



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**El solmáforo. Dispositivo para la monitorización y
divulgación del Índice Ultravioleta**

Autor:

José Luis Martín Marcos

Tutor/es:

Carlos Toledano

Ramiro González

Índice general

Índice general	1
Resumen / Abstract	3
Introducción	4
1. La radiación ultravioleta (UV)	6
1.1. Fundamentos de radiometría	6
1.2. Interacción de la radiación UV con la atmósfera y la superficie	7
1.3. Efectos de la radiación UV en la salud	8
1.3.1. La piel	9
1.3.2. Los ojos	10
1.3.3. El sistema inmune	10
1.3.4. La capa de ozono	10
1.4. Divulgación e Índice UV (UVI)	11
1.4.1. El índice ultravioleta UVI	11
1.5. Solmáforo	12
2. Hardware. Descripción del instrumento	14
2.1. El demostrador	14
2.2. Componentes del Solmáforo	14
2.2.1. El sensor	14
2.2.2. El microcontrolador	15
2.2.3. El panel indicador	15
2.2.4. Otros componentes	16
2.3. Dispositivos	16
2.3.1. Prototipo de calibración	16
2.3.2. Prototipo funcional	16
3. Medidas, resultados y análisis	18
3.1. Calibración	18
3.1.1. Filtrado manual de las medidas	19
3.1.2. Filtrado estadístico de las medidas	22

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	2
3.1.3. Resultado y análisis de la calibración	29
3.2. Medidas del prototipo funcional	29
3.3. Análisis de discrepancias puntuales	34
4. Actividad divulgativa	37
Conclusiones	39
Bibliografía	41
Índice de figuras	41
Índice de tablas	43
Anexos	45

Resumen / Abstract

En este trabajo se presentan los conceptos básicos de la interacción de la radiación ultravioleta con la atmósfera y la superficie de nuestro planeta, así como los efectos que tiene sobre la salud de las personas. De esta forma se justifica la necesidad de tomar medidas de prevención en la población, centrándose en la divulgación mediante el denominado Índice Ultravioleta (UVI). Se aprovecha el UVI para ofrecer una solución tecnológica, que se denominará *'solmáforo'*, un dispositivo desarrollado íntegramente como parte de este trabajo, y que monitoriza la radiación solar e informa del riesgo mediante el UVI. Se calibra el sensor de ultravioleta del dispositivo mediante la comparación con las medidas oficiales tomadas por la Agencia Estatal de Meteorología y se analizan los resultados. Se planifican y realizan acciones divulgativas y de prevención empleando el solmáforo desarrollado.

This paper presents the basic concepts of the interaction of ultraviolet radiation with the atmosphere and the surface of our planet, as well as the effects it has on people's health. In this way, the need to take preventive measures in the population is justified, focusing on divulgation through the so-called Ultraviolet Index (UVI). UVI is used to offer a technological solution, which will be called *'solmáforo'* (*'trafficsunlight'*, in literal translation), a device developed entirely as part of this work, and which monitors solar radiation and reports the risk through the UVI. The ultraviolet sensor of the device is calibrated by comparing it with the official measurements taken by the *'Agencia Estatal de Meteorología'* (State Meteorological Agency of Spain) and the results are analyzed. Divulgation and prevention actions are planned and carried out using the developed *'solmáforo'*.

Introducción

El Grupo de Óptica Atmosférica (GOA) de la Universidad de Valladolid lleva estudiando la atmósfera mediante instrumentación óptica desde 1996. La interacción entre la radiación solar y la atmósfera es una parte fundamental del campo en el que desarrolla su actividad, y dentro de esta, la radiación ultravioleta tiene especial relevancia por ser capaz de provocar perjuicios en la salud a quienes se exponen a ella demasiado.

Aunque los riesgos de la radiación ultravioleta son globales, las poblaciones de América del Sur suelen estar más concienciadas debido a su cercanía al agujero de la capa de ozono, de forma que vivieron de primera mano la alarma que se generó antes de conseguir frenar su deterioro. La actividad del GOA le ha llevado a colaborar con instituciones y grupos de investigación de varias partes del mundo, entre ellas la División de Atmósfera del *CITEDEF* en Argentina. Este grupo llevó a cabo un proyecto de divulgación y salud pública en el que desarrollaron un dispositivo que monitorizaba la radiación ultravioleta e informaba del riesgo en tiempo real a la población mediante un panel indicador de tipo semáforo. De la colaboración con ellos en otros ámbitos surgió la inspiración de recrearlo en Valladolid y desarrollar nuestro propio solmáforo.

La importancia de este proyecto está directamente relacionada con el riesgo que supone la radiación ultravioleta para la población general. En las últimas décadas ha habido un incremento de la actividad de ocio en exteriores (actividad deportiva, excursionismo en la naturaleza, ocio en playas, etc.) junto a una popularización del bronceado de la piel, la Organización Mundial de la Salud (OMS) identifica estos como los factores principales de un incremento en la incidencia del cáncer de piel y otras enfermedades degenerativas de la piel y los ojos [2,5,6]. Igualmente, los servicios de salud pública llevan mucho tiempo advirtiendo y concienciando sobre estos riesgos, así como promoviendo la prevención y métodos de protección entre la población general. Sin embargo los resultados a día de hoy son insuficientes y sigue siendo demasiado común exponerse sin protección a la radiación ultravioleta hasta el punto de provocar lesiones que contribuyen a la degeneración de la piel y aumentan la probabilidad de aparición de melanomas.

Entre las herramientas que se han desarrollado en la línea de la divulgación y protección, destaca el Índice Ultravioleta (UVI, en inglés), un índice adimensional junto a un código de colores para su comunicación que representa el riesgo de que la radiación ultravioleta produzca lesiones de piel. El solmáforo es una solución que pretende contribuir a la

divulgación de estos riesgos entre la población general y hacer más fácil su protección aprovechando el UVI. Utilizando un panel indicador familiar y llamativo, como son los semáforos, informa a su alrededor en tiempo real y de forma sencilla del riesgo que supone la exposición a la radiación ultravioleta en ese momento. Instalándolo en lugares estratégicos, puede ayudar a la población a tener la información adecuada para protegerse mejor al mismo tiempo que hace que la radiación ultravioleta y todo lo que le rodea esté más presente en sus vidas cotidianas, favoreciendo su divulgación.

En la línea de lo expuesto, el objetivo general de este trabajo es diseñar, construir y validar un solmáforo de índice ultravioleta. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Diseño de un solmáforo: Elección de los componentes, asegurando la compatibilidad e integración en un único dispositivo.
- Montaje de prototipo y calibración del sensor ultravioleta: ensamblar los componentes de forma que se puedan tomar medidas y calibrar el sensor para conseguir una medida precisa del UVI.
- Construcción del prototipo de solmáforo: ensamblaje de todos los componentes hasta conseguir un prototipo de solmáforo completamente funcional.
- Comprobación del buen funcionamiento del solmáforo: vigilar el comportamiento del panel indicador y comprobar con medidas que la calibración es adecuada
- Exposición pública y divulgación: instalar el solmáforo en un lugar público para que cumpla la función para la que fue concebido, al mismo tiempo que se aprovecha para realizar divulgación.

Capítulo 1

La radiación ultravioleta (UV)

La radiación ultravioleta (UV a partir de ahora) es la radiación electromagnética comprendida entre las longitudes de onda de 15 a 400 nm. Recibe su nombre por ser el intervalo de longitudes de onda inmediatamente más cortas al espectro visible, es decir, justo ‘después’ de lo que las personas percibimos como violeta.

En el intervalo de longitudes más largas de la radiación UV se produce la transición de radiaciones electromagnéticas no ionizantes a las ionizantes, una de las principales características que la hacen merecedora de atención como veremos más adelante.

Una parte de la radiación electromagnética emitida por el Sol es radiación UV, y se considera que la totalidad de esta se encuentra en el intervalo de 100 a 400 nm, razón por la que desde el principio nos limitamos a dicho intervalo. [1]

1.1. Fundamentos de radiometría

En primer lugar veamos brevemente algunos conceptos de radiometría [1] a los que se va a hacer referencia a lo largo del trabajo:

- **Radiancia:** potencia de la radiación electromagnética que irradia (emite) un elemento de superficie por unidad de ángulo sólido y de superficie, se expresa en $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. Si la radiación es de un rango de longitudes estrecho se denomina radiancia espectral y se expresa en $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$.
- **Exitancia o emitancia:** es la radiancia en un ángulo sólido de 2π sr (superficie semi-esférica), se expresa en W m^{-2} .
- **Irradiancia:** potencia de la radiación electromagnética con la que es irradiado (recibe) un elemento de superficie por unidad de superficie, se expresa en W m^{-2} . Si la radiación es de un rango de longitudes estrecho se denomina irradiancia espectral y se expresa en $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$.

1.2. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN UV CON LA ATMÓSFERA Y LA SUPERFICIE⁷

- Insolación o exposición: es la energía total acumulada en el tiempo que un cuerpo recibe por unidad de superficie al ser irradiado por una radiación electromagnética, se expresa en J m^{-2} . Si la radiación es de un rango de longitudes estrecho se denomina insolación espectral y se expresa en $\text{J m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$.

1.2. Interacción de la radiación UV con la atmósfera y la superficie

Dado que nuestra atención se centra en la radiación UV de origen solar que llega a la superficie terrestre, en primer lugar nos interesa conocer cómo interacciona con la atmósfera. Los dos fenómenos de extinción que consideraremos son, muy brevemente descritos [1, 2]:

- Absorción: es el fenómeno que transforma la radiación directa incidente en calor o que la emplea en ionizar moléculas mediante la interacción cuántica con los fotones.
- Dispersión o scattering: es el fenómeno por el que la radiación directa incidente es dispersada en todas direcciones y se debe a que las moléculas de gas y los aerosoles¹ se convierten en emisores puntuales secundarios de la radiación. La dispersión producida por moléculas se denomina 'dispersión o scattering Rayleigh' y la producida por aerosoles se denomina 'dispersión o scattering de Mie'.

El intervalo de radiación UV considerado se divide en tres tipos con diferencias en su interacción con los gases que forman la atmósfera [1, 2]:

- Ultravioleta C (UVC): intervalo de 280 a 100 nm. Es la radiación más energética de las tres, es absorbida y dispersada por el oxígeno y ozono de las capas altas de la atmósfera y se extingue completamente antes de alcanzar la superficie terrestre.
- Ultravioleta B (UVB): intervalo de 315 a 280 nm. Esta radiación es fuertemente absorbida por el ozono, solo alcanza la superficie aproximadamente un 10 % de la radiación incidente, una cifra que varía ligeramente en función de las variaciones de concentración de ozono estratosférico.
- Ultravioleta A (UVA): intervalo de 400 a 315 nm. Es la radiación menos energética de las tres y en este intervalo se produce la transición de radiación no ionizante a ionizante. La atmósfera absorbe y dispersa esta radiación en menor medida, extinguiendo aproximadamente un 50 % y convirtiéndola en la principal componente de toda la radiación UV que alcanza la superficie terrestre.

La nubosidad es otra condición atmosférica que es importante destacar, pues también extingue radiación UV, pero es necesaria una cobertura nubosa densa para que esta absorción sea relevante. Se estima que más del 90 % de la radiación UV incidente atraviesa la nubosidad de baja densidad, y en casos extremos la dispersión que produce puede llegar a aumentar la irradiancia a la que se ven sometidos los cuerpos sobre la superficie

¹Aerosoles: nombre con el que se denomina al conjunto de partículas sólidas y líquidas que se pueden encontrar en suspensión en la atmósfera.

[2,4]. El resto de aerosoles también pueden absorber y dispersar radiación UV [1], pero sus efectos son menos relevantes que los de la nubosidad. En consecuencia de lo explicado, la mayor parte de la radiación UV que podemos medir desde la superficie será UVA y estará acompañada de un pequeño porcentaje de UVB.

Otra condición que afecta a la irradiancia sobre los cuerpos es la pareja latitud - época del año y la elevación. Por regla general, la irradiancia sobre la superficie disminuye al aumentar la latitud, pero a cualquier latitud dependiendo de la época del año la radiación UV incidirá de forma más o menos oblicua a la superficie. Esta oblicuidad en la incidencia reduce la irradiancia de por sí, pero además, cuanto más oblicua sea mayor será el camino a recorrer a través de la atmósfera y mayor será la absorción de esta. De la misma forma, la elevación a la que esté el cuerpo irradiado es determinante porque a mayor altura menor será el espesor atmosférico, menor el camino que la radiación incidente UV realiza por la atmósfera y menor la absorción de esta. Las estimaciones con las que se trabajan son que la irradiancia sobre la superficie aumenta en un 4 % por cada 300 metros de altura o que por cada incremento de 1000 metros en altura la irradiancia aumenta entre un 10 y un 12 % [2].

Una vez la radiación ha atravesado la atmósfera, esta incide directamente sobre los cuerpos que haya sobre la superficie terrestre, pero la irradiancia a la que estos cuerpos son sometidos puede variar sustancialmente dependiendo del tipo de superficie y sus condiciones. Veamos las estimaciones que suelen manejarse en algunos casos que podrían llegar a ser relevantes para este trabajo [2]:

- Nieve: se estima que la nieve reciente o limpia puede reflejar un 80 % de la radiación UV incidente, aumentando en gran medida la irradiancia a la que se ven sometidos los cuerpos sobre esta superficie.
- Suelo rocoso o arenoso claro: se estima que reflejan en torno a un 15 % de la radiación UV incidente.
- Agua: se necesitan varios metros de profundidad para extinguir toda la radiación UV en condiciones de máxima irradiancia. Se estima que a medio metro de profundidad se ha extinguido al rededor del 60 % de la radiación UV incidente.
- Sombra: se estima que las sombras uniformes reducen la irradiancia UV directa en aproximadamente un 50 %, aunque puede depender mucho del objeto que proyecta la sombra y no se consideran efectivas bloqueando la radiación difusa.

1.3. Efectos de la radiación UV en la salud

Es bien conocido que una exposición adecuada a la radiación UV tiene efectos positivos sobre la salud e incluso es necesaria para la producción de vitamina D. También tiene utilidad en tratamientos médicos para enfermedades como el raquitismo o la psoriasis. Sin embargo nos centraremos en los efectos perjudiciales de la radiación UV de origen solar, pues es con su divulgación con lo que este trabajo puede ayudar.

La exposición a la radiación UV solar puede afectar a la salud de tres formas según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [2,5,6]: dañando la piel, los ojos y el sistema inmune.

1.3.1. La piel

Empezando por los efectos agudos, aquellos que tienen una duración corta y bien determinada, el más conocido es el eritema o quemadura solar, una irritación y enrojecimiento de la piel debido a los daños producidos en las células. Estos daños desencadenan en los días siguientes una respuesta biológica del cuerpo para protegerse, incrementando la producción de melanina, lo que se conoce como bronceado, y el grosor de la piel, lo que se manifiesta más tarde al escamarse y desprenderse la piel ‘sobrante’. A largo plazo, estos procesos producen un envejecimiento prematuro de la piel que facilita la aparición de otras dolencias. En función de la sensibilidad a la radiación UV, es decir, la facilidad de aparición de eritema, y de ciertas características morfológicas, se distinguen cuatro tipos de piel que se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de piel	se broncea	se quema	color cabello	color ojos
I	nunca	sistemáticamente	rojos	azules
II	a veces	habitualmente	rubios	azules/verdes
III	habitualmente	a veces	castaños	grises/castaños
IV	sistemáticamente	nunca	negros	castaños

Cuadro 1.1: Tipos de piel según sensibilidad a la radiación UV

Sin embargo, el más importante de todos es un efecto crónico, el cáncer de piel. A partir de los estudios realizados la OMS² llega a la conclusión de que tanto el cáncer de piel no melánico como los melanomas están directamente relacionados con la exposición a la radiación solar y, más concretamente, a la radiación UV. Cabe destacar que existen dudas sobre si una exposición a la radiación UV continua y muy prolongada en el tiempo pero sin que se produzcan eritemas es un factor de riesgo realmente determinante en estas dolencias, pero no hay duda de que las exposiciones altas e intermitentes sí son un factor de riesgo importante y está demostrada la asociación de la aparición de melanomas con los antecedentes de quemaduras solares, especialmente los producidos a edades tempranas.

En las últimas décadas se ha observado un incremento de las tasas de cáncer de piel, y una de las principales causas a las que se le atribuye es al aumento de la exposición a la radiación solar por motivos culturales, concretamente, el aumento de las actividades al aire libre con motivos recreativos y la percepción del bronceado como un indicador de belleza y salud combinado con un desconocimiento generalizado de los riesgos asociados. En la práctica han llevado a un gran incremento de las exposiciones intensas e intermitentes.

²Organización Mundial de la Salud (OMS), el organismo de la Organización de Naciones Unidas dedicado a gestionar y promover políticas de prevención y promoción de la salud

1.3.2. Los ojos

Los ojos tienen protecciones naturales contra la radiación solar que incide desde arriba, como su ubicación en cuencas hundidas y los actos reflejos que contraen la pupila y cierran parcialmente los párpados. Pero son especialmente vulnerables ante la radiación UV difusa o reflejada por las superficies, que evita estas protecciones y limitan su eficacia.

Los efectos agudos más importantes son la fotoqueratitis y la fotoconjuntivitis, inflamación de los tejidos del globo ocular y de los párpados respectivamente, aunque no suelen dejar secuelas. En condiciones extremas, como un día de alta irradiancia UV sobre una superficie nevada, estos efectos se pueden agravar y producir una ceguera temporal con secuelas importantes.

El efecto crónico destacable son las cataratas, la desnaturalización de proteínas del cristalino del ojo que hacen que se vuelva opaco progresivamente acabando en ceguera. Es la principal causa de ceguera en el mundo. La exposición a la radiación UV, especialmente la UVB, es uno de los principales factores de riesgo de esta enfermedad. En los países cercanos al Ecuador es un grave problema de salud pública.

1.3.3. El sistema inmune

La OMS reconoce que las evidencias aún son demasiado débiles, pero sí que habla abiertamente, aunque con cautela, de un efecto inmunodepresor por la exposición a la radiación UV. Las consecuencias pueden ser muy importantes, no solo porque la radiación UV facilitaría las infecciones, también porque el sistema inmunitario es el responsable de evitar la aparición de tumores y ralentizar su crecimiento, entonces la radiación UV no solo provoca directamente la aparición de cáncer de piel, si no que también reduce la eficacia del sistema inmune que se encarga de evitarlo y eliminarlo una vez ha aparecido.

1.3.4. La capa de ozono

Un problema añadido en relación con la radiación UV y la salud es la disminución de la concentración de ozono estratosférico que ha tenido lugar en las últimas décadas como consecuencia de la emisión de clorofluorocarbonos (CFC), aunque las medidas que se tomaron para solucionarlo con el Protocolo de Montreal (redactado en 1987 y en vigor desde 1989) han conseguido que en los últimos años esta reducción se detenga y la concentración se estabilice.

Esta disminución del ozono estratosférico puede ser muy peligrosa para la salud porque permite que más radiación UV alcance la superficie terrestre, especialmente la UVB, mucho más dañina que la UVA y absorbida en su mayor parte por esta capa de ozono, como ya hemos visto.

1.4. Divulgación e Índice UV (UVI)

Teniendo en cuenta los efectos sobre la salud de la exposición a la radiación UV, algunos de ellos muy graves, y a que una parte importante de los problemas que genera se deben a las actividades que la población lleva a cabo con una percepción errónea e ignorando los peligros, es evidente que la divulgación de los riesgos es necesaria. La OMS considera que los programas de divulgación sobre los riesgos de la exposición a radiación UV son importantes en la prevención de muchas enfermedades que afectan a la población mundial de forma generalizada, y que pueden mejorar considerablemente la salud pública y suponer un importante ahorro económico para los sistemas de atención a la salud.

Por ello se desarrolló un sistema que permitiera informar fácilmente a la población del riesgo de la exposición a la radiación UV solar en todo momento, pues como ya hemos visto este riesgo puede variar mucho a lo largo del año, de un día para otro e incluso a lo largo del día. Este sistema consta del índice ultravioleta (UVI, en sus siglas en inglés) y un código gráfico estandarizado globalmente para comunicar el mismo [Anexo A].

1.4.1. El índice ultravioleta UVI

El UVI es una magnitud adimensional pensada para informar de forma simple y rápida del riesgo de la exposición a la radiación UV en un día concreto. Se define basándose en el *espectro de acción eritémica de referencia* para los eritemas producidos sobre la piel humana por la radiación UV que es definido por la Comisión Internacional sobre iluminación (CIE). [2]

El *espectro de acción eritémica* se define como

$$s(\lambda)_{ER} = \frac{ID_{\lambda}(300nm)}{ID_{\lambda}(\lambda)} \quad (1.1)$$

donde $ID_{\lambda}(300nm)$ y $ID_{\lambda}(\lambda)$ representan las insolaciones espectrales monocromáticas a longitudes de onda de 300nm y λ respectivamente con una duración D necesaria para la aparición del eritema. Se ha observado que la longitud de onda de 300nm es de las más activas en la producción de eritemas, por tanto el valor $ID_{\lambda}(300nm)$ es de los más pequeños posibles, y entonces el espectro de acción eritémica $s(\lambda)_{ER}$ toma valores entre 0 y 1 y además es una magnitud adimensional. [1]

A partir de pruebas realizadas para pieles de tipo 1 y 2, la CIE definió un espectro de acción eritémica *de referencia* mediante el siguiente conjunto de ecuaciones [1]:

$$\begin{aligned} s(\lambda)_{ER} &= 10^0 = 1 && \text{para} && 250 \leq \lambda \leq 298nm \\ s(\lambda)_{ER} &= 10^{0,094(298-\lambda)} && \text{para} && 298 \leq \lambda \leq 328nm \\ s(\lambda)_{ER} &= 10^{0,015(139-\lambda)} && \text{para} && 328 \leq \lambda \leq 400nm \end{aligned} \quad (1.2)$$

Esta magnitud así definida nos está describiendo, para pieles de tipo 1 y 2, la capacidad para producir un eritema que tiene la irradiancia solar a cada longitud de onda del intervalo relevante (que por convenio es el de UVA, UVB y parte de UVC, de 250 a 400 nm). Gracias a ello podemos definir la *potencia eritémica* o *irradiancia efectiva* del sol de la siguiente forma [1]:

$$PEM = \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} s(\lambda)_{ER} d\lambda \quad (1.3)$$

con E_{λ} la irradiancia espectral solar expresada en $Wm^{-2}nm^{-1}$. Esta magnitud se expresa en Wm^{-2} , lo que concuerda con la interpretación de que es la irradiancia solar ponderada según su capacidad para producir un eritema.

Llegados a este punto, podemos llegar a la expresión del UVI simplemente normalizando la potencia eritémica a una escala que nos sea cómoda y útil. El UVI está definido numéricamente igual a 40 veces la potencia eritémica del Sol para las pieles de tipo 1 y 2 medida en valor medio de 10 a 30 minutos al rededor del máximo diurno. Esto se traduce en que para definir el UVI solo tenemos que multiplicar el PEM por una constante $k_{ER} = 40 m^2W^{-1}$:

$$UVI = k_{ER} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} s(\lambda)_{ER} d\lambda \quad (1.4)$$

con $k_{ER} = 40 m^2W^{-1}$, E_{λ} la irradiancia espectral solar y $s(\lambda)_{ER}$ el espectro de acción eritémica de referencia para pieles tipo 1 y 2. [1, 2]

Podemos ver que el UVI, tal y como está definido, es un índice que tiene un único valor para cada día y que describe la peligrosidad de la exposición a la radiación UV solar en torno al momento de máxima irradiación del día.

1.5. Solmáforo

El concepto del solmáforo consiste en un dispositivo que mida cada cierto tiempo la irradiancia UV, calcule el UVI y lo comunique a las personas de su alrededor mediante un panel de tipo semáforo que respeta el código gráfico estandarizado.

La definición del UVI, tal y como la comentábamos al final del apartado anterior, se ajusta bien a los servicios de predicción, que dan un único valor para cada día informando de

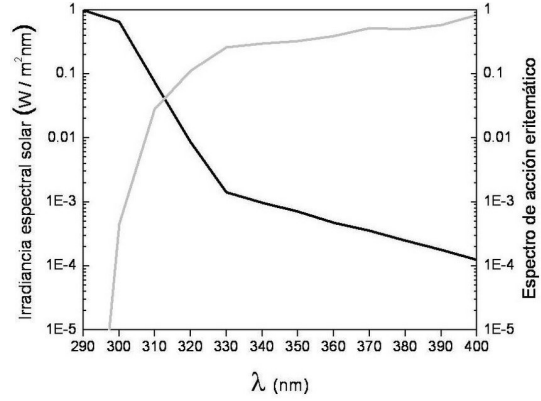


Figura 1.1: Espectro de acción eritémica (línea negra) [7]

forma rápida y sencilla a la población de los riesgos que correrán. Pero esta definición limita mucho el potencial de un dispositivo como el solmáforo, y se puede ‘abusar’ de ella para calcular el UVI de forma periódica y en tiempo real a lo largo del día. Esto no es estrictamente riguroso pero es evidente que resulta mucho más útil para el público y no surge ningún problema real de esta pequeña falta de respeto al estándar del UVI. La correcta comunicación del UVI es importante para que la población conozca los riesgos de la exposición a la radiación UV solar, y hacerlo de una forma atractiva para el público es una gran ayuda.

La utilización de un panel de tipo semáforo permite una comunicación muy sencilla y directa en un formato con el que la población está muy familiarizado, pues prácticamente todo el público al que este trabajo puede alcanzar conoce el funcionamiento de los semáforos de tráfico y forman parte de su rutina diaria. El formato y estilo visual del semáforo ha sido utilizado en muchas otras ocasiones por multitud de instituciones para advertir de riesgos de forma sencilla a la población en general, muchas veces acompañado de un índice numérico. Ejemplos de ello son el Nivel de Alerta Antiterrorista, fijado por el Ministerio de Interior del Gobierno de España, o el reciente *NutriScore* que forma parte de las estrategias conocidas como ‘semáforos nutricionales’.

El principal antecedente del solmáforo de este trabajo se encuentra en Argentina. La División de Atmósfera del *CITEDEF - UNIDEF (MINDEF-CONICET)*³ desarrolló varios dispositivos siguiendo esta misma idea de monitorizar el UVI y comunicar en tiempo real mediante un panel de tipo semáforo. Esta institución permite acceder a los datos en tiempo real de sus estaciones, incluyendo su red de solmáforos, en la web <http://data.savernet-satreps.org/>

³CITIDEF: Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa. UNIDEF: Unidad de Investigación y Desarrollo Estratégico para la Defensa. MINDEF: Ministerio de Defensa. CONICET: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Capítulo 2

Hardware. Descripción del instrumento

El hardware del solmáforo que se ha desarrollado en este trabajo consta de los siguientes elementos principales: microcontrolador, sensor UV y panel indicador. Además, se utilizan otros componentes necesarios, como son un convertor de señal analógica a digital, transformadores de corriente, relés electricos, etc.

2.1. El demostrador

Como primera aproximación, se montó un demostrador utilizando componentes de muy bajo coste. Como microcontrolador una *RaspBerry Pi 2B*, como sensor una placa *ARD2-2068* y como indicador un pequeño LED RGB. Se calibró utilizando las medidas de un único día despejado mediante comparación con las medidas del observatorio meteorológico *2422-Valladolid*, situado en la Calle Orión 1 (Valladolid) que AEMET¹ publicó en su web. El resultado fue aceptable para un demostrador.

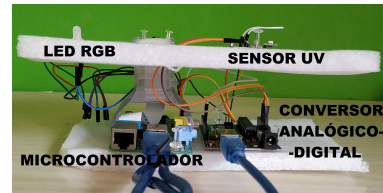


Figura 2.1: Demostrador

2.2. Componentes del Solmáforo

2.2.1. El sensor

El sensor utilizado es el *UV-Cosine_UVI* de la empresa *sflux GmbH* (especificaciones en el Anexo B). Elegido principalmente por la estabilidad en sus medidas a lo largo del tiempo y en distintas condiciones ambientales, y por estar diseñado para ser resistente al agua sin necesidad de añadir protecciones adicionales para usarlo en el exterior. Fue utilizado en el

¹Agencia Estatal de Meteorología de España

antecedente del *CITIDEF - UNIDEF* ya referenciado, quienes recomendaron su uso tras la experiencia.

El sensor ofrece una señal analógica entre 0 y 5 voltios que es proporcional al valor de UVI. La respuesta espectral del sensor se ajusta con precisión al *espectro de acción eritémica* (ver 2.3.1) entre las longitudes de onda 300 y 350 nm, es decir, en la parte del espectro UV que conforma prácticamente toda la irradiancia en superficie y que es relevante en la producción de eritemas.



Figura 2.2: Sensor UV

2.2.2. El microcontrolador

El microcontrolador utilizado es una *RaspBerry Pi 3B+*. Fue elegido por ser un modelo comercial fiable bien asentado en el mercado, con amplios recursos y componentes compatibles fácilmente disponibles. Al disponer de numerosos módulos integrados y sistema operativo *Raspbian*, distribución de *UNIX/Linux*, nos permite de una forma cómoda poder utilizar varios lenguajes de programación, conexión a internet, acceso remoto, comunicación con base de datos, etc. Es por esto que se prefirió frente al otro microcontrolador considerado, un *Arduino Nano*, cuya principal ventaja era simplicidad y bajo consumo eléctrico.

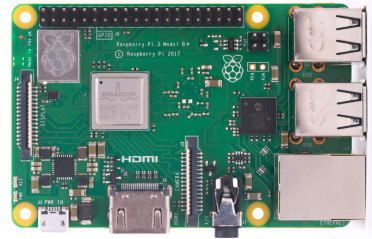


Figura 2.3: Microcontrolador

2.2.3. El panel indicador

Para el panel indicador se optó por utilizar los paneles LED de *Cree* modelo *XLamp CXA1304* en su versión de 5000K de temperatura de color. Fueron elegidos por emitir un flujo radiante de 10,9W, una luz suficientemente potente como para destacar a la vista a plena luz del día.

Estos paneles fueron colocados sobre una estructura cilíndrica para formar el panel indicador. La estructura está compuesta de módulos construidos mediante impresión 3D con material PLA. Se emplearon cinco módulos prácticamente idénticos para cada uno de los niveles de colores en los que se divide el UVI, pintados desde el módulo inferior hasta el superior de cada uno de los colores en orden creciente de UVI, y se colocaron equiespaciados tres paneles LED en cada uno de ellos para que la luz sea visible en cualquier dirección. Sobre el módulo superior se colocó un módulo en forma de cúpula cuya



Figura 2.4: Panel indicador

función es proteger de la lluvia y el sol el interior del cilindro, y fue provisto de una superficie vertical destinada a soportar la garita con el sensor.

Los paneles LED de cada módulo parpadean, manteniéndose encendidos durante $200ms$ cada $1s$, indicando de esta manera el nivel de UVI correspondiente a cada momento. Se eligió el parpadeo respecto a un encendido estático por dos motivos: permite que sea más fácil de distinguir para el observador qué nivel es el que está encendido y nos permite mantener baja la temperatura de los paneles sin necesidad de disipadores ni ventilación forzada.

2.2.4. Otros componentes

Utilizamos el conversor analógico-digital (conversor AD) *Adafruit* modelo *ADS1015* que nos permite convertir la señal analógica del sensor en una señal digital que el microcontrolador puede leer.

Utilizamos módulos relé *SONGLE* modelo *SRD-05VDC-SL-C* que nos permiten controlar con una señal digital el encendido y apagado de los paneles LED.

2.3. Dispositivos

2.3.1. Prototipo de calibración

El prototipo de calibración estuvo compuesto por el microcontrolador, el conversor analógico-digital y el sensor UV. Este último fue colocado en una garita para proteger la conexión del cable y la garita fue atornillada a un mástil orientando el sensor al cenit. El resto fue colocado en una caja provista de un enchufe en su interior para proteger la electrónica y alimentación.

Tras varios meses de mediciones de calibración, desde finales de julio hasta mediados de diciembre de 2020, unas fuertes lluvias inundaron la caja y destruyeron los componentes electrónicos pero no dañaron el sensor.

2.3.2. Prototipo funcional

El prototipo funcional de Solmáforo incluyó todos los componentes ya detallados y fue instalado en el banco de mediciones del *GOA* situado en la terraza de la Facultad de Ciencias de la UVa. Se decidió no integrar todas las partes en una misma estructura con los objetivos de facilitar el montaje y desmontaje y poder estar totalmente seguros de que resistirían un episodio de fuertes lluvias.

El sensor UV, colocado en su garita, fue fijado al lateral del banco de mediciones. El panel indicador fue fijado encima del banco de mediciones. El resto de componentes electrónicos se integraron dentro de una caja anexa al banco de mediciones y elevada sobre el suelo.

Queda como trabajo de futuro integrar todas las partes del dispositivo en una misma estructura, fijando la garita del sensor en la superficie vertical que hay sobre el panel

indicador, y la caja con la electrónica en la parte inferior del panel indicador.

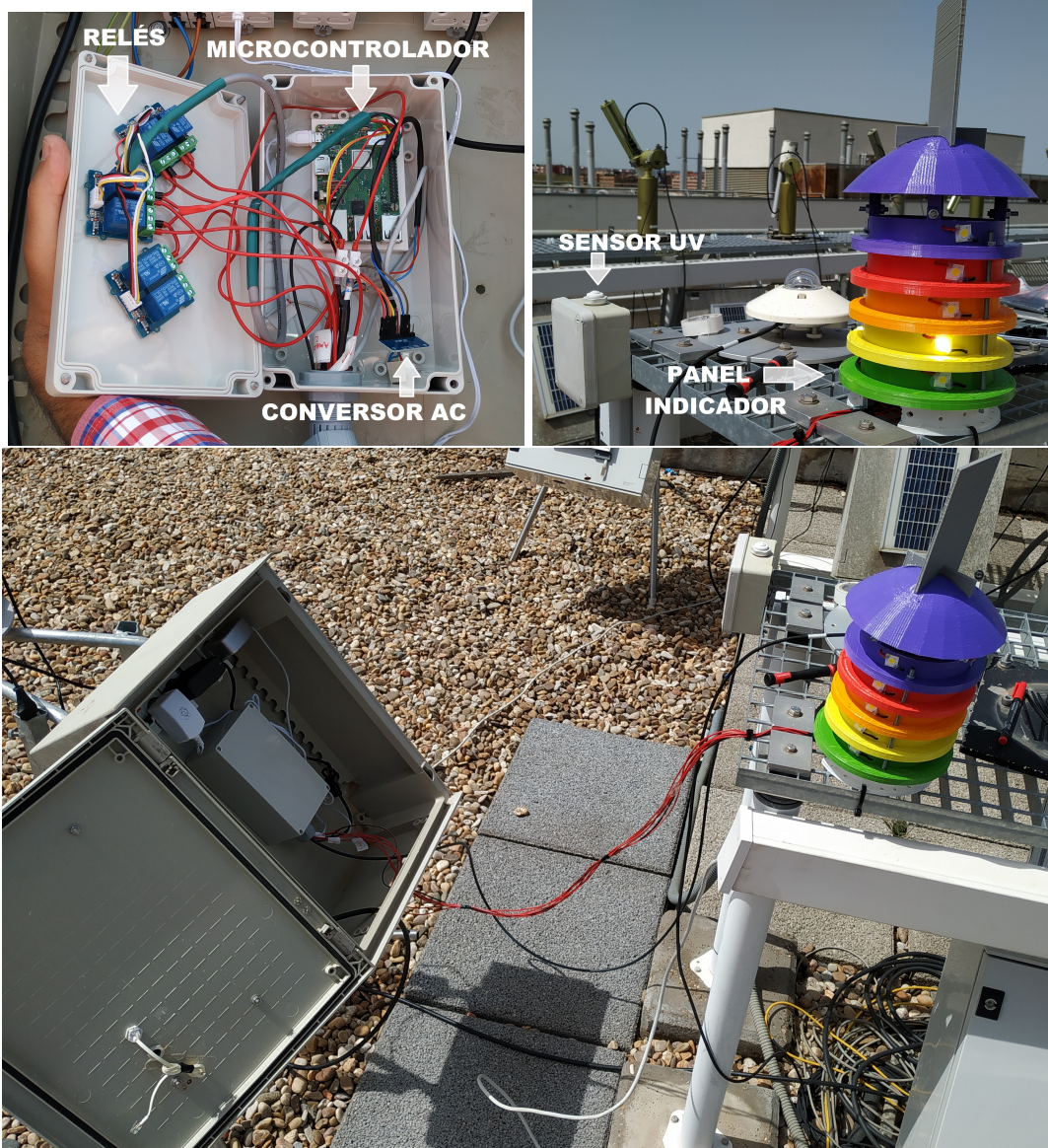


Figura 2.5: Solmáforo

Capítulo 3

Medidas, resultados y análisis

3.1. Calibración

Como hemos visto en la descripción del sensor UV, ofrece una señal analógica entre 0 y 5V que es proporcional al UVI, pero necesita ser calibrado. La calibración se realizó por comparación respecto a las medidas realizadas por AEMET en el observatorio *2422-Valladolid*, situado en la Calle Orión 1 (Valladolid). La distancia que separa este observatorio de la ubicación del prototipo de calibración es de *4,7km*, una distancia insuficiente como para que haya diferencias perceptibles en la irradiancia solar de ambas ubicaciones, excepto por la influencia de las nubes que pueden arrojar sobre las ubicaciones sombras distintas en momentos distintos.

El prototipo de calibración estuvo tomando una medida cada minuto desde el día 30 de julio de 2020 hasta el 20 de diciembre de 2020. AEMET nos proporcionó para esas fechas la medida de UVI diaria. Se solicitó a AEMET información detallada sobre el método de medida y procesado posterior de los valores, ante la ausencia de respuesta tuvimos que asumir que la medición y tratamiento se realizó tal y como está definida en el apartado 2.3.1. de este trabajo, aunque existía la posibilidad de que los valores fueran el valor máximo medido durante el día (con un periodo entre mediciones desconocido). El objetivo de la calibración por comparación es conseguir un ajuste de las medidas del sensor que acerquen sus resultados lo máximo posible a las medidas de referencia de AEMET, porque al ser una institución adherida a la OMM¹ tenemos la garantía de que los datos proporcionado por AEMET están calibrados y ajustados a los estándares de la OMM. Para esto se utilizaron 2 métodos, que se exponen a continuación.

¹Organización Meteorológica Mundial (OMM), organismo de la Organización de las Naciones Unidas encargado de facilitar y asegurar la cooperación de los servicios meteorológicos nacionales así como estandarizar la instrumentación y métodos de observación

3.1.1. Filtrado manual de las medidas

El primer método consiste en calibrar por comparación eligiendo los días despejados con el cielo más limpio, con el objetivo de asegurarnos que las condiciones atmosféricas son adecuadas para afirmar que ambos instrumentos están midiendo lo mismo a pesar de estar separados varios kilómetros. Para ello, utilizamos las medidas de espesor óptico de aerosoles (AOD - Aerosol Optical Depth), que el GOA toma desde la terraza de la Facultad de Ciencias y publica en AERONET². A estas medidas se les aplica un algoritmo de control de la nubosidad, por lo que aquellos días cuyos datos son etiquetados como libres de nubes (el denominado nivel 1.5 de AERONET) podemos considerarlos como despejados. Si elegimos aquellos días despejados que además tengan valores de AOD inferiores o cercanos a 0,2 sabremos que el cielo estaba limpio, libre de polvo en suspensión o nubosidad fina.

Consultando estos datos, los días del periodo considerado con mayor calidad atmosférica para nuestra calibración son:

Agosto: 4, 5, 13, 15, 16, 19, 24, 25, 27, 28. Septiembre: 2, 4, 9, 10, 11, 29.

Octubre: 7, 9, 12, 30. Noviembre: 17, 18, 19, 22. Diciembre: 12

Vamos a comparar con un único valor por día desde agosto hasta diciembre, de forma que estos valores con los que comparamos disminuyen según avanza el tiempo al desplazarnos del verano hacia el invierno por la menor elevación solar. Disponemos de una buena distribución de días con calidad atmosférica a lo largo de todo el periodo considerado, esto nos permite disponer de una mayor variedad de valores con los que realizar el ajuste, lo que es beneficioso para la calidad de la calibración.

Realizamos un ajuste por regresión lineal de los valores de UVI proporcionados por AEMET frente a los valores de voltaje máximos diarios del sensor UV. Primero consideramos el valor máximo de voltaje diario ofrecido por el sensor, la regresión lineal nos proporciona el siguiente resultado:

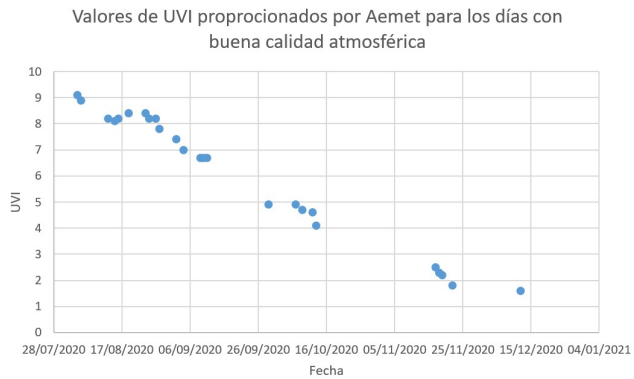


Figura 3.1: Valores de UVI proporcionados por AEMET en los días seleccionados por buena calidad atmosférica

²Aerosol Robotic Network. Consultar <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>

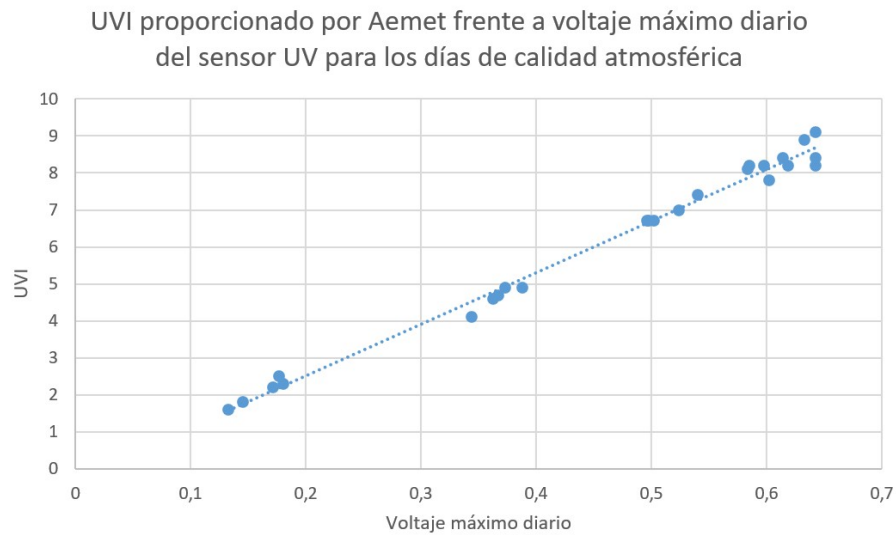


Figura 3.2: Regresión lineal del valor de voltaje máximo diarios para los días seleccionados por su buena calidad atmosférica

$$UVI = 13,93659289V_{max} - 0,269306249 \quad R^2 = 0,99091088 \quad (3.1)$$

Ajustamos los valores de máximo voltaje diario medido por el sensor para todo el periodo y representamos en el tiempo junto al UVI proporcionado por AEMET:

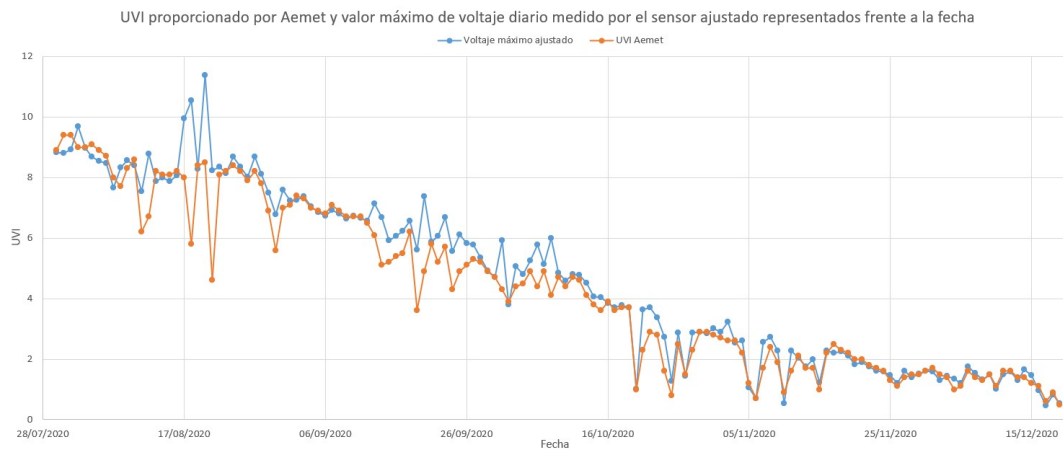


Figura 3.3: Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario realizado con la selección de días con buena calidad atmosférica

Ahora consideramos el valor medio de las medidas tomadas 30 minutos en torno al valor de voltaje diario máximo medido por el sensor UV, siguiendo la definición del UVI en el apartado 2.3.1. La regresión lineal nos proporciona el siguiente resultado:

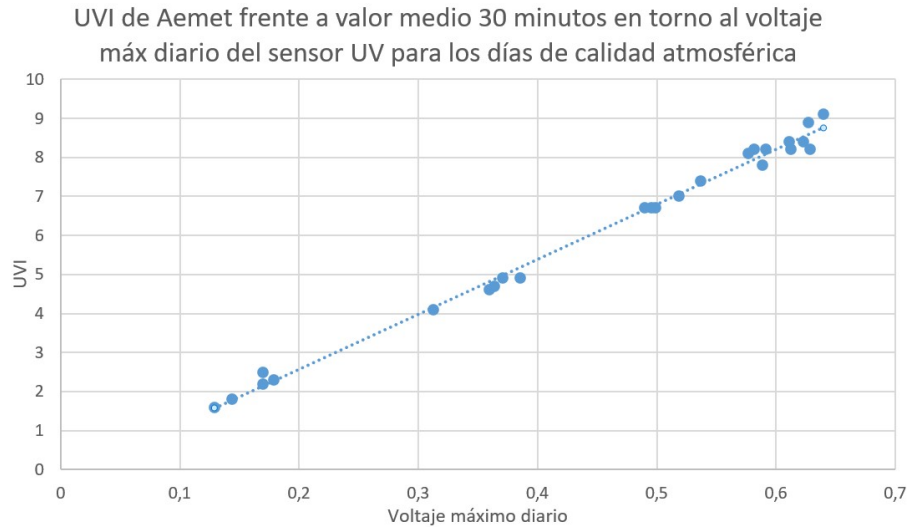


Figura 3.4: Regresión lineal del valor medio 30 minutos en torno al voltaje máximo diario para los días seleccionados por buena calidad atmosférica

$$UVI = 14,04533385V_{med,max} - 0,231036774 \quad R^2 = 0,993690741 \quad (3.2)$$

Ajustamos los valores de valor medio en 30 minutos en torno al máximo voltaje diario medido por el sensor para todo el periodo y representamos en el tiempo junto al UVI proporcionado por AEMET:



Figura 3.5: Comprobación del ajuste del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario realizado con la selección de días con buena calidad atmosférica

Se puede observar que en ambos ajustes el resultado es bueno, las medidas ajustadas del sensor UV concuerdan adecuadamente con los valores de UVI proporcionados por AEMET. Sin embargo podemos observar una clara ventaja del segundo ajuste frente al primero. En el primer ajuste, al comparar, destacan valores medidos por nuestro sensor UV muy superiores a los medidos por AEMET en varios periodos de unos pocos días (en torno al 18 de agosto, del 13 al 27 de septiembre y en torno al 22 de octubre). En el segundo ajuste, estos problemas desaparecen casi por completo. Esto refuerza nuestra suposición de que los valores de UVI proporcionados por AEMET siguen la definición del UVI del apartado 2.3.1., aunque no sepamos si la media se realiza exactamente con 30 minutos en torno al máximo. También podemos deducir que el segundo ajuste es de mayor calidad que el primero, por lo que la expresión 3.2 será el ajuste de calibración de nuestro sensor UV.

3.1.2. Filtrado estadístico de las medidas

En este método, emplearemos los datos de todos los días del periodo considerado para hacer la regresión lineal. Al igual que antes, comenzamos por los valores de UVI proporcionados por AEMET frente a los valores de voltaje máximos diarios del sensor UV, la regresión lineal nos proporciona el siguiente resultado:

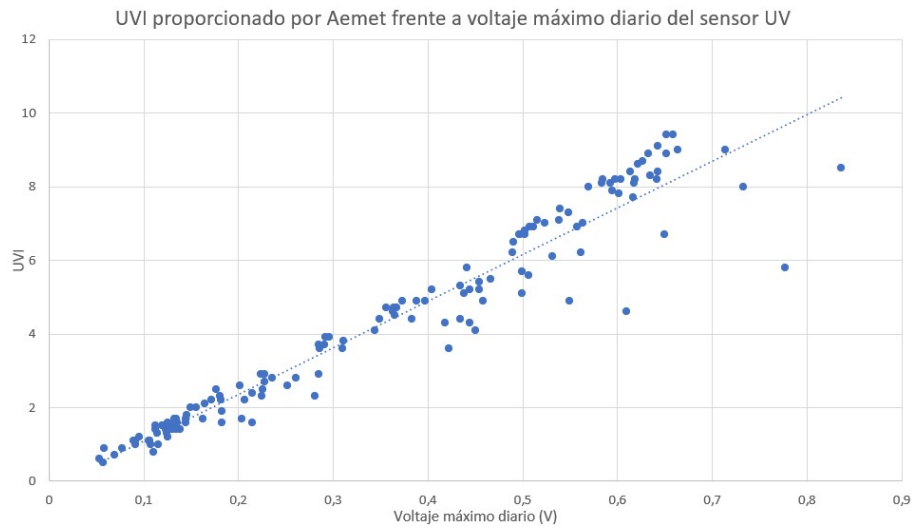


Figura 3.6: Regresión lineal del voltaje máximo diario

$$UVI = 12,69017418V_{max} - 0,17822408 \quad R^2 = 0,931134422 \quad (3.3)$$

Salta a la vista una mayor dispersión de los valores en torno a la recta de ajuste, como cabía esperar. Ajustamos los valores de voltaje y comparemos con el UVI proporcionado por AEMET para comprobar la calidad de la calibración:

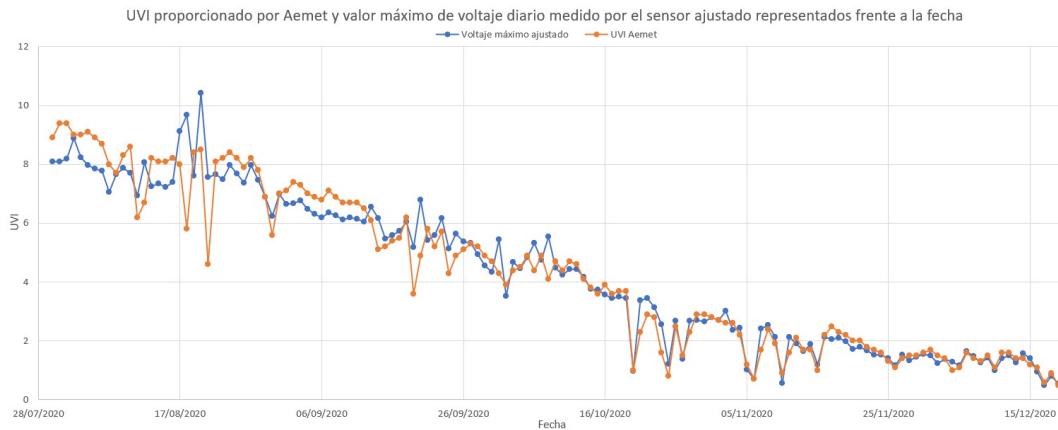


Figura 3.7: Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario

Observamos un gran desajuste en los valores altos. La influencia de los días con mala calidad atmosférica para realizar la calibración es demasiado perjudicial como para poder emplear este ajuste.

Vamos a realizar un tratamiento estadístico para filtrar los días con peor calidad. El objetivo es tratar de no considerar aquellos días en los que nuestro sensor ha tomado una medida máxima muy diferente de la medición de AEMET. Una vez realizado este primer ajuste, para cada día tomaremos en valor absoluto la diferencia entre el valor de UVI proporcionado por AEMET y el valor de voltaje máximo ajustado. Si esta diferencia es mayor que el valor de UVI proporcionado por AEMET multiplicado por un cierto factor de calidad, el día no será tenido en cuenta al realizar una segunda regresión lineal.

Como nuestro objetivo es conseguir que los valores medidos por nuestro sensor se acerquen todo lo posible al UVI proporcionado por AEMET, podemos tomarnos la libertad de probar distintos valores del factor de calidad y buscar el que nos da un mejor resultado. Al fin y al cabo, con esto estamos eligiendo los días no adecuados para realizar el ajuste, para descartarlos. Encontramos que un valor de 0,15 para el factor de calidad arroja buenos resultados, es decir, descartamos aquellos días con mediciones de nuestro sensor que, tras ser ajustadas, se alejan más de un 15 % del valor de UVI correspondiente. Realizamos la regresión lineal y nos proporciona el siguiente resultado:

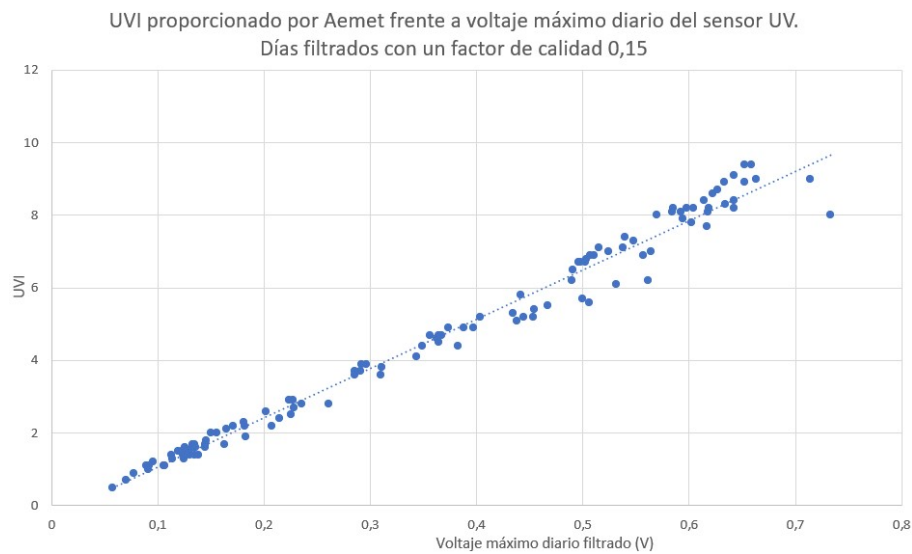


Figura 3.8: Regresión lineal del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15

$$UVI = 13,57367428V_{max} - 0,315679868 \quad R^2 = 0,978045978 \quad (3.4)$$

Se observa que la dispersión es menor que antes. Ajustamos y comparamos:

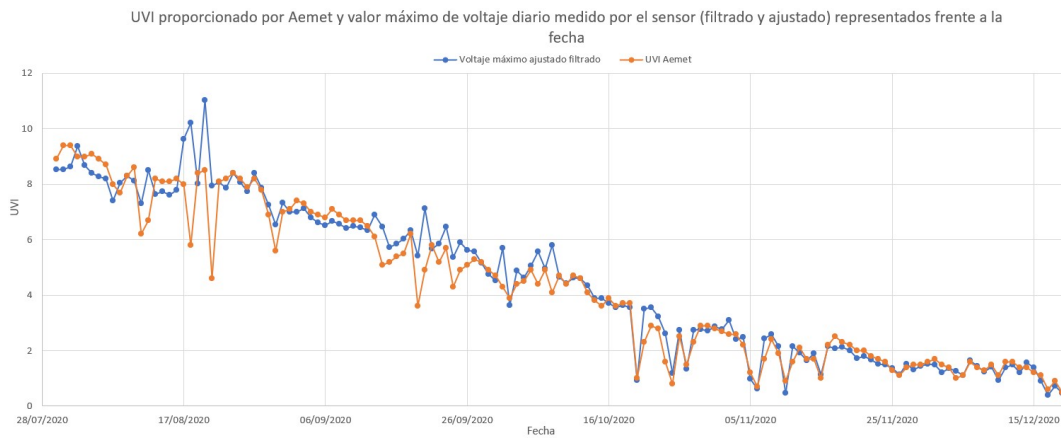


Figura 3.9: Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15

Se observa una mejora de concordancia en los valores superiores, donde teníamos los mayores problemas, mientras que los valores inferiores se mantienen correctamente y los valores intermedios continúan presentado cierta discrepancia. Vamos a buscar una mejora aún mayor haciendo un segundo filtrado a partir de este ajuste, utilizamos un factor de calidad de 0,05, es decir, descartamos los días con una discrepancia mayor el 5%. La regresión lineal nos ofrece el siguiente resultado:

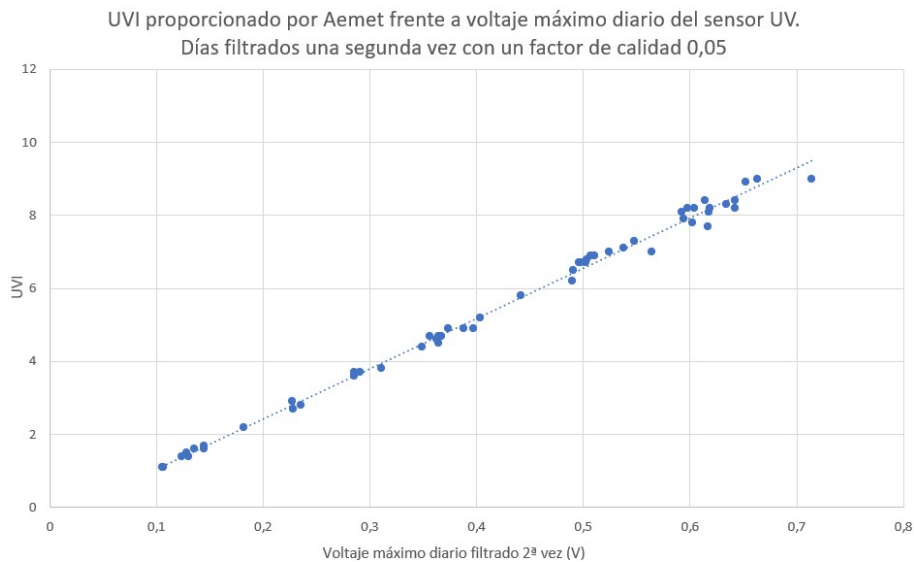


Figura 3.10: Regresión lineal del voltaje máximo diario con un filtrado adicional de los días con un factor de calidad de 0,05

$$UVI = 13,70350964V_{max} - 0,293139294 \quad R^2 = 0,985560234 \quad (3.5)$$

Se observa que apenas hay dispersión de los datos en comparación con los 2 pasos anteriores, lo que sugiere una mejoría, pero el número de datos ha disminuido sensiblemente y eso puede contribuir a empeorar la calidad de la calibración. Ajustamos y comparamos:

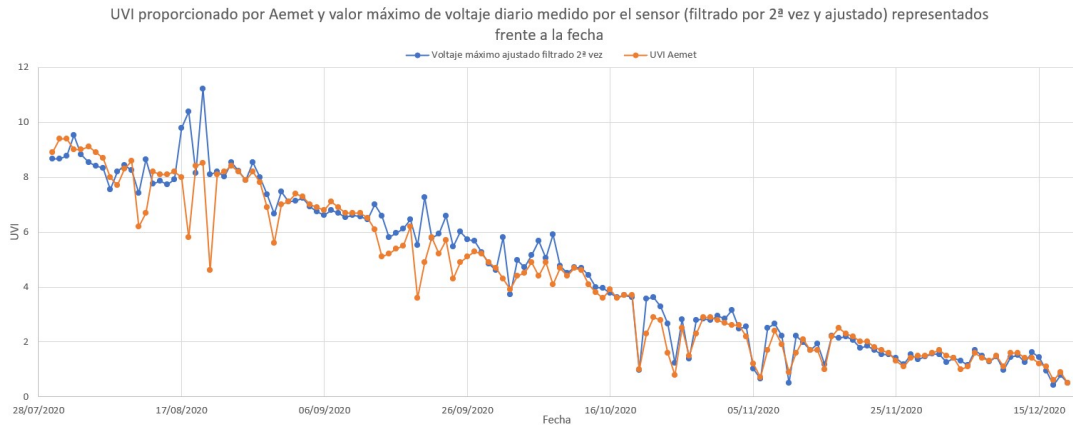


Figura 3.11: Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario filtrando los días adicionalmente con un factor de calidad de 0,05

A primera vista no se observa una mejoría significativa. Si observamos los pequeños detalles, podemos observar un mayor acercamiento entre las curvas en algunos tramos concretos, pero el efecto es tan pequeño que podemos concluir que este último paso no tiene utilidad real. Es probable que con un tratamiento más fino en el primer filtrado de días sea posible conseguir una mejoría similar. Ya que el objetivo es optimizar el ajuste para que las dos curvas tengan la mínima separación, sería una posibilidad determinar el valor óptimo del factor de calidad mediante el método de montecarlo u otros algoritmos de optimización, algo que queda planteado para realizar posteriormente a la presentación de este trabajo.

Hay una forma obvia de tratar de mejorar los resultados obtenidos que ya hemos realizado en el método anterior. Vamos a realizar este mismo tratamiento pero considerando el valor medio de las medidas tomadas 30 minutos en torno al valor de voltaje diario máximo medido por el sensor UV, siguiendo la definición de UVI expuesta en el apartado 2.3.1. Previsiblemente, esto eliminará el problema de los valores muy superiores, como ya nos ocurrió en el anterior método.

Realizamos el ajuste lineal y nos proporciona el siguiente resultado:

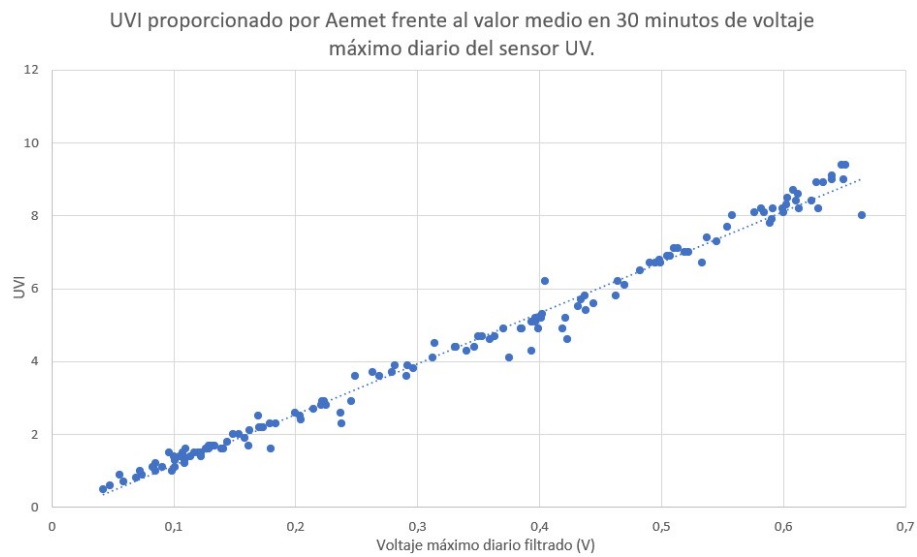


Figura 3.12: Regresión lineal del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario

$$UVI = 13,70350964V_{max} - 0,293139294 \quad R^2 = 0,985560234 \quad (3.6)$$

Podemos observar que la dispersión es mucho menor que en la gráfica de la figura 3.6, lo que nos anticipa un mejor resultado.

Ajustamos y comparamos:

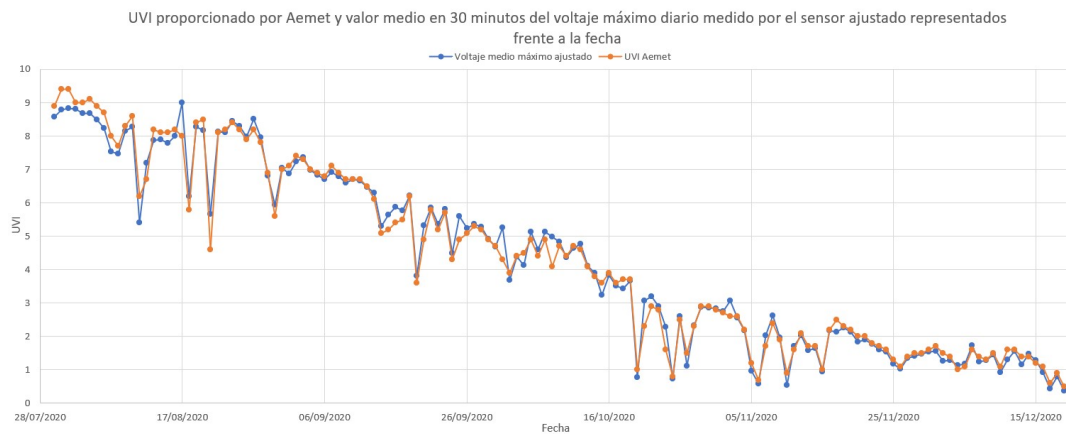


Figura 3.13: Comprobación del ajuste del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario

Antes de seguir analizando, igual que antes, realizamos un filtrado de días con factor de calidad de 0,15 por ser el que mejor resultado ofrece. La regresión lineal nos proporciona el siguiente resultado:

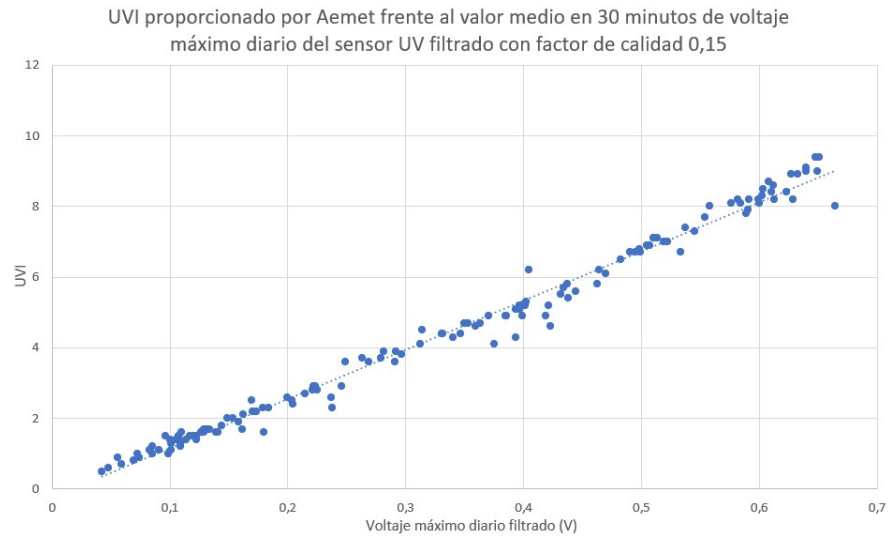


Figura 3.14: Regresión lineal del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15

$$UVI = 14,03019447V_{max} - 0,250263472 \quad R^2 = 0,991393575 \quad (3.7)$$

Ajustamos y comparamos:

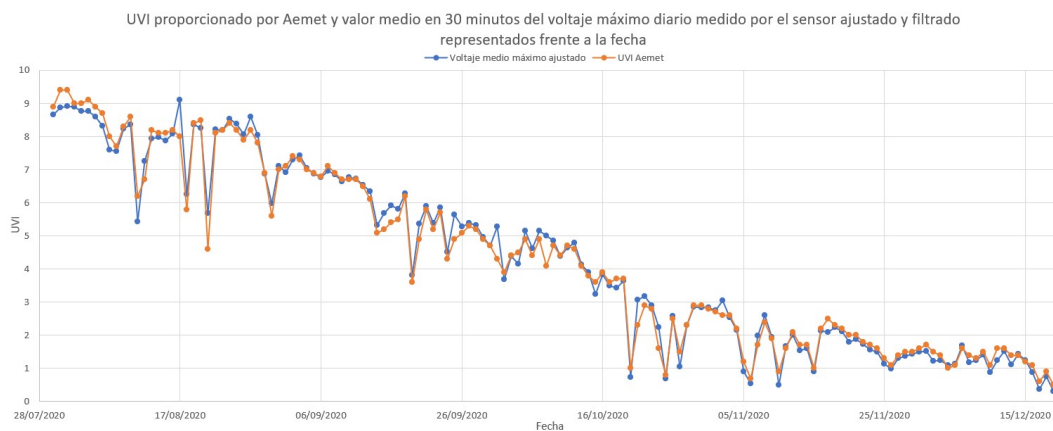


Figura 3.15: Comprobación del ajuste del calor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad del 0,15

El ajuste es muy bueno y el problema de las grandes discrepancias en días concretos desaparece. Sin embargo en esta ocasión el filtrado apenas supone una mejoría, hay que observar detalles muy concretos para percibir un acercamiento entre las dos curvas. Así que consideramos que la expresión 3.7 es suficientemente buena para considerarla un buen resultado de calibración de este método.

3.1.3. Resultado y análisis de la calibración

Para calibrar el sensor, los datos de calibración y los de referencia tienen que ser comprobables, es decir, significar lo mismo físicamente. Ya hemos comprobado que los valores de UVI proporcionados por AEMET siguen la definición del apartado 2.3.1., porque al procesar las medidas de nuestro sensor de esta manera las curvas de ambos conjuntos de datos presentan perfiles prácticamente idénticos. Es obvio entonces que la calibración debe realizarse con los resultados de considerar la media en 30 minutos en torno al valor máximo de UVI diario. Además, vemos en la figura 3.5 que la comparación de estos datos con los proporcionados por AEMET dan un resultado muy bueno. Podemos considerar, entonces, que la expresión 3.2 es un ajuste de calibración de calidad para nuestro sensor UV, y es por tanto la expresión que utiliza el Solmáforo para convertir la señal analógica del sensor UV en la medida del UVI.

Hemos preferido el resultado del primer método frente al segundo, porque el segundo utiliza únicamente las propias medidas para seleccionar los días adecuados para calibrar, mientras que el primer método emplea criterios y medidas adicionales, como son los registros de AOD, para determinar la calidad del día para ser empleado en la calibración.

Los resultados del segundo método expuestos en el apartado 4.1.2. nos sirven como control de calidad del primero. Observamos que las expresiones 3.7 y 3.2 son muy parecidas aunque no idénticas. El valor de la pendiente difiere en un 0,11 % y el de la ordenada un 8,32 %. Las figuras 3.15 y 3.5, en las que se comparan estos dos ajustes con los valores de UVI proporcionado por AEMET, son idénticas. Esta buena concordancia entre los resultados de ambos métodos aporta consistencia al resultado de nuestra calibración.

3.2. Medidas del prototipo funcional

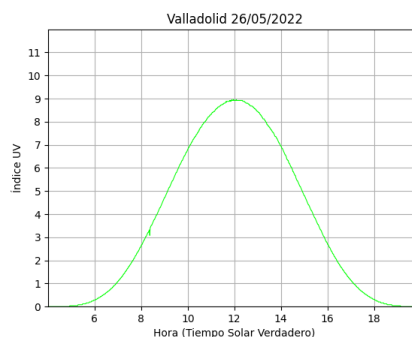
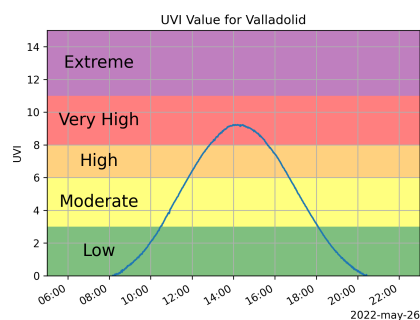
El prototipo, calibrado y con el panel indicador integrado, estuvo instalado, funcionando y registrando medidas en la terraza de la Facultad de Ciencias de la UVa desde el día 16 de mayo de 2022 hasta la entrega de este trabajo a mediados de julio de 2022. En esta ocasión, el dispositivo no almacena simplemente la señal analógica del sensor UV, toma ese valor de voltaje y lo ajusta mediante la expresión 3.2 para obtener el UVI, almacenando directamente la medida de UVI.

Además, se automatizó la creación de gráficas diarias que se van generando en tiempo real con las medidas tomadas por el solmáforo, proceso que se detalla en el siguiente capítulo. Vamos a comparar estas curvas que el solmáforo grafica diariamente con las curvas diarias

que AEMET publica en su web³ para comprobar el buen funcionamiento del solmáforo. AEMET proporciona estas gráficas diarias, pero no los datos numéricos con los que son elaboradas. Hay que destacar que AEMET representa sus medidas respecto al Tiempo Solar Verdadero⁴, que en la época del año y ubicación en la que estamos comparando los datos se puede transformar de forma orientativa a la hora local española sumando 2 horas y media.

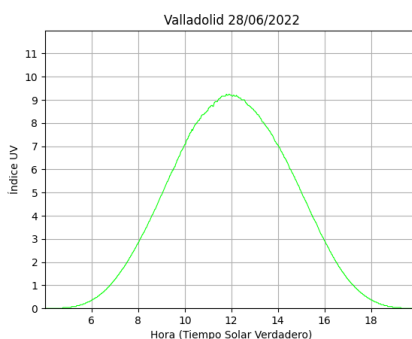
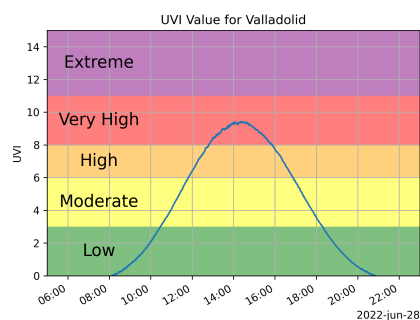
Empezamos comparando días con cielos despejados que nos dan curvas limpias y suaves. Observamos que hay días que presentan valores muy similares, pero otros días en los que los valores son significativamente distintos, en todos ellos el solmáforo registra valores superiores a los de AEMET.

A continuación, presentamos comparaciones de varios días con buena coincidencia de las curvas:



© Agencia Estatal de Meteorología

AEMET
Agencia Estatal de Meteorología



© Agencia Estatal de Meteorología

AEMET
Agencia Estatal de Meteorología

³<https://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/radiacion/ultravioleta>

⁴Tiempo Solar verdadero: medida del tiempo pensada para seguir el movimiento del Sol en el firmamento, se establece considerando que un 'día solar verdadero' es el intervalo entre dos retornos sucesivos del Sol a un meridiano local y que a las 12:00 el Sol esté en su punto más alto

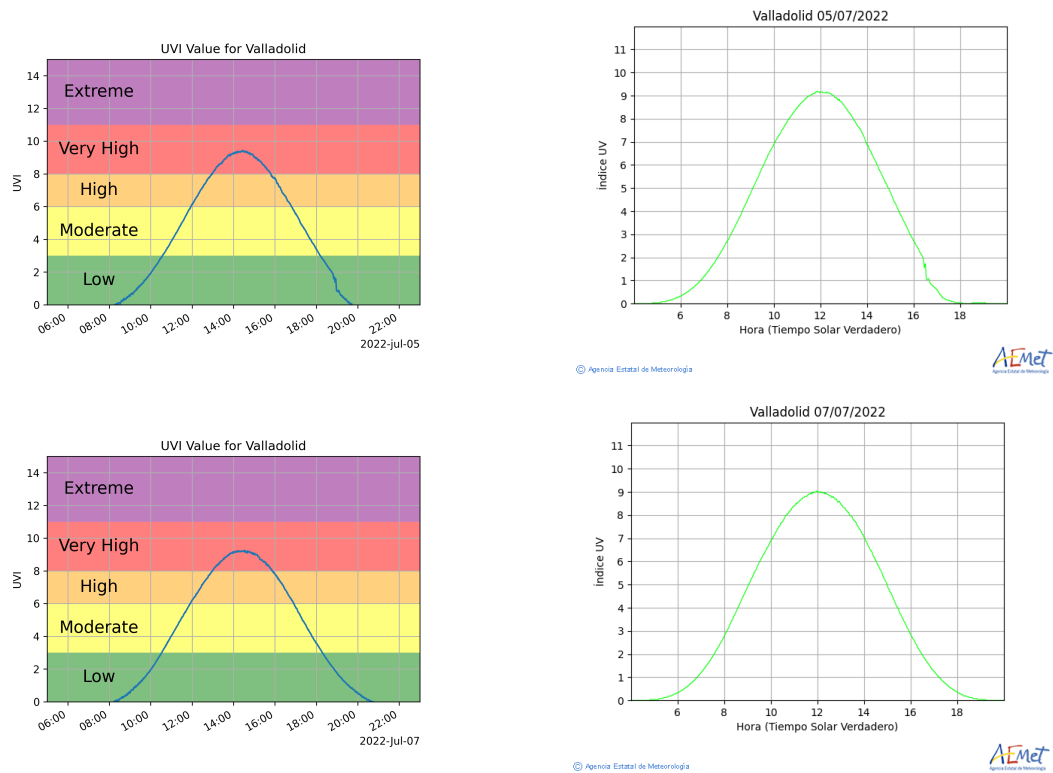
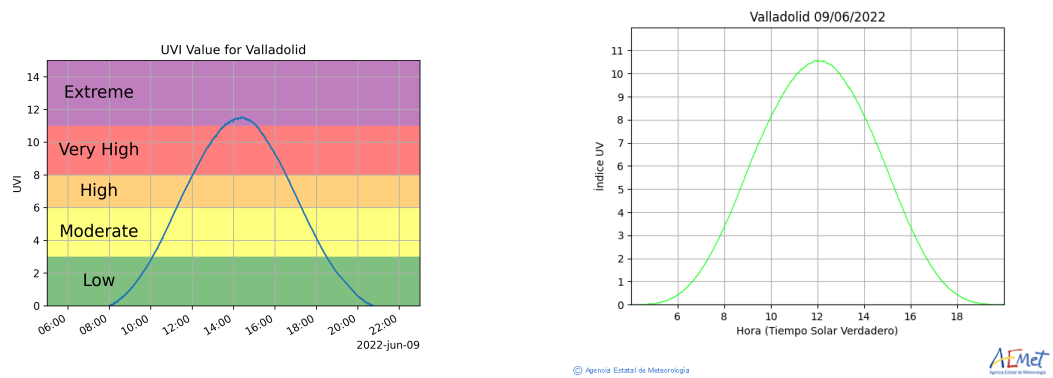


Figura 3.16: Comparación de días con buena coincidencia. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET

A continuación, presentamos comparaciones de varios días en los que el solmáforo midió valores de UVI claramente superiores que AEMET:



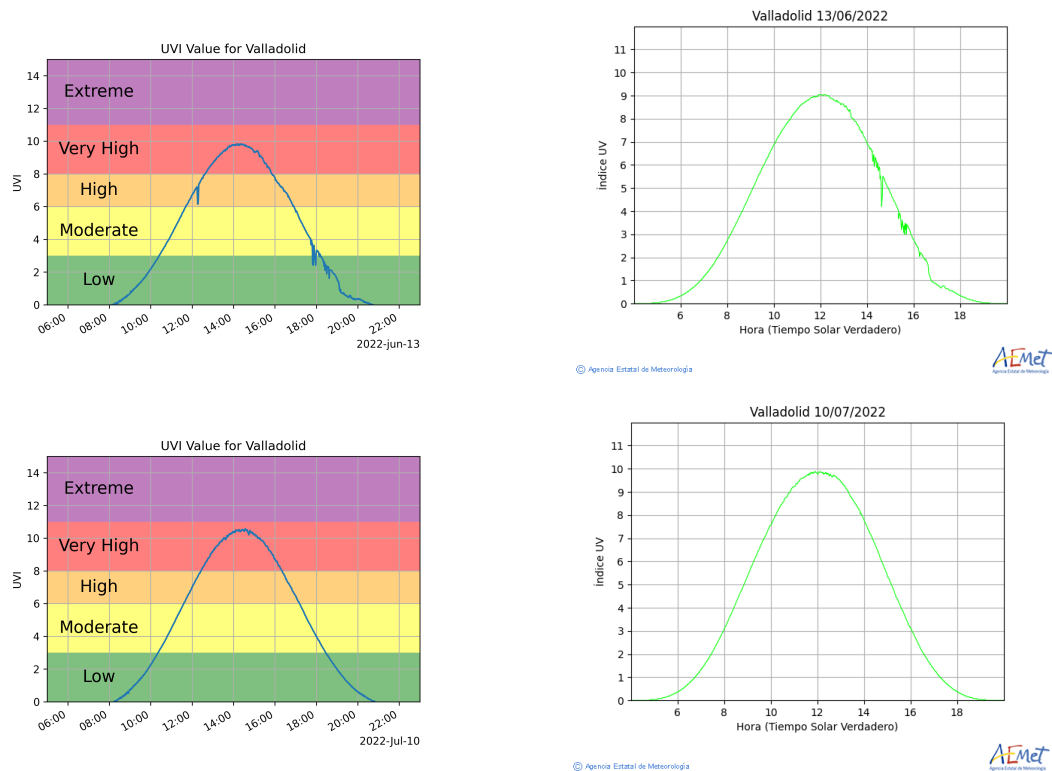


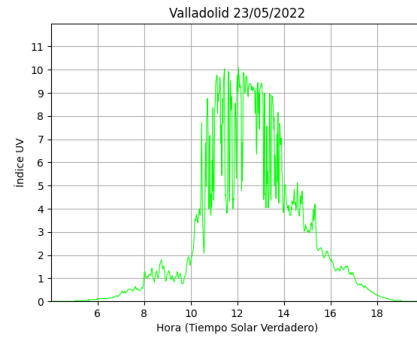
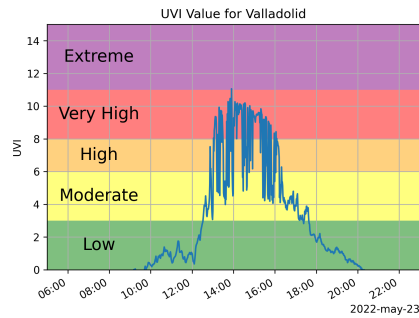
Figura 3.17: Comparación de días con discrepancias. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET

Los 3 días con discrepancias y los 4 días con buen ajuste de las curvas que han sido presentados son representativos del comportamiento de las medidas durante todo el periodo. Comprobando con los registros de la cámara ‘todo cielo’ que el GOA tiene instalada en la terraza de la Facultad de Ciencias, todos estos días fueron despejados, así que no podemos responsabilizar a las nubes de estas diferencias. Comprobando las medidas de AOD que ya hemos empleado antes, estos días tuvieron cielos limpios y libres de aerosoles a excepción del 13 de junio y 5 de julio (días en los que se produjeron fuertes irrupciones de polvo provenientes del norte de África), en ellos se observa una disminución uniforme del UVI a lo largo del día. Como las discrepancias y buenos ajustes ocurren tanto con cielos limpios como con fuerte carga de aerosoles, podemos descartarles como responsables.

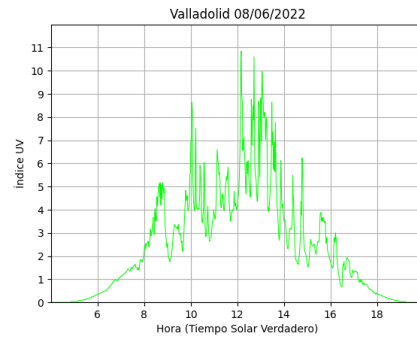
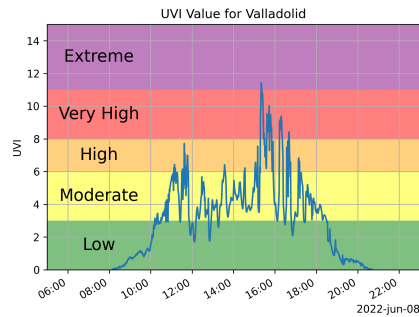
Si regresamos a la calibración realizada en el apartado anterior, podemos observar en la figura 3.15 que los valores máximos que se emplearon no superan el valor 10 de UVI. Una posibilidad es que la calibración tenga una carencia de precisión al acercarnos o superar este valor, para lo cual, posteriormente a la presentación de este trabajo se tratará de incluir estas nuevas medidas en la calibración, de forma que se incremente la precisión

para valores altos.

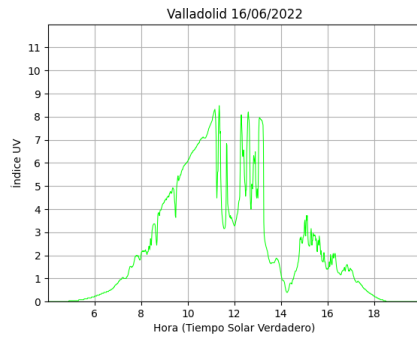
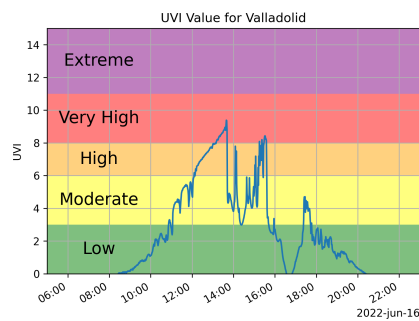
Por último, comparamos días en los que había presencia de nubosidad y las medidas trazan curvas con comportamientos claramente reconocibles:



© Agencia Estatal de Meteorología



© Agencia Estatal de Meteorología



© Agencia Estatal de Meteorología



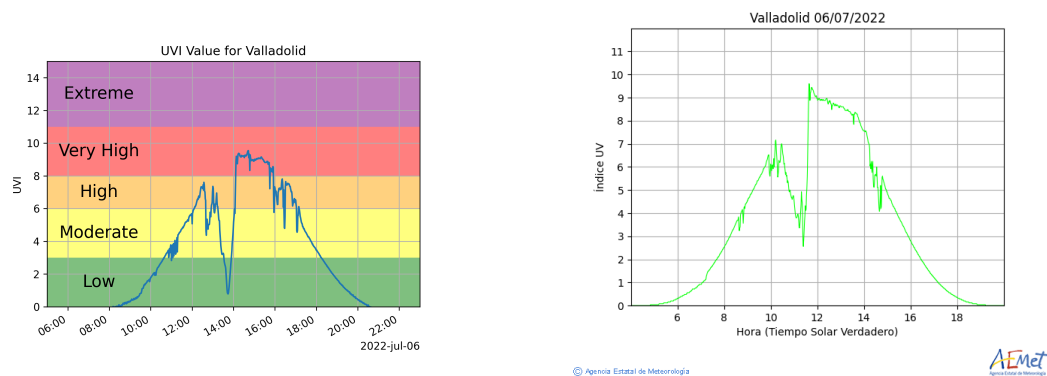


Figura 3.18: Comparación de días con nubosidad. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET

Observamos que el ajuste de las curvas es bueno en estos días con presencia de nubosidad, pero es interesante detenernos un poco a analizar diferencias. El día 23 de mayo presenta un comportamiento idéntico de subidas y bajadas abruptas, típico de días con nubosidad variable pero uniforme, algo que se comprueba que es así con la cámara ‘todo cielo’. El día 8 de junio tiene el mismo análisis que el 23 de mayo, con la diferencia de que en torno a las 12:30 (hora local) un claro entre la nubosidad pasó sobre el observatorio de AEMET pero no sobre la Facultad de Ciencias. El día 16 de junio, la nubosidad fue intermitente, y cabe destacar que el solmáforo midió valores muy superiores al observatorio de AEMET entre la 13:00 y las 14:00, justo antes de que llegara el grueso de la nubosidad. El día 6 de julio, una banda de nubosidad densa atravesó la zona entre las 13:00 y las 14:00, y claramente afectó más al solmáforo que al observatorio de AEMET. Deducimos que la nubosidad tiene un efecto importante, pero en líneas generales dos instrumentos separados varios kilómetros presentan medidas muy similares.

Resulta interesante señalar, también, cómo se observa que la presencia de nubosidad no es garantía de protección contra la radiación UV. Los valores del UVI se mantienen en la región de UVI Alto (naranja) o por encima durante un tiempo acumulado suficientemente alto como para entrañar riesgo. La presencia de nubosidad puede transmitir a la población una falsa sensación de seguridad.

3.3. Análisis de discrepancias puntuales

A lo largo de la presentación de resultados y análisis realizada hasta ahora, ha estado presente un fenómeno en el que no nos hemos detenido. En ocasiones, las medidas de UVI (tanto del solmáforo como del observatorio de AEMET) presentan picos, en periodos de tiempo en los que ocurren subidas y bajadas abruptas hay valores máximos que superan lo que sería esperable para la latitud de Valladolid en esos días concretos. Observemos una secuencia de 3 días (del 28 al 30 de junio de 2022) que es característica de este fenómeno.

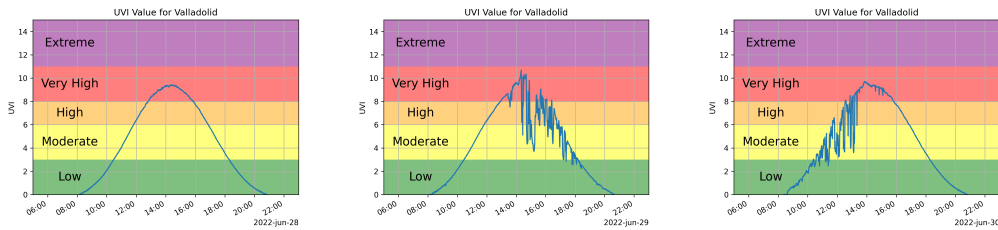


Figura 3.19: Secuencia de curvas medidas por el solmáforo desde el 28 al 30 de junio de 2022

Observamos que los días 28 y 30 de junio presentan un comportamiento similar, con un valor máximo de aproximadamente 9,5 (concretamente, 9,31 el día 28 y 9,60 el día 30), que además se corresponde bien con el valor típico del UVI en Valladolid para finales de junio y principios de julio. Sin embargo, el día 29 las medidas presentan en torno al máximo picos que superan el valor 10 de UVI y uno incluso se acercan al valor 11 poco después de las 14:00. Incluso es posible distinguir en la gráfica que si la curva hubiera seguido una evolución suave típica de un día despejado, no superaría el valor 10, al igual que ocurre en el día anterior y posterior. Si consultamos las imágenes captadas por la cámara ‘todo cielo’ ese día entre las 14:10 y las 14:35 hora local encontramos la siguiente secuencia en intervalos de 5 minutos:

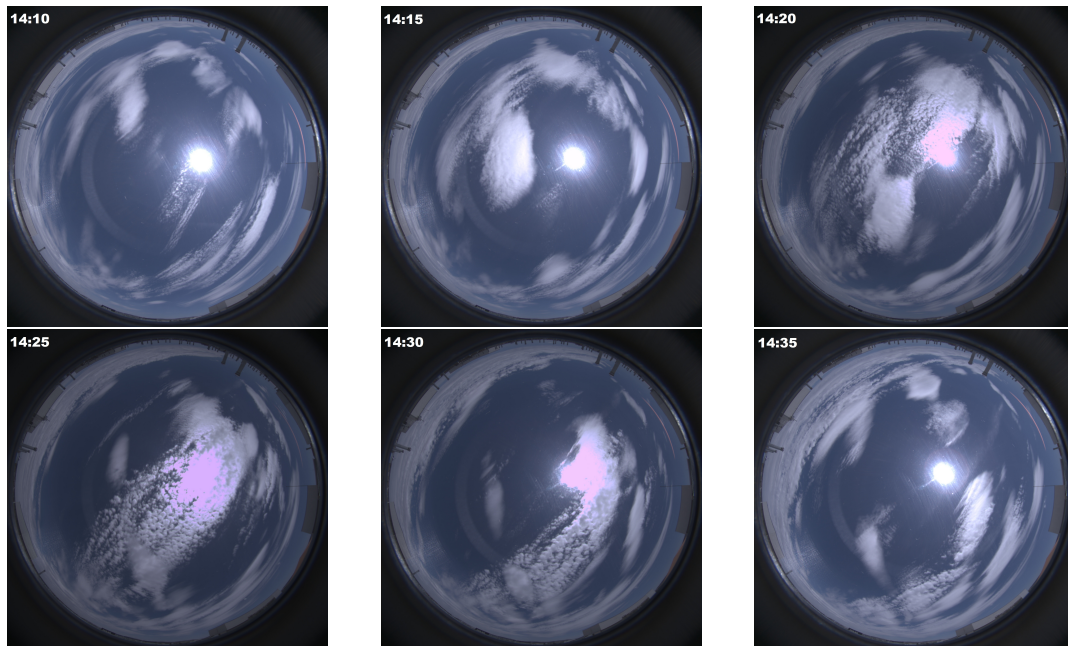


Figura 3.20: Imágenes ‘todo cielo’. 29/06/2022. De 14:10 a 14:35. Intervalos de 5 minutos

Observamos la presencia de nubosidad fina, que permite el paso de gran parte de la radiación del Sol. Podemos deducir que se está produciendo un *efecto realce* (conocido como *enhancement* en inglés) [4]. Esto consiste en que la radiación solar está alcanzando la superficie con una irradiancia normal (cuando las nubes no se interponen) o atenuada muy ligeramente (porque la nubosidad es fina y atenúa poco), mientras que la nubosidad fina al rededor del Sol está actuando como difusor de la radiación solar, se incrementa la radiación UV difusa que alcanza el sensor y, sumado a la radiación UV directa, resulta en una irradiancia mayor a la típica y por tanto a mayores valores de UVI que los que habría en condiciones de cielo despejado.

Por lo que se ha observado tanto en este trabajo como en la bibliografía consultada [4], este efecto raramente tiene consecuencias significativas, pues suelen ser fenómenos que ocurren con poca frecuencia y duran periodos de tiempo muy cortos (unos pocos minutos). Sin embargo, pueden darse episodios que se mantengan más allá de los 5 minutos de duración y que provocan un aumento del UVI de hasta un punto o más, los cuales sí pueden aumentar el riesgo de lesiones por radiación UV, especialmente si ocurren durante una exposición ya de por sí exagerada y por ser inesperados y difíciles de percibir para la población.

Capítulo 4

Actividad divulgativa

El objetivo último de este proyecto, como ya se ha mencionado, es ofrecer una herramienta que informe sencilla y claramente a la población del peligro que les supone exponerse a la radiación UV en cada momento. Y de esa manera, además, divulgar el Índice UV y fomentar la reflexión sobre los riesgos de exponerse al Sol.

Con las mediciones del dispositivo instalado en la terraza de la facultad podemos realizar una acción divulgativa a través de internet. El Grupo de Óptica Atmosférica, en su web <http://goa.uva.es/>, ofrece en abierto las mediciones en tiempo real que realizan sus estaciones. En la página correspondiente a la estación de Valladolid (<http://goa.uva.es/valladolid-station/>), hemos incluido una representación gráfica de las mediciones que realiza el Solmáforo que se actualiza en tiempo real y que muestra claramente los intervalos coloreados en los que se divide, junto a un indicador del nivel que está indicando el Solmáforo para mayor claridad.

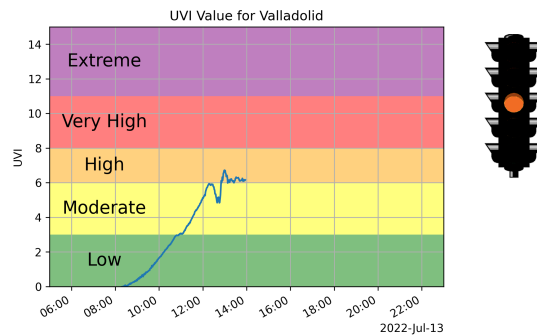


Figura 4.1: Ejemplo de comunicación de las medidas del solmáforo en la web

De esta manera, pinchando en un simple enlace, cualquiera puede consultar el UVI actual y saber el riesgo al que se expone en cada momento. Como ya hemos mencionado, el UVI es un valor que con cielos despejados varía imperceptiblemente entre lugares alejados varios kilómetros, así que esta consulta es útil para los habitantes de todo Valladolid e incluso de las poblaciones cercanas. Además supone una clara ventaja frente a la información ofrecida por AEMET, ya que la agencia mantiene publicadas únicamente las medidas del día anterior tras haber sido procesadas, mientras que las medidas del Solmáforo pueden

ser consultadas en tiempo real.

Por otro lado, el panel indicador ha funcionado correctamente durante todo el tiempo que ha estado instalado. Por el momento, esto ha sido aprovechado por los miembros del GOA, que tienen que trabajar en la terraza de la Facultad de Ciencias, expuestos al Sol a menudo y durante intervalos de tiempo suficientemente largos como para producir eritemas en momentos con valores altos de UVI. Cuando están trabajando en la terraza, de un solo vistazo pueden saber el riesgo al que se están exponiendo y sirve de recordatorio constante de tomar medidas de precaución y protección.

Otra acción divulgativa, planeada para fechas posteriores a la presentación de este trabajo, es instalar el Solmáforo en un campamento de verano durante la primera quincena del mes de agosto. De esta forma no solo cumplirá completamente con el fin para el que fue diseñado, además podrá ser aprovechado activamente por el personal del campamento para educar en los riesgos de la exposición al Sol y cómo protegerse.

El objetivo a largo plazo consistiría en instalar el Solmáforo en un lugar de paso del campus Miguel Delibes. Y en el futuro, con la experiencia obtenida durante este proyecto, montar varios Solmáforos que se instalen en diferentes ubicaciones con gran afluencia de público y alta probabilidad de exposición al Sol, como pueden ser en Valladolid la playa de las Moreras, instalaciones deportivas, las plazas de acceso al Campo Grande, el Real de la Feria o la plaza Mayor.

Conclusiones

Analicemos la consecución de los objetivos que nos marcamos al principio de este trabajo:

- Hemos diseñado un solmáforo atendiendo a la compatibilidad de los componentes, obteniendo un resultado funcional y estable.
- Hemos montado un prototipo de calibración que tomó medidas con suficiente calidad como para calibrar el sensor ultravioleta.
- Hemos calibrado el sensor ultravioleta utilizando como referencia medidas de AEMET, un organismo oficial perteneciente a la OMM. Y hemos analizado el contexto y las condiciones ambientales para asegurarnos de que la comparación entre instrumentos separados unos pocos kilómetros era posible.
- Hemos construido un prototipo de solmáforo completamente funcional. Los miembros del GOA que trabajan en la terraza donde está instalado han observado un comportamiento normal y estable del panel indicador.
- Hemos comprobado la calidad de la calibración mediante la comparación de un segundo periodo de medidas. En esta comprobación, hemos observado un ajuste adecuado en general, pero hemos encontrado discrepancias para valores altos de UVI en días puntuales.
- Los miembros del GOA que trabajan en la plataforma de medidas de radiación solar ubicada en la terraza de la Facultad de Ciencias han manifestado la utilidad que supone disponer de un dispositivo que les permite saber fácilmente el riesgo de la radiación UV en cada momento y les recuerda tomar medidas de protección.
- Hemos publicado en abierto las mediciones del solmáforo a través de la web del GOA, mostrándolas en tiempo real, siguiendo el código gráfico estandarizado y con una presentación sencilla y amigable. La población puede conocer en todo momento el riesgo de exposición a la radiación UV en las cercanías de Valladolid.

Adicionalmente, durante el desarrollo del proyecto, han surgido oportunidades para realizar lo siguiente:

- En las mediciones de calibración y comprobación, se ha podido observar y analizar el *efecto realce* (*enhancement*) que produce la nubosidad de baja densidad en la

radiación ultravioleta.

- Se ha podido comprobar que hace falta una fuerte carga de aerosoles en la atmósfera para que se produzca una atenuación significativa de la radiación ultravioleta.
- Se ha podido comprobar cómo la presencia de nubosidad no es garantía de protección contra la radiación UV salvo que sea densa, extensa y uniforme. Especialmente en la época del año con mayor irradiación.

Por último analicemos los objetivos que han quedado por cumplir y las líneas de trabajo futuras

- Es necesario un análisis más exhaustivo y/o llevar a cabo una segunda calibración para tratar de solucionar las discrepancias para valores altos de UVI entre las medidas del solmáforo y las del observatorio de AEMET (Observado en la figura 3.17). Otra alternativa es calibrarlo en el laboratorio del GOA, frente a lámparas calibradas y certificadas en irradiancia.
- Sería muy beneficioso conseguir una comunicación efectiva con AEMET en la que informarnos de los detalles del método de medida del UVI y procesado de los datos que emplean.
- Existe margen de mejora en el diseño del solmáforo. El conversor analógico-digital tiene una resolución suficiente pero podría mejorarse sustituyéndolo por un *data-logger* de mayor calidad. El microcontrolador puede sustituirse por componentes más simples y proporcionados, con menor consumo eléctrico. Se puede simplificar la fuente de alimentación eléctrica.
- Queda pendiente integrar todos los componentes en un único dispositivo compacto.
- Queda pendiente instalar el solmáforo en un lugar público para que cumpla de forma definitiva el fin para el que fue concebido, aunque hay planes en marcha para realizarlo en un futuro cercano.
- A partir del prototipo funcional construido, es posible elaborar un dispositivo más profesional e incluso comercial. Tratando de que esté homologado en protección contra el polvo y agua, emplear una célula fotovoltaica y batería para independizarlo de la red eléctrica, miniaturizar el dispositivo para hacer una versión portátil, etc.

En definitiva, el resultado es satisfactorio, pues tenemos un solmáforo funcional que, en general, ofrece información fiable y útil. Pero aún es posible mejorarlo más y, sobre todo, aprovechar todo su potencial en el ámbito de la divulgación y salud pública, pues aunque se han dado pasos queda camino por recorrer. En el proceso hemos podido aprovechar las medidas y observaciones para aprender y comprobar el comportamiento de la radiación UV en la atmósfera. Y tenemos por delante numerosas oportunidades para continuar el proyecto y aumentar su utilidad e impacto en la población.

Bibliografía

- 1 'La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera', Alain Chiron de la Casinière y Victoria E. Cachorro Revilla, Universidad de Valladolid
- 2 'Índice UV Solar Mundial. Guía Práctica', Organización Mundial de la Salud y Organización Meteorológica Mundial.
- 3 'UVI clipart Overview', Organización Mundial de la Salud y Organización Meteorológica Mundial.
- 4 A.A. Piedehierro; M. Antón; A. Cazorla; L. Alados-Arboledas; F.J. Olmo. Evaluation of enhancement events of total solar irradiance during cloudy conditions at Granada (Southeastern Spain). *Atmospheric Research* 135-136 (2014)
- 5 Ultraviolet radiation. An authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion. Geneva, World Health Organization, 1994 (Environmental Health Criteria Monograph, No. 160).
- 6 Proceedings of an international workshop on ultraviolet radiation exposure, measurement and protection, St Catherine's College, Oxford, 1999. *Radiation Protection Dosimetry*, 2000, 91:1-3.
- 7 Figura 1.1 tomada de APLICACIONES MÉDICAS Y EFECTOS TÓXICOS DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO, TiO₂, Ag Y NANOTUBOS DE CARBONO - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Espectro-de-accion-eritematico-El-linea-negra-y-espectro-solar-Sl-linea-gris_fig5_269113154 [accessed 14 Jul, 2022]

Este trabajo ha sido elaborado utilizando, entre otros, datos suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Índice de figuras

1.1. Espectro de acción eritémica (línea negra) [7]	12
2.1. Demostrador	14
2.2. Sensor UV	15
2.3. Microcontrolador	15
2.4. Panel indicador	15
2.5. Solmáforo	17
3.1. Valores de UVI proporcionados por AEMET en los días seleccionados por buena calidad atmosférica	19
3.2. Regresión lineal del valor de voltaje máximo diarios para los días seleccionados por su buena calidad atmosférica	20
3.3. Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario realizado con la selección de días con buena calidad atmosférica	20
3.4. Regresión lineal del valor medio 30 minutos en torno al voltaje máximo diario para los días seleccionados por buena calidad atmosférica	21
3.5. Comprobación del ajuste del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario realizado con la selección de días con buena calidad atmosférica	22
3.6. Regresión lineal del voltaje máximo diario	23
3.7. Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario	23
3.8. Regresión lineal del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15	24
3.9. Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15	25
3.10. Regresión lineal del voltaje máximo diario con un filtrado adicional de los días con un factor de calidad de 0,05	25
3.11. Comprobación del ajuste del voltaje máximo diario filtrando los días adicionalmente con un factor de calidad de 0,05	26
3.12. Regresión lineal del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario	27
3.13. Comprobación del ajuste del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario	27
3.14. Regresión lineal del valor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad de 0,15	28

3.15. Comprobación del ajuste del calor medio en 30 minutos del voltaje máximo diario filtrando los días con un factor de calidad del 0,15	28
3.16. Comparación de días con buena coincidencia. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET	31
3.17. Comparación de días con discrepancias. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET	32
3.18. Comparación de días con nubosidad. Columna izquierda: medidas del solmáforo desarrollado en este trabajo. Columna derecha: medidas del observatorio de AEMET	34
3.19. Secuencia de curvas medidas por el solmáforo desde el 28 al 30 de junio de 2022	35
3.20. Imágenes ‘todo cielo’. 29/06/2022. De 14:10 a 14:35. Intervalos de 5 minutos	35
4.1. Ejemplo de comunicación de las medidas del solmáforo en la web	37
4.2. Detalles del código de colores normalizado utilizado	45

Índice de cuadros

1.1. Tipos de piel según sensibilidad a la radiación UV	9
---	---

Anexos

Anexo A: Código gráfico normalizado para la comunicación del UVI

A continuación, se presenta la tabla con la información del código de colores normalizado utilizado en las representaciones de este trabajo, extraída del documento ‘UVI clipart Overview’ [3].

UVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	>10
Category	Low		Moderate			High		Very High		Extreme	
Colour	Green		Yellow			Orange		Red		Purple	
Pantone Matching System	375		102			151		032		265	
RGB (8 bit values)	40r 149g 0b		247r 228g 0b			248r 89g 0b		216r 0g 29b		107r 73g 200b	

Figura 4.2: Detalles del código de colores normalizado utilizado

Anexo B: *Datasheet* del sensor UV

En las siguientes páginas se presenta el *datasheet* del sensor *UV-Cosine_UVI - sglux GmbH* utilizado en el solmáforo.

UV Sensor "UV-Cosine_UVI"

Waterproof cosine corrected UV sensor for UV-Index measurements

GENERAL FEATURES

▶ 1/2



Properties of this sensor

This UV sensor is designed for very high accuracy UV-Index measurements. The measurement uncertainty of this sensor is 5% only. The spectral response curve and the field of view (cosine type) are in near perfect accordance with the requirements defined in the ISO 17166 standard. The housing is made of PTFE. It is waterproof and stain repellent with a male threaded body (M20x1.5). The sensor contains integrated electronics and is shielded against electromagnetic interference. The sensor can be configured as a voltage of 0 to 5 V, a current of 4 to 20 mA, CAN bus interface or USB. The

UV sensor is available with a PTB traceable calibration.

Page 3 of this datasheet allows to enter the signal output requirements of the needed sensor. After selection you may forward this document to factory or agent, or alternatively use the sensor probe online configurator at www.sglux.com. Please contact us for assistance.

SPECIFICATIONS

FIXED SPECIFICATIONS

Parameter	Value
Dimensions	please refer to drawing on page 2
Weight	27 g
Spectral Sensitivity	UV-Index (erythema curve) according to ISO 17166, measurement uncertainty 5 %
Temperature Coefficient (30 to 65°C)	0.05 to 0.075%/K
Operating Temperature	-25 to +80°C
Storage Temperature	-40 to +80°C
IP Protection Class	IP68 at window side, IP65 at plug side, on request IP68 for submerge applications

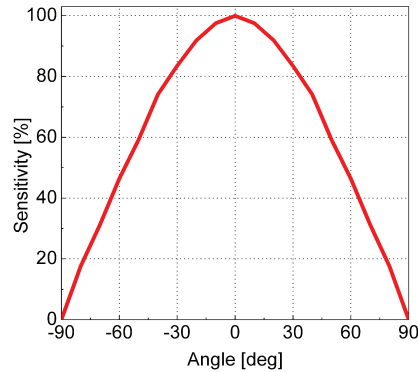
CONFIGURABLE SPECIFICATIONS

Parameter	Value (page 3 shows more detailed information)
Signal Output	0 to 5 V or 4 to 20 mA or CAN bus signal (125kbit/s) or USB
Current Consumption	for 0 to 5 V = < 30 mA / for 4 to 20 mA = signal out / digital = < 17 mA
Connections	cable = 2 m cable with tinned leads on free end plug = 5 pin male connector with 2 m cable with tinned leads on free end CAN = 2 m cable with 8 pin male connector (to converter or else) USB = with 1.5 m cable with USB-A plug Other cable lengths on request.
Measuring Range	up to UVI 30

UV Sensor "UV-Cosine_UVI"

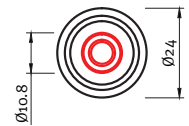
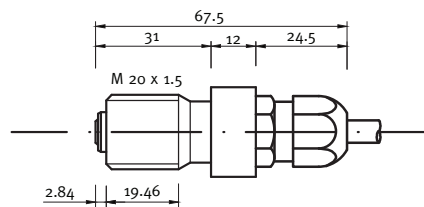
Waterproof cosine corrected UV sensor for UV-Index measurements

FIELD OF VIEW

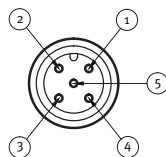
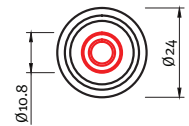
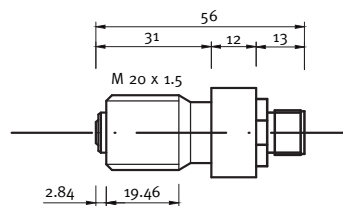


DRAWING

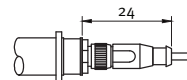
ANALOG CABLE



ANALOG PLUG

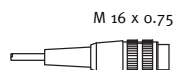
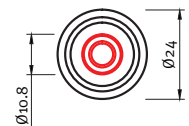
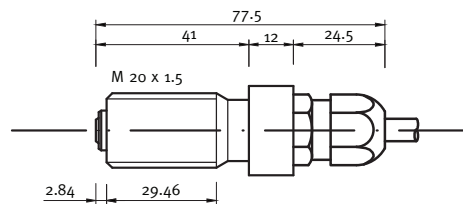


connector view
5 pin M 12 x 1
RSFM5



plug connection
5 pin M 12 x 1
e.g. Lumberg PRSFM 5

DIGITAL



KFV 80 plug

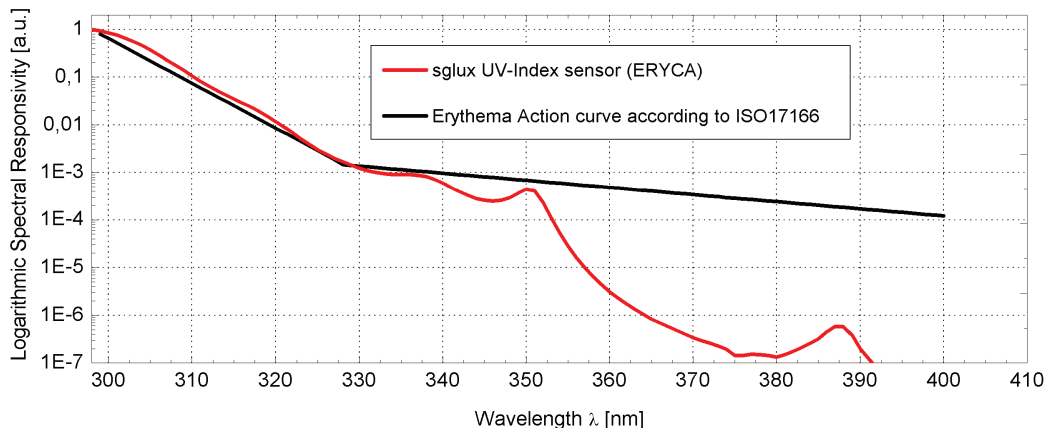


pin layout

UV Sensor "UV-Cosine_UVI"

Requirements questionnaire sheet

STEP 1 → Normalized Spectral Responsivity



STEP 2 → Signal Output Type Selection

Please tick your selection. The pin configuration is shown in drawings on page 2.

Output Type	Description	Connection = "cable"	Connection = "male plug"
<input type="checkbox"/> 0 to 5 V	0 to 5 V voltage output proportional to radiation input. Supply voltage is 7 to 24VDC, current consumption is < 30 mA.	<input type="checkbox"/> V. = brown, V ₊ = white, V _{out} = green, shield = black	<input type="checkbox"/> V. = 1, V ₊ = 4, V _{out} = 3
<input type="checkbox"/> 4 to 20 mA	4 to 20 mA current loop for PLC controllers. The current is proportional to the radiation, supply voltage is 24VDC.	<input type="checkbox"/> V. = brown, V ₊ = white, shield = black	<input type="checkbox"/> V. = 1, V ₊ = 4
<input type="checkbox"/> CAN bus signal	VSCP protocol according to the following specifications: http://download.sglux.de/probes-digital/digiprobe-can/	Pins 1 & 7 = CAN low Pins 3 & 8 = CAN high Pins 2 & 4 & 5 = GND	
<input type="checkbox"/> USB	The signal is transmitted via standard USB-A plug to a computer. Software and 1.5 m cable are included. Other cable lengths on request. Programming guide available: http://download.sglux.de/probes-digital/digiprobe-usb/digiprobe_USB_Programming_Guide.pdf		