




MEDICIÓN DE PERFILES ATMOSFÉRICOS VERTICALES UTILIZANDO GLOBOS SONDA DE BAJO COSTO EQUIPADOS CON TECNOLOGÍAS ABIERTAS

MEASURING VERTICAL ATMOSPHERIC PROFILES USING LOW-COST BALLOON PROBES EQUIPPED WITH OPEN TECHNOLOGIES

Rolyn Chuquihuanca-Carhuapoma ¹, Patrick Honorio-Choquehuanca ^{*}, Vladimir Adolfo Juárez Ortiz ²

¹Departamento de Física, Universidad Nacional de Piura, Piura, 20001, Perú

² Universidad Nacional de Frontera, Sullana, 20100, Perú

*Autor de Correspondencia: 72849086@posgrado.unp.edu.pe

Historial del artículo:

Recibido: 02.06.2025

Revisado: 19.06.2025

Aceptado: 30.06.2025

En línea: 15.07.2025

Palabras clave:

Perfiles atmosféricos

Globos sonda

Bajo costo

Tecnologías abiertas

Medición vertical

Keywords:

Atmospheric profiles

Weather balloons

Low cost

Open technologies

Vertical measurement

Cómo citar:

R. Chuquihuanca-Carhuapoma, P. Honorio-Choquehuanca, y V. A. Juárez Ortiz, «Medición de Perfiles Atmosféricos Verticales Utilizando Globos Sonda de Bajo Costo Equipados con Tecnologías Abiertas», International Journal of Computational Innovations, Intelligent Systems and AI, vol. 1, n.º 1, pp. 7–27, jul. 2025. doi: [10.64439/cisai.v1i1.6](https://doi.org/10.64439/cisai.v1i1.6)

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia CC-BY-NC-ND



Resumen:

Este trabajo experimental presenta el diseño, ensamblaje y lanzamiento de una plataforma de exploración atmosférica con globo sonda, carga útil y paracaídas, construida con materiales de bajo costo e incorporando sensores digitales y transmisión inalámbrica para el registro en tiempo real de datos. El sistema permitió la medición en tiempo real de variables clave como temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, radiación ultravioleta y concentración de ozono, generando perfiles verticales sobre la costa de Piura, Perú. La metodología incluyó la selección y adquisición de sensores, programación del microcontrolador, calibración en condiciones controladas, pruebas de funcionamiento y análisis de los datos registrados durante el vuelo. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre la estructura térmica y dinámica de la troposfera y la estratósfera, confirmando la viabilidad técnica de plataformas económicas para estudios atmosféricos de mediana altitud. Este trabajo sienta un precedente para el desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental en regiones con infraestructura limitada y plantea oportunidades futuras para la integración de sensores más avanzados y sistemas de transmisión de datos en tiempo real, con aplicaciones tanto científicas como educativas.

Abstract:

This experimental work presents the design, assembly, and launch of an atmospheric exploration platform with a weather balloon, payload, and parachute, built from low-cost materials and incorporating digital sensors and wireless transmission for real-time data recording. The system enabled real-time measurement of key variables such as temperature, atmospheric pressure, relative humidity, ultraviolet radiation, and ozone concentration, generating vertical profiles over the coast of Piura, Peru. The methodology included the selection and acquisition of sensors, microcontroller programming, calibration under controlled conditions, functional testing, and analysis of the data recorded during the flight. The results obtained provide valuable information on the thermal structure and dynamics of the troposphere and stratosphere, confirming the technical feasibility of cost-effective platforms for mid-altitude atmospheric studies. This work sets a precedent for the development of environmental monitoring systems in regions with limited infrastructure and opens future opportunities for the integration of more advanced sensors and real-time data transmission systems, with both scientific and educational applications.

I. INTRODUCCIÓN

La observación de la atmósfera es una característica relevante para comprender la dinámica climática y mejorar los modelos de predicción meteorológica, especialmente en contextos donde la variabilidad atmosférica tiene un impacto directo sobre sectores estratégicos como la agricultura, la gestión del agua o la mitigación de riesgos naturales. Aunque las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas han consolidado redes de monitoreo en superficie, persiste una brecha en la obtención de datos en altitud, debido principalmente a la complejidad técnica y a los elevados costos asociados a las plataformas de medición tradicionales. Esta carencia de perfiles atmosféricos verticales limita la capacidad de caracterizar procesos como la distribución térmica, la humedad relativa o la dinámica de los vientos en diferentes capas de la atmósfera, afectando la precisión de las simulaciones y pronósticos locales. Ante este escenario, los globos sonda meteorológicos se presentan como una alternativa eficiente y accesible, permitiendo la adquisición de datos atmosféricos a distintas alturas mediante plataformas de bajo costo y operación sencilla, adaptables a diversas necesidades de investigación.

La atmósfera terrestre, que se extiende hasta aproximadamente mil kilómetros sobre la superficie, concentra la mayor parte de su masa en los primeros cien kilómetros, y particularmente en la troposfera, donde fenómenos como la formación de nubes, la circulación de vientos y las inversiones térmicas evidencian el comportamiento del clima [1-3]. Estos procesos cambian con la altitud, por lo que es importante contar con mediciones verticales que permitan describirlos con mayor precisión. Si bien las mediciones a nivel superficial proporcionan información valiosa, resultan insuficientes para capturar la complejidad de los gradientes atmosféricos que influyen en la generación de fenómenos extremos o en la modulación de patrones regionales como la temperatura y las precipitaciones pluviales. En este contexto, los globos sonda representan una alternativa de solución, ya que su ascenso lento y controlado permite registrar variaciones de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento a diferentes niveles, complementando las observaciones de superficie y fortaleciendo el entendimiento integral del sistema climático local [4-5].

Por otro lado, el desarrollo de cargas útiles para globos sonda ha evolucionado con la aparición de tecnologías de hardware abierto como Arduino, que facilitan la construcción de sistemas modulares, escalables y de bajo costo [6]. El acceso a sensores comerciales de amplia disponibilidad ha permitido diseñar soluciones flexibles que integran módulos de adquisición y almacenamiento de datos, sistemas de transmisión inalámbrica, unidades de localización por GPS y fuentes de alimentación compactas para soportar las condiciones extremas de las capas superiores de la atmósfera [7]. Estas características han impulsado el despliegue de proyectos de investigación atmosférica en diversas regiones, donde las limitaciones presupuestarias dificultan el acceso a tecnologías tradicionales de mayor costo. El aprovechamiento de plataformas abiertas no solo reduce las barreras de entrada a la investigación atmosférica, sino que también fomenta la innovación local mediante el diseño y la adaptación de soluciones específicas a las necesidades de cada territorio. Diversos antecedentes en América Latina demuestran el potencial de los sistemas de observación basados en tecnologías abiertas. En México, el desarrollo de radiosondas meteorológicas equipadas con sistemas de telemetría permitió capturar variables de la atmósfera utilizando configuraciones de bajo costo [8]. En Ecuador, globos sonda equipados con sensores de ozono posibilitaron la determinación precisa de la altitud de la tropopausa sobre la región andina [9]. En Perú, diferentes iniciativas impulsadas por universidades y centros de investigación han desarrollado sistemas electrónicos para la recolección de datos en altitud, utilizando componentes de fácil acceso y validados mediante campañas de lanzamiento experimental [10-11]. En la región de Piura, el proyecto PACS-SONET, financiado por la NOAA, ejecutó más de tres mil lanzamientos de globos piloto entre 1997 y 2006, proporcionando una base de datos única para el análisis de la dinámica atmosférica regional y su relación con eventos como el Fenómeno “El Niño” [12].

A pesar de estos esfuerzos, las capacidades actuales de observación atmosférica en Piura siguen presentando limitaciones. Aunque existen alrededor de cuarenta estaciones meteorológicas distribuidas en la región [13], la mayoría se enfoca en el monitoreo de variables en superficie y enfrenta desafíos recurrentes relacionados con la continuidad de la transmisión de datos, la calibración de instrumentos y la cobertura espacial. Esta situación dificulta la generación de modelos atmosféricos locales de alta resolución y limita la capacidad de respuesta ante fenómenos meteorológicos extremos que afectan de manera crítica a la población y las actividades productivas. La necesidad de fortalecer las capacidades de observación en altura se vuelve cada vez más urgente en un contexto de creciente variabilidad climática y eventos extremos de mayor frecuencia e intensidad.

Con el propósito de contribuir a cerrar esta brecha tecnológica, el presente trabajo tuvo como objetivo diseñar, ensamblar y validar una carga útil modular basada en la plataforma Arduino y sensores de acceso abierto, destinada a la obtención de perfiles atmosféricos verticales mediante el lanzamiento de dos globos sonda en la región de Piura, Perú. La propuesta busca demostrar la viabilidad técnica y operativa de soluciones de bajo costo adaptadas a entornos de recursos limitados, y explorar su potencial para fortalecer la capacidad de observación atmosférica en contextos regionales mediante tecnologías abiertas, escalables y replicables.

II. MÉTODOS

La metodología para la operación del globo sonda, que incluyó el diseño y la gestión de la carga útil, se estructuró en etapas interrelacionadas, como se ilustra en la Figura 1. La primera etapa comprendió la selección y validación de componentes electrónicos capaces de operar bajo condiciones estratosféricas, junto con el hardware de soporte necesario. En la segunda etapa, se procedió a la integración y calibración de los sensores, seguida del ensamblaje de la plataforma en su conjunto. La fase final correspondió a la ejecución de los lanzamientos de los globos sonda y concluyó con el análisis de los datos recolectados, los cuales fueron validados mediante comparación cruzada con registros regionales de referencia.



Figura 1. Proceso metodológico aplicado

2.1 Selección de hardware

Para el diseño de la carga útil del globo sonda, se definieron los requerimientos técnicos en función de las variables atmosféricas a medir, así como del método de adquisición y transmisión de datos necesarios para el monitoreo en tiempo real. Dado que era fundamental registrar información durante el ascenso, se incorporó un sistema de comunicación que garantizara el envío continuo de datos a una estación terrestre. La selección del hardware respondió a criterios de precisión, rango operativo, resistencia a condiciones extremas de baja temperatura y presión, además de su disponibilidad comercial y viabilidad económica. Se utilizaron sensores específicos para la medición de variables, Tabla 1, como el PT100 para temperatura, SHT40 para humedad relativa y temperatura, MS611 para presión barométrica, UVM30A para radiación ultravioleta y MQ131 para concentración de ozono.

Table 1. Sensores seleccionados para la carga útil

Sensores	Características
PT100 Tipo RTD	Sensor de temperatura que funciona según las características de un Termistores Pt cuya resistencia varia con temperatura, operando en un rango de -100°C a +200°C [14], el sensor necesita del módulo transmisor MAX31865
SHT40	Mide temperatura y humedad relativa con precisiones de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ desde el rango de -40 a 125 °C, y $\pm 1.8\%$ HR desde el rango de 0 a 100% HR respectivamente, utiliza comunicación I ² [15].
MS5611	Mide la presión atmosférica con resolución de 0.010 mBar y rango de medición de 10 a 1200 mBar, temperatura de trabajo -40 a 85 °C. Con interfaz SPI/I ² C [16].
UVM30A	Detecta radiación UV-A y UV-B mediante una salida analógica proporcional a la intensidad recibida, temperatura de trabajo -20 a 80 °C [17].
MQ131	detecta concentraciones de ozono en el rango de 10 a 1000 ppb a través de variaciones en su conductividad eléctrica. temperatura de trabajo -20 a 80 °C. Operación de 5 VDC [18].

El procesamiento y control del sistema fueron gestionados mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560 Pro Mini, elegido por su bajo consumo energético y su capacidad de expansión de entradas y salidas. La transmisión de los datos registrados por los sensores durante el vuelo fue asegurada mediante módulos de comunicación LoRa (modelo E90-DTU900SL42), seleccionados por su largo alcance y su capacidad para operar con alta fiabilidad en entornos con posibles interferencias atmosféricas. Para el seguimiento en tiempo real de la trayectoria y la localización del punto de caída de la carga útil, se empleó un sistema combinado compuesto por un módulo GPS NEO-7M y un dispositivo Spot Trace con enlace satelital, complementado en tierra por una antena direccional Yagi 2G/3G/4G LTE, destinada a optimizar la recepción de señales en zonas con cobertura limitada. Las características técnicas de estos componentes se presentan en la Tabla 2. Todos los componentes electrónicos fueron ensamblados en un contenedor cúbico de poliestireno expandido (corcho), con dimensiones externas de 28.85 cm × 23.4 cm × 18.3 cm y dimensiones internas de 24.95 cm × 20.0 cm × 14.1 cm; su exterior fue revestido con papel aluminio para mejorar el aislamiento térmico y minimizar las interferencias electromagnéticas. El ascenso de la plataforma se efectuó mediante un globo de látex o neopreno de 0.02 mm de espesor, seleccionado en función del peso de la carga útil y de la altitud objetivo, e inflado con gas helio por ser una alternativa más segura frente al hidrógeno.

Table 2. Software necesario para la carga útil

Microcontrolador	Características
Arduino Mega 2560 Pro Mini	Placa que incorpora el microcontrolador ATMEGA 2560 que Tiene la capacidad para gestionar múltiples sensores que se conectan mediante conexiones SPI, I ² C y UART (54 pines digitales y 16 entradas analógicas) [19-20].
Equipos de transmisión	Características
E90-DTU (900SL42) LoRa	Con interfaz RS485/RS232, permite la transmisión de datos hasta 30 km de distancia en la banda de 900 MHz, (15W, 12 V DC) [21].
Antena TX915-JKD-20	Antena omnidireccional utilizada para la transmisión de datos [23] de 915 MHz, 3.5 dBi de ganancia, 20W y 50Ω.
Equipos de localización	Características
Modulo GPS NEO-7M	Con soporte SBAS y actualización con a 5 Hz. La comunicación mediante UART facilita su integración con el Arduino Mega [22].
SPOT TRACE GPS	Dispositivo con servicios de ubicación GPS satelital, que funciona de forma independiente a redes de celular, operando a -30°C a 60°C [23].
Equipo de respaldo	Características
Módulo lector de memoria microSD	Opera a 3.3-5 VDC y utilizando interfaz SPI. Incluye pines MOSI, MISO, SCK y CS, además de un chip conversor lógico MC74VHCT125A
Fuentes de alimentación	Características
Power Band	Se utilizará para suministrar energía el transmisor E90-DTU (900SL42). 12 VDC, 4 A.
Baterías de litio	Utilizadas para alimentar al microcontrolador Arduino Mega, módulos y sensores con 1,5 VDC cada una.

2.2. Herramientas de software utilizadas

En esta subsección se describe la selección de las herramientas de software utilizadas para el diseño electrónico, la programación de la carga útil y el procesamiento preliminar de los datos recolectados. El software EasyEDA, especializado en diseño de circuitos impresos, fue empleado para la creación de las placas que integran los componentes electrónicos de la carga útil [25]. Para la programación de los microcontroladores encargados de gestionar los sensores, se utilizó el entorno de desarrollo Arduino IDE 2.0, de código abierto [26], empleando protocolos de comunicación como I²C, SPI y UART según los requerimientos de cada dispositivo.

El desarrollo del código contempló la configuración de los pines, la inicialización de los protocolos de comunicación y la verificación del arranque del sistema. Posteriormente, se implementó la lectura secuencial de los sensores de acuerdo con intervalos de tiempo programados, asegurando la sincronización y la coherencia temporal de todas las mediciones. Los datos adquiridos fueron transformados de señales analógicas a digitales y corregidos en función de las calibraciones específicas de cada sensor, con el fin de garantizar su precisión. Por último, el software MATLAB fue utilizado como herramienta de procesamiento numérico para el análisis de los datos obtenidos [27].

El fragmento de código mostrado (Tabla 3) define las bibliotecas y pines necesarios para el funcionamiento de un sistema de monitoreo ambiental basado en Arduino. Las bibliotecas importadas permiten la integración de diversos sensores, como el MS5611 para presión atmosférica, el Adafruit_SHT4x para temperatura y humedad, el MAX31865 para sensores RTD, así como módulos GPS (TinyGPS++) y LoRa para comunicación. Además, se configura el uso de una tarjeta SD mediante la biblioteca SD.h y la interfaz SPI para el almacenamiento de datos.

En cuanto a los pines, se asignan entradas analógicas para los sensores de radiación ultravioleta (UV) y ozono (O₃), mientras que el pin digital 53 se utiliza como chip select (CS) para la tarjeta SD. También se definen dos pines digitales para los LEDs de señalización: uno rojo para indicar errores y uno verde para indicar el funcionamiento correcto del sistema. La Tabla 3 resume las bibliotecas utilizadas y la asignación de pines principales.

Table 3. Codificación para la captura y envío de datos

Librerías y Pines Utilizados en el Sistema de Monitoreo Ambiental
<pre>#include <SPI.h> #include <SD.h> #include <Wire.h> #include <MS5611.h> #include <Adafruit_SHT4x.h> #include <TinyGPS++.h> #include <SoftwareSerial.h> #include <Adafruit_MAX31865.h> // Pines const int sensorPinUV = A7; // Sensor UV const int sensorPinO3 = A6; // Sensor de Ozono (O3) const int chipSelect = 53; // SD card CS pin const int ledRojo = 8; // LED de error const int ledVerde = 9; // LED de operación correcta</pre>
Receptor de Datos
<pre>#include <SPI.h> #include <SD.h> // Pines de la tarjeta SD const int chipSelect = 53; // Pin CS de la tarjeta SD String receivedData = ""; // Buffer para los datos recibidos char endChar = '\n'; // Carácter de finalización de la transmisión void setup() { // Inicializa la comunicación Serial para monitorizar datos Serial.begin(9600); // Inicializa la comunicación Serial con el módulo LoRa en Serial1 (TX1=18, RX1=19) Serial1.begin(9600);</pre>

2.3 Diseño y ensamblaje de la carga útil

Tras la selección e integración de los componentes electrónicos y la configuración del sistema de comunicación descritos en la sección anterior, se procedió al diseño técnico y ensamblaje detallado de la carga útil. Esta etapa comprendió tanto la programación de los microcontroladores como la organización física del hardware, asegurando una operación coordinada y eficiente durante el vuelo. En esta sección se describen los procedimientos seguidos para lograr el correcto funcionamiento del sistema en condiciones estratosféricas. El diagrama de la Figura 2a muestra en detalle la distribución de los pines del microcontrolador y su conexión con los distintos componentes del sistema. Se especifican las asignaciones correspondientes a sensores, módulos de comunicación, unidades de almacenamiento, sistema de alimentación y LEDs indicadores, con el objetivo de asegurar una integración estructurada y libre de conflictos lógicos o eléctricos.

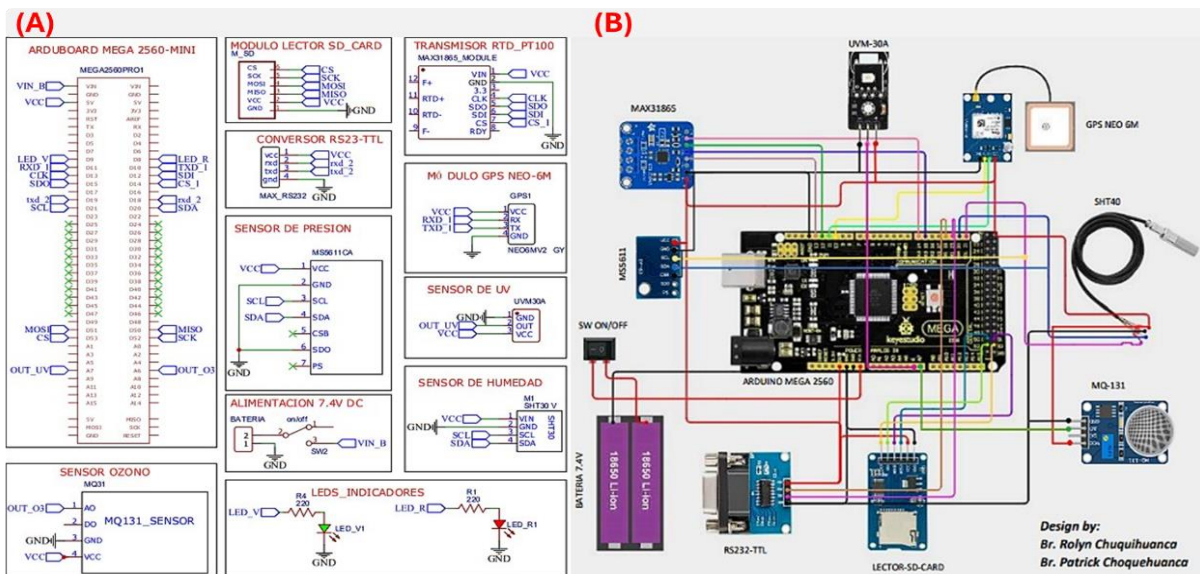


Figura 2. Esquema de pines y electrónico

Las conexiones de los componentes electrónicos y su disposición en el contenedor de la carga útil comenzaron con el montaje del microcontrolador Arduino Mega, el cual fue fijado directamente a la estructura interna del contenedor. A continuación, se integraron los sensores mediante conexiones a los pines correspondientes, como se muestra en la Figura 2b. Posteriormente, se instaló el sistema de alimentación, compuesto por baterías de litio y reguladores de voltaje, lo que permitió garantizar la estabilidad del suministro energético durante todo el trayecto. Por último, se conectó el módulo LoRa y se realizó la validación de los sistemas de localización GPS, incluido el satelital. El diseño de la parte electrónica se optimizó mediante el desarrollo de placas de circuito impreso, como se ilustra en la Figura 3, la cual reemplaza las conexiones tradicionales con protoboard. Esta solución elimina el riesgo de desconexiones accidentales, incrementa la estabilidad eléctrica y reduce la posibilidad de errores inducidos por vibraciones o impactos durante el vuelo. Adicionalmente, permite una mejor organización del espacio, reducción de peso, y facilita la detección de fallas mediante inspección visual o pruebas de continuidad sobre las pistas de la placa.

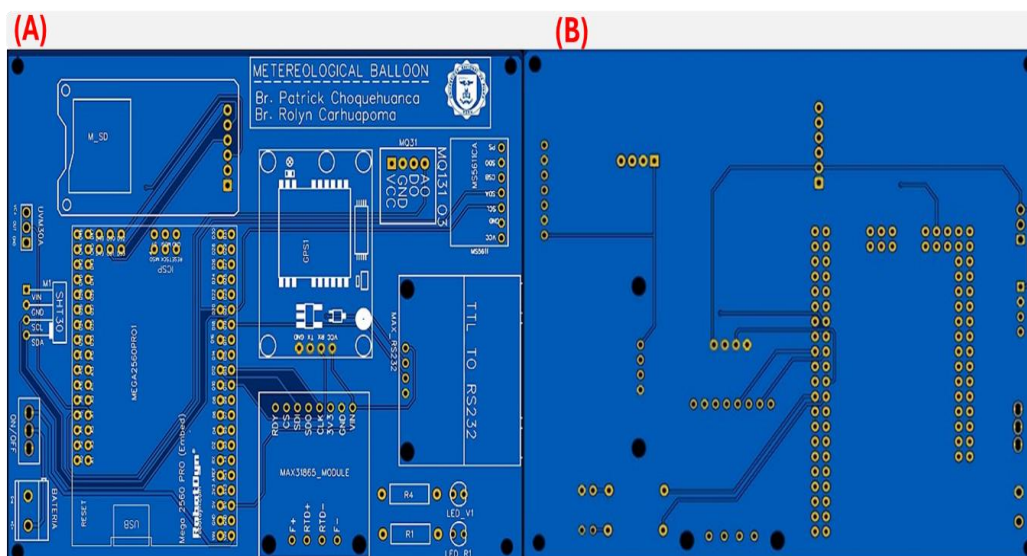


Figura 3. Diseño esquemático de la PCB

Los componentes del sistema fueron sometidos a pruebas de validación en condiciones controladas, los resultados se compararon con instrumentos patrón ya calibrados utilizados como referencia. Las pruebas permitieron verificar su desempeño de los cinco sensores tomando datos al mismo tiempo, luego se evaluó la comunicación Lora a diferentes distancias y se tomó en cuenta el tiempo que las baterías podían suministrar energía lo que es fundamental para garantizar la confiabilidad del sistema y que responda de la mejor manera ante las condiciones atmosféricas a las que va a estar expuesto. La disposición final del hardware sobre la placa PCB se observa en la Figura 4; este conjunto constituye el componente esencial de la carga útil del globo sonda, diseñado para el registro variables atmosféricas sobre la costa piurana.

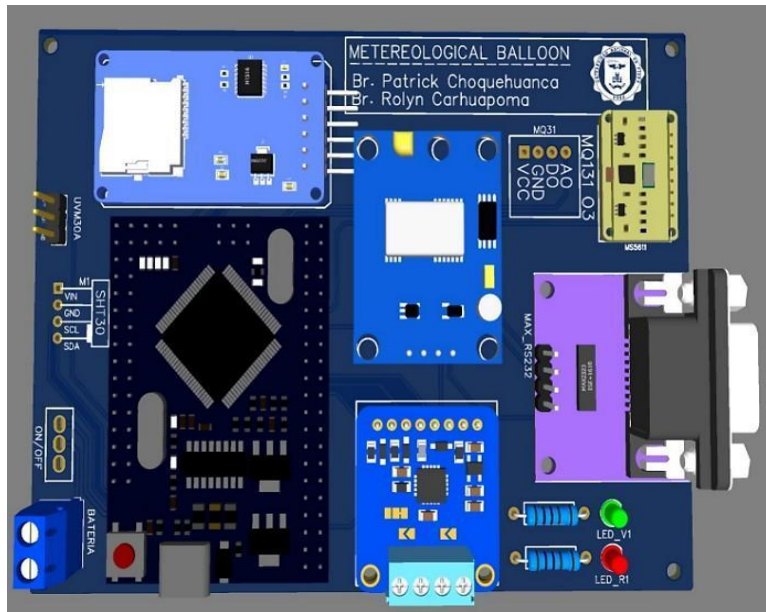


Figura 4. Diseño de la placa PCB con los componentes ensamblados

2.4 Calibración de sensores

Una vez completado el ensamblaje e integración de los componentes, se procedió a la calibración individual de los sensores con el objetivo de garantizar la precisión de las mediciones durante el vuelo. Este proceso fue fundamental para validar el desempeño de los sensores bajo condiciones controladas y establecer una referencia confiable frente a los valores teóricos. En esta sección se describe el procedimiento seguido para el sensor de temperatura PT100, acoplado al módulo de adquisición MAX31865.

Dado que la ciudad de Piura, lugar donde se realizaron los ensayos, se encuentra a una altitud de aproximadamente 30 metros sobre el nivel del mar, se consideró la presión atmosférica local para establecer con mayor precisión los puntos de referencia térmicos. El primer experimento tuvo como objetivo verificar la respuesta del sensor PT100, acoplado al módulo MAX31865, en el punto de ebullición del agua. Para ello, el sensor fue sumergido en un recipiente con agua en ebullición, cuya temperatura teórica, ajustada según la presión local, era de 99.98 °C. Se mantuvo sumergido durante cinco minutos para alcanzar el equilibrio térmico, tras lo cual se tomaron diez mediciones a intervalos de diez segundos, repitiéndose el procedimiento en tres ocasiones. El valor promedio registrado por el sensor fue de 100.104 °C, lo que representa una diferencia de 0.125 °C respecto al valor teórico. En el segundo experimento, se evaluó el desempeño del sensor en condiciones de congelación. Tras sumergirlo en agua en fase sólida y mantenerlo en equilibrio térmico durante cinco minutos, se tomaron diez mediciones con intervalos de diez segundos. El sensor PT100 arrojó un valor promedio de 0.94 °C, mientras que un sensor de referencia (Leybold) registró un promedio de 0.33 °C. Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 5.

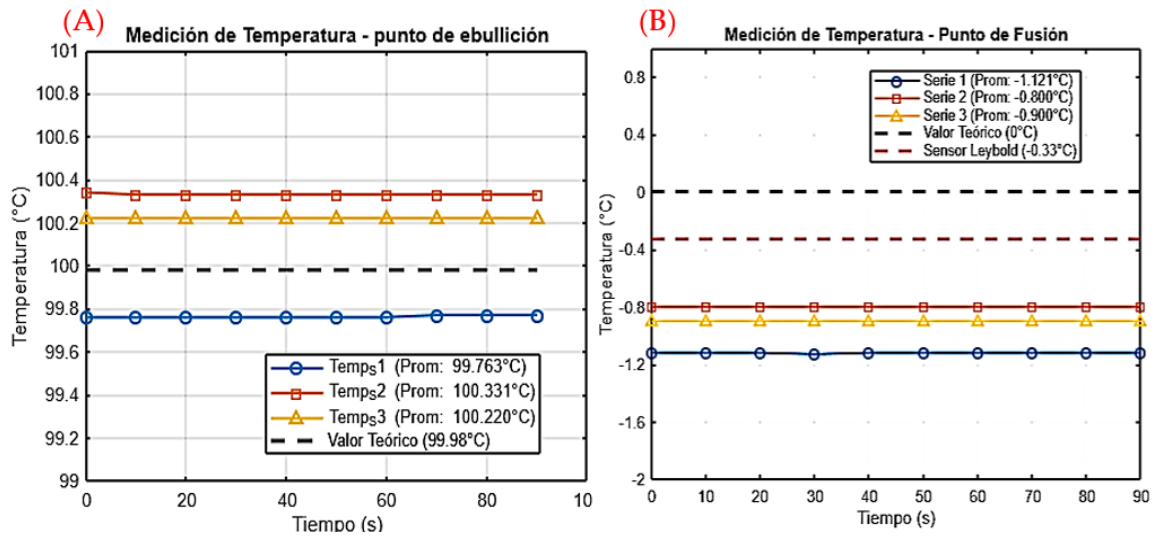


Figura 5. Valores de temperatura del punto de fusión y ebullición del agua obtenidos por el sensor PT100.

En continuidad con el proceso de calibración, el sensor de humedad relativa SHT40 fue ajustado utilizando el método de sales saturadas, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma internacional ASTM E104-02-2012 [30]. Este procedimiento permite generar ambientes de humedad controlada mediante soluciones químicas específicas que, a una temperatura constante, producen valores conocidos de humedad relativa (HR). En este caso, se emplearon sulfato de magnesio ($MgSO_4$), que genera una HR de $32.768 \pm 0.16 \%$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, y cloruro de sodio ($NaCl$), que produce una HR de $75.29 \pm 0.12 \%$ bajo las mismas condiciones [28]. Cada solución fue preparada en un recipiente herméticamente sellado, en el cual se colocó el sensor durante 24 horas a temperatura ambiente ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), con el fin de garantizar la estabilización de la humedad. El montaje experimental puede observarse en la Figura 6. Para cada solución, se realizaron tres series de diez mediciones con intervalos de diez segundos entre ellas. Posteriormente, se calcularon los valores promedio obtenidos y se compararon con los valores teóricos de referencia.



Figura 6. Sensor de humedad SHT40 expuesto al vapor de la solución de $MgSO_4$

Los resultados mostraron que, en el caso del sulfato de magnesio, el valor teórico de 33.1 % HR contrastó con un promedio experimental de 38.54 % HR, evidenciando una desviación positiva de +5.44 %. En el caso del cloruro de sodio, el valor teórico de 75.3 % HR se comparó con un valor promedio medido de 81.17 % HR, con una desviación de +5.87 %. Se aplicó una corrección automática restando el promedio de las desviaciones (+5.655 %) a ambas mediciones. Los nuevos valores ajustados son (32.88 % y 75.52 %) acercándose notablemente a los teóricos, con un error menor a ± 0.3 %. Los valores promedio de los valores obtenidos en los experimentos medidos por el sensor SHT40 se muestran en la Figura 7.

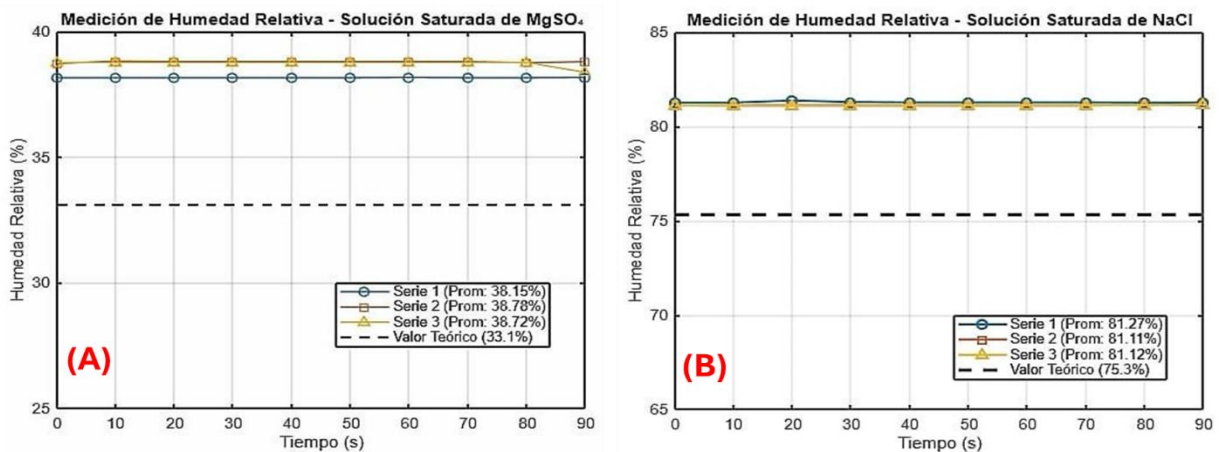


Figura 7. Sensor de humedad SHT40 expuesto al vapor MgSO₄ y NaCl

La calibración del sensor de presión barométrica MS5611 se realizó mediante comparación directa con un sistema de referencia LabQuest 2, al que se acopló un sensor Vernier de alta precisión. Para ello, ambos sensores fueron colocados en el interior de un recipiente hermético previamente modificado con dos orificios para permitir su inserción y exposición simultánea a los cambios de presión. Una vez sellado el sistema, se utilizó una jeringa unidireccional para extraer aire de manera gradual, reduciendo progresivamente la presión interna del contenedor. Durante el ensayo, se realizaron diez mediciones con intervalos de diez segundos, abarcando un rango de presión desde 1000 hPa hasta 100 hPa. Este procedimiento permitió evaluar el comportamiento del sensor MS5611 en distintos niveles de presión y contrastar sus registros con los valores obtenidos por el sistema de referencia. La configuración experimental puede observarse en la Figura 8.



Figura 8. Registro de datos a diferentes niveles de presión barométrica

Los valores obtenidos por el sensor de presión MS5611 fueron comparados con las mediciones del sensor de referencia, evidenciando una variación promedio de 1.428 hPa entre ambos dispositivos, margen que se considera aceptable dentro de los límites esperados para mediciones atmosféricas. La estrecha concordancia entre ambos conjuntos de datos demuestra la confiabilidad del MS5611 para aplicaciones en ambientes controlados, lo cual puede apreciarse en la Figura 9.

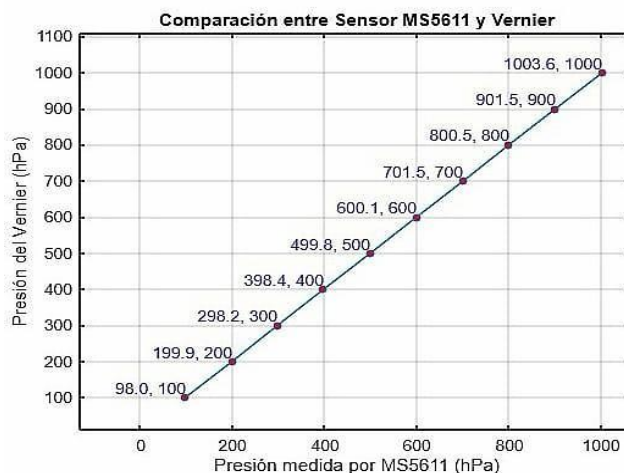


Figura 9. Valores de comparación entre el sensor MS5611 y el equipo Vernier

En cuanto a los sensores MQ131 y UVM30A, sus registros fueron utilizados exclusivamente como indicadores cualitativos de la concentración de ozono y la intensidad de la radiación ultravioleta, respectivamente, en diferentes niveles de altitud, debido a las limitaciones inherentes a su precisión absoluta. Para mejorar la exactitud de las mediciones de los sensores PT100, SHT40 y MS5611, se programaron factores de compensación en el microcontrolador Arduino, con el fin de corregir automáticamente las desviaciones detectadas respecto a los equipos de referencia. Tras aplicar estos ajustes, se realizaron nuevas pruebas de validación, confirmando que la precisión alcanzada por los sensores calibrados se mantuvo dentro de los márgenes de tolerancia permitidos para las variables evaluadas. En la Figura 10, se resumen la instrumentación utilizada para el estudio.

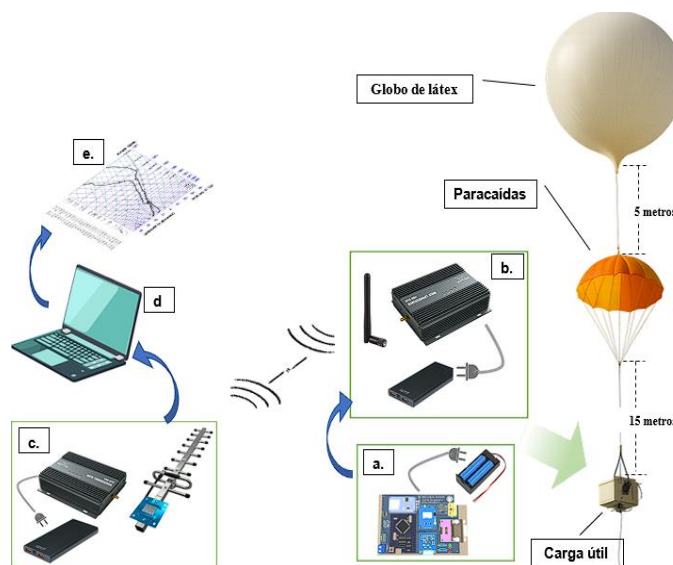


Figura 10. Resumen de equipos y materiales utilizados

2.5 Lanzamiento de los globos sonda y recuperación de la carga útil

Una vez finalizado el proceso de calibración y validación de los sensores, se procedió al lanzamiento de los globos sonda, etapa crucial para la recolección de datos en condiciones estratosféricas. El sitio de lanzamiento fue seleccionado estratégicamente en una zona despejada, ubicada a 10 metros del Laboratorio de Física de la Universidad Nacional de Piura. Esta ubicación presentaba condiciones logísticas favorables, como fácil acceso y proximidad a la estación meteorológica instalada en la azotea del laboratorio, la cual fue empleada para la calibración in situ de los sensores. Las coordenadas geográficas exactas del punto de lanzamiento fueron -5.17702 de latitud y -80.61734 de longitud. La disposición del lugar puede observarse en la Figura 11.

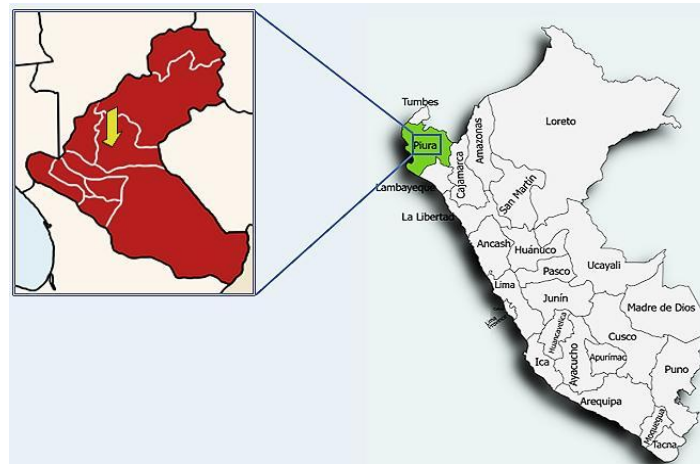


Figura 11. Ubicación de lanzamiento

El primer lanzamiento se llevó a cabo el sábado 28 de septiembre de 2024 a las 10:35 a.m. (15:35 UTC), durante el cual el globo alcanzó una altitud máxima de 28.80 km. Para la localización y recuperación de la carga útil, se emplearon las plataformas virtuales de rastreo que serán descritas luego. El segundo lanzamiento se efectuó el sábado 5 de octubre de 2024 a las 12:11 p.m. (17:11 UTC) y, en esta ocasión, se integró una cámara a bordo que permitió documentar visualmente todo el proceso de ascenso. Ambos lanzamientos se desarrollaron con éxito, sin incidentes técnicos relevantes. La Figura 12 muestra los preparativos correspondientes a cada uno de estos eventos: (a) primer lanzamiento y (b) segundo lanzamiento.

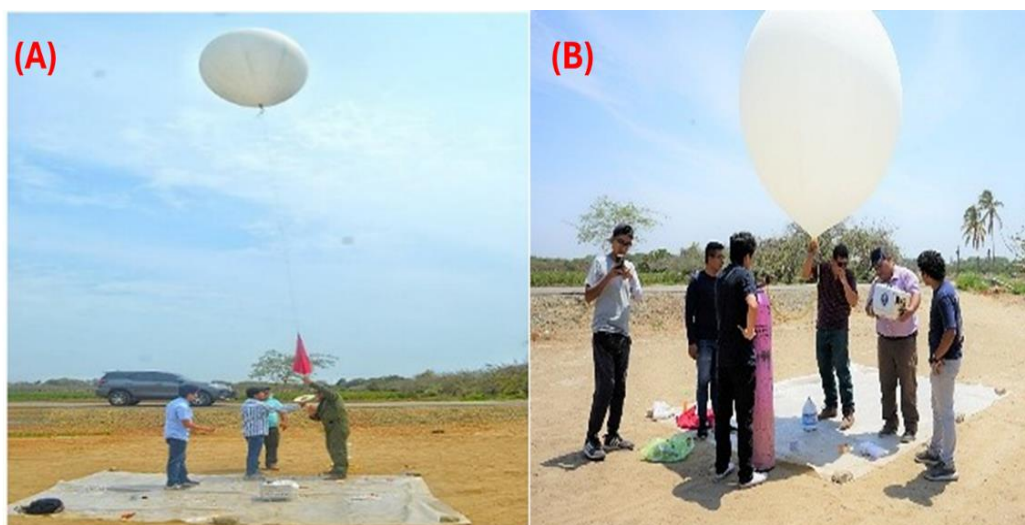


Figura 12. Lanzamiento de Globo Sonda

2.6 Seguimiento del globo sonda

Para el monitoreo del trayecto del globo sonda, se empleó la herramienta Predic Sondehub, la cual permitió simular la trayectoria prevista minutos antes del lanzamiento y estimar con antelación el posible punto de impacto de la carga útil [29]. De forma complementaria, se utilizó la plataforma Mapeo Spot, la cual fue configurada para recibir actualizaciones de posición cada 2.5 minutos, lo que facilitó el rastreo continuo del dispositivo Spot Trace (GPS) durante el ascenso y desplazamiento del globo [24]. La Figura 13 muestra, en la parte (a), la simulación previa de la trayectoria y el punto estimado de impacto, y en la parte (b), la ruta real descrita por el globo durante el primer lanzamiento, registrada a través del sistema GPS y visualizada mediante la plataforma Mapeo Spot.

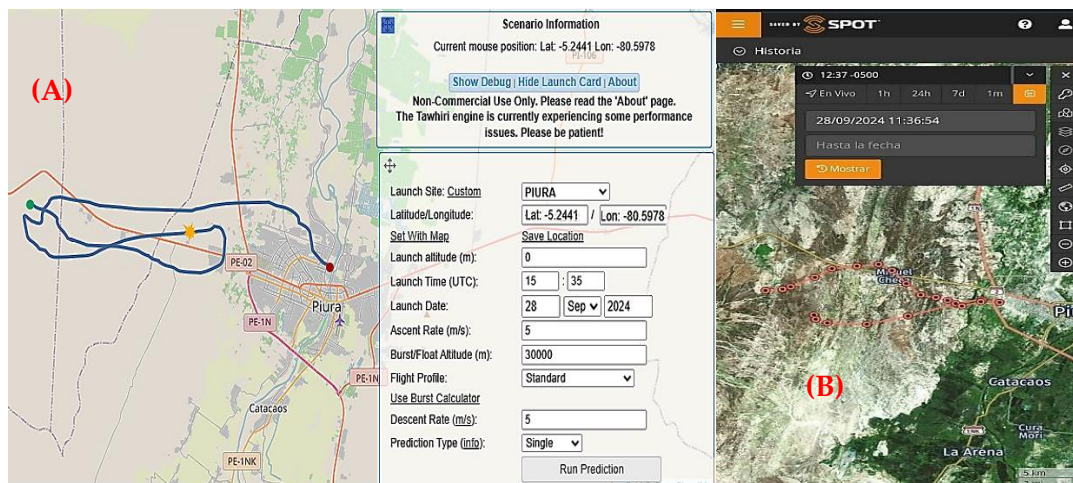


Figura 13. Trayectoria del Globo Sonda

III. RESULTADOS

Como resultado de los dos lanzamientos realizados, se logró recopilar una gran cantidad de datos en tiempo real sobre las variables atmosféricas de interés. En el primer vuelo, el sistema registró información durante 2 horas, 12 minutos y 10 segundos, desde el despegue hasta la descarga de la fuente de alimentación. En el segundo lanzamiento, el tiempo de monitoreo fue de 1 hora, 56 minutos y 50 segundos. La alta densidad de datos obtenida en ambas misiones permitió construir perfiles verticales detallados de temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, radiación ultravioleta y concentración de ozono, lo cual posibilita el análisis comparativo de las condiciones estratosféricas registradas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de estas variables.

3.1. Valores de temperatura atmosférica

A partir de esta sección, se emplearán las notaciones T_1 y T_2 para referirse a los valores de temperatura registrados durante el primer y segundo lanzamiento, respectivamente (este mismo criterio se aplicará al análisis de las demás variables). Durante el ascenso, ambos globos alcanzaron altitudes donde se observaron los valores mínimos de temperatura, correspondientes a la región de la tropopausa, capa de transición entre la troposfera y la estratósfera, en la cual las temperaturas típicamente oscilan entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el primer lanzamiento, la temperatura mínima registrada fue de $T_1 = -54.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una altitud de 15.74 km, mientras que en el segundo lanzamiento se obtuvo una temperatura mínima de $T_2 = -70.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 15.79 km de altitud. Posteriormente, al alcanzar las altitudes máximas registradas por los globos $Z_1 = 28.80\text{ km}$ y $Z_2 = 25.10\text{ km}$ las temperaturas se elevaron a $T_1 = -14.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_2 = -33.39\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Estos resultados son consistentes con la estructura térmica esperada de la atmósfera: la temperatura disminuye con la altitud en la troposfera hasta llegar a la tropopausa, y luego aumenta gradualmente en la estratósfera. La diferencia entre T_1 y T_2 evidencia variaciones en las condiciones atmosféricas entre ambos días de lanzamiento. El perfil vertical de temperatura para ambos vuelos se presenta en la Figura 14.

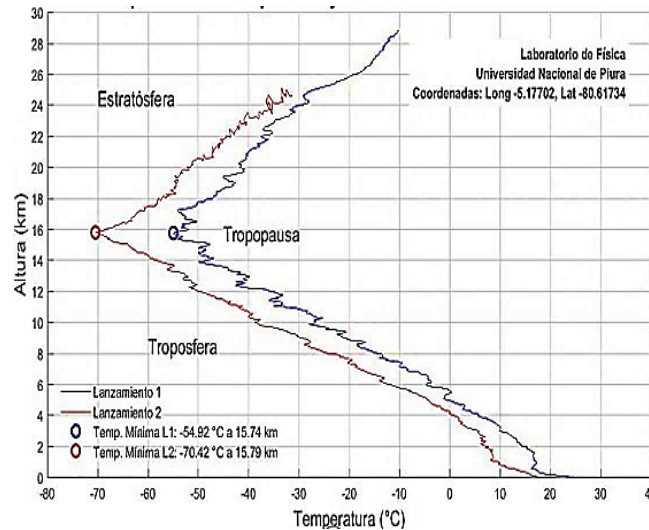


Figura 14. Perfil atmosférico de la temperatura

3.2. Valores de presión atmosférica

Siguiendo con el análisis de las variables atmosféricas, se presentan los perfiles verticales de presión, representados como P_1 para el primer lanzamiento y P_2 para el segundo. En ambos vuelos, los valores mínimos de presión se registraron a las altitudes máximas alcanzadas por los globos sonda, ubicándose dentro de la región baja de la estratósfera, donde la densidad del aire es considerablemente menor. En el primer lanzamiento, a una altitud de $Z_1 = 28.80$ km, se obtuvo una presión mínima de $P_1 = 14.02$ hPa. En el segundo lanzamiento, a $Z_2 = 25.10$ km, el valor mínimo registrado fue de $P_2 = 24.69$ hPa. Esta diferencia en los valores de presión entre ambos vuelos se corresponde con la diferencia en altitud alcanzada, así como con posibles variaciones meteorológicas entre los días de los lanzamientos. La presión atmosférica, como es característico, disminuye de manera exponencial con la altitud. La superposición de los perfiles de presión de ambos experimentos muestra una coherencia en la tendencia de los datos y respalda la confiabilidad del sistema de medición. La Figura 15 ilustra comparativamente los perfiles atmosféricos de presión para ambos lanzamientos, evidenciando el comportamiento esperado según la estructura vertical de la atmósfera.

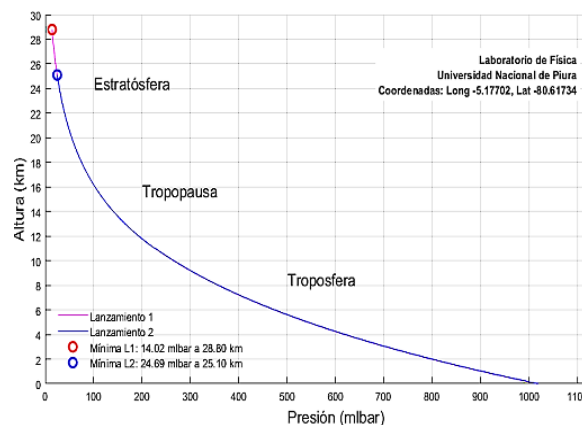


Figura 15. Perfil atmosférico de presión

3.3 Valores de humedad relativa

El análisis del perfil vertical de humedad relativa, representado como HR_1 y HR_2 para el primer y segundo lanzamiento respectivamente, muestra un comportamiento coherente con la estructura térmica y dinámica de la atmósfera. Los valores mínimos registrados de humedad relativa se ubican en la estratósfera inferior, región caracterizada por temperaturas extremadamente bajas, lo que limita significativamente la capacidad del aire para retener vapor de agua. Durante el primer lanzamiento, a una altitud de $Z_1 = 25.00$ km, se obtuvo un valor mínimo de $HR_1 = 10.08$ %, mientras que, en el segundo lanzamiento, a $Z_2 = 24.67$ km, se registró $HR_2 = 13.87$ %. Estas cifras son consistentes con lo reportado para esta región atmosférica, que presenta condiciones de alta estabilidad y baja humedad. El perfil atmosférico de humedad relativa, mostrado en la Figura 16, evidencia un marcado descenso a medida que el globo asciende a través de la troposfera, alcanzando un punto de inflexión en altitudes cercanas a los 11 km. A partir de esa altura, correspondiente a la subcapa llamada tropopausa, la humedad tiende a estabilizarse con valores persistentemente bajos. Este comportamiento apoya la hipótesis de que la tropopausa actúa como una barrera física, que restringe el ascenso de masas de aire húmedo desde la troposfera y limita el intercambio de humedad con la estratósfera, la cual permanece relativamente seca.

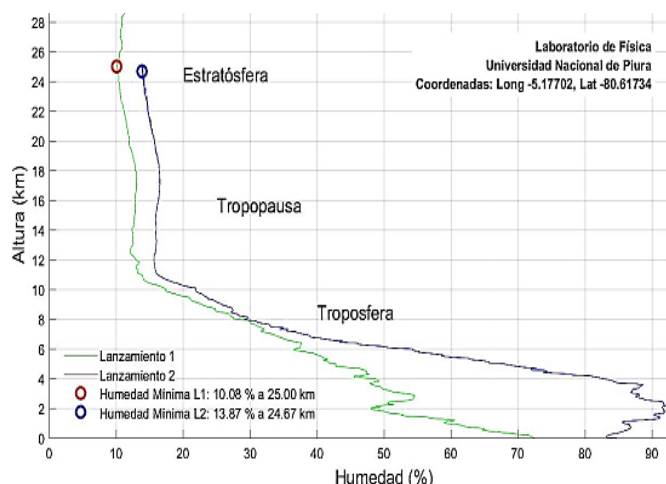


Figura 16. Perfil atmosférico de humedad relativa

3.4 Valores de la radiación (UV) y de concentración de ozono (O_3)

El comportamiento de la radiación ultravioleta y la concentración de ozono en función de la altitud fue evaluado mediante los sensores UVM30A y MQ131, respectivamente. Aunque ambos sensores proporcionan mediciones de tipo cualitativo, los valores obtenidos permiten identificar tendencias representativas del entorno atmosférico en diferentes capas de la atmósfera. Durante los vuelos, el sensor UVM30A registró valores máximos de salida de 1251.22 mV y 1246.33 mV, correspondientes a altitudes de 20.04 km y 22.24 km en el primer y segundo lanzamiento, respectivamente. Estos picos reflejan tendencias esperadas en regiones de menor densidad atmosférica, donde la atenuación natural de la radiación UV es menor debido a la reducción de moléculas que absorben o dispersan la radiación solar. El perfil vertical de radiación UV para ambos vuelos se presenta en la Figura 17a. Por otro lado, el sensor MQ131, utilizado para estimar la concentración relativa de ozono (O_3), mostró valores mínimos a altitudes de 14.51 km en el primer lanzamiento y 3.80 km en el segundo. Estos datos reflejan las fluctuaciones propias del contenido de ozono en las distintas capas atmosféricas, donde su distribución depende de múltiples factores como la dinámica estratosférica, la radiación solar incidente y las condiciones meteorológicas locales. La evolución de los valores medidos se muestra en la Figura 17b. Los valores mostrados corresponden a lecturas cualitativas de los sensores y no deben interpretarse como concentraciones absolutas, ya que la función principal es evidenciar tendencias relativas según la altitud.

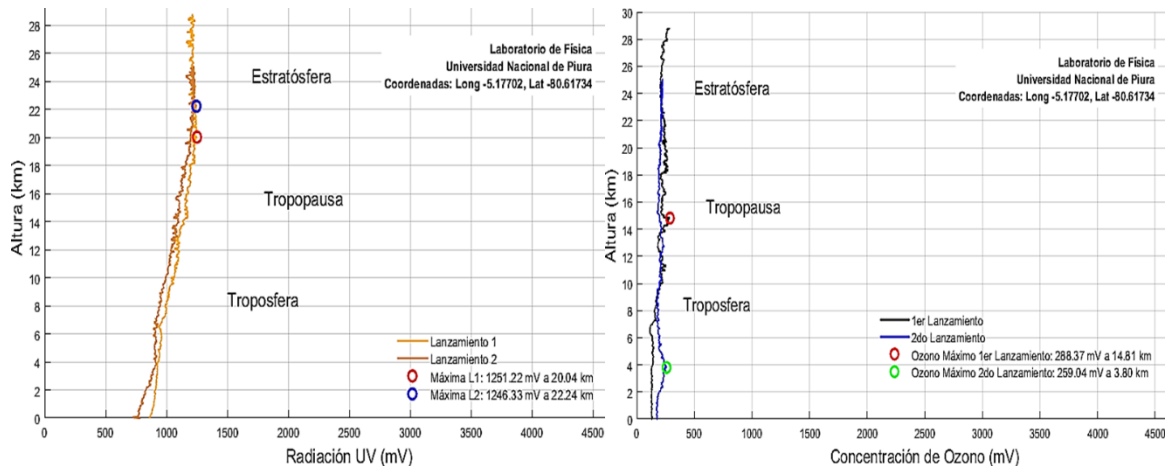


Figura 17. Perfil atmosférico de radiación UV y concentración de ozono

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de los dos lanzamientos de globos sonda evidencian la efectividad de la plataforma desarrollada, basada en un diseño modular de bajo costo, para la adquisición de perfiles atmosféricos verticales detallados en la región de Piura. Esta aproximación experimental, que integra instrumentación calibrada, microcontroladores programables y sensores comerciales, ha demostrado ser una herramienta viable para la caracterización de variables clave en la atmósfera media y superior, incluso bajo condiciones operativas exigentes. En particular, los registros de temperatura mínima ($-54.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70.42\text{ }^{\circ}\text{C}$) obtenidos a altitudes de 15.74 km y 15.79 km son consistentes con los valores esperados para la tropopausa tropical, típicamente ubicada entre los 15 y 17 km de altitud, donde las temperaturas oscilan entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos resultados coinciden con estudios previos realizados en la ciudad de Huancayo [32] y Lima [11]. en el primer lanzamiento se presentó un aumento de temperatura a los 700 m. (inversión térmica) debido a corrientes de aire [12]. Entre los 15 y 16 Km de altura, se da segunda inversión térmica, incrementado la temperatura debido a la presencia de ozono que interactúa con la radiación, correspondiente a la subcapa de la tropopausa, lo que valida la precisión del sistema de adquisición de datos. Estas observaciones coinciden con diferentes fuentes que registran a esta subcapa a una altitud media de 17 km [9]. No obstante, se identificaron discrepancias relevantes en las temperaturas registradas a las altitudes mínimas alcanzadas por los globos, con una diferencia de más de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre ambos lanzamientos ($-54.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente a $-70.42\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esta variación puede explicarse por la dinámica atmosférica local y factores como la radiación solar incidente, los gradientes térmicos diarios y el periodo de tiempo entre lanzamiento de una semana, periodo suficiente para que se produzcan cambio en las condiciones meteorológicas específicas no controladas. Estos hallazgos resaltan la necesidad de realizar campañas de medición repetidas para caracterizar de manera más robusta la variabilidad atmosférica en escalas temporales y espaciales.

Por otro lado, los valores de presión mínima (14.02 hPa y 24.69 hPa a altitudes de 28.8 km y 25.1 km, respectivamente) se alinean con lo previsto por modelos atmosféricos estándar [11], lo registrados en ambos lanzamientos decaen exponencialmente debido a la disminución de la columna de aire (debido a la menor concentración de gases y partículas) conforme el globo asciende hacia la estratósfera [9], los datos obtenidos de la variable presión reafirma la confiabilidad del sensor MS561.

Los perfiles de humedad relativa mostraron un comportamiento coherente con la estructura atmosférica vertical con un descenso progresivo a lo largo de la troposfera, salvo en el segundo lanzamiento presentando un incremento de humedad en los primeros kilómetros, factor que permite la formación de nubes. Luego se estabiliza disminuyendo gradualmente conforme se asciende en la atmósfera hasta alcanzar la tropopausa donde se registran los valores de humedad mínimos ($HR_1 = 10.08\%$ y $HR_2 = 13.87\%$). Este comportamiento respalda la hipótesis ampliamente aceptada de que la tropopausa actúa como una barrera dinámica que restringe el intercambio de masa de agua entre la troposfera húmeda y la estratósfera seca.

Si bien los sensores UVM30A y MQ131 operaron fuera de sus rangos térmicos óptimos, sus lecturas resultaron cualitativamente útiles para identificar tendencias generales en la intensidad de la radiación UV y la concentración de ozono. Sin embargo, la falta de calibración en condiciones extremas limita su uso como instrumentos cuantitativos, lo que señala la necesidad de incorporar sensores más robustos, específicamente diseñados para ambientes estratosféricos, en futuras implementaciones.

En comparación con estudios realizados en otras regiones del país, como Lima [11] y Huancayo [30], los datos obtenidos en Piura se alinean con las tendencias nacionales e internacionales como realizado en el Ecuador [9] a pesar de las diferencias geográficas, temporales y metodológicas. Esta convergencia subraya el valor de los globos sonda como herramientas complementarias a las estaciones meteorológicas tradicionales, especialmente en regiones con infraestructura de sondeo en altitud es muy limitada [13].

Los estudios que se realizan en los países desarrollados y un caso destacable es el desarrollado en Bruselas (Bélgica) donde se ha medido perfiles de ozono mediante ozonosondas desde 1969 durante más de 50 años realizando tres lanzamientos semanales permitiendo conocer la concentración de este gas en cada década y las proyecciones a futuro, además permitió validar perfiles de ozono mediante satélites para la región [31]. El Perú la exploración de la atmósfera los realizaba SENAMHI, pero la información recopilada y los análisis realizados a partir de los datos obtenidos no se encuentra fácilmente en el repositorio de la institución o que se haya realizado alguna publicación lo que es preocupante no conocer a profundidad los fenómenos físicos atmosféricos y como ellos afectan a la población. Por mencionar un país, en el Ecuador, desde el año 2014 a la fecha se han realizado 69 perfiles de ozono siendo la única fuente de datos para la validación satelital en la región cerca de la línea ecuatorial [32]. Para conocer más acerca de la exploración atmosférica basta con visitar la página web SondeHub Tracker: seguimiento en vivo de vuelos de radiosondas donde se puede visualizar los escasos lanzamientos realizados en Sudamérica a excepción de los países de Brasil y en menor número en Argentina, en comparación con los que se realizan en Estados Unidos, los países europeos y China [33].

Desde la perspectiva tecnológica, esta investigación pone en evidencia el potencial de sistemas contruidos con componentes de bajo costo y tecnología abierta. La plataforma se basó en un microcontrolador Arduino Mega 2560 Pro Mini, sensores digitales de temperatura, humedad y presión, módulos de comunicación LoRa, y una solución GPS satelital para seguimiento en tiempo real. Esta arquitectura modular no sólo permitió la adquisición y transmisión eficiente de datos, sino que además facilitó la integración de subsistemas mediante protocolos estándar, lo que optimiza la escalabilidad y la replicabilidad del sistema en diversos contextos geográficos o educativos. La utilización de herramientas digitales como Predic Sondehub para la predicción de trayectorias para el monitoreo en tiempo real. Los lanzamientos realizados en la región se utilizan radiosondas (como carga útil) disponibles en el mercado que miden dos o tres variables, el principal inconveniente es su vida útil por lo general es de un solo uso ya que cerca del 80% de estas no se logran recuperar sumado a ello que cada modelo de radiosonda tiene características

predeterminados por el fabricante, haciendo casi imposible agregar nuevos sensores y si se logran modificar éstos pierden su garantía.

Los estudios a los que se ha recurrido muestran que la carga útil no se ha recuperado por lo que hace más costoso desarrollar este tipo de proyectos a largo tiempo porque se necesitaría nuevos equipos en cada lanzamiento. Este sistema que se ha implementado mediante la integración simultánea de telemetría con el equipo de transmisión LoRa E90-DTU (900SL42) con el módulo Spot Trace, permitiendo la recuperación de la carga útil incluso en zonas rurales o de difícil acceso, algo que no ha sido documentado en estudios similares de bajo costo. Esta capacidad de integración se puede hacer con plataformas web y herramientas de visualización convirtiendo a la solución desarrollada en una infraestructura informática útil para el monitoreo ambiental distribuido, susceptible de escalar a entornos de computación en la nube o redes IoT aplicadas a estudios meteorológicos. De este modo se refuerza la idea de que sistemas basados en tecnologías accesibles pueden democratizar la investigación atmosférica y permitir la generación de datos científicos relevantes desde regiones periféricas o en vías de desarrollo. En síntesis, los hallazgos no solo validan la solidez científica de los datos recolectados, sino que también destacan el aporte del enfoque tecnológico adoptado, capaz de combinar eficiencia operativa, bajo costo y potencial de expansión en múltiples áreas de aplicación, tanto científicas como educativas e institucionales.

V. CONCLUSIONES

El lanzamiento de globos sonda equipados con sensores de bajo costo ha demostrado que es posible construir plataformas atmosféricas altamente funcionales, accesibles y operativas incluso bajo condiciones estratosféricas extremas. La arquitectura electrónica, basada en microcontroladores abiertos y sensores digitales integrados, permitió adquirir datos confiables de temperatura, humedad relativa y presión, con márgenes de error dentro de los rangos aceptables para aplicaciones científicas (± 0.5 °C para el sensor PT100, ± 1.8 % HR para el SHT40 y ± 1.43 hPa para el MS5611). Asimismo, los registros obtenidos de radiación ultravioleta y concentración de ozono, aunque preliminares y cualitativos, abren nuevas líneas de investigación orientadas al estudio de procesos fotoquímicos en la atmósfera media y su posible impacto en el clima regional. Estos hallazgos demuestran que es posible extender el uso de plataformas tecnológicas de bajo costo para abordar problemáticas ambientales complejas desde una perspectiva experimental. En esta misma dirección, los resultados permiten considerar al sistema como un precedente sólido para la implementación de un programa de monitoreo atmosférico estratosférico permanente en la región de Piura. Su arquitectura modular, basada en tecnologías abiertas y de bajo costo, lo convierte en una solución altamente escalable y replicable en otras regiones de América Latina que enfrentan desafíos similares en cuanto a infraestructura tecnológica y acceso a datos atmosféricos de alta resolución. Esta adaptabilidad, junto con la facilidad de ensamblaje y operación, refuerza su potencial como herramienta de uso académico, científico y técnico en contextos con recursos limitados.

Desde una perspectiva de evolución tecnológica, futuras versiones de la plataforma podrían incorporar sensores de mayor precisión, como espectrómetros UV para el análisis detallado de la radiación solar, detectores de aerosoles para evaluar la calidad del aire, y sistemas inerciales que permitan una reconstrucción más precisa de las trayectorias de vuelo. Asimismo, la integración de módulos de telemetría avanzada facilitaría la mejora de la resolución espacial y temporal de los datos recopilados, además de habilitar la transmisión remota en tiempo real mediante sistemas en la nube o entornos IoT. Como direcciones futuras, se recomienda ampliar la campaña de lanzamientos en diferentes estaciones del año con el fin de capturar la variabilidad estacional de la atmósfera. También, sería deseable promover colaboraciones interinstitucionales entre universidades, centros de investigación y organismos meteorológicos para estandarizar protocolos de lanzamiento, calibración y análisis, así como para compartir datos en redes

regionales. Esta estrategia no solo enriquecería los modelos climáticos locales, sino que también contribuiría al fortalecimiento de la capacidad científica y tecnológica de países en vías de desarrollo como el Perú.

Contribución de los autores:

Todos los autores han contribuido por igual en el desarrollo del estudio.

Agradecimientos:

Agradecemos al Mg. Rudy Giuseppe Espinoza Nina por su constante apoyo, compromiso y valiosa disposición para guiarnos a lo largo de este proyecto, así como por habernos involucrado activamente en su desarrollo. Asimismo, expresamos nuestro reconocimiento al Dr. Oscar Peña-Cáceres por sus oportunas y acertadas recomendaciones en la redacción de este trabajo, las cuales fueron relevantes para fortalecer su calidad científica y metodológica.

Financiamiento:

El estudio ha sido autofinanciado por los autores.

Declaración de consentimiento informado:

No aplica.

Declaración de disponibilidad de datos:

A solicitud se compartirían los datos.

Conflictos de intereses:

No existen conflictos de intereses.

REFERENCIAS

- [1] R. Barry, R. Chorley, R. G. Barry, y T. L. R. Chorley, *Atmosphere, Weather and Climate*, 0 ed. Routledge, 2004. <https://doi.org/10.4324/9780203428238>
- [2] J. Green y I. Dyer, "Measurement of humidity," *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, vol. 10, no. 1, pp. 45–47, Jan. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2008.11.016>
- [3] D. G. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics*, 1st ed. Cambridge University Press, 2000. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511800771>
- [4] P. Alexander, "A numerical study of open atmospheric balloon dynamics," *Physics of Fluids*, vol. 15, no. 10, pp. 3065–3078, Oct. 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1607325>
- [5] P. Cullis, C. Sterling, E. Hall, A. Jordan, B. Johnson, y R. Schnell, "Pop Goes the Balloon!: What Happens when a Weather Balloon Reaches 30,000 m asl?," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, no. 2, pp. 216–217, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0094.1>
- [6] E. V. Campos, J. E. M. Torres, y A. D. R. Campoy, "Plataforma de Pruebas de Bajo Costo para Vuelos en Globo a Grandes Alturas," *Pistas Educativas*, vol. 42, no. 136, Dec. 2020. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2425>
- [7] H. O. Larreynaga Paz, "Simulación de trayectoria de un globo sonda para dimensionamiento de subsistema de navegación en misiones a la estratosfera," Universidad Don Bosco, 2023. <http://hdl.handle.net/11715/2636>
- [8] H. I. Caldelas Trujillo, R. R. Espinosa Mendoza, y R. Reyes Cárdenas, "Telemetría para una Sonda Meteorológica," Thesis, 2012. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/7883>

- [9] R. Salvador Mora Bowen, "Experimento de sondeo vertical de la atmósfera en el Valle de Cumbayá, Ecuador protocolo de lanzamiento de sondas meteorológicas y resultados preliminares," bachelorThesis, Quito, 2015. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4144>
- [10] S. J. Cruz Herrera, "Diseño de un sistema de adquisición y visualización de datos de sensores inerciales y atmosféricos para cargas útiles de globos estratosféricos," Universidad Tecnológica del Perú, 2019. <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/3365>
- [11] A. Juárez Ortiz, "Determinación de parámetros atmosféricos de altura utilizando una radiosonda," 2014. <https://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/776>
- [12] M. W. Douglas y J. Murillo, "The Pan-American Climate Studies Sounding Network," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 89, no. 11, pp. 1709–1726, Nov. 2008. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2521.1>
- [13] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), "Datos Hidrometeorológicos en Piura," 2025. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=piura&p=estaciones>
- [14] C. Liu, C. Zhao, Y. Wang, y H. Wang, "Machine-Learning-Based Calibration of Temperature Sensors," *Sensors*, vol. 23, no. 17, p. 7347, Aug. 2023. <https://doi.org/10.3390/s23177347>
- [15] Y. Cho et al., "Low-cost urban heat environment sensing device with Android platform for digital twin," *HardwareX*, vol. 20, p. e00598, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00598>
- [16] F. Zhou y Y. Li, "The Height Measurement Device for Unmanned Aerial Vehicle based on Barometric Sensor," *International Journal of Science*, vol. 4, no. 3, pp. 78–84, 2017. <http://www.ijscience.net/download/IJS-4-3-78-84.pdf>
- [17] Serrano, J. Abril-Gago, y C. J. García-Orellana, "Development of a Low-Cost Device for Measuring Ultraviolet Solar Radiation," *Front. Environ. Sci.*, vol. 9, p. 737875, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.737875>
- [18] M. Badura, P. Batog, A. Drzeniecka-Osiadacz, y P. Modzel, "Low- and Medium-Cost Sensors for Tropospheric Ozone Monitoring," *Atmosphere*, vol. 13, no. 4, p. 542, Mar. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13040542>
- [19] C. Gheorghe y C. I. Stoica, "Wireless Weather Station Using Arduino Mega and Arduino Nano," *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, vol. 21, no. 1, pp. 35–38, Apr. 2021. <https://doi.org/10.2478/sbeef-2021-0008>
- [20] H. M. Costa, "Soluções opensource para coleta e análise de dados de telemetria via rádio frequência," bachelorThesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024. <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/36161>
- [21] H. Xu et al., "Research on an IoT-based Smart Monitoring System for Distribution Transformers in Solar PV Plants," in 2023 IEEE 6th Int. Electrical and Energy Conf. (CIEEC), Hefei, China, May 2023, pp. 2377–2381. <https://doi.org/10.1109/CIEEC58067.2023.10166229>
- [22] J. E. Epeloa, "Estudio y validación de mediciones de presión de vapor de agua integrado en la atmósfera," Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 2015. <https://doi.org/10.35537/10915/45418>
- [23] S. Bassino, "Optimizing Data Collection in IoT Networks with LoRa Equipped Drone," *laurea*, Politecnico di Torino, 2024. <https://webthesis.biblio.polito.it/31862/>
- [24] Price, "An apparatus for personalized atmospheric and flight data collection aboard high altitude weather balloons," *HardwareX*, vol. 6, p. e00077, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00077>
- [25] J. Hossain, N. A. Algeelani, A. H. H. Al-Masoodi, y A. F. A. Kadir, "Solar-wind power generation system for street lighting using internet of things," *IJEECS*, vol. 26, no. 2, p. 639, May 2022. <https://doi.org/10.11591/ijeeecs.v26.i2.pp639-647>
- [26] M. de la Horra Köllmer, "Sistemas de adquisición de datos basados en la plataforma Arduino: aplicaciones a Matlab, Simulink y Android," May 2013. <https://hdl.handle.net/10016/17166>
- [27] T. R. Ault, R. Zurita-Milla, y M. D. Schwartz, "A Matlab© toolbox for calculating spring indices from daily meteorological data," *Computers & Geosciences*, vol. 83, pp. 46–53, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.015>
- [28] ASTM International, "Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Aqueous Solutions," *ASTM Standard E104-02(2012)*, 2012. <https://doi.org/10.1520/E0104-02R12>

- [29] M. H. Denton et al., "Experiments at the edge of space: balloon flights to the stratosphere," *Phys. Educ.*, vol. 59, no. 2, p. 025024, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad1f5e>
- [30] R. Vicuña Salazar, W. Ramírez Salas, y L. Suárez Salas, "Estimación de la altura de capa de mezcla mediante globosondeo de la atmósfera en la zona urbana de Huancayo, Perú," *Yotantsipanko*, vol. 2, no. 1, Jul. 2022. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v2i1.14>
- [31] R. Van Malderen et al., "Fifty years of balloon-borne ozone profile measurements at Uccle, Belgium," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, no. 16, pp. 12385–12411, Aug. 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12385-2021>
- [32] M. Cazorla y E. Herrera, "An ozonesonde evaluation of spaceborne observations in the Andean tropics," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, p. 15942, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20303-7>
- [33] projecthorus/sondehub-tracker, JavaScript, Project Horus, May 30, 2025. <https://github.com/projecthorus/sondehub-tracker>