

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA, CASO LAGUNA PALCACOCHA (ANCASH)”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

**DAVID ISRAEL GARAY MARZANO**

Lima – Perú

**2022**

---

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

## Document Information

Analyzed document	TSP_Garay Marzano David para Ouriginal.pdf (D149164397)
Submitted	11/9/2022 6:10:00 PM
Submitted by	Victoria Calle Montes 
Submitter email	vcmquebec@lamolina.edu.pe
Similarity	0%
Analysis address	vcmquebec.unalm@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Anteproyecto Estacion meteorologica - E. Lopez corregido 9.2.21 JCG.docx</b> Document Anteproyecto Estacion meteorologica - E. Lopez corregido 9.2.21 JCG.docx (D95223129)		<b>1</b>
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.gob.pe/institucion/inaigem/noticias/286510-el-cambio-climatico-en-el-incremento-de...">https://www.gob.pe/institucion/inaigem/noticias/286510-el-cambio-climatico-en-el-incremento-de...</a> Fetched: 11/9/2022 6:11:00 PM		<b>1</b>

## Entire Document

1 UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS "ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO EN ZONAS DE ALTA MONTAÑA, CASO LAGUNA PALCACOCHA (ANCASH)" TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO METEORÓLOGO EJECUTOR: DAVID ISRAEL GARAY MARZANO ASERORA: M. SC. VICTORIA DORIS CALLE MONTES LIMA – PERÚ 2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“ANÁLISIS HIDROMETEOROLÓGICO EN ZONAS DE ALTA  
MONTAÑA, CASO LAGUNA PALCACOCHA (ANCASH)”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METEORÓLOGO**

Presentada por:

**DAVID ISRAEL GARAY MARZANO**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Dr. Alexis Nicolás Ibáñez Blancas  
Presidente

---

Mg. Sc. Ely Oliver Guardia Jara  
Miembro

---

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar  
Miembro

---

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes  
Asesora

## **DEDICATORIA**

A Dios y a mis seres queridos cercanos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la profesora Victoria Calle, por su disposición a ayudar y constante asesoramiento.

A los miembros del jurado.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT .....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Objetivos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Meteorología de montañas .....	3
2.2. Arduino.....	3
2.3. Estación meteorológica automática portátil de Campbell Scientific .....	4
2.4. Laguna Palcacocha.....	4
2.5. Raíz del error cuadrático medio (RMSE).....	4
2.6. BIAS o sesgo .....	4
2.7. Coeficiente de Pearson .....	5
III. DESARROLLO DEL TRABAJO .....	6
3.1. Delimitación temporal y ámbito geográfico .....	6
3.2. Equipo y Materiales .....	7
3.3. Regla limnimétrica .....	11
3.4. Estación meteorológica automática (EMA) profesional .....	12
3.5. Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de un sensor de nivel del agua a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para los meses de marzo-mayo del 2017.....	13
3.5.1 Diseño y ensamblaje del sensor de nivel de agua, a partir de un sensor ultrasónico. ....	13
3.5.2 Construcción e instalación del sensor de nivel del agua. ....	15
3.5.3. Recopilación de la data registrada por un periodo de 3 meses (marzo a abril de 2017), los datos fueron tomados con una frecuencia de una hora.....	17

3.6. Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de una microestación meteorológica automática a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para el año 2019. ....	18
3.6.1 Diseño y ensamblaje de la microestación meteorológica que registró datos de temperatura y humedad relativa. ....	18
3.6.2 Construcción e instalación de la microestación meteorológica que registró datos de temperatura y humedad relativa. ....	19
3.6.3. Recopilación de la data registrada por un periodo de 12 meses (enero a diciembre de 2019), los datos fueron tomados con una frecuencia de una hora. ....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSION .....	23
4.1. Comparación de los datos diarios de nivel del agua de la laguna Palcacocha tomados de la regla limnimétrica versus los datos registrados por el sensor (Arduino).....	23
4.1.1. Validación de los datos diarios de nivel del agua de la laguna Palcacocha registrados, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y coeficiente de Pearson.....	23
4.2. Comparación de valores de temperatura máxima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino).....	24
4.2.1. Validación de los datos diarios de temperatura máxima de la microestación meteorológica (Arduino), a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson.....	25
4.3. Comparación de valores de temperatura mínima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino).....	25
4.3.1. Validación de los datos diarios de temperatura mínima de la	

microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson. ....	26
4.4. Comparación de valores de humedad relativa máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica .....	27
4.4.1. Validación de los datos diarios de humedad relativa máxima de la microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson. ....	27
4.5. Comparación de valores de humedad relativa mínima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica .....	28
4.5.1. Validación de los datos diarios de humedad relativa mínima de la microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson. ....	29
V. CONCLUSIONES .....	30
VI. RECOMENDACIONES .....	31
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32

## ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1: Pruebas estadísticas de los datos diarios del sensor de nivel (Arduino) .....	24
Tabla 2: Pruebas estadísticas de los datos diarios de temperatura máxima de la microestación (Arduino).....	25
Tabla 3: Pruebas estadísticas de los datos diarios de temperatura mínima de la microestación (Arduino).....	26
Tabla 4: Pruebas estadísticas de los datos diarios de humedad relativa máxima de la microestación (Arduino).....	27
Tabla 5: Pruebas estadísticas de los datos diarios de humedad relativa mínima de la microestación (Arduino).....	29

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista satelital de la laguna Palcacocha.....	6
Figura 2: Imagen del DHT22 y su descripción técnica.....	7
Figura 3: Imagen de la placa Arduino NANO y su descripción técnica. ....	7
Figura 4: Imagen del módulo MicroSD y su descripción técnica. ....	8
Figura 5: Imagen del Módulo reloj Ds1307 y su descripción técnica. ....	8
Figura 6: Imagen del Panel solar y su descripción técnica. ....	8
Figura 7: Imagen de las pilas de Litio y su descripción técnica. ....	9
Figura 8: Imagen Tarjeta elevadora de voltaje a 5v y su descripción técnica. ....	9
Figura 9: Imagen Tarjeta módulo de carga de batería de Litio y su descripción técnica.....	9
Figura 10: Imagen referencial de cobertor para sensor de temperatura y humedad. ....	10
Figura 11: Imagen referencial de cobertor para sensor ultrasónico HC-SR04.....	10
Figura 12: Imagen referencial de panel solar de 30 W. ....	10
Figura 13: Imagen referencial de batería de 12 V. ....	11
Figura 14: Imagen referencial del controlador de carga de 20 A y 12/24 V.....	11
Figura 15: Valores diario promedio de las variaciones del nivel de la laguna, con respecto al nivel de rebose, tomados desde la regla limnimétrica.....	12
Figura 16: Datos de las temperaturas extremas diarias de la estación meteorológica profesional (Campbell), para el periodo de enero a diciembre del 2019. ....	12
Figura 17: Datos de la humedad relativa extrema diaria de la estación meteorológica profesional (Campbell), para el periodo de enero a diciembre del 2019. ....	13
Figura 18: Diagrama con los componentes del sistema de almacenamiento de energía portátil.....	14
Figura 19: Diagrama que muestra a todos los módulos (incluido el sensor) conectados a la placa Arduino NANO.....	15

Figura 20: A la izquierda se observa la estructura del proyecto junto al panel solar, a la derecha se tiene una vista del sensor quien será el que estará ubicado (en una línea paralela sobre el espejo de agua) y medirá la altura .....	16
Figura 21: sensor de nivel de laguna montado sobre la estructura metálica .....	17
Figura 22: Valores promedio diarios de la altura por debajo del nivel de rebose de la laguna Palcacocha registrados por el sensor a bajo costo. ....	17
Figura 23: Diagrama con los componentes del sistema de almacenamiento de energía.....	18
Figura 24: Diagrama que muestra a todos los módulos (incluido el sensor) conectados a la placa Arduino NANO.....	19
Figura 25: Microestación meteorológica (Arduino) instalada.....	21
Figura 26: Datos de las temperaturas extremas diarias de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.....	22
Figura 27: Datos de la humedad relativa extrema diaria de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.....	22
Figura 28: Comparación de los niveles de laguna tomados de la regla versus los registrados por el sensor, para el periodo de marzo a mayo del 2017. ....	23
Figura 29: Comparación de valores de temperatura máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019.....	24
Figura 30: Comparación de valores de temperatura mínima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.....	26
Figura 31: Comparación de valores de humedad relativa máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019.....	27

Figura 32: Comparación de valores de humedad relativa mínima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019..... 28

## RESUMEN

Actualmente existe un déficit de información hidrometeorológica en las zonas de alta montaña, debido a su difícil acceso y a lo costoso que es la adquisición y mantenimiento de equipos automáticos, sin embargo, ahora existen tecnologías a bajo costo que permiten desarrollar diversos tipos de proyectos y cuentan con toda una gama de sensores al escoger, entre ellos, están los del tipo hidrometeorológico: temperatura del aire, humedad relativa y sensor de nivel, que son los que se utilizarán en el presente trabajo, ya que la microestación meteorológica (Arduino) fue instalada al lado de una estación meteorológica automática profesional (Campbell) ubicada en la morrena frontal (material glacial no estratificado) de la laguna Palcacocha (Huaraz – Ancash); y el sensor de nivel (Arduino), de nivel de agua, fue instalado a orillas de la laguna en mención y cerca de una regla limnimétrica, donde sus datos (por variable) fueron comparados entre sí, a través de la raíz del error cuadrático medio (MRSE), BIAS o sesgo y el coeficiente de Pearson, observándose un buen ajuste en los datos obtenidos por los equipos a bajo costo, además de una buena asociación positiva y ligera sobreestimación en los registros; convirtiéndolos en equipos confiables para el registro de variables en zonas de montaña.

**Palabras clave:** Montaña, Arduino, MRSE, Bias, Pearson.

## ABSTRACT

Currently there is a lack of hydrometeorological information in high mountain areas, due to its difficult access and the cost of acquiring and maintaining automatic equipment, however, there are now low-cost technologies that allow the development of various types of projects and have with a whole range of sensors to choose from. Among them, there are those of the hydrometeorological type: ambient temperature, relative humidity and ultrasound, which are the ones that will be used in this work, since the meteorological microstation (Arduino) was installed next to a professional automatic meteorological station (Campbell) located in the frontal moraine (non-stratified glacial material) of the Palcacocha lagoon (Huaraz – Ancash); and the hydrometric sensor (Arduino), of water level, was installed on the banks of the lagoon in question and near a limnometric rule, where its data (by variable) were compared with each other, through the root of the squared error medium, BIAS and Pearson's coefficient, observing a good fit in the data obtained by low-cost equipment, in addition to a good positive association and slight overestimation in the records; making them reliable equipment for recording variables in mountain areas.

**Keywords:** Mountain, Arduino, MRSE, Bias, Pearson.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problemática

El 13 de diciembre de 1941, se produjo la ruptura de parte del dique morrénico de la laguna Palcacocha, causando un aluvión que terminó destruyendo la tercera parte de la ciudad de Huaraz, matando a 3000 personas aproximadamente (Wegner, 2014), y afectando, además, a la infraestructura vial, energética, turística y agrícola. Como consecuencias del evento, el estado peruano, encargó a un grupo de especialistas a evaluar e identificar las lagunas, ubicadas en la Cordillera Blanca, que representen peligros. Es así como se da inicio a la construcción de obras de desagüe y seguridad en lagunas, consideradas peligrosas, de origen glaciar.

En el 2011, la laguna Palcacocha es declarada en estado de emergencia, debido a las nuevas cifras que había alcanzado su volumen. Es cuando el gobierno regional de Ancash decide instalar un sistema de sifonaje (Proyecto Glaciares+, 2019) para controlar el incremento del volumen de la laguna.

A principios del 2017 (Huaraz en línea, 2017), la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento del INAIGEM, comenzó con el monitoreo de la laguna Palcacocha, instalando una estación meteorológica automática (sobre una morrena ubicada al lado oeste de la laguna), reglas limnimétricas (con los que se tienen las lecturas del nivel del agua) y la toma de datos del caudal a la salida de los sifones, una vez por semana. Sin embargo, Palcacocha no es la única laguna de origen glaciar que presenta un peligro potencial, ya el número de estas han ido en aumento debido al cambio climático (Gobierno del Perú, 2020) y el costo de adquisición, instalación y mantenimiento de estos equipos profesionales (estaciones automáticas) es elevado, por lo que una opción interesante es replicar este monitoreo con equipos de bajo costo (Arduino).

La plataforma electrónica de software y hardware libre, ARDUINO, brinda la posibilidad de realizar múltiples proyectos debido a su compatibilidad entre sus componentes y su programación de lenguaje sencillo, además de ello se tiene el bajo costo por su adquisición,

con lo que se pueden armar equipos de múltiples sensores, obteniendo datos y abarcando áreas más grandes gracias a su replicabilidad (Monk 2012). Por ello es necesario comparar sus datos con los de los equipos oficiales y más sofisticados para observar su error y confiabilidad, que es eso lo que se quiere lograr al desarrollar e instalar un equipo basado en ARDUINO que pueda registrar las variables de temperatura del aire, humedad relativa y nivel de agua, además contará con un sistema de alimentación autónoma con lo que podrá estar en campo registrando datos sin problemas, éste equipo fue instalado alrededor de los 4600 m de altitud al lado de un equipo automático (estación meteorológica Campbell) y uno convencional (regla limnimétrica); que registran las mismas variables que los equipos desarrollados a bajo costo. De lograrse que los resultados tengan un nivel de confianza entre aceptable y bueno, el equipo podrá ser usado por los investigadores en zonas de alta montaña donde tendrán un registro de datos de áreas más amplias gracias al bajo coste y al fácil ensamblaje del equipo en cuestión.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar el comportamiento temporal de las variables hidrometeorológicas de equipos con tecnología a bajo costo (Arduino) frente a equipos profesionales: convencional (regla limnimétrica) y automático (estación meteorológica Campbell), instalados en la laguna Palcacocha (Ancash).

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de un sensor de nivel del agua a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para los meses de marzo-mayo del 2017.

Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de una microestación meteorológica automática a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para el año 2019.

Comparar los datos obtenidos por los equipos con tecnología a bajo costo (Arduino) con los obtenidos por la regla limnimétrica y la estación meteorológica automática Campbell, mediante los niveles de error.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Meteorología de montañas**

Las montañas modifican el clima y el tiempo meteorológico a diversas escalas, en la escala sinóptica se tiene la formación de vaguadas, casi estacionarias, relacionadas a las principales cordilleras; en una menor escala hay presencia de las ondas de sotavento relacionados a nubes de tipo altocúmulos lenticulares y también están los vientos inducidos térmicamente debido al ciclo diurno solar y al calentamiento diferencial sobre los diferentes sectores de las montañas (UCAR 2008).

#### **a. Clima de la Cordillera Blanca**

La laguna Palcacocha está ubicada dentro del ámbito de la Cordillera Blanca, de acuerdo a la clasificación climática de Thornthwaite (SENAMHI 1988), sobre la cordillera predomina un clima semifrío, con lluvia en verano y seco en invierno, según los datos estimados y validados del proyecto PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations, 2016), la estimación de la temperatura media anual oscila entre los 14 y 16 °C para zonas ubicadas alrededor de los 3000 m (donde se encuentran las ciudades principales del Callejón de Huaylas y la zona de Los Conchucos), luego los valores van disminuyendo a su vez que se incrementa la altitud obteniéndose una media anual de 4 °C por sobre los 4500 m.

### **2.2. Arduino**

Es una plataforma de software y hardware libre, desarrolladas a la par y de código abierto lo cual garantiza su compatibilidad. Su cualidad más significativa es que puede interactuar con su entorno; a través de la recepción de entradas desde una variedad de sensores, pero también puede afectar a su alrededor mediante el control de luces leds, servomotores, etc. Las placas Arduino son de fácil adquisición y de bajo costo, su uso es posible en diversas plataformas (Windows, GNU/Linux y Macintosh OSX), aunque la mayoría están limitadas a Windows, su programación es sencilla para principiantes y está basada en los lenguajes "C" y JAVA (Torrente 2013).

Para el proyecto se hizo uso de los sensores: DHT 22 que registra data de temperatura y humedad relativa; y HC-SR04 que es el sensor ultrasónico. Además de usar la placa Nano, que es una placa microcontroladora pequeña y de gran practicidad, se tuvo un sistema de alimentación de energía solar autónomo y los datos serán almacenados en una tarjeta MicroSD de 2GB.

### **2.3. Estación meteorológica automática portátil de Campbell Scientific**

Las estaciones meteorológicas automáticas de marca Campbell Scientific son bastante utilizadas para la investigación o para la implementación de redes de monitoreo. Se caracterizan por su precisión en las medidas, bajo consumo y fiabilidad probada en condiciones extremas; lo cual lo convierte en una buena elección para su instalación en zonas de montaña (Campbell Scientific 2016).

### **2.4. Laguna Palcacocha**

Es una laguna de origen glaciar, ya que es alimentada por los nevados Palcaraju y Pucaranra, ubicada en Huaraz (Ancash) es parte del desborde conjunto de lagunas de la cordillera Blanca. El 13 de diciembre de 1941 ocurrió un aluvión, que inclusive rompió el dique natural morrénico, debido al desprendimiento de grandes masas de hielo que generó un flujo aluviónico que recorrió aguas abajo la quebrada Cojup para posteriormente llegar a la ciudad de Huaraz y ocasionar cuantiosas pérdidas humanas y económicas (ANA, 2013).

### **2.5. Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**

Es un estadístico de precisión que mide las diferencias en promedio entre diferentes conjuntos de datos. Siempre de resultados positivos, y los datos presentarán un mejor ajuste mientras mas cerca del valor de 0 se encuentren (Willmott y Matsuura, 2006).

### **2.6. BIAS o sesgo**

Es un estadístico que nos muestra la información sobre la tendencia de los valores pronosticados, ya que al cuantificar el error del modelo podemos concluir, a través de los resultados si los datos pronosticados sobreestiman (si es positivo) o subestiman (si es negativo) los valores observados (Pielke, 1984).

## **2.7. Coeficiente de Pearson**

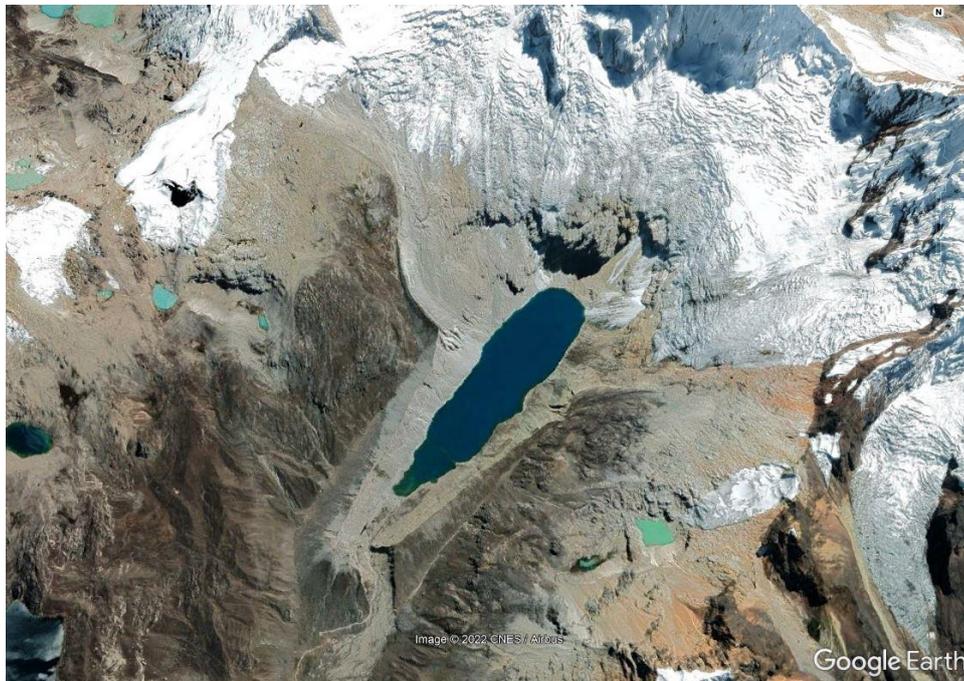
Es una prueba estadística de donde se obtiene la relación entre dos variables, el resultado toma un valor entre +1 y -1; mostrando una asociación positiva en valores superiores a 0, una asociación negativa en el caso opuesto y la inexistencia de una asociación al tomar el valor de 0 (Rodríguez, 2001).

### III. DESARROLLO DEL TRABAJO

El presente trabajo de suficiencia profesional (TSP), implicará la realización de una monografía no experimental. Para ello se utilizará los datos de nivel del agua de la laguna de marzo a mayo del 2017; y datos de las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa del año 2019, como muestra estadística.

Siendo una necesidad cubrir la escasez de información hidrometeorológica en zonas de montaña se presenta la propuesta del desarrollo de equipos hidrometeorológicos a bajo costo (Arduino), de software y hardware libre, facilitando así el ahorro de gastos de licencia; y como los equipos son ensamblados y programados por uno mismo, la tarea del mantenimiento, solución de problemas y cambio de módulos se convierten en actividades económicas y de fáciles de replicar, con lo que es posible cubrir un mayor área de registro de información de variables meteorológicas donde antes hubiera sido costoso realizar.

#### 3.1. Delimitación temporal y ámbito geográfico



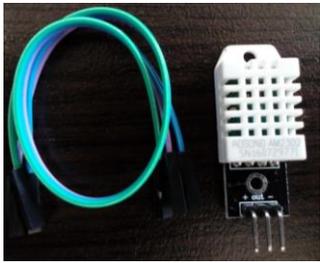
**Figura 1:** Vista satelital de la laguna Palcacocha.  
**FUENTE:** Google Earth 2022

El área de estudio está localizada en la laguna Palcacocha, de origen glaciar, en el departamento de Ancash, Provincia de Huaraz. Con coordenadas 9°23'49''S y 77°22'47''O, ubicada en la cabecera de la quebrada Cojup (subcuenca del río Quillcay) con una altura promedio de 4653 msnm en la base del glaciar Palcaraju.

### 3.2. Equipo y Materiales

Para el proyecto se hizo uso de los siguientes componentes:

- Sensor de temperatura y humedad DHT22

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de operación: 3.3 – 5.5 VDC.</p> <p>Rango de Medición de Temperatura: -40 a 80 °C.</p> <p>Precisión de Medición de Temperatura: &lt;math&gt;\lt; \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}&lt;/math&gt;.</p> <p>Resolución Temperatura: 0.1 °C.</p> <p>Rango de Medición de Humedad: 0 a 100% RH.</p> <p>Precisión de Medición de Humedad: 2% RH.</p> <p>Resolución Humedad: 0.1% RH.</p> <p>Tiempo de Sensado: 2s.</p>
--	--

**Figura 2:** Imagen del DHT22 y su descripción técnica.

- Arduino NANO

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de operación: 5 V.</p> <p>Voltaje recomendado de entrada: 7-12 V.</p> <p>Pines E/S Digitales: 14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM).</p> <p>Pines Analógicos: 8.</p> <p>Corriente máxima por cada PIN de E/S: 40 mA.</p> <p>Frecuencia de reloj: 16 MHz</p> <p>Dimensiones: 18,5mm x 43,2mm.</p>
---	---

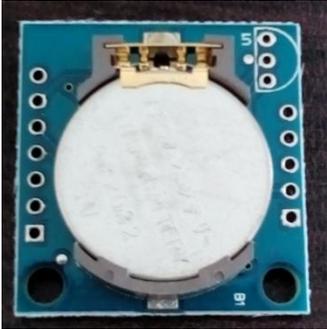
**Figura 3:** Imagen de la placa Arduino NANO y su descripción técnica.

- Módulo micro SD

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de operación: 3.3 – 5 V.</p> <p>Interfaz: SPI.</p> <p>Cuenta con los pines SPI de la tarjeta. SD: MOSI, MISO, SCK, CS.</p> <p>Permite almacenar datos en memorias microSD utilizando Arduino o PIC.</p>
---	---

**Figura 4:** Imagen del módulo MicroSD y su descripción técnica.

- Módulo reloj Ds1307

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de operación: 4.5 – 5.5 V</p> <p>Compatible con Arduino, incluso posee diversas librerías.</p> <p>Tiene todas las funciones de reloj-calendario con compensación de año bisiesto.</p> <p>Interfaz con la mayoría de los microcontroladores a través de I2C.</p> <p>Batería de respaldo para el RTC incluida en el módulo.</p>
--	---

**Figura 5:** Imagen del Módulo reloj Ds1307 y su descripción técnica.

- Panel Solar de 3.5w y 6 v

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Dimensiones: 23 x 16 x 1.8 cm</p> <p>Peso (kg): 0.5.</p> <p>Máximo poder: 3.5 W.</p> <p>Máximo poder de voltaje: 6 V.</p> <p>Máximo poder de corriente: 0.5 A.</p> <p>Rango de temperatura: -40 °C a +85°C.</p>
---	---

**Figura 6:** Imagen del Panel solar y su descripción técnica.

- Dos pilas de Litio 18650 3800mAh 3.7v

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Capacidad: 3800 mAh.</p> <p>Voltaje: 3,7 V.</p> <p>Química: Ion-Litio.</p> <p>Diámetro: 18 mm.</p> <p>Longitud: 65 mm.</p> <p>Tipo de terminal: plana.</p> <p>Rango de temperatura de funcionamiento: -20 a 70°C.</p>
---	---

Figura 7: Imagen de las pilas de Litio y su descripción técnica.

- Tarjeta elevadora de voltaje a 5v con Puerto USB

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de entrada: 2.5 - 6 V.</p> <p>Corriente de salida: 1000mA.</p> <p>Frecuencia de conmutación: 1MHz.</p> <p>Temperatura de funcionamiento: industrial (-40 ° C a + 85 ° c)</p> <p>Regulación de voltaje: <math>\pm 2.5\%</math>.</p> <p>Salida: USB.</p> <p>Tamaño: 3 x 1.3 x 0.8 cm.</p>
--	---

Figura 8: Imagen Tarjeta elevadora de voltaje a 5v y su descripción técnica.

- Tarjeta Módulo de carga de batería de Litio 18650 a 5V con micro USB

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de entrada: 5 V.</p> <p>Carga de voltaje de corte: <math>4.2 V \pm 1\%</math>.</p> <p>Máxima corriente de carga: 1000mA.</p> <p>Batería sobredescarga la protección del voltaje: 2.5 V.</p> <p>Batería de protección contra sobre corriente: 3<sup>a</sup>.</p> <p>Tamaño del tablero: 2.6 x 1.7 cm.</p>
---	--

Figura 9: Imagen Tarjeta módulo de carga de batería de Litio y su descripción técnica.

- Cobertor para los sensores de Temperatura y Humedad

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Cobertor para sensor de temperatura y humedad hechos a bajo costo cumpliendo los estándares de la OMM.</p>
---	--

**Figura 10:** Imagen referencial de cobertor para sensor de temperatura y humedad.

- Sensor ultrasónico HC-SR04

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Voltaje de operación: 5V</p> <p>Frecuencia de operación: 40KHz</p> <p>Rango: máx 4.5 m / mín 0.17 m</p> <p>Duración mínima del disparo: 10 <math>\mu</math>s</p> <p>Tiempo mínimo de espera entre una medida y el inicio de otra 20 ms</p>
---	--

**Figura 11:** Imagen referencial de cobertor para sensor ultrasónico HC-SR04.

- Panel solar de 30 W

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Dimensiones: 430x545x25</p> <p>Corriente a potencia max (IMP):1,67<sup>a</sup></p> <p>Tensión a potencia max (VMP): 18v</p> <p>Potencia máx: 30W</p> <p>Tensión a circuito abierto (VOC):22,5v</p>
---	--

**Figura 12:** Imagen referencial de panel solar de 30 W.

- Batería de 12 V

	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Capacidad 12 Ah</p> <p>Tensión 12 V</p> <p>Medidas 150x100x95</p> <p>Peso 3.95 kg</p>
---	---

**Figura 13:** Imagen referencial de batería de 12 V.

- Controlador de carga de 20 A

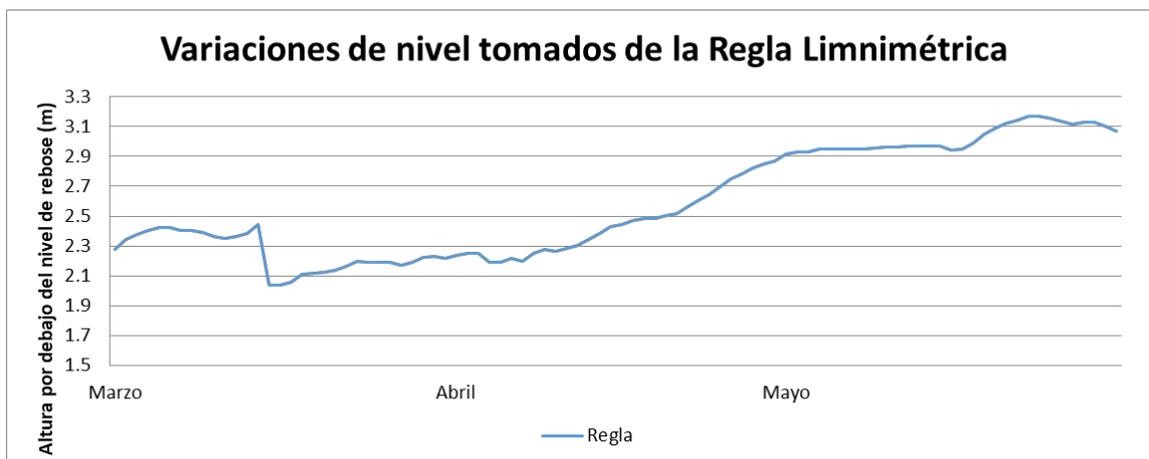
	<p><b>Especificaciones técnicas:</b></p> <p>Sobrecarga y protección de corto circuito.</p> <p>Voltaje: DC 12 V/24 V</p> <p>Autoconsumo: 10ma</p> <p>Corriente de carga nominal: 20A</p> <p>Peso: 120g/4.1 oz</p>
---	--

**Figura 14:** Imagen referencial del controlador de carga de 20 A y 12/24 V.

También se utilizaron, cables, cinta aislante, tijera, tarjeta microSD de 2GB, alicata, cautín (soldador de estaño), estaño, potenciómetro, una estructura metálica que funciona como soporte y sostendrá una caseta protectora para la estación meteorológica. Y para el sensor de nivel, se utilizará una estructura metálica que funciona como soporte y sostendrá un pequeño taper (11.4 x 20.0 x 13.00) que será el recipiente del proyecto.

### 3.3. Regla limnimétrica

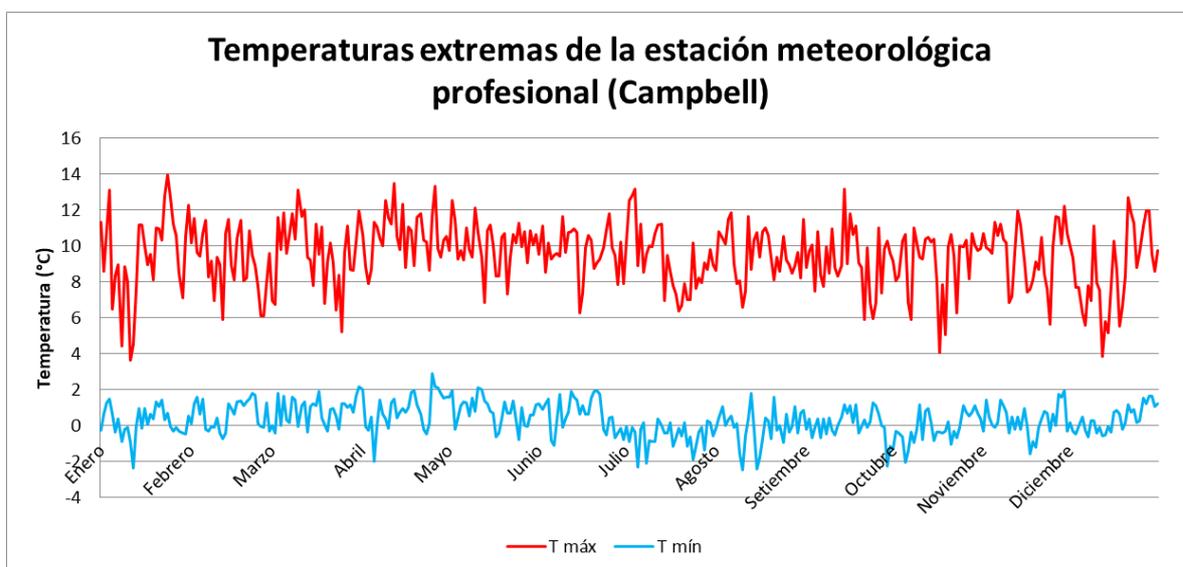
Fue instalada desde febrero del 2017 a orillas de la laguna Palcacocha, cuyas coordenadas son 9°23'46''S y 77°22'57''O. Los datos son tomados mediante inspección visual a las 6:00 am y a las 6:00 pm, para la validación del sensor de nivel se promediaron los datos para obtener valores diarios del periodo marzo a mayo del 2017.



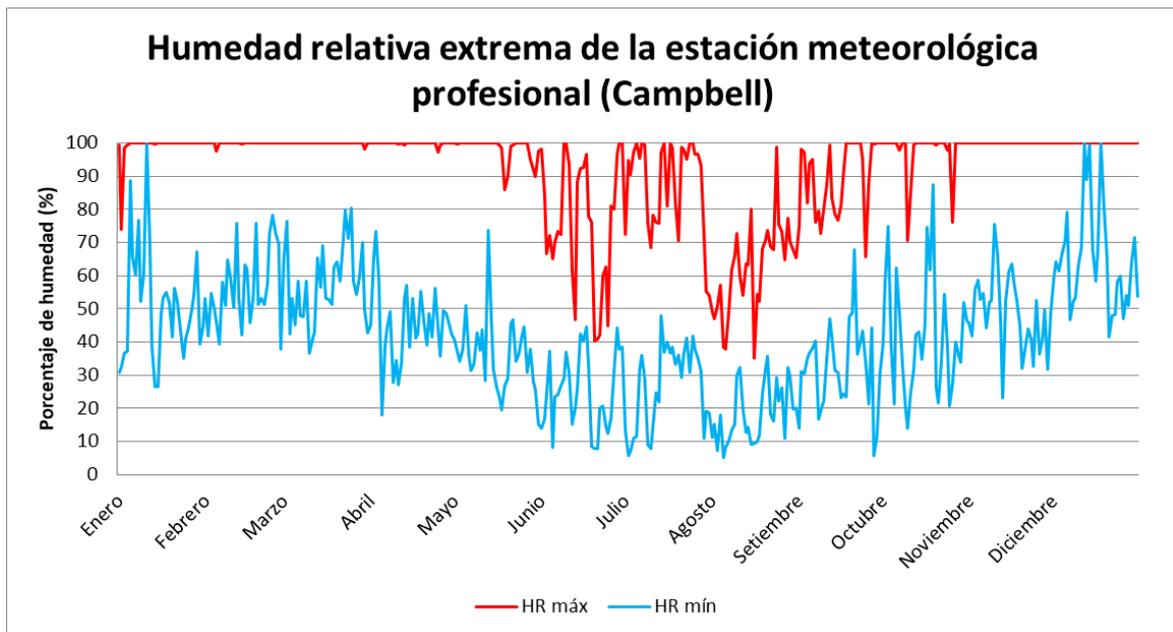
**Figura 15:** Valores diario promedio de las variaciones del nivel de la laguna, con respecto al nivel de rebose, tomados desde la regla limnimétrica.

### 3.4. Estación meteorológica automática (EMA) profesional

La estación meteorológica automática profesional de marca Campbell también fue instalada en febrero de 2017, en la cima de la morena frontal de la laguna Palcacocha, cuyas coordenadas son 09°24'09"S y 77°23'07"O. Las variables que registra son de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa máxima, humedad relativa mínima y precipitación; siendo de utilidad las cuatro primeras, que son las que utilizarán para realizar la validación de la microestación meteorológica a bajo costo.



**Figura 16:** Datos de las temperaturas extremas diarias de la estación meteorológica profesional (Campbell), para el periodo de enero a diciembre del 2019.



**Figura 17:** Datos de la humedad relativa extrema diaria de la estación meteorológica profesional (Campbell), para el periodo de enero a diciembre del 2019.

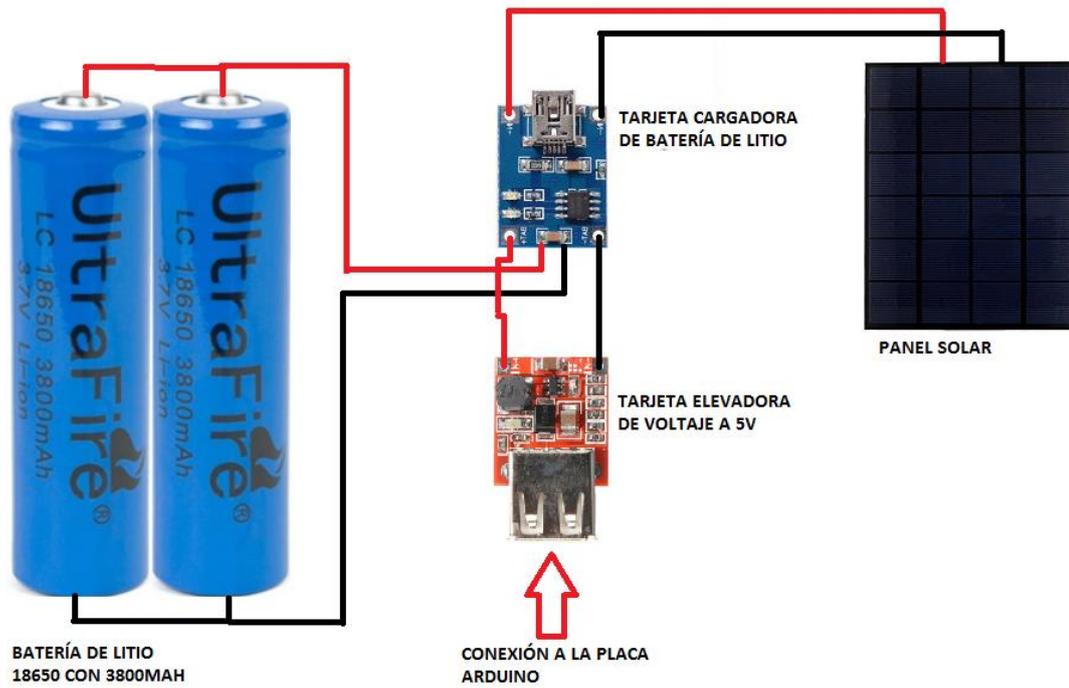
### 3.5. Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de un sensor de nivel del agua a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para los meses de marzo-mayo del 2017.

#### 3.5.1 Diseño y ensamblaje del sensor de nivel de agua, a partir de un sensor ultrasónico.

Al adquirir los componentes electrónicos basados en tecnología Arduino, se procedió a realizar el ensamblaje y programación del sensor de nivel del agua que contará con un sensor ultrasónico (HC-SR04).

##### a) Sistema de almacenamiento de energía portátil

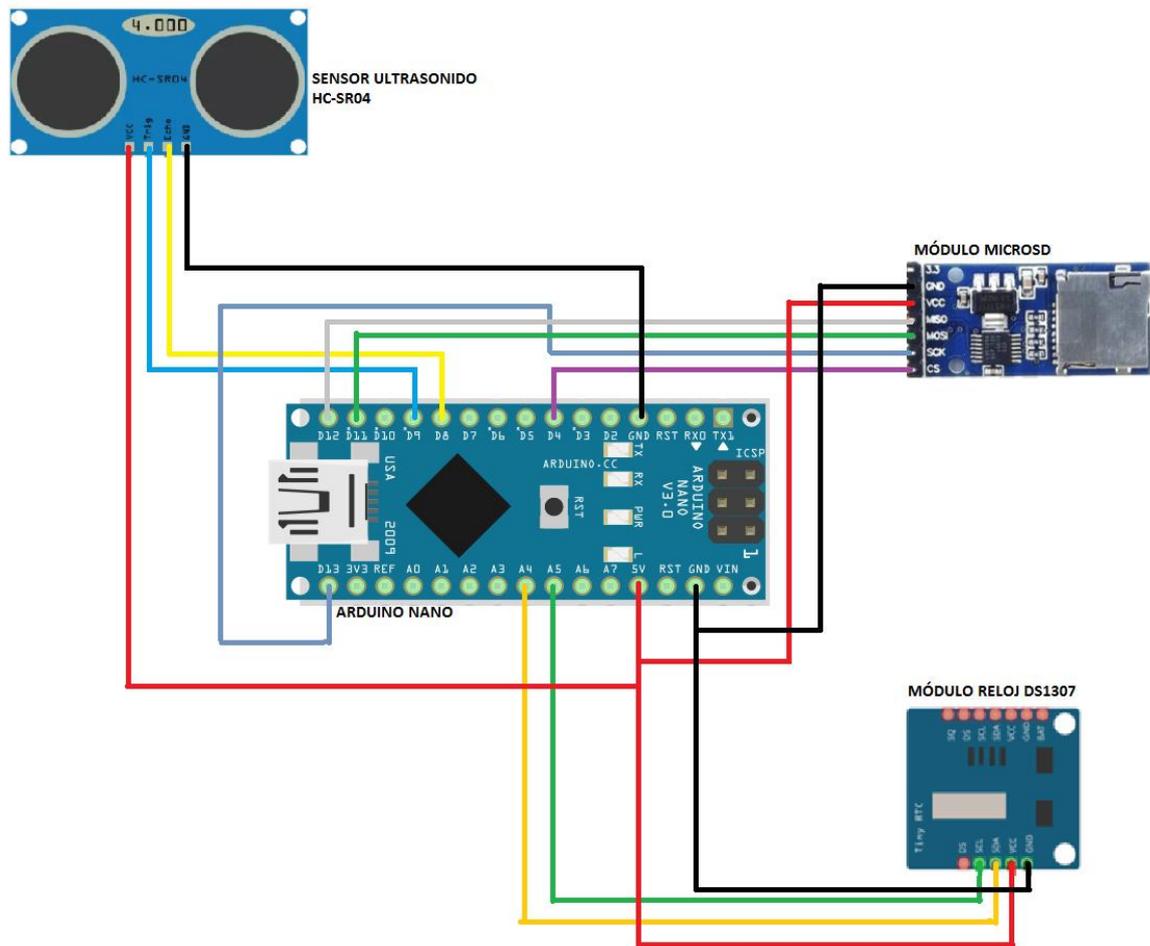
El sistema de almacenamiento de energía portátil tendrá la siguiente estructura (Figura 18) en donde está presente una tarjeta elevadora de voltaje a 5 V que presenta una salida USB para ser conectada a la placa NANO. También se utilizarán dos baterías de Litio tipo 18650 de 3.7 V y 3800 mAh cada una, que serán recargadas a través de la tarjeta cargadora, encargada de regular la carga de las baterías y protegerlas en caso la tensión llegue a valores por debajo de los 2.5 V. Cabe resaltar que las baterías de Litio necesitarán 28.12 Wh y el panel solar tiene una potencia de 3.5 W, por lo que se estima que el tiempo de recarga total de las baterías será de 8 horas.



**Figura 18:** Diagrama con los componentes del sistema de almacenamiento de energía portátil

b) Diagrama del sistema

En la Figura 19 se muestra el diagrama con los módulos necesarios y conectados a la placa Arduino NANO, que fue alimentado por la powerbank a través de la salida USB de la misma, los datos fueron tomados cada hora y almacenada en el módulo microSD. El consumo total del sistema ensamblado es de 60 mA y las pilas tienen una carga total de 7600 mAh, por lo que se garantiza el abastecimiento de energía por 126.7 horas, sin embargo el panel solar podrá recargarlas en tan solo 8 horas

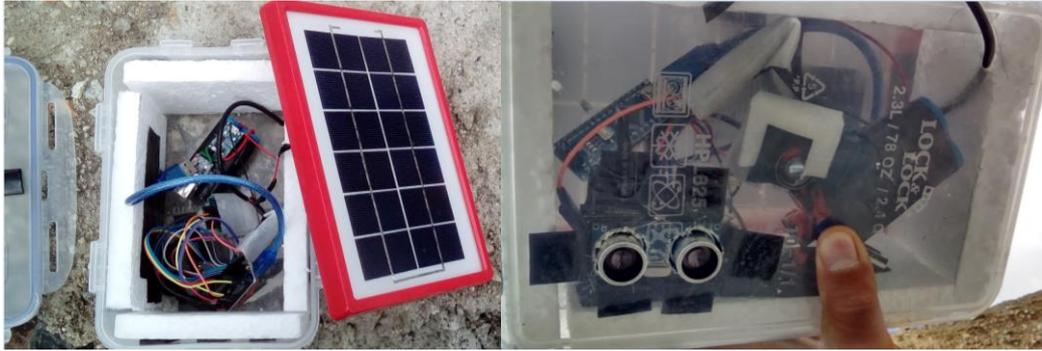


**Figura 19:** Diagrama que muestra a todos los módulos (incluido el sensor) conectados a la placa Arduino NANO.

### 3.5.2 Construcción e instalación del sensor de nivel del agua.

#### 3.5.2.1. Construcción

Una vez ensamblados los componentes electrónicos se construyó el sistema que contiene el sensor de nivel de agua, estos se colocaron dentro de un taper acondicionado con una salida debajo del mismo para acoplar el sensor ultrasónico y estuvo conectado a la batería que fue alimentada por energía solar, a través de un panel. Todo el sistema fue montado sobre una estructura metálica que estuvo fija sobre el terreno (Figura 20).



**Figura 20:** A la izquierda se observa la estructura del proyecto junto al panel solar, a la derecha se tiene una vista del sensor quien será el que estará ubicado (en una línea paralela sobre el espejo de agua) y medirá la altura

### 3.5.2.2. Instalación en la laguna Palcacocha

#### a) Traslado hacia la laguna.

Una vez terminado el ensamblaje del sensor del nivel del agua se realizó el traslado de hacia la laguna Palcacocha que se encuentra a 30 km aproximadamente de distancia desde la ciudad de Huaraz, el recorrido dura alrededor de 1:30 hrs y la segunda mitad del camino es pura trocha. Al llegar, se ubicó un lugar adecuado en la orilla de la laguna para proceder a fijar la estructura metálica.

#### b) Instalación

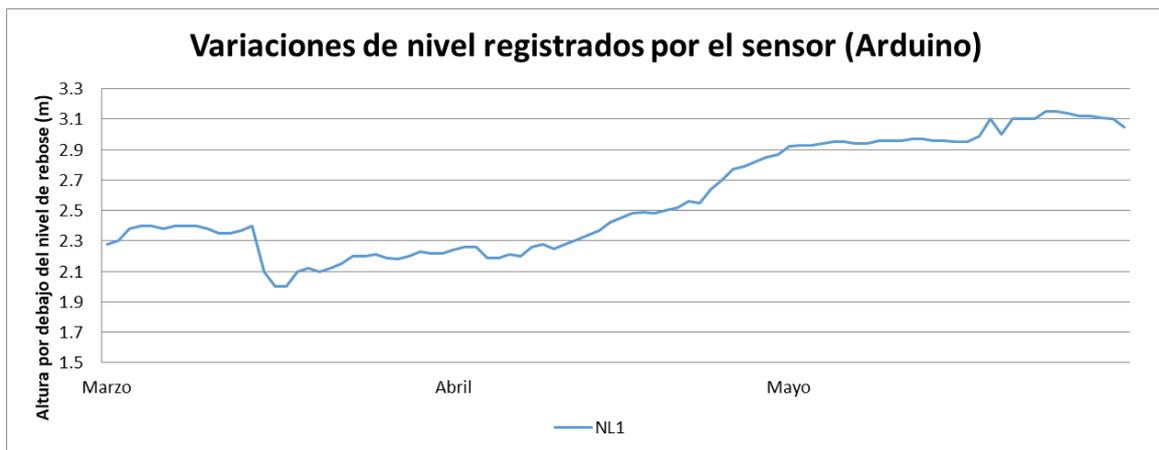
El equipo fue instalado en una ubicación que permitió su correcto funcionamiento durante el tiempo requerido, de acuerdo al protocolo de instalación del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (Senamhi, 2013), además fue georreferenciado con las siguientes coordenadas  $9^{\circ}23'59.44''S$ ,  $77^{\circ}22'57.73''O$  y 4544.9 m de altitud. Cabe resaltar de que para la correcta toma de información es necesario que el equipo sea instalado con respecto a un nivel ya georreferenciado, y este fue la cota de nivel de rebose de la laguna Palcacocha que es de 4547.944 m de altitud, con lo que el sensor tomará datos del nivel de la laguna con respecto al nivel de rebose mencionado.



**Figura 21:** sensor de nivel de laguna montado sobre la estructura metálica

3.5.3. Recopilación de la data registrada por un periodo de 3 meses (marzo a abril de 2017), los datos fueron tomados con una frecuencia de una hora.

El sensor de nivel fue programado para que registre los datos con una frecuencia de una hora, pero para efectos prácticos se tomará el promedio diario de los valores tomados a las 6 am y las 6 pm, debido a que esas son las dos únicas horas de las que se tiene el registro de la regla limnimétrica, la cual también se encuentra instalada a orillas de la laguna.



**Figura 22:** Valores promedio diarios de la altura por debajo del nivel de rebose de la laguna Palcacocha registrados por el sensor a bajo costo.

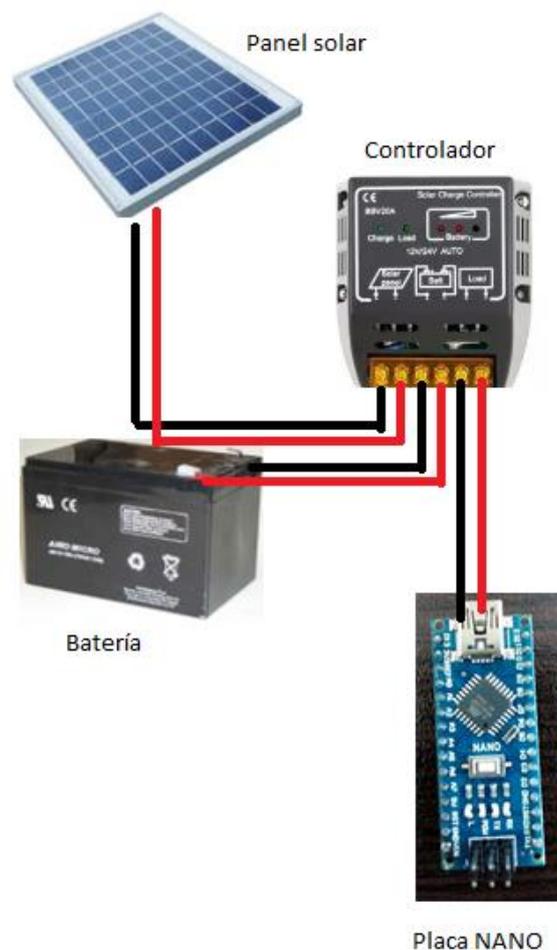
### 3.6. Explicar la construcción, criterios de instalación y registro de una microestación meteorológica automática a bajo costo (Arduino) en la laguna Palcacocha, para el año 2019.

3.6.1 Diseño y ensamblaje de la microestación meteorológica que registró datos de temperatura y humedad relativa.

Al adquirir los componentes electrónicos basados en tecnología Arduino, se procedió a realizar el ensamblaje y programación de la microestación meteorológica que contó con sensores que registraron las variables de temperatura y humedad relativa (sensor DHT22).

a) Sistema de almacenamiento de energía

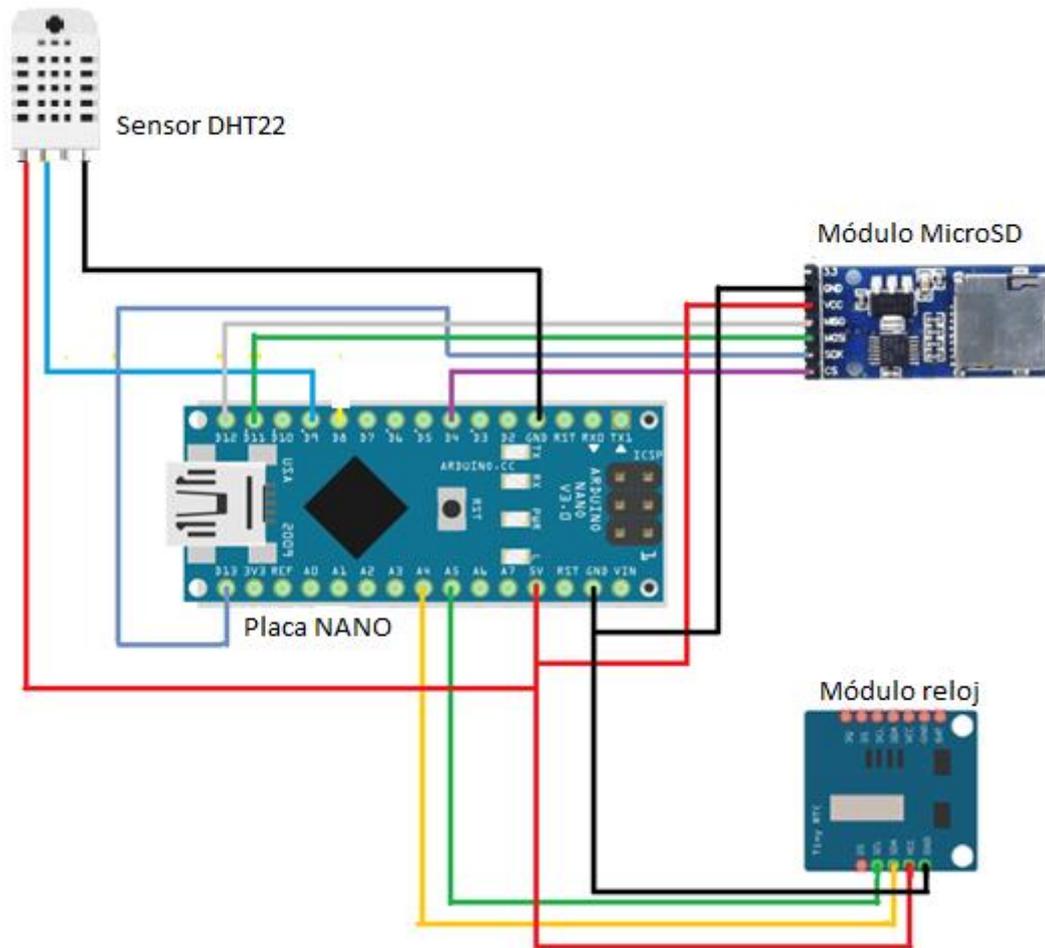
Para el sistema de almacenamiento de energía de la microestación meteorológica se utilizó un panel solar de 30 W a 12 V, una batería de 12 V y un controlador de 20 A y un voltaje de 12 V/24 V. Para este caso se tiene un exceso de energía porque se planeaba agregar más sensores a futuro (Figura 23).



**Figura 23:** Diagrama con los componentes del sistema de almacenamiento de energía.

## b) Diagrama

En la Figura 24 se muestra el diagrama con los módulos necesarios y conectados a la placa Arduino NANO, para este caso está presente el sensor DHT22 que medirá la temperatura y humedad relativa. El consumo total del sistema ensamblado es de 60 mA y la batería tiene una carga total de 12000 mAh, por lo que se garantiza el abastecimiento de energía por 200 horas, sin embargo el panel solar podrá recargarlas en tan solo 1 hora.



**Figura 24:** Diagrama que muestra a todos los módulos (incluido el sensor) conectados a la placa Arduino NANO.

### 3.6.2 Construcción e instalación de la microestación meteorológica que registró datos de temperatura y humedad relativa.

#### 3.2.2.1. Construcción

Una vez ensamblados los componentes electrónicos se construyó un cobertor (para el sensor de temperatura y humedad relativa), además el sistema estuvo alimentado por energía solar

lo que lo convirtió en un sistema autónomo que estuvo al aire libre en zonas de montaña. Todo el sistema fue montado en un soporte que lo mantuvo fijo sobre el terreno.

### 3.2.2.2. Instalación en la morrena frontal de la laguna Palcacocha

#### a) Traslado hacia la laguna.

Una vez terminado el ensamblaje de la microestación meteorológica se realizó el traslado de hacia la laguna Palcacocha que se encuentra a 30 km aproximadamente de distancia desde la ciudad de Huaraz, el recorrido dura alrededor de 1:30 hrs y la segunda mitad del camino es pura trocha. Al llegar, se ubicó la morrena frontal ubicada a 60 m por encima de la laguna en donde se encuentra la estación meteorológica automática de marca Campbell funcionando continuamente y es al lado de ésta donde se instaló la microestación.

#### b) Instalación

Para instalar la microestación meteorológica, se tuvo que ascender a una altura superior a los 4500 m, hasta donde se encontraba la EMA profesional, luego se identificó el punto más adecuado para la instalación, el cual represente las condiciones atmosféricas típicas del área objeto de monitoreo y se encuentra libre de obstáculos alrededor, procediendo después a la limpieza de un área mínima aceptable de 6 m x 6 m (OMM, 1996), cuyas coordenadas son 09°24'09.05"S y 77°23'06.84"O. La microestación fue montada sobre el trípode y el sensor DHT22 (temperatura y humedad) fue puesto a la altura recomendada de 1.60 m y el panel solar fue orientado hacia el norte (Senamhi, 2013).

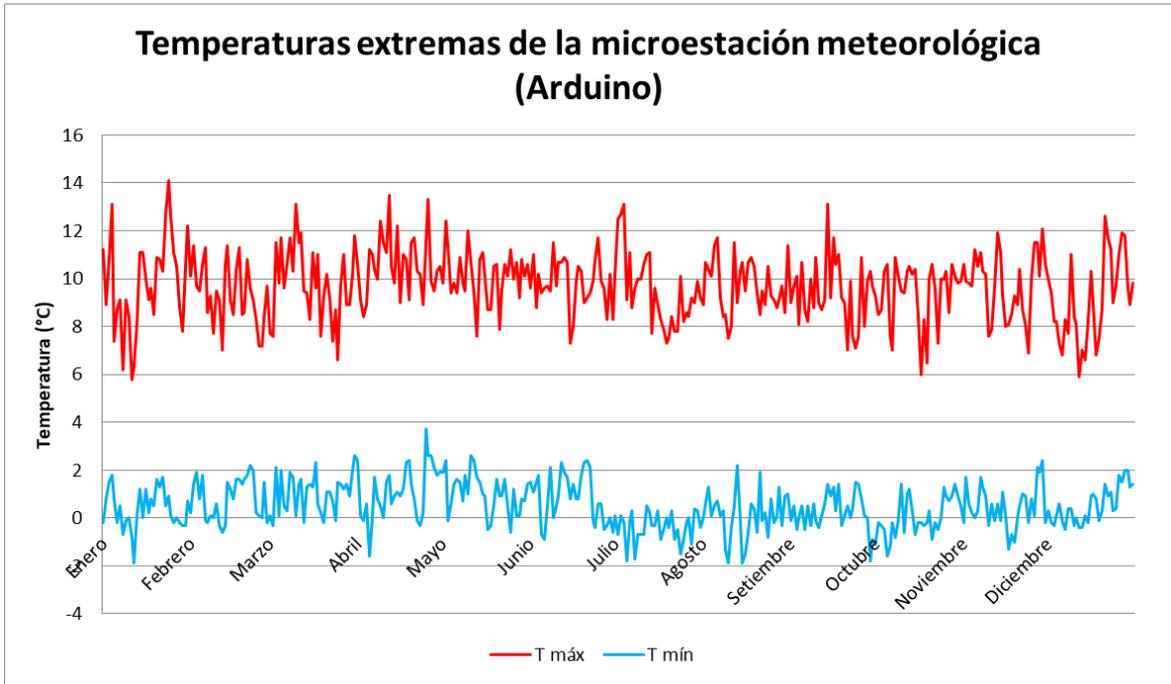


**Figura 25:** Microestación meteorológica (Arduino) instalada.

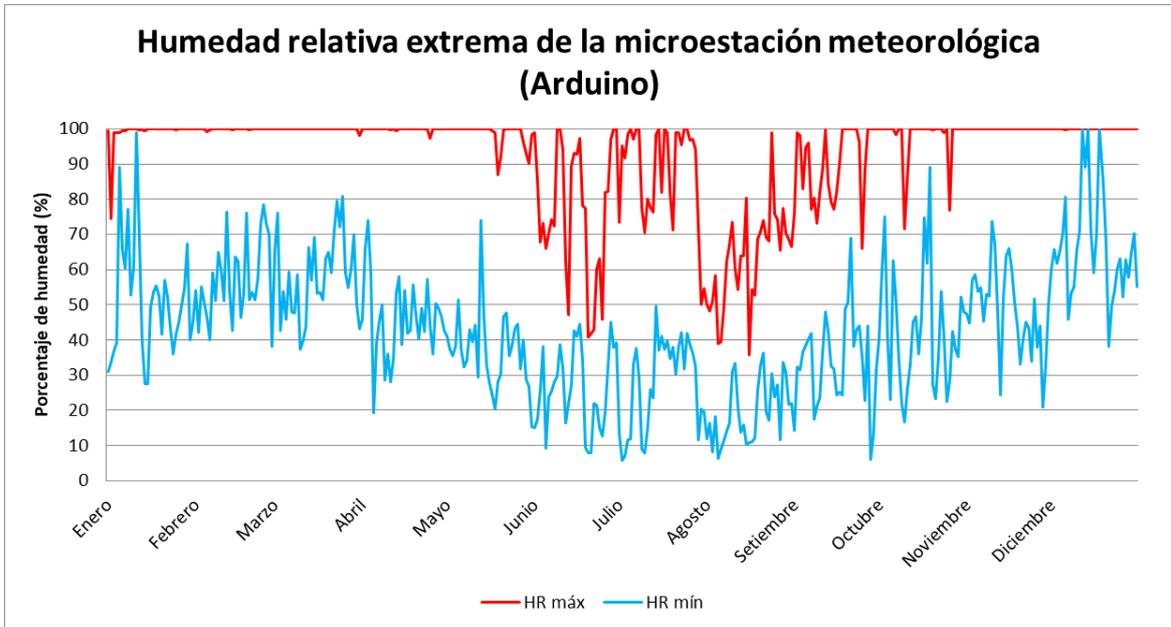
3.6.3. Recopilación de la data registrada por un periodo de 12 meses (enero a diciembre de 2019), los datos fueron tomados con una frecuencia de una hora.

Durante el transcurso de 12 meses, después de la instalación, se realizaron descargas mensuales de los datos (tanto de la microestación como de la estación meteorológica automática) para su posterior análisis.

A continuación se muestran datos diarios procesados de la estación microestación meteorológica de las variables de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa máxima y humedad relativa mínima.



**Figura 26:** Datos de las temperaturas extremas diarias de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.

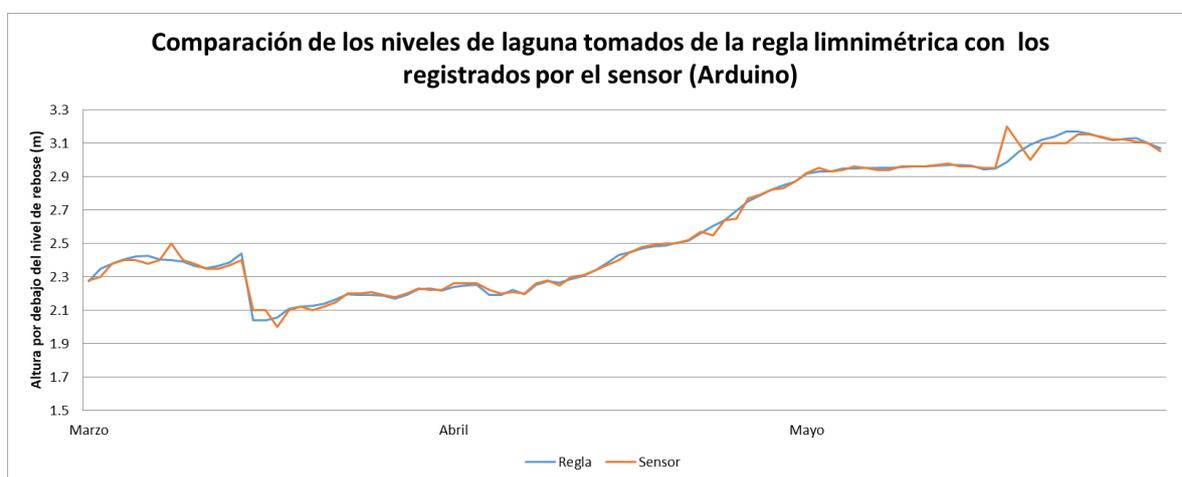


**Figura 27:** Datos de la humedad relativa extrema diaria de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se mostrará la comparación de los datos obtenidos por los equipos de bajo costo con los registrados por los equipos automáticos profesionales, mostrando los niveles de error y confiabilidad.

### 4.1. Comparación de los datos diarios de nivel del agua de la laguna Palcacocha tomados de la regla limnimétrica versus los datos registrados por el sensor (Arduino)



**Figura 28:** Comparación de los niveles de laguna tomados de la regla versus los registrados por el sensor, para el periodo de marzo a mayo del 2017.

De la figura se observa que los datos registrados por el sensor presentan, en promedio, el mismo comportamiento que los datos obtenidos con la regla, pero con variaciones, presentándose de forma más pronunciada hacia el final de los días de registro.

4.1.1. Validación de los datos diarios de nivel del agua de la laguna Palcacocha registrados, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y coeficiente de Pearson.

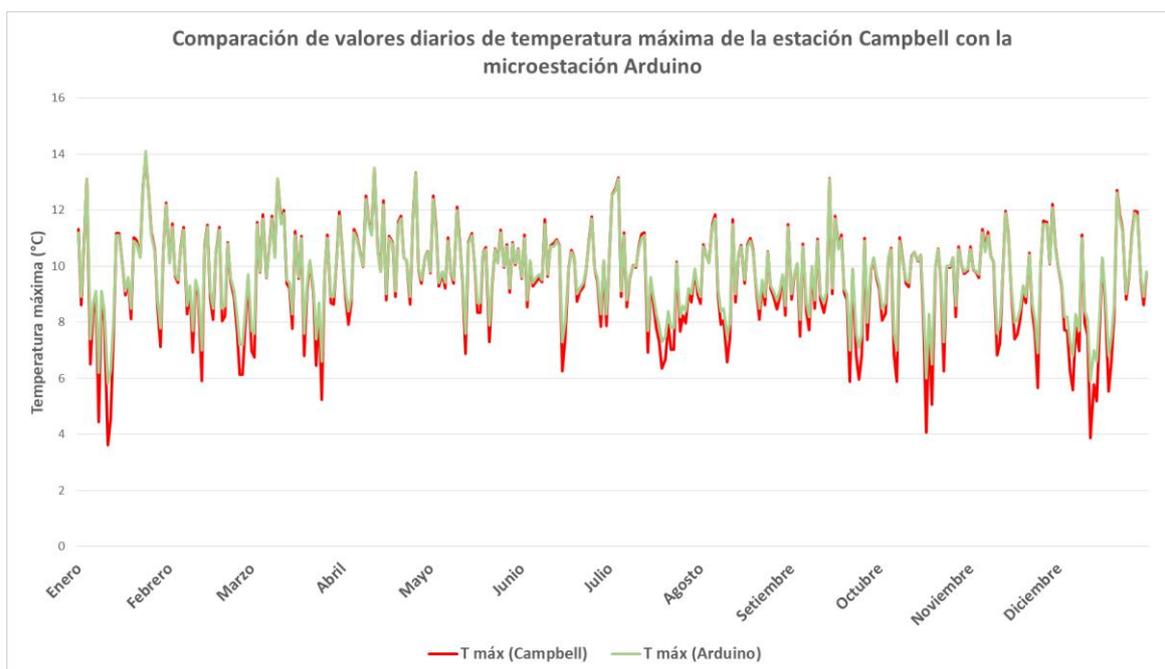
Para la validación se hará uso de tres estadísticos, los cuales son:

**Tabla 1:** Pruebas estadísticas de los datos diarios del sensor de nivel (Arduino)

Prueba estadística	Valor
RMSE	0.034
BIAS	0.001
Coefficiente de Pearson	0.996

Luego de realizar el cálculo del error, error cuadrático medio, se obtuvo de que la raíz del error cuadrático medio (RMSE) fue de 0.034, y como es un resultado cercano a cero, la teoría nos dice que los valores tomados por el sensor presentan un buen ajuste al ser comparados con los datos de la regla limnimétrica. Para el sesgo o BIAS, se obtuvo un valor de 0.001 lo que nos dice de que los datos del sensor tienden a sobreestimar muy ligeramente los datos de la regla limnimétrica. Con respecto al coeficiente de Pearson, el valor es de 0.996, bastante cercano a 1, mostrando una buena asociación positiva.

#### 4.2. Comparación de valores de temperatura máxima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino)



**Figura 29:** Comparación de valores de temperatura máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019.

De la Figura 29 se observa que los datos diarios de temperatura máxima de la microestación meteorológica (Arduino) presentan, en promedio, el mismo comportamiento que los datos de la estación meteorológica (Campbell), sin embargo, esta última presenta una mayor

sensibilidad ya que se muestran datos con valores por debajo de los registrados por la microestación (Arduino). También se ve que, en el primer y último trimestre del año, hay un mayor contraste en la amplitud de las oscilaciones, debido a las variaciones de la presencia de la cobertura nubosa, ya que se ubica dentro del periodo de lluvias.

4.2.1. Validación de los datos diarios de temperatura máxima de la microestación meteorológica (Arduino), a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson.

Para la validación se hará uso de tres estadísticos, los cuales son:

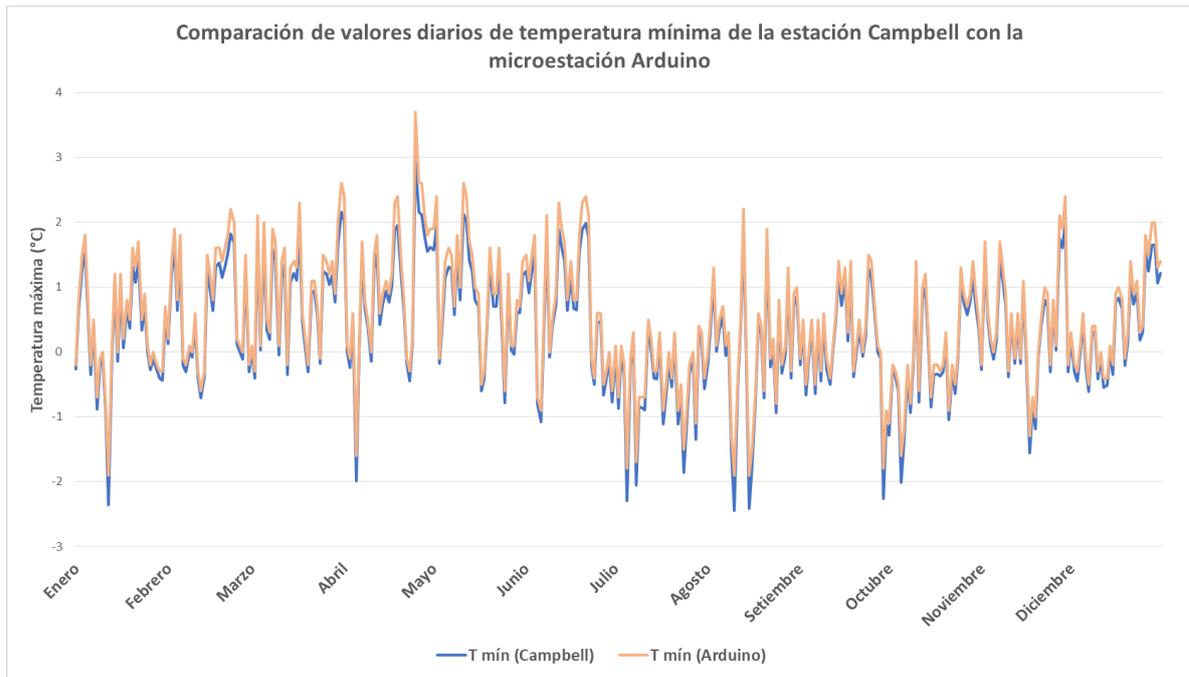
**Tabla 2:** Pruebas estadísticas de los datos diarios de temperatura máxima de la microestación (Arduino).

<b>Prueba estadística</b>	<b>Valor</b>
RMSE	0.438
BIAS	0.205
Coeficiente de Pearson	0.994

El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tuvo un valor de 0.438, y como es un resultado cercano a cero, la teoría nos dice que los valores tomados por la microestación (Arduino) presentan un buen ajuste al ser comparados con los datos de la estación profesional (Campbell). Para el sesgo o BIAS, se obtuvo un valor de 0.205 lo que nos dice que los datos de la microestación (Arduino) tienden a sobreestimar ligeramente los datos de la estación (Campbell). Con respecto al coeficiente de Pearson, el valor es de 0.994, bastante cercano a 1, mostrando una buena asociación positiva.

### **4.3. Comparación de valores de temperatura mínima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino)**

De la Figura 30 se observa que los datos diarios de temperatura mínima de la microestación meteorológica (Arduino) presentan, en promedio y al igual que la temperatura máxima, el mismo comportamiento que los datos de la estación meteorológica (Campbell), inclusive también presenta una menor sensibilidad a la hora de registrar los datos. También se observa que para los meses de julio y agosto (invierno) los valores son más bajos en promedio, que el resto de meses del año.



**Figura 30:** Comparación de valores de temperatura mínima de la estación meteorológica profesional (Campbell) con valores de la microestación meteorológica (Arduino), para el periodo de enero a diciembre del 2019.

4.3.1. Validación de los datos diarios de temperatura mínima de la microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson.

Para la validación se hará uso de tres estadísticos, los cuales son:

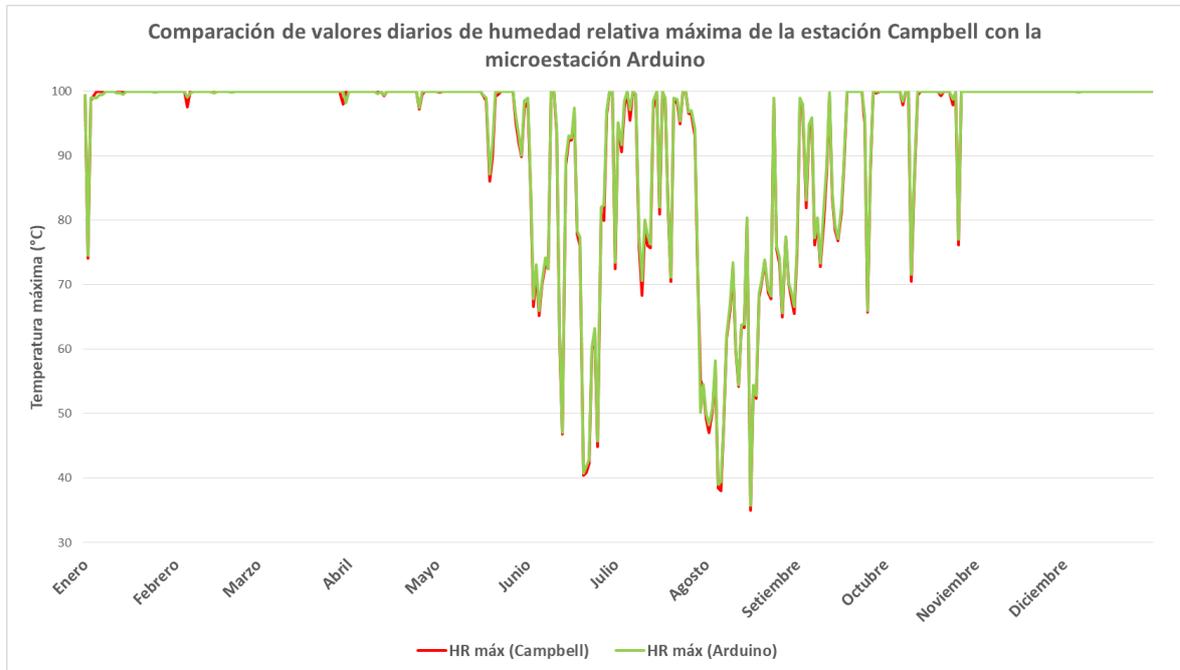
**Tabla 3:** Pruebas estadísticas de los datos diarios de temperatura mínima de la microestación (Arduino).

Prueba estadística	Valor
RMSE	0.208
BIAS	0.183
Coeficiente de Pearson	0.996

El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tuvo un valor de 0.208, y como es un resultado cercano a cero y menor al obtenido de los valores de temperatura máxima, la teoría nos dice que los valores tomados por la microestación (Arduino), para la variable de temperatura mínima, presentan un mejor ajuste al ser comparados con los datos de la estación profesional (Campbell). Para el sesgo o BIAS, se obtuvo un valor de 0.183 lo que nos dice que los datos de la microestación (Arduino) tienden a sobreestimar ligeramente los datos de la estación (Campbell), pero en menor medida con respecto a la variable de temperatura

máxima. Con respecto al coeficiente de Pearson, el valor es de 0.996, bastante cercano a 1, mostrando una buena asociación positiva.

#### 4.4. Comparación de valores de humedad relativa máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica



**Figura 31:** Comparación de valores de humedad relativa máxima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019.

En la Figura 31 se observa que los datos de la microestación (Arduino) presentan un comportamiento similar a los de la estación profesional (Campbell), mostrando poca diferencia entre sus valores. Por otra parte, se ve que los valores oscilan el 100 % de humedad relativa máxima en lo que sería la temporada de lluvia, y disminuyen en la temporada seca.

##### 4.4.1. Validación de los datos diarios de humedad relativa máxima de la microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson.

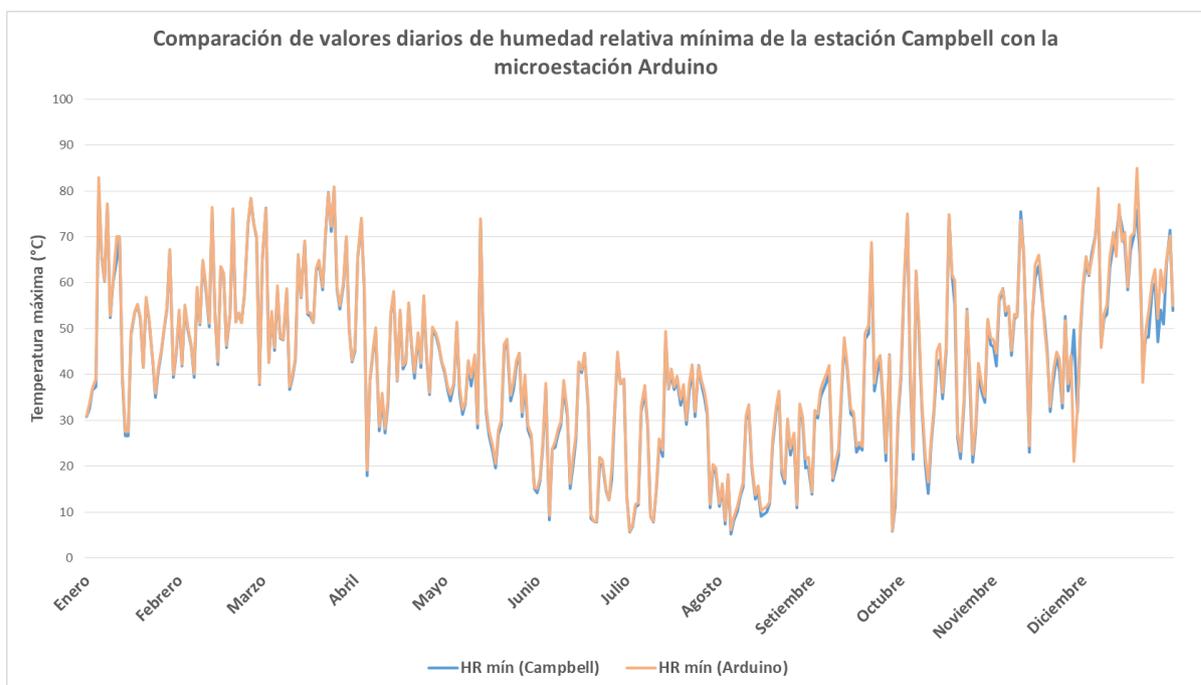
Para la validación se hará uso de tres estadísticos, los cuales son:

**Tabla 4:** Pruebas estadísticas de los datos diarios de humedad relativa máxima de la microestación (Arduino).

Prueba estadística	Valor
RMSE	0.594
BIAS	0.224
Coeficiente de Pearson	0.999

El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tuvo un valor de 0.594, un tanto mayor a los valores de las temperaturas extremas, y como es un resultado cercano a cero, la teoría nos dice que los valores tomados por la microestación (Arduino) presentan un buen ajuste al ser comparados con los datos de la estación profesional (Campbell). Para el sesgo o BIAS, se obtuvo un valor de 0.224 lo que nos dice que los datos de la microestación (Arduino) tienden a sobreestimar ligeramente los datos de la estación (Campbell), al igual que con los datos de las temperaturas extremas. Con respecto al coeficiente de Pearson, el valor es de 0.999, que es el resultado más cercano a 1 de entre todas las variables analizadas, mostrando una muy buena asociación positiva.

#### 4.5. Comparación de valores de humedad relativa mínima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica



**Figura 32:** Comparación de valores de humedad relativa mínima de la estación meteorológica profesional con valores de la microestación meteorológica, para el periodo de enero a diciembre del 2019.

En la Figura 32 se observa que los datos de la microestación (Arduino) presentan un comportamiento similar a los de la estación profesional (Campbell), mostrando poca diferencia entre sus valores, al igual que con los valores de la humedad relativa máxima. Por otra parte, se ve que los valores tienden a descender durante la temporada seca y a ascender durante la temporada de lluvia.

4.5.1. Validación de los datos diarios de humedad relativa mínima de la microestación meteorológica, a través de las pruebas estadísticas de Raíz del error cuadrático medio (RMSE), BIAS y Coeficiente de Pearson.

Para la validación se hará uso de tres estadísticos, los cuales son:

**Tabla 5:** Pruebas estadísticas de los datos diarios de humedad relativa mínima de la microestación (Arduino).

<b>Prueba estadística</b>	<b>Valor</b>
RMSE	2.123
BIAS	0.852
Coeficiente de Pearson	0.944

El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) tuvo un valor de 2.123, es el resultado más alto de este estadístico de entre todas las variables, su valor se aleja del cero, lo que nos dice que los valores tomados por la microestación (Arduino) presentan un ajuste con menor eficiencia, al ser comparado con los resultados de las demás variables. Para el sesgo o BIAS, se obtuvo un valor de 0.852, siendo nuevamente el resultado más alto, lo que nos dice que los datos de la microestación (Arduino) presentan una mayor sobreestimación de los datos de la estación (Campbell). Con respecto al coeficiente de Pearson, el valor es de 0.994, bastante cercano a 1, mostrando una buena asociación positiva.

## V. CONCLUSIONES

- La construcción por módulos del sensor de nivel (Arduino) hace que sea fácil identificar averías y abaratar los costos de mantenimiento y ensamblaje de futuros proyectos.
- La construcción de la microestación meteorológica (Arduino) se proyectó con la intención de que en el futuro se anexasen más sensores, por ello se usó un panel solar más grande y una batería de mayor capacidad.
- La comparación entre los datos obtenidos por los equipos a bajo costo (Arduino) con los datos obtenidos por los equipos profesionales, arrojó que los primeros con respecto a los segundos, en general presentan un buen ajuste (RMSE cercanos a 0), una ligera sobreestimación (BIAS >0) y una buena asociación positiva (Pearson cercanos a 1).
- Como conclusión general, los datos de los equipos a bajo costo (Arduino), reflejaban el mismo comportamiento que los datos de los equipos profesionales, inclusive en la microestación meteorológica se observaron variaciones ocasionadas por la influencia de la cobertura nubosa y la estacionalidad de las temporadas del año.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Con respecto al sensor de nivel (Arduino), es necesario contar con información de un periodo de 12 meses para obtener resultados estadísticos más confiables.
- El diseño de la microestación meteorológica permite ser complementada con diversos módulos, los cuales se sugiere adherir los de presión atmosférica y radiación UV.
- Para futuros prototipos, es recomendable el diseño de estructuras a medida para cada proyecto a través de la impresión 3D.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Autoridad nacional del Agua, ANA. (2013). Informe técnico colegiado sobre las acciones, actividades y proyectos que deben ejecutarse, para disminuir el riesgo de desastre por desembalse de la Laguna Palcacocha.
- Bayes, T. (1763). «An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances.». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53: 370-418. doi:10.1098/rstl.1763.0053
- Bolton, W. (1995). *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*. Barcelona, España. MARCOMBO, S.A. 321 p.
- Campbell Scientific. (2016). *Monitorización meteorológica* (en línea). Barcelona, España. Consultado 5 mar. 2018. Recuperado de:  
[http://s.campbellsci.com/documents/es/productbrochures/weather\\_monitoring\\_solutions.pdf](http://s.campbellsci.com/documents/es/productbrochures/weather_monitoring_solutions.pdf)
- Escribano Vega, J. (2016). *Implementación de una estación meteorológica con Arduino* (en línea). Tesis Ing. Sist. De Teleom., Sonido e Imagen. Gandia, España, Universidad Politécnica de Valencia. Consultado 20 ene. 2018. Recuperado de:  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/77955/ESCRIBANO%20-%20Implementaci%C3%B3n%20de%20una%20estaci%C3%B3n%20meteorol%C3%B3gica%20con%20Arduino.pdf?sequence=1>
- Escuela Universitaria de Electrónica y Telecomunicaciones; Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, España. (2001). *Electrónica básica: Curso de electrónica básica en internet* (en línea, curso). Barcelona, España. Consultado 4 feb. 2018. Recuperado de: [http://www2.uned.es/cabergara/ppropias/Morillo/web\\_et\\_dig/02\\_semiconduc/semiconductores.pdf](http://www2.uned.es/cabergara/ppropias/Morillo/web_et_dig/02_semiconduc/semiconductores.pdf)

- Gobierno del Perú.(6 de agosto de 2020). El cambio climático en el incremento de las lagunas peligrosas de origen glaciar. Recuperado de:  
<https://www.gob.pe/institucion/inaigem/noticias/286510-el-cambio-climatico-en-el-incremento-de-las-lagunas-peligrosas-de-origen-glaciar>
- Huarazenlinea.com. (28 de enero de 2017). Huaraz: instalan estación meteorológica en la laguna Palcacocha. Recuperado de: <https://huarazenlinea.com/noticias/medio-ambiente/28/01/2017/huaraz-instalan-estacion-meteorologica-en-la-laguna-palcacocha>
- Miranda, F. & Salinas, J. (2012). Estadística General. Lima, Perú. 200 p.
- Monk, S. (2012). 30 Proyectos con Arduino. Madrid, España. ESTRIBOR, S.L. 191 p.
- OMM. (1996). Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Sexta Edición, OMM N°8, Ginebra, Suiza 1996.
- Proyecto Glaciares +. (27 de marzo de 2019). Perú: falta de prevención en Laguna Palcacocha podría ocasionar desastre en Huaraz.  
<https://www.proyectoglaciares.pe/peru-falta-de-prevencion-en-laguna-palcacocha-podria-ocasionar-desastre-en-huaraz/>
- Rodríguez, M.E. (2001). Coeficientes de asociación. Plaza y Valdés, S.A.
- SENAMHI. (1988). Mapa de Clasificación Climática del Perú. Método de Thornthwaite. Eds. SENAMHI Peru, 50 pp.
- MINAM. (2013). Resolución Ejecutiva N° 0174 SENAMHI-PREJ-OGOT/2013
- Torrente, O. (2013). Arduino, Curso práctico de formación. México D.F, México. Alfaomega Grupo Editor, S.A. 569 p.
- UCAR (Corporación universitaria de investigación atmosférica). (2008). The Comet Program, USA. Ondas de montaña y vientos de ladera descendentes (en línea, curso). Colorado, USA. Consultado 10 ene. 2018. Disponible en [https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnwave\\_es/navmenu.php](https://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnwave_es/navmenu.php)
- Willmott, C.J., & Matsuura, K. (2006). On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), 89-102.  
doi:10.1080/13658810500286976.