y la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, con el objetivo de instalar un nodo de monitoreo de radiación solar UV y visible en el centro de la provincia de Buenos Aires, contribuyendo al interés mutuo de las dos instituciones en generar actividades de investigación conjunta en estos temas.

Así, en octubre de 2018 se instaló un nuevo conjunto de instrumentos para el monitoreo de la radiación solar Total mediante un piranómetro Kipp&Zonen modelo CM-11 y Ultravioleta mediante radiómetros EKO-UVA y EKO-UVB en la ciudad de Tandil, ampliando la red SAVER-Net. Estos instrumentos de banda ancha permiten monitorear la radiación solar en superficie en diferentes rangos del espectro electromagnético. El piranómetro Kipp&Zonen modelo CM-11 está diseñado para medir la

radiación global (310-2800 nm) mientras que los radiómetros EKO-UVA y EKO-UVB miden la irradiancia en el rango del UVA (315-400 nm) y la irradiancia eritémica (280-400 nm, con filtro eritémico), respectivamente.

En este trabajo se describe la metodología de procesamiento que se lleva a cabo desde el registro de datos de irradiancia solar medida por los diferentes instrumentos hasta la obtención de la irradiancia solar en superficie en el nodo SAVER-Net Tandil en unidades radiométricas. El procesamiento descrito en este trabajo se realiza a través de rutinas automáticas especialmente programadas en lenguajes versátiles de computación. Además, se describe la calibración y contrastación de los instrumentos EKO-UVA y EKO-UVB realizada previamente a la instalación de los instrumentos durante la campaña de intercomparación llevada a cabo en el nodo Villa Martelli de la red SAVER-Net.

Importancia de monitorear la radiación solar

La radiación solar ultravioleta (UV) es uno de los parámetros que más afectan a los organismos vivos que habitan nuestro planeta. Los niveles de esta radiación que llega a la superficie terrestre dependen fundamentalmente de la latitud y la altitud y de la capacidad de absorción atmosférica. Abarca el intervalo de longitudes de onda desde los 100 nm hasta los 400 nm, y se divide en tres bandas: UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (100-280 nm).

La radiación UVC es completamente absorbida por la atmósfera terrestre, mientras que la radiación que alcanza a la superficie terrestre está compuesta mayoritariamente UVA (~90%) y minoritariamente UVB (~10%).

La radiación UVB es principalmente absorbida por el ozono (O₃) estratosférico y la pequeña porción que alcanza la superficie tiene extrema importancia en el desarrollo de la vida en la Tierra tal como la conocemos. Es la radiación solar más energética que alcanza la superficie terrestre por fotón incidente, y en consecuencia produce acciones biológicas de importancia sobre los seres vivos y materiales expuestos al Sol (Zerefos y Bais, 1997). La energía de estos fotones es suficientemente alta como para in-

ducir efectos destructivos en las moléculas que componen ciertas sustancias expuestas a esta radiación. Entre ellas, la de mayor significancia es la molécula de ADN - íntimamente relacionada con los seres vivos – sobre la cual la máxima acción biológica es producida por radiación solar en el entorno 305-310 nm (Jagger, 1985).

A nivel internacional (WMO, 2003; UNEP, 2003) se emplea la acción biológica eritémica (de enrojecimiento de la piel) como indicadora del riesgo de exposición al Sol, a través del índice ultravioleta (IUV), que se define como la irradiancia eritémica – producto de la irradiancia espectral solar por el espectro de acción eritémica (McKinlay y Diffey, 1987) expresada en W/m^2 – multiplicada por un factor 40 m^2/W , de modo que este índice tome valores que van usualmente entre 0 y 10, aunque se pueden registrar superiores a 20 en casos extremos. La sobreexposición a la radiación UVB puede generar enfermedades en la piel de las personas, afectar la visión, afectar el funcionamiento del sistema inmunológico y provocar una disminución en las defensas, resultando indispensable el monitoreo de esta irradiancia para la gestión de la fotoprotección de la población.

Debido a la destrucción de la capa de ozono como consecuencia de la contaminación antropogénica, se ha observado un aumento significativo de la componente solar UVB, principalmente en latitudes medias y altas en ambos hemisferios. Mediciones realizadas en el sur de nuestro país han correlacionado incrementos significativos de esta radiación con niveles de ozono bajo debido al paso del agujero de ozono antártico (Wolfram *et al.*, 2012; Orte *et al.*, 2019).

La radiación UVB también puede tener efectos benéficos sobre las personas. Uno de los beneficios más importantes que se obtienen a través de la exposición a la radiación UVB es la síntesis de vitamina D. Estudios realizados indican que niveles inadecuados de vitamina D en sangre podrían causar raquitismo en niños mediante la falta de absorción de calcio o derivar en incidencia a distintos tipos de cánceres (WHO, 2008; Archer *et al.* 2008). En latitudes altas, donde la radiación solar que alcanza la superficie es débil, como en el sur de nuestro país, es de primordial interés el estudio de la

factibilidad de sintetizar suficiente vitamina D desde la radiación solar. En el sur argentino, se ha demostrado que durante el invierno no se alcanza la producción adecuada de vitamina D por exposición a la radiación UVB (Orte *et al.* 2011, Orte *et al.* 2013, Díaz *et al.*, 2011).

Por otro lado, la radiación solar UVA que alcanza la superficie de la tierra está asociada principalmente con sus consecuencias sobre la salud humana y el crecimiento de las plantas. La sobreexposición a este tipo de radiación puede producir muerte celular en seres humanos y afectar la morfología, la fotosíntesis y otros mecanismos químicos en las plantas.

Algunos estudios han relacionado la exposición a la radiación UVA con el fotoenvejecimiento y las arrugas (Farage *et al.*, 2008; Gilchrest, 1996). El UVA puede penetrar en las capas más profundas de la piel e inducir daño en el ADN, causando la muerte celular y la transformación maligna de las células de la piel (Noonan *et al.*, 2012; Grigalavicius *et al.*, 2016).

Aunque se cuenta con mediciones satelitales y terrestres de la radiación UVA, este parámetro ha sido poco estudiado en Argentina. Con el objetivo de cuantificar la irradiancia solar UVA promedio que alcanza la superficie a lo largo y ancho de nuestro país, se han combinado mediciones satelitales con mediciones desde tierra provistas por la red SAVER-Net para obtener climatologías de este parámetro (Orte *et al.*, 2018). La instalación de este nuevo nodo de monitoreo de la radiación UVA permitirá mejorar y ampliar los estudios en este campo de investigación.

Monitorear la radiación solar total sobre superficie es igualmente importante en múltiples aspectos y aplicaciones. Poder cuantificar esta radiación a nivel de superficie es fundamental para proyectos de desarrollo de energía solar, cálculos de evapotranspiración, estudiar el balance radiativo terrestre, entre otros fines ambientales. Estudios realizados en la Argentina utilizando datos de tierra de irradiancia solar total de la red Saver-Net y datos satelitales se han realizado para obtener mapas que muestran la variación espacio-temporal de la radiación solar global en la Argentina (Carmona *et al.*, 2018).

Estación de monitoreo Tandil

Instrumentos de medición y adquisición de datos

Los radiómetros solares del sitio Tandil fueron instalados en la parcela experimental de IHREDA (<http://www.ihreda.com.ar/ihreda/>), del cual el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) es parte. La parcela se encuentra emplazada dentro del campus de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos

Aires (UNCPBA) (Figura 1).

Estos radiómetros, pertenecientes a la División Atmósfera del Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, se instalaron el 4 de octubre de 2018 y son operados por personal de la División Atmósfera del CEILAP y el IHLLA. En la Tabla 1 se pueden observar las características de los diferentes instrumentos de sensado remoto pasivo del nodo Tandil de la red de radiómetros SAVER-Net.



Fig. 1. Instrumental instalado en el nodo Tandil de Saver-Net: EKO-UVB, EKO-UVA y piranómetro Kipp&Zonen modelo CM-11)

Tabla 1. Características de los Instrumentos de sensado remoto pasivo de la radiación solar instalados en el nodo Tandil de la Red SAVER-Net

| Instrumento | Modelo | Número de serie (SN) | Rango λ (nm) | k |
|------------------------|--------|----------------------|----------------------|--|
| Piranómetro Kipp&Zonen | CM-11 | CM11830288 | 310 – 2800 | $k_p = 4,84 \cdot 10^{-3}$ (mV/(W/m ²)) |
| Radiómetro EKO | UVA | S99014.06 | 315 – 400 | $k_{EKO-UVA} = 15,7089$ W/m ² /mV |
| Radiómetro EKO | UVB | S97088.02 | 280 – 320 | $k_{EKO-UVB} = 0,1535$ W/m ² /mV |

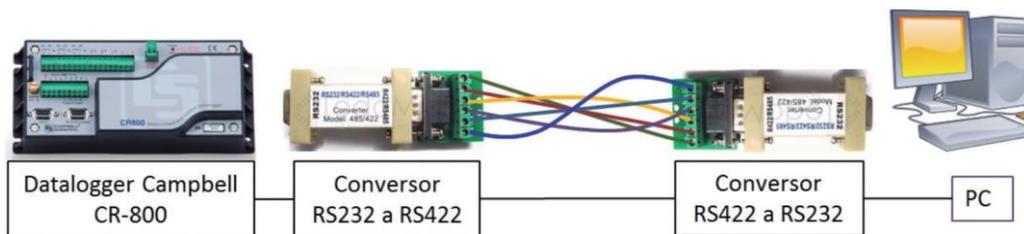


Fig. 2. Conexión entre el *datalogger* y la PC

Estos instrumentos están conectados a un registrador de datos (*datalogger*) marca Campbell, modelo CR-800 (SN 21629) (Campbell Scientific). El programa de adquisición se generó con el programa LoggerNet de Campbell, que luego se instaló en el *datalogger*. El programa de adquisición (PiraRG-EKOUVA-EKOUVB.CR8) está diseñado para registrar automáticamente los datos de salida con una resolución temporal de 1 minuto, que representa el promedio de mediciones instantáneas cada 1 segundo. Los datos crudos en voltaje (mV) son registrados automáticamente por el *datalogger* en una tabla dentro de un archivo de texto.

Utilizando la función Setup del programa LoggerNet se establece la comunicación con una PC a través de un puerto RS232 y se configura la frecuencia de almacenamiento en la PC (actualización del archivo de registro en la PC). Dado que la distancia recomendada para una conexión RS232 no supera los 15 metros y el *datalogger* se encuentra a una distancia aproximada de 30 metros de la PC, se instalaron dos conversores de RS232 a RS422 y viceversa a la salida y entrada del *datalogger* y la PC, respectivamente. Esto permitió la conexión a través de un cable entre los conversores (Figura 2).

En Tandil los archivos son actualizados en la PC cada 1 minuto, lo que asegura el duplicado de los registros cada 1 minuto disminuyendo el riesgo de pérdida de información. Cuando los archivos de datos alcanzan los 2 MB de información, LoggerNet está configurado para el cierre automático del archivo y apertura de un nuevo archivo de registros de datos en la PC.

Las constantes de calibración k_{UVA} y k_{UVB} de

la Tabla 1 fueron obtenidas mediante la intercomparación con radiómetros independientemente calibrados. En la siguiente sección se describe la metodología para la obtención de estas constantes de calibración y la contrastación con radiómetros independientes.

Resultados y discusión

Previo a la instalación de los radiómetros solares en el nodo Tandil se intercompararon, en la estación de Villa Martelli entre el 5 y el 27 de octubre de 2017, los radiómetros marca EKO-UVA MS-210A y EKO-UVB MS-210D con instrumentos Kipp&Zonen. El objetivo de la intercomparación es obtener nuevas constantes de calibración de los instrumentos EKO (Tabla 1). Los radiómetros Kipp&Zonen son tomados como referencia para la calibración y contrastación, ya que cuentan con la calibración de fábrica y fueron instalados por primera vez para la realización de esta comparación. Todos los radiómetros fueron conectados al mismo *datalogger*, marca Campbell modelo CR-1000. En la Figura 3 se presentan los instrumentos instalados para la campaña de intercomparación.

Intercomparación y calibración EKO-UVA

El radiómetro EKO-UVA fue intercomparado con un instrumento de monitoreo de irradiancia UVA de similares características marca Kipp&Zonen (SN 170144). En la Tabla 2 se presentan los dos instrumentos intercomparados.

La constante $k_{K\&Z-UVA}$ es el promedio de las constantes de calibración obtenidas por la empresa Kipp&Zonen durante la caracterización del instrumento (en una ventana de 0° - 70° de ángulo solar cenital y 260-400 de columna total de ozono) la cual varía dependiendo del



Fig. 3. Radiómetros instalados en la estación Villa Martelli para la campaña de inter-comparación y calibración de los instrumentos EKO-UVA y EKO-UVB

Tabla 2. Características de los Instrumentos de sensado remoto pasivo UVA inter-comparados

| Instrumento | Modelo | SN | Rango λ (nm) | K |
|----------------------------------|--------|-----------|----------------------|--|
| Radiómetro Kipp&Zonen | UVA-1 | 170144 | 315 – 400 | $k_{KZ-UVA} = 30,584$ $W/m^2/mV^{(1)}$ |
| Radiómetro EKO | UVA | S99014.06 | 315 – 400 | $k'_{EKO-UVA} = 11,6450$ $W/m^2/mV^{(2)}$ |

(1) Promedio de la constante media del instrumento publicada en el certificado de calibración por la empresa. El promedio es tomado en una ventana de 0°-70° de ángulo solar cenital y 260-400 UD.

(2) $k'_{EKO-UVA}$ es la constante de calibración obtenida por la empresa Schreder en Julio de 2010, previo a la calibración realizada en este informe.

ángulo solar cenital y el valor de columna total de ozono (CTO).

El valor de irradiancia UVA para el instrumento Kipp&Zonen es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$I_{UVA-KZ} = k_{KZ-UVA}(\theta_{SZA}, CTO) * (V_{UVA-KZ} - V_{bg-KZ}) \quad (1)$$

Donde:

$k_{KZ-UVA}(\theta_{SZA}, CTO)$ es obtenida desde la matriz de caracterización instrumental dependiendo del valor de ozono en unidades Dobson y el ángulo solar cenital.

El valor de CTO en el momento de la medición es obtenido desde la base de datos satelitales del sobrevuelo (*overpass*) del instrumento satelital OMI para la región de Buenos Aires (*Ozone Monitoring Instrument*, <https://avdc.gsfc>).

nasa.gov/index.php?site=652236511&id=46). V_{bg-KZ} es el valor de señal oscura o *background* (mV) obtenido para cada día desde el valor medio de las mediciones que realiza el instrumento durante la noche.

Los valores de irradiancia en el rango del UVA para el instrumento EKO-UVA son obtenidos multiplicando los valores de la señal en voltaje (mV) medidos, la constante $k'_{EKO-UVA}$ y un factor de corrección $FC_{EKO-UVA}(\theta_{elev}, CTO)$ que depende de la columna total de ozono y del ángulo de elevación.

$$I_{UVA-EKO} = FC_{EKO-UVA}(\theta_{elev}, CTO) * k'_{EKO-UVA} * (V_{UVA-EKO} - V_{bg-EKO}) \quad (2)$$

La constante $k'_{EKO-UVA}$ es la que se desea actualizar en esta sección mediante la intercomparación propuesta. La matriz que contiene el factor de corrección $FC_{EKO-UVA}(\theta_{elev}, CTO)$ está normalizada al valor de CTO=300 UD y SZA=50° y da cuenta de la respuesta coseno y a los diferentes valores de CTO del instrumento. Este factor es obtenido interpolando en la matriz de caracterización de doble entrada dependiente del ángulo solar cenital y la columna total de ozono al momento de la medición (WMO/GAW Report No. 120, 1996; WMO/GAW Report No. 141, 1999). $k'_{EKO-UVA}$ y $FC_{EKO-UVA}(\theta_{elev}, CTO)$ fueron obtenidas por la

empresa Schreder en Julio de 2010 [Alexander Los, 2010]. V_{bg-EKO} es el valor fondo o *background* y es obtenido de la misma manera que para el instrumento Kipp&Zonen.

La Figura 4 presenta las mediciones de irradiancia $I_{UVA-EKO}$ e I_{UVA-KZ} obtenida por los radiómetros UVA EKO (rojo) y Kipp&Zonen SN 170144 (azul) respectivamente, durante el periodo de intercomparación. Se observa una subestimación sistemática en las mediciones del radiómetro EKO-UVA respecto del instrumento calibrado Kipp&Zonen.

En la siguiente Figura 5 se presenta un gráfico de dispersión y la regresión lineal (forzada a origen) entre las mediciones. La regresión presenta una pendiente de 0,7413.

El valor de la pendiente es utilizado para la corrección de la constante de calibración del instrumento EKO-UVA aplicando la siguiente ecuación:

$$k_{EKO-UVA} = \frac{k'_{EKO-UVA}}{0,7413} = 15,7089 \text{ (W/m}^2\text{)/mV} \quad (3)$$

Por lo tanto, la nueva constante de calibración obtenida para el EKO-UVA es $k_{EKO-UVA} = 15,7089 \text{ (W/m}^2\text{)/mV}$.

Una vez obtenida la nueva constante de cali-

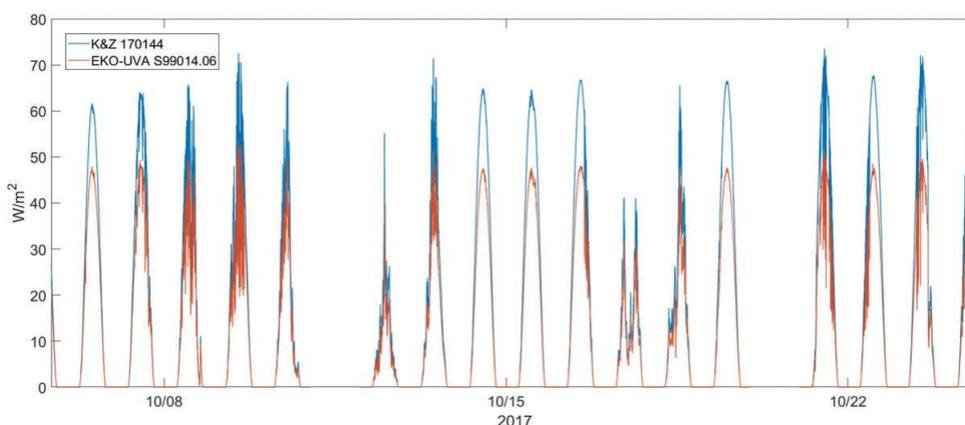


Fig. 4. Mediciones de los radiómetros EKO-UVA SN S99014.06 (rojo) y Kipp&Zonen SN 170144 (azul) durante el periodo de intercomparación

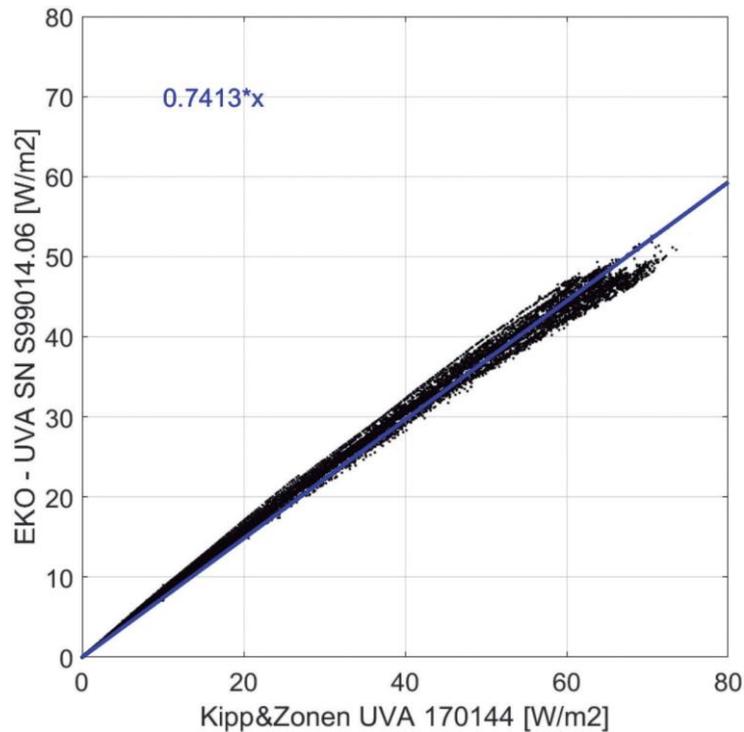


Fig. 5. Gráfico de dispersión y regresión lineal (forzada al origen) de las mediciones de radiación solar UVA del EKO-UVA y el Kipp&Zonen SN 170144

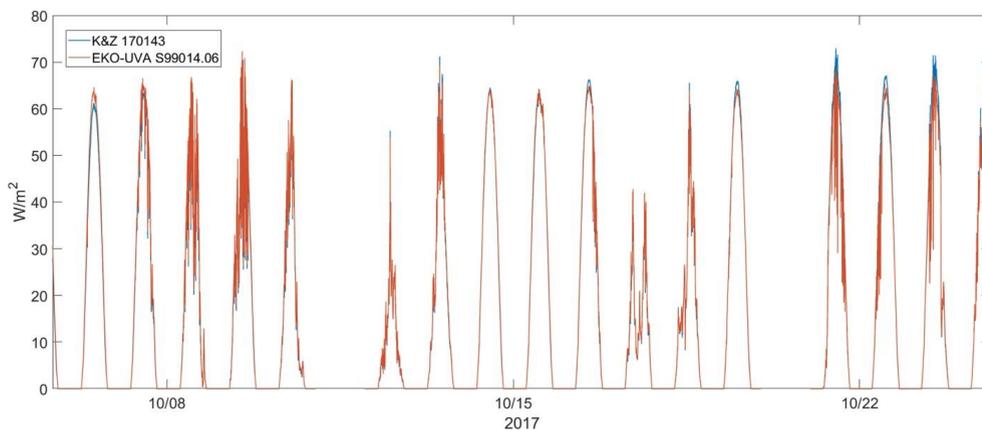


Fig. 6. Mediciones intercomparadas de los radiómetros EKO-UVA (rojo) y Kipp&Zonen SN 170143 (azul)

bración, el instrumento EKO-UVA fue comparado con un tercer instrumento independiente instalado al mismo *datalogger* Campbell CR-1000 con el objetivo de validar la nueva constante de calibración obtenida. El instrumento es un radiómetro Kipp&Zonen UVA-1 (SN:

170143) el cual cuenta con la calibración de fábrica. La irradiancia es obtenida aplicando la ecuación (1) donde el valor de la constante es obtenido desde la matriz de caracterización de este instrumento. La Figura 6 muestra las mediciones realizadas con ambos instrumentos.

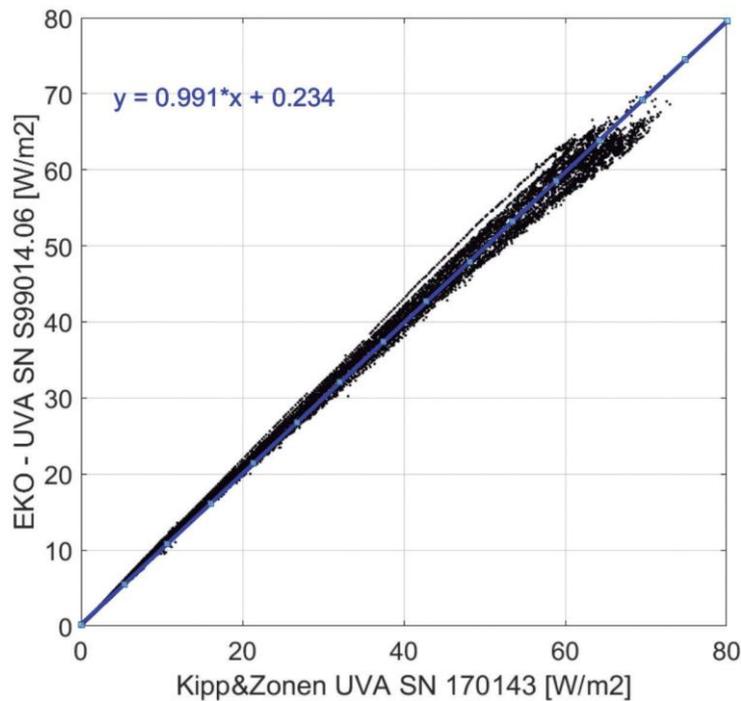


Fig. 7. Gráfico de dispersión y regresión lineal de las mediciones de radiación solar UVA del EKO-UVA y el K&Z 170143

Tabla 3. Características de los Instrumentos de sensado remoto pasivo intercomparados

| Instrumento | Modelo | SN | Rango λ (nm) | k |
|-----------------------|-------------|-----------|----------------------|--|
| Radiómetro Kipp&Zonen | UVB-1 | 170212 | 280 – 320 | $k_{KZ-UVB} = 0,198$ $W/m^2/mV^{(1)}$ |
| Radiómetro EKO | UVB MS-210D | S97088.02 | 280 – 320 | $k'_{EKO-UVB} = 0,12743$ $W/m^2/mV^{(2)}$ |

(1) Promedio de la constante media del instrumento publicada en el certificado de calibración por la empresa. El promedio es tomado en una ventana de $\Theta_{SZA} = 0^\circ-70^\circ$ y 260-400 UD (Kipp&Zonen).

(2) $k'_{EKO-UVB}$ es la constante de calibración obtenida por la Schreder en Julio de 2010 (Alexander Los, 2010)

La Figura 7 presenta un gráfico de dispersión y la regresión lineal forzada al origen entre las mediciones de la Figura 6. Se observa una muy buena correlación entre los instrumentos con una pendiente de 0,991 y una ordenada al origen cercana a cero (0,234).

Intercomparación y calibración EKO-UVB

El radiómetro EKO-UVB fue intercomparado con un instrumento de monitoreo de irradiancia eritémica de similares características marca Kipp&Zonen (SN 170212) aplicando la misma

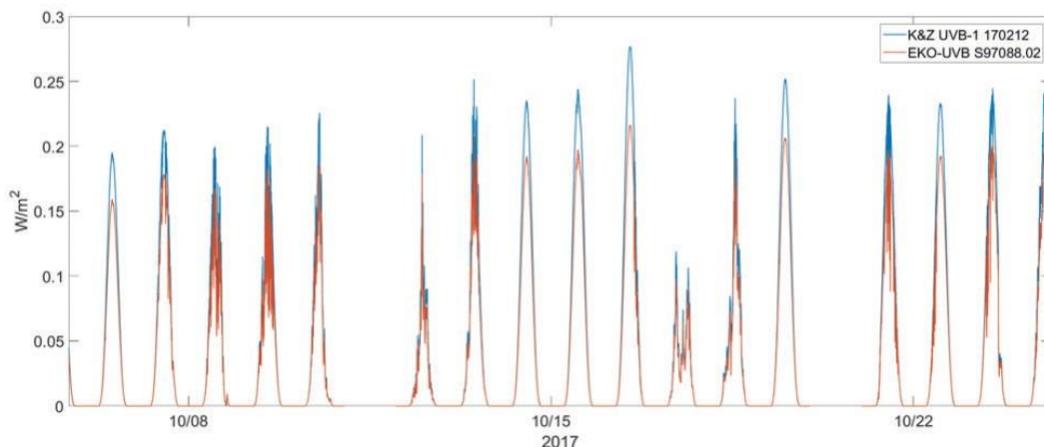


Fig. 8. Irradiancia eritémica k_{KZ-UVB} e $I_{EKO-UVB}$ de los radiómetros Kipp&Zonen UVB-1 SN 170212 (azul) y EKO-UVB (rojo), respectivamente

metodología que para el EKO-UVA, descrita en la sección anterior. En la Tabla 3 se resumen las características básicas de los dos radiómetros de irradiancia eritémica intercomparados.

Los valores de irradiancia eritémica del instrumento son obtenidos de la siguiente manera:

$$I_{EKO-UVB} \left[\frac{W}{m^2} \right] = k'_{EKO-UVB} * FC_{EKO-UVB}(\theta_{elev}, CTO) * (V_{EKO-UVB} - V_{bg-EKO}) \quad (4)$$

Donde:

$V_{EKO-UVB}$ es el valor medido por el instrumento en voltaje (mV) y V_{bg-EKO} es el valor de ruido obtenido para cada día desde el valor medio de las mediciones que realiza el instrumento durante la noche.

Al igual que en la intercomparación anterior, la constante $k'_{EKO-UVB}$ y el factor de calibración $FC_{EKO-UVB}(\theta_{elev}, CTO)$ fueron obtenidos por la empresa Schreder en Julio de 2010 (Alexander, Los, 2010).

La irradiancia eritémica para el instrumento Kipp&Zonen es obtenida multiplicando el valor de voltaje (en mV) por la constante de calibración, restando el valor de señal oscura o *background* previamente:

$$I_{KZ-UVB} = k_{KZ-UVB}(\theta_{SZA}, CTO) * (V_{KZ-UVB} - V_{bg-KZ}) \quad (5)$$

El valor de la constante $k_{KZ-UVB}(\theta_{SZA}, CTO)$ se obtiene de la matriz de calibración para el instrumento Kipp&Zonen SN 170212.

Una vez obtenida la irradiancia eritémica I_{KZ-UVB} e $I_{EKO-UVB}$ para ambos instrumentos, se procede a la intercomparación de los datos. La Figura 8 muestra las mediciones de irradiancia eritémica de los radiómetros EKO-UVB (rojo) y Kipp&Zonen UVB-1 (azul). Se observa que el radiómetro EKO-UVB mide sistemáticamente por debajo del instrumento Kipp&Zonen.

En la Figura 9 se muestra un gráfico de dispersión y la regresión lineal (forzada al origen) entre las mediciones. La regresión presenta una pendiente de 0,8304.

El valor de la pendiente es utilizado para la corrección de la constante de calibración del

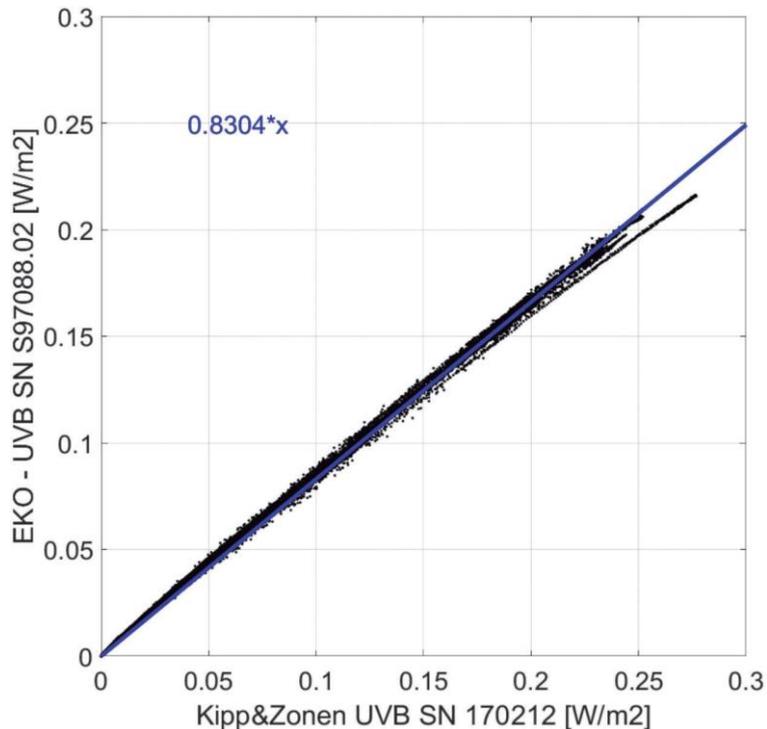


Fig. 9. Gráfico de dispersión y regresión lineal entre las mediciones de irradiancia eritémica solar del EKO-UVB y el Kipp&Zonen UVB-1

instrumento EKO-UVB aplicando la siguiente ecuación:

$$k_{EKO-UVB} = \frac{k'_{EKO-UVB}}{0,8304} = 0,1535(W/m^2)/mV \quad (6)$$

Por lo tanto, la nueva constante de calibración obtenida para el EKO-UVB es $k_{EKO-UVB} = 0,1535(W/m^2)/mV$.

Con el objetivo de contrastar la nueva constante de calibración, el instrumento EKO-UVB fue intercomparado con un tercer instrumento independiente instalado al mismo *datalogger* Campbell CR-1000. Este instrumento es un Kipp&Zonen modelo UVB-1 SN 170213 calibrado (Kipp&Zonen). La irradiancia eritémica es obtenida aplicando la ecuación (5) donde la constante k_{KZ-UVB} para este instrumento

es interpolada desde la matriz de caracterización.

La Figura 10 muestra las mediciones realizadas con ambos instrumentos utilizando la constante obtenida $k_{EKO-UVB}$. Si se compara con las mediciones de la Figura 9, se puede observar una mejor aproximación entre las mediciones, aplicando la nueva constante de calibración.

La Figura 11 presenta un gráfico de dispersión y la regresión lineal entre las mediciones de la Figura anterior. Se observa una muy buena correlación entre los instrumentos con una pendiente de 0,995 y una ordenada al origen igual a cero.

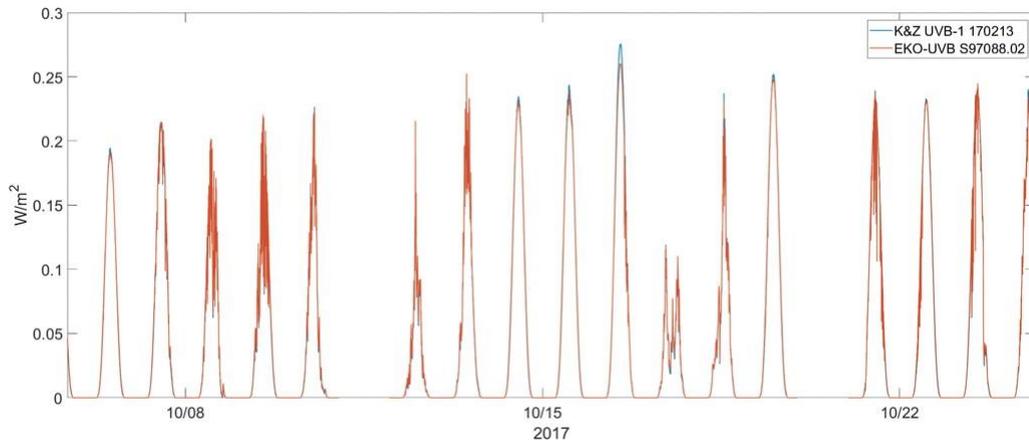


Fig. 10. Mediciones intercomparadas de los radiómetros EKO-UVB (rojo) y Kipp&Zonen SN 170213 (azul)

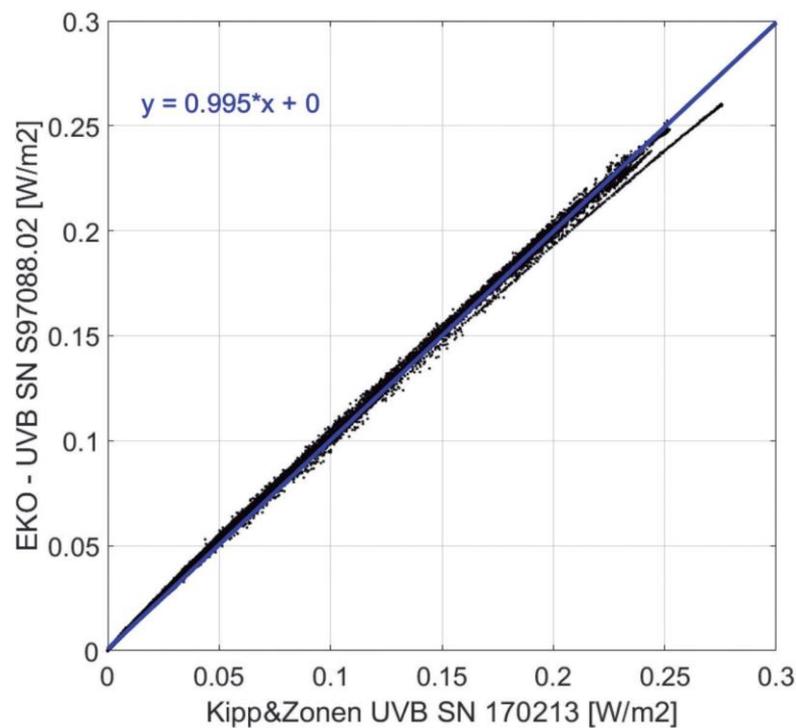


Fig. 11. Gráfico de dispersión y regresión lineal entre las mediciones de irradiancia eritémica del EKO-UVB y el K&Z 170213

Conclusiones

El presente trabajo describe la instalación, calibración y puesta en funcionamiento de los radiómetros solares en los distintos rangos del espectro electromagnético del nodo Tandil de la red SAVER-Net.

Se logró el desarrollo de algoritmos automáticos propios para el procesamiento de datos de radiación solar medidos por los instrumentos instalados en este sitio, a saber piranómetro Kipp&Zonen CM-11, radiómetro EKO-UVA, radiómetro EKO-UVB.

Además, se realizó la calibración de los instrumentos EKO-UVA y EKO-UVB, previo a la instalación, durante en la campaña de intercomparación llevada a cabo en el nodo Villa Martelli, en octubre de 2017. La calibración realizada fue contrastada con instrumentos independientes asegurando la calidad de las mediciones de irradiancia UVA y UVB-eritémica. Los resultados muestran que la calibración de los instrumentos es realmente confiable.

De esta manera, la Facultad Regional Buenos Aires de la UTN extendió sus actividades de investigación en colaboración con otras importantes universidades y centros de investigación del país.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecemos al consorcio público-privado IHREDA (Proyecto FONARSEC N° 19, <http://www.ihreda.com.ar/>) y a la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) por facilitar las instalaciones y la colaboración en la instalación de este nuevo nodo de monitoreo de radiación solar. Agradecemos también a la División Técnicas Digitales, Departamento de Electrónica Aplicada de CITEDEF por el asesoramiento brindado para la conexión instrumental. Además, queremos agradecer especialmente a la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la FRBA/UTN por la asistencia administrativa proporcionada en la instalación de este nuevo nodo de la red SAVER-Net.

Referencias

- ARCHER, C.L. and CALDEIRA, K., (2008). Historical trends in the jet streams, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08803, doi:10.1029/2008GL033614. Campbell Scientific, <https://s.campbellsci.com/documents/cn/manuals/cr800-cr850.pdf> Fig. 11. Gráfico de dispersión y regresión lineal entre las mediciones de irradiancia eritémica del EKO-UVB y el K&Z 170213
- CARMONA, F.; ORTE, F.; RIVAS, R.; WOLFRAM, E. y KRUSE, E., (2018). Development and analysis of a new solar radiation atlas for Argentina from ground based measurements and CERES_SYN1DEG data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Volume 21, Issue 3, December 2018, Pages 211-217, ISSN: 1110-9823.
- DÍAZ, S.; VERNET, M.; PALADINI, A.; FUENZALIDA, H.; DEFERRARI, G.; BOOTH, C. R.; CABRERA, S.; CASICCIA, C.; DIÉGUEZ, M.; LOVINGREEN, C.; PEDRONI, J.; ROSALES, A. y VRSALOVIC, J., (2011). Availability of vitamin D photoconversion weighted UV radiation in southern South America. *Photochem Photobiol Sci.*, 10(12):1854-67.
- FARAGE, M.A.; MILLER, K, W.; ELSNER, P. y MAIBACH, H.I., (2008). "Intrinsic and extrinsic factors in skin ageing: a review", *Int J Cosmet Sci.* ; vol. 30(2), pp. 87-95, Apr. 2008
- GILCHREST, B.A., (1996). "A review of skin ageing and its medical therapy", *Br J Dermatol*, vol. 135(6), pp. 867-875, Dec. 1996.
- GRIGALAVICIUS, M.; MOAN, J.; DAHLBACK, A. y JUZENIENE, A., (2016). "Daily, seasonal, and latitudinal variations in solar ultraviolet A and B radiation in relation to vitamin D production and risk for skin cancer", *Int J Dermatol*, vol. 55, pp. 23-28.
- JAGGER, J., (1985). "Solar UV actions on living cells". Editorial Praeger, New York. Kipp&Zonen, Calibration Certificate UV-S-A-T radiometer, Kipp&Zonen (UVB-1 SN 170212, UVB-1 SN 170213, UVA-1 SN 170143, UVA-1 SN 170144), traceability VSL B.V.
- LOS, A., (2010). Absolute irradiance calibration of a broadband detector with erythemal weighting, EKO Instruments Europe BV, Leiden, The Netherlands, July 2010.
- McKINLAY, A. and DIFFEY, B.L., (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin, in *Human Exposure to Ultraviolet Radiation: Risks and Regulations*, edited by W. Passchier and B. Bosnjakovich, Elsevier, New York.
- NOONAN, F.P.; ZAIDI, M.R.; WOLNICKA-GLUBISZ, A.; ANVER, M.R.; BAHN, J.; WIELGUS, A.; CADET, J.; DOUKI, T.; MOURET, S.; TUCKER, M.A.; POPRATILOFF, A.; MERLINO, G. y DE FABO, E. C., (2012). Melanoma induction by ultraviolet A but not ultraviolet B radiation requires melanin pigment. *Nat Commun*, vol. 3.
- ORTE, F.; WOLFRAM, E.; SALVADOR, J.; D'ELIA, R.; BULNES, D.; PAES LEME N. y QUEL E., (2013). Vitamin D synthesis measured with a multiband filter radiometer in Río Gallegos, Argentina. *AIP Conf. Proc.* 1531, 891; doi: 10.1063/1.4804914.
- ORTE, F., WOLFRAM, E.; SALVADOR, J.; D'ELIA, R.; PAES LEME, N. y QUEL, E., (2011). Synthesis of vitamin D and erythemal irradiance obtained with a multiband filter radiometer and annual variation analysis in Río Gallegos, Argentina. *J. Phys.: Conf.Ser.*274012099, doi: 10.1088/1742-6596/274/1/012099.
- ORTE, F.; WOLFRAM, E.; BALI, J.L.; CARMONA, F.; LUSI, A. y LIBERTELI, C., (2018). Comparison of monthly means daily UVA from CERES with groundbased measurements. *IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2018*, Article number 8646239, ISBN 978-153865032-5. DOI: 10.1109/ARGENCON. 2018.8646239.
- ORTE, P.F.; WOLFRAM, E.; SALVADOR, J., MIZUNO, A.; BÈGUE, N.; BENCHERIF, H.; BALI, J.L.; D'ELIA, R.; PAZMIÑO, A.; GODIN-BEEKMANN, S.; OHYAMA, H. AND QUIROGA, J., (2019). Analysis of a southern sub-polar short-term ozone variation event using a millimetre-wave radiometer, *Ann. Geophys.*, 37, 613-629, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-613-2019>.
- UNEP, (2003). "Environmental effects of ozone depletion and its interaction with climate change", UNEP Report.
- WHO (World Health Organization), (2008). International Agency for Research on Cancer. Vitamin D and cancer. *IARC Working Group Reports*, WHO Press, 5, 148.

WMO (2003). Índice UV Solar Mundial: Guía Práctica. Organización Mundial de la Salud, Organización Meteorológica Mundial, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Comisión Internacional de Protección contra la Radiación no Ionizante. WHO/SDE/OEH/02.2

WMO/GAW (1996) Report No. 120: WMO-UMAP Workshop on Broad-Band UV Radiometers, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1996. WMO TD – No. 894.

WMO/GAW (1999) Report No. 141: Report of the LAP/COST/WMO Intercomparison of Erythral Radiometers, Thessaloniki, Greece, 1999. WMO TD – No. 1051.

WOLFRAM, E. A.; SALVADOR, J.; ORTE, F.; D'ELIA, R.; GODIN-BEEKMANN, S.; KUTTIPPU-RATH, J.; PAZMIÑO, A.; GOUTAIL, F.; CASICCIA, C.; ZAMORANO, F.; PAES LEME, N., and QUEL, E.J., (2012). The unusual persistence of an ozone hole over a southern mid-latitude station during the Antarctic spring 2009: a multi-instrument study, *Ann. Geophys.*, 30, 1435–1449, <https://doi.org/10.5194/angeo30-1435-2012>.

ZEREFOS, C. y BAIS, A.F., (1997). "Solar Ultraviolet Radiation", Springer