



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

DESARROLLO DE UN SISTEMA INSTRUMENTAL INTELIGENTE  
DE ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA PARA EVALUAR LA RADIACIÓN UV  
Y RECONOCER EL IMPACTO EN ZONAS LOCALES

**TESIS,**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**ING. KEVIN RODRIGO MOYA CASTILLO**

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. VÍCTOR MANUEL VELASCO HERRERA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA – UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA – CIUDAD DE MÉXICO, MARZO 2023



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dra. Tetyana Baydyk  
Secretario: Dr. Francisco Javier García Ugalde  
1 er. Vocal: Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera  
2 do. Vocal: Dr. Miguel Ángel Bañuelos Saucedo  
3 er. Vocal: Dr. Mauro Valdés Barrón

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología y el Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera

---

**FIRMA**

El presente trabajo de tesis nivel maestría fue desarrollado de manera conjunta en el Laboratorio de Sistemas Inteligentes del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología y el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, bajo la tutoría del Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera y las asesorías del Dr. Ernst Kusul, Dr. Miguel Ángel Bañuelos Saucedo, Dr. David Riveros Rosas, Mtra. Adriana González Cabrera y la Dra. Graciela Velasco Herrera.

Becas: CONACYT CVU: 1083646.

Este trabajo forma parte de los resultados de la participación en proyectos de investigación relacionados con el desarrollo de sistemas de instrumentación, procesamiento de datos, inteligencia artificial y análisis wavelet para el estudio de la radiación solar. Proyectos: UNAM-PAPIIT-IT102420 y UNAM-DGAPA-PAPIIT IT 102320.

## **Agradecimientos**

A mi familia y a mis amigos por apoyarme en todo momento para no dejar la escuela, y por su gran cariño hacia mí persona.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por acogerme como mi segunda casa y darme la oportunidad de estudio medio superior, superior y posgrado.

A la Facultad de Ingeniería por darme las herramientas necesarias para lograr mi formación profesional y retribuir un poco al crecimiento del país con lo que aquí he aprendido.

A todos mis profesores a lo largo de mi trayectoria escolar, desde el Colegio de Ciencias y Humanidades plantel Vallejo, a los de la Facultad de Ingeniería y a los del posgrado en Ingeniería Eléctrica, gran parte de los valores humanos, razonamiento lógico, curiosidad científica y mente crítica lo aprendí de ustedes.

Al dr. Víctor Manuel Velasco Herrera, investigador del Instituto de Geofísica, y a la dra. Graciela Velasco Herrera, investigadora del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología por darme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación por el cual me es posible titularme.

Al Instituto de Geofísica por el apoyo mediante el acceso al Laboratorio de Radiación Solar y las asesorías y clases especializadas por parte de sus investigadores.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca nacional otorgada para cursar la maestría de tiempo completo con No. CVU: 1083646.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología por el apoyo de beca proporcionado para la terminación de este proyecto de investigación.

# Índice

Capítulo 1: Introducción .....	6
1.1. Planteamiento del tema .....	6
1.2. Justificación de la investigación .....	7
1.3. Ubicación del trabajo .....	8
1.4. Objetivos .....	8
1.5. Hipótesis .....	8
Capítulo 2: Estado del arte .....	8
Capítulo 3: Antecedentes .....	11
3.1. Generalidades sobre la radiación ultravioleta .....	11
3.2. Índice UV solar mundial .....	16
Capítulo 4: Marco teórico .....	17
4.1. Análisis espectral de Fourier.....	17
4.2. Análisis espectral Wavelet .....	19
4.3. Redes Neuronales Recurrentes (RNN) .....	19
Capítulo 5: Diseño, Desarrollo del sistema y metodología .....	23
5.1. Arquitectura del radiómetro .....	23
5.2. Subsistema de potencia .....	26
5.3. Subsistema de alineamiento con el vector de poynting solar .....	29
5.4. Subsistema de medición y envío de datos .....	34
5.5. Subsistema de reloj en tiempo real .....	41

5.6. Subsistema de recepción, despliegue y registro de datos .....	42
5.7. Subsistema estructural y térmico .....	44
5.8. Integración de subsistemas y componentes, prototipo de radiómetro .....	48
5.9. Funcionamiento del instrumento .....	61
Capítulo 6: Análisis de resultados .....	69
Capítulo 7: Conclusiones y discusión .....	86
Apéndices .....	88
A.1. Calculadora Solar .....	88
A.2. Servidor local para el registro de datos de Radiación UV .....	88
A.3. Análisis de Radiación UV-A de 2000 a 2020, mediciones del SIMAT, CDMX .....	89
A.4. Análisis de Irradiancia Solar Total de 2003 a 2020, pronóstico para 2023 .....	91
A.5. Portafolio de evidencias en Google Drive .....	96
Entregables: Constancias de participación en congresos .....	97
Bibliografía y Referencias .....	99

## 1. Introducción

En el presente trabajo, se diseñó, se implementó y se probó el funcionamiento de los circuitos, mecanismos y algoritmos de los distintos subsistemas que componen un sistema instrumental inteligente dedicado a medir y registrar la cantidad de radiación ultravioleta proveniente del Sol que impacta sobre la superficie terrestre. La zona de estudio se encuentra al Norte de la Ciudad de México. La radiación UV se mide en sus diferentes intervalos de longitud de onda: UV-A (320-370 nm), UV-B (280-320 nm), adicionalmente, se presenta como propuesta, la detección de UV-C (220-280 nm), esta última se implementó debido a que en el mercado actual de instrumentos de medición de radiación UV, no se existe uno dedicado a medir UV-C, esto debido a que teóricamente, se atenúa en la capa de ozono del planeta; el hecho de contar con un instrumento dedicado a medir este tipo de radiación altamente energética y que además marque un valor de 0 es importante para confirmarlo. Se analizaron los datos utilizando transformada de Fourier, transformada Wavelet y se implementó un sistema de redes neuronales artificiales (RNA) para reconstruir los datos faltantes en las series de tiempo analizadas, así como para realizar pronósticos de radiación.

### 1.1. Planteamiento del tema

El Sol emite una gran cantidad de energía a la Tierra, de la cual sólo entre un 6% a 7% corresponde a la radiación ultravioleta (UV), siendo esta una forma de energía radiante invisible que cubre el rango de longitudes de onda entre los 100 y los 400 nanómetros (nm), se clasifica en tres categorías: UV-A, UV-B y UV-C, acorde con la longitud de onda. Se ha reportado que entre más corta sea la longitud de onda de la radiación UV, biológicamente es más perjudicial. Al atravesar la atmósfera, el ozono ( $O_3$ ), el vapor de agua, el oxígeno ( $O_2$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) absorben en su mayoría la radiación UV-C y aproximadamente el 90% de la radiación UV-B. La atmósfera absorbe la radiación UV-A en menor medida. En consecuencia, la radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de rayos UV-A, con una pequeña parte de rayos UV-B [3].

La cantidad de radiación UV que impacta en una determinada zona, está inversamente relacionada con la concentración de ozono total en la atmósfera (especialmente en la región entre los 18 y los 40 km de altura, zona en la que se ubica la capa de ozono); a menor concentración de  $O_3$  mayor radiación UV llega a la superficie. Por ello, la mayor incidencia de radiación UV se presenta en aquellas regiones en donde la concentración de  $O_3$  es relativamente baja [3].

Los niveles de radiación UV a nivel de superficie terrestre, dependen de varios factores: posición del Sol, altitud, latitud, cubrimiento de las nubes y concentración de ozono en la atmósfera, estos varían durante el día y a lo largo del año. Los mayores niveles se registran en el día cuando el Sol se encuentra en su máxima elevación (entre las 10:00h hasta las 14:00h en tiempo solar verdadero), en donde cerca del 60% de la radiación UV es recibida a estas horas, mientras que, cuando el ángulo del Sol está más cercano al horizonte llega menos radiación solar a la superficie de la Tierra debido a que atraviesa una mayor distancia en la atmósfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción. En zonas diferentes a los trópicos los máximos niveles se presentan en los meses de verano alrededor del mediodía. En los trópicos, los mayores niveles de radiación se presentan a principios de año generalmente, durante el perihelio (cuando la Tierra está más cerca al Sol) y los más bajos a mitad del año durante el afelio (cuando la Tierra está más alejada del Sol), [3].

Adicionalmente, la radiación UV varía de acuerdo con la ubicación geográfica; sobre la zona ecuatorial los rayos solares inciden perpendicularmente a diferencia de en las latitudes medias donde presentan un ángulo de incidencia, por ello, la radiación UV resulta ser más intensa en esa área. La altitud también determina la cantidad de radiación UV que se recibe, debido a que en zonas de alta montaña es más delgada la capa atmosférica que deben recorrer los rayos solares, de manera que a mayor altitud mayor radiación UV. En promedio, por cada 1 km de incremento de la altitud, la radiación UV aumenta de un 10% a 12%. Las nubes pueden tener un impacto importante en la cantidad de radiación UV que recibe la superficie terrestre, generalmente las nubes densas bloquean más UV que una nube delgada [3].

Debido a que estamos entrando en un déficit solar, en donde varía sustancialmente la energía que llega a la Tierra. Es de gran interés de la comunidad científica, poder medir los niveles de variación de radiación UV, conocer cuánto ha variado el porcentaje de radiación que llega a la superficie, así como minimizar el impacto de afectaciones (enfermedades) futuras por exposición de rayos UV [4].

## 1.2. Justificación de la investigación

México cuenta con un mapa de radiación UV-B, el cual se obtuvo por métodos de interpolación [4], es importante poder medir la exposición en diferentes puntos a nivel de superficie terrestre. En el presente trabajo se propone un prototipo de un arreglo instrumental de bajo costo con seguidor solar, y de fácil instalación para poder estimar los niveles de radiación UV en lugares de difícil acceso.

Actualmente, para medir radiación UV-C a nivel de superficie terrestre no existen instrumentos de referencia. La teoría indica que se este tipo de radiación se atenúa completamente en la capa de ozono [3]. La forma de comprobar si se está recibiendo el tipo de radiación UV-C es a través de un dispositivo debidamente calibrado [24]. En este trabajo, se utiliza un microsensor tipo fotodiodo que opera en la ventana espectral del UV-C, sin embargo, al no contar con un instrumento de referencia que opere en este intervalo de longitud de onda, no es posible realizar un procedimiento de calibración. Se considera esta implementación únicamente como una propuesta, en otras palabras, se trata de un primer trabajo de detección de radiación UV-C a nivel de superficie, esta requiere ser validada haciendo uso de un instrumento de referencia rigurosamente caracterizado y calibrado.

Se desarrolló un sistema instrumental inteligente, en donde se realizó un preanálisis de datos de radiación para poder conocer el fenómeno a estudiar y con ello se obtuvo información útil para el diseño del arreglo instrumental. El análisis de los registros de radiación a través de las transformadas de Fourier y Wavelet e implementación de arreglos de redes neuronales recurrentes para el pronóstico permite presentar un complemento a los sistemas de medición de la radiación.

Debido a que actualmente se conoce que existen variaciones sustanciales en la cantidad de energía que emite el Sol [1], también hay variaciones en la radiación que llega a la Tierra, si se puede medir, cuantificar y dar un pronóstico basado en el desarrollo de un sistema instrumental inteligente se pueden emitir recomendaciones por impacto de la radiación. En décadas recientes, se ha medido la radiación solar mediante el uso de satélites, los efectos de esta son distintos dependiendo de la

posición geográfica, por eso es importante conocer sus variaciones locales y globales y realizar un pronóstico a corto, mediano y largo plazo para planificar las diferentes actividades humanas.

### **1.3. Ubicación del Trabajo de Tesis**

Área de desarrollo de tesis: Ingeniería Eléctrica, Instrumentación.

Cobertura del proyecto: Investigación y desarrollo de un prototipo como una propuesta para la creación de tecnología dedicada a la medición de la radiación UV.

### **1.4. Objetivos de la investigación**

Objetivo general:

- Diseñar, implementar y probar el funcionamiento de los circuitos, mecanismos y algoritmos necesarios para la creación de un sistema instrumental inteligente que mida el tipo de radiación ultravioleta (A, B y C) que impacta en un lugar específico: Caso de estudio en la zona Norte de la Ciudad de México.

Objetivos específicos:

- Realizar un preanálisis de datos, a través de la base de datos espaciales de Irradiancia Solar Total (TSI por sus siglas en inglés) y las mediciones de radiación UV por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT-CDMX) para identificar los patrones de comportamiento y reconstrucción de las series de datos cuando estas tengan información faltante.

- Identificar y reconocer los patrones de la serie de tiempo para la creación de un pronóstico de radiación.

- Complementar una herramienta de pronóstico de radiación UV, que permita de manera local recomendar mejoras en los protocolos de contingencia por la incidencia de radiación a nivel local.

### **1.5. Hipótesis**

El desarrollo del presente sistema instrumental va a permitir generar la información necesaria para crear un sistema de pronóstico de radiación UV en sus diferentes ventanas espectrales, de forma puntual en la Zona de Estudio. Adicionalmente, se presentará el instrumento final como una alternativa de estimar la radiación UV en zonas de difícil acceso.

## **2. Estado del arte**

Actualmente en el país, sólo algunas ciudades cuentan con una Red Automática de Monitoreo Atmosférico, las cuales además de medir y registrar los valores de los contaminantes en el aire, se encargan también de medir y registrar la cantidad de radiación UV, tal es el caso de la Ciudad de México (SIMAT-CDMX) o la Zona Metropolitana del Valle de Toluca [7], [8].

Asimismo, el Instituto de Geofísica de la UNAM cuenta con el Servicio Solarimétrico Mexicano, el cual está dedicado a la calibración, medición, validación, procesamiento y publicación de información solarimétrica, tanto para público general e instituciones privadas, como de entidades

estatales y del gobierno federal. El servicio solarimétrico se conforma a partir de la creación del Observatorio de Radiación Solar y de una red especializada de estaciones solarimétricas, distribuidas en todo el país, en las cuales se miden diferentes parámetros de la radiación solar en superficie, así como en sus correspondientes ventanas espectrales [9].

No se pretende suplantar estos sistemas, sino dar un soporte a zonas del territorio nacional donde no se cuente con este tipo de redes de monitoreo como pueden ser por ejemplo pequeñas ciudades, pueblos, zonas turísticas, zonas de plantíos, parques de generación de energía eléctrica (fotovoltaicos), etc. Al mismo tiempo que se pretende crear un sistema instrumental que pueda acoplarse fácilmente en cualquier estación de monitoreo o punto de interés en cualquiera de los lugares antes mencionados para la tarea de detección, registro y estimación de la cantidad de radiación UV terrestre en diferentes lugares del país.

En 2021, Aguilar Ponce, propone construir un sistema de monitoreo de radiación ultravioleta para zonas recreativas. El sistema propuesto consiste en una red de nodos que contienen sensores UV-A y UV-B por comunicación I2C para determinar la radiación UV ambiental. Estas mediciones son reportadas a través de Bluetooth a los teléfonos inteligentes de los visitantes para calcular la dosis de exposición a la radiación ultravioleta que el usuario ha tenido. Se propone además el desarrollo de una aplicación para teléfonos inteligentes que permitan reportar la dosis absorbida por el usuario de acuerdo a los datos emitidos por la red de monitoreo [10].

En 2020, Mujaico Mariano y Anderson Abel plantean el desarrollo e implementación de un sistema de medición de la radiación UV con la finalidad de asociar los riesgos a la salud por altos niveles de exposición, además de la tarea de realizar un pronóstico mediante la utilización de herramientas como machine learning e internet de las cosas. Sin embargo, este sistema utiliza solamente un sensor con salida analógica, el cual entrega una señal proporcional a la cantidad de radiación UV tipo A y tipo B juntas, sin capacidad de diferenciar cuánta energía se está recibiendo en cada intervalo de longitud de onda [11].

En 2019, Pohl, et al, plantean el diseño e implementación de un medidor de radiación uv con el fin de crear un “uvmáforo” cuyo valor pueda desplegarse tanto en una pantalla como en una página web html, además se plantea la programación de una aplicación para teléfonos móviles con sistema operativo Android con el fin de hacer más accesible la información para el público en general [12].

En 2017, Escobedo Bretado, et al, analizaron una serie de mediciones de radiación solar ultravioleta UV-A y UV-B, obtenida de diciembre 2015 a febrero 2017, en la ciudad de Durango, México. Se analizó el comportamiento diario de radiación de los meses de invierno y verano. Se calcularon acumulados de energía diaria y promedio mensual. La energía UV-A acumulada promedio mensual en invierno (diciembre, 2015) fue de  $905 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$  y en verano (junio, 2016) de  $1,732 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$ . Los valores máximos de energía se presentaron en el mes de julio, ( $2,077 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$ ) para UV-A y  $60 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$  para UV-B; los valores mínimos se presentaron en noviembre, ( $255 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$  para UV-A y  $6.5 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{día}$  para UV-B). Las mediciones analizadas contribuyen al inicio de una base de datos de radiación UV-A y UV-B, la cual es básica para diferentes aplicaciones, así como el análisis de sus efectos, a nivel de receptores, y la determinación del potencial de aplicación en procesos ambientales. Esto permitirá analizar y relacionar causas y efectos en compartimentos ambientales de gran interés a nivel de ecosistemas en el norte de México [13].

En 2017, Díaz Rangel, et al, plantean utilizar dispositivos de bajo costo con el fin de diseñar e implementar un sistema de medición de la cantidad de radiación UV. La idea de este proyecto es proporcionar a las personas información en tiempo real de la radiación solar a la que se exponen,

esto mediante dispositivos que permitan medir el nivel de radiación ultra violeta (UV) y mostrar visualmente la medición. La propuesta realiza mediciones con múltiples sensores, y mediante un algoritmo ad-hoc mejora el nivel de precisión, el algoritmo también determina el correcto funcionamiento de sensores, haciendo al sistema más confiable; adicionalmente se guarda un registro de las mediciones, lo cual podrá ser útil para análisis a largo plazo [14].

Actualmente, existen algunos satélites cuyo objetivo principal es medir la Irradiancia Solar Total (TSI) de forma extraterrestre, tal es el caso del sensor de irradiancia solar total y espectral de Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés: National Aeronautics and Space Administration), el cual mide la cantidad total de radiación solar que incide sobre la Tierra y cómo esta se distribuye entre las longitudes de onda ultravioleta, visible e infrarroja. TSIS-1 se lanzó el 15 de diciembre de 2017 y está diseñado para durar cinco años a bordo de la Estación Espacial Internacional. En lo alto de la atmósfera, por encima de los sistemas meteorológicos, se encuentra la capa de ozono. El ozono es el protector solar natural de la Tierra, debido a que atenúa la radiación ultravioleta más dañina del sol y protege a los seres vivos que se encuentran debajo. Pero el ozono es vulnerable a ciertos gases producidos por los humanos que llegan a la atmósfera superior. Una vez allí, reaccionan en presencia de la luz solar para destruir las moléculas de ozono. Un conjunto de satélites de la NASA y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés: National Oceanic and Atmospheric Administration) rastrean la cantidad de ozono en la atmósfera superior y la energía solar que impulsa la fotoquímica que crea y destruye el ozono. La NASA ahora está lista para lanzar un nuevo instrumento a la Estación Espacial Internacional que proporcionará las mediciones más precisas jamás hechas de la radiación solar medida por encima de la atmósfera terrestre, un componente importante para evaluar los efectos a largo plazo de la química que destruye el ozono. El sensor de irradiancia solar total y espectral (TSIS-1) medirá la cantidad total de radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera de la Tierra y cómo esta se distribuye entre diferentes longitudes de onda, incluidas las longitudes de onda ultravioleta que no podemos sentir con nuestros ojos, pero que se sienten por nuestra piel y perjudicial para nuestro ADN [15].

TSIS-1 es sensible a intervalos de luz en el ultravioleta (UV), incluidos UV-B y UV-C. Cada uno juega un papel diferente en la capa de ozono. Los rayos UV-C son esenciales para la generación del ozono. Los rayos UV-B y algunos productos químicos naturales regulan la abundancia de ozono en la atmósfera superior. La concentración de ozono es un equilibrio entre estos procesos naturales de producción y pérdida. En el curso de estos procesos, los rayos UV-C y UV-B son atenuados, lo que evita que lleguen a la superficie de la Tierra y dañen a los organismos vivos. El adelgazamiento de la capa de ozono ha permitido que algunos rayos UV-B lleguen al suelo [15].

El sensor de irradiancia solar total y espectral de la NASA - 2, o TSIS-2, medirá la radiación que llega a la Tierra. Desde 1978, un conjunto de satélites ha medido la radiación solar sobre la atmósfera de la Tierra. TSIS-2 agregará mediciones de irradiancia solar a cuatro décadas de registros de datos continuos. A diferencia de su predecesor TSIS-1, que opera desde la Estación Espacial Internacional, TSIS-2 viajará en una nave espacial de vuelo libre [16].

TSIS-2 consta de dos instrumentos, el monitor de irradiancia total (TIM, por sus siglas en inglés: Total Irradiance Monitor) y el monitor de irradiancia espectral (SIM, por sus siglas en inglés: Spectral Irradiance Monitor). TIM mide la Irradiancia Solar Total y SIM mide la Irradiancia Espectral en un intervalo de longitud de onda que cubre el 96% del espectro solar. Ambos instrumentos son similares a los utilizados para la misión TSIS-1. Décadas de mediciones han demostrado que la cantidad de radiación que emite el Sol fluctúa en un  $\pm 0.1\%$  durante un ciclo

solar de 11 años. La atmósfera superior de la Tierra es sensible a estos cambios en la radiación solar, sin embargo, esta variación en la Irradiancia Solar Total es demasiado pequeña para explicar las tendencias recientes en el aumento de la temperatura de la superficie global [16].

El Experimento de Radiación Solar y Clima (SORCE) es una misión satelital patrocinada por la NASA que proporciona mediciones de vanguardia de rayos X entrantes, ultravioleta, visible, infrarrojo cercano y Irradiancia Solar Total. Las mediciones proporcionadas por SORCE abordan específicamente el cambio climático a largo plazo, la variabilidad natural y la predicción mejorada del clima, y el ozono atmosférico y la radiación UV-B. Estas mediciones son fundamentales para el estudio del Sol; su efecto en nuestro sistema terrestre; y su influencia en la humanidad [17].

La nave espacial SORCE fue lanzada el 25 de enero de 2003 en un vehículo de lanzamiento Pegasus XL para proporcionar a la Empresa de Ciencias de la Tierra (ESE) de la NASA mediciones precisas de la radiación solar. Se lanzó a una órbita de 645 km y 40 grados y es operado por el Laboratorio de Física Atmosférica y Espacial (LASP) de la Universidad de Colorado (CU) en Boulder, Colorado, EE. UU. Continuará con las mediciones precisas de irradiancia solar total (TSI) que comenzó con el instrumento ERB en 1979 y ha continuado hasta el presente con la serie de mediciones ACRIM. SORCE también proporcionará las mediciones de la irradiancia espectral solar de 1 nm a 2000 nm, lo que representa el 95% de la contribución espectral a TSI [17].

SORCE lleva cuatro instrumentos, incluido el monitor de irradiancia espectral (SIM), el experimento de comparación de irradiancia estelar solar (SOLSTICE), el monitor de irradiancia total (TIM) y el sistema de fotómetro XUV (XPS) [17].

La misión SORCE finalizó el 25 de febrero de 2020 después de completar más de 17 años de excelentes observaciones de la irradiancia solar total (TSI) y la irradiancia solar espectral (SSI) entre 1 nm y 2400 nm. Este fue un evento de pasivación planificado para SORCE después de la superposición requerida con la nueva misión del sensor de irradiancia solar espectral y total de la NASA (TSIS-1) a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS). La duración de la misión SORCE permitió mediciones en dos de los ciclos solares de 11 años del Sol, y SORCE observó condiciones mínimas del ciclo solar en 2008 y 2019 que son particularmente útiles para la tendencia secular de la irradiancia solar [17].

Los satélites meteorológicos síncronos (SMS-1, SMS-2) y los satélites ambientales operativos geoestacionarios (GOES-1, GOES-2, etc.) llevan a bordo el subsistema de monitor ambiental espacial (SEM), este proporciona información sobre la actividad solar y el clima espacial que pueden afectar a los satélites e instrumentos. Los satélites GOES-13, -14 y -15 incorporan un sensor de ultravioleta externo (EUVS por sus siglas en inglés: External UltraViolet Sensor) [18].

### **3. Antecedentes**

#### **3.1. Generalidades sobre la radiación ultravioleta**

El Sol emite una gran cantidad de energía a la Tierra, de la cual sólo entre un 6% a 7% corresponde a la radiación ultravioleta (UV) (Fig. 1). Esta radiación, es una forma de energía radiante que cubre el rango de longitudes de onda entre los 100 y los 400 nanómetros. Mientras más corta es la longitud de onda de la radiación UV, biológicamente es más dañina [3] (Tabla 1).

Tipo de radiación	Longitud de onda ( $\lambda$ )
UV-A	(320,400] nm
UV-B	(280,320] nm
UV-C	[100,280] nm

Tabla 1: Ventanas espectrales de la radiación UV.

La radiación solar viaja a través de la atmósfera terrestre antes de llegar a la superficie y en este recorrido el total de la radiación UV-C y el 90% de la UV-B es atenuada por gases como el ozono, vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono, mientras que, la radiación UV-A es débilmente atenuada (Fig. 2). La radiación UV que alcanza la superficie de la tierra está compuesta en gran parte por la radiación UV-A (95%) y en menor grado por la UV-B (5%). La radiación UV que incide sobre la Troposfera es el motor de todos los procesos fotoquímicos en las capas bajas de la atmósfera de la Tierra. Los fotones en la longitud de onda UV tienen el potencial de romper moléculas bastante estables en fragmentos muy reactivos (fotólisis) y, por lo tanto, iniciar cadenas de reacción que de otra manera serían poco probables o incluso imposibles [3].

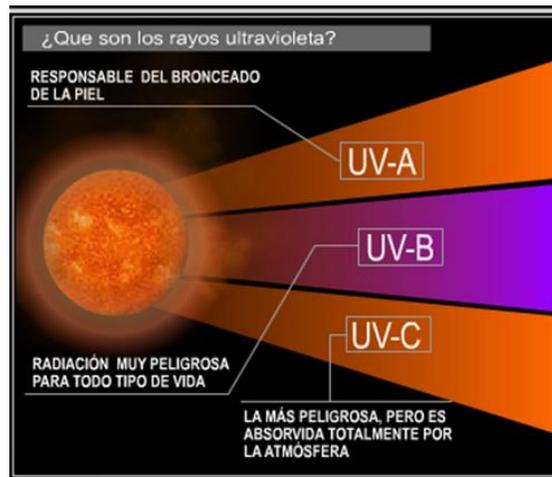


Fig. 1: Emisión de radiación ultravioleta por el Sol [3].

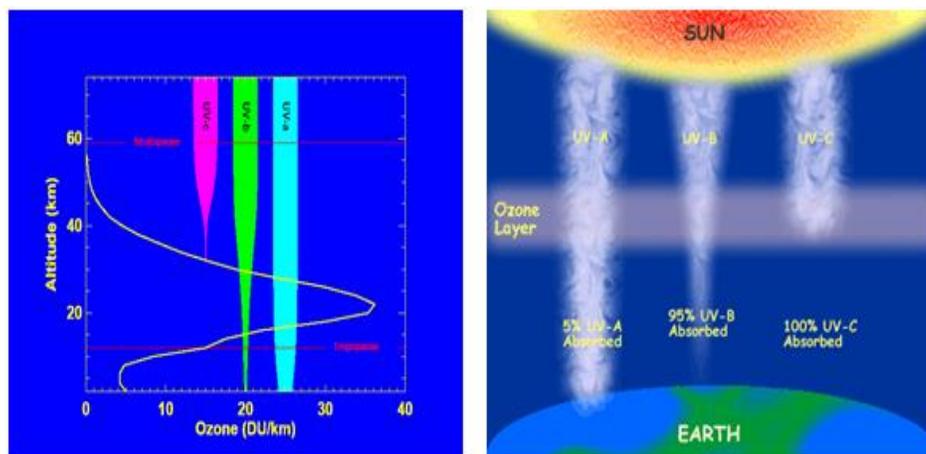


Fig. 2: Comportamiento de la radiación UV en la atmósfera [3].

Dentro del espectro UV, el intervalo que corresponde a UV-C se considera el intervalo de radiación más energético (Fig. 3). Además, es fácilmente absorbido por las cadenas del ADN, el ARN y las proteínas (Fig. 4). A menudo este rango se conoce como “germicida” dada su alta eficiencia de desinfección frente a las bacterias y los virus. El mayor efecto germicida se produce a 205-280 nm, mientras que la mayor sensibilidad germicida de los microorganismos se produce a 265 nm [28].

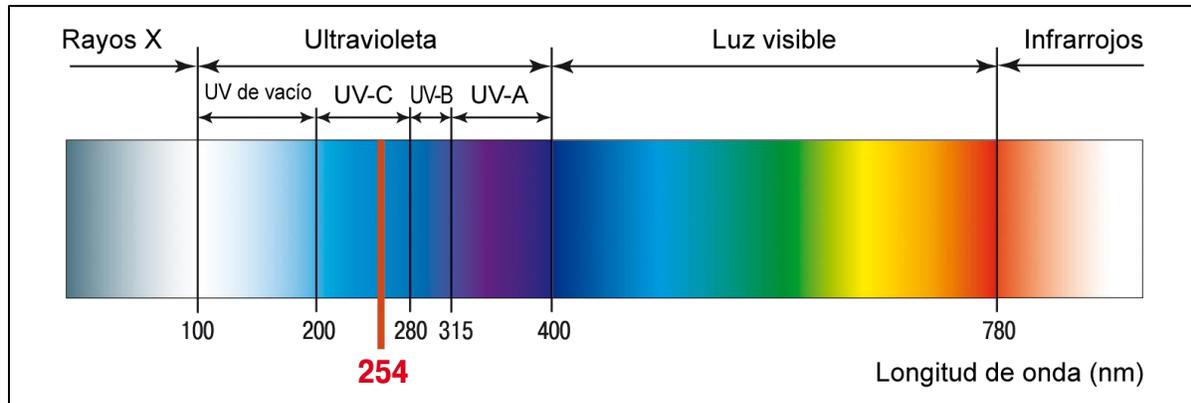


Fig. 3: Espectro de radiación electromagnética UV [28].

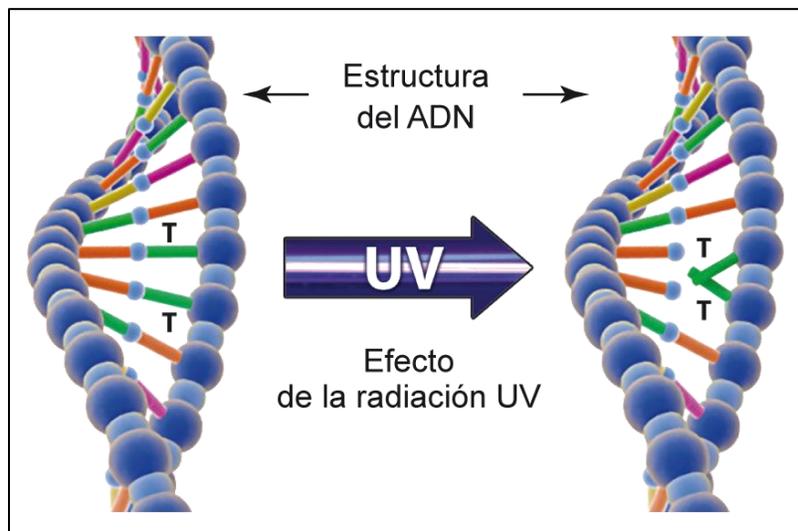


Fig. 4: Efecto de la radiación UV en las cadenas del ADN [28].

Dentro del espectro UV, la longitud de onda más larga corresponde con la radiación UV-A seguida de la UV-B, estas, se manifiestan en múltiples implicaciones sobre los procesos biológicos del planeta. En dosis apropiadas, la radiación electromagnética con estas longitudes de onda beneficia ciertas funciones de los organismos vivos, pero en dosis excesivas de exposición sus consecuencias pueden llegar a ser perjudiciales. La altitud es un factor determinante en la cantidad de radiación UV que se recibe, debido a que en zonas de alta montaña es más delgada la capa de gases que deben recorrer los rayos solares, de manera que a mayor altitud mayor radiación UV. En promedio, por cada 1km de incremento de la altitud sobre el nivel del mar, la radiación UV aumenta entre un 10% a un 12% [3].

La presencia de nubes en la atmósfera influye en la cantidad de radiación UV que se recibe a nivel de superficie, ya que las gotas de agua y los cristales de hielo, actúan como difusores de radiación UV, mediante el fenómeno conocido como difusión Mie [3]. La contaminación urbana también determina la cantidad de radiación UV que llega a la superficie de la Tierra. [3].

La amplitud de la radiación UV que llega a la superficie de un lugar, es inversamente proporcional a la concentración de ozono total en la atmósfera (especialmente en la región entre los 18 y los 40 km de altura, zona en la que se ubica la capa de ozono); a menor cantidad de ozono mayor radiación UV llega a la superficie. Es por esto que, la mayor cantidad de radiación UV se recibe en aquellas regiones en donde la concentración de ozono es menor (Fig. 5) [29].

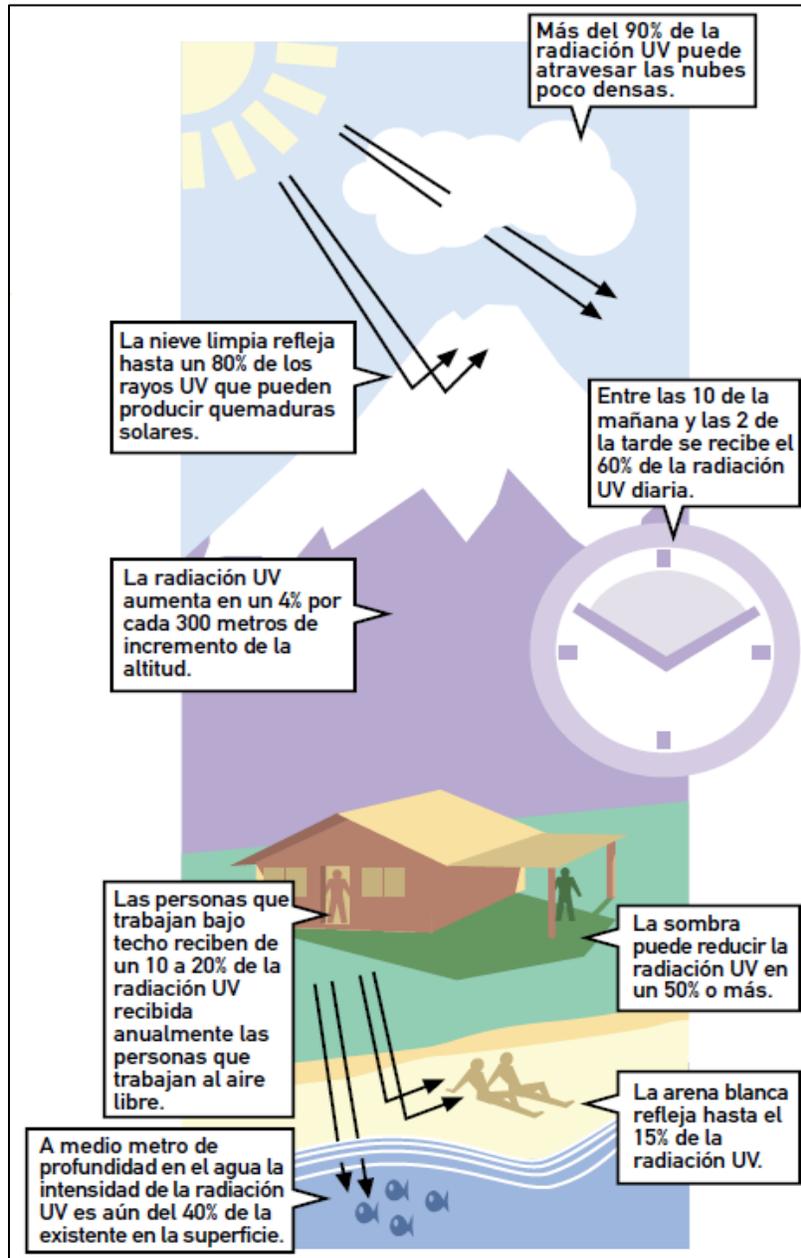


Fig. 5: Información de interés sobre la radiación UV [29].

La irradiancia ( $G$ ) se define como la cantidad de potencia [ $W$ ] distribuida por unidad de área [ $m^2$ ], mientras que la irradiación ( $I$ ), se define como la irradiancia multiplicada por un diferencial de tiempo, es decir, la cantidad de energía que se recibe por unidad de área en un intervalo de tiempo (Fig. 6).

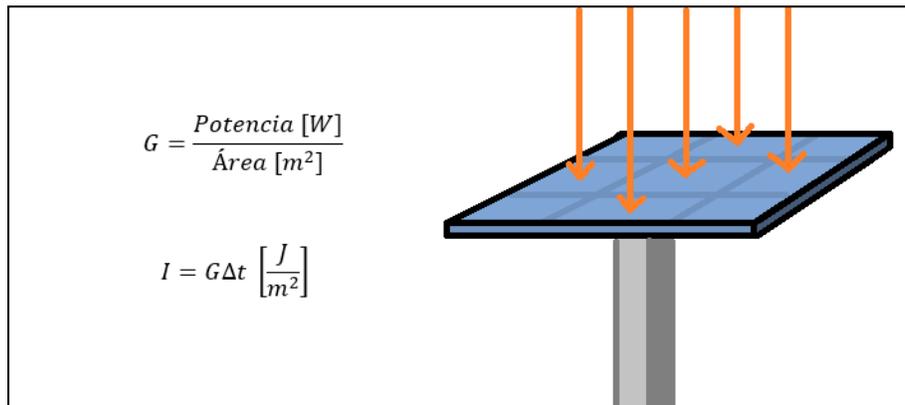


Fig. 6: Definición de irradiancia e irradiación.

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, lo que se llama dispersión. La dispersión ocurre cuando un fotón afecta a un obstáculo sin ser absorbido cambiando solamente la dirección del recorrido de ese fotón. La dispersión depende de la longitud de onda, en el sentido de que cuanto más corta sea ésta, tanto mayor será la dispersión. Moléculas de gas con tamaños relativamente pequeño comparadas con la longitud de onda causan que la radiación incidente se disperse en todas las direcciones, hacia adelante y hacia atrás, este fenómeno es conocido como dispersión de Rayleigh (IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Fig. 7) [35].



Fig. 7: Dispersión, reflexión y absorción de la luz: Radiación solar difusa y radiación solar directa [35].

La capacidad de reflexión o fracción de la radiación reflejada por la superficie de la tierra o cualquier otra superficie se denomina Albedo. El albedo planetario es en promedio de un 30%. El albedo, relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente sobre una superficie horizontal, se expresa en porcentaje. El albedo es variable de un lugar a otro y de un instante a otro, depende de la cobertura nubosa, naturaleza de la superficie, inclinación de los rayos solares, partículas en el aire, etc. [35].

### 3.2. Índice UV solar mundial

El índice UV solar mundial (IUV) es una medida de la intensidad de la radiación UV solar sobre la superficie terrestre (Tabla 2). El índice se expresa como un valor superior a cero, y cuanto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares y menos tardan en producirse esas lesiones. El IUV se dirige a toda población e informa sobre los efectos de la radiación UV sobre la salud, como las quemaduras solares, el cáncer de piel y el envejecimiento de la piel, o las alteraciones oculares y del sistema inmunitario [29].

CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN	INTERVALO DE VALORES DEL IUV
<b>BAJA</b>	<b>&lt; 2</b>
<b>MODERADA</b>	<b>3 A 5</b>
<b>ALTA</b>	<b>6 A 7</b>
<b>MUY ALTA</b>	<b>8 A 10</b>
<b>EXTREMADAMENTE ALTA</b>	<b>11+</b>

Tabla 2: Categorías de exposición a la radiación UV [29].

Existen horas del día durante las cuales el IUV supera un valor determinado de umbral (Fig. 8). Por ejemplo, en un determinado día el IUV puede alcanzar un valor superior a 3 durante no más de 30 minutos, mientras que otro día puede permanecer por encima de 3 durante varias horas. En este caso, las recomendaciones a la población subrayan la necesidad de adoptar medidas de fotoprotección durante estas horas [29].

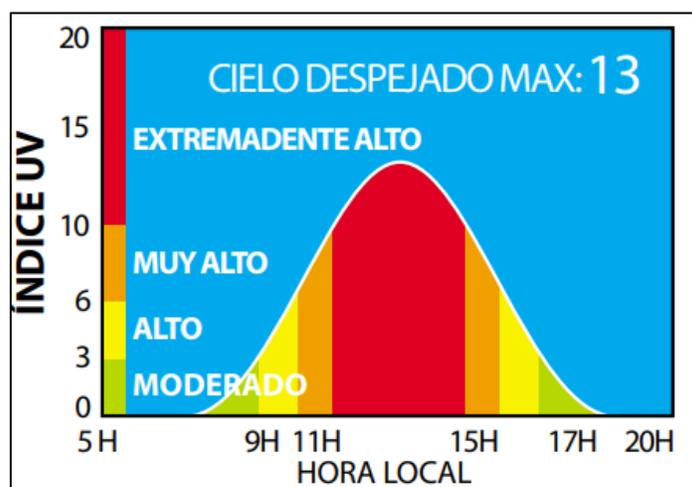


Fig. 8: Gráfico en el que se presentan las horas de peligro [29].

La Ciudad de México se encuentra en una latitud que le permite recibir la radiación del sol durante todo el año, además por su altitud está expuesta a un 20% más de radiación ultravioleta con respecto al nivel del mar. Cuando el Índice UV alcanza o supera el valor de 11 existe un riesgo importante de sufrir daños en la piel si no se usa protección en un periodo de tiempo breve. [7], [29].

Durante todo el año se registra una intensidad alta en la radiación solar UV, aunque es en los meses de marzo a septiembre cuando aumenta significativamente, representando un mayor riesgo para la salud. Las horas de mayor intensidad y por lo tanto de mayor riesgo, son de las 11:00 a las 16:00 h, cuando el sol alcanza su máxima altura en el cielo. La presencia de nubosidad disminuye la sensación de calor, pero no disminuye la intensidad de la radiación solar UV, por lo que también en días nublados se recomienda usar protección contra la radiación ultravioleta [7].

Por razones médicas, para la radiación solar ultravioleta se emplean unidades llamadas MED, (Minimum Erythema Dose) por sus siglas en inglés ó MED/h. Se utiliza la banda del ultravioleta tipo B, debido a que es el tipo de radiación más energética que llega a nivel de superficie terrestre. 1 MED (dosis eritematogena mínima) se define como la cantidad de exposición a la luz solar necesaria para inducir irritación en la piel dentro de 24 horas de ocurrida la exposición al sol según el tipo de piel.

1 MED/hora = 0.0583 W/m<sup>2</sup>, esta es la equivalencia aceptada por la OMS y 1 MED = 210 J/m<sup>2</sup>. Por definición, una unidad del índice ultravioleta equivale a 0.025 W/m<sup>2</sup> (IUV = 1/40 [W/m<sup>2</sup>]), por lo que, una manera más directa de calcular el IUV, es a partir del valor de la irradiancia en W/m<sup>2</sup> del espectro de UV-B [36].

Para calcular el índice UV, se parte de la medición de los equipos de referencia de UV-B en [W/m<sup>2</sup>], posteriormente, se divide por un factor de 0.025 y se redondea el resultado al límite superior inmediato (ver ejemplo en la Tabla 3).

UV-B [W/m <sup>2</sup> ]	Factor	Resultado parcial	IUV
0.23	0.025	9.2	10

Tabla 3: Ejemplo de cálculo del IUV a partir del valor de irradiancia de UV-B en [W/m<sup>2</sup>].

## 4. Marco teórico

### 4.1. Análisis espectral de Fourier

Una señal periódica  $\eta(t)$ , con duración  $T_r$  puede ser descompuesta en armónicos simples, como una serie infinita de senos y cosenos, de forma tal que:

$$\eta(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_r}\right) + b_n \sen\left(\frac{2\pi n t}{T_r}\right) \right) \quad (1)$$

En términos de la frecuencia angular:

$$\eta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{-i\sigma_n t} \quad (2)$$

Este desarrollo se denomina Serie de Fourier, donde  $a_0$  representa el valor del nivel medio y  $a_n$  y  $b_n$  son los coeficientes de Fourier. Los coeficientes de Fourier, para  $n \geq 1$  y  $a_n \neq b_n$  se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$a_0 = \frac{1}{T_r} \int_{-\frac{T_r}{2}}^{\frac{T_r}{2}} \eta(t) dt \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T_r} \int_{-\frac{T_r}{2}}^{\frac{T_r}{2}} \eta(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_r}\right) dt \quad (4)$$

$$b_n = \frac{2}{T_r} \int_{-\frac{T_r}{2}}^{\frac{T_r}{2}} \eta(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T_r}\right) dt \quad (5)$$

La frecuencia angular del  $n$ -ésimo coeficiente se define como:

$$\sigma_n = \frac{2\pi n}{T_r} \quad (6)$$

Y la distancia entre armónicos adyacentes es:

$$\Delta\sigma = \frac{2\pi}{T_r} \quad (7)$$

En la medida que el periodo de registro sea mayor el espacio entre armónicos se hace más pequeño y los coeficientes de Fourier estarán más próximos.

En la teoría clásica de Fourier se introduce una función  $F(\sigma)$  que se denomina transformada de Fourier y se calcula a partir de la expresión (8). La transformada de Fourier tiene la principal ventaja que permite convertir una señal que originalmente depende del tiempo a otra en función de la frecuencia y, agrupa la energía asociada a cada frecuencia a partir de la serie temporal original.

$$F(\sigma) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i\sigma t} dt \quad (8)$$

Es común, para el análisis de las series de tiempo encontrar la transformada de Fourier expresada en términos de la frecuencia  $f$  en lugar de la frecuencia angular  $\sigma$ , de manera que si:

$$\sigma = 2\pi f \quad (9)$$

Entonces:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (10)$$

Las condiciones que debe cumplir la señal original para poder calcular la transformada de Fourier son las de Dirichlet: que sea integrable en todo el dominio, que tenga un grado de oscilación finito y que el número de discontinuidades sea numerable.

## 4.2. Análisis espectral Wavelet

La transformada Wavelet de una función  $f(t)$  se define como:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t)\psi_{s,\tau}^* dt \quad (11)$$

Donde  $s$  es el factor de escala y  $\tau$  es el factor de translación.

Las funciones  $\psi_{s,\tau}(t)$  forman una base y son llamadas wavelets. Las wavelets se generan a partir de la translación y cambio de escala de una misma función llamada wavelet madre definida como:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}}\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (12)$$

Las wavelets generadas de la misma función madre tienen la misma forma, pero diferente escala  $s$  y ubicación  $\tau$ .

El factor de escala siempre es  $s > 0$ . Cuando  $s > 1$  se dice que las wavelets son dilatadas y cuando  $s < 1$  son contraídas, así que cambiando el valor de  $s$  se cubren rangos de diversas frecuencias.

Cuando se tienen más de una serie de tiempo se aplica el análisis de cross-wavelet cuyo objetivo es encontrar la correlación lineal desde el punto de vista espectral existente entre dos series de tiempo. Si se tiene una serie de tiempo  $X$  y otra  $Y$  cuyas transformadas son  $W^x$  y  $W^y$ , entonces las cross-wavelet está definida como:

$$W^{xy} = W^x \cdot W^y \quad (13)$$

En los espectros se pueden incluir flechas que indican la fase relativa entre dos señales, la cual se calcula como:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}(W^{xy})}{\text{Re}(W^{xy})}\right) \quad (14)$$

## 4.3. Redes Neuronales Recurrentes (RNN)

Las Redes Neuronales Artificiales, (RNA) son arreglos de elementos interconectados entre sí y organizados de una forma similar a las neuronas en el cerebro humano, en donde cada elemento tiene su propio valor también llamado “peso” o “ganancia”. Estos arreglos presentan propiedades como el cerebro; aprenden de la experiencia, generalizan de ejemplos previos a ejemplos nuevos y abstraen las características principales de una serie de datos. En los trabajos de Baydyk y Kussul (2009-2019) han desarrollado algoritmos de reconocimiento y clasificación de imágenes para diversas aplicaciones utilizando Redes Neuronales Artificiales, tales aplicaciones incluyen: reconocimiento de escarabajos en un cultivo de papa utilizando clasificadores neuronales [38] y aplicaciones en el área de la micromecánica [39] y automatización inteligente en energías renovables [40].

Las Redes Neuronales Recurrentes (Recurrent Neural Networks, RNN) son una clase de redes para analizar datos de series temporales permitiendo tratar la dimensión de tiempo. Fueron definidas en la década de los 80s. Sin embargo, estas redes son complejas de entrenar por sus altos requerimientos en computación [41].

La RNN más simple posible, compuesta por una sola neurona que recibe una entrada, produciendo una salida, y enviando esa salida a sí misma, como se muestra en la Figura 9 [41].

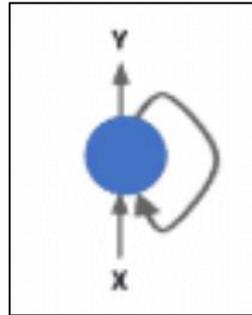


Fig. 9: Neurona de una RNN [41].

En cada instante de tiempo (también llamado timestep en este contexto), esta neurona recurrente recibe la entrada  $x$  de la capa anterior, así como su propia salida del instante de tiempo anterior para generar su salida  $y$ . Podemos representar visualmente esta pequeña red desplegada en el eje del tiempo como se muestra en la Figura 10 [41].

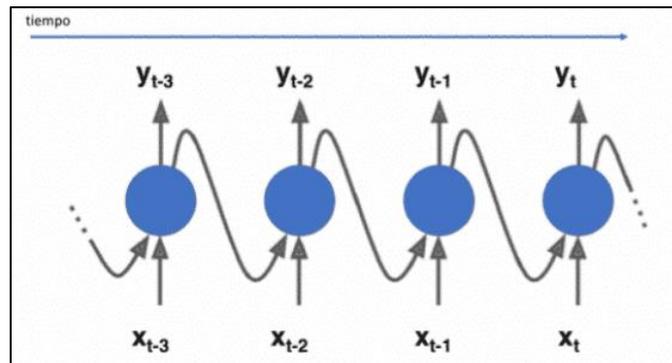


Fig. 10: Pequeña RNN [41].

Siguiendo esta idea, una capa de neuronas recurrentes se puede implementar de tal manera que, en cada instante de tiempo, cada neurona recibe dos entradas, la entrada correspondiente de la capa anterior y a su vez la salida del instante anterior de la misma capa [41].

Ahora cada neurona recurrente tiene dos conjuntos de parámetros, uno que lo aplica a la entrada de datos que recibe de la capa anterior y otro conjunto que lo aplica a la entrada de datos correspondiente al vector salida del instante anterior. Lo anterior se puede expresar de la siguiente manera [41]:

$$y_t = f(Wx_t + Uy_{t-1} + b) \quad (15)$$

Donde  $x = (x_1, \dots, x_T)$  representa la secuencia de entrada proveniente de la capa anterior,  $W$  los pesos de la matriz y  $b$  el bias vistos ya en las anteriores capas. Las RNN extienden esta función con una conexión recurrente en el tiempo donde  $U$  es la matriz de pesos que opera sobre el estado de la red en el instante de tiempo anterior ( $y_{t-1}$ ) anterior. Ahora, en la fase de entrenamiento a través del backpropagation también se actualizan los pesos de esta matriz [41].

### 4.3.1. Memory cell

Dado que la salida de una neurona recurrente en un instante de tiempo determinado es una función de entradas de los instantes de tiempo anteriores, se podría decir que una neurona recurrente tiene en cierta forma memoria. La parte de una red neuronal que preserva un estado a través del tiempo se suele llamar memory cell (o simplemente cell) [41].

Y precisamente esta “memoria interna” es lo que hace de este tipo de redes muy adecuadas para problemas de aprendizaje automático que involucran datos secuenciales. Gracias a su memoria interna, las RNN pueden recordar información relevante sobre la entrada que recibieron, lo que les permite ser más precisas en la predicción de lo que vendrá después manteniendo información de contexto a diferencia de los otros tipos de redes, que no pueden recordar acerca de lo que ha sucedido en el pasado, excepto lo reflejado en su entrenamiento a través de sus pesos [41].

Proporcionar modelos con memoria y permitirles modelar la evolución temporal de las señales es un factor clave en muchas tareas de clasificación y traducción de secuencias en las que los RNN sobresalen, como la traducción automática, el modelado del lenguaje o el reconocimiento de voz, entre muchas otras áreas, donde la secuencia de datos y su dinámica temporal que conecta los datos a menudo es más importante que el contenido espacial (de los píxeles) de cada dato (imagen) individual [41].

Para ilustrar el concepto de “memoria” de una RNN, imaginemos que, para una red neuronal convencional, le pasamos la palabra “neurona” como entrada y esta red procesa la palabra carácter a carácter. En el momento en que alcanza el carácter “r”, ya se ha olvidado de “n”, “e” y “u”, lo que hace que sea casi imposible para la red neuronal predecir qué letra vendrá después. Pero en cambio, una RNN permite recordar precisamente esto. Conceptualmente, la RNN tiene como entradas el presente y el pasado reciente. Esto es importante porque la secuencia de datos contiene información crucial para saber lo que viene a continuación [41].

### 4.3.2. Backpropagation a través del tiempo

En las redes neuronales más comunes, básicamente se hace Forward-Propagation para obtener el resultado de aplicar el modelo y verificar si este resultado es correcto o incorrecto para obtener la Loss. Después se hace Backward-Propagation (o Backpropagation) que no es otra cosa que ir hacia atrás a través de la red neuronal para encontrar las derivadas parciales del error con respecto a los pesos de las neuronas. Esas derivadas son utilizadas por el algoritmo Gradient Descent para minimizar iterativamente una función dada, ajustando los pesos hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de cómo se disminuye la Loss [41].

Entonces, con Backpropagation básicamente se intenta ajustar los pesos de nuestro modelo mientras se entrena lo que se llama Backpropagation Through Time (BPTT). El desenrollar es una herramienta conceptual y de visualización que permite ayudar a comprender cómo puede conseguirse realizar el Backpropagation, solo que, incluyendo la dimensión tiempo [41].

Para el caso simple de una sola neurona, y la versión desenrollada, se puede observar que no queda ningún ciclo y que la información se pasa de un instante a otro. Al analizar la figura visual que nos queda después de desenrollar, se observa por qué se puede considerar una RNN como una secuencia de redes neuronales en la que se puede realizar un Backpropagation relativamente al de otras redes neuronales [41].

Al realizar el proceso de BPTT, se requiere a nivel matemático incluir la conceptualización de desenrollar, ya que la Loss de un determinado instante de tiempo depende del instante (timestep)

anterior. Dentro de BPTT, el error es propagado hacia atrás desde el último hasta el primer instante de tiempo, mientras se desenrollan todos los instantes de tiempo. Esto permite calcular la Loss para cada instante de tiempo, lo que permite actualizar los pesos. Pero el grafo no cíclico que resulta del desplegado en el tiempo es enorme y poder realizar el BPTT es computacionalmente costoso [41].

### 4.3.3. Exploding Gradients y Vanishing Gradients

Dos cuestiones importantes que afectan a las RNN (aunque afecta en general a cualquier tipo de red muy grande en números de parámetros sea o no sea recurrente) son Exploding Gradients y Vanishing Gradients dado el impacto que han tenido ambos en el desarrollo de extensiones actuales de RNN [41].

Un gradiente es una derivada parcial de una función con respecto a sus entradas que mide cuánto cambia la salida al cambiar las entradas un poco, por decirlo en un lenguaje lo más general posible. También se puede ver como la pendiente de una función en un punto, que cuanto más alto es el gradiente, más pronunciada es la pendiente y más rápido puede aprender un modelo. Pero si la pendiente es cero, el modelo se detiene en el proceso de aprender [41].

En resumen, el gradiente indica el cambio a realizar en todos los pesos con respecto al cambio en el error. Hablamos de “gradientes explosivos” o Exploding Gradients en inglés cuando el algoritmo asigna una importancia exageradamente alta a los pesos, sin mucha razón y esto genera un problema en el entrenamiento. En este caso el problema se puede resolver fácilmente si se truncan o reducen los gradientes [41].

Hablamos de “gradientes desaparecidos” o Vanishing Gradients cuando los valores de un gradiente son demasiado pequeños y el modelo deja de aprender o requiere demasiado tiempo debido a ello. Este fue un problema importante en la década de 1990 y mucho más difícil de resolver que los Exploding Gradients. Afortunadamente, se resolvió mediante el concepto de gate units (puertas) [41].

### 4.3.4. Long-Short Term Memory

Long-Short Term Memory (LSTM) son una extensión de las redes neuronales recurrentes, que básicamente amplían su memoria para aprender de experiencias importantes que han pasado hace mucho tiempo. Las LSTM permiten a las RNN recordar sus entradas durante un largo período de tiempo. Esto se debe a que LSTM contiene su información en la memoria, que puede considerarse similar a la memoria de un ordenador, en el sentido que una neurona de una LSTM puede leer, escribir y borrar información de su memoria [41].

Esta memoria se puede ver como una “celda” bloqueada, donde “bloqueada” significa que la célula decide si almacenar o eliminar información dentro (abriendo la puerta o no para almacenar), en función de la importancia que asigna a la información que está recibiendo. La asignación de importancia se decide a través de los pesos, que también se aprenden mediante el algoritmo. Esto se puede ver como que aprende con el tiempo qué información es importante y cuál no [41].

En una neurona LSTM hay tres puertas a estas “celdas” de información: puerta de entrada (input gate), puerta de olvidar (forget gate) y puerta de salida (output gate). Estas puertas determinan si se permite o no una nueva entrada, se elimina la información porque no es importante o se deja que afecte a la salida en el paso de tiempo actual [41].

Las puertas en una LSTM son análogas a una forma sigmoide, lo que significa que van de 0 a 1. El hecho de que sean análogas a una función de activación sigmoid, permite incorporarlas (matemáticamente hablando) al proceso de Backpropagation. Como ya se ha mencionado, los problemas de los Vanishing Gradients se resuelven a través de LSTM porque mantiene los gradientes lo suficientemente empinados y, por lo tanto, el entrenamiento es relativamente corto y la precisión alta [41].

## 5. Diseño, Desarrollo del sistema y metodología

De manera muy general, el arreglo instrumental para medir la cantidad de radiación UV-A, UV-B, y UV-C, está diseñado en la integración de dos módulos principales, los cuales son una estación de medición y un ordenador que hace la función de servidor (Fig. 11).

En la estación, se obtienen las mediciones de tres sensores principales para cada intervalo de longitud de onda, estas señales analógicas se acondicionan y se envían por radiofrecuencia a la computadora.

En el servidor, la computadora recibe los datos de forma serial, se registran y se almacenan junto con la fecha y la hora del sistema en un archivo de texto tabulado cuyo nombre es “mediciones.txt”.

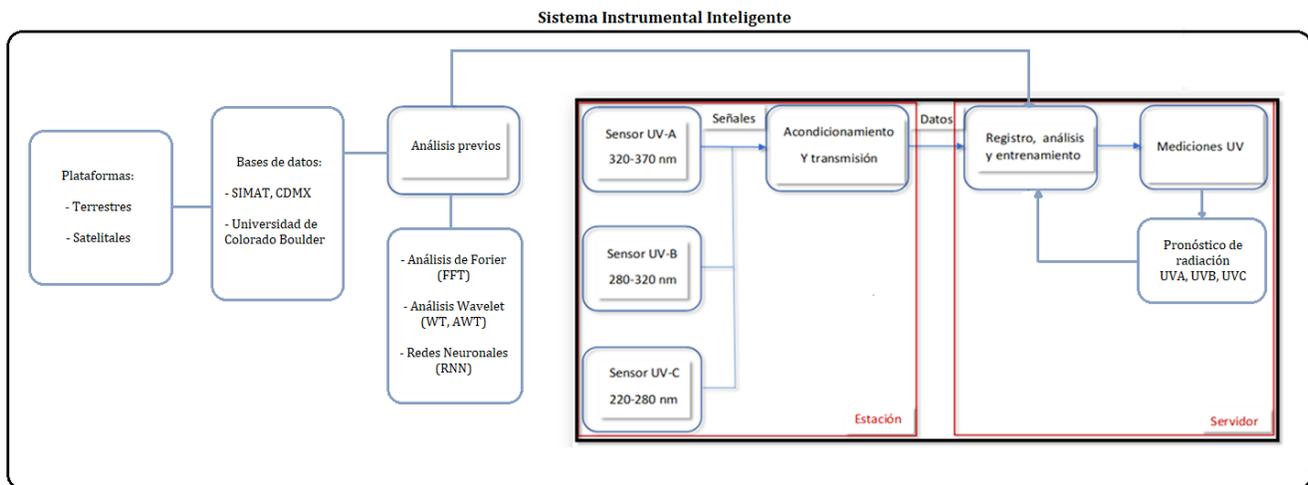


Fig. 11: Diagrama de bloques del sistema instrumental.

### 5.1 Arquitectura del radiómetro

A partir de este punto, se le llamará módulo 1 a la estación de monitoreo encargada de medir la radiación UV y enviar la información por radiofrecuencia, y módulo 2 al servidor encargado de recibir, desplegar y grabar la información.

El módulo 1 se compone de 5 subsistemas fundamentales, los cuales son: subsistema estructural y térmico, subsistema de medición y envío de datos, subsistema de orientación, subsistema de reloj en tiempo real y subsistema de potencia. Cada uno de estos debe operar correctamente para el

buen funcionamiento del instrumento. La Figura 12, muestra la arquitectura del módulo 1, así como los algoritmos principales que se ejecutan por cada subsistema.

El módulo 2 se compone principalmente de 2 subsistemas, los cuales son el receptor de radiofrecuencia y envío de datos de forma serial a través de USB, y una computadora que se encarga de recibir los datos de forma serial, desplegarlos en pantalla y grabarlos en un archivo de texto tabulado. La Figura 13, muestra la arquitectura del módulo 2, así como los algoritmos principales que se ejecutan por cada subsistema.

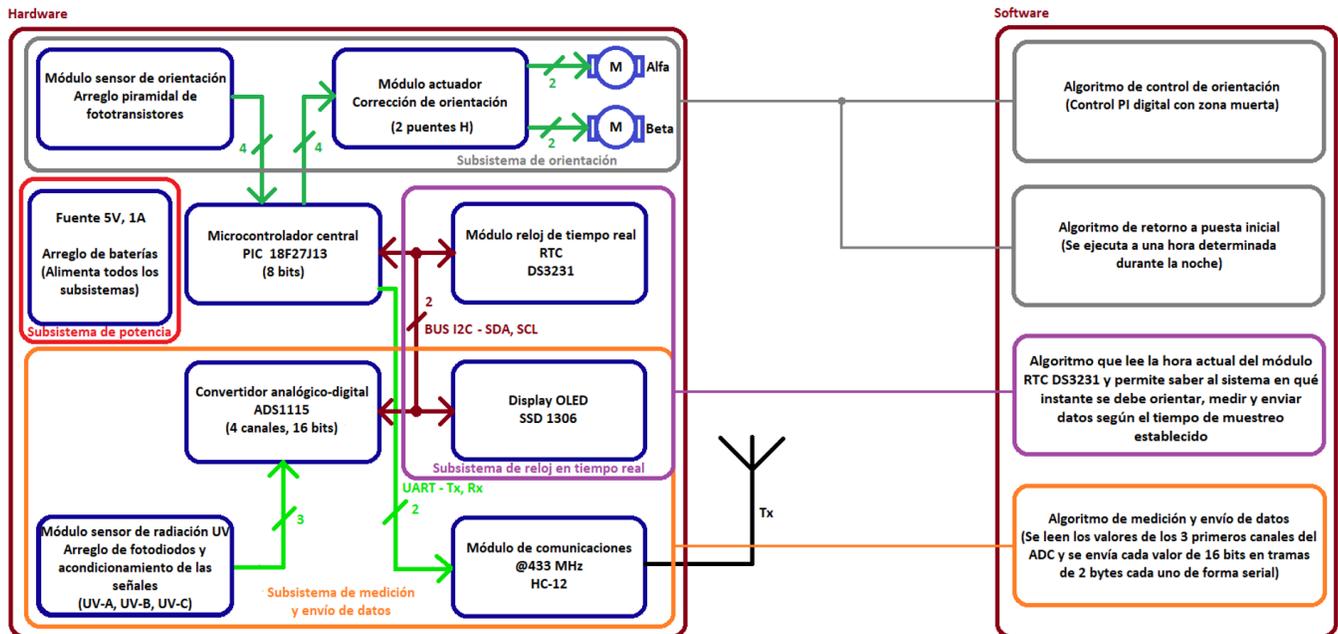


Fig. 12: Módulo 1, Estación (etapa de medición y envío de datos a través de radiofrecuencia).

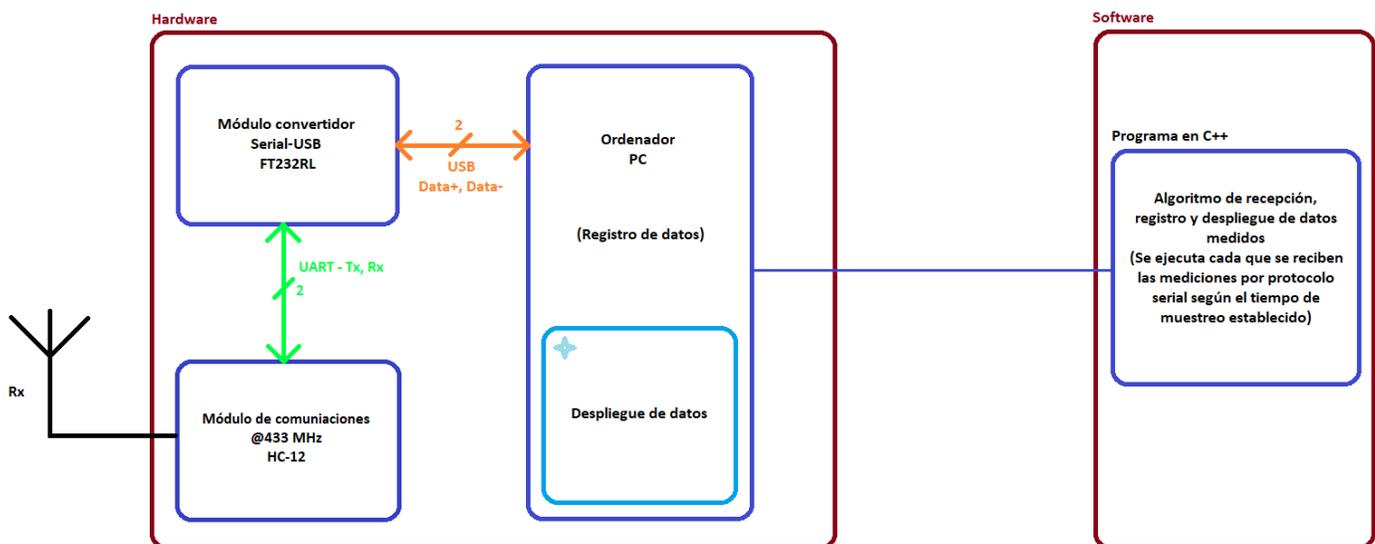


Fig. 13: Módulo 2, (etapa de recepción, despliegue y registro de datos).

Los diagramas de flujo 1 y 2, muestran, respectivamente, los procesos y las subrutinas que ejecuta el módulo 1 y el módulo 2, cada subrutina y función se especifica y se detalla su funcionamiento en el apartado del subsistema correspondiente.

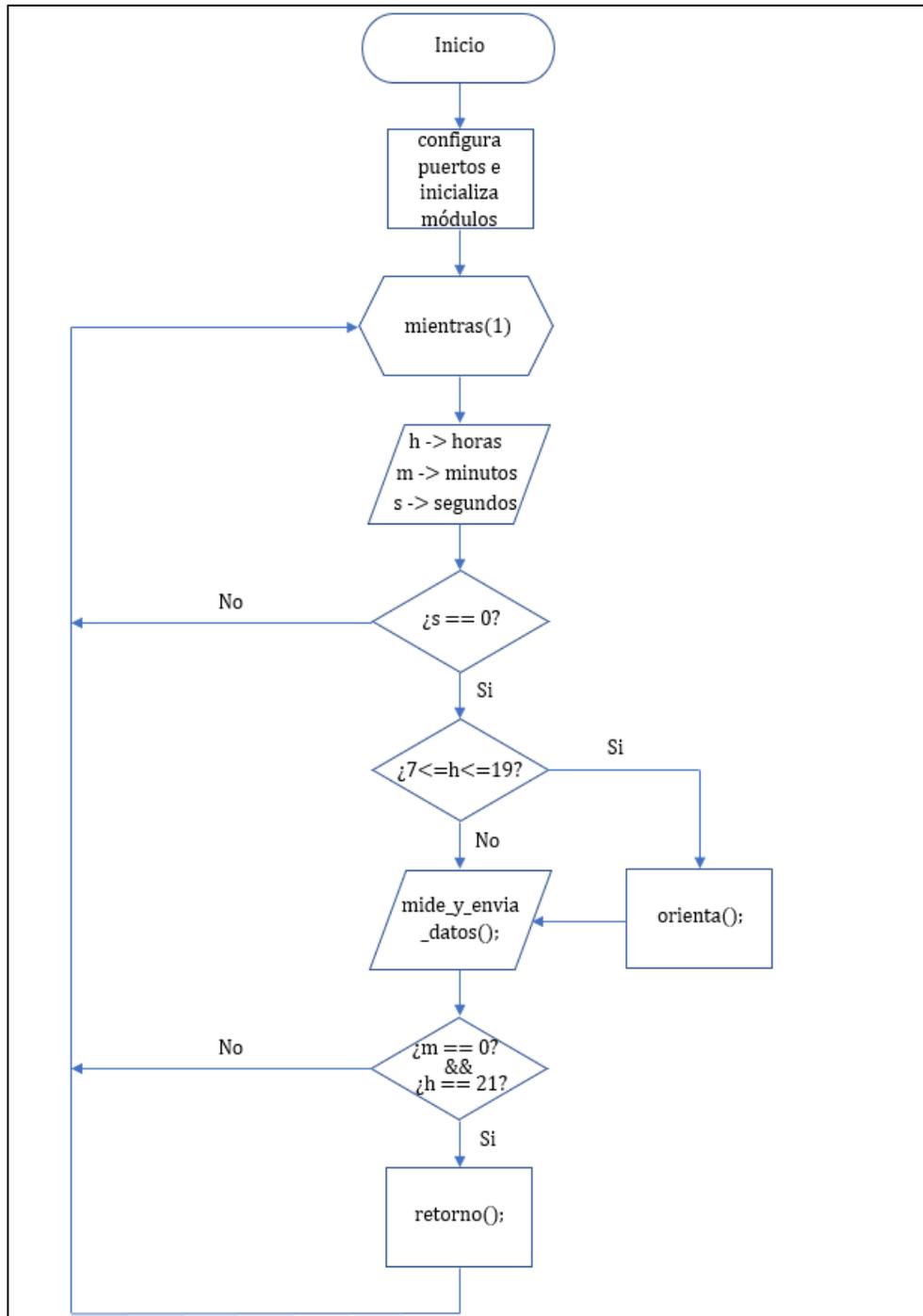


Diagrama de flujo 1: Algoritmo principal del módulo 1.

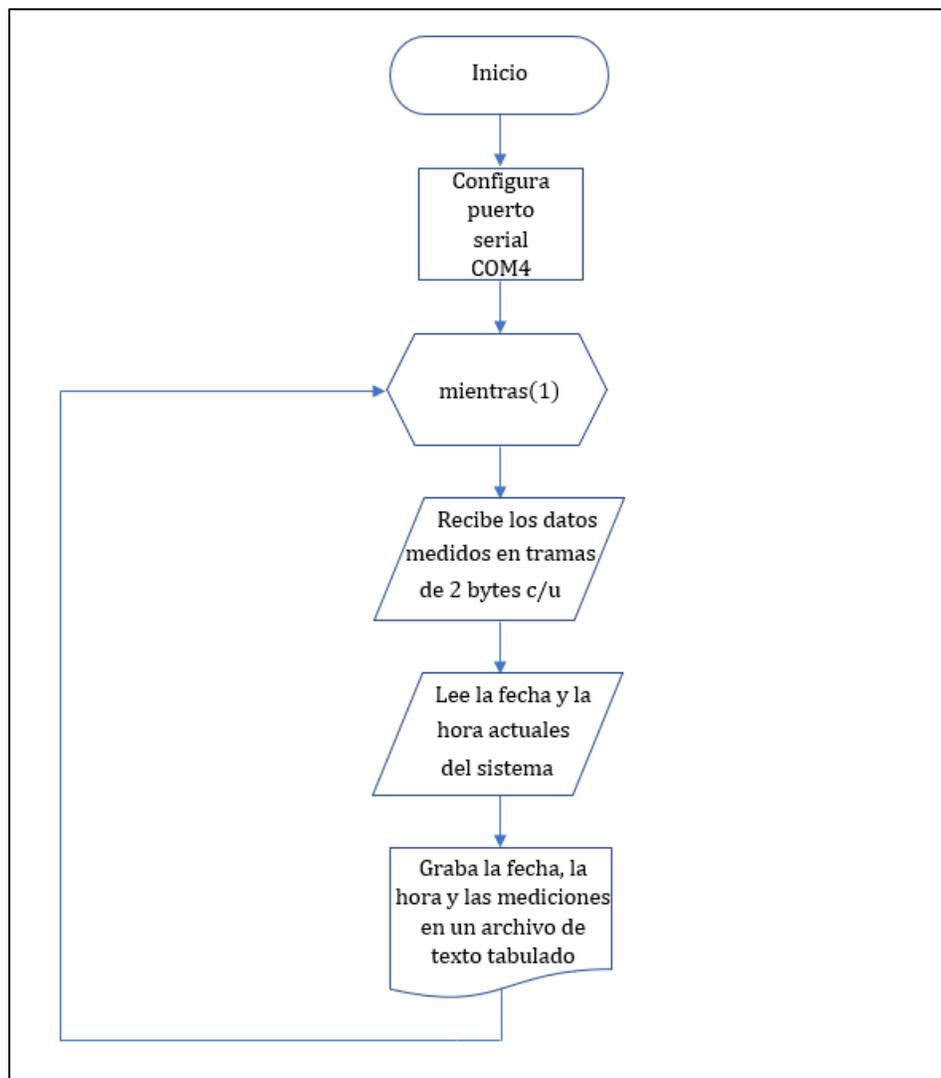


Diagrama de flujo 2: Algoritmo principal del módulo 2.

## 5.2. Subsistema de potencia

Debido a que el instrumento debe de colocarse en alto para que pueda medir la radiación UV (por ejemplo, la azotea de una edificación), no siempre se cuenta con instalación eléctrica en este tipo de lugares, por lo cual, se decidió que el prototipo tome energía de sol para funcionar en la etapa de pruebas de funcionamiento y posteriormente de una fuente fija en la etapa de funcionamiento continuo.

Un arreglo de dos pilas fotovoltaicas de 7V, 200 mA cada una, conectadas en paralelo, energizan el instrumento, y a su vez, cargan un arreglo de pilas recargables, este arreglo se conforma de 8 pilas recargables de 1.2 V y 2500 mAh cada una. Cada par de pilas se conectan en paralelo, lo que da un total de 4 pilas de 1.2V, 5000 mAh cada una, y cada subarreglo en paralelo se conecta en serie para dar como resultado una batería recargable de 5V, 5000 mAh. Las pilas son de Níquel-Metal y deben cargarse con una corriente constante de 200 mA. Un transistor PNP BD140 se encarga de suministrar la energía variable proveniente de las celdas solares a la batería recargable para que

esta sea almacenada, posteriormente, se utiliza un regulador de baja caída a 3.3V para poder energizar el microcontrolador y tener una referencia de voltaje fija para los demás subsistemas, el voltaje de la batería se utiliza para alimentar directamente al módulo de comunicaciones RF y los motores, que son controlados mediante señales PWM. El diagrama esquemático de la fuente de alimentación se muestra en la Figura 14. La eficiencia de esta fuente es aproximadamente de 73%.

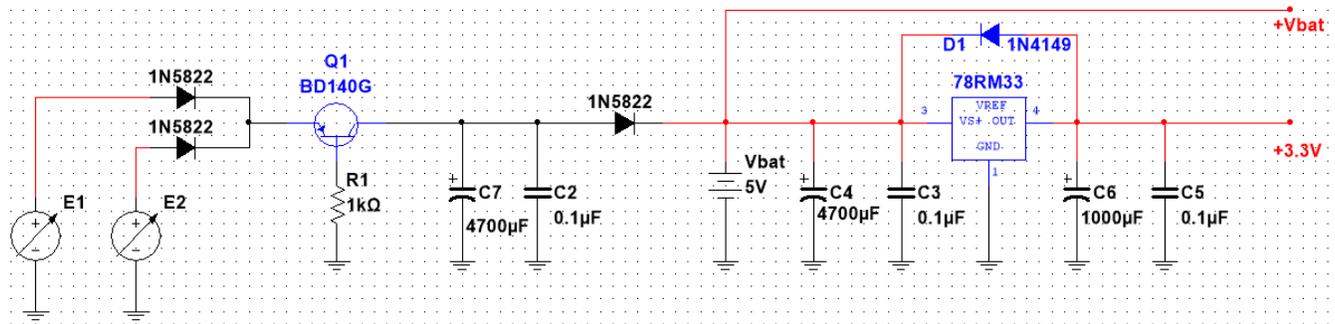


Fig. 14: Fuente de alimentación solar con almacenamiento en una batería.

El consumo energético del sistema en reposo es de 0.1W, mientras que al orientarse, medir y enviar los datos por radiofrecuencia es de 5W, este consumo máximo se da cada minuto durante 1 segundo, de acuerdo al tiempo de muestreo establecido. Cada minuto, el sistema se orienta, mide y envía datos por lo que mientras permanece en reposo con un consumo de 0.1W. La Figura 15, muestra la curva de consumo energético del instrumento normalizada a 1 minuto.

La integral de esta curva corresponde con la energía utilizada por el instrumento en 1 minuto, y da como resultado un valor de 10.9J. A mediodía, suponiendo un cielo despejado, la fuente es capaz de proporcionar 2W de potencia, lo cual en 1 minuto es igual a 120J por lo que teóricamente 109.1J son almacenados en las baterías, esto es 10 veces la energía que necesita el instrumento para funcionar, pero no es constante, ya que varía a lo largo del día siendo las horas cercanas al mediodía las de mejor aprovechamiento energético, también la energía suministrada por esta fuente solar varía en función de las nubes. Esta configuración garantiza tener las pilas siempre cargadas para permitir que el instrumento opere de forma correcta y continua, además de ser una fuente de bajo ruido sin conmutaciones de inductancias que puedan generar rizo que afecte a las mediciones. Durante la noche, el instrumento no se orienta, por lo que su consumo energético es mínimo: 0.1W.

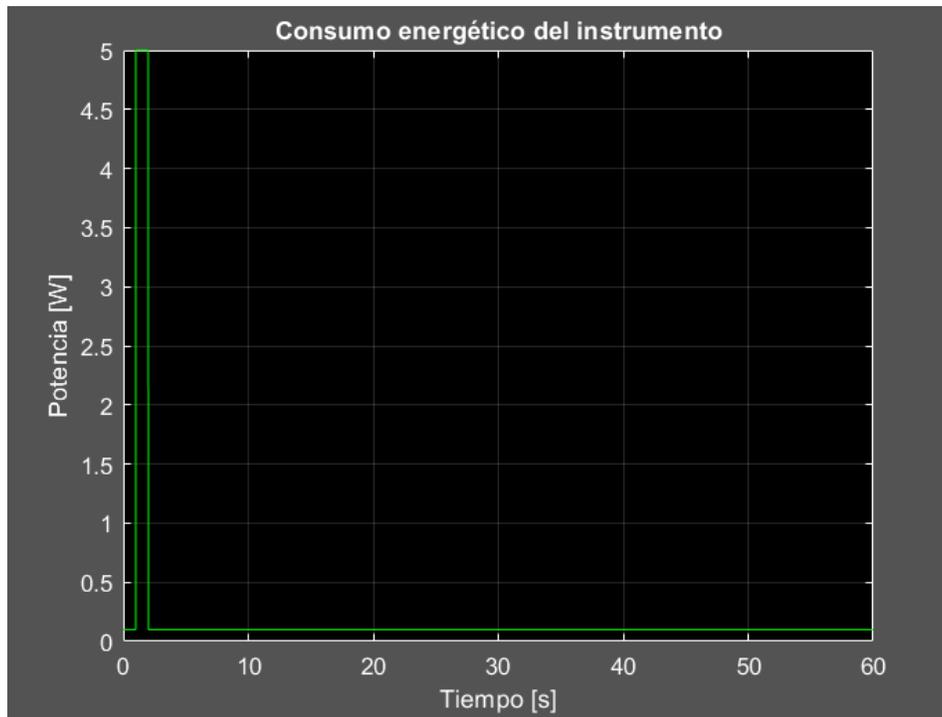


Fig. 15: Consumo energético máximo del instrumento normalizado a 1 minuto.

Se diseñó una fuente lineal simple de bajo ruido que mantiene las baterías del instrumento completamente cargadas en todo momento, esta fuente se utilizó en la etapa de funcionamiento continuo del instrumento una vez pasadas las pruebas de funcionamiento alimentadas con celdas solares. La Figura 16, muestra el diagrama esquemático de este circuito.

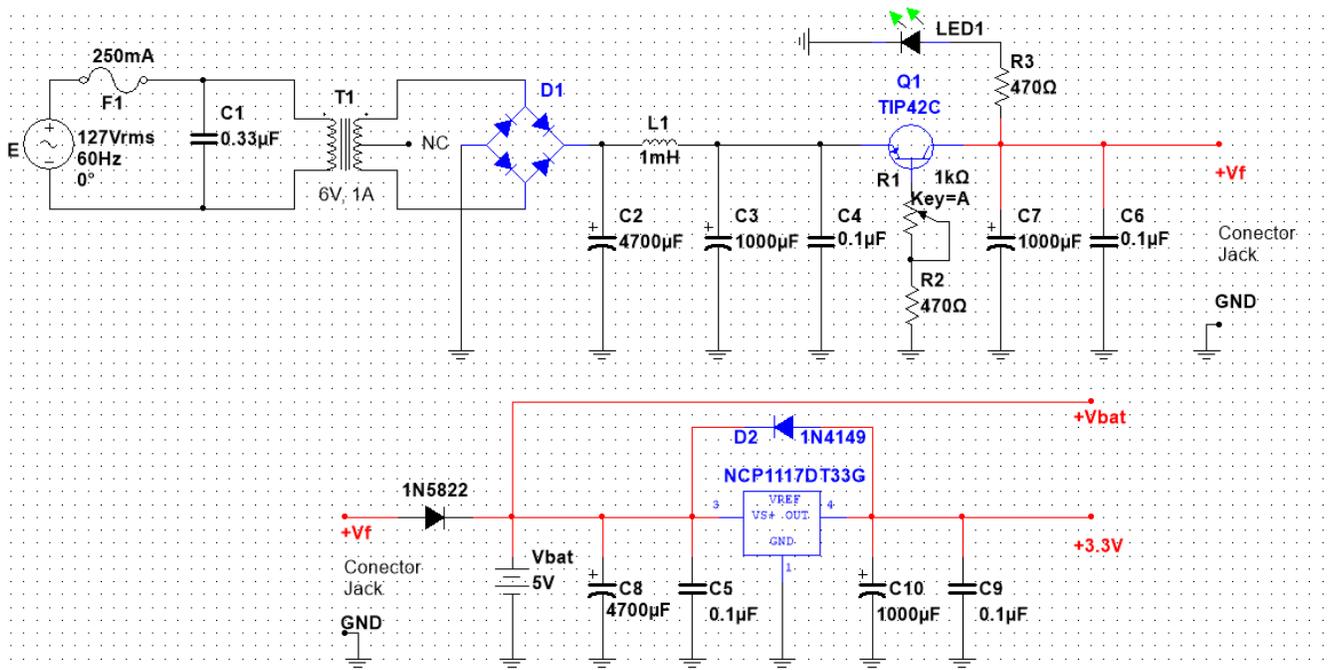


Fig. 16: Fuente de alimentación lineal 5V, 1A.

### 5.3. Subsistema de alineamiento con el vector de poynting solar

El microcontrolador PIC 18F27J13, ejecuta un algoritmo de control para poder mover una estructura en la cual se encuentra montado el arreglo instrumental con el fin de seguir la trayectoria solar durante el día y medir la radiación solar. La Figura 17, muestra el modelo dinámico del mecanismo, así como las expresiones matemáticas que rigen su comportamiento, estas se obtuvieron al modelar el mecanismo.

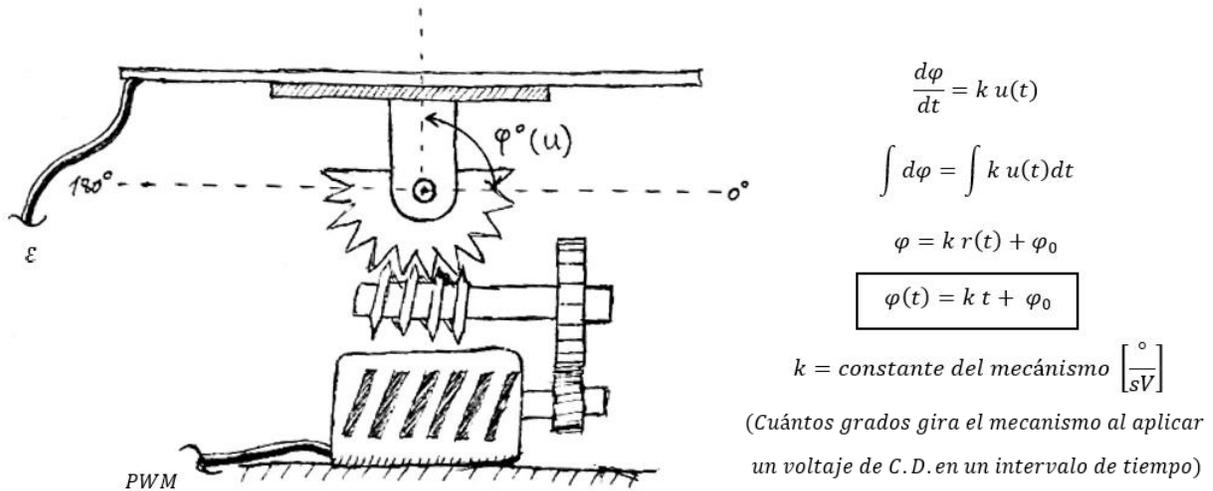


Fig. 17: Modelado del sistema físico del mecanismo para el seguidor solar.

Nota: El ángulo  $\varphi$  es un ángulo genérico para cualquier mecanismo. En el caso particular del mecanismo para el seguidor solar, corresponde al ángulo de elevación del sol, un segundo mecanismo similar se implementó de forma horizontal para resolver para el ángulo de acimut.

Sobre la superficie móvil, se encuentra un arreglo piramidal de 4 fototransistores, los cuales sirven como referencia y alimentan el estado actual del sistema para poder ejecutar el algoritmo de control y poder así orientarse con el vector de poynting solar. La Figura 18 muestra el proceso de construcción de esta pirámide a partir de una hoja de aluminio. Las dimensiones son 3cm  $\times$  3cm de base y 2 cm de altura.



Fig. 18: Construcción de un opto sensor piramidal.

Cada fototransistor se encuentra en una cara de la pirámide, visto de forma transversal, un par de fototransistores en cada eje, forman un ángulo de  $36.87^\circ$  respecto a la normal de la superficie móvil (ver Fig. 19). Con ello generan señales diferenciales para cada ángulo de incidencia de la radiación solar, en el caso concreto en el que la radiación incide perpendicularmente a la superficie, y la normal de esta se alinea con el vector de poynting, la diferencia de voltaje entre la señal generada por cada par de fototransistores se aproxima teóricamente a cero, en el caso práctico no es así ya que cada dispositivo fototransistor responde de manera diferente.

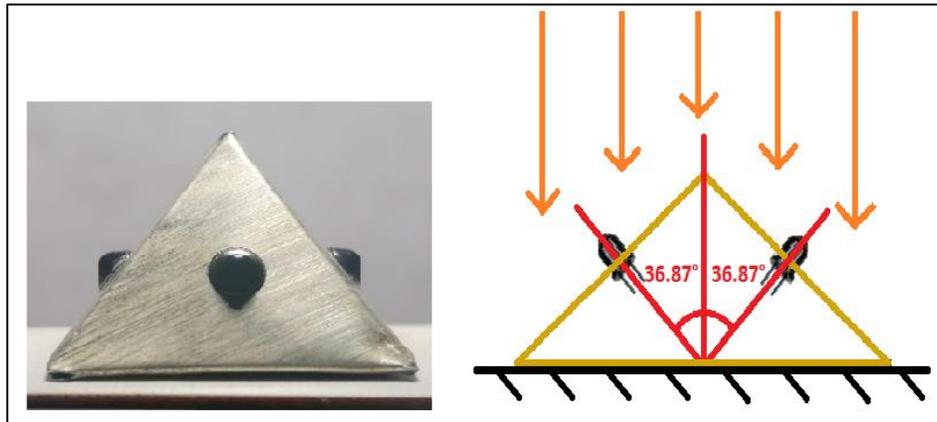


Fig. 19: Arreglo instrumental de fototransistores.

Cada fototransistor corresponde con un OP593, cuya respuesta en longitud de onda se encuentra en parte del espectro visible y parte del infrarrojo (ver Fig. 20), adicionalmente, se muestra el desplazamiento angular al cual responde cada fototransistor [46].

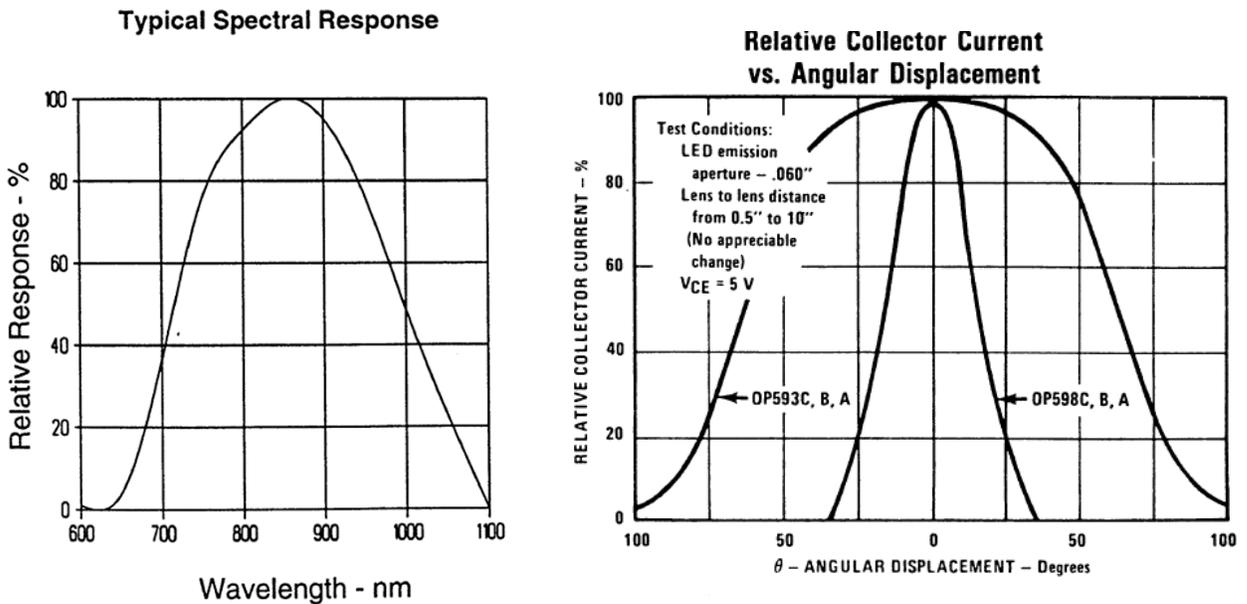


Fig. 20: Respuesta espectral y desplazamiento angular del fototransistor OP593 [46].

El diagrama esquemático del arreglo de fototransistores se muestra en la Figura 21. Los potenciómetros sirven para el ajuste fino de la referencia y con ello calibrar el apuntamiento para cada ángulo (elevación y acimut). Las señales A0 y A1 son señales diferenciales que alimentan el control del ángulo de acimut, mientras que las señales A2 y A3 son señales diferenciales que alimentan el control del ángulo de elevación.

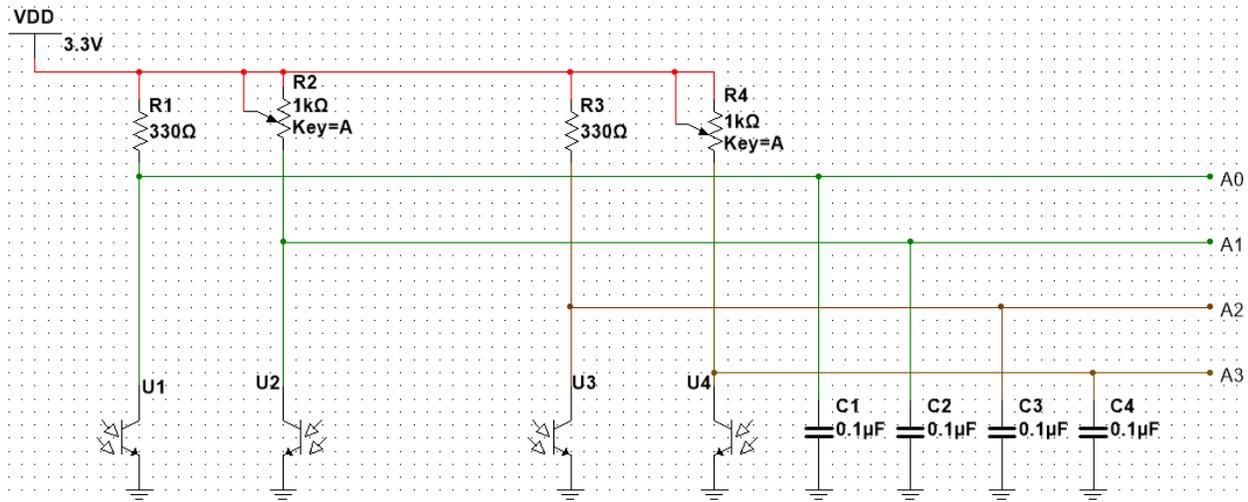


Fig. 21: Diagrama esquemático del arreglo instrumental de fototransistores OP598.

El control de orientación de cada ángulo se lleva a cabo considerando que, las señales que entregan los fototransistores son analógicas y corresponden directamente a la detección energética de radiación electromagnética en el intervalo de 600 nm a 1100 nm.

Para que el sistema pueda llevar a cabo el control de apuntamiento, deben cumplirse dos condiciones. La primera es que la hora actual que reporta el sistema a través del módulo reloj en tiempo real RTC-DS3231, esté dentro de un intervalo en el que se presente radiación solar (típicamente de 7:00 a 20:00 hrs. en verano). La segunda condición que debe cumplirse es que por lo menos 1 fototransistor de los 4 integrados en el arreglo piramidal, reporte un valor de voltaje analógico inferior a un voltaje fijo de referencia de 725 mV. Ambas condiciones son muy importantes para el correcto funcionamiento del sistema, esto debido a que, la primera condición es para que el sistema no trate de orientarse durante la noche, y la segunda condición sirve para que el sistema se oriente únicamente cuando el cielo esté despejado y las nubes no tapen completamente al Sol.

Si ambas condiciones se cumplen, entonces se ejecuta el algoritmo de control de orientación, el cual se describe a continuación. La Figura 22 muestra, el diagrama esquemático del subsistema de control de orientación, el cual se alimenta con las señales diferenciales anteriormente descritas provenientes de los fototransistores. Es importante señalar que el servomotor que se utiliza en el sistema para orientar el ángulo acimutal no se controla como tradicionalmente al modular el ancho de pulso en alto de una señal cuadrada de 50 Hz, esto es, porque se retiró el circuito de control dejando el motor de corriente directa disponible para ser controlado mediante una señal PWM (por sus siglas en inglés: Pulse Width Modulation) cualquiera, al igual que el mecanismo motorreductor que se utiliza para orientar al ángulo de elevación. Se utiliza un microcontrolador de 8 bits de palabra PIC18F27J13 de Microchip, este cuenta con un convertidor analógico-digital

de 12 bits de resolución y genera 2 señales PWM independientes de hasta 10 bits de resolución cada una. Se configuró el timer 1 del microcontrolador para ejecutar el algoritmo de control de orientación con un tiempo de muestreo de 1 ms [47].

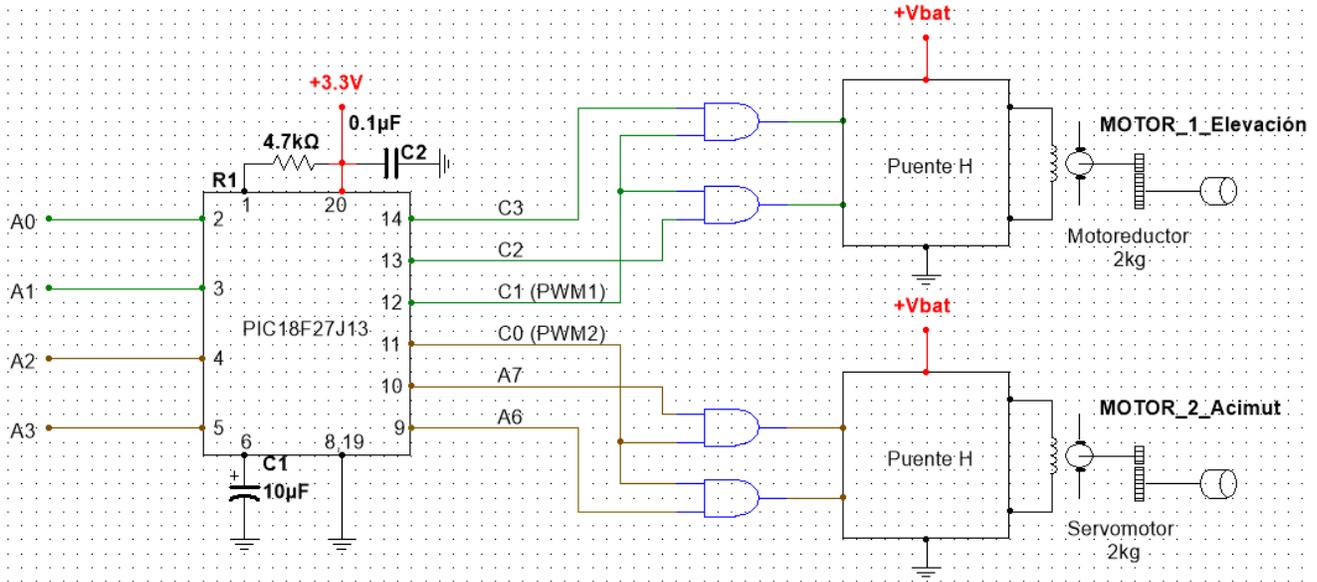


Fig. 22: Diagrama esquemático del sistema de control de orientación.

Para cada control independiente se calcula una tolerancia, la cual, matemáticamente se expresa como el valor absoluto de la diferencia de voltaje entre las dos señales diferenciales (expresiones 15 y 16):

$$tol_1 = |A_0 - A_1| \quad (15)$$

$$tol_2 = |A_2 - A_3| \quad (16)$$

Este valor de tolerancia se compara con un valor de ventana constante de 8 mV (tolerancia aceptable dentro de la zona muerta del control). Mientras más pequeño sea este valor de tolerancia más exacto será el control de apuntamiento, sin embargo, existe un valor mínimo el cual no puede rebasarse, ya que ni las resistencias ni los fototransistores son completamente idénticos. Cada control PI digital se implementó bajo las tres condiciones de operación siguientes, las expresiones 17-21 corresponden al control de orientación del ángulo de elevación donde  $C_2$ ,  $C_3$ , son operadores booleanos:

$$Si \quad A_0 \approx A_1 \quad entonces \quad C_2 = 0 \quad , \quad C_3 = 0 \quad , \quad PWM_1 = 0 \quad (17)$$

*(implica que el sistema de apuntamiento está en la zona muerta del control)*

$$\text{Si } A_0 < A_1 \text{ entonces } C_2 = 1, C_3 = 0, PWM_1 = 0.5 dif_y(n) + 0.25 \sum_{k=-\infty}^n dif_y(n) \quad (18)$$

$$\text{con } dif_y(n) = A_1(n) - A_0(n) \text{ y } n = \text{número de muestra} \quad (19)$$

$$\text{Si } A_0 > A_1 \text{ entonces } C_2 = 0, C_3 = 1, PWM_1 = 0.5 dif_y(n) + 0.25 \sum_{k=-\infty}^n dif_y(n) \quad (20)$$

$$\text{con } dif_y(n) = A_0(n) - A_1(n) \text{ y } n = \text{número de muestra} \quad (21)$$

El control de orientación PI digital para el ángulo de acimut se implementó exactamente igual bajo las 3 condiciones anteriormente descritas, las expresiones 22-26 corresponden al control de orientación del ángulo de acimut donde  $A_6$  y  $A_7$  son operadores booleanos:

$$\text{Si } A_2 \approx A_3 \text{ entonces } A_6 = 0, A_7 = 0, PWM_2 = 0 \quad (22)$$

*(implica que el sistema de apuntamiento está en la zona muerta del control)*

$$\text{Si } A_2 < A_3 \text{ entonces } A_6 = 1, A_7 = 0, PWM_2 = 0.1 dif_x(n) + 0.01 \sum_{k=-\infty}^n dif_x(n) \quad (23)$$

$$\text{con } dif_x(n) = A_3(n) - A_2(n) \text{ y } n = \text{número de muestra} \quad (24)$$

$$\text{Si } A_2 > A_3 \text{ entonces } A_6 = 0, A_7 = 1, PWM_2 = 0.1 dif_x(n) + 0.01 \sum_{k=-\infty}^n dif_x(n) \quad (25)$$

$$\text{con } dif_x(n) = A_2(n) - A_3(n) \text{ y } n = \text{número de muestra} \quad (26)$$

El método que se utilizó para sintonizar los controles anteriores fue el método de Ziegler-Nichols, el cual permite obtener las constantes proporcional, integral y derivativa a partir de la respuesta del sistema ante una entrada escalón en lazo abierto. Los valores propuestos por este método intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobrepulso máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas. Se realizó un ajuste holístico de las ganancias.

Las compuertas lógicas tipo AND necesarias para llevar a cabo el control de orientación que se muestran en el diagrama esquemático de la Figura 23 corresponde con un chip de 4 compuertas 74LS08, el cual trabaja con un voltaje de 5 V. Los circuitos tipo puente H que se muestran en el diagrama esquemático de la misma figura, se construyeron a partir de elementos discretos, transistores y diodos, esto debido al relativo bajo voltaje al que opera la batería y que los puentes H comerciales tienen un voltaje de saturación muy alto. El diagrama esquemático de un puente H construido a partir de elementos discretos se muestra en la Figura 24, este tiene la ventaja de poder controlar una corriente más alta que los puentes H tradicionales en circuitos integrados, y tiene un voltaje de saturación mínimo menor o igual a 0.6 V.

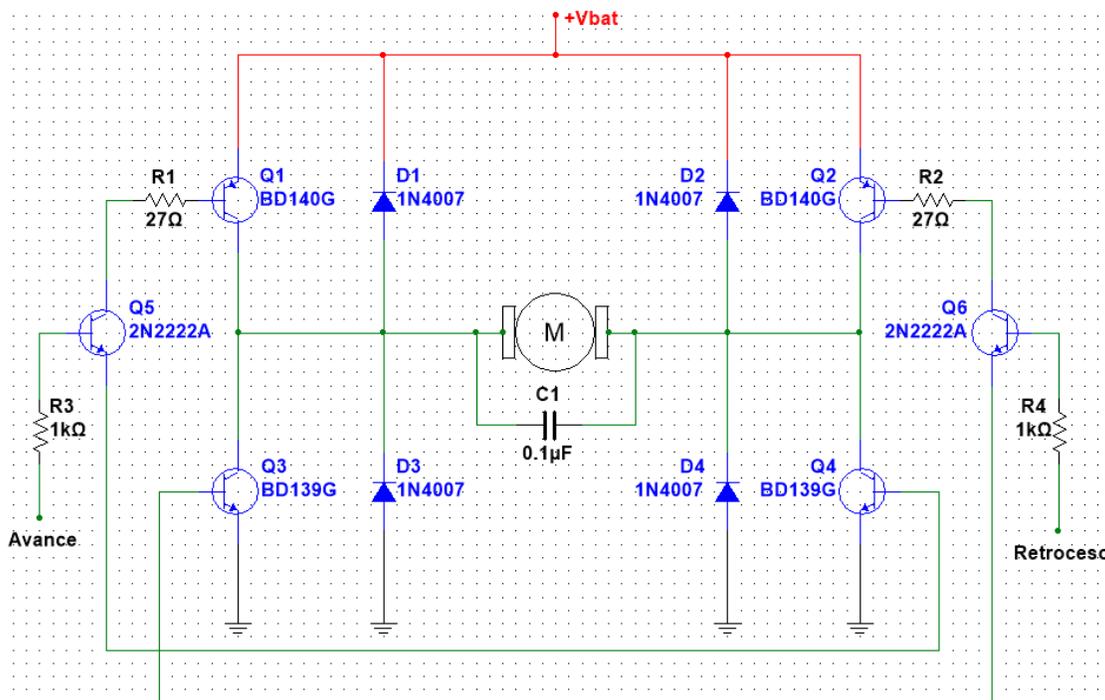


Fig. 23: Diagrama esquemático de un puente H diseñado a partir de elementos discretos para controlar el sentido de giro y la potencia suministrada a un motor de corriente directa.

Una vez que el día ha terminado y el sol se ha ocultado por completo, exactamente a las 21:00 hrs., el sistema ejecuta el algoritmo de retorno a puesta inicial, esto es, con el objetivo de que al día siguiente cuando amanezca y se ejecute por primera vez en el día a las 7:00 hrs. El algoritmo de orientación, el sistema pueda orientarse correctamente. Básicamente, el algoritmo de retorno a puesta inicial consiste en, rotar el mecanismo  $-180^\circ$  del ángulo de acimut para que el sistema pueda quedar mirando nuevamente hacia el este para comenzar a orientarse hacia el sol nuevamente al día siguiente.

#### 5.4. Subsistema de medición y envío de datos

Luego de realizar una investigación previa de sensores de radiación ultravioleta de bajo costo, se propone utilizar sensores tipo fotodiodos, fabricados a partir de un material semiconductor hecho de nitruro de galio y aluminio, el cual, al ser irradiado con radiación electromagnética con longitud de onda entre 220 a 370 nm (sensor UV-A), 220 a 320 nm (sensor UV-B) y 220 a 280 nm (sensor UV-C). Estos fotodiodos generan una pequeña corriente en el orden de los nano amperes que es directamente proporcional a la irradiancia total en el intervalo de longitud de onda en el cual operan. El intervalo de temperatura de operación del sensor es de  $-30$  a  $85^\circ\text{C}$  [48].

La Figura 24, muestra un ejemplo de cómo es físicamente cada sensor, así como algunas de sus características principales y aplicaciones.

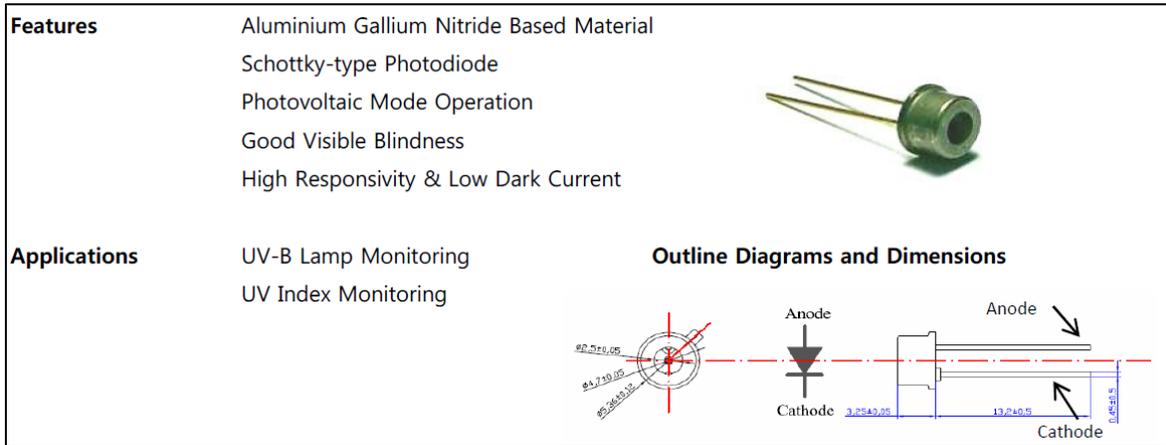


Fig. 24: Sensor tipo fotodiodo de radiación UV [48].

Las Figuras 25-27 muestran el intervalo de distribución en longitud de onda de operación de cada sensor y la alta linealidad de sus respuestas.

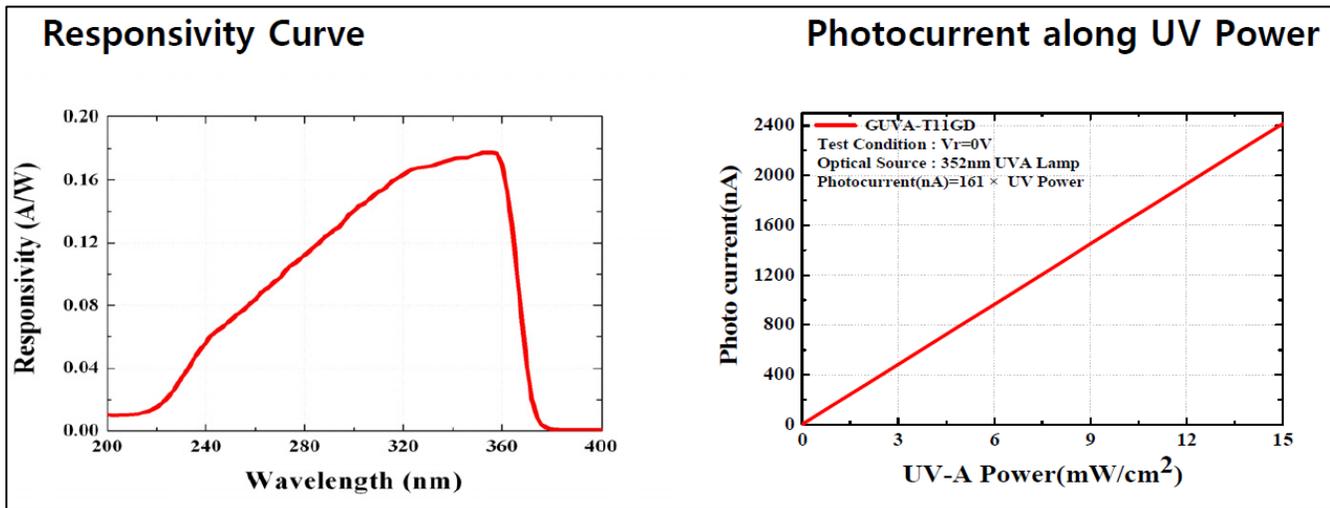


Fig. 25: Distribución en longitud de onda y respuesta lineal del sensor GUA-T11GD [48].

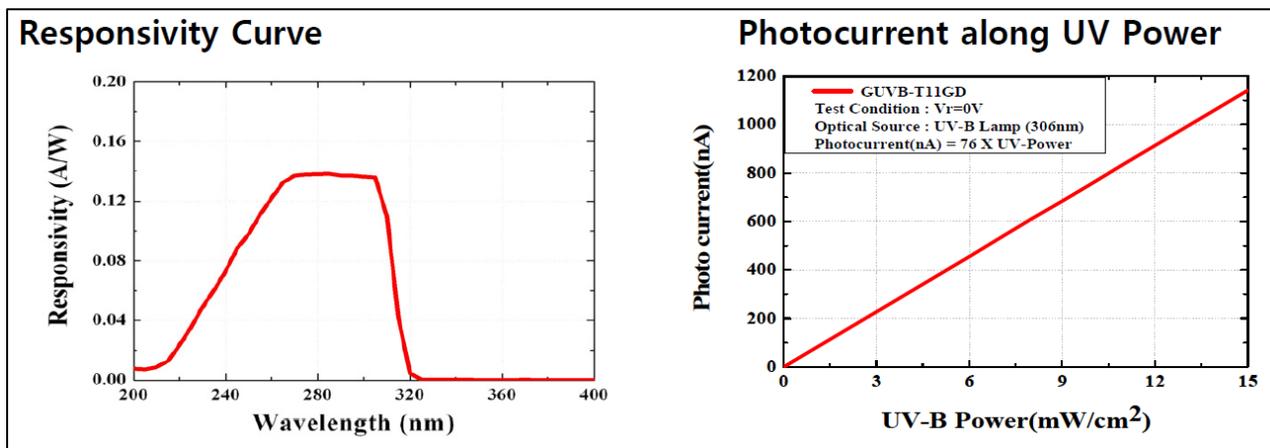


Fig. 26: Distribución en longitud de onda y respuesta lineal del sensor GUVB-T11GD [48].

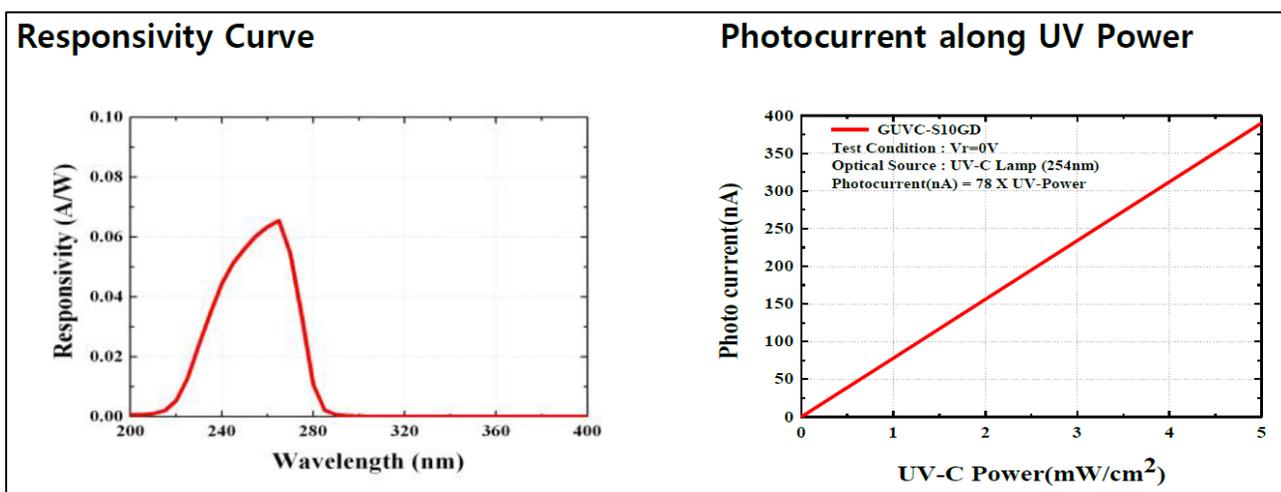


Fig. 27: Distribución en longitud de onda y respuesta lineal del sensor GUVB-T10GD [48].

Las hojas de datos de los sensores no especifican la respuesta angular de cada sensor, es decir la respuesta ante diferentes ángulos de incidencia de la radiación, sin embargo, se obtuvieron experimentalmente las curvas de desplazamiento angular para cada sensor. La Figura 28 muestra, las curvas de desplazamiento angular para el sensor de UV-A, UV-B y UV-C respectivamente. Estas curvas se obtuvieron a mediodía solar en un día despejado y variando el ángulo de incidencia.

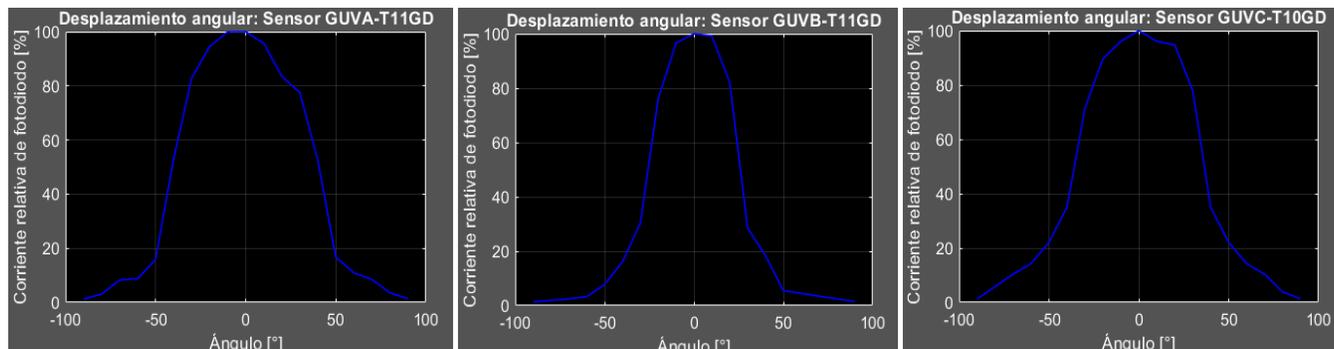


Fig. 28: Desplazamiento angular: GUA-T11GD, GUVB-T11GD, GUVB-T10GD.

Para poder medir la fotocorriente de cada sensor, que es directamente proporcional al valor de irradiancia en  $\text{mW}/\text{cm}^2$  en el intervalo de longitud de onda en que cada sensor opera, es necesario utilizar un amplificador de transconductancia, es decir, que convierte una señal de corriente eléctrica a una señal de voltaje. La Figura 29 muestra el arreglo instrumental diseñado para esta tarea, se utiliza el amplificador de bajo voltaje NCS2003, el cual es un amplificador de bajo voltaje cuya salida puede ir de VSS a VDD (rail to rail output), además, tiene una corriente de bias de  $1 \text{ pA}$  y muy bajo nivel de offset debido a la temperatura (máx.  $6 \text{ uV}/^\circ\text{C}$ ) [49].

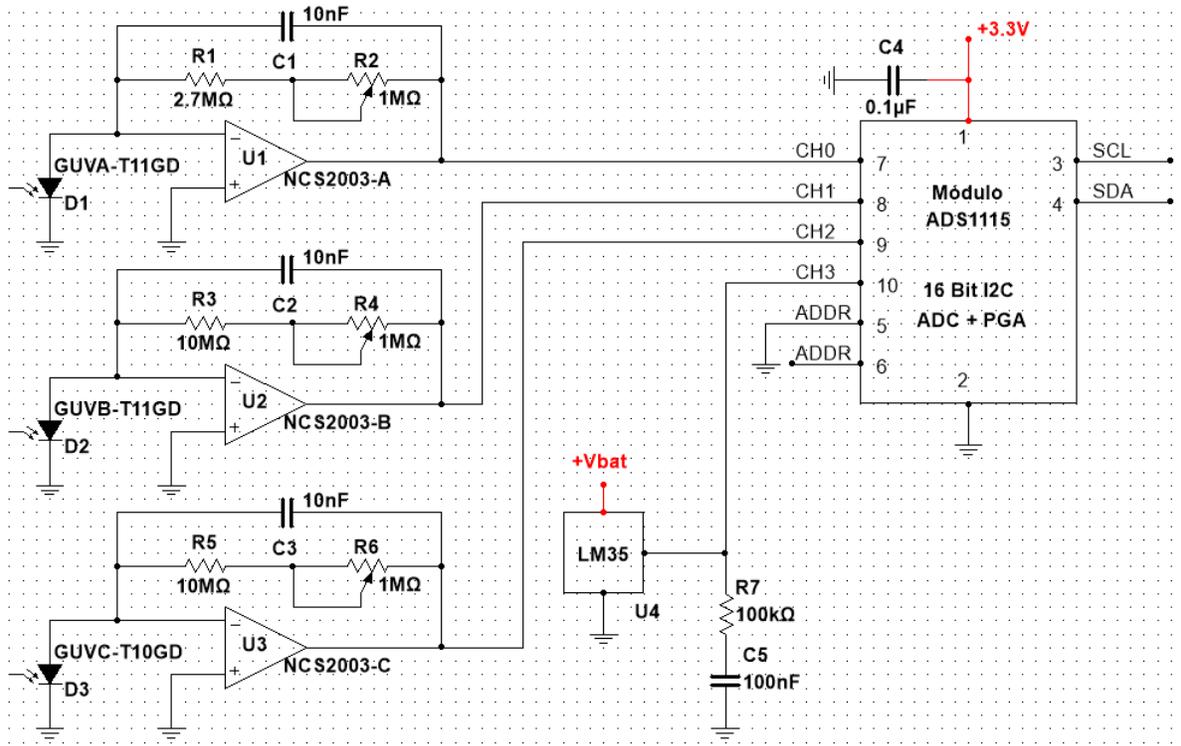


Fig. 29: Subsistema de medición: acondicionamiento y adquisición de señales.

Se utilizó el convertidor analógico/digital ADS1115 por comunicación I2C, el cual tiene una resolución de 16 bits (de los cuales el bit más significativo se utiliza para definir el signo de la muestra por lo que, en la práctica, las mediciones tienen una resolución de 15 bits). Cuenta además con un amplificador de ganancia programable (PGA por sus siglas en inglés), este ayuda para poder mejorar aún más la resolución ya que da un intervalo dinámico para el voltaje de entrada de las señales que puede ir desde  $0 \text{ V}$  hasta  $256 \text{ mV}$ ,  $512 \text{ mV}$ ,  $1024 \text{ mV}$ ,  $2048 \text{ mV}$ ,  $4096 \text{ mV}$  y  $6144 \text{ mV}$  [50].

El microcontrador PIC18F27J13 se comunica con el ADS1115 por medio del protocolo I2C. Recibe las mediciones de los 4 canales del ADC en tramas de 8 bits (1 byte) cada una, primero se recibe la parte más significativa de la medición y después la menos significativa. Inmediatamente después de recibir los 2 bytes que componen a cada muestra de cada canal, el microcontrolador las envía por protocolo serial UART a través del módulo de radiofrecuencia HC-12. Este módulo opera a una frecuencia de  $433 \text{ MHz}$  y con una tasa de transferencia configurada de  $9600 \text{ baudios}$  [51]. La Figura 30, muestra el diagrama esquemático de este circuito de comunicación inalámbrica.

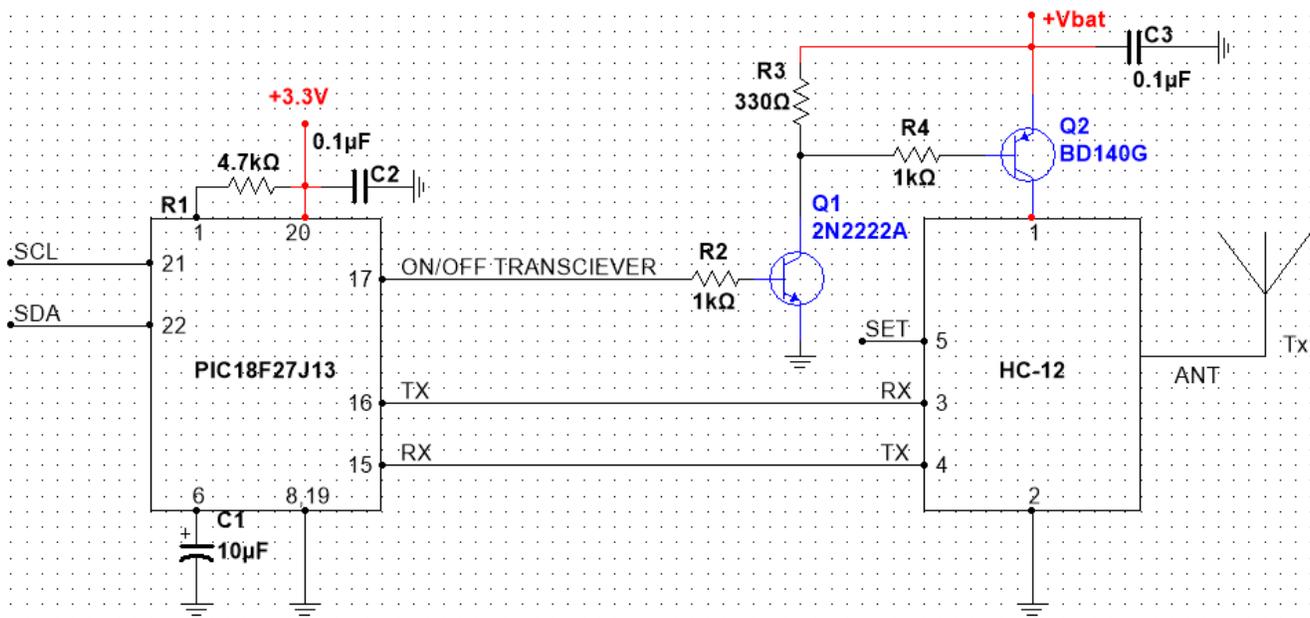


Fig. 30: Comunicación inalámbrica a través del módulo HC-12 @ 433 MHz.

Debido a las características del radiómetro UV, este será instalado en la azotea de un edificio donde se llevarán a cabo las mediciones, debido a que la mayoría de los módulos comerciales son bluetooth o wifi y se atenúa su señal a los pocos metros, se utilizó el módulo comercial HC-12, el cual puede transmitir hasta 1 km de radio a una velocidad de transferencia de 9600 baudios [51]. Este módulo opera a una frecuencia portadora de 433 MHz, la cual se encuentra dentro una banda civil que no interfiere con otras bandas destinadas a otros propósitos de acuerdo con el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF).

El Instituto Federal de Telecomunicaciones a través de la Dirección General de Planeación del Espectro, adscrita a la Unidad de Espectro Radioeléctrico, elabora y mantiene actualizado el CNAF, con la finalidad de llevar a cabo la adecuada planeación, administración y control del espectro radioeléctrico en nuestro país. El CNAF es la disposición administrativa que indica el servicio o servicios de radiocomunicaciones a los que se encuentra atribuida una determinada banda de frecuencias del espectro radioeléctrico; además, proporciona información adicional sobre el uso y planificación de determinadas bandas de frecuencias (Fig. 31) [52].

CUADRO NACIONAL DE ATRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

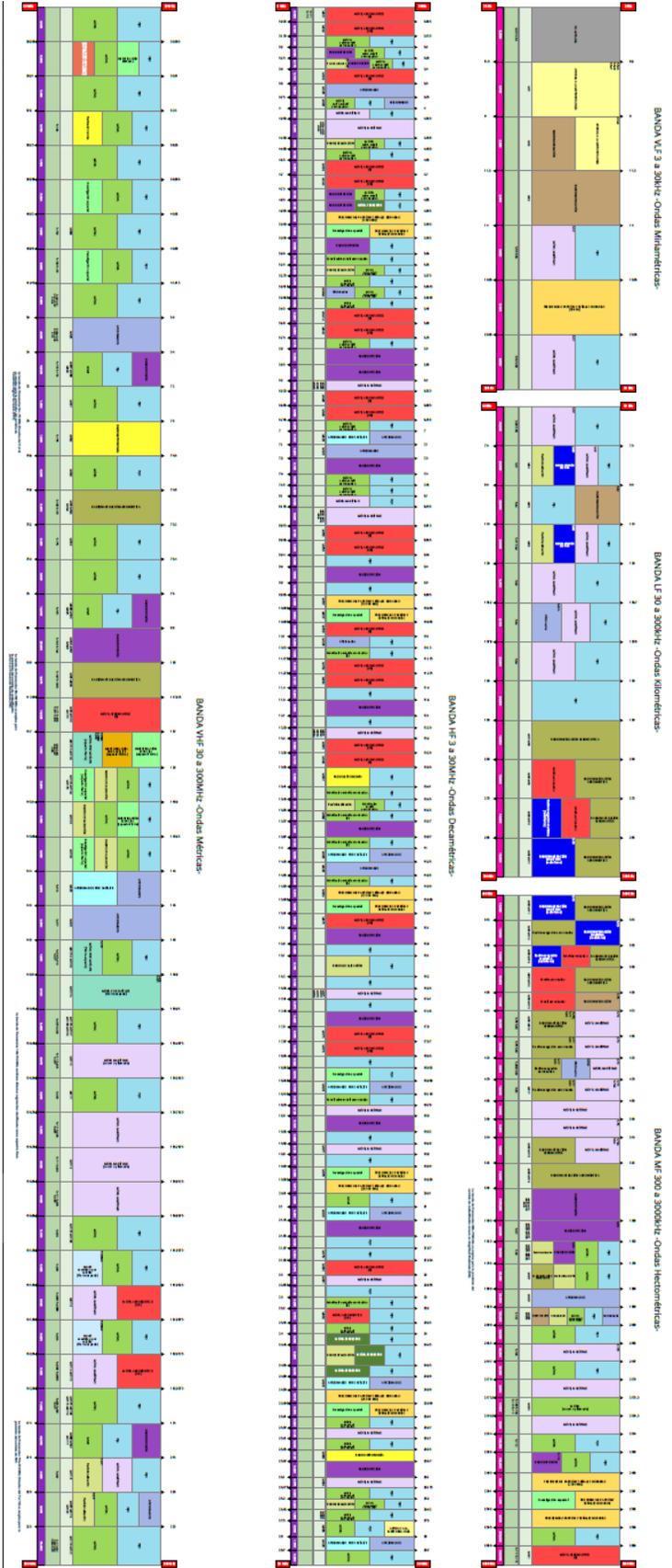
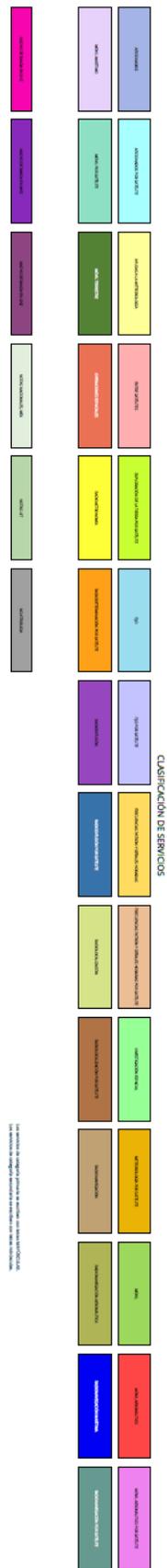


Fig. 31: Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias CNAF, IFT [52].

El módulo HC-12 utiliza la banda de UHF de entre 300 a 1000 MHz conocida como ondas decimétricas y se seleccionó una portadora cuya frecuencia central está en 433 MHz debido a que es banda libre, y no interfiere con otras frecuencias destinadas a usos específicos (Fig. 32).

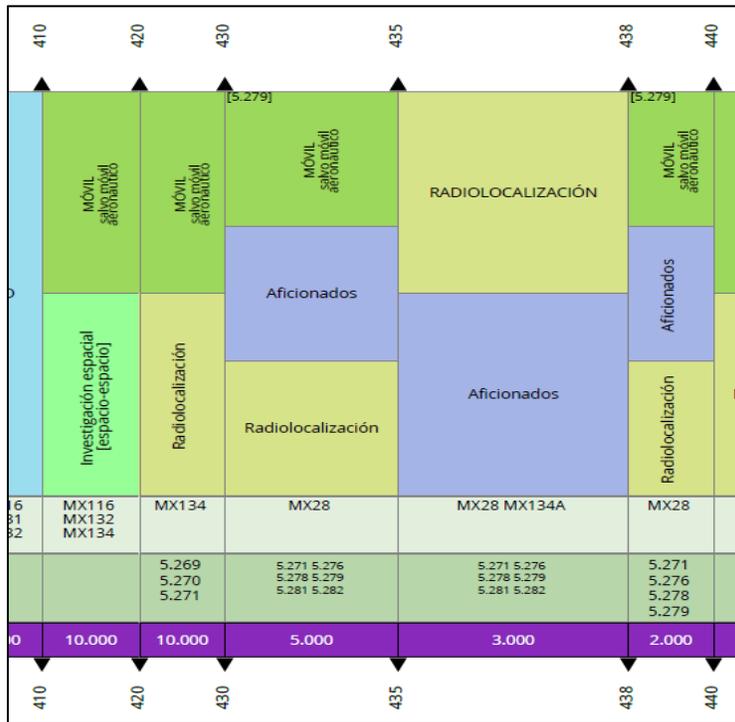


Fig. 32: Frecuencia de la portadora en 433 MHz [52].

Se diseñó una antena tipo monopolo, cuyo patrón de radiación es omnidireccional a partir del plano de tierra (Fig. 33), y cuya longitud es igual a  $\frac{1}{4}$  parte de la longitud de onda a la frecuencia a la que se está trabajando, por lo tanto, si se está trabajando a una frecuencia de 433 MHz, la longitud de onda resultante es de 69.236 cm y la longitud de la antena monopolo debe de ser por lo tanto de 17.3 cm.

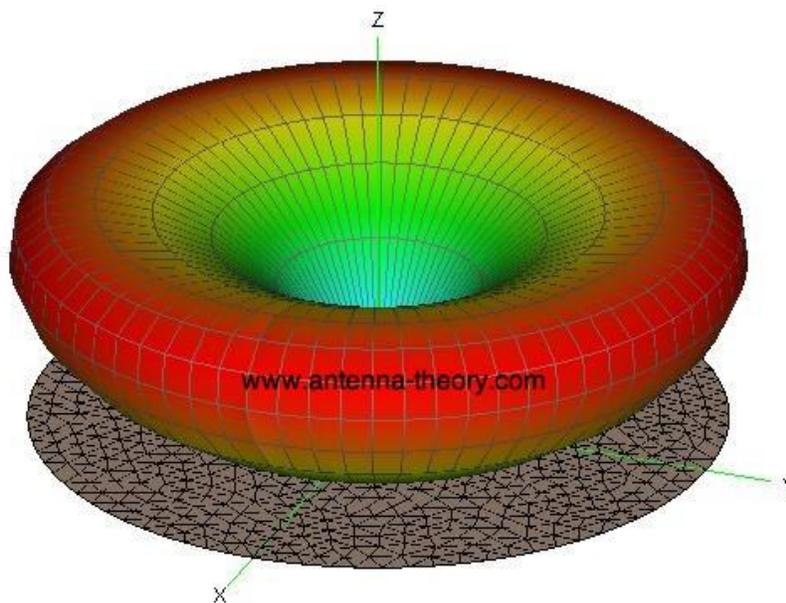


Fig. 33: Patrón de radiación de una antena monopolo [53].

Para enviar una medición de 16 bits, el microcontrolador PIC18F27J13 escribe primero en el puerto serial la dirección 0x01 (comando que indica que se está a punto de iniciar el envío de una medición, “comando de inicio”), seguidamente, escribe en el puerto la dirección 0x0A si se va a enviar la medición de UV-A, 0x0B si se va a enviar la medición de UV-B, 0x0C si se va a enviar la medición de UV-C o 0x0D si se va a enviar la medición de la temperatura (a este comando se le llamó de identificación de la variable que se está transmitiendo).

Luego de enviar el comando de inicio de transmisión y el comando de identificación, el microcontrolador escribe de forma secuenciada en el puerto serial la parte más significativa de la medición y después la parte menos significativa de la medición de la variable correspondiente. Este mismo procedimiento se realiza para enviar las 4 variables medidas de forma serial por el puerto UART y a través del módulo de comunicación RF HC-12.

Este algoritmo de envío y recepción de datos fue desarrollado de manera específica para este instrumento. El subsistema de recepción y despliegue de datos se programó para acoplarse, interpretar, recibir y grabar las mediciones correspondientes.

### 5.5. Subsistema de reloj en tiempo real

Debido a la necesidad de llevar un registro de las mediciones de radiación de forma precisa en el tiempo, es decir un tiempo de muestreo constante y consistente con la variable física que se está midiendo, se utilizará un módulo de reloj en tiempo real DS3231, el cual es un reloj de alta precisión y se comunica mediante protocolo I2C, para que el sistema pueda efectuar las mediciones y enviarlas de forma serial cada cierto intervalo de muestreo dado, en este caso cada minuto. El módulo reloj se presenta en la Figura 34. Este módulo cuenta con una batería de litio tipo botón de 3V de respaldo.



Fig. 34: Módulo reloj de tiempo real con comunicación I2C DS3231 [54].

El diagrama esquemático de este subsistema se presenta en la Figura 35, en donde el microcontrolador PIC18F27J13 se comunica por protocolo I<sup>2</sup>C con el módulo RTC DS3231, además, se utilizó temporalmente una pantalla OLED de 64x120 píxeles I<sup>2</sup>C SSD1306 solamente para poder programar el módulo DS3231 con una hora y fechas iniciales y verificar su correcto funcionamiento, después de programar el sistema con la fecha y hora sincronizadas a las actuales se desconectó la pantalla. De esta manera es como el sistema sabe la hora actual, cada que la variable de minutos es igual a 0 el sistema debe ejecutar el algoritmo de control de orientación y después el algoritmo de medición y envío de datos. A las 21:00 hrs se ejecuta el algoritmo de retorno a puesta inicial que permite que el sistema regrese a su posición inicial luego de haber seguido la trayectoria solar durante todo el día.

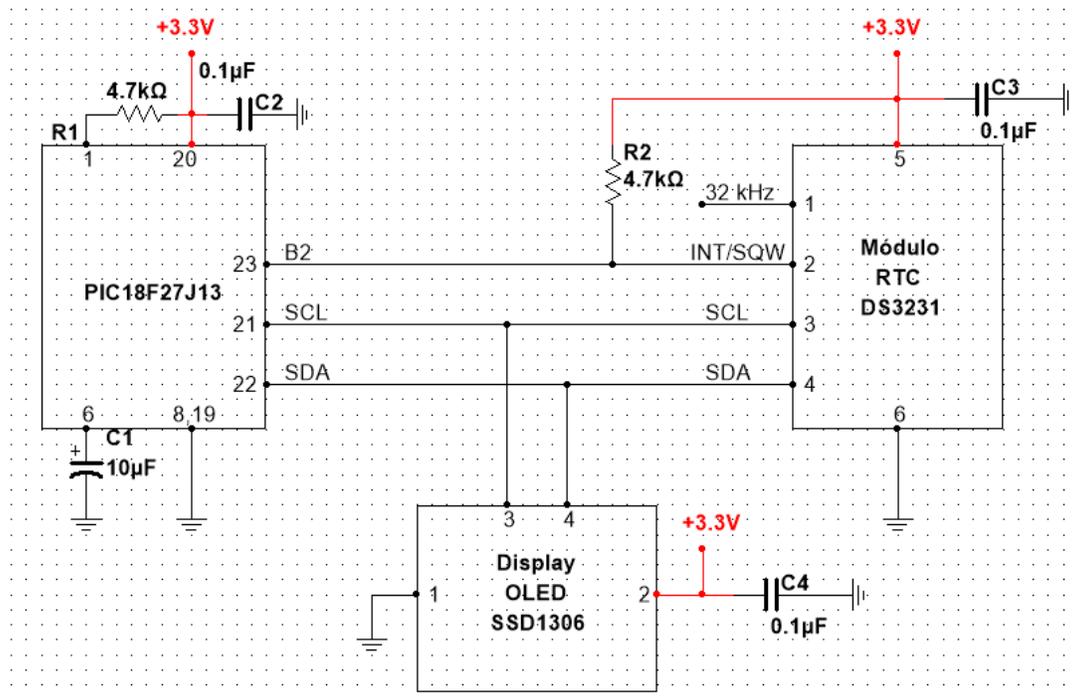


Fig. 35: Diagrama esquemático del subsistema de reloj en tiempo real.

## 5.6. Subsistema de recepción, despliegue y registro de datos

Para recibir los datos, se utilizó de igual forma el módulo RF a 433 MHz HC-12, ya que para lograr un enlace entre dos microcontroladores por protocolo UART, es necesario utilizar dos módulos de comunicación idénticos y configurados de igual forma en cuanto a frecuencia de la portadora y baudaje. De igual forma, se utilizó una antena monopolo de 17.3 cm de longitud para el receptor. Además, se utilizó un módulo serial-USB FT232RL para poder enviar los datos de forma serial a la computadora receptora. De esta manera, se ejecuta un programa diseñado en C++, el cual lee e interpreta los datos del puerto serial COM4 para poder registrar y almacenar esta información en un archivo de texto tabulado con extensión txt llamado "mediciones.txt". El diagrama esquemático del subsistema de recepción de datos se muestra en la Figura 36, en donde, se toman la alimentación de 5V desde el propio puerto USB.

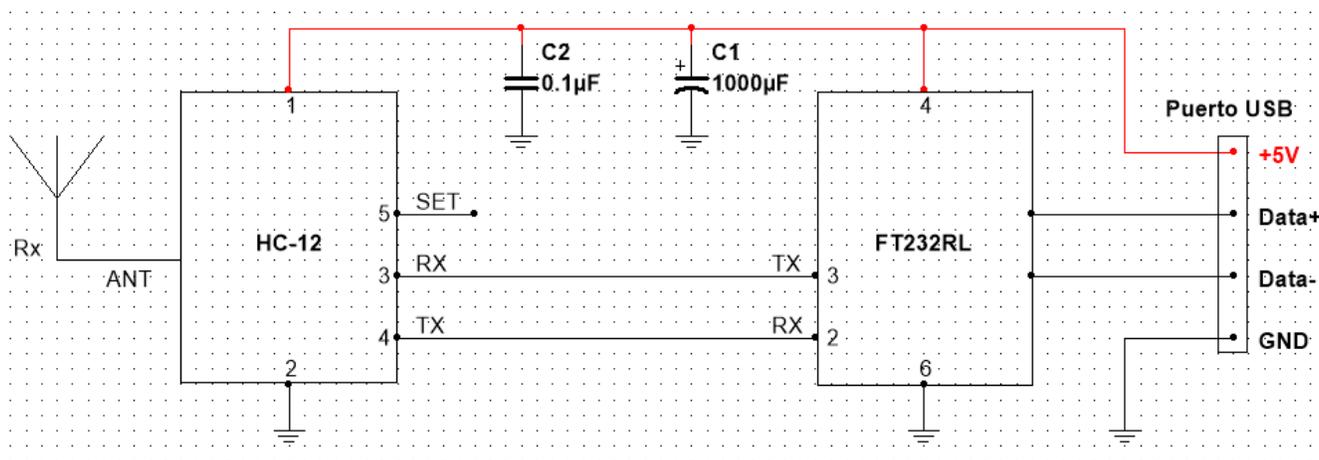
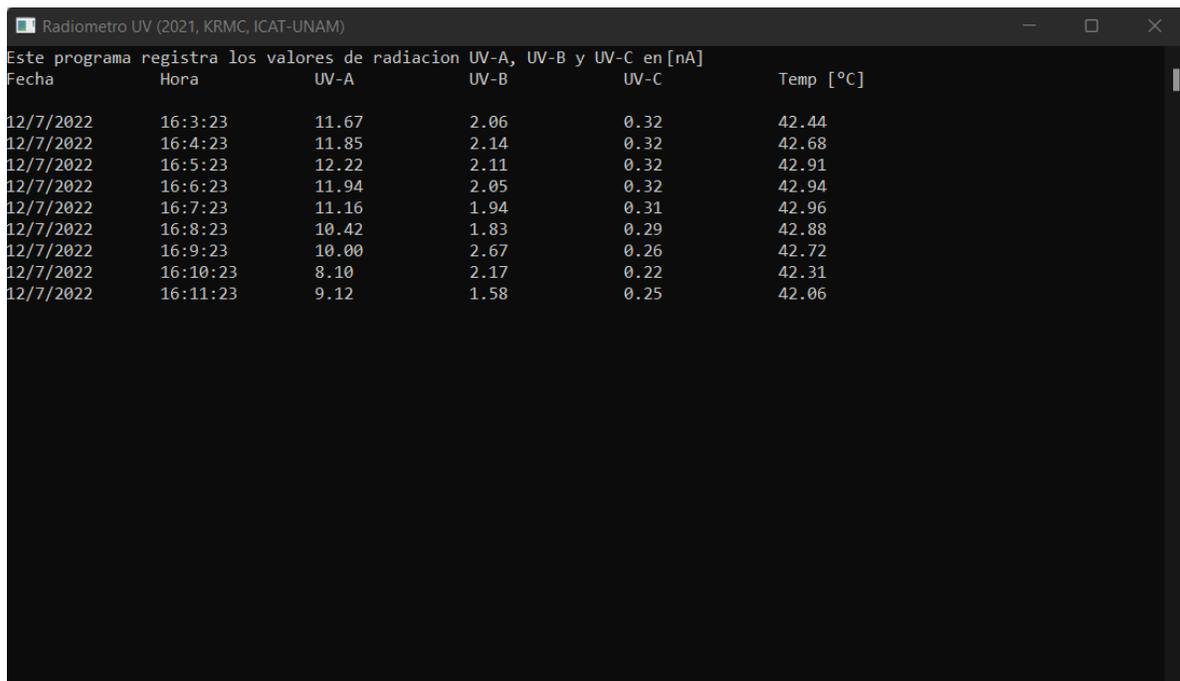


Fig. 36: Recepción serial de datos y convertidor serial-USB.

Un programa desarrollado en lenguaje C++ llamado “receptor\_de\_datos.exe” se ejecuta continuamente en la computadora que emula la función de un servidor. Este programa se encarga de configurar el puerto serial COM4 que es el medio por el cual se van a recibir los datos, posteriormente ejecuta en un ciclo infinito las funciones de recepción, registro y despliegue de datos medidos, para ello, lee continuamente lo que llega al puerto serial, si se recibe el valor 0x01 (comando de inicio), significa que se está a punto de recibir el comando de identificación de la variable seguido de la medición de 16 bits, esta se recibe en 2 partes, el byte más significativo y el byte menos significativo, por lo cual, luego de recibir el comando 0x01, si se recibe 0x0A seguido de este significa que se van a recibir las dos partes que componen la medición de UV-A, si se recibe 0x0B entonces se recibe UV-B, si se recibe 0x0C se recibe UV-C y si se recibe 0x0D se recibe la medición de la temperatura a la cual está operando el instrumento.

Cada que se reciben las 4 mediciones correspondientes a 1 muestra, este programa, lee la fecha y la hora actuales del sistema, y despliega en pantalla de forma tabulada la fecha, la hora, el valor de UV-A, UV-B y UV-C en [nA] y el valor de la temperatura del instrumento en [°C] para posteriormente grabar esta información en un archivo de texto tabulado nombrado “mediciones.txt” en el cual, continuamente se están grabando los datos según se van recibiendo.

La Figura 37, muestra una captura de pantalla de cómo funciona este programa en consola, y la Figura 38 muestra cómo se graba la información en un archivo de texto tabulado, esto facilita su ordenamiento y clasificación. Este archivo puede abrirse directamente en Excel o ser importado a Matlab para el análisis de datos correspondiente.



```
Radiometro UV (2021, KRMC, ICAT-UNAM)
Este programa registra los valores de radiacion UV-A, UV-B y UV-C en [nA]
Fecha      Hora      UV-A      UV-B      UV-C      Temp [°C]
12/7/2022  16:3:23  11.67     2.06     0.32     42.44
12/7/2022  16:4:23  11.85     2.14     0.32     42.68
12/7/2022  16:5:23  12.22     2.11     0.32     42.91
12/7/2022  16:6:23  11.94     2.05     0.32     42.94
12/7/2022  16:7:23  11.16     1.94     0.31     42.96
12/7/2022  16:8:23  10.42     1.83     0.29     42.88
12/7/2022  16:9:23  10.00     2.67     0.26     42.72
12/7/2022  16:10:23 8.10     2.17     0.22     42.31
12/7/2022  16:11:23 9.12     1.58     0.25     42.06
```

Fig. 37: Recepción y despliegue de datos en consola.

mediciones.txt: Bloc de notas

Archivo Editar Ver

12/7/2022	16:3:23	11.67	2.06	0.32	42.44
12/7/2022	16:4:23	11.85	2.14	0.32	42.68
12/7/2022	16:5:23	12.22	2.11	0.32	42.91
12/7/2022	16:6:23	11.94	2.05	0.32	42.94
12/7/2022	16:7:23	11.16	1.94	0.31	42.96
12/7/2022	16:8:23	10.42	1.83	0.29	42.88
12/7/2022	16:9:23	10.00	2.67	0.26	42.72
12/7/2022	16:10:23	8.10	2.17	0.22	42.31
12/7/2022	16:11:23	9.12	1.58	0.25	42.06

Ln 1, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Fig. 38: Registro de datos de forma tabulada en un archivo de texto.

## 5.7. Subsistema estructural y térmico

Debido a la exposición continua la radiación solar, se decidió montar la instrumentación electrónica dentro de una caja de acero como la que se muestra en la Figura 39. Las dimensiones de esta son de 12x18x5.5 cm. La expansión volumétrica del metal debida al cambio de la temperatura es de 0.04 cm<sup>3</sup> para un intervalo de temperatura de entre 25 °C a 60°C [55].



Fig. 39: Carcasa metálica de acero de 5.5x12x18 cm.

Sobre la tapa de esta caja metálica se instalaron dos soportes, los cuales sostienen el servomotor que orienta al sistema en el ángulo acimutal y sobre este, se acopló el mecanismo motorreductor que orienta al sistema en el ángulo de elevación tal como se muestra en la Figura 40.

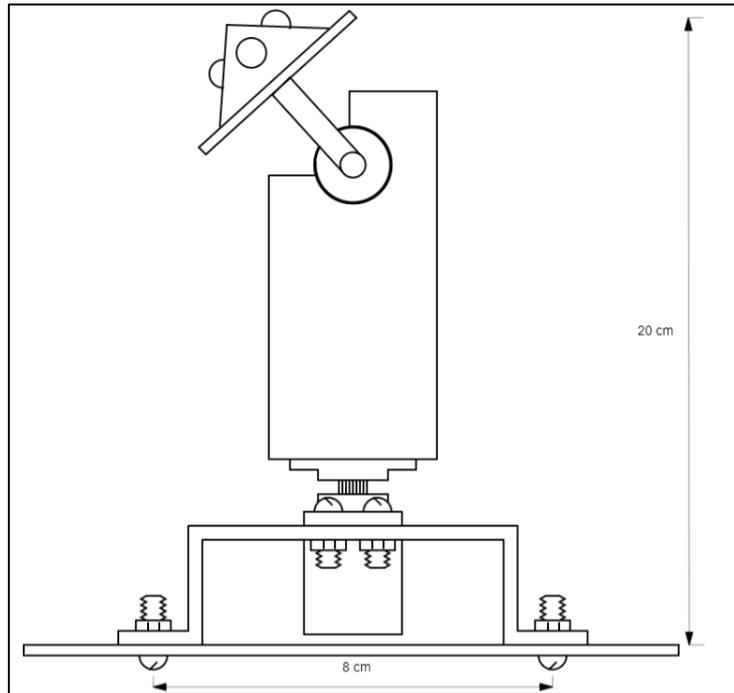


Fig. 40: Estructura principal del prototipo del instrumento.

Con el objetivo de proteger el instrumento de las condiciones climatológicas y meteorológicas, se decidió utilizar un domo. El material más adecuado del cual debería estar constituido este es vidrio pulido para evitar rugosidad en su superficie y con un grosor constante con el objetivo de evitar la refracción de la radiación dentro del mismo. Debido a la cantidad de recursos limitada para este proyecto, y el alcance limitado a un prototipo, se decidió implementar un domo de acrílico en forma de media esfera con un radio de 30 cm con un volumen total de  $56.54 \text{ dm}^3$ . La Figura 41 muestra, la representación del domo en un plano.

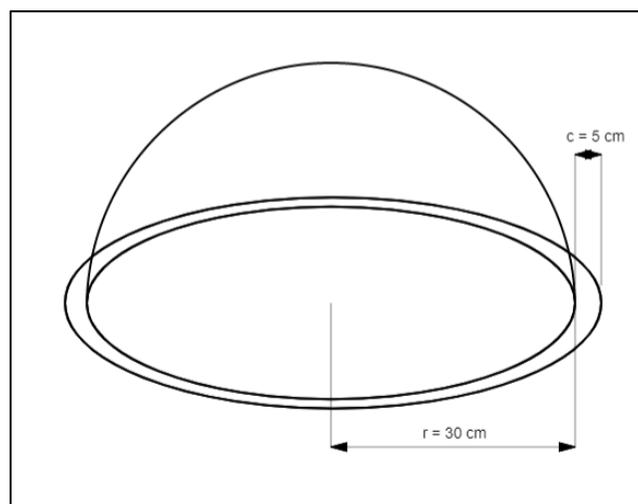


Fig. 41: Estructura principal del domo que protege al instrumento de las condiciones meteorológicas.

Al incidir la radiación electromagnética sobre la superficie del domo, parte de ella es reflejada y otra parte incide en el material, la radiación incidente dentro del domo excita las moléculas de la masa de aire dentro del mismo provocando un incremento en la temperatura conocido como efecto invernadero. El aire más caliente dentro del domo, al ser menos denso tiende a elevarse y concentrarse en la parte superior del mismo, mientras que el aire más frío al ser más denso tiende a concentrarse en la parte inferior del mismo, esto provoca que, durante el día, exista un gradiente de temperatura dentro del domo, es decir, que la temperatura dentro del domo no sea uniforme, y se registre una temperatura mínima en la parte inferior del domo y una temperatura máxima en la parte superior. La Figura 42, muestra el diagrama de convección del calor dentro de la estructura.

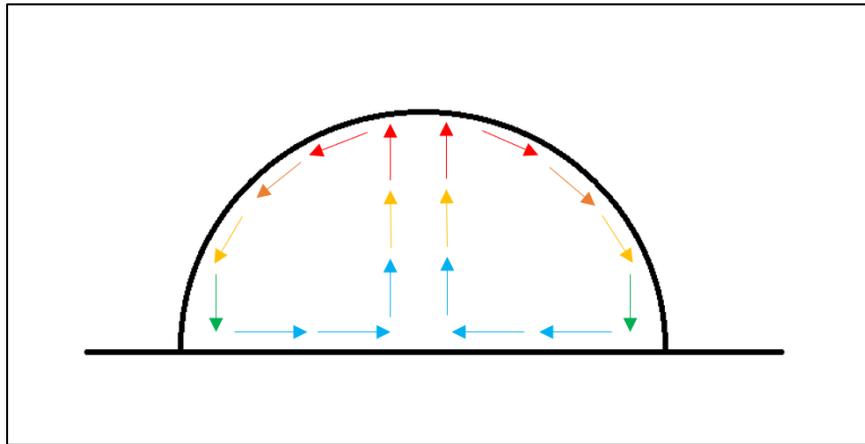


Fig. 42: Convección de calor dentro de un domo.

Debido a la acumulación de calor y, en consecuencia, el incremento de temperatura dentro del domo es evidente la necesidad de un mecanismo para poder enfriar el interior del mismo, ya que, esto puede dañar los componentes electrónicos del instrumento, es importante mantenerlo trabajando en un intervalo de temperatura de entre  $-40$  a  $85$  °C el cual, es el intervalo de temperatura en el cual operan de forma correcta todos los componentes electrónicos que conforman el instrumento. Para este subsistema, se utilizaron 2 ventiladores de 5 V, 200 mA (1W) como el que se muestra en la Figura 43, las dimensiones de cada ventilador son de 10x10x5 cm, son capaces de girar a 4500 rpm y proporcionar un flujo volumétrico de  $43.71$  dm<sup>3</sup>/min.



Fig. 43: Ventilador de 7 aspas (5V, 1W).

Cada ventilador se instaló en la parte inferior del domo y sobre cada uno un tubo de pvc tal como se muestra en la Figura 44, en donde uno se encarga de suministrar aire frío del exterior y el otro se encarga de expulsar el aire caliente de dentro del domo, este arreglo no garantiza erradicar completamente el efecto invernadero dentro del domo, ya que, para lograr mitigar este efecto es necesario que la temperatura del interior del domo se iguale con la temperatura del exterior pero en la práctica siempre va a existir una masa de aire acumulado en la parte superior del domo.

El aire del exterior (evidentemente, a una temperatura menor que la del interior de la estructura durante el día), entra por V1 a un flujo volumétrico de  $43.71 \text{ dm}^3/\text{min}$ , y se deposita en la parte inferior del domo, este aire se calienta y por convección sube para concentrarse en la parte superior del domo, es aquí donde V2 se encarga de expulsar este aire caliente hacia el exterior con el mismo flujo volumétrico con el que entra por V1.

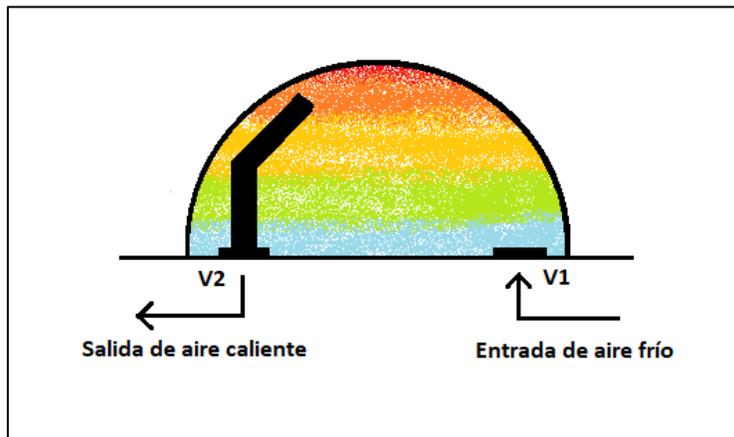


Fig. 44: Ventilación interna de la estructura principal del instrumento.

Una fuente externa de 5 V, 500 mA se encarga de suministrar la energía necesaria para que ambos ventiladores funcionen simultáneamente, estos se encuentran conectados en paralelo a esta fuente. Se independizaron las fuentes del instrumento y la del subsistema de ventilación, debido a que los ventiladores inducen rizo en la fuente que los alimenta y, para que no contaminen con ruido a la señal de voltaje que alimenta al instrumento y pueda afectar las mediciones se decidió que estos trabajen con una fuente independiente. Los ventiladores funcionan únicamente en horas con luz solar debido a que por la noche no es necesario ventilar el interior de la estructura.

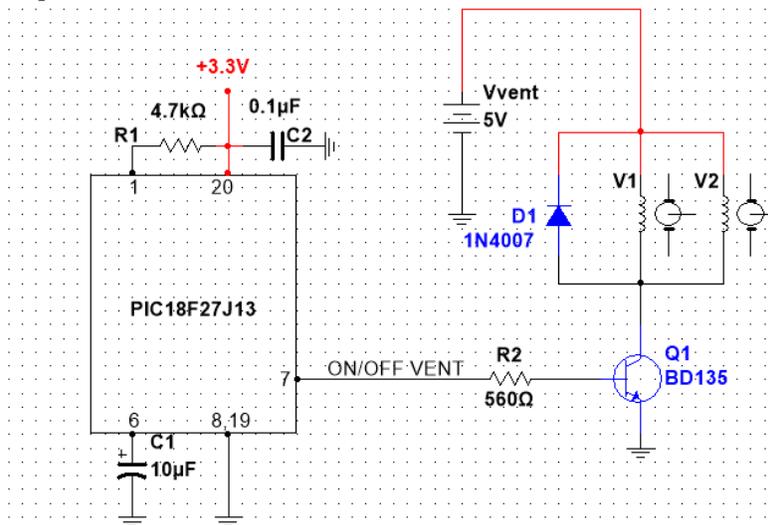


Fig. 45: Diagrama esquemático del subsistema de ventilación.

## 5.8. Integración de subsistemas y componentes, prototipo de radiómetro UV

En este subcapítulo, se documentará todo el proceso de integración de los diseños electrónicos y mecánicos que se realizaron para desarrollar el prototipo final del instrumento.

Se comenzó por la carcasa metálica, en la cual, dentro de ella se instalaron los componentes electrónicos y fuera de ella, los componentes mecánicos; primero se realizó un proceso de varias perforaciones con un taladro de banco, para tener una rendija de ventilación, y 4 hoyos que sujetan los soportes del servomotor, el conector para la antena de transmisión de datos, una junta de goma para poder pasar los cables que comunican con la parte móvil del instrumento, almohadillas de goma en la parte inferior de la caja metálica para sostener el instrumento y los postes dentro de la caja que sujetan las placas de circuito impreso con los componentes electrónicos. Las Figuras 46, 47 y 48 muestran el resultado final de este subproceso.



Fig. 46: Vista posterior de la carcasa metálica del instrumento.



Fig. 47: Vista inferior de la carcasa metálica del instrumento.

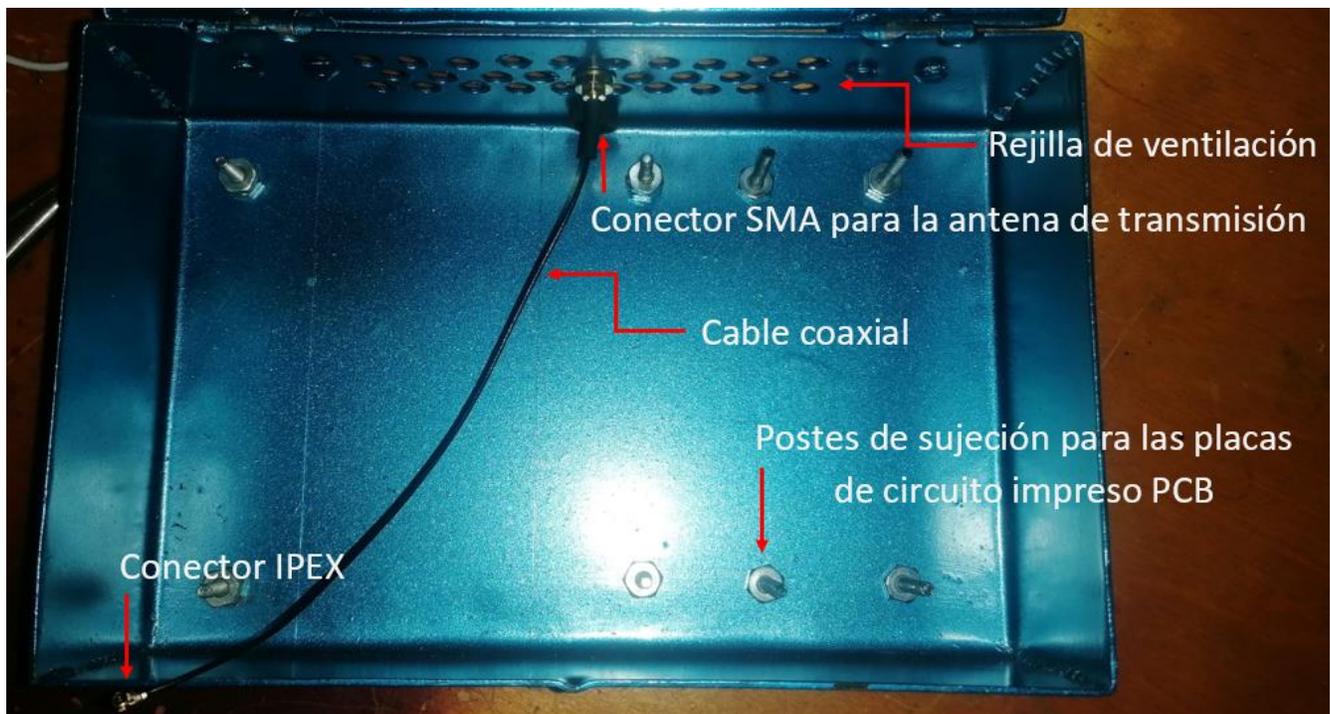


Fig. 48: Vista interior de la carcasa metálica del instrumento.

Se utilizó una antena externa tipo helicoidal de 17.3 cm de longitud total de alambre enrollado. Esta antena funciona exactamente para la frecuencia a la cual opera el módulo de comunicación inalámbrica HC-12 la cual es de 433 MHz. La antena se atornilla al conector SMA que sale por la parte posterior de la caja metálica y el conector IPEX se conecta al módulo HC-12. La Figura 49 muestra la construcción de esta antena.



Fig. 49: Antena monopolo externa de 433 MHz.

Se utilizó una versión de prueba del programa PCB Wizard para diseñar los circuitos PCB donde se colocaron todos los componentes electrónicos; 3 placas principales son las que componen al instrumento, las cuales son la placa de los sensores que se instaló en la parte móvil del instrumento, la placa de instrumentación en donde se encuentra el sistema de acondicionamiento de señales, adquisición y envío de datos así como el módulo de reloj en tiempo real y la placa de la fuente, la cual distribuye la energía a las diferentes partes del instrumento. Las Figuras 50, 51 y 52, muestran los diseños de los circuitos PCB para la parte de sensores, instrumentación, y fuente respectivamente.

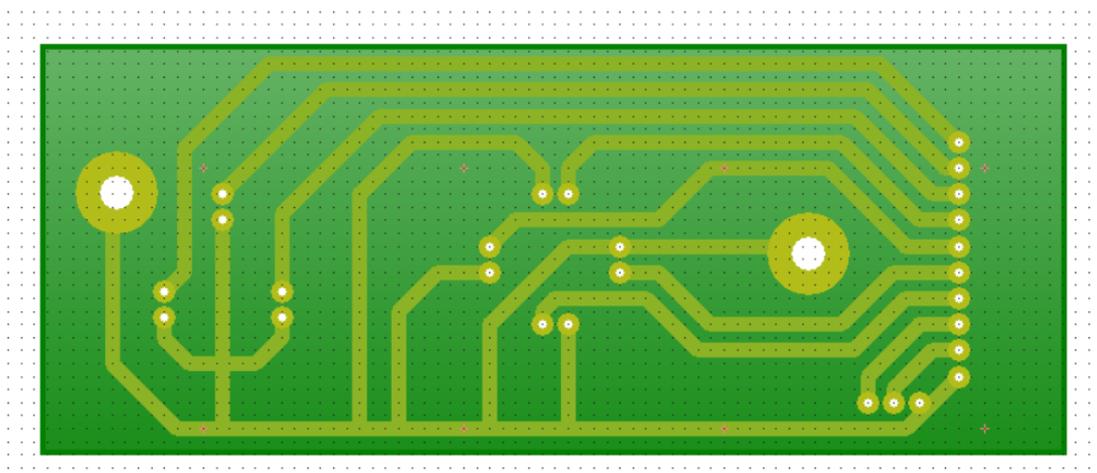


Fig. 50: Placa del circuito de los sensores ópticos, térmico y conector molex de 10 pines. (Dimensiones: 4x10 cm).

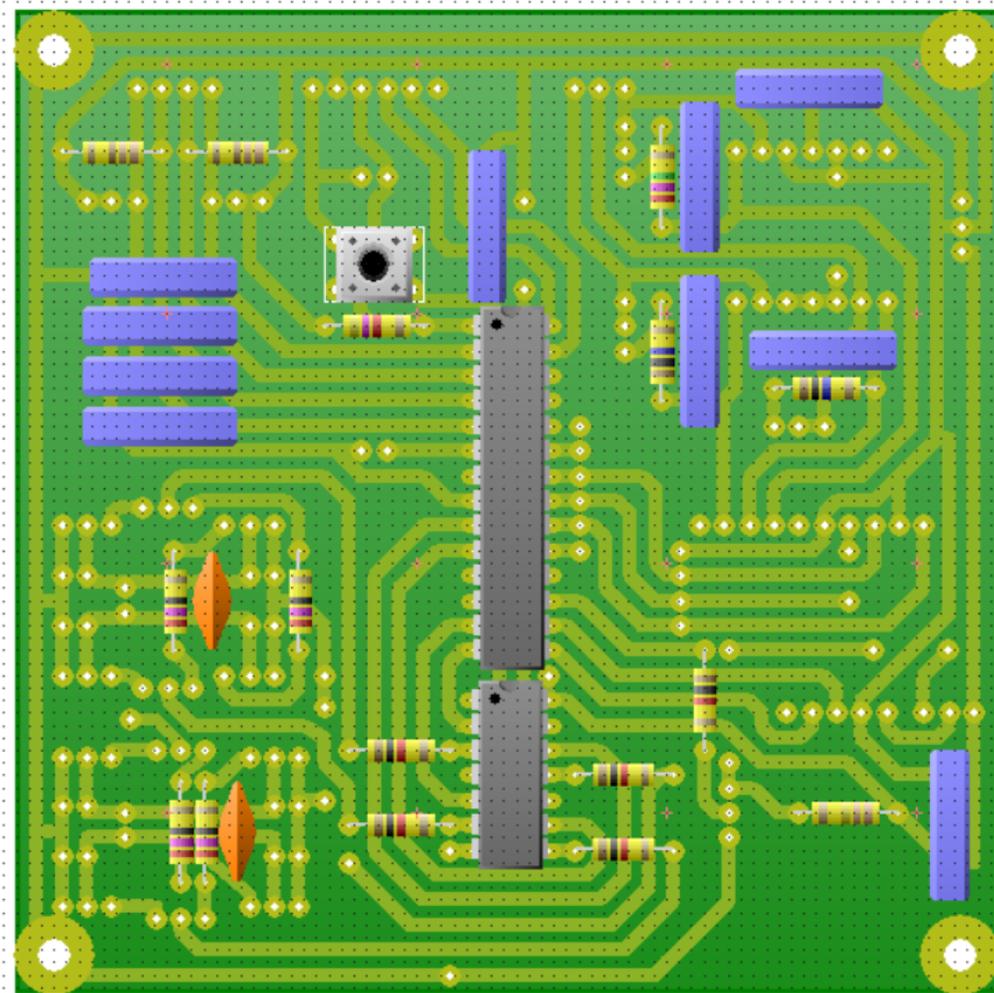


Fig. 51: Placa principal del circuito: Control de apuntamiento, acondicionamiento, adquisición de señales y transmisión de datos. (Dimensiones: 10x10 cm).

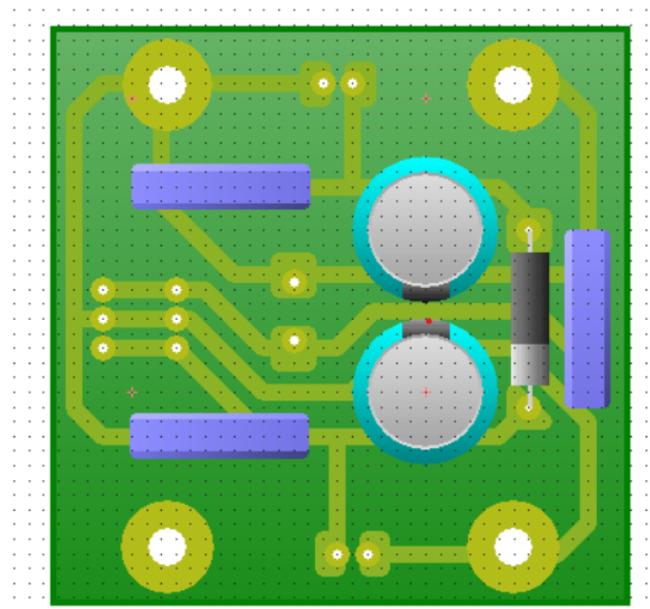


Fig. 52: Placa del circuito de la fuente de alimentación del instrumento. (Dimensiones: 5x5 cm).

Para la fuente fija de 5V, 1A que se encarga de energizar el instrumento continuamente y mantener las pilas cargadas, se diseñó un circuito en una placa de 5x8 cm la cual se muestra en la Figura 53, se utilizaron borneras para conectar el transformador y la clavija y conectores molex para las interconexiones de corriente directa. La fuente lineal de bajo ruido se implementó dentro de una caja de plástico de 10x18x8 cm. Las Figuras 54 y 55 muestran, el proceso de implementación de la fuente.

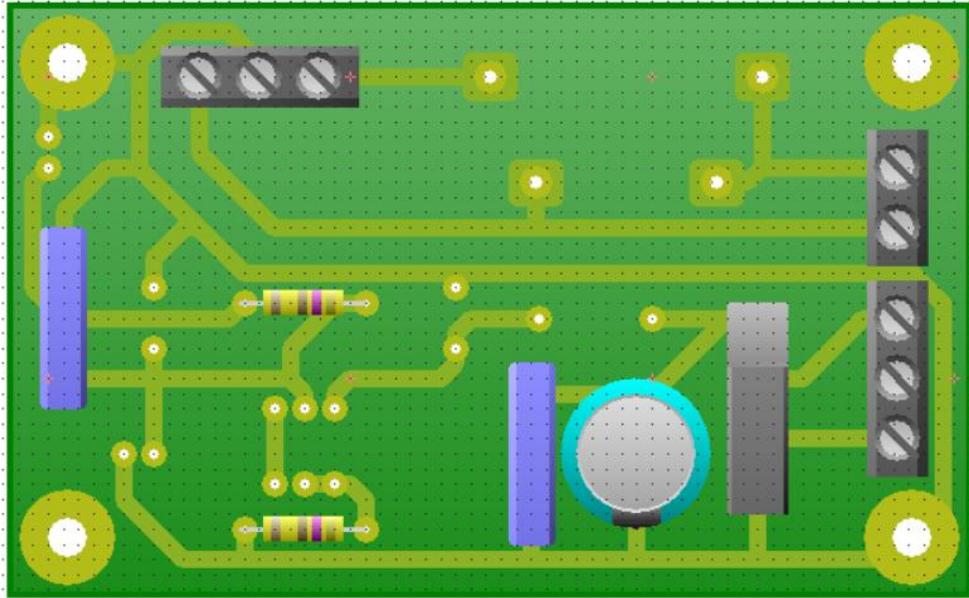


Fig. 53: Placa del circuito de la fuente de alimentación de 5V, 1A. (Dimensiones: 5x8 cm).

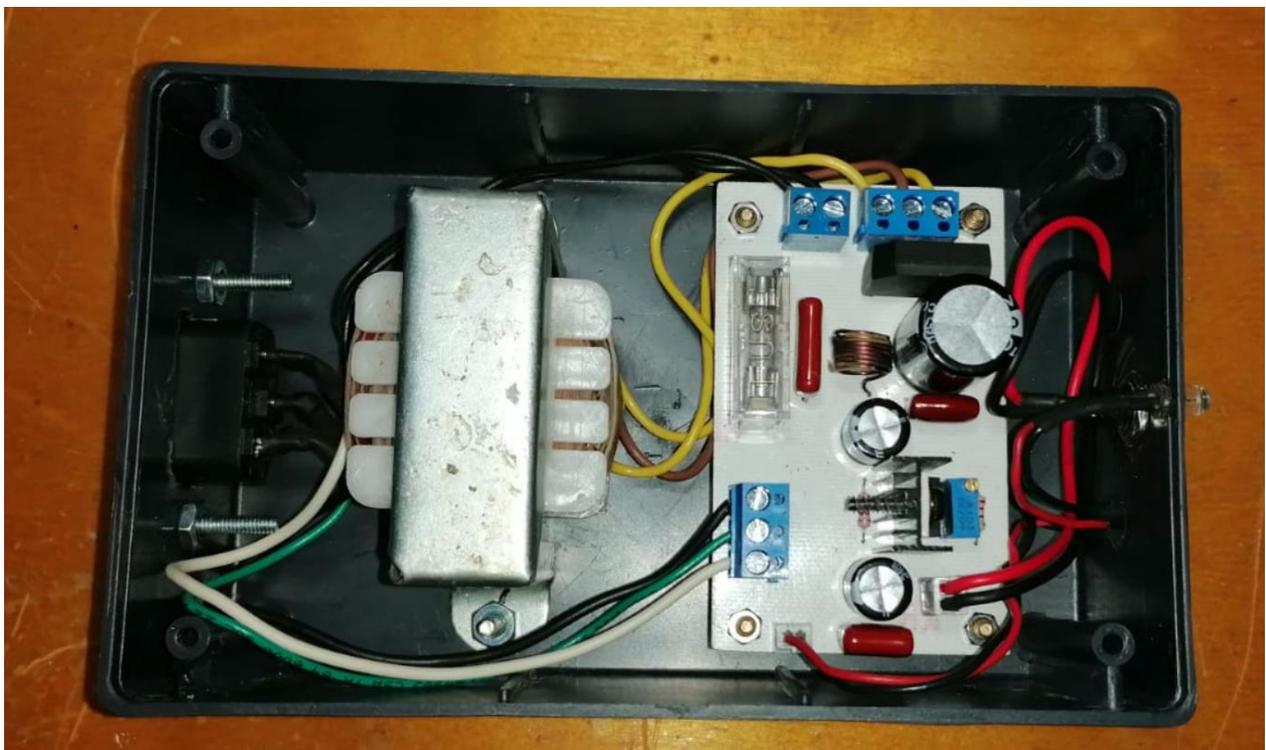


Fig. 54: Integración de componentes de la fuente en carcasa de 10x18x8 cm.



Fig. 55: Fuente lineal de bajo ruido 5V, 1A.

Debido a que el amplificador operacional NCS2003 que se utilizó para implementar los amplificadores de transconductancia en la etapa de acondicionamiento y adquisición de señales viene en un encapsulado de montaje superficial el cual contiene 4 op amps, fue necesario el diseño de un circuito impreso intermedio para poder acoplar las salidas SMD del circuito integrado de 14 pines a Through-Hole, este se diseñó en el programa CIRCAD. La figura 56 muestra este circuito.

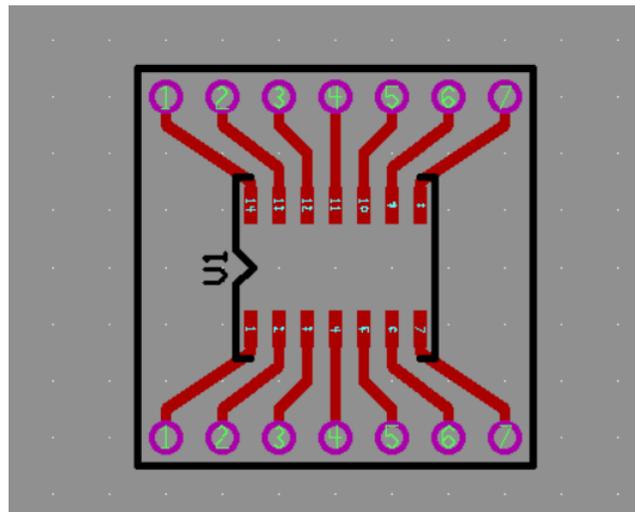


Fig. 56: Adaptador de circuito integrado SMD de 14 pines a Through-Hole. (Dimensiones: 18x18 mm).

La Figura 57 muestra, la integración final de todos los componentes en la placa principal del instrumento mientras que la Figura 58 muestra, una prueba del correcto funcionamiento de esta placa, en la cual se grabó la fecha y la hora en el módulo reloj en tiempo real DS3231 en donde se utilizó una fuente conmutada específica para realizar pruebas de funcionamiento al instrumento y una pantalla OLED de 64x128 píxeles SSD1306 para visualizar la hora y la temperatura del módulo reloj DS3231.

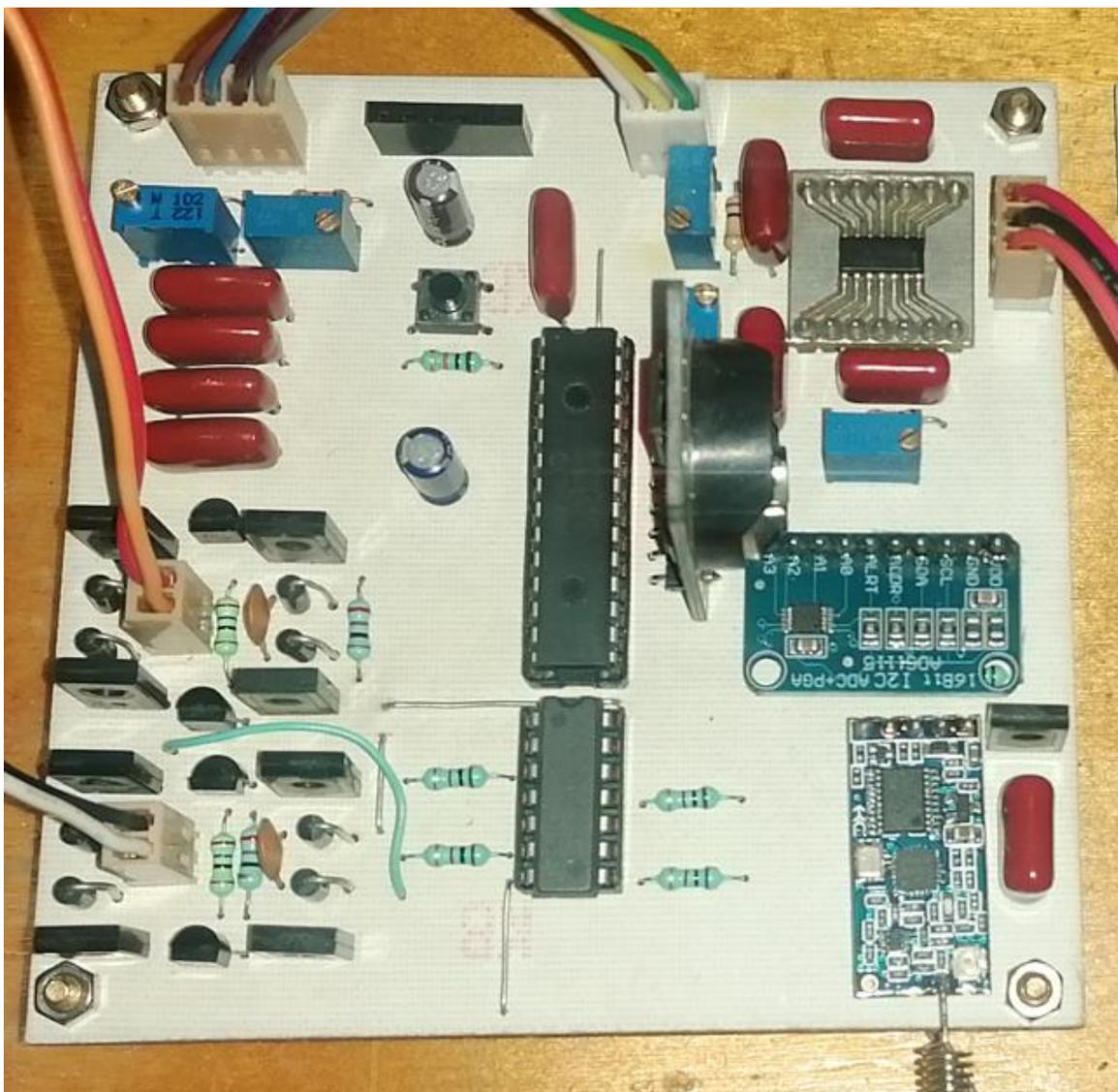


Fig. 57: Integración final de componentes electrónicos en la tarjeta principal del instrumento.

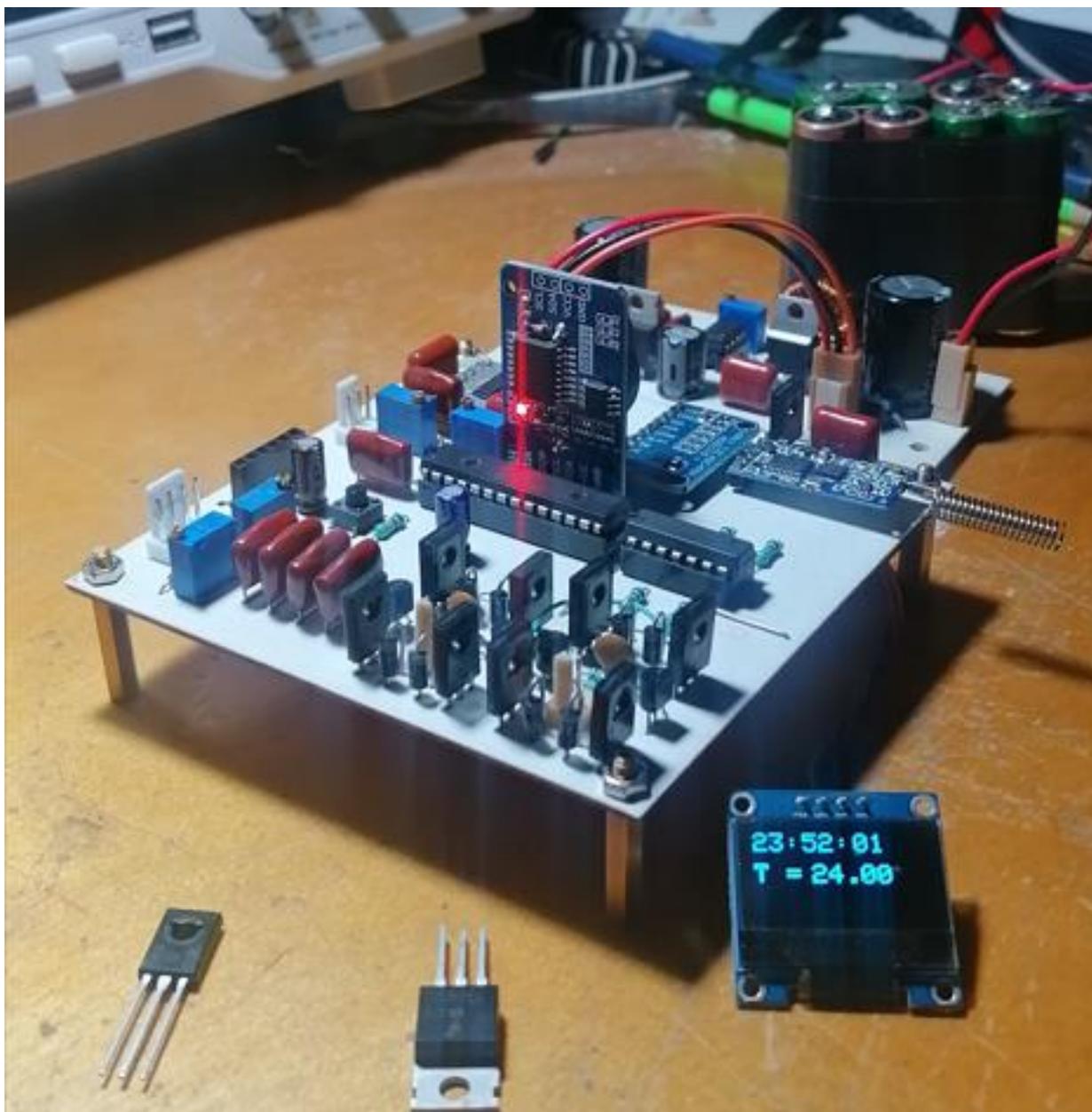


Fig. 58: Prueba de funcionamiento de la tarjeta principal del instrumento.

Se instalaron los sensores de radiación UV tipo fotodiodo, el arreglo piramidal de fototransistores y el sensor de temperatura LM35 en la placa de circuito dedicada a los sensores, esta placa se instalará en la parte móvil del instrumento. La implementación de los sensores sobre la placa se muestra en la Figura 59.

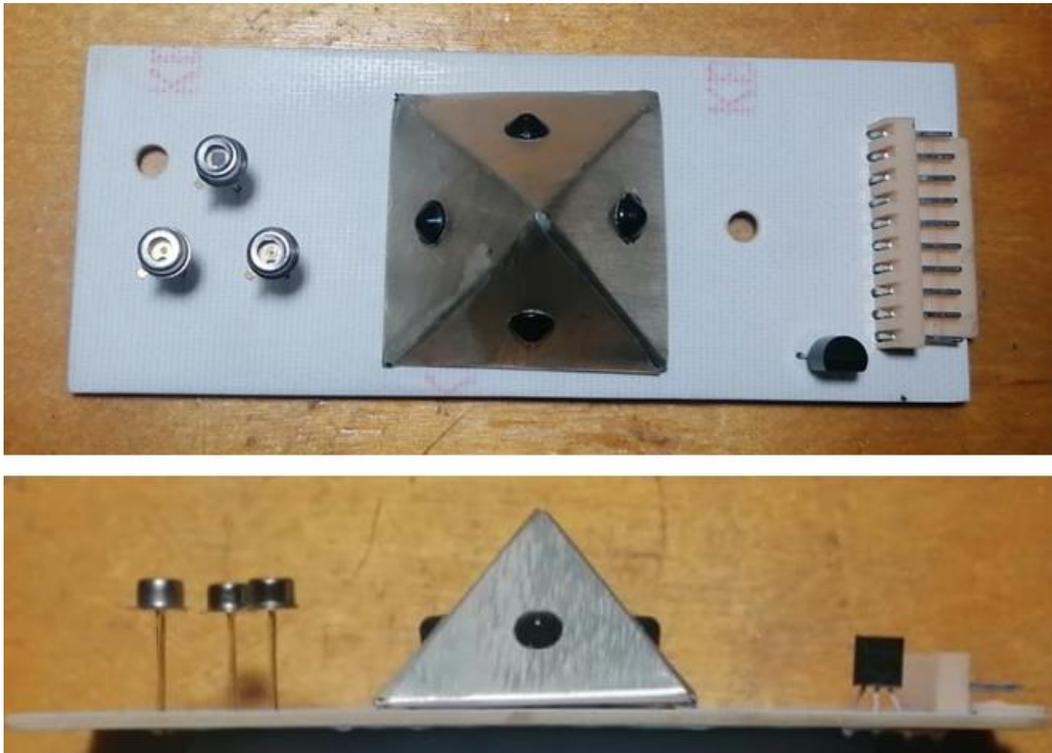


Fig. 59: Vista frontal y de perfil de la tarjeta de sensores de radiación, ópticos para el control de orientación y de temperatura (A la derecha se encuentra el conector de 10 pines por el cual se envían las señales analógicas provenientes de los sensores por a través de un BUS que comunica con la tarjeta principal del instrumento)

Se instalaron los soportes del servomotor sobre la tapa de la carcasa metálica, sobre el servomotor se instaló el motorreductor y en el eje de este se instaló una placa de aluminio de 10x15 cm y 3 mm de grosor la cual sujeta la parte móvil del instrumento, en esta parte se instaló la tarjeta que tiene los sensores instalados. Un bus de comunicación de 10 pines comunica la parte móvil del instrumento con la tarjeta principal. La Figura 60 muestra, la integración de las distintas partes que componen al instrumento.

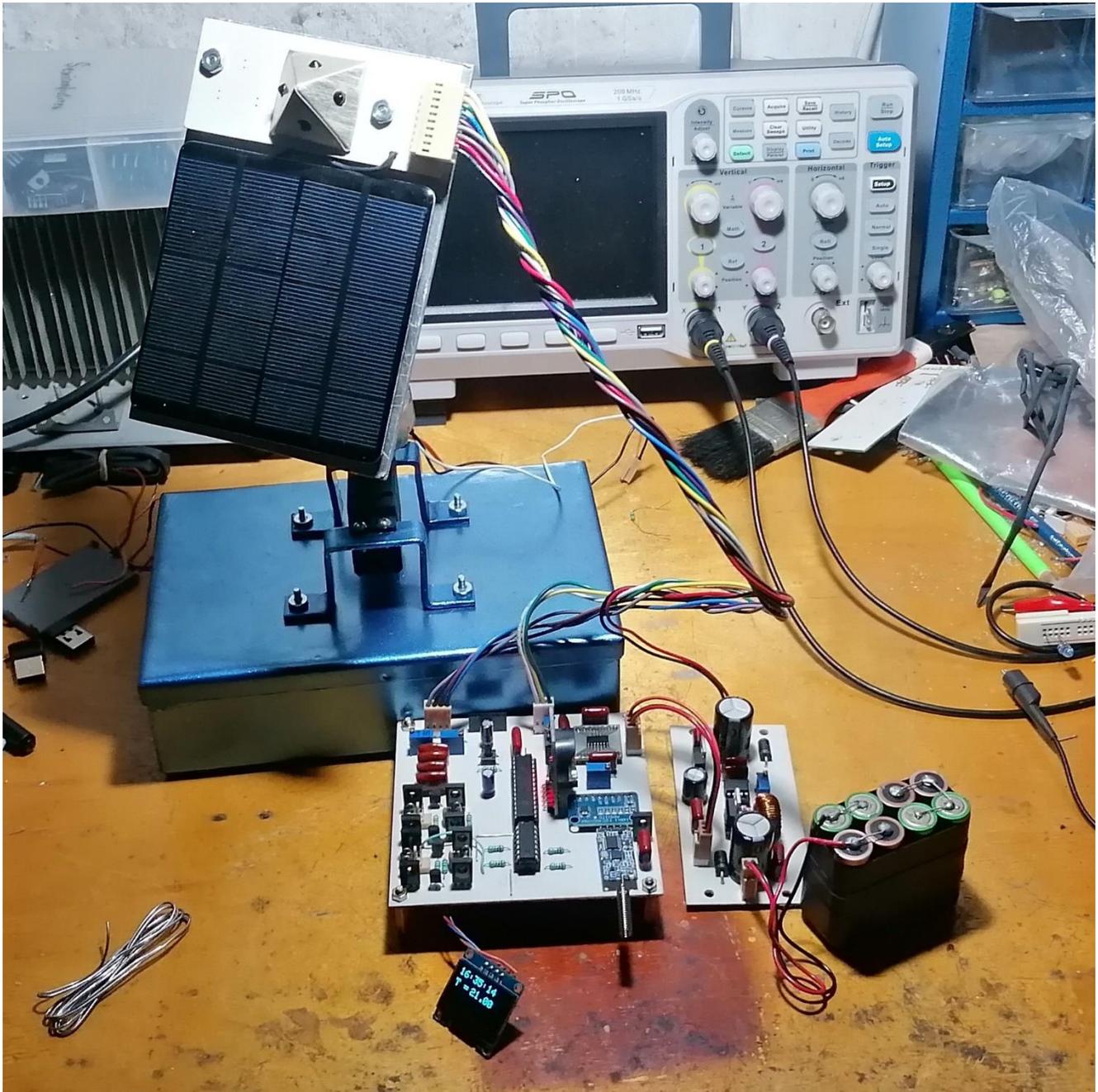


Fig. 60: Integración de las distintas tarjetas que componen el instrumento.

Una vez validado el correcto funcionamiento de cada subsistema, se instalaron dentro de la carcasa metálica las tarjetas y se realizó la interconexión de los distintos componentes. La Figura 61 muestra, la instalación interna de estos componentes dentro de la carcasa metálica.



Fig. 61: Vista interna del instrumento.

La Figura 62 muestra, un prototipo completamente armado y funcional del radiómetro UV.

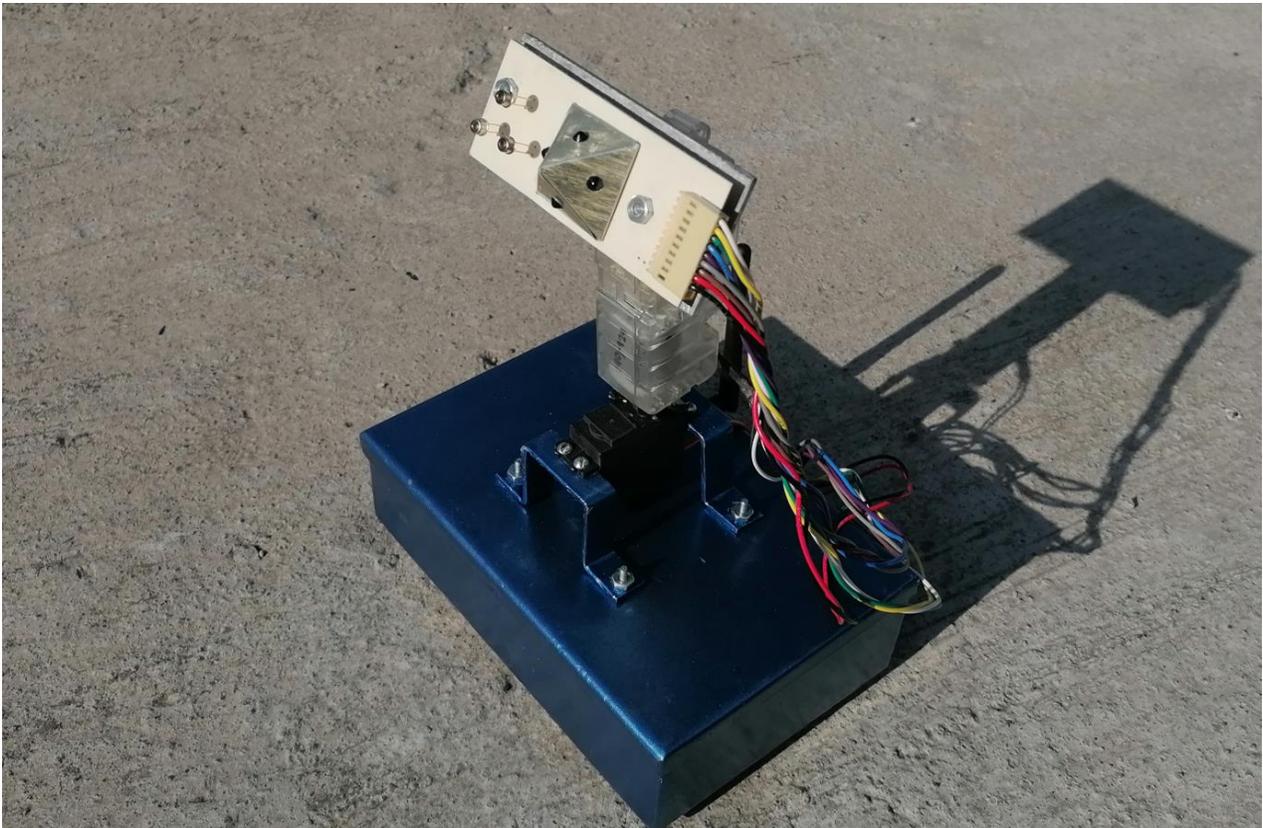


Fig. 62: Prototipo de radiómetro UV.

Para la etapa de recepción de datos se diseñó un circuito el cual conecta el módulo receptor de radiofrecuencia HC-12 con el módulo serial a USB FT232RL. Se utilizó una antena externa idéntica a la que se utilizó en la etapa de transmisión de datos. La Figura 63 muestra el diseño de este circuito PCB mientras que las Figuras 64 y 65 muestran, la implementación y la integración final de los componentes respectivamente en una caja de plástico cuyas dimensiones son de 4x7x10 cm.

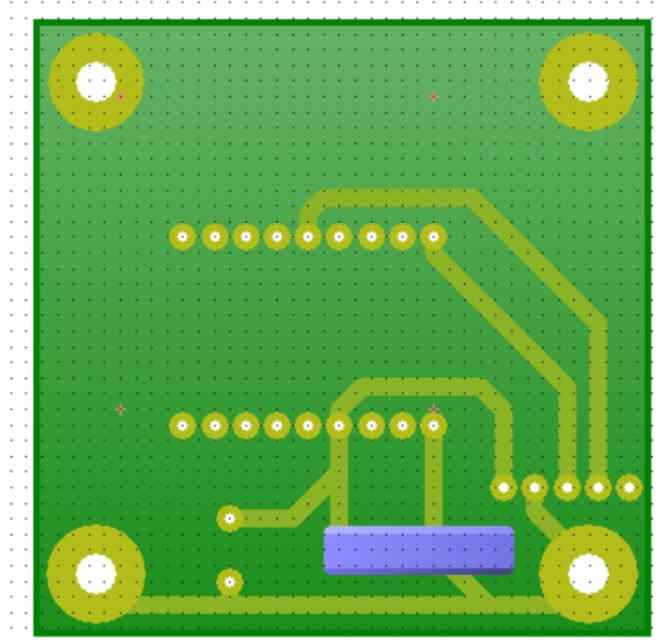


Fig. 63: Placa del circuito de la etapa de recepción de datos. (Dimensiones: 5x5 cm).

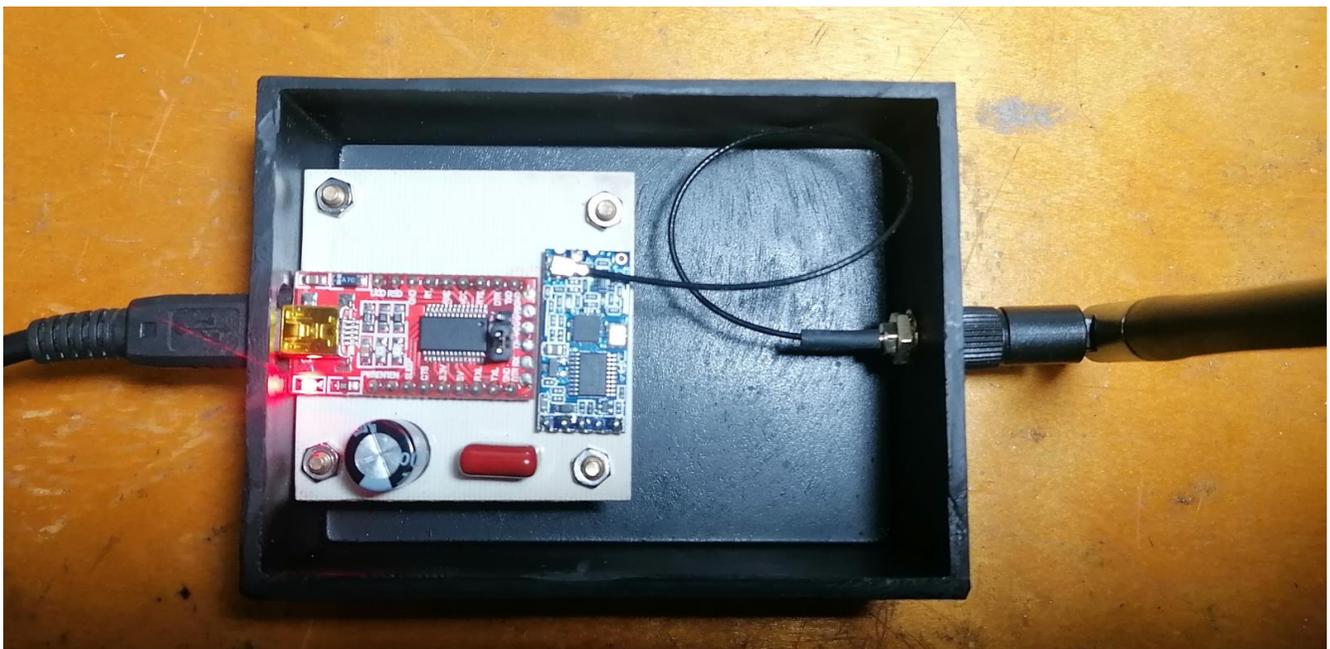


Fig. 64: Implementación del circuito receptor de datos.



Fig. 65: Módulo RF receptor de datos: Serial-USB.

La Figura 66 muestra, una fotografía panorámica de 180° del campo de visión que tiene el instrumento, esta corresponde con la trayectoria solar que se presenta de este a oeste.



Fig. 66: Fotografía panorámica del horizonte de medición del radiómetro UV.

Al tener todos los subsistemas implementados y funcionando correctamente, se integraron para consolidar la estación de monitoreo. Sobre una mesa de madera cuya superficie es de 70x70 cm, se instaló el domo, para ello se utilizó, una bisagra y 4 tornillos de sujeción tipo mariposa dispuestos cada 72°, así como una circunferencia de material sintético esponjoso que realiza la función de junta y sella el interior de la cúpula para evitar que entre el agua durante la precipitación atmosférica. La Figura 67 muestra la integración final de los subsistemas que conforman el prototipo de estación de monitoreo de la radiación UV.



Fig. 67: Integración Final de subsistemas. Estación de monitoreo de la radiación UV.

## 5.9. Funcionamiento del instrumento

El principal objetivo de implementar de forma permanente un mecanismo de seguidor solar en el instrumento, es que, debido a que los sensores ópticos que se utilizaron tienen un desplazamiento angular, el cual se obtuvo experimentalmente y con ello se pierde información si la radiación electromagnética no incide de forma perpendicular a la superficie fotosensible del sensor. Se crea un cenit artificial a lo largo del día para los sensores, con lo cual se puede estimar la radiación solar UV. Este algoritmo ayuda a la creación del IUV. La Figura 68 muestra, la comparativa de curvas de medición a) sin seguimiento solar (superficie horizontal) y b) con seguimiento de la trayectoria solar. En esta comparativa se aprecia la diferencia que presentan las curvas durante el amanecer y durante el ocaso. Al no implementar el mecanismo de seguimiento solar, se pierde información útil para la estimación de la radiación UV entre las 7:00-10:00 hrs y entre las 17:00-20:00 hrs.

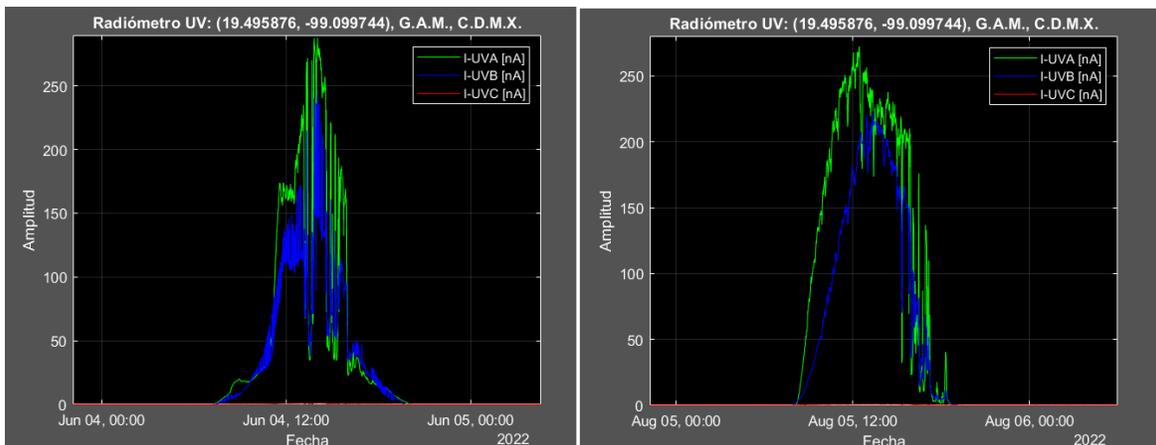


Fig. 68: Comparativa de mediciones durante 1 día; a) Sin mecanismo seguidor y b) Con seguidor solar.

Debido a que el domo actúa como un filtro, cuya función de transferencia atenúa de forma diferente cada intervalo de longitud de onda de la radiación electromagnética en amplitud y fase, se tuvo trabajando el instrumento durante la temporada seca en la Ciudad de México, con los sensores directamente expuestos a la radiación solar para registrar su respuesta directa. Posteriormente, en la temporada de lluvias en la ciudad, se tuvo que cubrir el instrumento con el domo. Lo anterior provocó que se tenga una serie de tiempo para antes de cubrir el domo con el instrumento y para después de cubrirlo, la Figura 69 muestra, la serie de tiempo y como se atenúan las 3 mediciones de la radiación debido al domo.

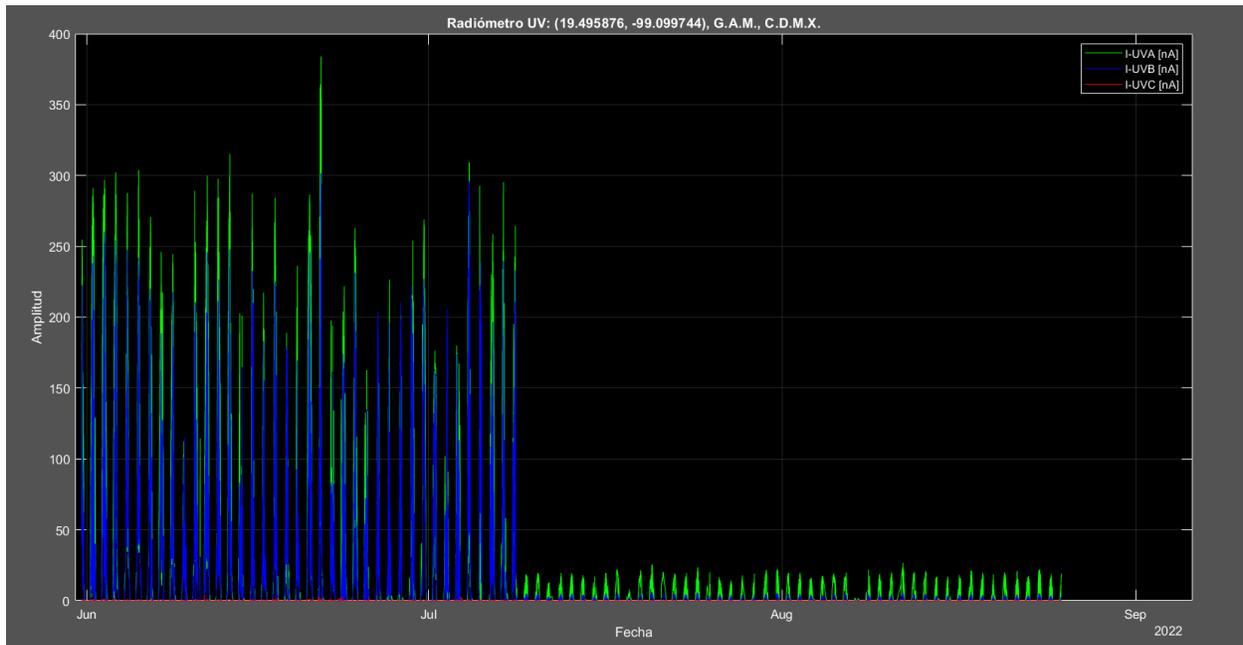


Fig. 69: Atenuación de las mediciones debida al domo.

Por lo anterior, se realizó una prueba para obtener el factor de atenuación de cada intervalo de longitud de onda. La prueba consistió en alternar una medición con el domo y sin el domo, para tener un conjunto de datos atenuados y otros sin atenuar lo suficientemente parecidos entre ellos, esta prueba se realizó en un día despejado y en horas cercanas al mediodía solar, la Figura 70 muestra, el proceso físico bajo el cual fue efectuada esta prueba.

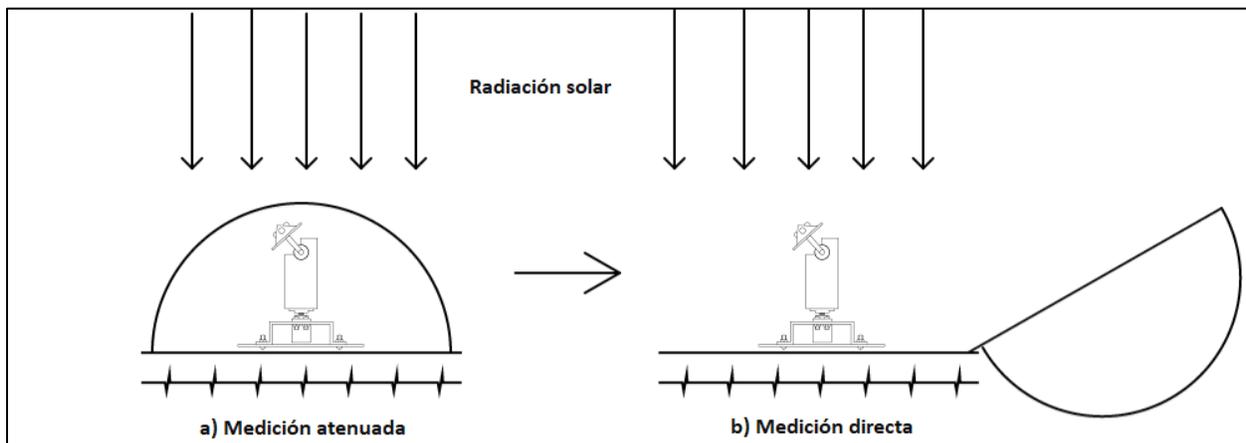


Fig. 70: Prueba de atenuación de mediciones debida al domo.

La Figura 71 muestra, las distintas curvas de corriente generadas a partir de esta prueba, en la cual, cada curva se alterna entre el valor máximo medido directamente, y el valor mínimo medido atenuado debido al domo, el número de muestras total es de 94. Se creó un algoritmo en Matlab que separa cada valor superior e inferior de cada curva de corriente, promedia cada uno de estos dos subconjuntos superior e inferior por separado y al final, se divide el promedio superior e inferior para obtener el factor de atenuación para cada intervalo de longitud de onda UV-A, UV-B y UV-C.

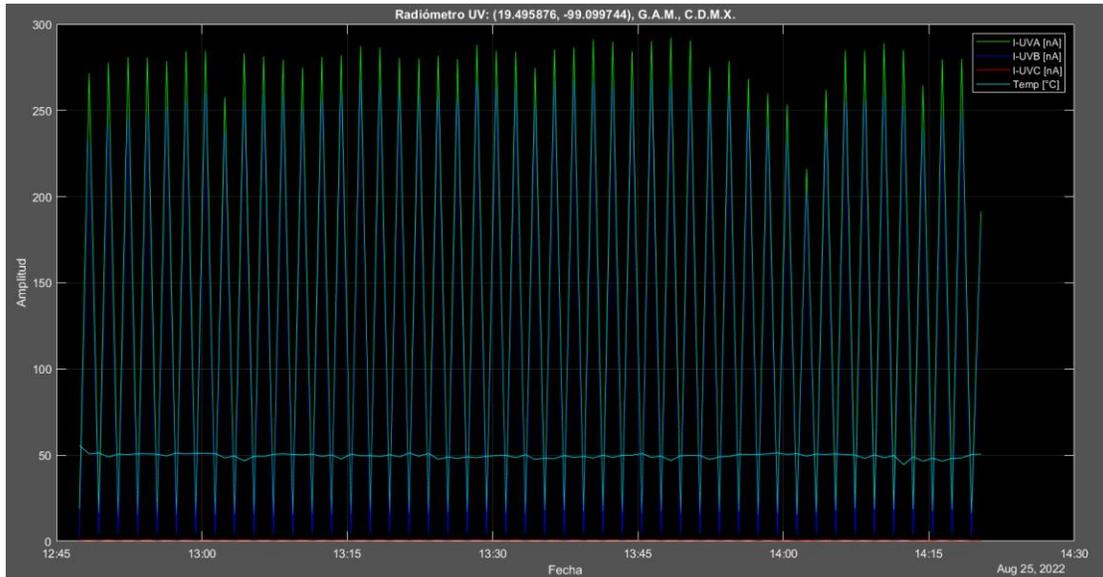


Fig. 71: Curvas triangulares de la prueba de atenuación del domo.

Al multiplicar cada curva de corriente de la segunda parte de la serie de tiempo presentada en la Figura 69, por el factor de atenuación correspondiente se logró calibrar la segunda parte de la serie obteniendo como resultado una curva de corriente equivalente a que el instrumento mida de manera directa la radiación solar sin verse afectada por la atenuación del domo, de esta manera homogeneizamos los datos de la serie de tiempo. La Figura 72 muestra, las curvas de corriente corregidas por su factor de atenuación correspondiente.

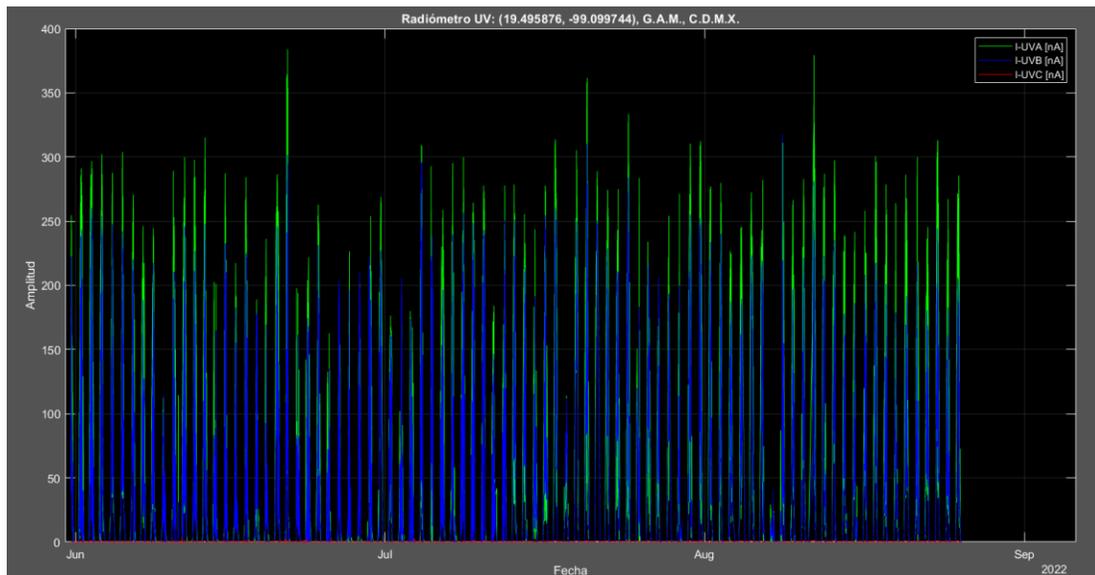


Fig. 72: Curvas de corriente corregidas respecto a la atenuación producida por el domo.

En el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM, se realizó una prueba de comparativa entre los datos medidos por el instrumento con instrumentos de referencia. Se utilizó un radiómetro marca Solar Light modelo 501 que mide la radiación electromagnética entre un intervalo de 300 a 400 nm de longitud de onda para el UV-A y un biómetro-radiómetro de la misma marca y modelo que mide en un intervalo espectral de entre 270 a 320 nm de longitud de onda para el UV-B. Para ello, se debieron cumplir algunos requisitos, los cuales son: Orientar el sensor de forma horizontal, que el Sol se encuentre en un ángulo de elevación mayor a  $20^\circ$  en un cielo completamente despejado. El tiempo de muestreo del instrumento fue el mismo para todos los instrumentos (1 minuto), para tener el mismo número de muestras. La Figura 73, muestra el proceso físico de comparativa de mediciones de cada en la azotea del instituto.

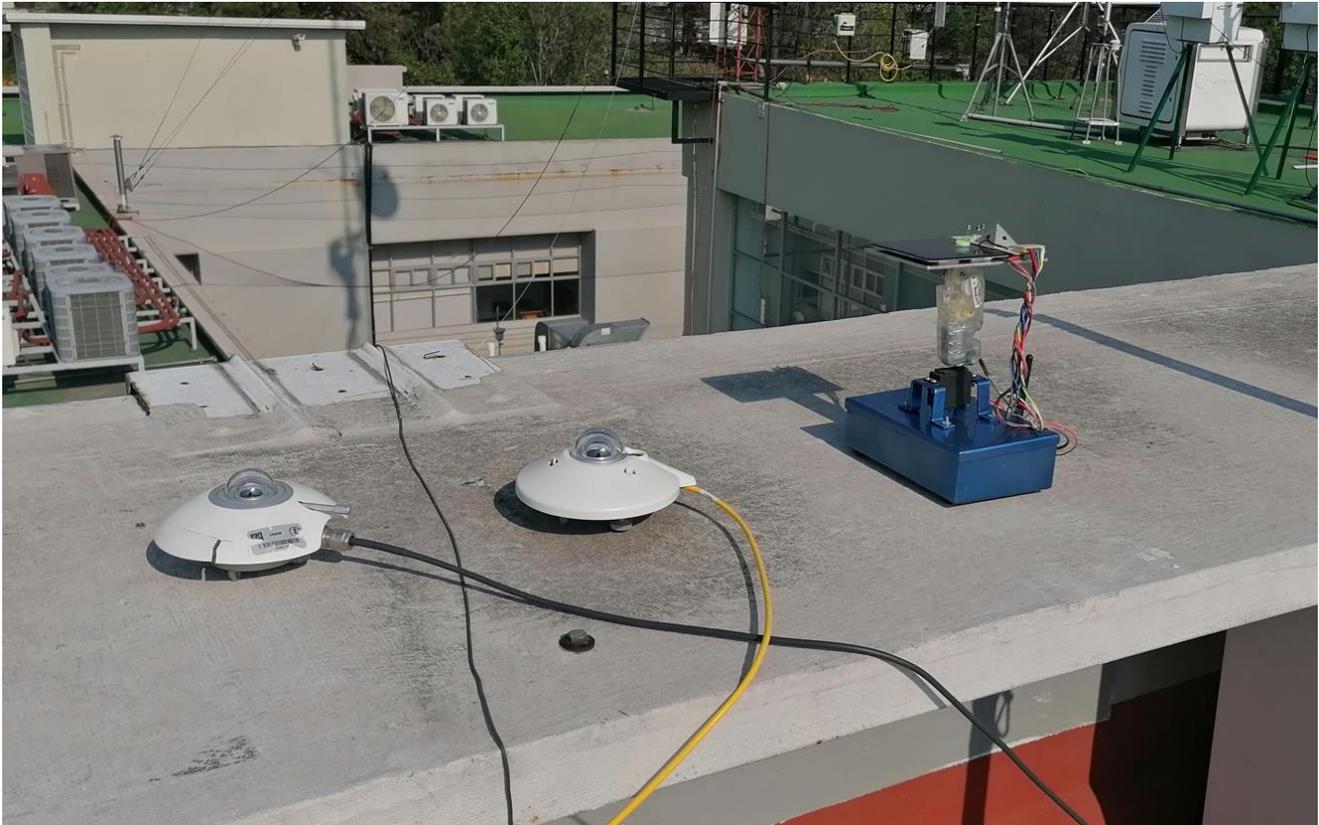


Fig. 73: Comparativa de mediciones IGEF, UNAM.

Debido a que los instrumentos de referencia, entregan sus mediciones diferentes unidades ( $[\text{mW}/\text{cm}^2]$  para UV-A y  $[\text{MED}/\text{h}]$  para UV-B), es necesario pasar de corriente en  $[\text{nA}]$  a estas unidades. El fabricante de los sensores Genicom, utilizados en el instrumento especifica en sus hojas de datos, un cierto valor de conversión para cada sensor, el cual, en todos los casos, convierte la medición de la fotocorriente en  $[\text{nA}]$  a  $[\text{mW}/\text{cm}^2]$  (Genicom Co., Ltd. UV-A, UV-B, UV-C Sensor: GUV-A-T11GD, GUV-B-T11GD, GUV-C-T10GD, 2020). Este valor debe considerarse con cierta reserva, ya que siempre es necesario realizar un ajuste en los datos medidos con una referencia confiable.

De esta comparativa, se obtuvieron las curvas que se presentan en las Figuras 74, 75, en las cuales, se compara la curva medida por el instrumento con la medida por el instrumento de referencia.

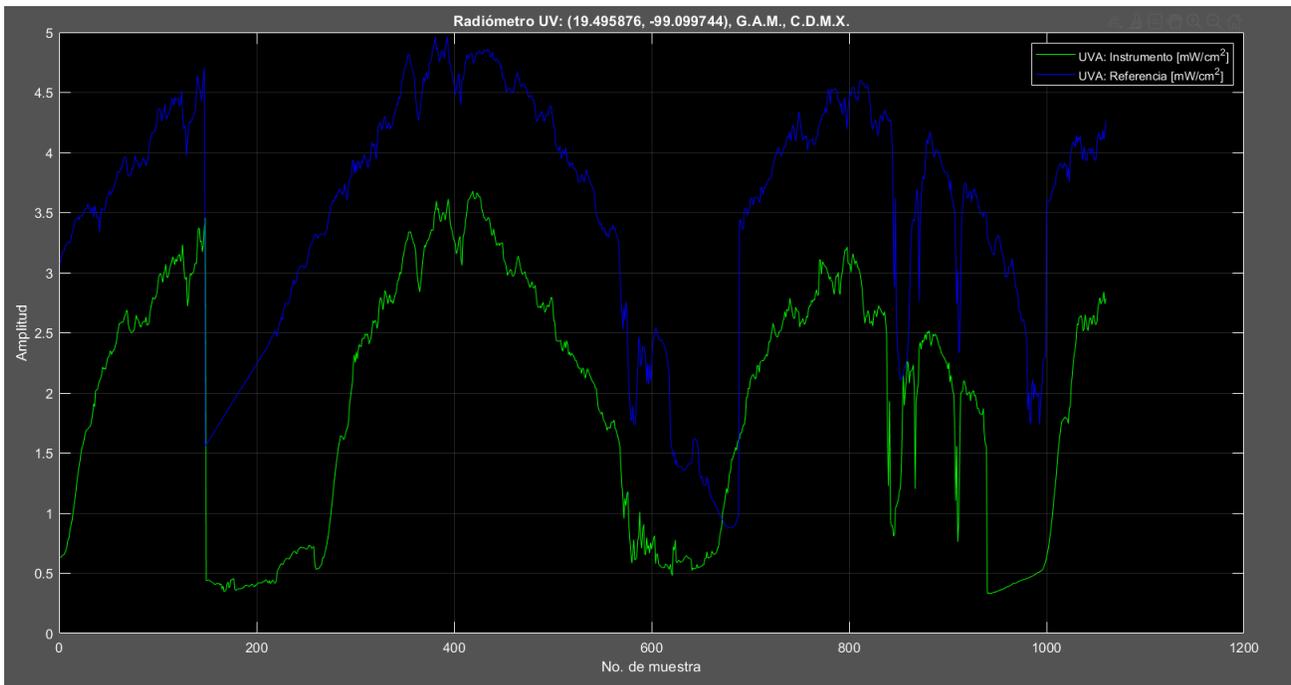


Fig. 74: Comparativa de curvas de radiación UV-A.

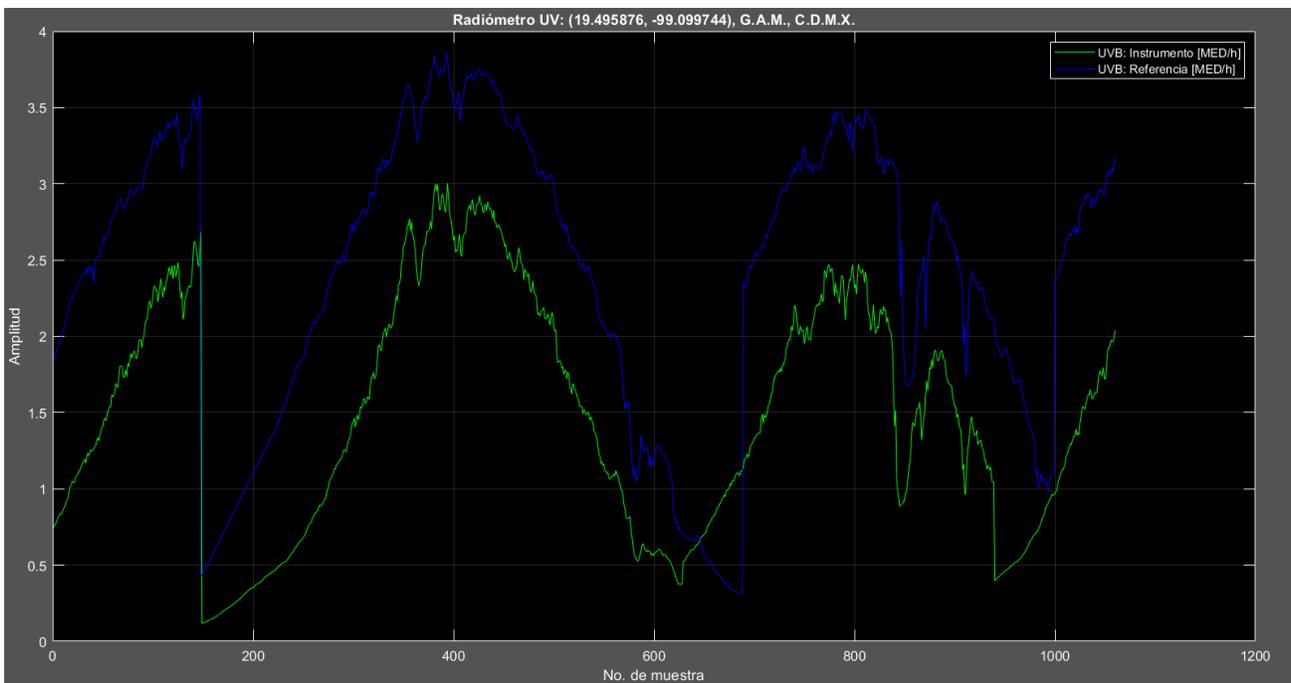


Fig. 75: Comparativa de curvas de radiación UV-B.

Dos algoritmos se implementaron para ajustar la ganancia de las curvas de las mediciones del instrumento con las curvas de los instrumentos de referencia. El primer análisis consistió en dividir cada muestra de la curva de referencia, superior a un cierto valor de umbral entre la muestra del instrumento para ese instante de tiempo, promediarlos y al final multiplicar todas las mediciones del instrumento por este factor de ganancia para ajustar con la curva de referencia. Al variar el valor de umbral, se puede ajustar la curva de tal forma de minimizar el error cuadrático medio.

La Figura 76 muestra, el mejor ajuste de la curva de UV-A para un valor de umbral superior a 4 [mW/cm<sup>2</sup>], una ganancia de 1.39 y un error cuadrático medio de 1.13. La Figura 77 muestra, el mejor ajuste de la curva de UV-B para un valor de umbral superior a 3.3 [MED/h], una ganancia de 1.38 y un error cuadrático medio de 0.31.

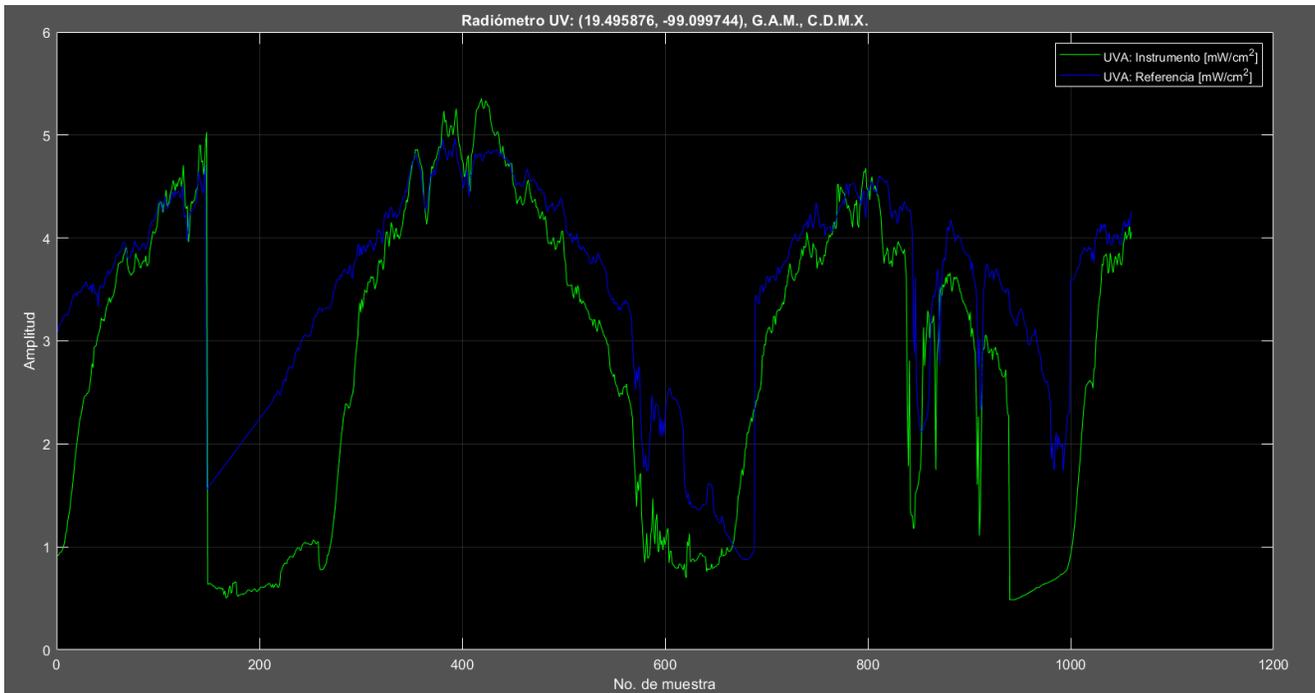


Fig. 76: Curva de UV-A ajustada mediante ganancia simple.

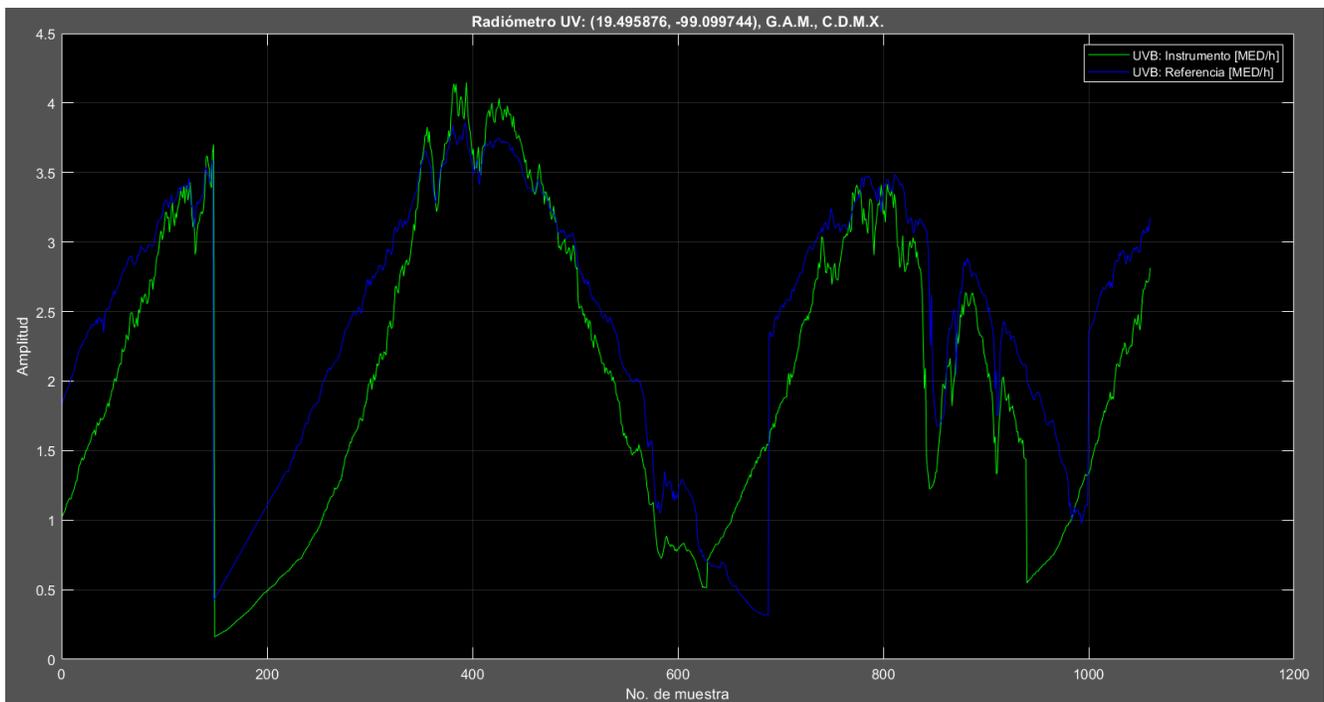


Fig. 77: Curva de UV-B ajustada mediante ganancia simple.

El segundo análisis, consistió en implementar un algoritmo de composición de datos creado por el Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera en el Instituto de Geofísica de la UNAM, este algoritmo, llamado “Mafalda” consiste en ajustar una serie de mediciones provenientes de un instrumento tomado como referencia a una o varias series de mediciones provenientes de otros instrumentos.

Para ajustar una serie de datos, el primer paso es centralizarlos, es decir, restar a cada valor el promedio de la serie con el objetivo de que el valor medio sea igual a 0. El segundo paso es estandarizar, es decir, dividir toda la serie por su desviación estándar para normalizarla a un valor igual a 1. El tercer y cuarto paso vienen del ajuste con la serie de referencia y consiste en multiplicar la serie de tiempo a ajustar por la desviación estándar de la serie de referencia y sumarle el valor medio de la misma. [56].

Las Figura 78 muestra, el resultado de aplicar este algoritmo de ajuste a la curva de UV-A con un error cuadrático medio de 0.29. Los datos de UV-A medidos por el instrumento tienen una desviación estándar de 1.06 [mW/cm<sup>2</sup>]. La Figura 79 muestra, el resultado de aplicar este algoritmo de ajuste a la curva de UV-B con un error cuadrático medio de 0.17. Los datos de UV-B medidos por el instrumento tienen una desviación estándar de 0.76 [MED/h].

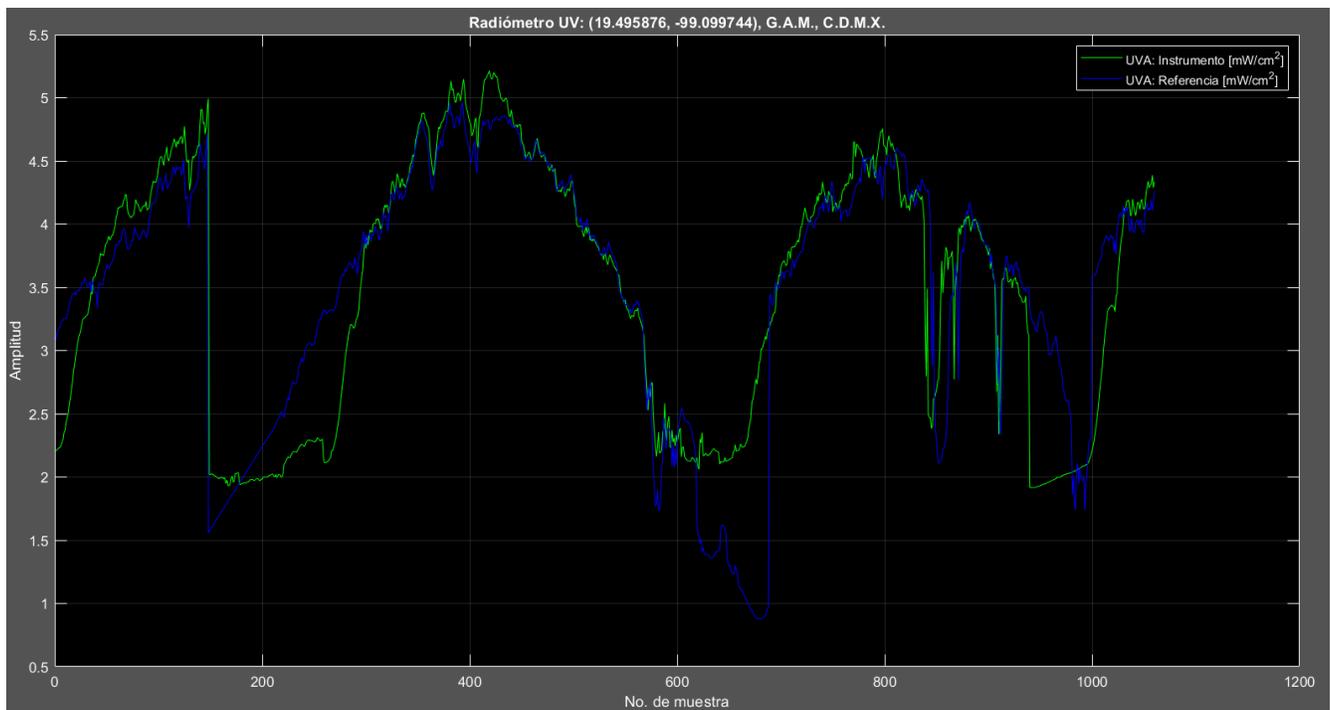


Fig. 78: Ajuste de la curva de UV-A mediante el algoritmo de Mafalda.

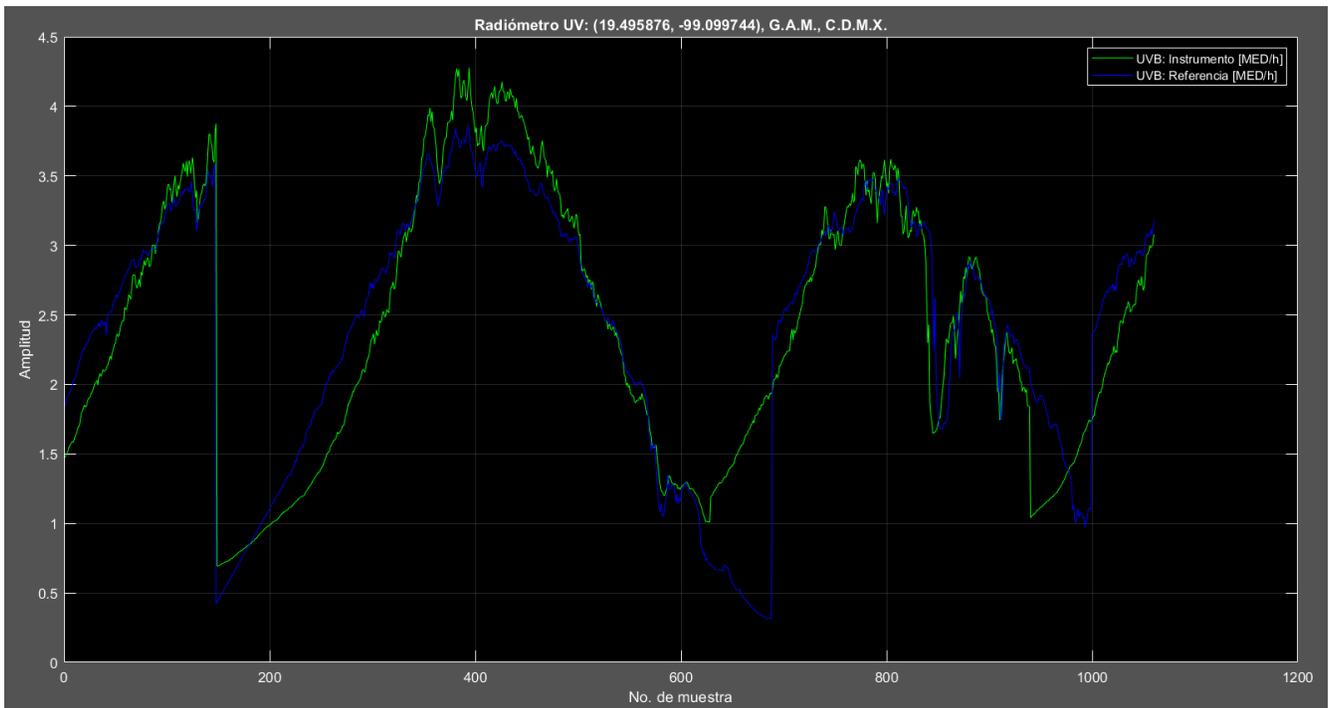


Fig. 79: Ajuste de la curva de UV-B mediante el algoritmo de Mafalda.

Debido a que el algoritmo de ajuste de datos desarrollado en el Instituto de Geofísica tiene un menor error que el tradicional ajuste de ganancia simple, es más apropiado utilizar este para el ajuste de los datos de UV-A y UV-B medidas por el instrumento. Se calcularon los coeficientes de correlación entre las mediciones de referencia y las ajustadas provenientes del instrumento, los cuales son 0.8538 correspondiente a UV-A (Ver Fig. 80) y 0.9043 a UV-B (Ver Fig. 81).

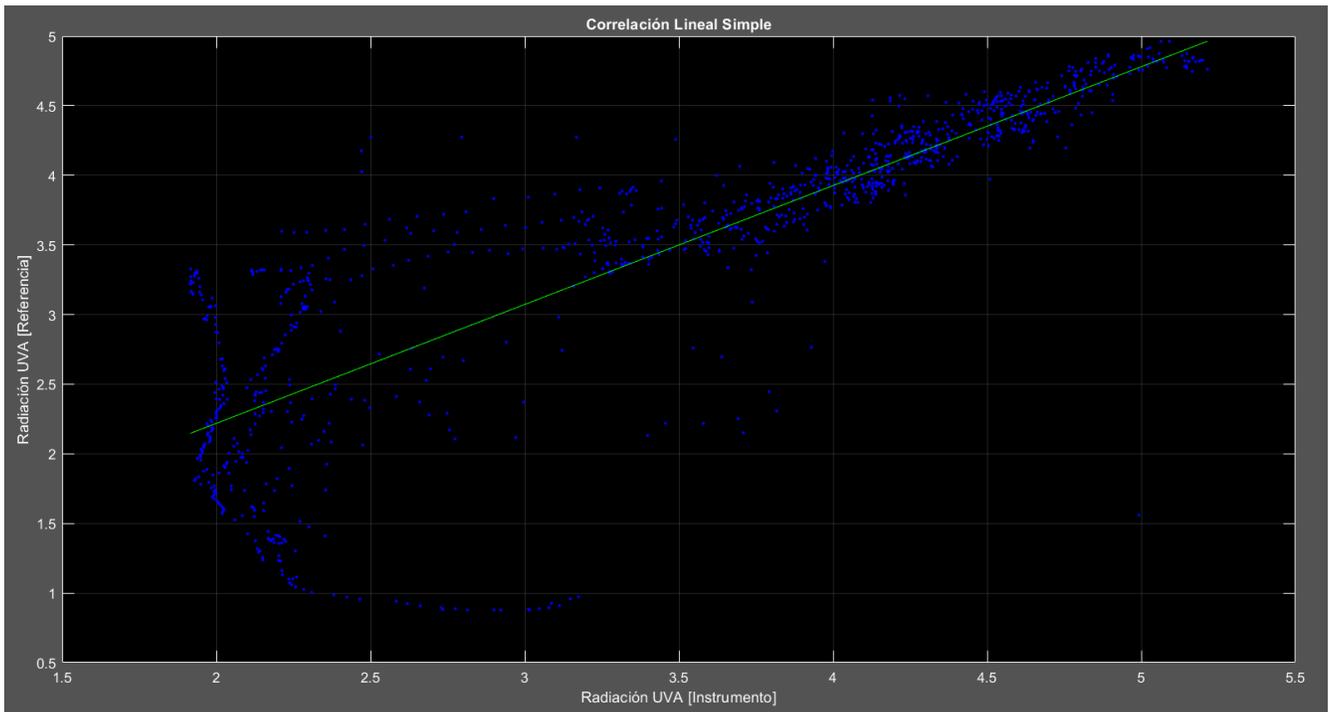


Fig. 80: Correlación Lineal Simple (UV-A).

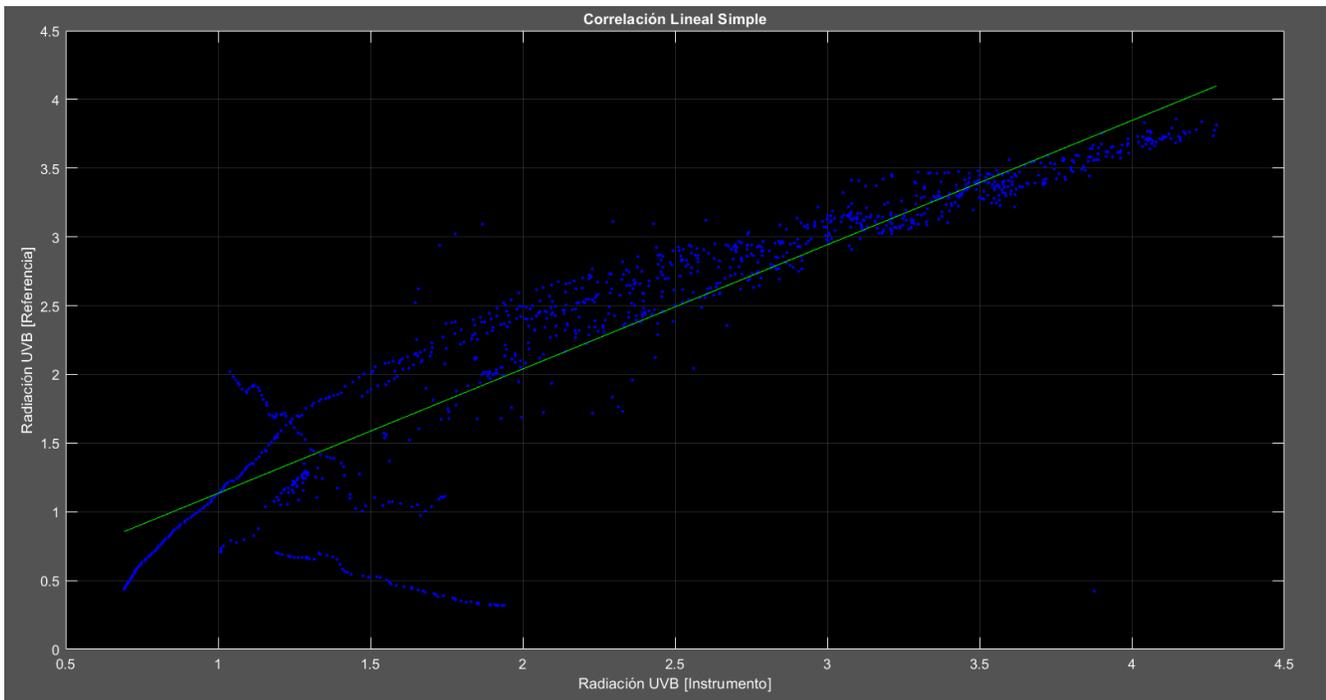


Fig. 81: Correlación Lineal Simple (UV-B).

## 6. Análisis de resultados

La Figura 82 muestra, la serie de tiempo continua, medida por el instrumento desde el día 31 de mayo de 2022, hasta el 25 de agosto del mismo año, con un tiempo de muestreo de 1 minuto, se tienen un total de 123,526 muestras. Para estar en concordancia con los estándares de medición de la radiación UV, se presenta la curva de UV-A en unidades correspondientes a  $[mW/cm^2]$ , en tanto que las curvas correspondientes a la radiación UV-B se presentan en unidades de  $[MED/h]$  y la propuesta de detección de UV-C se presenta en las mismas unidades que UV-B. Se calculó cual es la radiación UV directa promedio en los 3 meses de medición compuesta por UV-A, UV-B y UV-C y se obtuvo el valor de  $6.39 [W/m^2]$ , de este valor total de radiación UV medida, 99.5% corresponde a UV-A, 0.47% a UV-B y se detectó que el 0.03% corresponde a UV-C, este último requiere ser validado con un instrumento de referencia dedicado a medir UVC a nivel de superficie terrestre. El coeficiente de correlación entre la serie de tiempo de UV-A y UV-B es de 0.94, el coeficiente de correlación entre la serie UV-A y UV-C es de 0.9 y el coeficiente de correlación entre UV-B y UV-C es de 0.82.

La Figura 83 muestra, la curva de temperatura que registró el instrumento durante su periodo de funcionamiento continuo, las unidades son grados Celsius. En la curva se aprecia, el efecto invernadero que crea el sistema estructural del domo sobre el instrumento, ya que este se instaló el día 8 de julio del 2022 y a partir de esa fecha, se visualiza el incremento de la temperatura en la curva. La temperatura promedio en la que operó el instrumento fue de  $40^{\circ}C$ , teniendo un máximo de  $65^{\circ}C$  y un mínimo de  $13^{\circ}C$ .

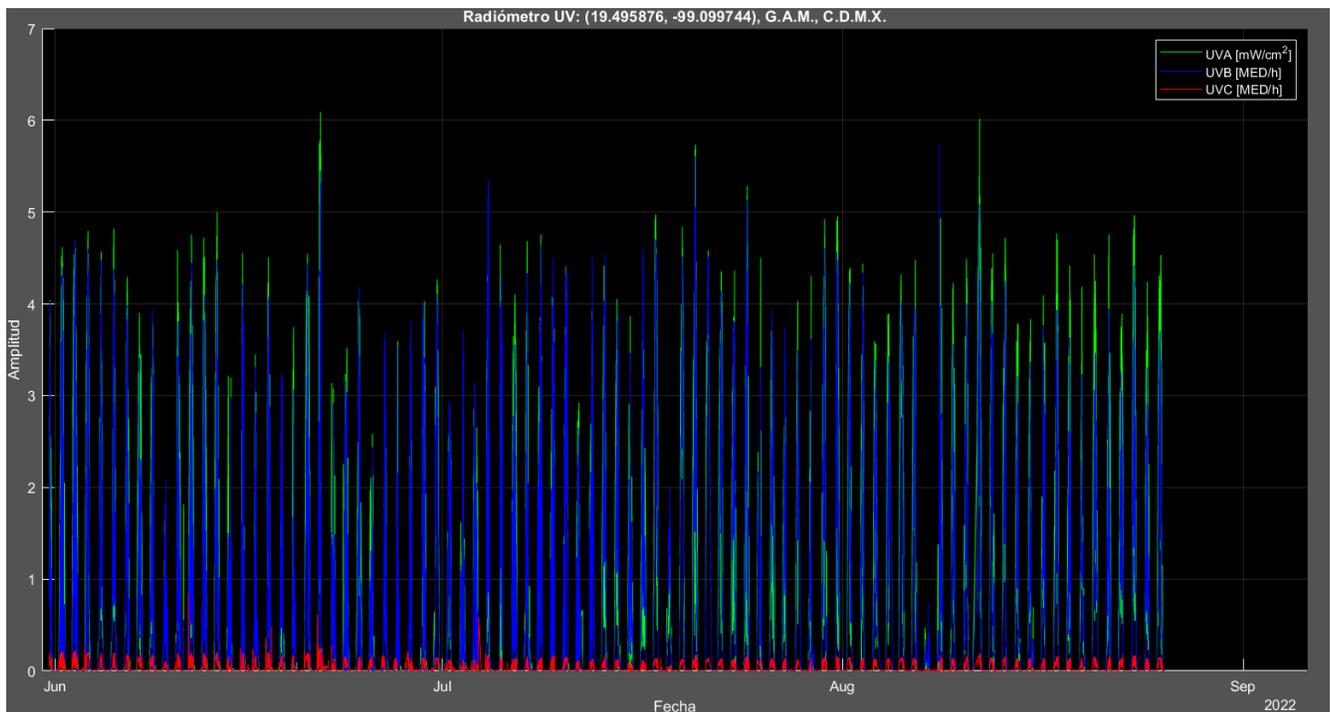


Fig. 82: Mediciones de UV-A, UV-B y UV-C desde el 31/05/2022 al 25/08/2022.

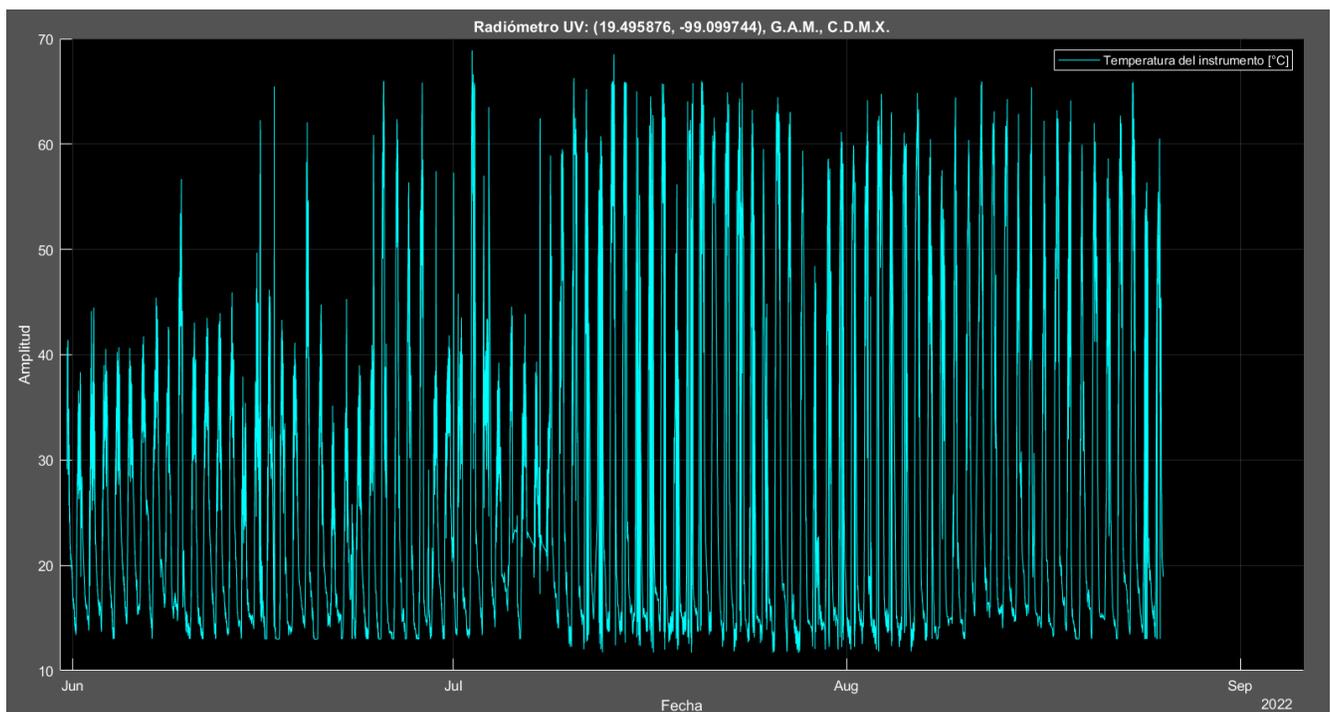


Fig. 83: Temperatura del instrumento desde el 31/05/2022 al 25/08/2022.

Se realizó un análisis tiempo frecuencia y un análisis implementando arreglos de Redes Neuronales Recurrentes (RNN) para realizar un pronóstico de radiación para cada una de las series de tiempo de interés UV-A, UV-B y UV-C. A continuación, se presentan los resultados de dichos análisis.

La Figura 84 muestra, la curva de UV-A, su valor medio se obtuvo al sintonizar (ajustar los parámetros de la función de transferencia) de un filtro RC (resistencia-capacitor) paso bajas digital.

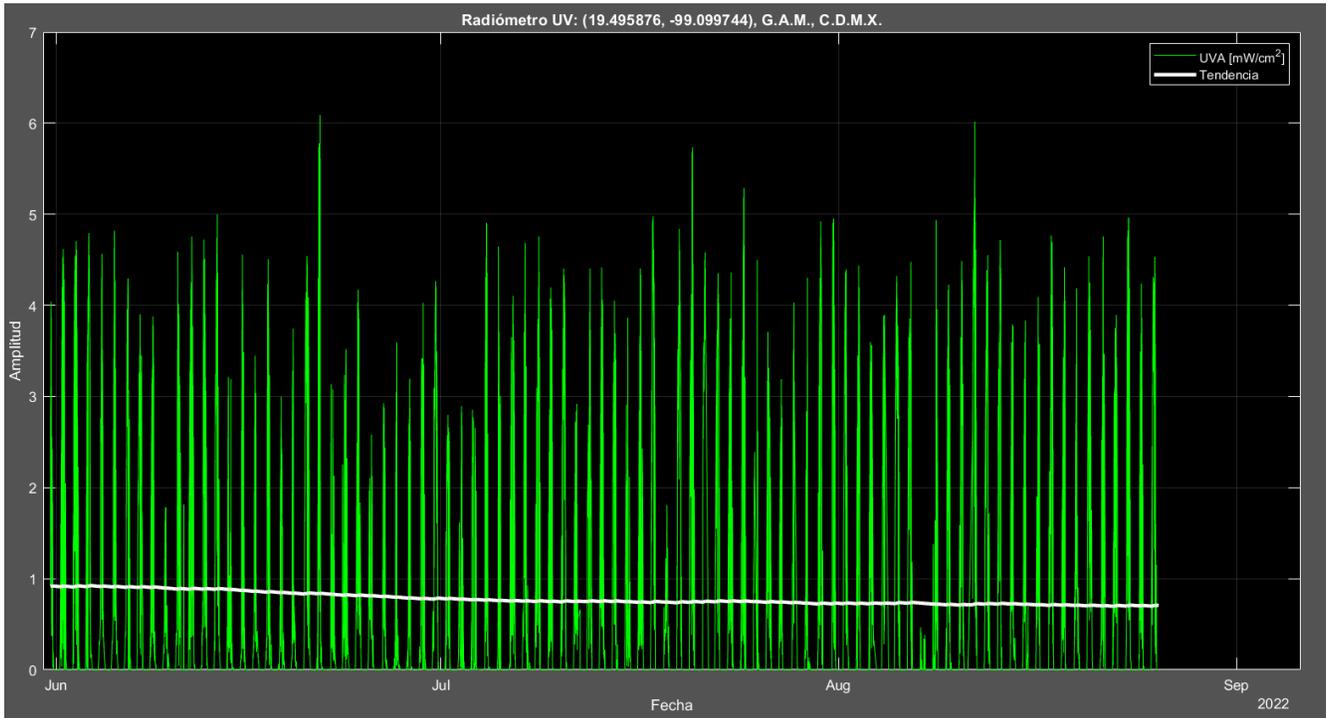


Fig. 84: Mediciones de radiación UV-A (31/05/2022 al 25/08/2022).

La Figura 85 muestra, el espectro de Fourier de la señal de UV-A, en donde se aprecia, la frecuencia fundamental diaria, una espiga del doble de frecuencia y el ruido debido a las nubes.

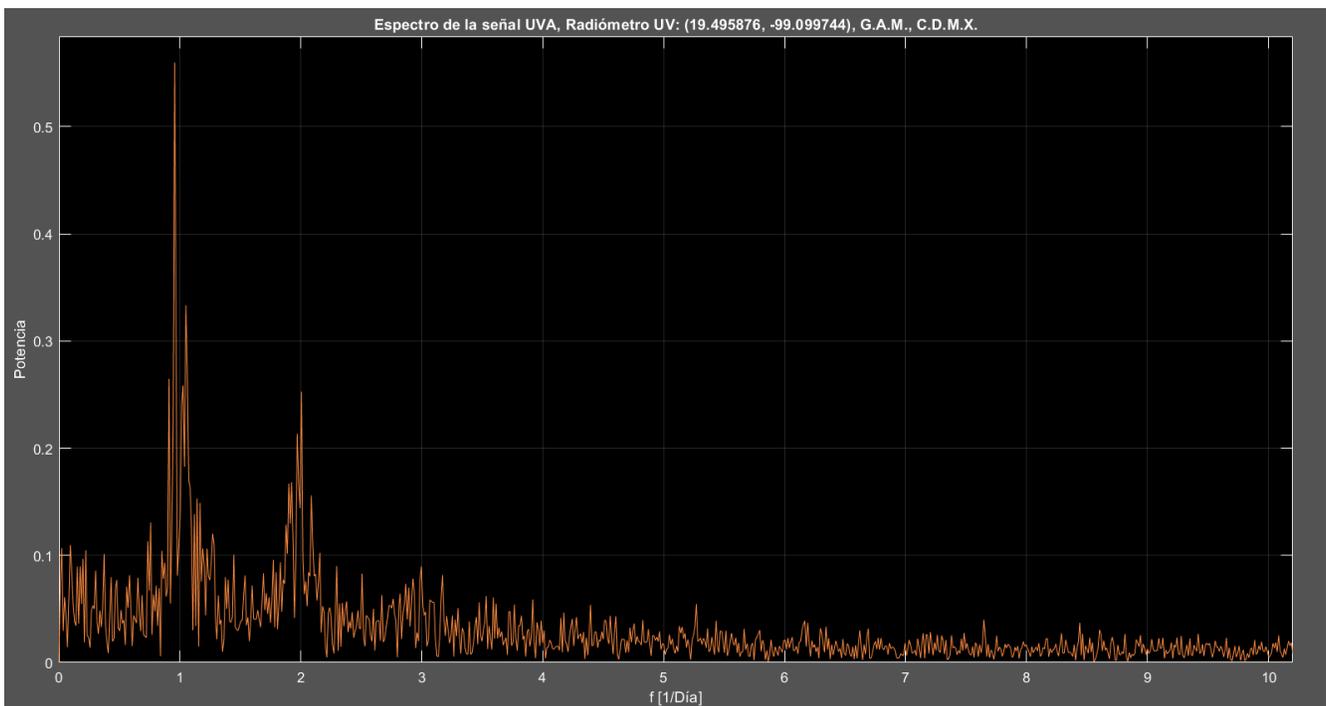


Fig. 85: Espectro de Fourier de la señal de UV-A.

La Figura 86 muestra, el espectro Wavelet de la señal de UV-A donde se aprecia el periodo fundamental diario, una componente del doble de frecuencia más componentes de mayor frecuencia (ruido en la señal debido a la presencia de nubes).

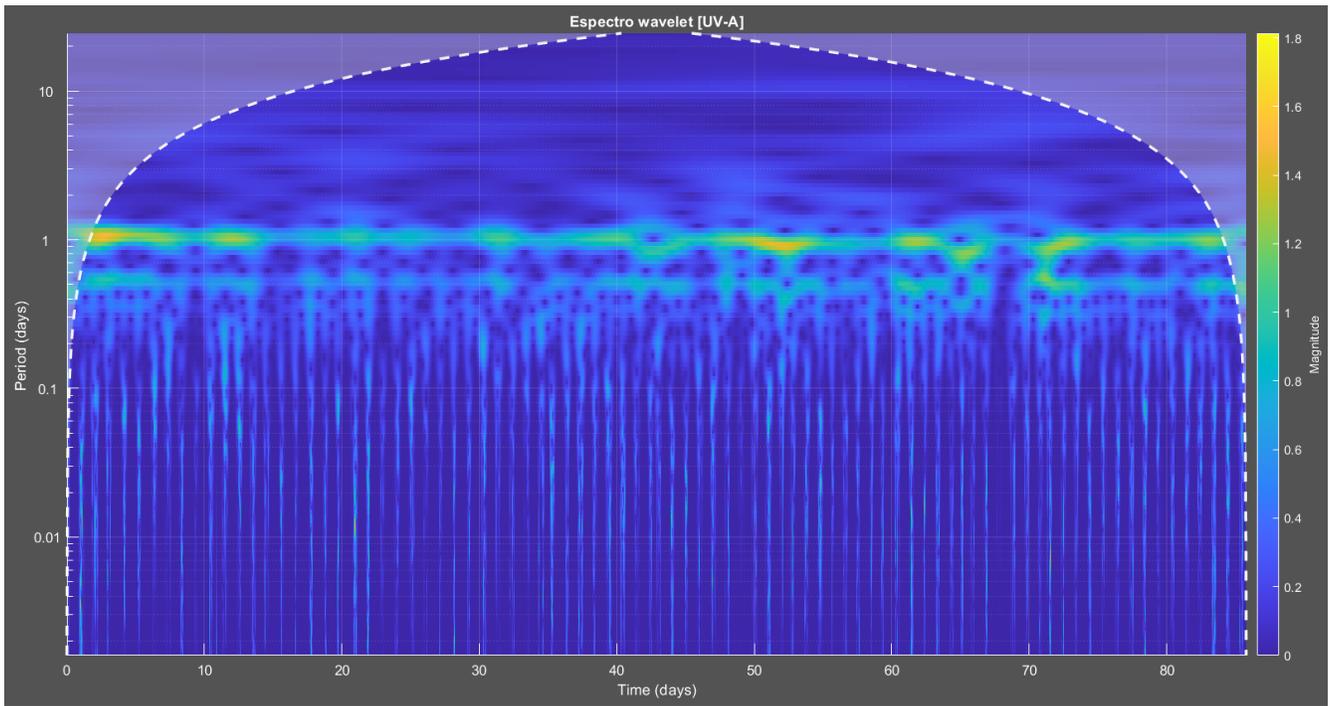


Fig. 86: Espectro Wavelet de la señal de UV-A.

La Figura 87 muestra, el espectro Wavelet acumulado de la señal de UV-A donde se observan los distintos armónicos que componen esta señal, así como sus periodos.

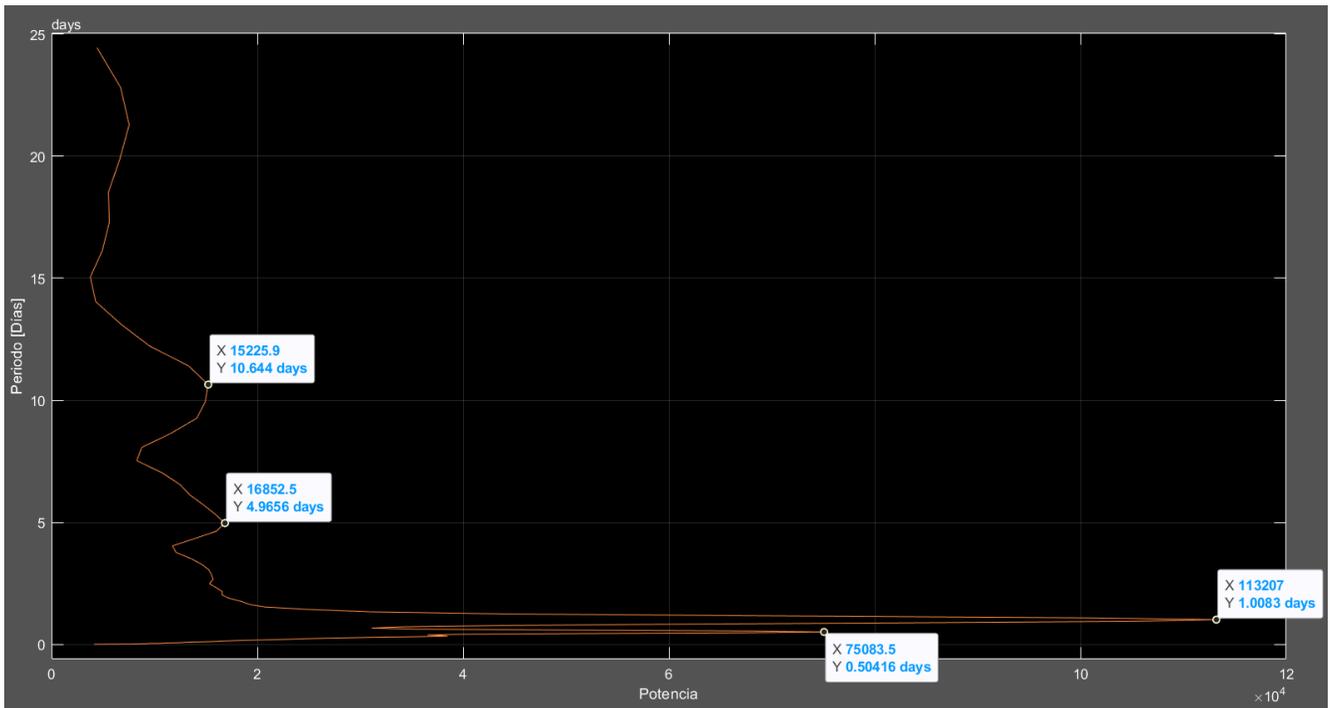


Fig. 87: Espectro Wavelet acumulado de la señal de UV-A.

Al variar los parámetros de la función de transferencia de un filtro paso bajas en tiempo real en Matlab, se puede conseguir sintonizar para filtrar componentes de alta frecuencia y eliminar el ruido de fondo de la serie de tiempo debida a las nubes. La Figura 88 muestra, la curva suavizada de la señal original de UV-A que mejora significativamente el análisis tiempo-frecuencia, la Figura 89 muestra, el espectro de Fourier y las Figuras 90 y 91, los espectros Wavelet de esta señal.

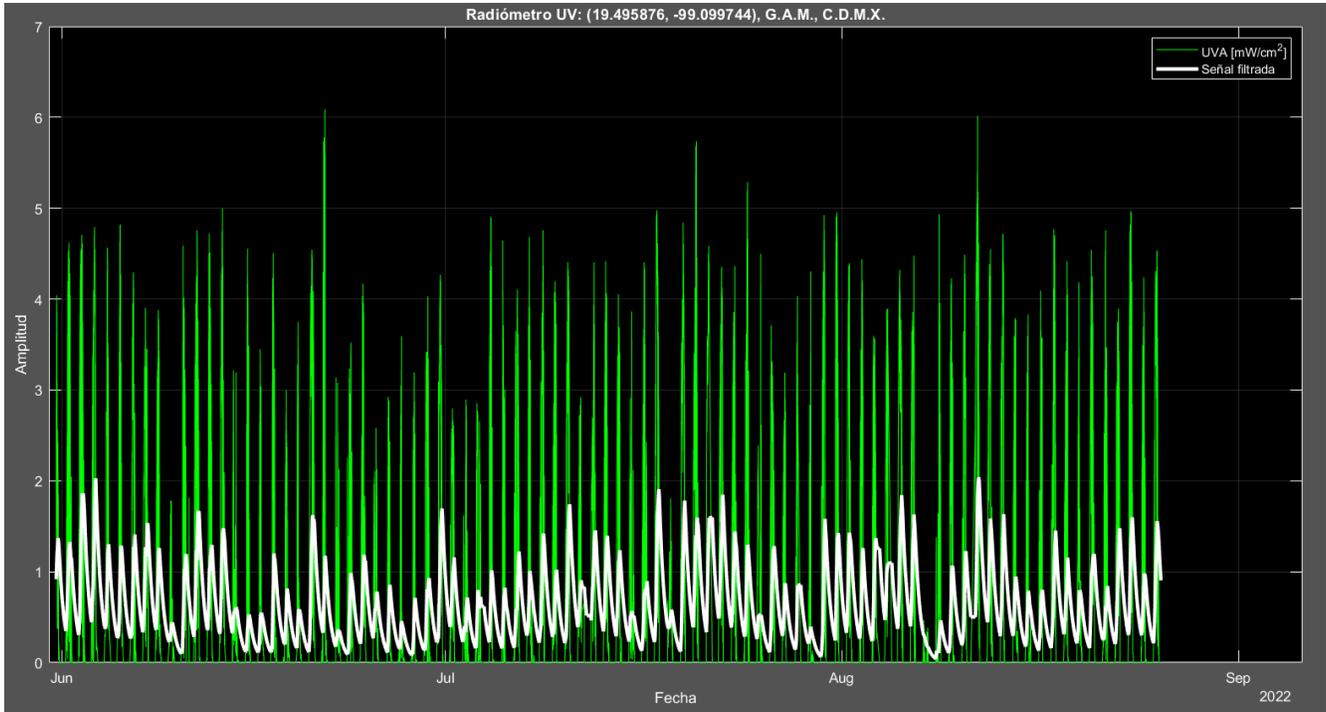


Fig. 88: Curva suavizada de la señal original de UV-A.

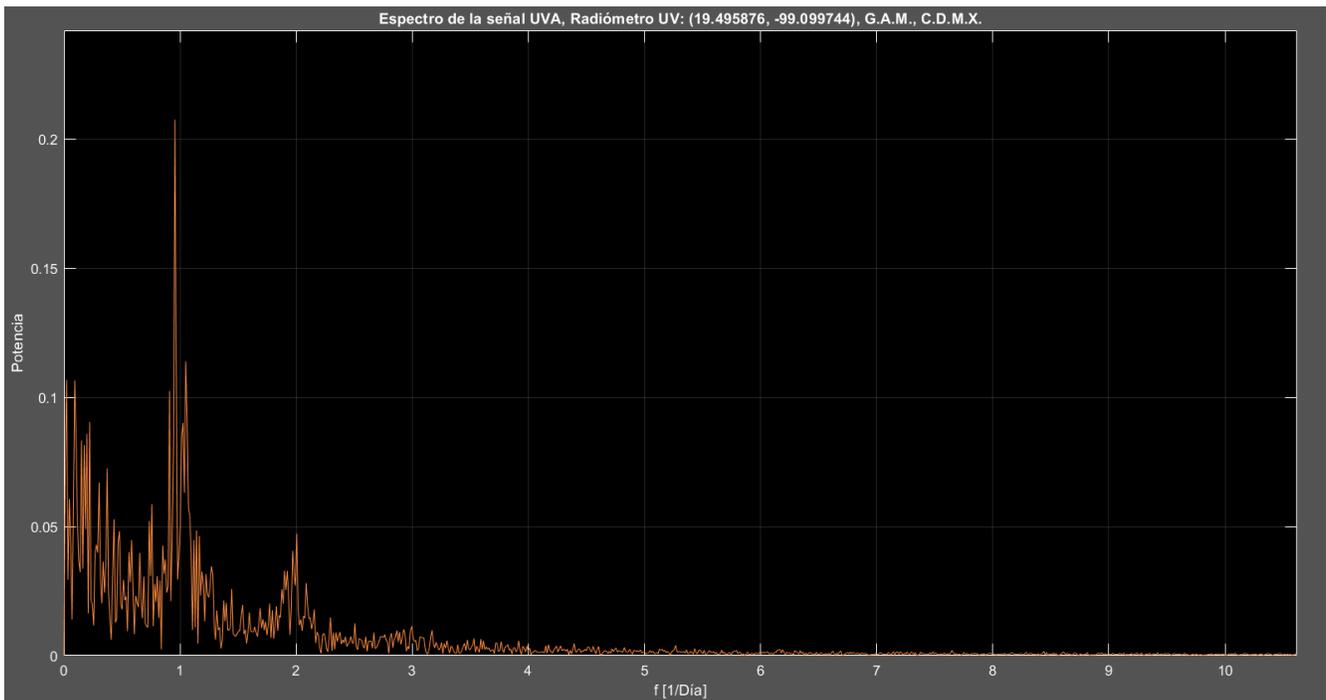


Fig. 89: Espectro de Fourier de la señal filtrada de UV-A.

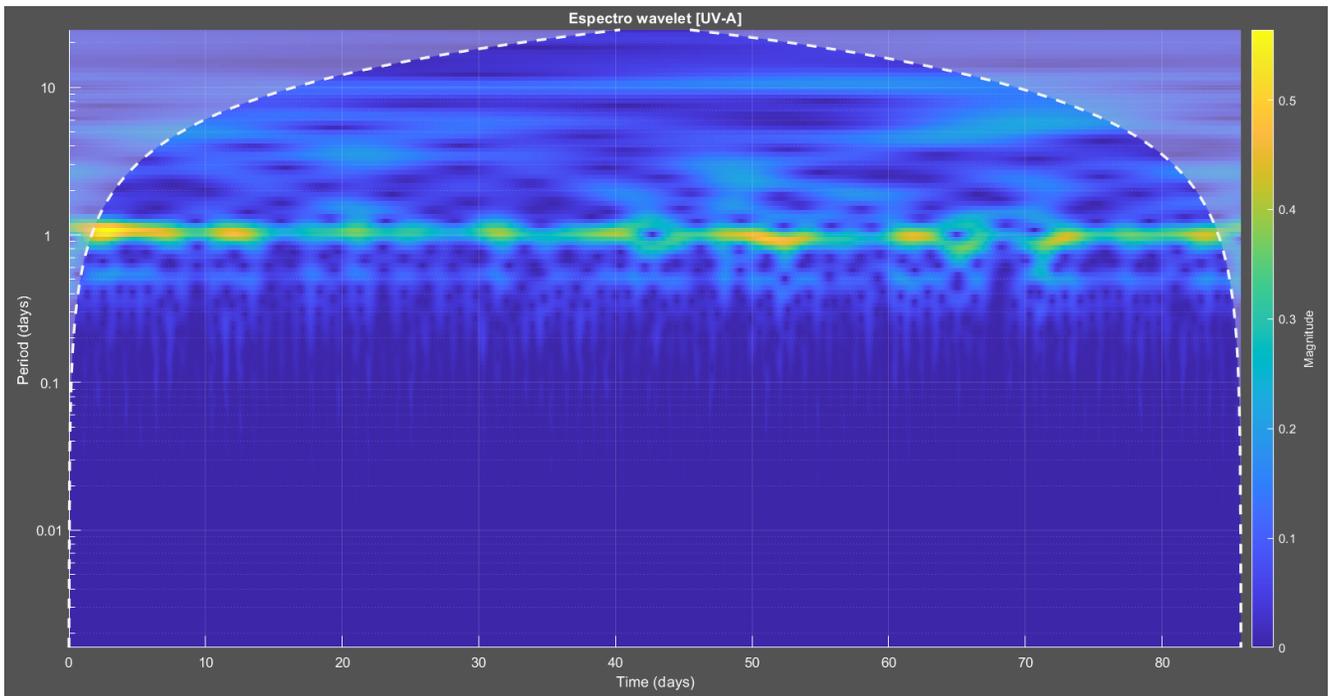


Fig. 90: Espectro Wavelet de la señal filtrada de UV-A.

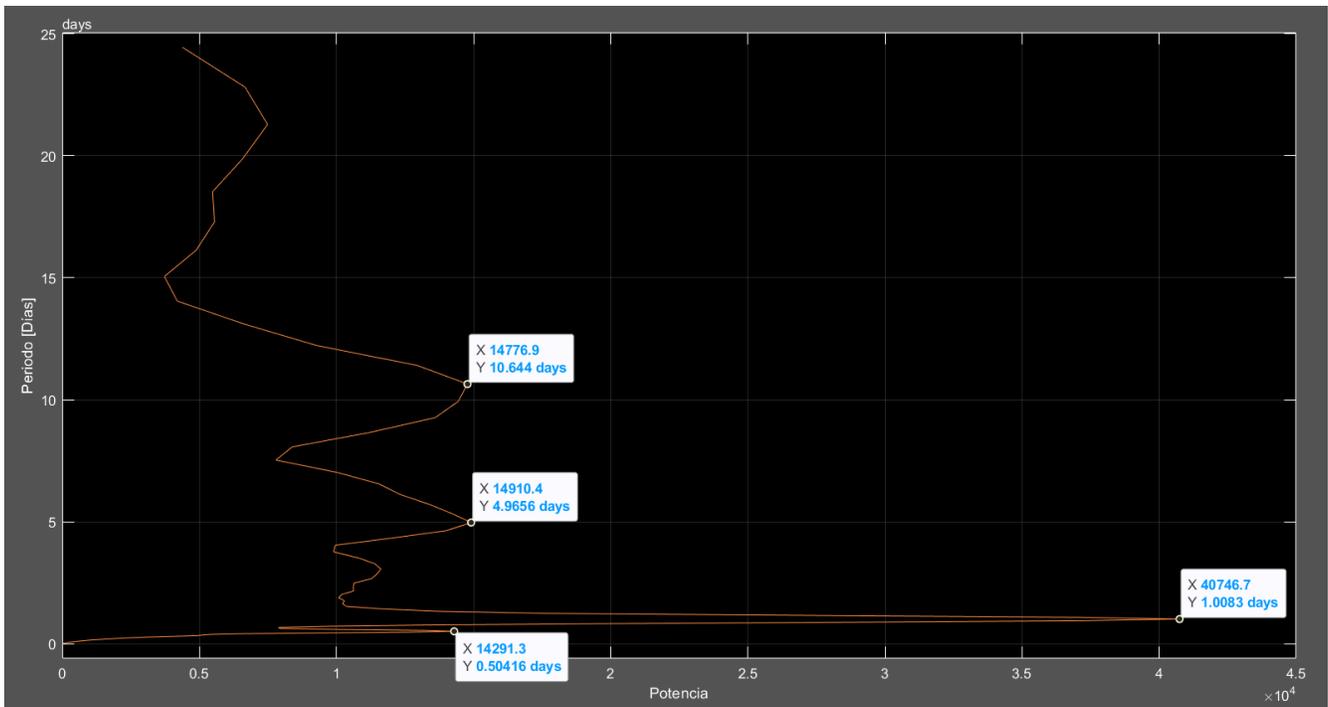


Fig. 91: Espectro Wavelet acumulado de la señal filtrada de UV-A.

Para elaborar un pronóstico, se requiere una serie de tiempo que contenga información suficiente del fenómeno analizado para poder crear el modelo y evaluarlo. En este trabajo se propone que para la creación de un pronóstico diario de radiación se utilicen mediciones de al menos una semana antes de la última medición, para crear un pronóstico semanal se utilicen las mediciones de por lo menos un mes anterior y para crear un pronóstico mensual se utilicen las mediciones de por lo menos 6 meses antes de la última medición.

En este caso en particular, se cuenta con mediciones de radiación de 3 meses, y, debido a la gran cantidad de recursos computacionales que este análisis requiere, se utilizó el último mes de mediciones (mes de agosto de 2022) para crear un pronóstico para la primera semana de septiembre de 2022. Esta serie de tiempo se utilizó para entrenar el arreglo de redes neuronales recurrentes (RNN) implementado en el software Matlab. La Figura 92 muestra, en color naranja, la serie de tiempo con la que se entrenó la red neuronal y en color azul, la curva del pronóstico generado a partir de este análisis inteligente. La Figura 93 muestra, la validación del modelo de pronóstico de radiación UV-A con los datos reales medidos por el instrumento, este modelo presenta un error cuadrático medio inicial de 21.41% y un error de 11.65% luego del ajuste al mismo con los valores reales medidos.

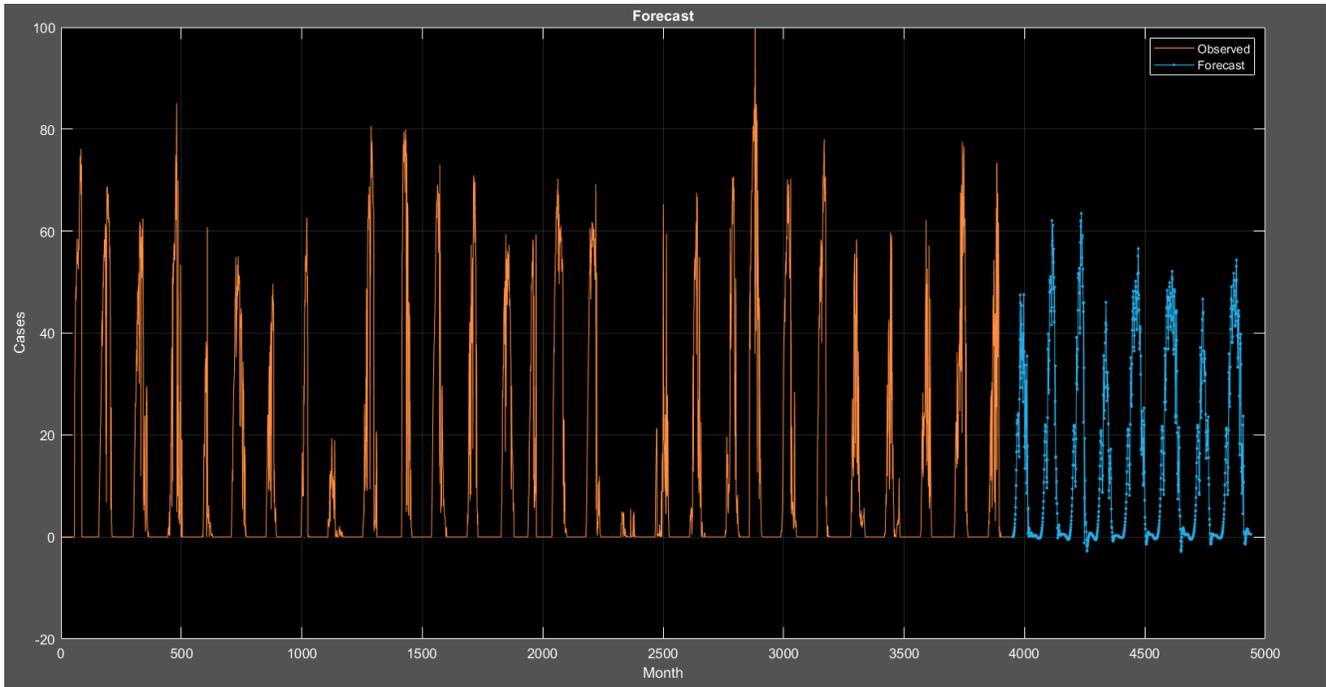


Fig. 92: Pronóstico de radiación UV-A (Del 26 de agosto de 2022 al 2 de septiembre de 2022).

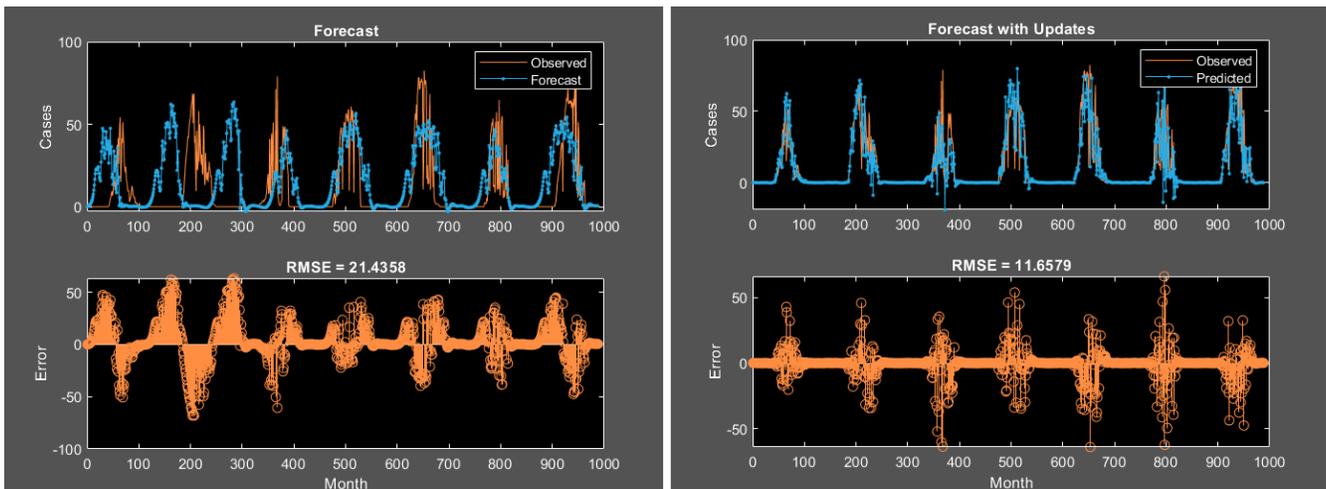


Fig. 93: Validación del modelo de pronóstico de radiación UV-A.

La Figura 94 muestra, curva de UV-B junto con su tendencia. La Figura 95 muestra, el espectro de Fourier de esta señal en el cual se pueden apreciar, además de la fundamental, componentes espectrales múltiples de la fundamental, así como procesos que modulan la señal en amplitud, estos aparecen como picos a los lados de las componentes armónicas fundamentales. Las Figuras 96 y 97 muestran, el espectro Wavelet y el espectro Wavelet acumulado respectivamente de esta señal, en ellas, se aprecian componentes espectrales de mayor frecuencia que la fundamental de 1 día.

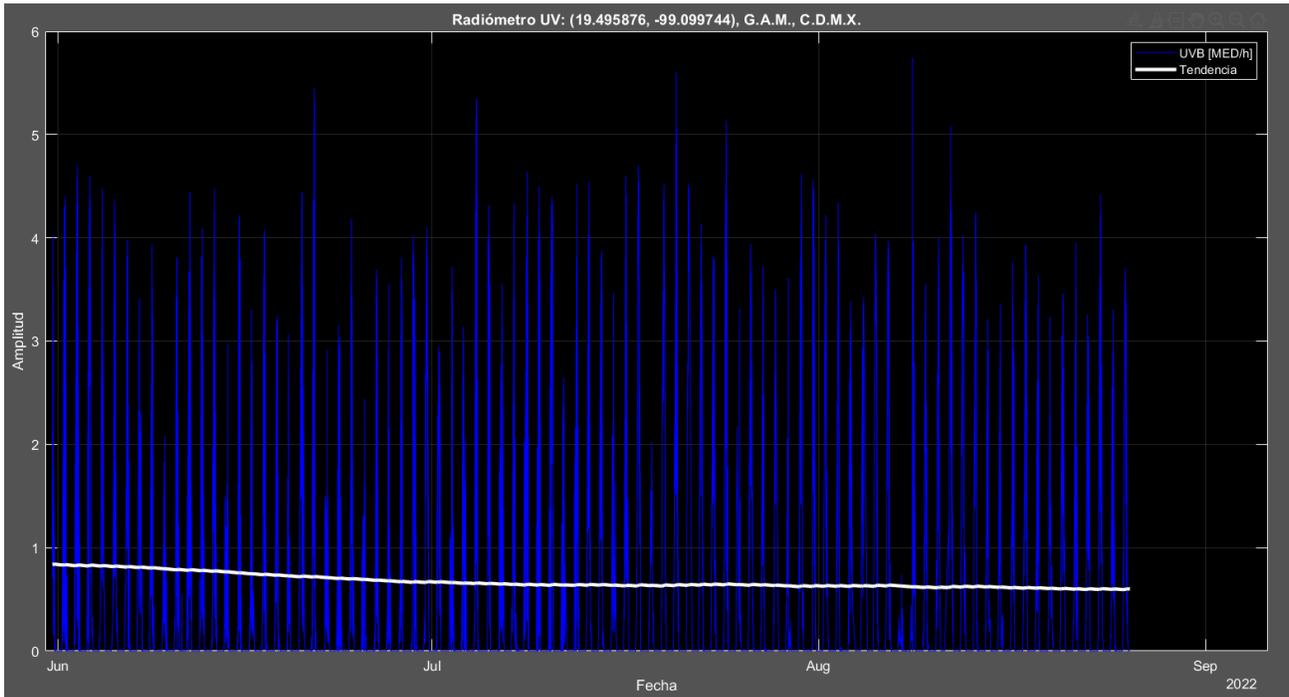


Fig. 94: Mediciones de radiación UV-B (31/05/2022 al 25/08/2022).

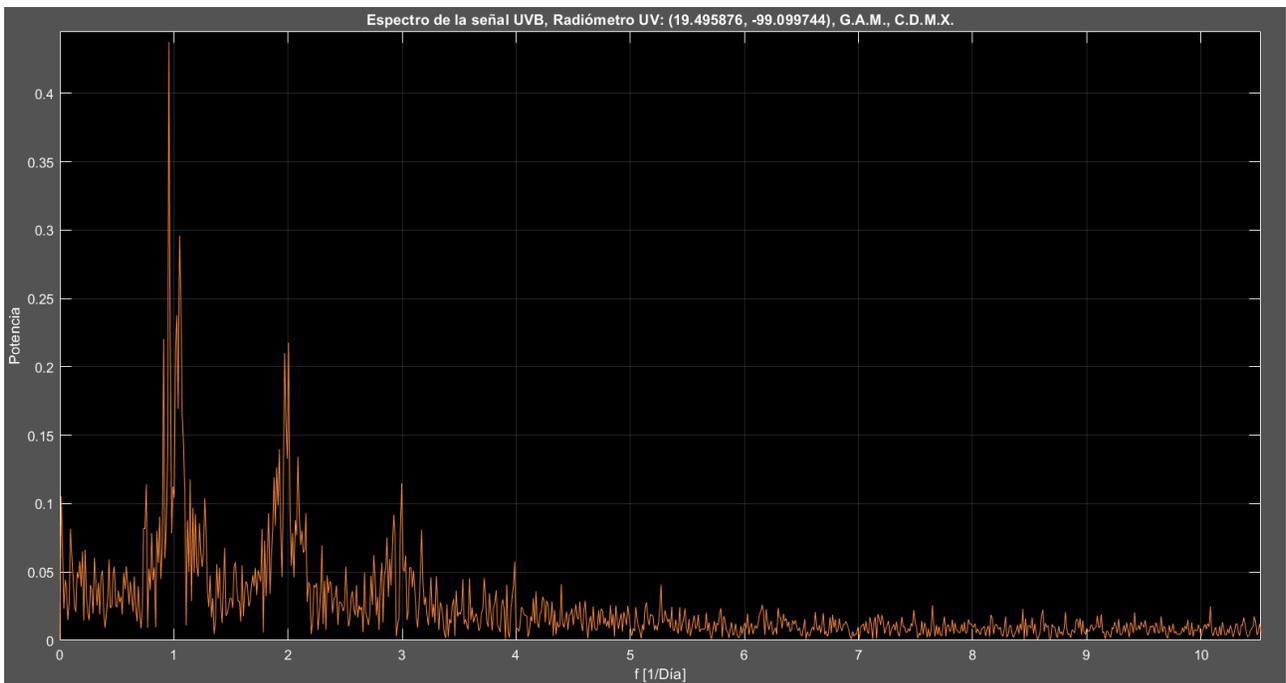


Fig. 95: Espectro de Fourier de la señal de UV-B.

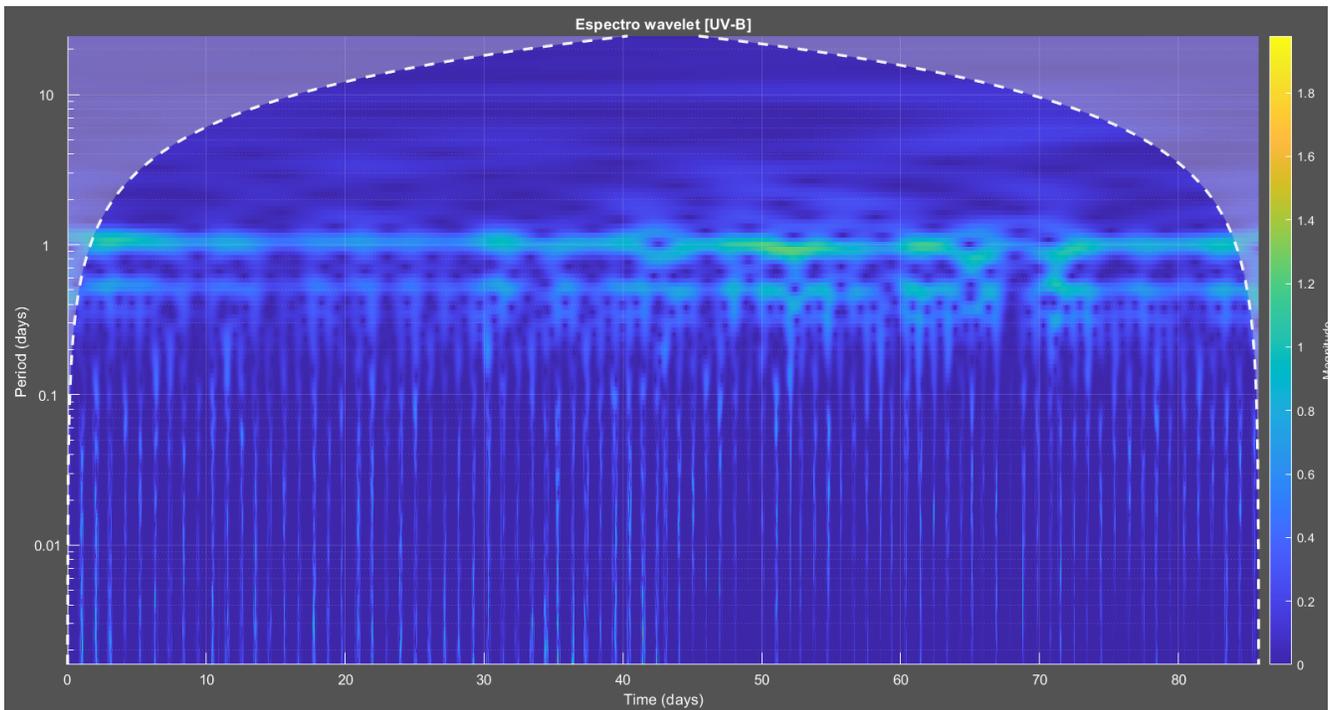


Fig. 96: Espectro Wavelet de la señal de UV-B.

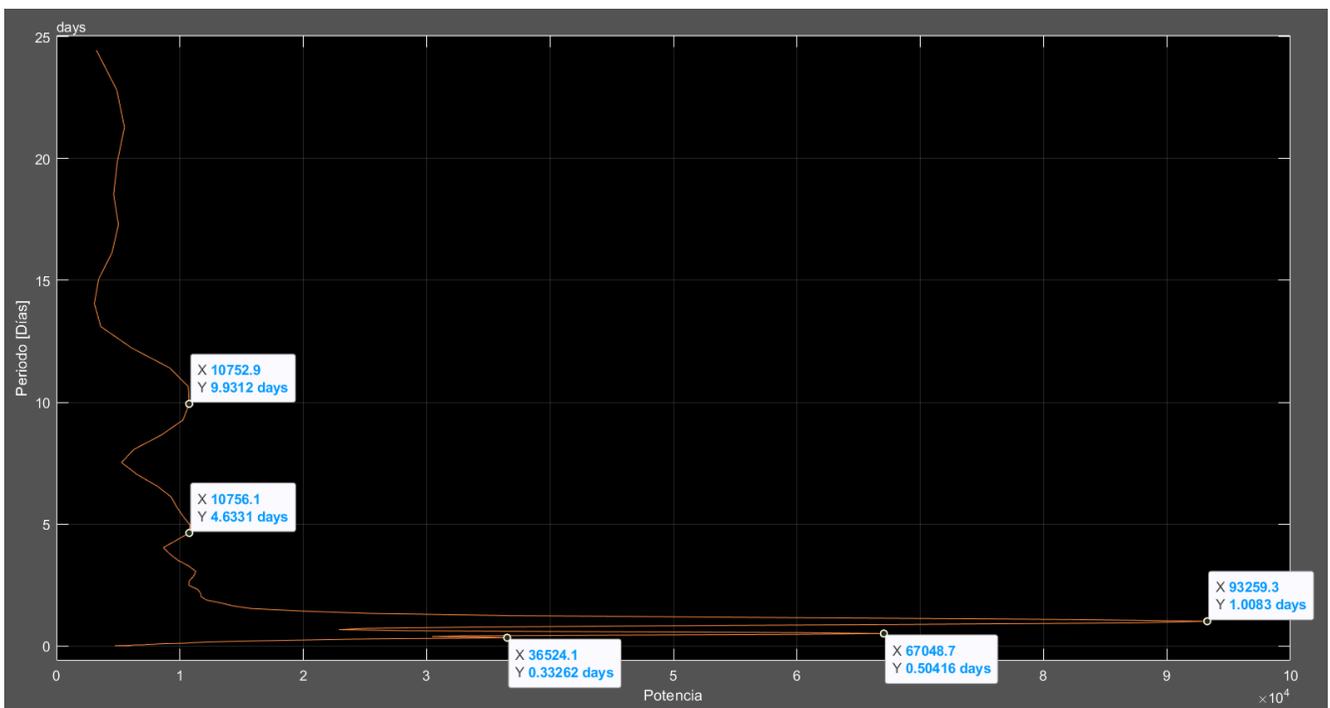


Fig. 97: Espectro Wavelet acumulado de la señal de UV-B.

La Figura 98 muestra, la curva suavizada de la señal original de UV-B, la cual mejora significativamente el análisis tiempo-frecuencia, la Figura 99 muestra, el espectro de Fourier y las Figuras 100 y 101, los espectros Wavelet y Wavelet Acumulado de esta señal.

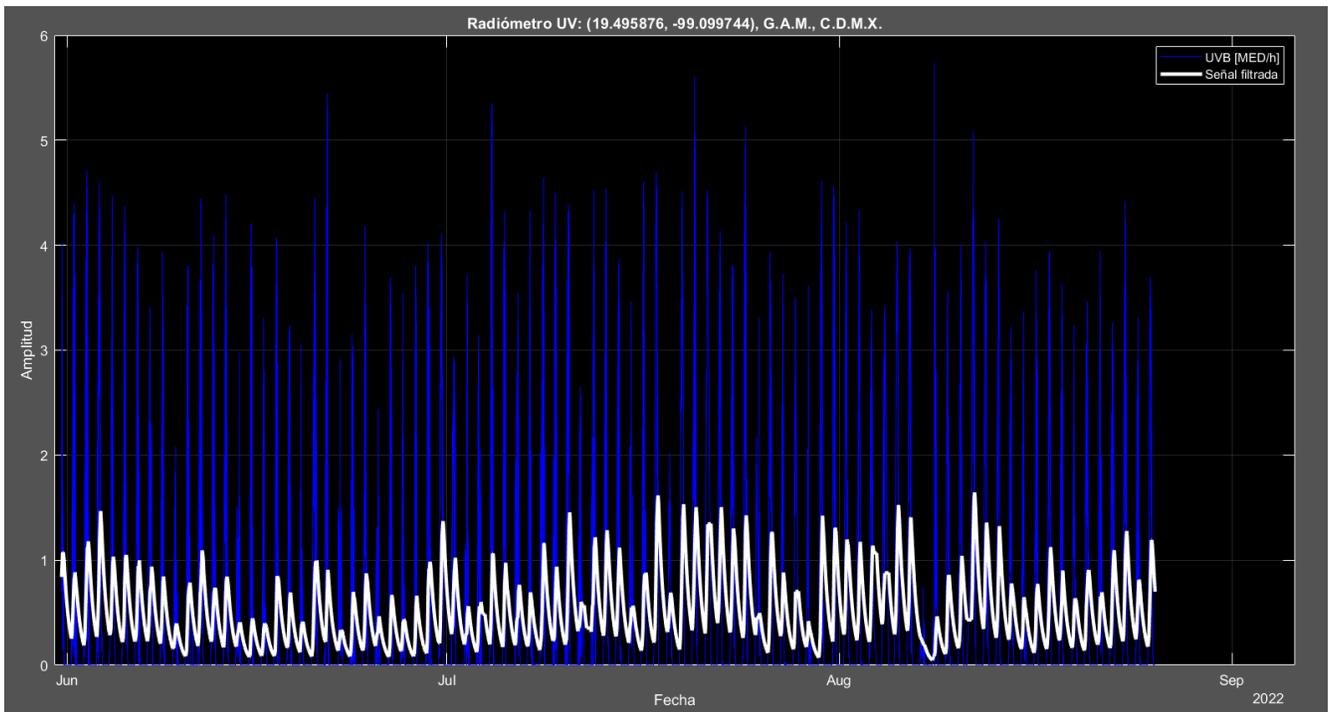


Fig. 98: Curva suavizada de la señal original de UV-B.

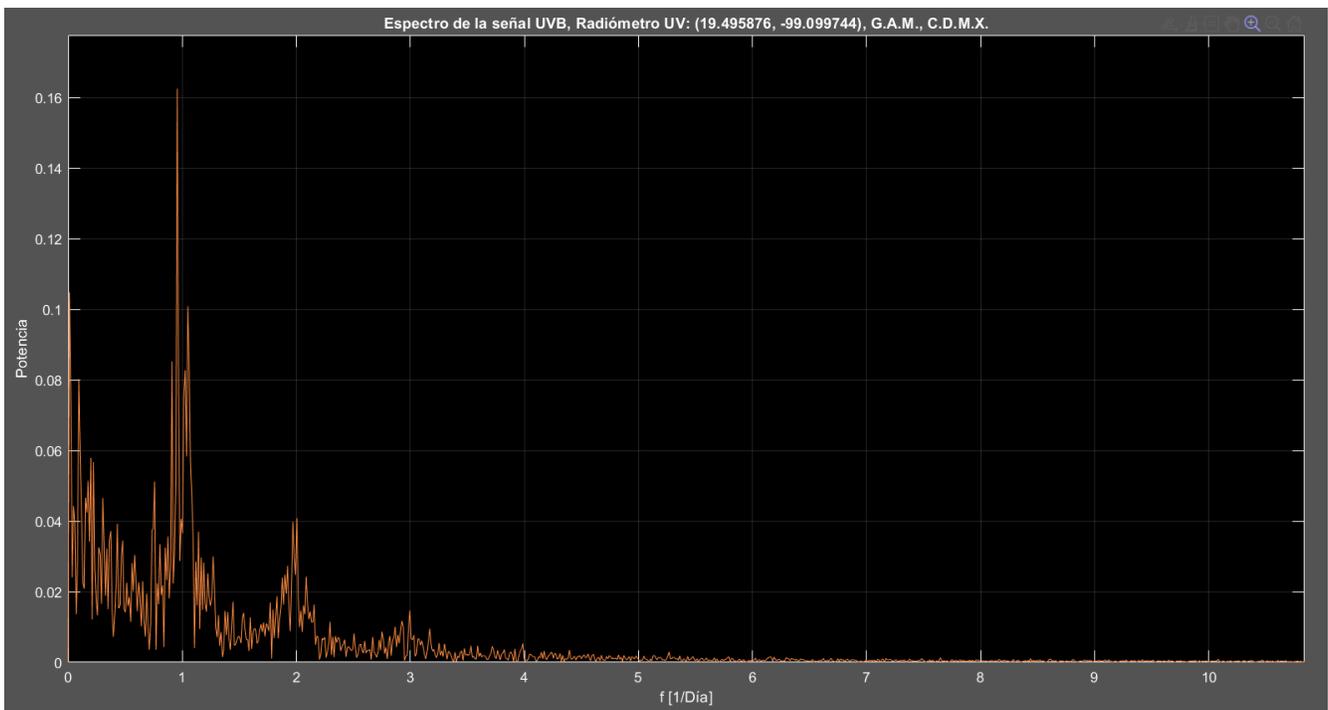


Fig. 99: Espectro de Fourier de la señal filtrada de UV-B.

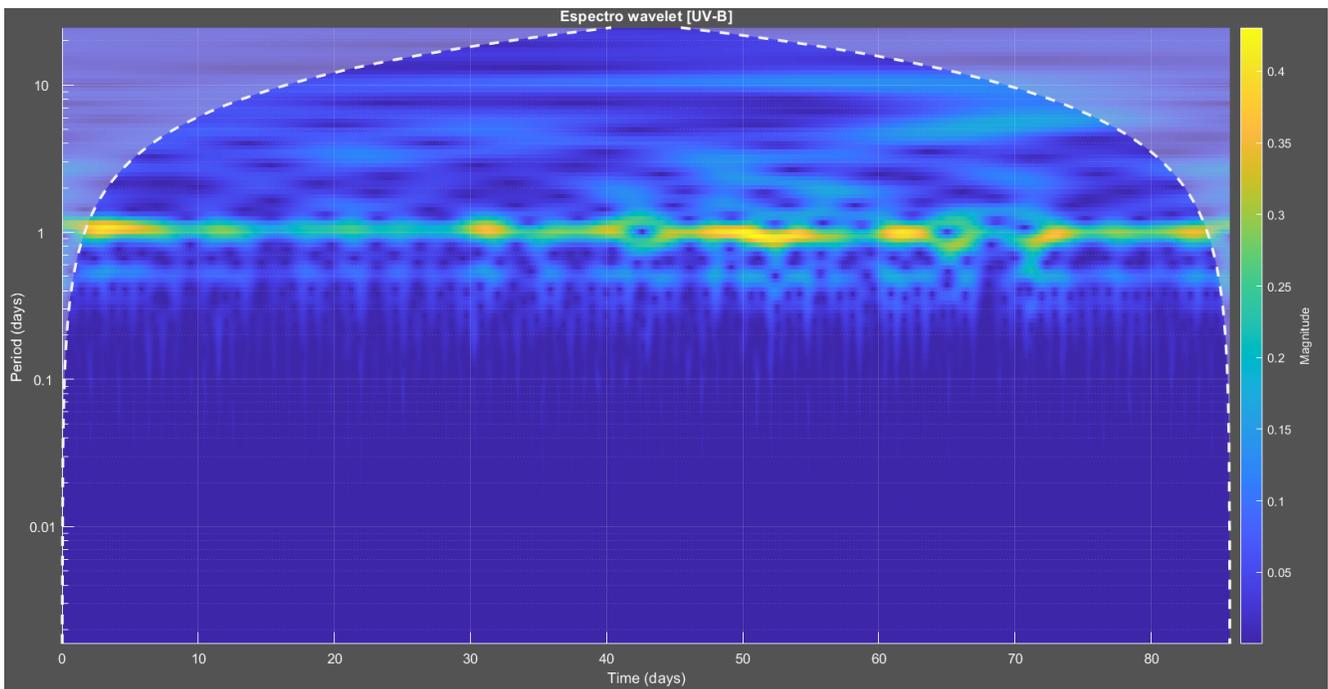


Fig. 100: Espectro Wavelet de la señal filtrada de UV-B.

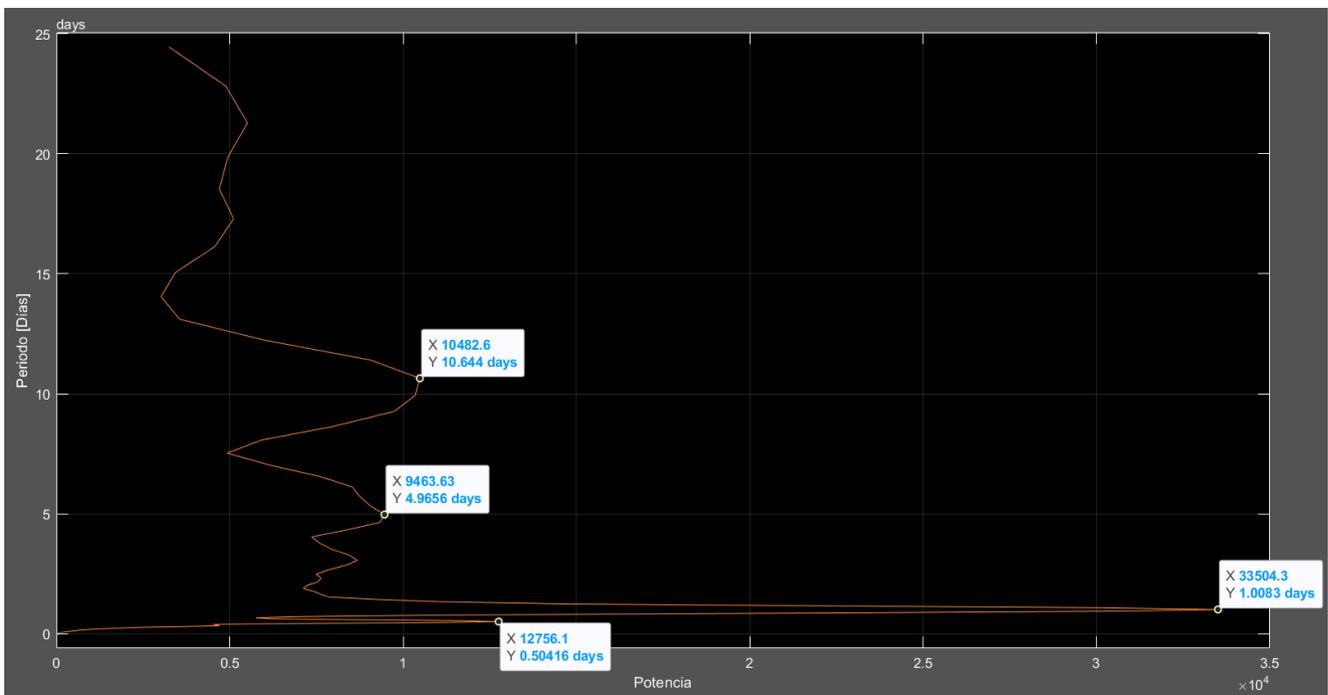


Fig. 101: Espectro Wavelet acumulado de la señal filtrada de UV-B.

La Figura 102 muestra, en color azul, el pronóstico de radiación UV-B generado para la primera semana de septiembre de 2022. La Figura 103 muestra, la validación del modelo de pronóstico de radiación UV-B con los datos reales medidos por el instrumento, este modelo presenta un error cuadrático medio inicial de 24.32% y un error de 7.98% luego del ajuste al mismo con los valores reales medidos.

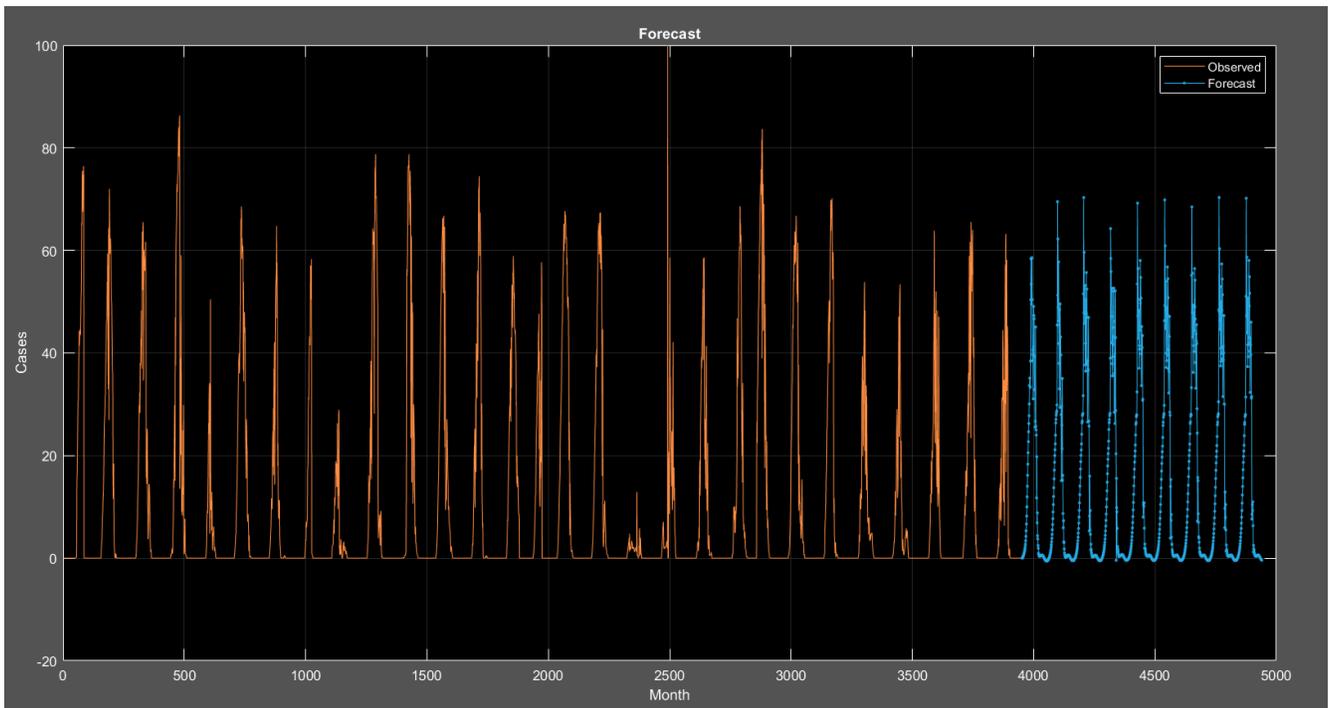


Fig. 102: Pronóstico de radiación UV-B (Del 26 de agosto de 2022 al 2 de septiembre de 2022).

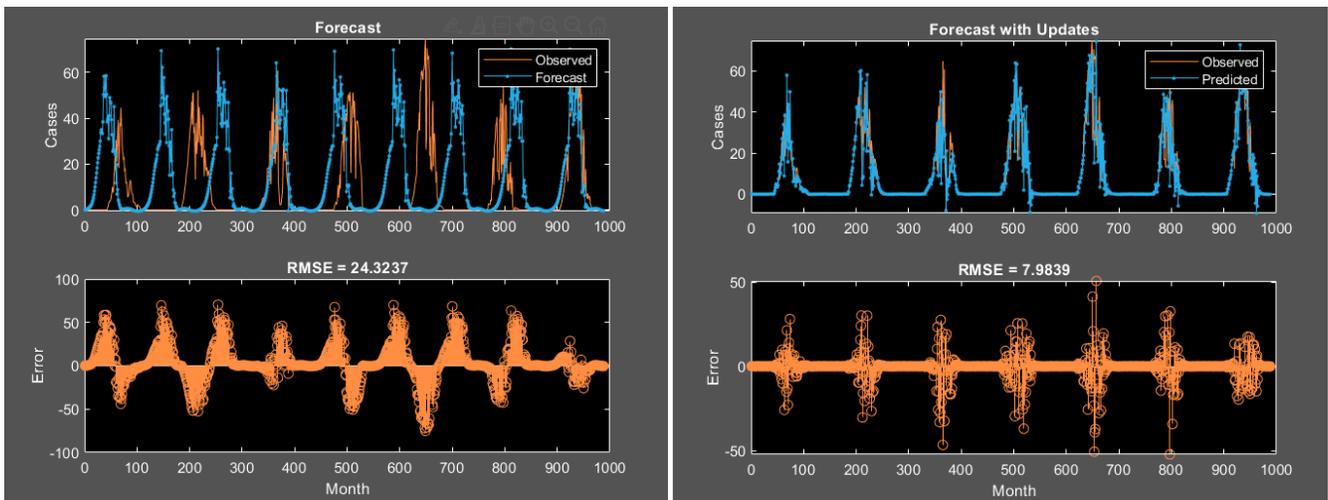


Fig. 103: Validación del modelo de pronóstico de radiación UV-B.

La Figura 104 muestra, curva de UV-C junto con su tendencia. La Figura 105 muestra, el espectro de Fourier de esta señal, este no contiene mayor información que la componente fundamental de 1 día, un múltiplo del doble de frecuencia, así como procesos que modulan la señal en amplitud, estos aparecen como picos a los lados de las componentes armónicas fundamentales. Las Figuras 106 y 107 muestran, el espectro Wavelet y el espectro Wavelet acumulado respectivamente de esta señal, en ellas, se aprecian estas componentes espectrales, así como algunas otras de mayor frecuencia debidas al ruido que provocan las nubes en las mediciones.

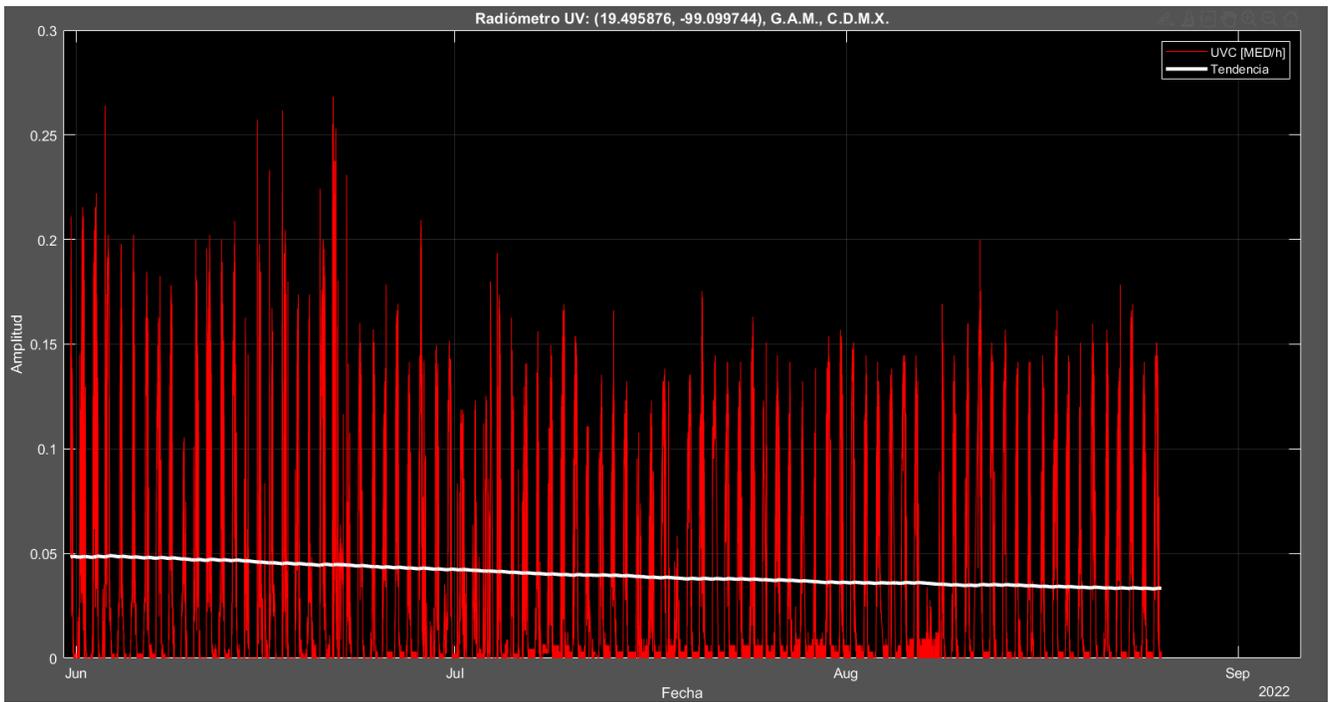


Fig. 104: Mediciones de radiación UV-C (31/05/2022 al 25/08/2022).

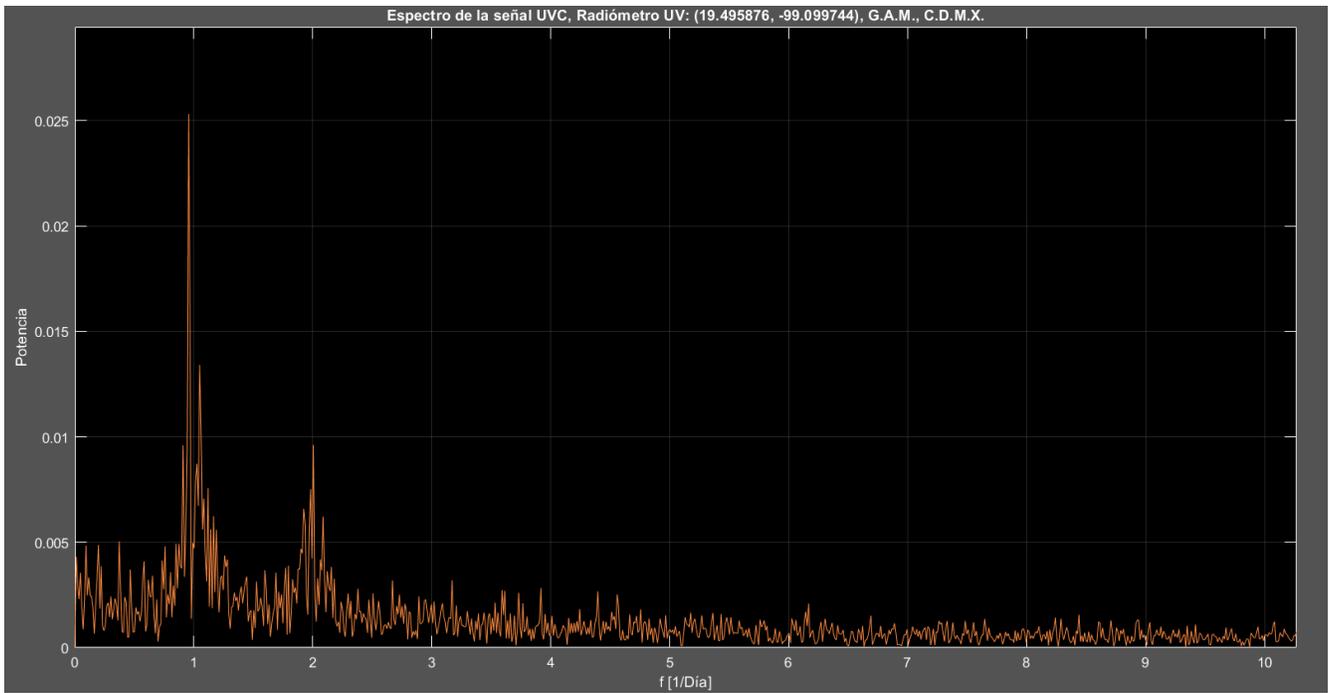


Fig. 105: Espectro de Fourier de la señal de UV-C.

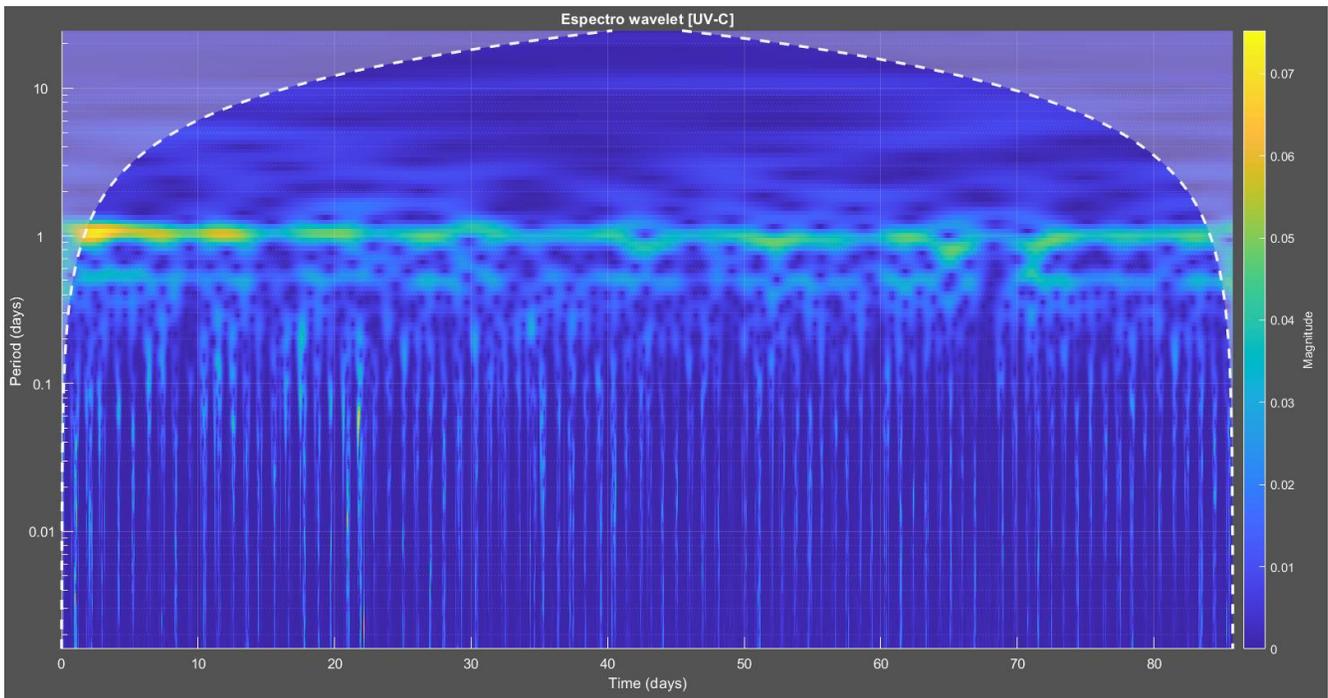


Fig. 106: Espectro Wavelet de la señal de UV-C.

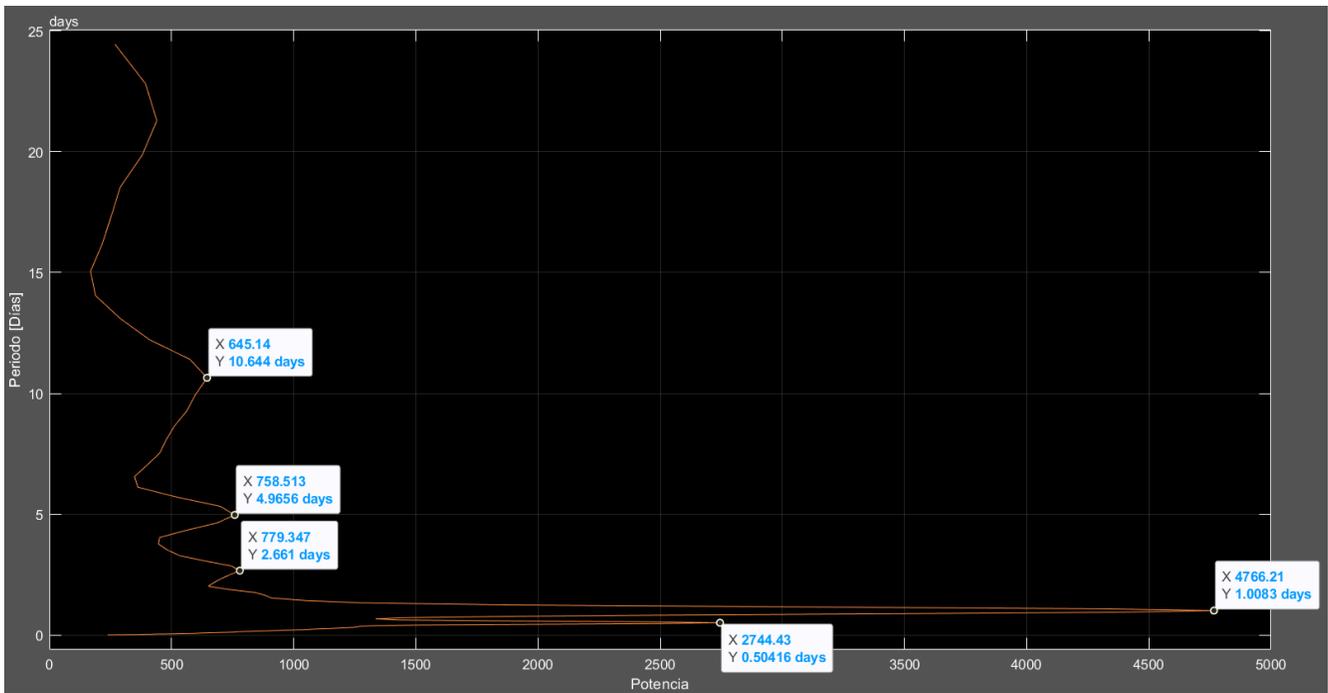


Fig. 107: Espectro Wavelet acumulado de la señal de UV-C.

La Figura 108 muestra, la curva suavizada de la señal original de UV-C, la cual mejora significativamente el análisis tiempo-frecuencia, la Figura 109 muestra, el espectro de Fourier y las Figuras 110 y 111, los espectros Wavelet de esta señal.

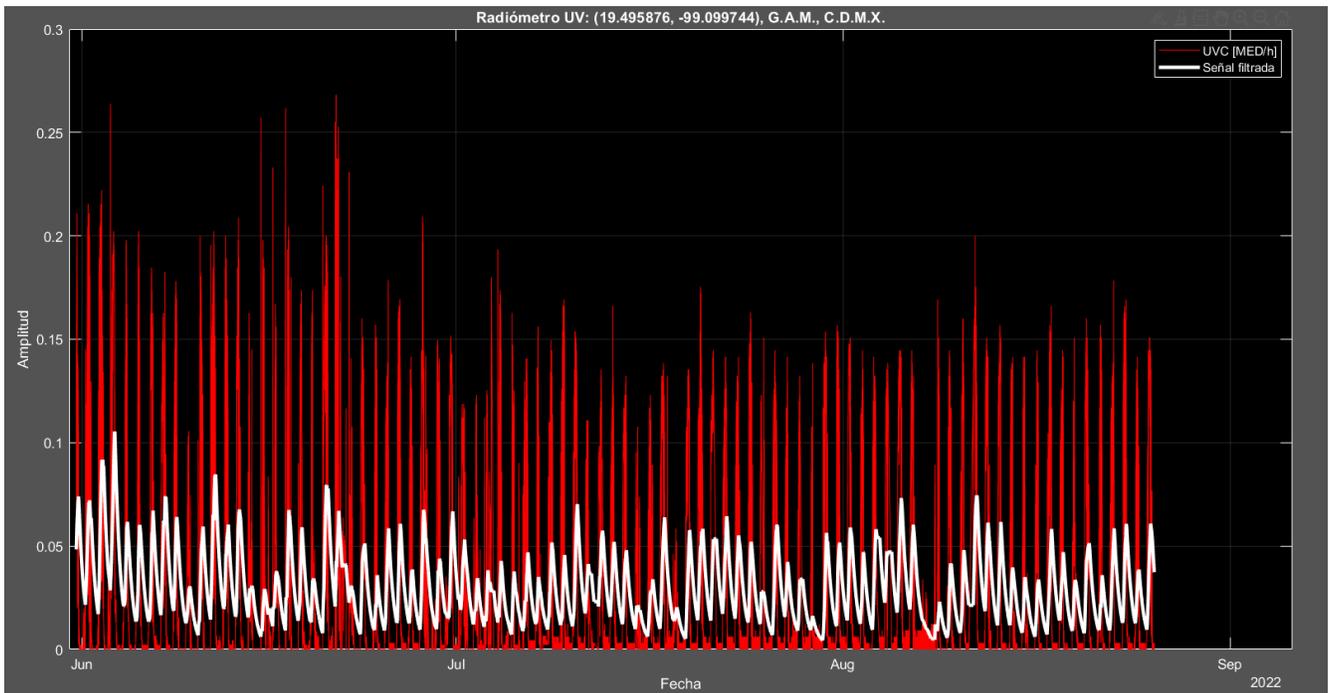


Fig. 108: Curva suavizada de la señal original de UV-C.

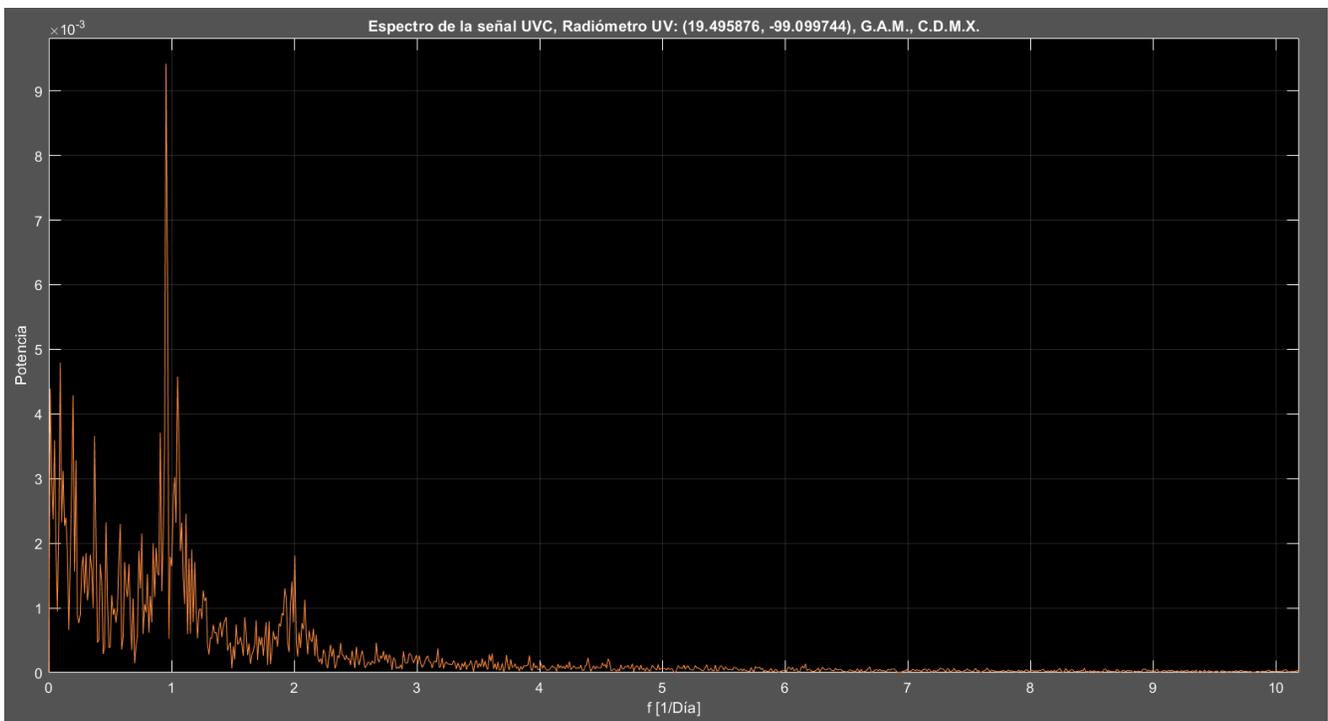


Fig. 109: Espectro de Fourier de la señal filtrada de UV-C.

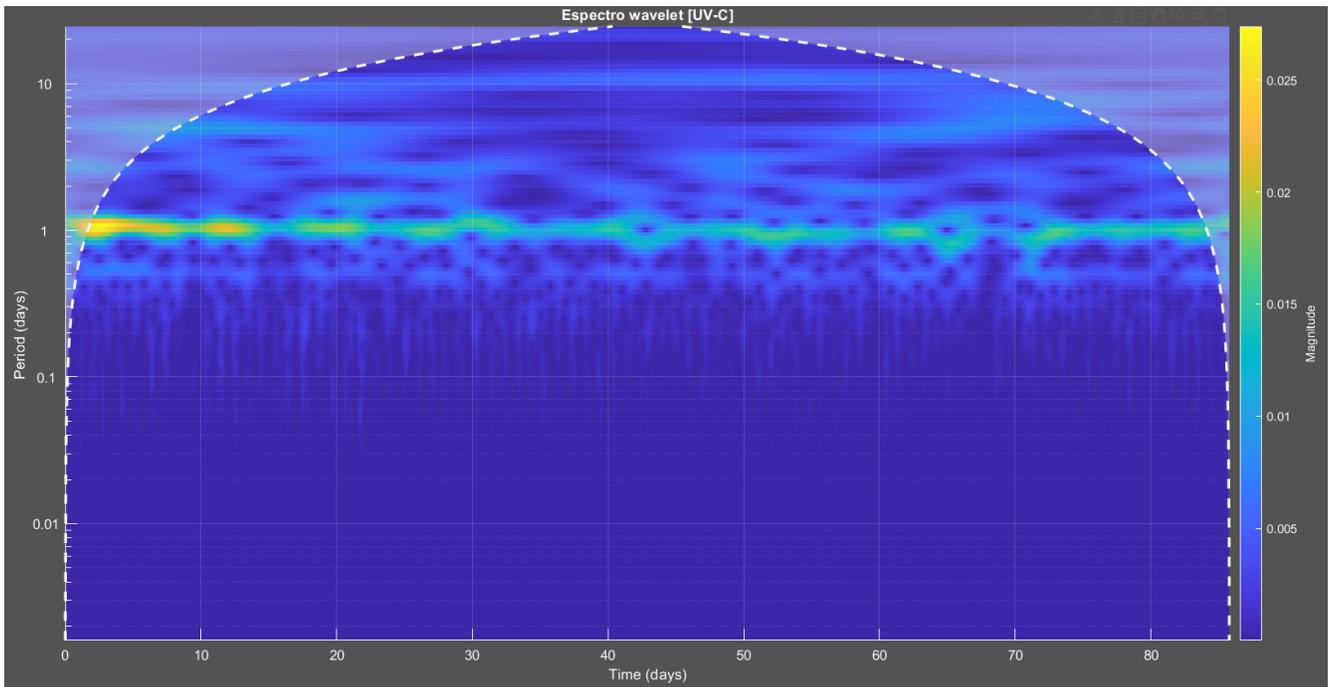


Fig. 110: Espectro Wavelet de la señal filtrada de UV-C.

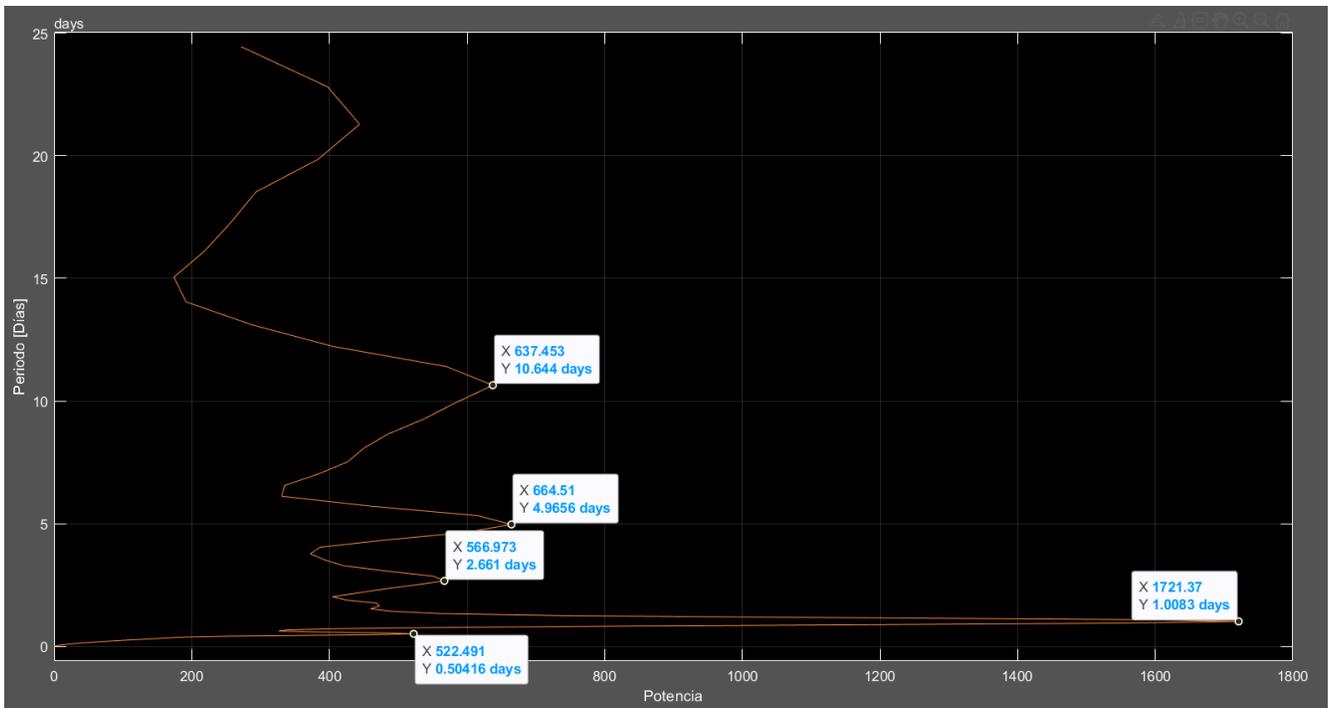


Fig. 111: Espectro Wavelet acumulado de la señal filtrada de UV-C.

La Figura 112 muestra, en color azul, el pronóstico de radiación UV-C generado para la primera semana de septiembre de 2022. La Figura 113 muestra, la validación del modelo de pronóstico de radiación UV-C con los datos reales medidos por el instrumento, este modelo presenta un error cuadrático medio inicial de 31.95% y un error de 13.27% luego del ajuste al mismo con los valores reales medidos.

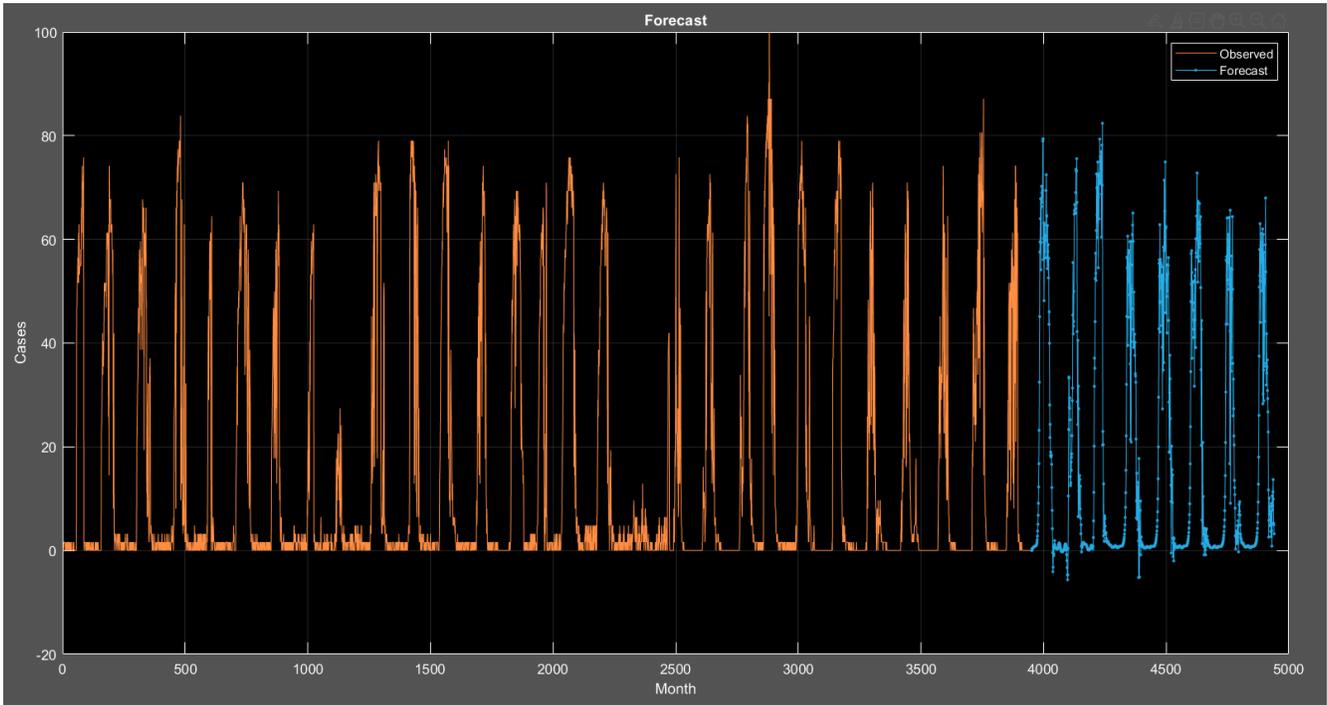


Fig. 112: Pronóstico de radiación UV-C (Del 26 de agosto de 2022 al 2 de septiembre de 2022).

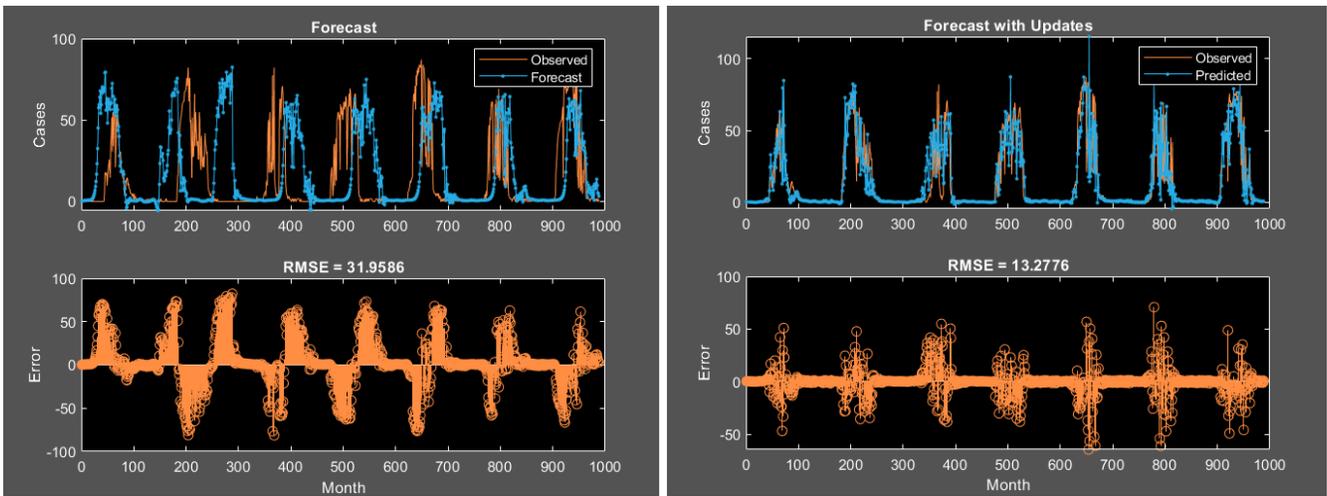


Fig. 113: Validación del modelo de pronóstico de radiación UV-C.

## 7. Conclusiones y discusión

De forma general, el proceso de creación de un instrumento dedicado a medir una variable física o química en específico, es un proceso complejo, debido a que involucra muchos aspectos a considerar, requiere fundamentalmente estudiar y comprender el fenómeno que se va a estudiar, requiere además conocimientos previos de física/química/matemáticas para entender cuál es el principio de operación de los sensores o transductores que se necesitan implementar para llevar a cabo la medición y desde luego, también requiere dominar las áreas de ciencia aplicada como son electrónica, mecánica y programación. Todo lo anterior, junto con un buen planteamiento del trabajo de investigación, aunado a un cronograma de actividades que incluya como primeras etapas la investigación de la teoría necesaria, es decir los fundamentos del proyecto, la investigación de los sensores o transductores disponibles en el mercado, junto con los otros componentes electrónicos y mecánicos que se van a utilizar, la parte de diseño, electrónico (acondicionamiento y adquisición de señales, subsistema de potencia, subsistema de comunicaciones, etc.) y mecánico (subsistema estructural y térmico, etc.), etapa de pruebas de funcionamiento, ajuste y validación de los datos obtenidos por el instrumento (calibración), pueden dar como resultado, el prototipo de un buen instrumento, lo suficientemente confiable y útil para resolver la tarea para la cual fue ideado en un principio.

El presente trabajo, se centró en el desarrollo de un sistema instrumental inteligente, el cual genera la información necesaria para estimar la radiación UV en sus diferentes intervalos de longitud de onda, por región de forma puntual. Se verificó el correcto funcionamiento de los distintos diseños electrónicos, mecánicos, así como de los algoritmos que se desarrollaron para este instrumento, en la tarea de poder estimar la radiación UV.

Debido a la inexistencia de un equipo de referencia para llevar a cabo la tarea de ajuste de datos de UV-C, estos deben tomarse con precaución, bajo la consideración de que la única forma de comprobar que efectivamente existe incidencia de este tipo de radiación en la zona de estudio es mediante, un equipo de referencia.

La implementación de un sistema de comunicación electrónica para un equipo que mide en el exterior engloba algunas consideraciones importantes, entre las cuales se encuentran, potencia de transmisión, frecuencia de la portadora, y velocidad de transmisión/recepción de la información. Implementar un algoritmo de detección y corrección de errores es altamente recomendable. Algunos módulos comerciales ejecutan automáticamente algoritmos de detección y corrección de errores.

No se está midiendo la radiación directa, difusa o global, simplemente se quería experimentar con los algoritmos para estimar la radiación UV. Los seguidores solares son muy caros, con un poco más de presupuesto, se podría mejorar significativamente la precisión del seguidor solar (mediante cálculos matemáticos), esto da la posibilidad de crear un seguidor confiable y mucho más económico a los comerciales para la tarea de medir la radiación solar directa, difusa y global.

El subsistema de apuntamiento solar, basado en un arreglo instrumental de fototransistores, presenta alta sensibilidad a la presencia de nubes, debido a que cuando las nubes tapan al Sol, la radiación se dispersa y esto provoca que sea más complicado que el subsistema de apuntamiento pueda alinearse con el vector de poynting solar ya que se vuelve menos directivo y, por lo tanto, incrementa el error. Una forma de corregir esto es apuntar al Sol utilizando componentes no ópticos; sino mediante ecuaciones de movimiento solar. Para ello, se propone la implementación de un programa desarrollado en lenguaje C debido a la compatibilidad de arquitectura con un microcontrolador. (ver apéndice A.1).

Una forma de desplegar la información medida por el instrumento es mediante una página web, en la cual, el usuario pueda acceder a la misma desde cualquier lugar. En el apéndice A.2 se presenta una propuesta de diseño para desplegar la información de forma local.

El análisis tiempo-frecuencia, engloba técnicas para el estudio de series de tiempo, así como la implementación de filtros digitales, los cuales ayudan a eliminar componentes espectrales de alta o baja frecuencia que se inducen en la señal (ver apéndice A.3).

En los últimos años los recursos computacionales y tecnológicos han incrementado la capacidad de cálculo, memoria y velocidad, esto ha permitido que algoritmos complejos como las Redes Neuronales sean implementadas para resolver tareas científicas. En particular, en este trabajo se implementaron arreglos de Redes Neuronales Recurrentes (RNN), los cuales aproximan una función matemática no lineal de múltiples variables de entrada, utilizando arreglos de capas de células de memoria conectadas en cascada. Este análisis inteligente permite la predicción de datos (ver apéndice A.4), así como reconstrucción de datos faltantes en series de tiempo. Esto puede mejorar notablemente, la precisión de la información obtenida mediante el análisis tiempo-frecuencia (ver apéndice A.4).

## Apéndices

### A.1. Calculadora Solar

En el curso especializado de Medición y Evaluación del Recurso Solar, que se imparte en la Sección de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el Dr. David Riveros Rosas y la Mtra. Adriana Elizabeth González Cabrera, se realizó un programa en lenguaje C, el cual calcula la posición del Sol, respecto a la ubicación geográfica, fecha y hora. Se obtuvo un error de  $\pm 5^\circ$  debido a que no considera el movimiento de nutación de la Tierra. En la figura 114 se muestra el programa corriendo en consola y el código correspondiente se muestra a detalle en el portafolio de evidencias (apéndice A.5).

```
Radiometro UV (2021, KRMC, ICAT-UNAM)
Este programa es una calculadora solar  IGEF-UNAM  ICAT-UNAM  FI-UNAM  (2022, KRMC)

          ***** Parametros de entrada *****

CDMX   Lat = 19.428471      Long = -99.127663      GMT-6   30/8/2022   16:5:15      n = 240

El angulo de declinacion 'delta' es: 9.225827
El angulo diario 'B' es: 235.571121
Ecuacion de tiempo, el valor de 'E' es: -1.684718
Tiempo estandar: 16.087500
Tiempo solar: 15.450910
Hora solar: 15:27:3
Angulo horario de alba y ocaso: 93.284299
Horas de sol: 12.437906
Angulo horario 'omega': 51.763645
Angulo cenital 'theta': 39.009100
Angulo acimutal 'gamma': 265.778381

-----
Process exited after 0.02469 seconds with return value 0
Presione una tecla para continuar . . .
```

Fig. 114: Calculadora Solar.

### A.2. Servidor local para el registro de datos de Radiación UV

Debido a que la computadora donde se registran los datos de radiación en un archivo de texto tabulado permanece encendida las 24h del día con conexión a internet, se propuso la idea de mostrar los datos en una página web sencilla. Configurar la computadora como servidor externo para montar la página en la web y poder acceder a ella desde cualquier lugar es una tarea que requiere conocimiento en computación y sobre todo tiempo, en el presente trabajo, debido a la falta de tiempo, ya no se pudo configurar la computadora para este propósito, pero si se pudo configurar como servidor local a través del entorno XAMPP, el cual es una distribución de Apache gratuita que puede ejecutar códigos de PHP. La Figura 115 muestra, la forma en que esta página sencilla despliega la información y el código en PHP se presenta, en su sección correspondiente dentro del portafolio de evidencias.

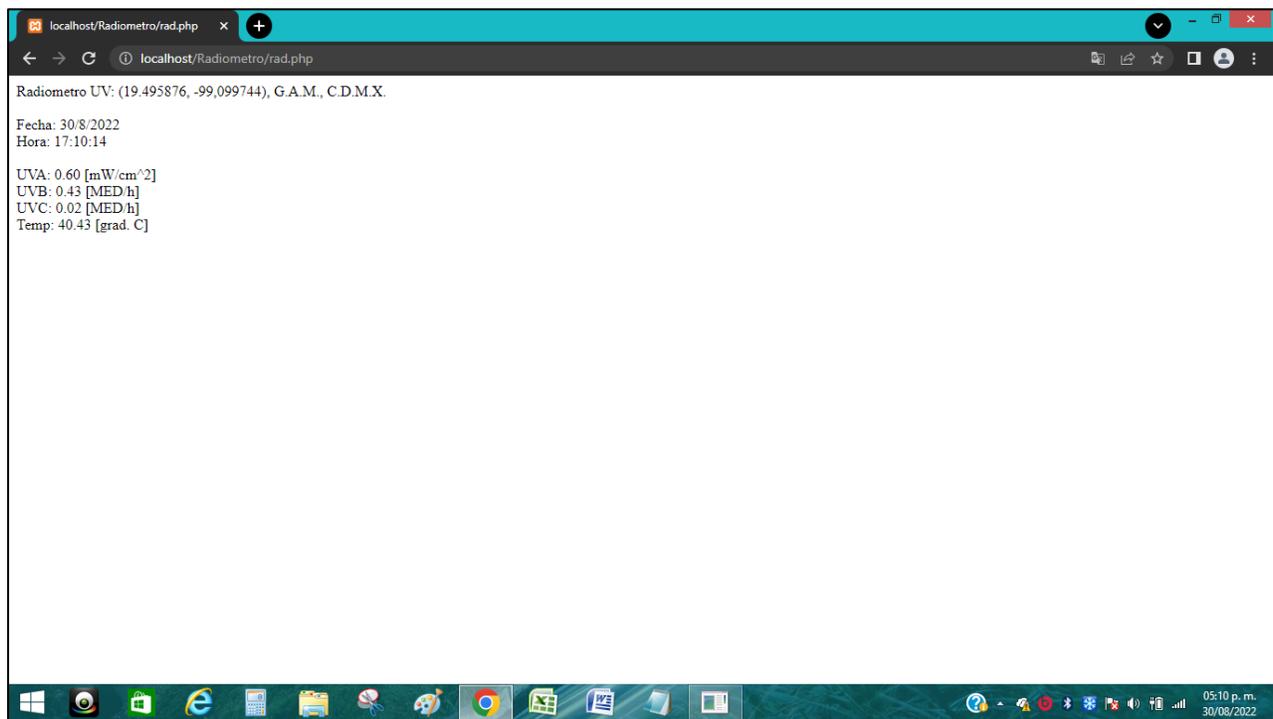


Fig. 115: Página web sencilla en PHP para el despliegue de la información.

### A.3. Análisis de Radiación UV-A de 2000 a 2020, mediciones del SIMAT, CDMX

Se realizó un análisis de datos con mediciones de radiación UV-A desde el año 2000 hasta el año 2020 proporcionados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México [7]. Se aplicó la transformada de Fourier y Wavelet. Los resultados se presentan en las Figuras 116- 120.

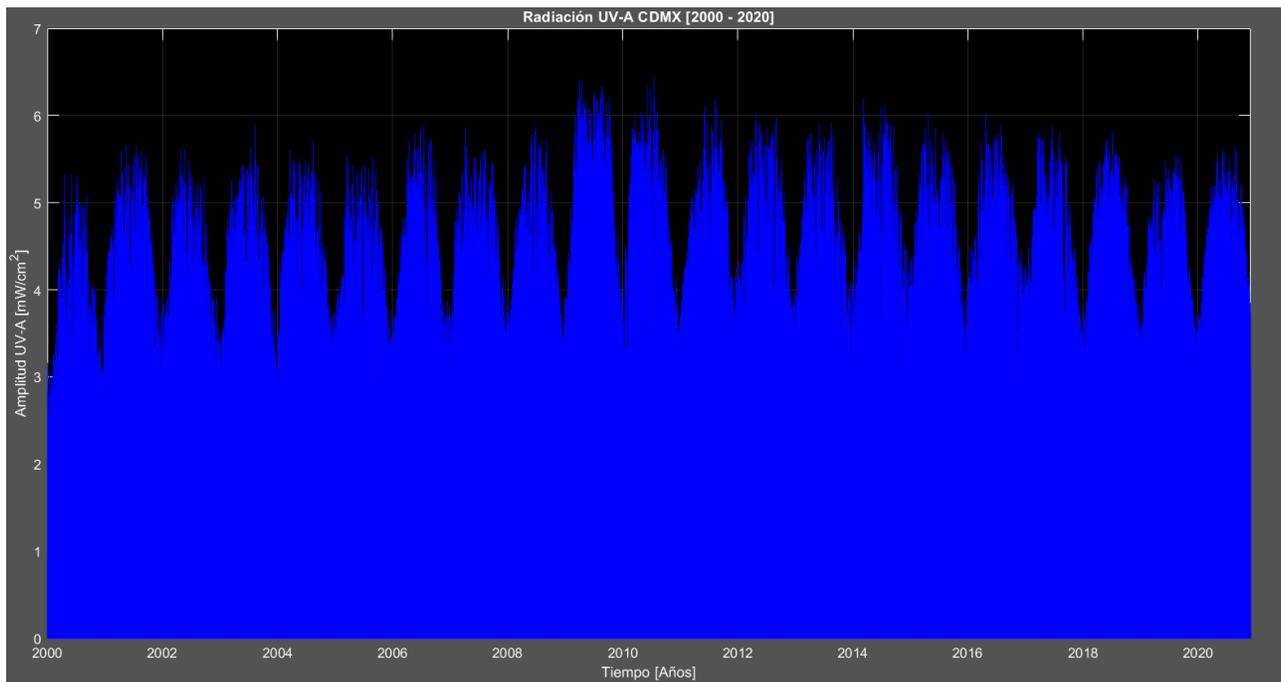


Fig. 116: Serie de tiempo de radiación UV-A del año 2000 al 2020 en la Ciudad de México.

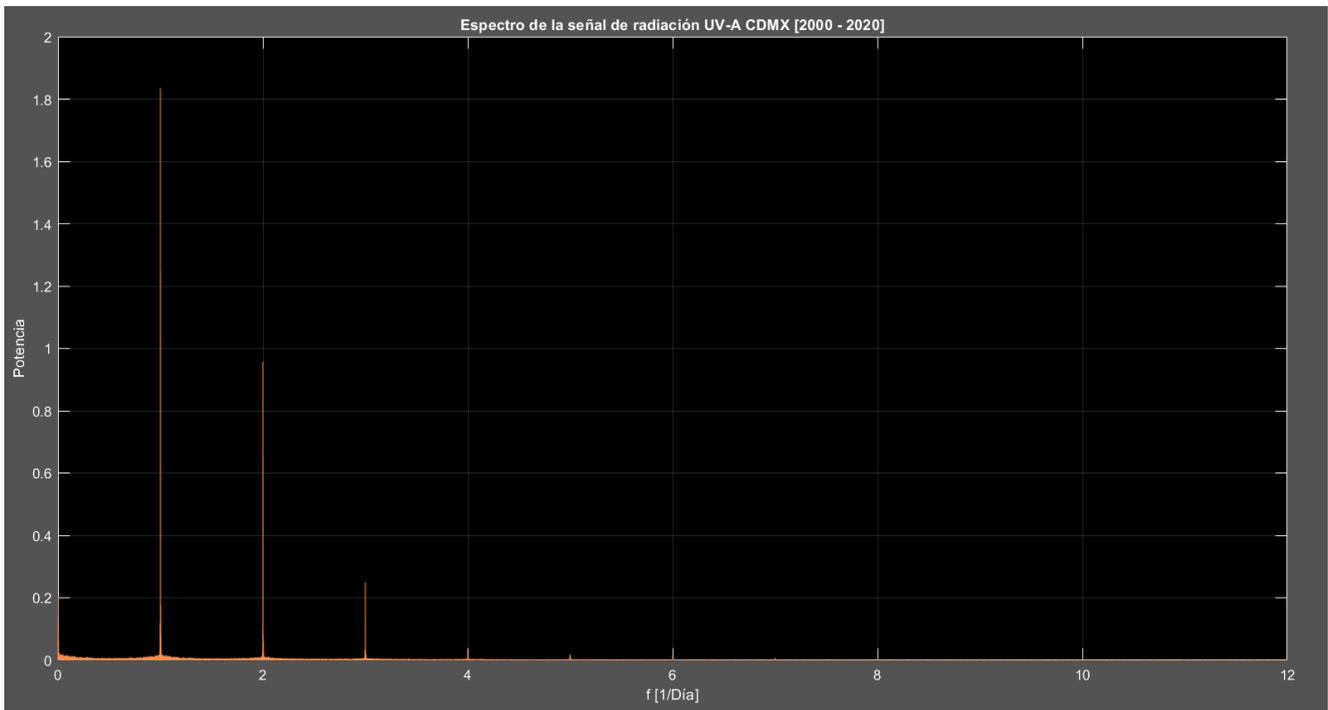


Fig. 117: Espectro de Fourier de la serie de tiempo de radiación UV-A del año 2000 al 2020, CDMX.

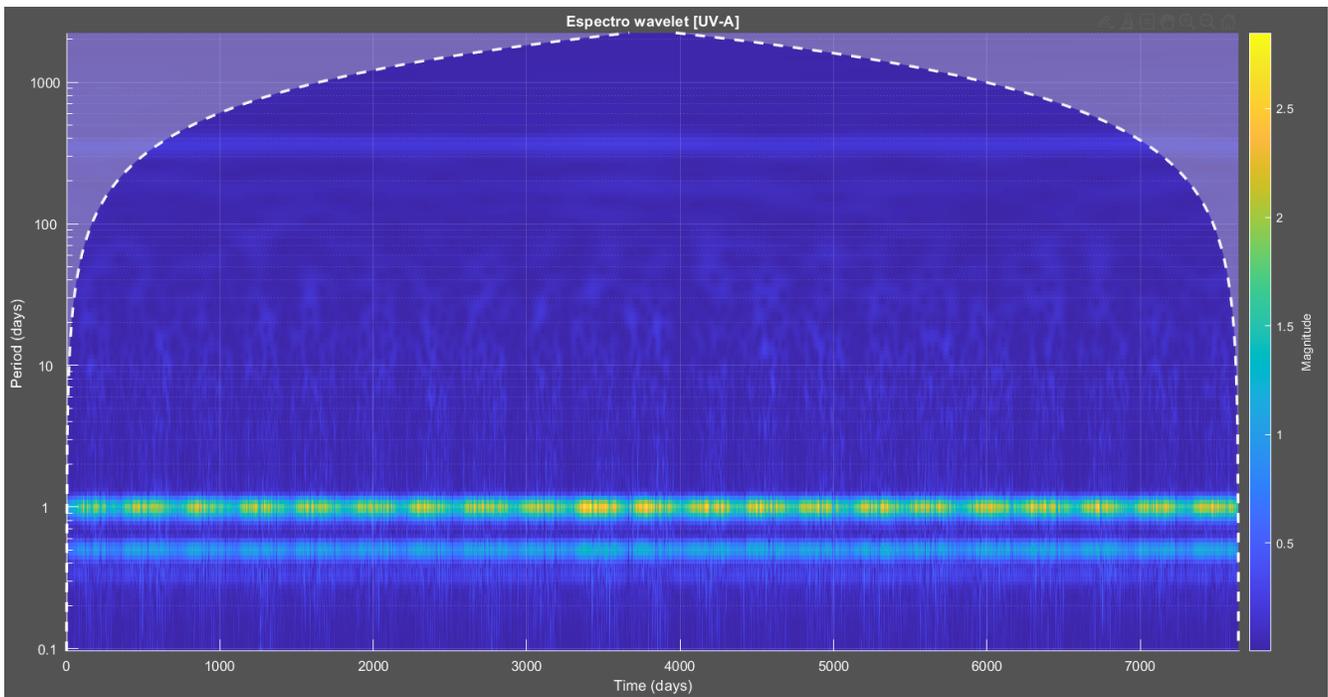


Fig. 118: Espectro Wavelet de la serie de tiempo de radiación UV-A del año 2000 al 2020, CDMX.

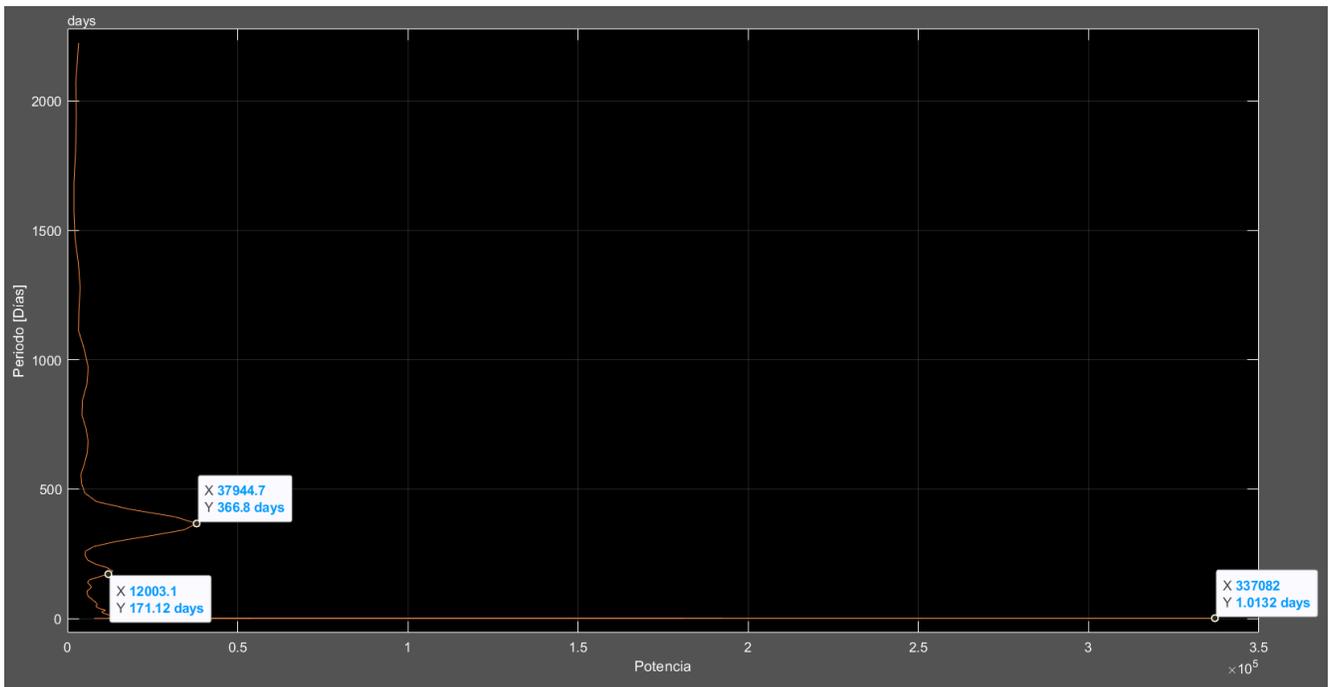


Fig. 119: Espectro Wavelet acumulado de la serie de tiempo de radiación UV-A del año 2000 - 2020, CDMX.

Derivado de este análisis, se identificaron los meses de marzo a octubre son los meses con mayor incidencia de radiación UV durante el día, siendo junio-julio en los cuales se ha registrado el valor máximo en amplitud de este tipo de radiación.

#### A.4. Análisis de Irradiancia Solar Total de 2003 a 2020, pronóstico para 2023

Este análisis, consistió en ajustar los parámetros de funcionamiento (número de neuronas y ciclos de entrenamiento) de una Red Neuronal Recurrente (RNN) implementada en el software Matlab. Con el objetivo de reconstruir un conjunto de datos faltantes durante un intervalo de tiempo, así como realizar un pronóstico utilizando una serie de tiempo de Irradiancia Solar Total (TSI) proporcionada por el proyecto Solar Radiation & Climate Experiment de la universidad de Colorado Boulder, los resultados se muestran a continuación.

Los datos en crudo proporcionados por el satélite se muestran en la Figura 120. Estos requieren de un análisis completo para poder obtener información útil de las mediciones de TSI proporcionadas por el satélite. Se realizó una interpolación temporal reemplazando los valores registrados como 0 por el valor promedio de TSI en toda la serie de tiempo, el cuál es de 1,360.9 [W/m<sup>2</sup>] (ver Fig. 121).

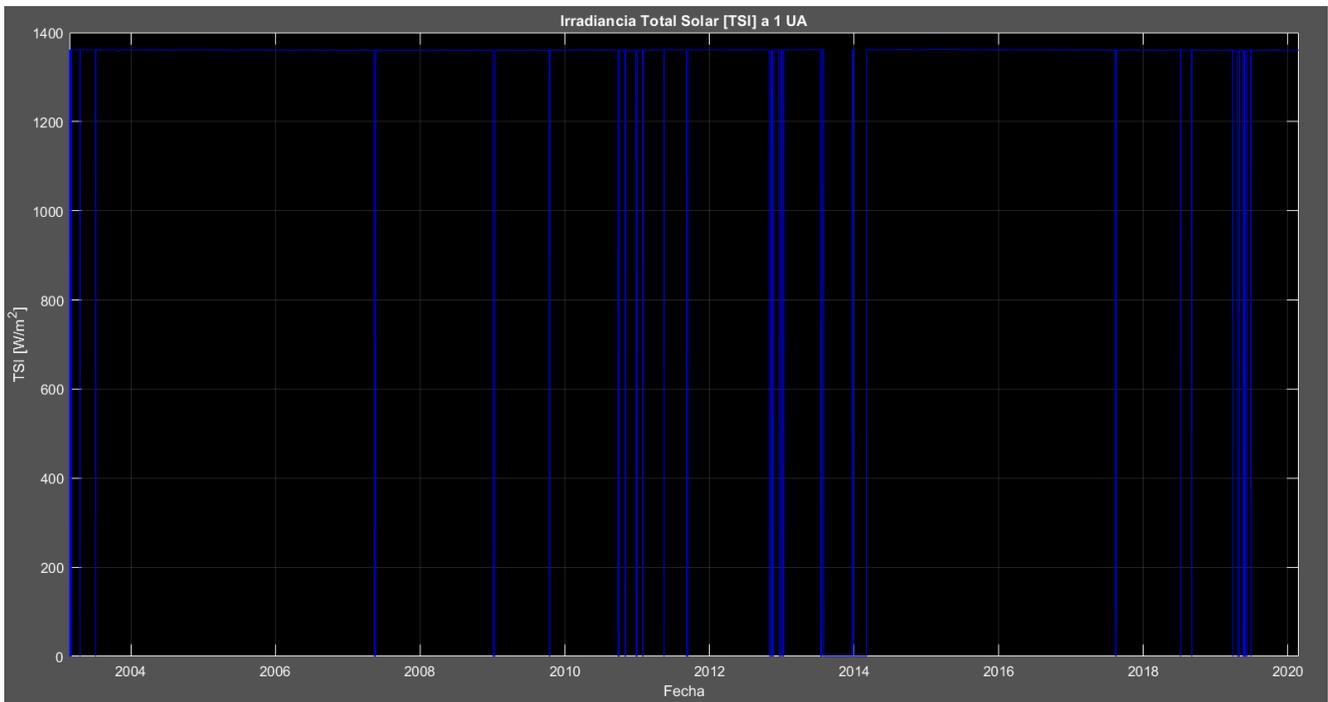


Fig. 120: Irradiancia Solar Total, datos arrojados por el satélite.

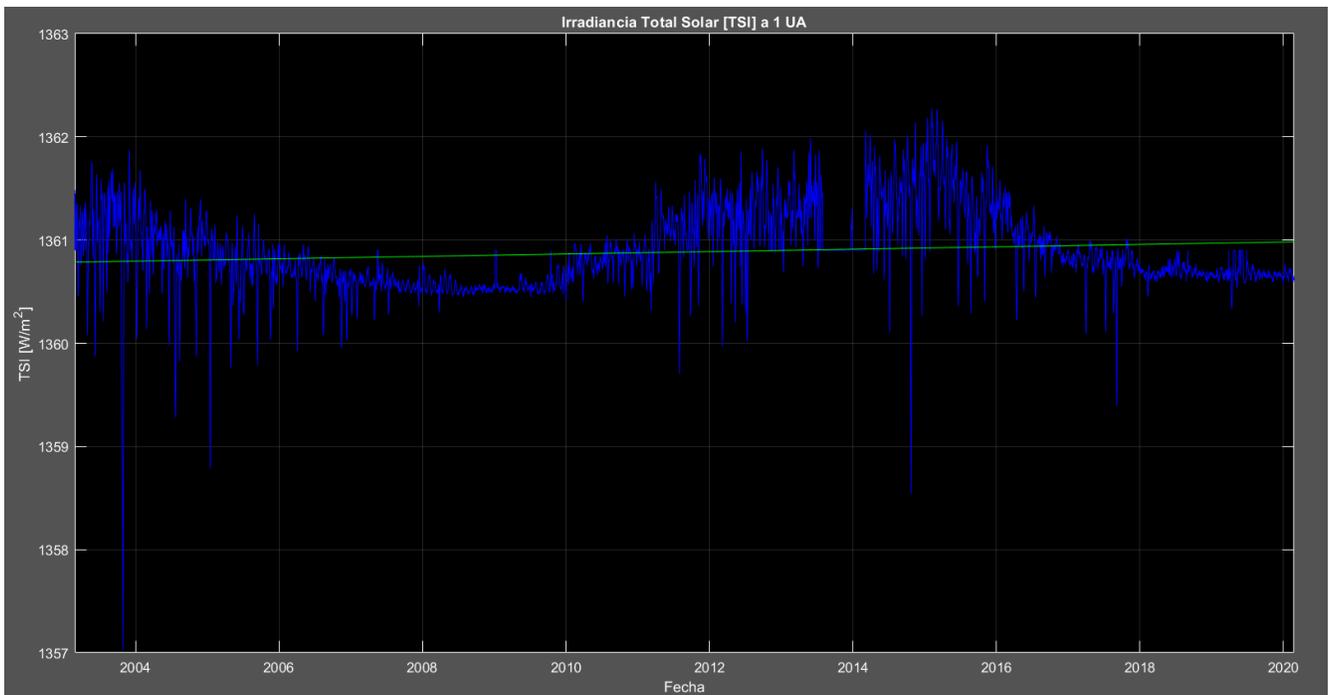


Fig. 121: Irradiancia Total Solar, después de la interpolación temporal (en color verde la tendencia).

Posteriormente, con el análisis antes mencionado, se hizo notorio que, del periodo del 31 de julio de 2013 al 04 de marzo de 2014, el instrumento no registró alguna medición de TSI (Fig. 121), por lo que fue necesario reconstruir estos datos faltantes haciendo uso de una Red Neuronal Recurrente (ver Fig. 122), asimismo, se generó un pronóstico de TSI para los 3 años próximos a partir de la última medición en la serie de datos, la cual corresponde del 25 de febrero de 2020 al 02 de julio de 2023 (Fig.123).

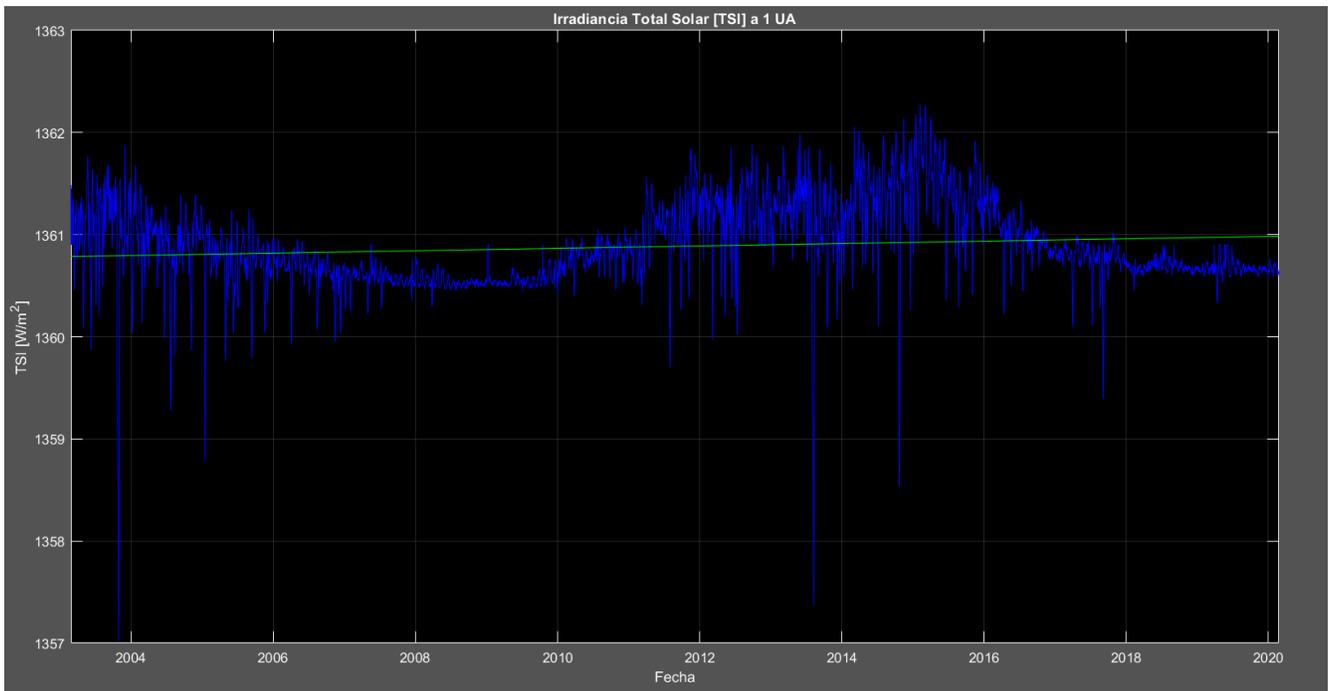


Fig. 122: Irradiancia Total Solar, datos reconstruidos mediante RNN (en color verde la tendencia).

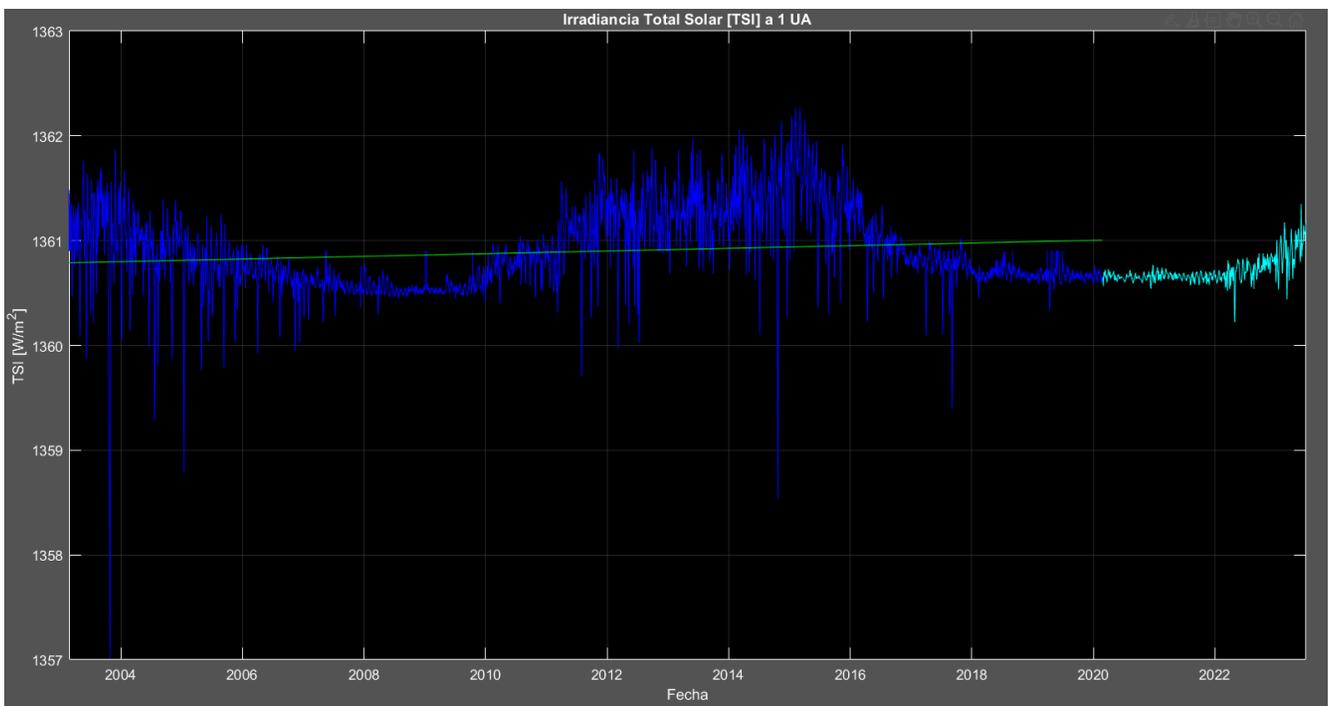


Fig. 123: Irradiancia Solar Total, pronóstico para mediados de 2023.

Por último, se obtuvieron los espectros de Fourier y Wavelet de la señal de TSI reconstruida para obtener los ciclos dominantes (Figs. 124, 125 y 126).

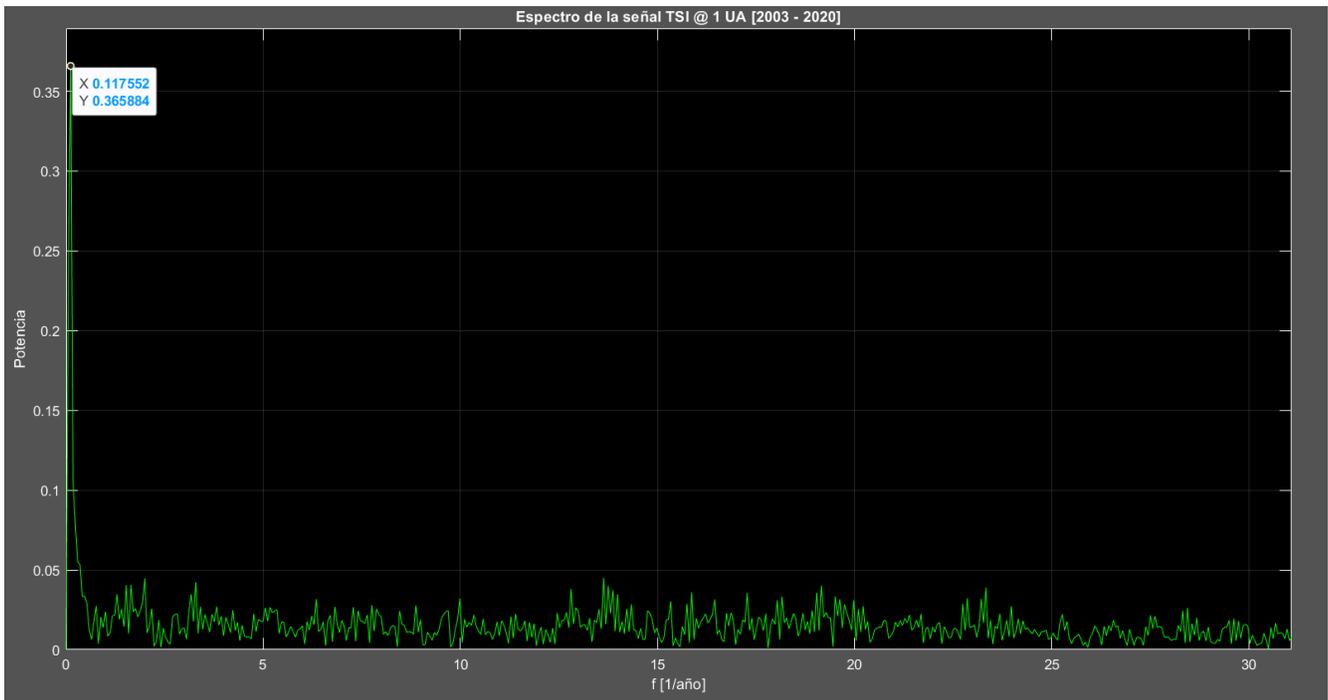


Fig. 124: Espectro de Fourier de la señal de TSI (Se observa una espiga aproximadamente cada 9 años y componentes de alta frecuencia).

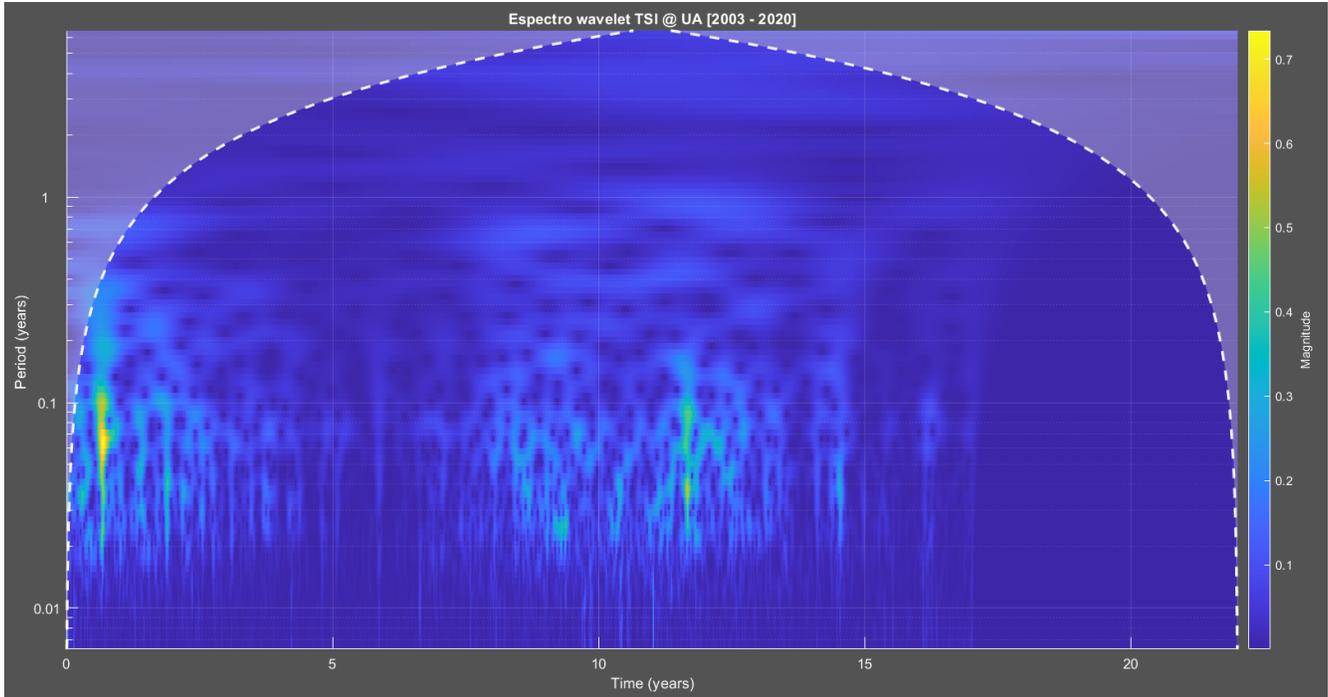


Fig. 125: Espectro Wavelet de la señal de TSI (Se observa el mayor periodo energético aproximadamente cada 10 años).

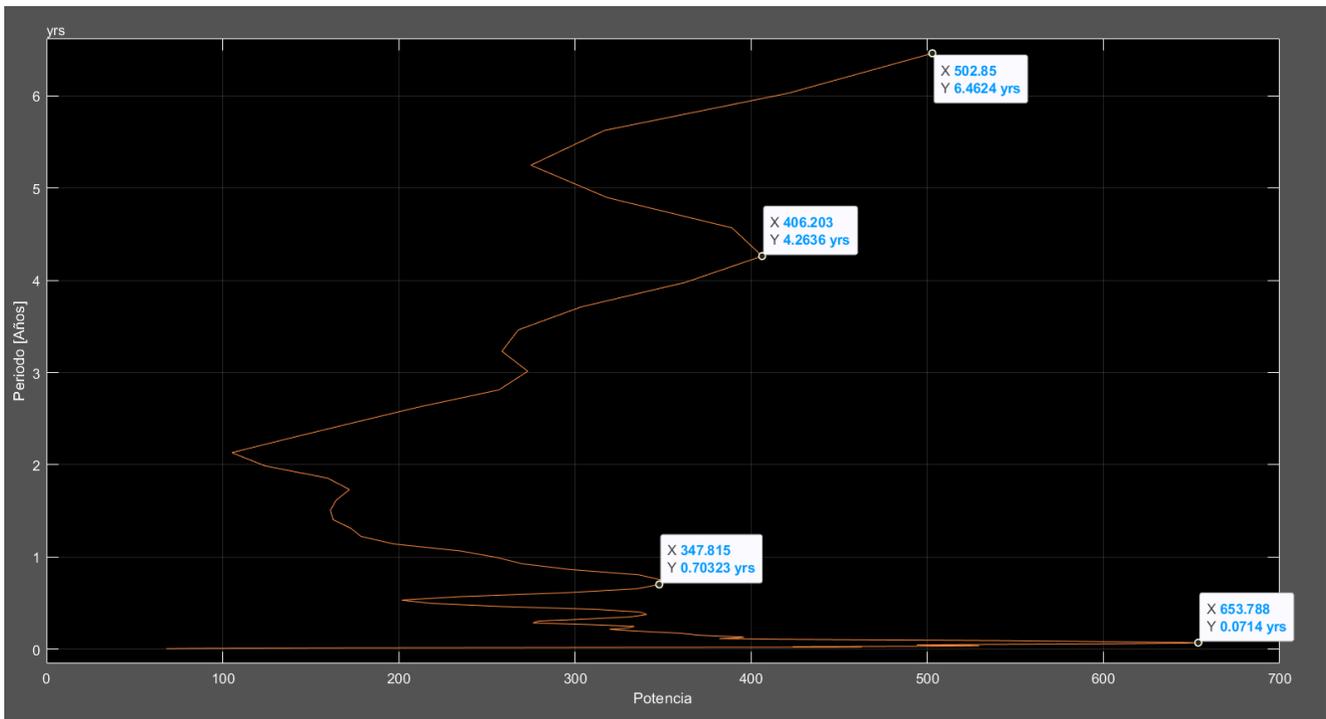


Fig. 126: Espectro Wavelet acumulado de la señal de TSI (Se observan componentes de alta frecuencia, así como un ciclo dominante mayor a 7 años).

Al implementar una Red Neuronal Recurrente para reconstruir los datos faltantes en la serie de tiempo de Irradiancia Solar Total (TSI) se logró mejorar significativamente el análisis tiempo frecuencia de Fourier y Wavelet, sin embargo, al revisar la literatura se sabe que el sol tiene ciclos solares de 11 años [15], en este caso se logró identificar dicho ciclo con un cierto error (9%) debido a que la serie de datos es pequeña y no contiene la información suficiente que nos permita identificar con nuestros análisis de forma correcta el ciclo solar dominante de 11 años.

Con base en las mediciones de TSI, correspondiente a la fecha de la última medición, la Tierra se encontraba en un mínimo solar, recibiendo una cantidad mínima de energía por parte del Sol, la cual tiene un valor aproximado de 1,360 [W/m<sup>2</sup>].

El pronóstico de la TSI para los siguientes 3 años indicó que, a principios de 2022, la cantidad de TSI que recibió la Tierra comenzó a incrementar hasta llegar a su máximo a finales del año 2025 (ciclo solar dominante de 11 años) cuyo valor se estima en 1,363.4 [W/m<sup>2</sup>] y, a partir de ese año, comenzará a disminuir nuevamente la cantidad de TSI que se recibe en el planeta hasta los 11 años siguientes, y así, de manera periódica.

## A.5. Portafolio de evidencias en Google Drive

Se creó una carpeta de evidencias en Google Drive, organizada en subcarpetas, donde se encuentran vídeos de funcionamiento del sistema instrumental, así como los códigos principales y los datos. La liga y el código QR para acceder al portafolio de evidencias son los siguientes:

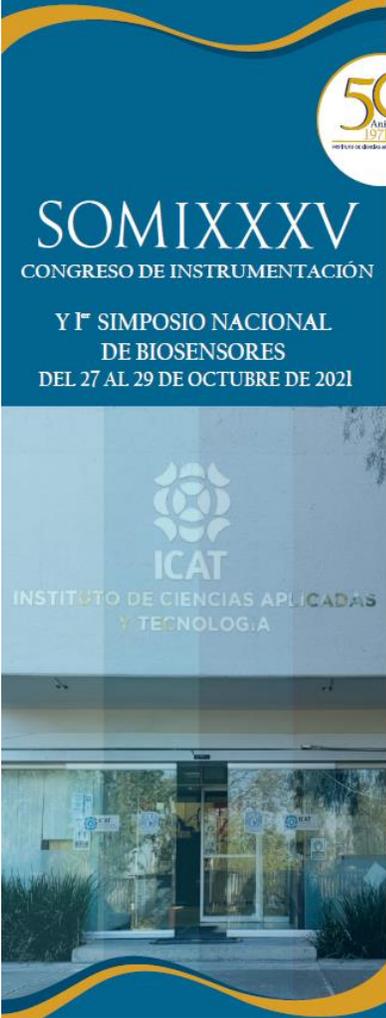
[https://drive.google.com/drive/folders/1jH\\_QTITwdN6ZGuiAiTyfN\\_6r-tcGlu\\_i?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1jH_QTITwdN6ZGuiAiTyfN_6r-tcGlu_i?usp=sharing)



## Constancias de participación en congresos

El presente trabajo se presentó en 2 Congresos. Los documentos entregados, así como las constancias de participación se encuentran en el portafolio de evidencias en Google Drive.

El primero de ellos fue SOMI XXXV CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN Y 1er SIMPOSIO NACIONAL DE BIOSENSORES, el cual se llevó a cabo del 27 al 29 de octubre de 2021 en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México.



50 Aniversario 1971-2021  
del Estado de México en Ciencias Aplicadas y Tecnología

**SOMI XXXV**  
CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN  
Y 1er SIMPOSIO NACIONAL  
DE BIOSENSORES  
DEL 27 AL 29 DE OCTUBRE DE 2021

ICAT  
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS  
Y TECNOLOGÍA



El Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología  
de la Universidad Nacional Autónoma de México

Otorgan la presente

# CONSTANCIA

a: Kevin Rodrigo Moya Castillo, Victor Manuel Velasco Herrera,  
Raúl Martell Dubois

por haber presentado el trabajo

Diseño de un sistema instrumental inteligente para identificar  
la radiación UV-A, UV-B y UV-C en la superficie terrestre

Cd. de México, México, 29 de octubre del 2021

Por el Comité Organizador



Dr. Rodolfo Zanella Specia  
Director  
Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología

La segunda participación fue mediante modalidad de póster en el 1er congreso estudiantil del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático el cual se llevó a cabo del 12 al 14 de octubre de 2022 en el Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la Universidad Nacional Autónoma de México.



## Bibliografía y Referencias

- [1] Manuel Vazquez, Pilar Montañas Rodríguez. (2010). The Earth in Time. Agosto, 2021, de Instituto de Astrofísica de Canarias Sitio web: [https://www.researchgate.net/figure/Holocene-temperature-variations-reconstructed-from-different-sources-Courtesy-Robert\\_fig36\\_251124882](https://www.researchgate.net/figure/Holocene-temperature-variations-reconstructed-from-different-sources-Courtesy-Robert_fig36_251124882)
- [2] Ronan Connolly, Willie Soon, Michael Connolly, Sallie Baliunas, Johan Berglund, C. J. Butler, Rodolfo G. Cionco, Ana G. Elias, Valery M. Fedorov, Hermann Harde, Gregory W. Henry, Douglas V. Hoyt, Ole Humlum, David R. Legates, Sebastian Lüning, Nicola Scafetta, Jan-Erik Solheim, László Szarka, Harry van Looy, Víctor M. Velasco Herrera, Richard C. Willson, Hong Yan and Weijia Zhang. (2020). How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate. *Research in Astronomy and Astrophysics*, RAA-2020-0449.R1, 2-145.
- [3] IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Generalidades de la Radiación Ultravioleta. Agosto, 2021, de IDEAM Sitio web: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/generalidades-de-la-radiacion-ultravioleta>
- [4] Valdés-Barrón, Mauro; Peláez-Chávez, Juan Carlos; Bonifaz-Alfonzo, Roberto; Riveros- Rosas, David; Velasco-Herrera, Victor; Estévez-Pérez, Hector. (enero-marzo, 2013). UVB solar radiation climatology for Mexico. *Geofísica Internacional*, vol. 52, pp. 31-42.
- [5] Denis M. Frolov, Rodolfo Gustavo Cionco, Willie Soon, Victor Manuel Naumovich Velasco Herrera. (2021). Role Of The Radiation Factor In Global Climate Events Of The Late Holocene. September, 2021, de *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics* Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/353348216\\_ROLE\\_OF\\_THE\\_RADIATION\\_FACTOR\\_IN\\_GLOBAL\\_CLIMATE\\_EVENTS\\_OF\\_THE\\_LATE\\_HOLOCENE](https://www.researchgate.net/publication/353348216_ROLE_OF_THE_RADIATION_FACTOR_IN_GLOBAL_CLIMATE_EVENTS_OF_THE_LATE_HOLOCENE)
- [6] Xinhua Zhao, Willie Soon, Victor M. Velasco Herrera. (2021). Holocene Millennial-Scale Solar Variability and the Climatic Responses on Earth. Septiembre, 2021, de MDPI - universe Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/349043577\\_Holocene\\_Millennial-Scale\\_Solar\\_Variability\\_and\\_the\\_Climatic\\_Responses\\_on\\_Earth](https://www.researchgate.net/publication/349043577_Holocene_Millennial-Scale_Solar_Variability_and_the_Climatic_Responses_on_Earth)
- [7] Red Automática de Monitoreo Atmosférico. (2021). Dirección de Monitoreo Atmosférico. Marzo, 2021, de Gobierno, CDMX Sitio web: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>
- [8] Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. (2021). Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Marzo, 2021, de Gobierno, Estado de México Sitio web: <https://rama.edomex.gob.mx/calidaddelaire>
- [9] Servicio Solarimétrico Mexicano (2021). Marzo, 2021, de Instituto de Geofísica, UNAM Sitio web: <http://areas.geofisica.unam.mx/solarimetrico/>
- [10] Dra. Ruth Aguilar Ponce. (2021). Sistema de Monitoreo de Radiación UV en Zonas Recreativas. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

[11] Mujaico Mariano, Anderson Abel. (2020). Diseño e implementación de un sistema de medición y pronóstico de radiación ultravioleta utilizando Internet de las cosas y Machine Learning. Los Olivos, Perú: Facultad de Ciencias e Ingeniería Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica con Mención en Telecomunicaciones.

[12] Mauricio Pohl, Carlos Juárez, Jaime Clímaco, Oscar Valencia, Héctor Escobar, Arturo Cisneros. (2019). Diseño, Construcción e Implementación de un Sistema de Motorización de Índice de Radiación Solar Ultravioleta (UV). El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

[13] Escobedo Bretado-Jorge1 †, González-Mario, Reynoso Cuevas-Liliana, Alarcón Herrera-María. (2017). Cuantificación De La Incidencia De Radiación Ultravioleta (UV-A, UV-B) En Durango, México. Junio, 2021, de Reseach Journal Template, Revista de Energías Renovables Sitio web: [https://www.researchgate.net/profile/Mario-H-Gonzalez/publication/322836141\\_Cuantificacion\\_de\\_la\\_incidencia\\_de\\_radiacion\\_ultravioleta\\_UV-A\\_UV-B\\_en\\_Durango\\_Mexico/links/5a90457745851535bcd595f1/Cuantificacion-de-la-incidencia-de-radiacion-ultravioleta-UV-A-UV-B-en-Durango-Mexico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mario-H-Gonzalez/publication/322836141_Cuantificacion_de_la_incidencia_de_radiacion_ultravioleta_UV-A_UV-B_en_Durango_Mexico/links/5a90457745851535bcd595f1/Cuantificacion-de-la-incidencia-de-radiacion-ultravioleta-UV-A-UV-B-en-Durango-Mexico.pdf)

[14] Ismael Díaz Rangel, María del Consuelo Escoto Ponce de León, Enrique José Tinajero Pérez, Luis Francisco Hernández Villalobos, Gustavo Angel Pioquinto Pérez. (2017). Sistema para la medición, visualización y registro de la radiación solar. Junio, 2021, de Universidad Autónoma del Estado de México, Ecatepec de Morelos, México Sitio web: [https://www.researchgate.net/profile/Ismael-Rangel/publication/323845495\\_Sistema\\_para\\_la\\_medicion\\_visualizacion\\_y\\_registro\\_de\\_la\\_radiacion\\_solar/links/5aaf06600f7e9b4897c03a09/Sistema-para-la-medicion-visualizacion-y-registro-de-la-radiacion-solar.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Ismael-Rangel/publication/323845495_Sistema_para_la_medicion_visualizacion_y_registro_de_la_radiacion_solar/links/5aaf06600f7e9b4897c03a09/Sistema-para-la-medicion-visualizacion-y-registro-de-la-radiacion-solar.pdf)

[15] Rani Gran. (2017). NASA's TSIS-1 Keeps an Eye on Sun's Power Over Ozone. Junio, 2021, de National Aeronautics and Space Administration Sitio web: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-tsis-1-keeps-an-eye-on-suns-power-over-ozone>

[16] NASA. (2019). Total and Spectral Solar Irradiance Sensor -2 (TSIS-2). Junio, 2021, de National Aeronautics and Space Administration Sitio web: <https://eosps.nasa.gov/missions/total-and-spectral-solar-irradiance-sensor-2>

[17] Laboratory For Atmospheric and Space Physics. (2020). Welcome to the Home Page of the Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE). Junio, 2021, de University Of Colorado Boulder Sitio web: <https://lasp.colorado.edu/home/sorce/>

[18] NOAA. (2021). GOES Space Environment Monitor Data describing the environment at geosynchronous orbit. Mayo, 2021, de National Oceanic and Atmospheric Administration Sitio web: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>

[19] Víctor Manuel Velasco Herrera. (2021). Mafalda y Datos Satelitales. Septiembre, 2021, de Universidad Nacional Autónoma de México Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/354916554\\_MAFALDA\\_Y\\_DATOS\\_SATELITALES](https://www.researchgate.net/publication/354916554_MAFALDA_Y_DATOS_SATELITALES)

- [20] Willie Soon a,\*, Victor M. Velasco Herrera b, Kandasamy Selvaraj c, Rita Traversi d, Ilya Usoskine, Chen-Tung Arthur Chen f, Jiann-Yuh Lou g, Shuh-Ji Kao c, Robert M. Carter h, Valery Pipin i, Mirko Severi d, Silvia Becagli. (2014). A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm. Septiembre, 2021, de ELSEVIER Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/260995415\\_A\\_review\\_of\\_Holocene\\_solar-linked\\_climatic\\_variation\\_on\\_centennial\\_to\\_millennial\\_timescales\\_Physical\\_processes\\_interpretative\\_frameworks\\_and\\_a\\_new\\_multiple\\_cross-wavelet\\_transform\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/260995415_A_review_of_Holocene_solar-linked_climatic_variation_on_centennial_to_millennial_timescales_Physical_processes_interpretative_frameworks_and_a_new_multiple_cross-wavelet_transform_algorithm)
- [21] V.M. Velasco Herrera a, B. Mendoza a, G. Velasco Herrera b. (2015). Reconstruction and prediction of the total solar irradiance: From the Medieval Warm Period to the 21st century. Septiembre, 2021, de ELSEVIER Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/264671457\\_Reconstruction\\_and\\_prediction\\_of\\_the\\_total\\_solar\\_irradiance\\_From\\_the\\_Medieval\\_Warm\\_Period\\_to\\_the\\_21st\\_century](https://www.researchgate.net/publication/264671457_Reconstruction_and_prediction_of_the_total_solar_irradiance_From_the_Medieval_Warm_Period_to_the_21st_century)
- [22] F. Borja Enrique. (2016). HR, La estrella de los diagramas en astrofísica. Mayo, 2021, de Cuaderno de Cultura Científica Sitio web: <https://culturacientifica.com/2016/10/21/hr-la-estrella-los-diagramas-astrofisica/>
- [23] Hugo Grossi Gallegos. (2002). Notas sobre radiación solar. Argentina: Universidad Nacional de Luján.
- [24] Muhammad Iqbal. (1983). An Introduction To Solar Radiation. University Of British Columbia: Academic Press.
- [25] Heliosfera. (2020). Coordenadas y Carta Solar. Agosto, 2021, de Heliosfera Sitio web: <https://www.heliosfera.com/coordenadas-y-carta-solar/#>
- [26] Martínez Martínez José Luis. (2018). El movimiento aparente del Sol. Agosto, 2021, de Astronomía para todos Sitio web: <https://astronomiaparatodos.com/2018/11/16/el-movimiento-aparente-del-sol/>
- [27] Christiana Honsberg, Stuart Bowden. (2021). Solar Time. Agosto, 2021, de PVEducation Sitio web: <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/hora-solar>
- [28] LIT - Ultraviolet Technology. (2012). Tecnología de desinfección UV. Agosto, 2021, de LIT Sitio web: <https://www.lit-uv.com/es/technology/>
- [29] 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. (2003). Índice UV Solar Mundial. Ginebra, Suiza: NLM classification: QT 162.U4.
- [30] EPA. (2021). Cómo calcular el índice UV. Junio, 2021, de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos Sitio web: <https://espanol.epa.gov/espanol/como-calcular-el-indice-uv>

- [31] V.M. Velasco Herrera a , W. Soon b , \*, G. Velasco Herrera c , R. Traversi d , K. Horiuchi e. (2017). Generalization of the cross-wavelet function. Septiembre, 2021, de ELSEVIER Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/316493733\\_Generalization\\_of\\_the\\_cross-wavelet\\_function](https://www.researchgate.net/publication/316493733_Generalization_of_the_cross-wavelet_function)
- [32] Victor Manuel Naumovich Velasco Herrera, Victor Manuel. (2016). The periodicity of Grand Solar Minimum. Septiembre, 2021, de EGU General Assembly Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/290394356\\_The\\_periodicity\\_of\\_Grand\\_Solar\\_Minimum](https://www.researchgate.net/publication/290394356_The_periodicity_of_Grand_Solar_Minimum)
- [33] Juan Pablo Castanedo Cázares, Bertha Torres Álvarez, Bárbara Portales González, Karla Martínez Rosales, Diana Hernández Blanco. (2015). Análisis de la radiación solar ultravioleta acumulada en México. Mayo, 2021, de Instituto Mexicano del Seguro Social, Universidad Autónoma de San Luis Potosí Sitio web: [http://revistamedica.imss.gob.mx/editorial/index.php/revista\\_medica/article/view/228/620](http://revistamedica.imss.gob.mx/editorial/index.php/revista_medica/article/view/228/620)
- [34] Adriana E. Gonzalez-Cabrera<sup>1, a)</sup>, David Riveros-Rosas<sup>1, b)</sup>, Mauro G. Valdes- Barrón<sup>1</sup>, Roberto Bonifaz-Alfonzo<sup>1</sup>, Victor M. Velasco-Herrera<sup>1</sup>, Hector R. Estevez-Perez<sup>1</sup> and Giovanni Carabali<sup>1</sup>. (2018). New Reference Solarimetric Network for Mexico. Agosto, 2021, de Universidad Nacional Autónoma de México Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/328815847\\_New\\_reference\\_solarimetric\\_network\\_for\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/328815847_New_reference_solarimetric_network_for_Mexico)
- [35] IDEAM. (2014). LA RADIACIÓN SOLAR Y SU PASO POR LA ATMÓSFERA. Junio, 2021, de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Sitio web: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/la-radiacion-solar-y-su-paso-por-la-atmosfera#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20viaja%20en,del%20recorrido%20de%20ese%20fot%C3%B3n>.
- [36] Ana Elia Hernández Ordoñez. (2002). Estudio de la radiación solar ultravioleta banda "B" en la zona metropolitana de la Ciudad de México. México D.F.: Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [37] L.D. Kudriávstev. (1983). CURSO DE ANÁLISIS MATEMÁTICO. Moscú, Rusia: Editorial Mir.
- [38] Baidyk T., Kussul E., "Redes neuronales, visión computacional y micromecánica", ITACA-UNAM, 2009, pp.158.
- [39] Kussul E., Baidyk T., Wunsch D., Neural Networks and Micro Mechanics, Springer, 2010, pp.210.
- [40] Baydyk T., Kussul E., Wunsch D., Intelligent Automation in Renewable Energy, Springer, 2019, pp.300.
- [41] Jordi Torres. (2020). Capítulo 7: Parámetros e hiperparámetros en redes neuronales. En Deep Learning – Introducción práctica con Keras (SEGUNDA PARTE) (139-156). Barcelona: Marcombo.

- [42] Ragnhild Guevara Patiño. (2016). El estado del arte en la investigación: ¿análisis de los conocimientos acumulados o indagación por nuevos sentidos? Bogotá, Colombia: Universidad Pedagógica Nacional.
- [43] UNIVER. (2008). ¿Cómo hacer un Protocolo de Tesis? Universidad Univer Colima.
- [44] Organización panamericana de la salud. (2010). Guía para escribir un protocolo de investigación. Washington, DC: programa de subvenciones para la investigación.
- [45] Katsuhiko Ogata. (1996). Sistemas de control en tiempo discreto. Segunda Edición. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice Hall Inc.
- [46] TT Electronics. (2016). NPN Plastic Silicon Phototransistor OP593, OP598, OP793, OP798 Series. Texas, USA: OPTEK Technology, Inc.
- [47] Microchip Technology Inc. (2017). PIC18F47J13 Family 28/44-Pin, High-Performance Microcontrollers with XLP Technology. U.S.A.: PIC18F47J13 FAMILY.
- [48] Genicom Co., Ltd. (2020). UV-A, UV-B, UV-C Sensor: GUVA-T11GD, GUVB-T11GD, GUVCT10GD. Korea: Datasheet.
- [49] Semiconductor Components Industries, LLC. (2016). Operational Amplifiers, High Slew Rate, Low Voltage, Rail-to-Rail Output. United States: On Semiconductor.
- [50] TI. (2009). Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference. United States: Texas Instruments Incorporated.
- [51] HC Tech. (2016). HC-12 Wireless Serial Port Communication Module. China: HC-Tech Corp.
- [52] Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2021). Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Estados Unidos Mexicanos: IFT.
- [53] Peter Joseph Bevelacqua. (2016). Antena monopolo. Septiembre, 2021, de Antenna-Theory.com Sitio web: <https://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/monopole.php>
- [54] Maxim Integrated Products Inc., (2015) DS3231: Extremely Accurate I2C Integrated RTC/TCXO/Crystal. US: Datasheet.
- [55] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (2014). Dilatación Térmica. Estado de Hidalgo: UAEH.
- [56] Víctor Manuel Velasco Herrera. (2021). Mafalda y Datos Satelitales. Septiembre, 2021, Departamento de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México Sitio web: [https://www.researchgate.net/publication/354916554\\_MAFALDA\\_Y\\_DATOS\\_SATELITALES](https://www.researchgate.net/publication/354916554_MAFALDA_Y_DATOS_SATELITALES)