UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

Diseño de un sistema óptico portátil para caracterización de muestras de agua de fuente remota en la parroquia Cubijies

Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Telecomunicaciones

Autor:
Shilquigua Rosacela Franklin Jhonatan

Tutor:
PhD. Pedro Fernando Escudero Villa

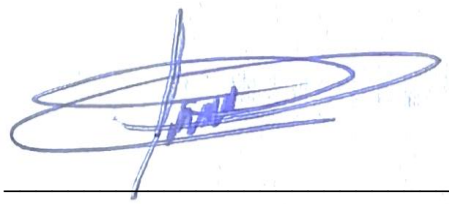
Riobamba, Ecuador 2025

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **FRANKLIN JHONATAN SHILQUIGUA ROSACELA**, con cédula de ciudadanía **060495790-2**, autor del trabajo de investigación titulado: **DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PORTÁTIL PARA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA DE FUENTE REMOTA EN LA PARROQUIA CUBIJIES**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Así mismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autora de la obra referida será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 15 de abril de 2024.



Franklin Jhonatan Shilquigua Rosacela
C.I:060495790-2

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

En la Ciudad de Riobamba, a los 30 días del mes de Abril de 2025, luego de haber revisado el Informe Final del Trabajo de Investigación presentado por el estudiante **Franklin Jhonatan Shilquigua Rosacela** con CC: **0604957902**, de la carrera **Ingeniería en Telecomunicaciones** y dando cumplimiento a los criterios metodológicos exigidos, se emite el **ACTA FAVORABLE DEL INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN** titulado **"DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PORTÁTIL PARA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA DE FUENTE REMOTA EN LA PARROQUIA CUBIJIES"**, por lo tanto se autoriza la presentación del mismo para los trámites pertinentes.

Firmado electrónicamente por:
PEDRO FERNANDO ESCUDERO VILLA
Validar únicamente con FirmaEC

PhD. Pedro Fernando Escudero Villa
TUTOR

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **"DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PORTÁTIL PARA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA DE FUENTE REMOTA EN LA PARROQUIA CUBIJIES"**, presentado por **FRANKLIN JHONATAN SHILQUIGUA ROSACELA**, con cédula de identidad número **060495790-2**, bajo la tutoría del PhD. Pedro Fernando Escudero Villa; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 22 de mayo de 2025.

PhD. Luis Tello
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

Dr. Klever Torres
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

Msc. Luis Santillán
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

Que, **SHILQUIGUA ROSACELA FRANKLIN JHONATAN** con CC: **0604957902**, estudiante de la Carrera **TELECOMUNICACIONES**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado **"DISEÑO DE UN SISTEMA ÓPTICO PORTÁTIL PARA CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE AGUA DE FUENTE REMOTA EN LA PARROQUIA CUBIJIES"**, cumple con el 4 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **COMPILATIO**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente, autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 07 de mayo de 2025

Firmado electrónicamente por:
PEDRO FERNANDO ESCUDERO VILLA
Validar únicamente con FirmaEC

PhD. Pedro Fernando Escudero Villa
TUTOR

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo:

A mis padres, Sr. Segundo Shilquigua y Sra. María Rosacela gracias por todo el apoyo que me han brindado a través de los años han sido mi motor y pilar fundamental para salir adelante, gracias por sus concejos los cuales me sirvieron de mucho en la vida. Su constante lucha y perseverancia para salir adelante son un ejemplo para mí para no rendirme y seguir adelante en busca de nuevos objetivos y metas por cumplir.

A mis hermanos Jhoselyn y Edwin que de una u otra manera se hicieron presentes en toda esta etapa de educación me brindaron palabras de aliento para seguir adelante y me brindaron su amor cuando más uno se lo necesita, también agradezco a mi sobrino Alexander en los días donde muchas cosas se ponían difíciles y uno se sentía cansado el con sus ocurrencias, juegos me sacaba una sonrisa y eso fue motivo para continuar y poder ser un ejemplo para el gracias.

A mi enamorada Ing. Myriam Guamán gracias, amor por estar acompañándome desde el inicio de esta etapa académica eres mi motivo para salir adelante para continuar alcanzando nuevas metas sé que me falta mucho por cumplir y alcanzar, pero sé que con tu apoyo y el de mi familia lograre seguir adelante, gracias a todos.

Franklin Jhonatan Shilquigua Rosacela

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios, por todas sus bendiciones por brindarme la oportunidad de llegar a esta etapa, también quiero expresar un agradecimiento profundo a mi tutor PhD. Pedro Escudero gracias por su ayuda y supervisión profesional, sus conocimientos amplios en la materia su dedicación y paciencia para guiarme fueron fundamentales para el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco también a mis compañeros de salón, con muchos de ellos iniciamos todo un proceso de aprendizaje formando amistades sinceras y de muchos años, mismas que aportaron mucho en esta etapa de aprendizaje gracias, amigos y compañeros por su amistad y su apoyo.

Franklin Jhonatan Shilquigua Rosacela

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL
CERTIFICADO ANTIPLAGIO
DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE DE TABLAS
ÍNDICE DE ECUACIONES
ÍNDICE DE FIGURAS
RESUMEN
ABSTRACT
Capítulo I Introducción 16
1.1. Antecedentes 17
1.2. Planteamiento del problema y justificación 21
1.3. Objetivos 22
1.3.1. Objetivo General 22
1.3.2. Objetivos Específicos 22
Capítulo II Marco Teórico 23
2.1. Estado del arte 23
2.2. Marco teórico 24
2.2.1. Agua elemento imprescindible 24
2.2.2. Indicadores para determinar la calidad del agua 25
2.2.3. Sistema Óptico 26
2.2.4. Sistema electrónico 31
Capítulo III Metodología 35
3.1. Tipo de investigación 35
3.2. Método de investigación 35
3.2.1. Investigación descriptiva 35
3.2.2. Investigación experimental 35
3.3. Procedimiento y análisis 35

3.3.1. Fase I Búsqueda y análisis de información. 37
3.3.2. Fase II Simulación del sistema óptico y electrónico. 37
3.3.3. Fase III Armado del espectrómetro prototipo 45
3.4. Técnicas de recolección de datos 47
3.4.1. Fuentes de información 47
3.4.2. Instrumento para la recolección de datos 47
3.5. Población y muestra 48
3.5.1. Población 48
3.5.2. Muestra 48
3.6. Operación de variables 48
3.6.1. Variable dependiente 48
3.6.2. Variable independiente 48
Capítulo IV Resultados y Discusión 49
4.1. Evaluación del funcionamiento del prototipo comparando los resultados obtenidos con otros dispositivos comerciales 49
4.1.1. Resultados de muestra Río Chambo 50
4.1.2. Resultados de muestra Río Guano 53
4.1.3. Resultados de muestra Río Chibunga 55
4.1.4. Resultados de muestra vertiente de agua 58
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones 61
5.1. Conclusiones 61
5.2. Recomendaciones 62
Bibliografía 63
Anexos 66
Anexo 1: Datasheet lentes ópticos. 66
Anexo 2: Curva del revestimiento de fluoruro de magnesio de los lentes ópticos 67
Anexo 3: Código de Arduino IDE 68
Anexo 4: Georreferencias de los puntos de analisis 70
Anexo 5: toma y analisis de muestras in situ 70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores del índice de Calidad de Agua (ICA) [17]. 25
Tabla 2. Tabla de características lentes [35]..... 37
Tabla 3. Especificaciones Técnicas del Arduino nano [28]. 39
Tabla 4. Especificaciones Técnicas Modulo HC-06 [36]..... 40
Tabla 5. Especificaciones técnicas servo SG90 [37]..... 40
Tabla 6. Especificaciones técnicas LCD i2C [40]..... 40
Tabla 7. Especificaciones Técnicas [39]. 41
Tabla 8. Tabla de georreferencia de los puntos análisis. 47
Tabla 9. Variable independiente..... 48
Tabla 10. Variable dependiente..... 48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1)..... 29
Ecuación (2)..... 34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principio de funcionamiento de un espectrómetro físico [18]. 26
Figura 2. Tipos de lentes para aplicaciones ópticas: Lentes convergentes y Lentes [3]. 27
Figura 3. Rejilla de difracción de Transmisión [20]. 27
Figura 4. Espectro Electromagnético [8]. 28
Figura 5. Reflexión de la luz en un medio (Agua) [8]. 30
Figura 6. Refracción de la luz en un medio [24]. 30
Figura 7. Difracción de un haz de luz a través de un prisma [8]. 31
Figura 8. Arduino Nano [25]. 31
Figura 9. Modulo HC-06 [26]. 32
Figura 10. Servo moto [27]. 32
Figura 11. Pantalla Lcd i2c [29]. 32
Figura 12. Fototransistor 3DU33 [30]. 33
Figura 13. Dimensiones del fotodiodo 3DU33 [31]. 33
Figura 14. Diagrama de flujo. 36
Figura 15. Interfaz del módulo óptica en FreeCAD. 38
Figura 16. Panel de opciones ópticas disponibles en FreeCAD para el diseño de sistemas ópticos. 38
Figura 17. Proceso de importación de archivo. step en FreeCAD para la incorporación de especificaciones reales de lentes. 38
Figura 18. Simulación del sistema óptico en FreeCAD mostrando la disposición del LED; los lentes, la red de difracción y el fototransistor. 39
Figura 19. Diseño esquemático del sistema en Proteus. 41
Figura 20. Diseño del PCB en Proteus mostrando la distribución de componentes y trazado de pistas. 42
Figura 21. Visualización tridimensional del circuito electrónico con componentes en Proteus. 42
Figura 22. Impresión láser del diseño del circuito en papel fotográfico para transferencia térmica. 43
Figura 23. Proceso de corrosión química de la PCB y resultado final tras la limpieza. 43
Figura 24. Configuración experimental de los componentes ópticos montados en el dispositivo de prueba inicial. 44
Figura 25. Sistema electrónico con cada uno de sus componentes soldados. 44

Figura 26. Encapsulado mediante impresión 3D en filamento negro. 45
Figura 27. Sistema óptico integrado en el encapsulado de impresión 3D de color negro. .. 46
Figura 28. Vistas múltiples del prototipo completo mostrando la integración de los componentes electrónicos y ópticos en sus respectivos encapsulados. 46
Figura 29. Sistema óptico del espectrofotómetro DR-2010 [33]. 49
Figura 30. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Chambo. ... 50
Figura 31. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Chambo. 52
Figura 32. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Chambo. 52
Figura 33. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Guano. 53
Figura 34. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Guano. 54
Figura 35. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Guano. 55
Figura 36. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Chibunga. . 55
Figura 37. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Chibunga. 57
Figura 38. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Chibunga. 57
Figura 39. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra vertiente de agua. 58
Figura 40. Diagrama de cajas para resultados de muestra vertiente de agua. 59
Figura 41. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra vertiente de agua. 60

RESUMEN

El objetivo de presente trabajo fue el diseño de un sistema óptico portátil para la caracterización de muestras de agua en fuentes remotas de la parroquia Cubijes del Ecuador. Se utilizó una metodología de investigación descriptiva y experimental, estructurada en tres fases: análisis teórico, simulación del sistema óptico y electrónico con los softwares FreeCAD y Proteus, e implementación del prototipo. El sistema diseñado incluye una fuente LED de luz blanca, lentes convexos, una red de difracción fabricada con un DVD y un fotodiodo 3DU33, controlado por un microcontrolador Arduino Nano, con transmisión de datos vía Bluetooth y funciona como un espectrómetro en el rango de 400 a 1100 nm. Se recolectaron muestras de 4 fuentes (ríos Chambo, Guano, Chibunga y una vertiente), cuyos resultados se compararon con un espectrofotómetro comercial (DR-2010). Los resultados mostraron concordancias dentro del rango de (500 - 530 nm) pero discrepancias en los extremos (590 - 700 nm) donde el prototipo subestimó la absorbancia. El análisis estadístico reveló una mayor variabilidad con el prototipo (desviación estándar de 2 a 3 veces mayor que con el instrumento comercial). A pesar de esto, el sistema demostró ser funcional y económico, presentando una opción razonable para el monitoreo in situ de la calidad del agua, aunque con advertencias respecto a la calibración y sensibilidad que necesitarán revisión en futuros compromisos.

Palabras clave: espectrómetro portátil, calidad del agua, caracterización óptica, Arduino, red de difracción.

ABSTRACT

The aim of this research work was the design of a portable optical system for the characterization of water samples in specific sources of Cubijes-Ecuador.
A descriptive and experimental research methodology was used, it was structured in three phases: theoretical analysis, simulation of the optical and electronic system with FreeCAD and Proteus software, and implementation of the prototype. The designed system includes a white light LED source, convex lenses, a diffraction network made with a DVD and a 3DU33 photodiode, controlled by an Arduino Nano microcontroller, data transmission via Bluetooth and working as a spectrometer in the range of 400 to 1100 nm. Samples were collected from 4 sources (Chambo, Guano, Chibunga rivers and a spring), whose results were compared with a commercial spectrophotometer (DR-2010). The results showed agreement within the range (500 - 530 nm) but discrepancies at the extremes (590 - 700 nm) where the prototype underestimated the absorbance. Statistical analysis revealed a higher variability with the prototype (2-3 times higher standard deviation than with the commercial instrument). Despite this, the system proved to be functional and economical, presenting a reasonable option for in situ water quality monitoring, although with warnings regarding calibration and sensitivity that will need revision in future engagements.

Keywords: portable spectrometer, water quality, optical characterization, Arduino, diffraction network.

Firmado electrónicamente por:
EDISON HERNAN
SALAZAR CALDERON
Validar únicamente con FirmaEC

Reviewed by:
Mgs. Edison Salazar Calderón
ENGLISH PROFESSOR
I.D. 0603184698

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

La luz visible es la radiación electromagnética que comprende las longitudes de onda que van desde los 400 nm a los 700 nm, esta radiación puede ser percibida por el ojo humano, cada longitud de onda está asociada a un color en específico empezamos en violeta 400 nm hasta los 700nm que es el color rojo. Para analizar la composición del espectro en el rango de luz visible y determinarlas distintas longitudes de onda se utilizan los espectrómetros son instrumentos con los cuales se puede separar y medir los componentes espectrales de una señal lumínica. Existen varios tipos de espectrómetros y algunos de los más comunes son espectrómetros de masa y el espectrómetro óptico[1].

Al analizar el espectro de luz se identifica diferentes componentes cromáticos, así también se analiza propiedades ópticas de materiales y se puede realizar mediciones más precisas. Estos análisis se los puede llevar a cabo mediante los espectrómetros, estos equipos utilizan componentes ópticos como redes de difracción, lentes entre otros componentes para descomponer la luz en diferentes longitudes de onda.

Los dispositivos ópticos suelen tener un alto costo lo cual lo limita su adquisición, para realizar proyectos o para entornos educativos, aunque existen varios estudios sobre materiales alternativos, no se tiene información relevante sobre si se puede diseñar un sistema óptico con materiales convencionales que tenga una resolución espectral alta, una estabilidad precisa entre otras características importantes, para realizar comparaciones con un espectrómetro comercial.

Con base en el análisis, se plantea la hipótesis: es posible construir un dispositivo óptico de bajo costo que detecte adecuadamente la intensidad luminosa en diferentes longitudes de onda dentro del espectro de luz visible, empleando materiales simples y una estructura electrónica básica.

En base al análisis se diseñó un espectrómetro el cual nos permite analizar la absorbancia de la luz en función de la longitud de onda en el rango de UV-Visible 400 a 700 nm. Este dispositivo contiene dos partes para su funcionamiento una la parte óptica y otra es la parte electrónica, a su vez el sistema tiene una programación para realizar un barrido de 0° a 14° en este rango es aquel donde pasan los colores en las diferentes longitudes de onda para realizar el control de velocidad y ángulo de giro nos ayudamos de un servo motor los datos que se obtienen del dispositivo mediante el fototransistor y son enviados mediante bluetooth hacia un dispositivo móvil para posterior ser analizados y comparados con un dispositivo comercial.

1.1. Antecedentes

Los sistemas ópticos (espectrómetros) se han utilizado en industrias y áreas de investigación como la química, bioquímica y ciencia de materiales para el monitoreo de las variables salud y el medio ambiente, que se ha vuelto cada vez más importante debido a los impactos ambientales negativos. Sin embargo, los métodos de análisis más tradicionales pueden ser inexactos debido a la contaminación de las muestras durante el transporte, pueden ser más costosos o que requieren mucho tiempo. El costo de los espectrómetros, que es el dispositivo utilizado para el análisis cuantitativo de absorción de luz, depende de su diseño y uso; las versiones de bajo costo suelen utilizar diodos LED como fuente de luz. La espectrometría visible hace posible cuantificar las concentraciones de los analitos en los campos de la biotecnología, farmacología, ingeniería química y estudios ambientales, donde se utiliza para monitorear contaminantes, estudiar reacciones enzimáticas, identificar diversos compuestos químicos, evaluar impactos ambientales, entre otras cosas [2].

Asimismo, el procedimiento utilizado para el diseño de un sistema óptico que detecte datos y transmisión de líquidos gestionados, que generan contaminantes, la detección de fluorescencia, hizo necesario el sistema óptico en la identificación de espectros fluorescentes. El propósito de esta investigación fue ejecutar un sistema óptico capaz de analizar los espectros de hidrocarburos y reconocer los componentes en las muestras proporcionadas. Dicho prototipo de seis puestos principales: un sistema de excitación compuesto por un LED UV, ilumina la muestra y la fluorescencia; un sistema óptico compuesto por una matriz de lentes y filtros ópticos; conformado por un soporte para la muestra con un sistema de enfoque; un sistema de control electrónico mediante un microcontrolador para los comandos lógicos del sistema; una unidad de adquisición de datos con capacidad necesaria para la comunicación e interpretación de datos; que utiliza recargas batería de ion para hacer que en el sistema de apagón automático; ante imágenes de espectro fluorescentes [3].

Por otro lado, tenemos el proyecto diseño y construcción de un aparato que monitoree el pH, así como también la temperatura del agua. Este trabajo propuso desarrollar un dispositivo electrónico con características para medir las cuantificaciones que establecen la calidad del agua. El desarrollo se realizó utilizando recursos de hardware y software de código abierto. Los parámetros medidos fueron temperatura, conductividad eléctrica y pH utilizando sensores caseros que fueron más económicos. Las mediciones se realizaron y compaginó con una placa Arduino y un conjunto de datos disponible, fue posible enviar la información a través de un módulo WI-FI a un servidor de Internet (conocido como Internet de las Cosas o IoT) para monitoreo y visualización en tiempo real. Además, se llevó a cabo un análisis estadístico para validar los sensores desarrollados en comparación con mediciones de versiones de un conjunto de referencia rellenas de sensores comerciales considerados puntos como referencia de norma de la industria [4].

El desarrollo y ejecución de un prototipo para el tratamiento de agua mediante un esterilizador ultravioleta monitoreado a distancia en la parroquia de Punín, que a su vez tiene un sistema automático de control y monitoreo de calidad de agua utilizando el controlador Arduino Mega 2560 junto al módulo GSM/GPRS, entre otros. El prototipo hace uso de sensores de pH, conductividad e intensidad de luz UV para enviar los datos medidos a internet, donde se pueden visualizar en una página web. A través de estos módulos, los usuarios son notificados automáticamente por SMS si el agua es apta para el consumo, determinando si es segura para beber. Los resultados obtenidos muestran que el prototipo permite una purificación eficiente del agua a una tasa de 3.02 litros por segundo, un flujo constante dentro del reactor. Siendo el nivel de pH registrado fue de unidades 7.3, la turbidez, alcanzado 2.56 NTU, la concentración de TDS fue de 373 mg/L y, con respecto al análisis microbiológico, los resultados óptimos para el consumo humano [5].

De igual forma, se desarrolló el diseño de un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible para identificar contaminantes en agua de experimentación en el rango de 200nm a 400nm (UV). A través de este trabajo, en el proyecto se construir se construye un sistema óptico sumergible que realiza la transmisión y recepción de señales ultravioleta (UV) en el rango de 200 nm a 400 nm, así como identificar los contaminantes en el agua de experimentación. El sistema tiene como meta la efectividad de la detección de sustancias a través de publicaciones analiza espectrales a través de interacciones de ópticas con luz ultravioleta (UV) técnicas que se basan en análisis ópticos de la ciudad. El diseño del sistema se estructura en dos bloques principales, un módulo de transmisión que emite señales de luz UV a distancias programadas como conocido transmisor óptico y un módulo de recepción llamada a negativos ópticos que la respuesta espectral del medio acuático. En el diseño asegurado con fuentes de luz ultravioleta calibradas, el rango extendido y con los sensores ópticos superiores de alta sensibilidad y selectividad que miden la intensidad y longitud de onda contaminadas. Para su operatividad, el sistema sumergible tuvo un diseño de estructura protegida ante la turbidez del agua de 0oC a 70oC [6].

El objetivo de esta investigación fue diseñado un sistema automatizado para la detección de contaminantes en aguas corrientes que se utilizan espectroscopia UV y de procesamiento. Esto se logra analizar el signo recibido con algoritmos de análisis espectral para determinar comportamientos espectrales correspondientes a habituales contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Los hallazgos derivados de las pruebas realizadas mostraron que el sistema es una opción viable para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real, con aplicaciones potenciales en la industria laboratorios, laboratorios de investigación y monitoreo ambiental. La investigación realizada en óptica sobre óptica y espectroscopia UV representa un avance hacia el desarrollo de herramientas tecnológicas ambientalmente sostenibles para la gestión de los recursos hídricos y la conservación ambiental [6].

En el diseño e implementación del sistema IoT para el seguimiento de los parámetros de pH, oxígeno disuelto, turbidez y temperatura en el acuicultivo de trucha. “Aguas Cristalinas”. Aplicado en la parroquia de Pungalá, carecían de información corporativa; es por ello por lo

que lo sistemas de control de tiempo en tiempo real totalmente integrado con la función de control y seguimiento. Al no existir la posibilidad de monitorear en tiempo real los parámetros necesarios para la vida de la trucha, sucumbía una mortalidad en la fase de crecimiento de un 15%. En la implementación del sistema está compuesto por dos nodos de sensor posicionado en la entrada y salida de la piscifactoría de truchas. Dentro de la piscina de alevines se localiza un sensor inalámbrico y otro en parte superior de la piscina de menores, lo importante a resaltar en este trabajo es que se pudo obtener datos requeridos y los parámetros con la calidad del agua [7].

El diseño y la implementación de un prototipo de un sistema espectral para adquirir datos de los diversos espectros de luz visible. Su objetivo es diseñar un prototipo que incluya tres módulos principales: el sistema óptico para la recolección y difracción de la luz, el sistema electrónico de adquisición de datos y el software para la visualización y análisis del espectro. Como parte del Módulo de Recolección Óptica y Difracción de Luz, la Fuente Láser incluye el Láser de Nitrógeno en Criogenia SRS NL100 (Stanford Research Systems), Láser de 337 nm, Láser de 460 nm y Láser de 532 nm. Los láseres pasan a través de una lente colimadora donde la luz se enfoca, después de este paso, la luz incide en la rejilla de difracción holográfica cóncava. La luz se difracta a través de sus diversas rendijas y la refleja hacia el detector CCD (Dispositivo de Acoplamiento de Carga). El correcto funcionamiento del sensor se asegura por la señal de reloj enviada desde el microcontrolador y el tiempo de integración propuesto para ser alrededor de 72.5 ms como mínimo y 440 ms como máximo [8].

En la implementación de un prototipo de monitoreo remoto de calidad de agua, facilitó el acceso del usuario a la información recopilada, la capacidad de iniciar sesión que permite así la observación en tiempo real de la evolución del fenómeno junto con la elaboración dinámica de reportes mediante la construcción automatizada de gráficos. Además, se envían notificaciones completas automatizadas cuando los datos medidos superan los límites preestablecidos, promovió mayor del servicio de contratación con la Alcaldía brindando seguridad y control. Desde el monitoreo de cuerpos de agua naturales hasta la gestión de la calidad de los sistemas de suministro de agua potable y acuarios, este proyecto abarca una amplia gama de temas. La personalización proporcionada por ESP32 y Arduino Cloud mejora la flexibilidad del sistema y su capacidad de respuesta a necesidades específicas, mientras que su escalabilidad permite la posterior adición de sensores y nuevas características [9].

La implementación de espectroscopía UV junto al procesamiento de imágenes en tiempo real de video de reserva de agua R-2 tenía por finalidad el desarrollo de un sistema automatizado para el monitoreo de contaminantes en aguas residuales cuyo objetivo era la detección precoz de fallas operacionales. Esto se logra al analizar el signo con algoritmos de análisis espectral con la matemática propuesta por [8] para determinar comportamientos espectrales suponiendo que el contaminante son metales pesados o compuestos orgánicos volátiles. Los hallazgos derivados de las pruebas realizadas mostraron que el sistema es una opción viable para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real, con aplicaciones

potenciales en la industria, laboratorios de investigación y monitoreo ambiental. La investigación realizada sobre óptica y espectroscopia UV representa un avance hacia el desarrollo de herramientas tecnológicas ambientalmente sostenibles para la gestión de los recursos hídricos y la conservación ambiental [10].

Este enfoque es no experimental y de alcance descriptivo, confiando en la observación directa y formularios de control como herramientas diagnósticas relacionadas con la situación operacional en el Reservorio R-2 de Arequipa y los problemas de los operativos internos, dieron lugar a la implementación de un sistema a nivel empírico de control y monitoreo, utilizando una regla de medición cúbica para el control del nivel 1.5 m, nivel 4.5 m, el by-pass de la válvula de control para el control del flujo en entrada y salida, y sin instrumentos automatizados para mediciones de y presión que alcance de control adecuado. Así, se socavó los factores operativos que afectaron el rendimiento del sistema ordenado en el nivel de control son los cierres de los accionamientos de válvulas, el control del desbordamiento, y los umbrales de cierre [10].

1.2. Planteamiento del problema y justificación

Problemática

Una de las problemáticas para realizar la caracterización de muestras liquidas en fuentes de aguas remotas es la limitación de disponer instrumentación portátil para poder detectar contaminantes, puesto que al transportar las muestras desde lugares remotos hasta el laboratorio en ocasiones puede tomar más de 24 horas entonces las muestras recolectadas podrían perder sus propiedades y su análisis en el laboratorio será deficiente dando muchos sesgos en los resultados de caracterización.

Otro de los problemas a considerar es que estos instrumentos tienen un costo alto y esto dificulta su adquisición para proyectos que son de bajo presupuesto o incluso para laboratorios. Impidiendo en muchas de las ocasiones que los estudiantes y pequeños investigadores no puedan experimentar los fenómenos ópticos, como la detección de colores la descomposición espectral entre otras características importantes para analizar.

Justificación

Con el anterior análisis uno de los problemas principales es que las muestras de agua al momento de ser transportada pueden perder sus características químicas, otro problema que se encontró es el alto costo de los equipos. Debido a estas problemáticas se propone diseñar un sistema óptico portátil similar a un espectrómetro lo que nos permitirá realizar el análisis de muestras in situ se obtendrán diferentes datos mismos que se realizara la comparación con otros datos que se obtendrán de un equipo comercial de esta manera se comprobaran los resultados y se definirá si el diseño de nuestro equipo es eficiente.

La importancia del proyecto es que mediante esta implementación de un espectrómetro se puede comprender los principios de la óptica, análisis espectral mediante un sistema accesible y funcional. Otro de los aspectos importantes del proyecto es considerar es la viable del mismo esto conlleva a estimar los costos de desarrollo del sistema óptico, incluyendo investigación, diseño, prototipado y pruebas, el equipo deberá ser de bajo costo y que sea asequible para las personas, empresas o instituciones que necesiten de este tipo de equipos. El impacto tecnológico que puede llegar a tener el dispositivo óptico portátil puede recaer más sobre la investigación, permitiendo que los estudiantes o instituciones con pocos recursos puedan acceder a experiencias en de análisis de muestras in situ. Además, el diseño compacto lo hace adecuado a transportarlo a cualquier área y se puede adaptar a diferentes tipos de experimentos, identificar colorantes, análisis muestras liquidas

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar un sistema óptico portátil para caracterizar muestras de agua de fuentes remotas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar el sistema óptico usando redes de difracción y el subsistema electrónico de transducción y procesado de datos.
- Implementar el sistema óptico como el sistema electrónico del prototipo para caracterización de muestras de aguas de fuentes remotas.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo comparando los resultados obtenidos con otros dispositivos comerciales.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

En la investigación de Edder Lenin Gaibor Ontaneda y Jhonny Mauricio Chuqui Gavilanes, "Diseño e implementación de un prototipo de sistema espectral para adquirir datos de los diferentes espectros de luz visible" afirman que los espectrómetros son instrumentos científicos y técnicos sofisticados para la medición y análisis de diversas formas de materia. El sistema opera con bloques que comprenden: fuente de luz, sistema de enfoque óptico, receptor y difractor de luz utilizando una rejilla de difracción holográfica cóncava con el sistema electrónico de calibración de rejilla, arreglos ópticos, zona de luz difractada hacia el sensor CCD y estos mismos acondicionadores y el computador. El prototipo de detección espectral diseñado usa una rejilla de difracción holográfica cóncava que permite difractar la luz cuando los electrones colisionan con su superficie. Sin embargo, es importante considerar que la rejilla sólo acepta un rango de 400 a 700 nm [8].

Serrano en su investigación "Diseño y construcción de equipo de medición para el monitoreo de pH, conductividad y temperatura del agua" tuvo como objetivo diseñar y construir un equipo de bajo costo, basado en Arduino, para medir en tiempo real parámetros de calidad del agua como el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica, permitiendo su monitoreo remoto mediante la plataforma ThingSpeak. La metodología empleada fue de tipo experimental, validando los sensores desarrollados frente a sensores comerciales, utilizando un enfoque comparativo y estadístico (T-student y % de error). En cuanto a la instrumentación, se utilizaron sensores de temperatura DS18B20, una sonda de pH SECTRION y una sonda de conductividad elaborada con materiales económicos, todo conectado a un microcontrolador Arduino DUE. Los resultados mostraron una alta precisión: en el sensor de temperatura se obtuvo una incertidumbre absoluta de ±0.3 °C, el sensor de pH presentó un error porcentual máxima de ±2.5% y el sensor de conductividad un error de hasta ±4.6%. Aunque no se midieron contaminantes específicos, las variables monitoreadas permiten inferir posibles condiciones de contaminación en el agua evaluada [4].

Por su parte Lomas realizo un estudio "Diseño e implementación de un sistema óptico que utiliza la técnica de transmisión en líquidos para detección de contaminantes de hidrocarburos destilados" con el objetivo de diseñar un sistema portátil basado en fluorescencia para identificar hidrocarburos como diésel, gasolina súper y extra. La metodología incluyó un sistema de excitación UV a 400 nm, espectrómetro y una interfaz HMI con enfoque automático. En cuanto a la instrumentación, se optó por lentes colimadoras, filtros ópticos y sensores de microcontrolador; el análisis fue efectuado a distancia de 5 mm de enfoque, con un LED al 70% de su potencia y un tiempo de integración de 7s. Estos resultados confirmaron el correcto asocio y reconocimiento de los compuestos; el diésel, por ejemplo, tuvo un pico de fluorescencia a 510 nm y un desplazamiento de 120nm en relación a la referencia. Las gasolinas también generaron espectros característicos, aunque con menor intensidad. La funcionalidad del sistema fue validada frente a datos de referencia [3].

Morales en la investigación “Implementación de un prototipo para monitoreo remoto de calidad de agua y visualización de datos mediante un dashboard web” tuvo como objetivo desarrollar un prototipo para el monitoreo remoto de la calidad del agua utilizando una placa ESP32 y sensores de pH y turbidez con visualización de datos en tiempo real e históricos a través de un dashboard web en Arduino Cloud. La metodología incluyó análisis, diseño, selección de componentes (ESP32, sensor PH-4502C, sensor DFRobot), codificación, construcción de circuitos PCB y pruebas funcionales. En cuanto a la instrumentación, se utilizaron sensores electroquímicos y ópticos I2C y los datos se enviaron a la nube a través de Wi-Fi. Los resultados mostraron que el sistema funcionó bien con errores de medición de pH entre 1.36% y 4.6%, todos los cuales fueron inferiores al 5% y así validando la precisión. Aunque no se analizaron contaminantes específicos, la capacidad del sistema para monitorear cambios en el pH y la turbidez permite la detección de variaciones en la calidad del agua [9].

Ponce en su estudio “Estudio exploratorio de la calidad de agua del sistema de riego Chambo – Guano de la provincia de Chimborazo”, tuvo como objetivo evaluar la calidad del agua en diez puntos del canal mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos. Utilizando una metodología experimental, se emplearon los parámetros pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, oxígeno disuelto, nitratos y coliformes totales como indicadores. Para esto, se utilizó un multiparamétrico portátil junto con métodos de laboratorio estándar como la espectrofotometría UV, absorción atómica y titulación. Se encontró que todos los parámetros estaban dentro de límites aceptables con la excepción del P1 (Bocatoma-Ceceles) que tuvo un efluente de RAS de 4.67% superando el valor permisivo. El valor promedio de pH fue de 7,0 y la conductividad eléctrica osciló entre 0,13 y 0,18 dS/m, lo que indica baja salinidad. Se concluyó que el agua del sistema es apta para riego, recomendándose análisis periódicos para controlar posibles impactos por actividades humanas a lo largo del canal [11].

2.2. Marco teórico

2.2.1. Agua elemento imprescindible

El agua es un recurso único, siendo esencial para alcanzar una vida digna y un nivel de vida sostenibles junto a la propia existencia, repercutiendo también en el funcionamiento de los ecosistemas a mayor escala. Es importante identificar los elementos que conducen a problemas derivados de este recurso: sequías, uso derrochador o contaminantes de actividades humanas. Este último factor es el que parece estar más descrito en muchas áreas del mundo, incluyendo Ecuador, nuestro país [12].

Existen diferentes enfoques relacionados con el control de la calidad del agua, desde aquellos que presentan valores aislados de parámetros de calidad de agua, hasta aquellos en que se agrupan diversos parámetros en función al interés que se tenga. A través de este tipo de expresiones simplificadas es posible reducir la cantidad de dimensiones a analizar respecto a la calidad del agua y agruparlas en un solo valor que muestre el “diagnóstico” del sistema monitoreado, tal es el caso de los índices de calidad del agua (ICA) [13].

Tabla 1. Valores del índice de Calidad de Agua (ICA) [14].

Calidad	Valor
Excelente	91 – 100
Buena	71 – 90
Mediana	51 – 70
Mala	26 – 50
Muy mala	0 – 25

La evaluación de la calidad del agua contiene la medición de características fisicoquímicas y biológicas específicas, como la suma de contaminantes, pH, temperatura y turbidez. Estos se llaman factores que afectan la calidad del agua. Las actividades antropogénicas han tenido un gran impacto en todos estos factores porque los humanos tienden a verter desechos en el agua o aplicar sustancias que no son naturales. Estas actividades interfieren con los procesos naturales [14].

2.2.2. Indicadores para determinar la calidad del agua

Temperatura

La temperatura de un líquido está determinada por la absorción de radiación por las capas superiores al líquido. Cualquier alteración en temperatura afecta la solubilidad de la sal dentro junto en un sistema, los gases en forma líquida cambiando su estado y todas propiedades en líneas generales [15].

Color

El color del agua viene dado por la presencia de substancias coloidales y disueltas en ella. Hay dos grandes clasificaciones respecto al color de las aguas: (a) aparente se refiere a la producida por materiales en suspensión y (b) verdadero es el que persiste en el agua después de eliminar la turbidez [16].

Turbidez

Este es uno de los parámetros más relevantes usados para evaluar la calidad del agua potable, y debe ser tratado para eliminar la turbidez [17]. Se refiere a la capacidad del material suspendido dentro del agua para obstruir la luz; es un producto del sedimento causado por la erosión natural y la deposición de materia orgánica [16].

Sólidos Totales Disueltos

- **Sólidos totales (ST):** Cualquier sustancia que queda después de la evaporación completa del agua.
- **Sólidos disueltos totales (SDT):** Cantidad de sales inorgánicas contenidas en el agua y sirve como un indicador del contenido de sal.
- **Sólidos sediméntales (SS):** engloba la parte que se acumula en la parte inferior de la cuba que contiene la muestra de agua [16].

2.2.3. Sistema Óptico

Espectrómetro

Espectrómetro o espectrofotómetro se denomina al dispositivo que es capaz de dirigir un haz de luz sobre una muestra y medir dos resultados posibles. La primera es la absorbancia, respecto a la cantidad de luz que la muestra capta, y la segunda la transmitancia, referente a la porción luminosa que pasa a través de la materia, siendo esta última el complemento matemático de la absorbancia [18].

El uso de espectrofotómetros se ha ido expandiendo a otras áreas de la ciencia gracias a la medición de líquidos, plásticos, papel, metales e incluso tejidos. Dentro de sus aplicaciones, cabe destacar medir la concentración de ciertos compuestos en una solución; por ejemplo, el hierro en sangre o el cobre en un tejido, determinar el nivel de contaminación en el aire y agua, identificar la cantidad de impurezas en alimentos o reactivos, calcular las constantes de disociación de indicadores ácido-base y uniformizar colores en plásticos o pintura [18].

Componentes de un espectrómetro

Un espectrofotómetro consta de varios elementos principales: una fuente de luz, un sistema de enfoque, un filtro de selección de luz, una celda o cubeta de absorción, un fotodetector y un dispositivo para mostrar los resultados [18].

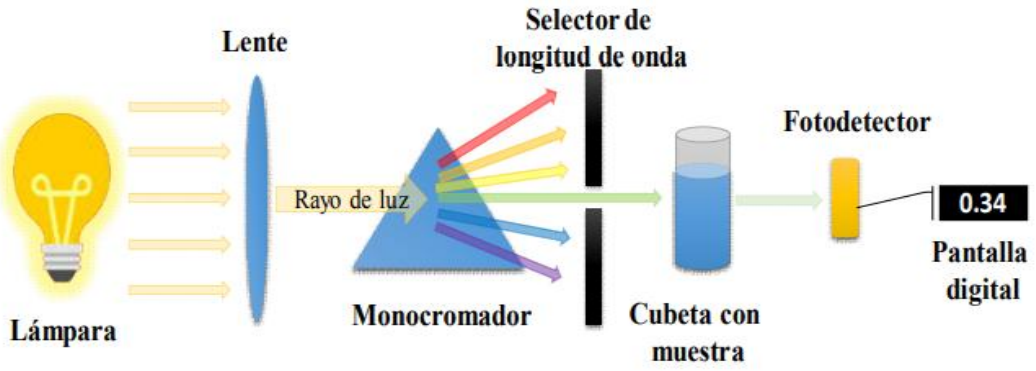


Figura 1. Principio de funcionamiento de un espectrómetro físico [18].

La fuente de luz debe suministrar las longitudes de onda correctas de luz con potencia constante. Generalmente se emplea una bombilla de filamento de tungsteno que emite luz de 380 a 750 nanómetros (nm), que abarca la región visible [18].
Los componentes ópticos son herramientas o instrumentos que se utilizan para ajustar el espectro electromagnético del sistema, esto según la aplicación para la que se esté implementando.

Fuentes de luz

La evolución de la tecnología LED ha traído ventajas importantes para el uso industrial de espectrofotómetros compactos, ya que permite sustituir muchas de las fuentes de luz tradicionales, como las lámparas de deuterio y tungsteno. Los LEDs ofrecen beneficios como

un costo reducido, una vida útil más prolongada, menor consumo energético y gastos de mantenimiento más bajos [2].

Lentes.

Una lente óptica es un componente transparente, generalmente hecho de vidrio, que tiene dos superficies curvas. Las lentes ópticas cambian la dirección de los rayos de luz que las atraviesan debido al fenómeno de la refracción. Son capaces de modificar el camino de la luz según su aplicación prevista, gracias a sus diferentes radios de curvatura [3].

En la figura 2 se muestran distintos tipos de lentes empleadas en óptica. Allí se observa que un rayo de luz incidente de forma perpendicular puede ser desviado hacia el plano focal o más allá de él, en el caso de lentes convergentes; o bien, puede refractarse alejándose del plano focal, como ocurre en las lentes divergentes[3].

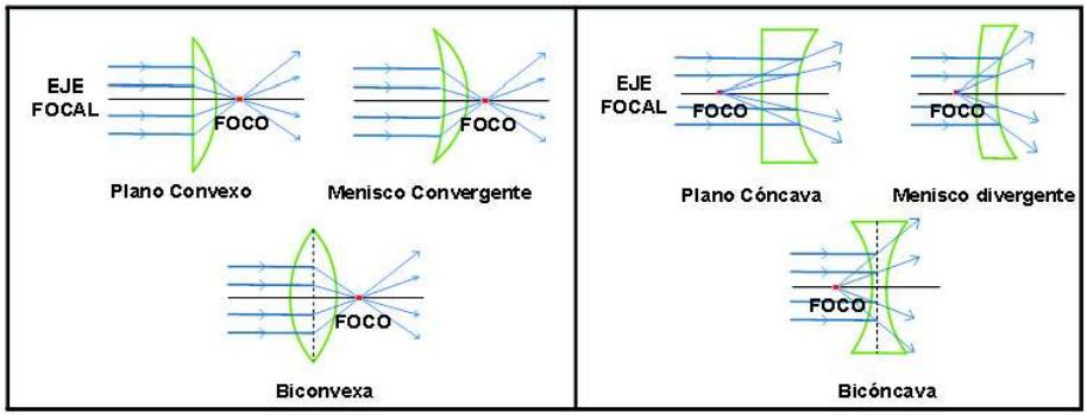


Figura 2. Tipos de lentes para aplicaciones ópticas: Lentes convergentes y Lentes [3].

Rejillas de difracción

Las rejillas de difracción ya sean transmisivas o reflectantes, pueden separar diferentes longitudes de onda de luz utilizando una estructura repetitiva incrustada dentro de la rejilla. La estructura afecta la amplitud y/o fase de la onda incidente, causando interferencia en la onda de salida [19].

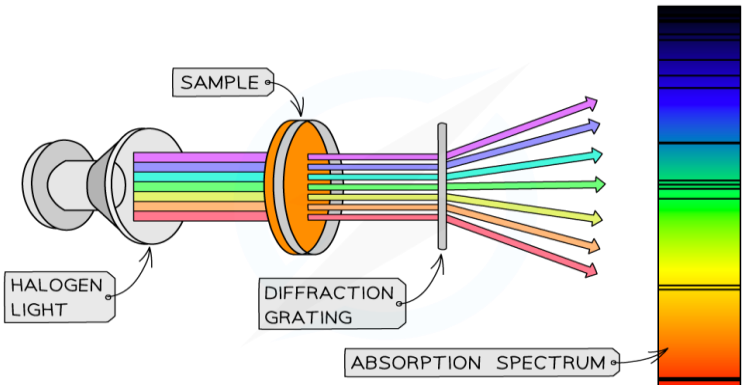


Figura 3. Rejilla de difracción de Transmisión [20].

La rejilla de difracción de transmisión es un portaobjetos de vidrio o plástico que contiene un gran número de rendijas o líneas paralelas espaciadas regularmente Se utiliza para

analizar las longitudes de onda de las líneas espectrales de la luz emitida por las estrellas. La dispersión angular (separación) de los colores es mucho mayor con una rejilla de difracción de transmisión que con un prisma óptico. Con las rejillas de difracción se obtienen franjas más nítidas que con una rendija doble [20].

Filtros

Los filtros ópticos son dispositivos que eliminan señales de luz no deseadas en un determinado intervalo de longitud de onda y permiten el paso de luz con ciertas características. Absorción, transmisión, y reflexión son parámetros que nos permiten evaluar la propiedad óptica de un filtro [3]. Para la investigación, no utilizamos ningún tipo de filtro para nuestro prototipo.

- **Absorción (A):** Esta es la correlación de la intensidad de luz que absorbe con la intensidad de luz incidente en la muestra, donde su valor varía entre 0 (transmitancia total) y 1 (absorción total), la mayor parte del tiempo se da en % [3].
- **Transmisión (T):** Relación de la intensidad de la luz que se transmite con la intensidad de la luz que incide en la muestra. Esta razón se expresa en %[3].
- **Reflexión (R):** Esta es la razón de la intensidad de la luz que se refleja con la intensidad de la luz incidente en la muestra[3].

Luz blanca

La luz blanca común es la combinación de ondas electromagnéticas que tiene energía a diferentes longitudes, siendo cada una de las ondas de distinta energía. La ventana de luz que es sensible al ojo humano se propaga en todos los medios (incluido el vacío) y su vibración se da en un número infinito de planos perpendiculares a la dirección de propagación [21].

Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético se refiere al conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas, ordenadas según el aumento de su longitud de onda [22]. En la figura adjunta se muestra cómo se distribuyen las distintas longitudes de onda en las diferentes regiones de luz dentro del espectro.

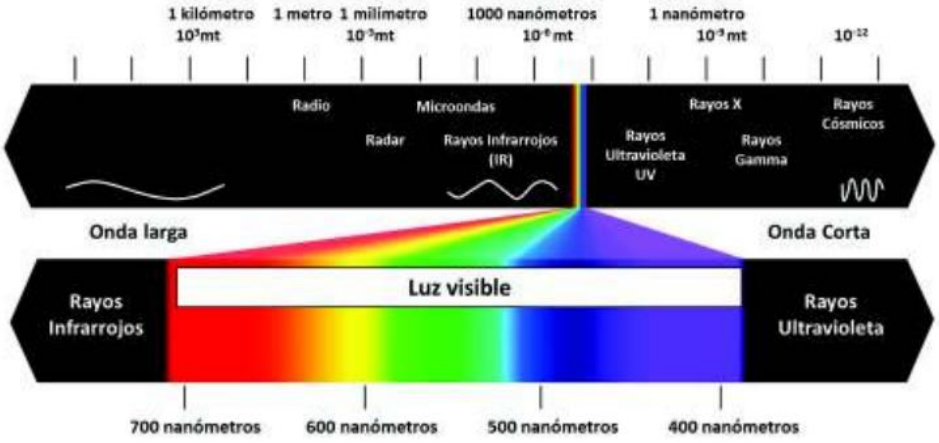


Figura 4. Espectro Electromagnético [8].

Espectrofotometría

La espectrofotometría es un método analítico que sirve para calcular la concentración de un elemento dentro de una solución [21]. Integra enfoques multifacéticos que proporcionan información detallada sobre la estructura ortoclinal de compuestos orgánicos e identificación de isótopos para átomos. Los métodos espectroscópicos son lo suficientemente sensibles como para permitir la detección de componentes traza, por ejemplo, contaminantes ambientales [13].

Espectroscopia UV – Visible

La espectroscopia UV-Visible pretende explicarse por varios constituyentes del agua, como los contaminantes, que son capaces de absorber luz en un área determinada del cociente de longitud de onda. Se funda en la ley de Lambert-Beer, que establece que la cantidad de producción de luz, la emisión de luz en la banda de energía de la sustancia es relativa a la cantidad de concentración de la solución en diluciones también la materia. Dependiendo del modelo matemático empleado, la precisión de los métodos utilizados se determina por el análisis de datos espectrales no empíricos que se divide en 4 etapas: procesamiento de la información del espectro, contorno de la longitud de onda, parámetros de calidad del agua y la evaluación del hecho matemático adoptado [13].

Los contaminantes en el agua absorben energía en diferentes longitudes de onda, por ejemplo, nitratos y nitritos están presentes de (200 - 220nm), materia orgánica de (250 - 380nm), turbidez de (380 a 750nm), y los metales dependen del método escogido[13]. La radiación visible corresponde a la descomposición de la luz blanca cuya frecuencia está comprendida entre 324 10^{12} *[Hz] a 796* 10^{12} [Hz] aproximadamente [8].

Longitud de Onda

La radiación electromagnética se describe como el movimiento alternativo de campos eléctricos y magnéticos que se propagan a través del espacio. Esta radiación, que presenta un comportamiento ondulatorio, puede clasificarse según su longitud de onda utilizando la siguiente ecuación 1:

$$\boldsymbol{V = \frac{C}{\lambda}} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde:
V= Frecuencia en segundos
C = Velocidad de la Luz ($3*10^8$) [m/s]
$\boldsymbol{\lambda}$ = Longitud de Onda (metros)
Al analizar esta relación, se deduce que a mayor energía corresponde una longitud de onda más corta. Por ello, las radiaciones como el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma poseen las energías más elevadas dentro del espectro electromagnético [8].

Reflexión

La reflexión es el fenómeno que tiene lugar cuando un rayo de luz alcanza la superficie que separa dos medios, ya sean gaseosos, líquidos o sólidos, y se rige por la Ley de la Reflexión, que establece dos principios fundamentales [8]

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la norma, se encuentra en un mismo plano.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

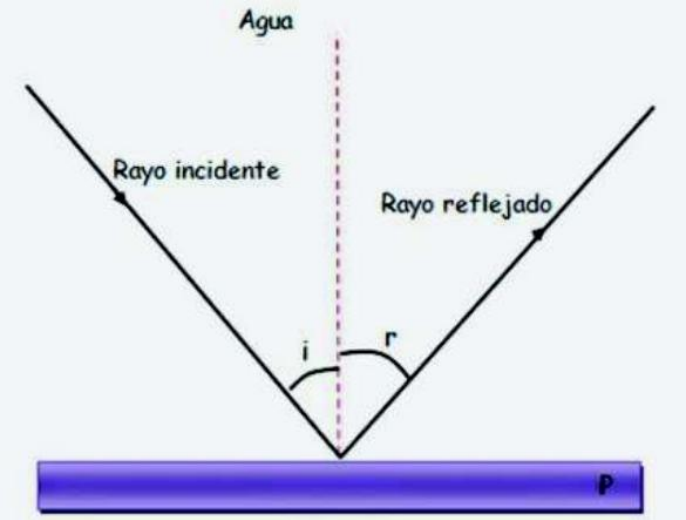


Figura 5. Reflexión de la luz en un medio (Agua) [8].

Refracción

La refracción ocurre cuando un haz de luz atraviesa el límite de dos medios diferentes y cambia de dirección. Este fenómeno puede ser explicado por la Ley de la Refracción o la ley de Snell. Esto es causado por el hecho de que la velocidad de la luz que se propaga cambia con el medio en el que se está propagando [23].

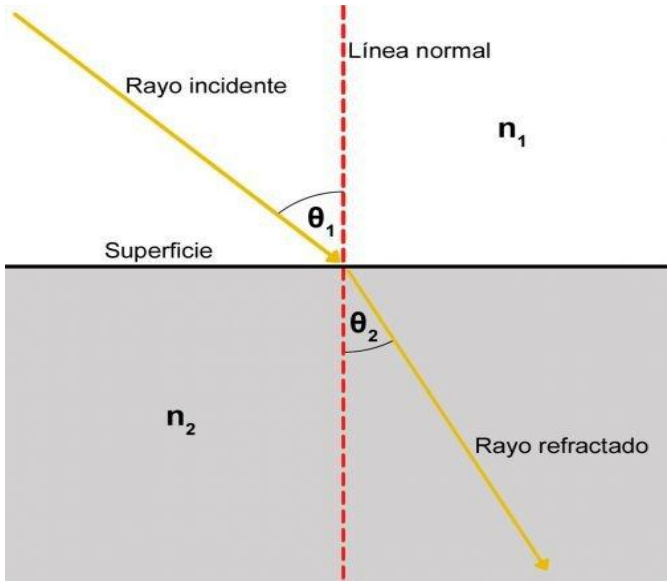


Figura 6. Refracción de la luz en un medio [24].

Difracción

Esto sucede cuando una onda cambia su dirección de propagación sin alterar el medio, al encontrarse con un obstáculo en su trayecto. En la Figura 7, se muestra cómo la luz que ingresa a un colimador pasa a través de una abertura, experimentando un cambio de dirección que permite ilustrar el principio de Huygens-Fresnel [8].

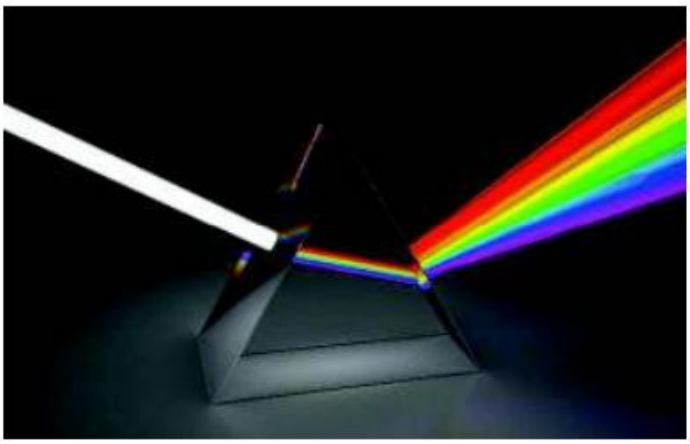


Figura 7. Difracción de un haz de luz a través de un prisma [8].

2.2.4. Sistema electrónico

Es importante adaptar el diseño del espectrómetro y la selección de sus componentes según los requisitos específicos para el sistema óptico con el cual se realizará el análisis de agua. Además, es posible que se requieran técnicas adicionales, como la preparación de muestras, para asegurar mediciones precisas.

Microcontrolador

El Arduino nano es un dispositivo muy completo con su microcontrolador el Atmega 328p es el que nos ayuda en el control de todo el sistema electrónico se carga el código programado para realizar el control, una de las principales características del Arduino nano es que es de tamaño compacto lo cual lo hace adecuado para realizar proyectos en espacios reducidos.

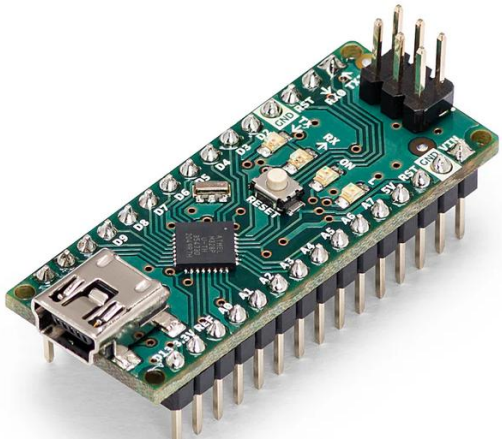


Figura 8. Arduino Nano [25].

Modulo bluetooth HC-06

El módulo HC-06 trabaja con la tecnología Bluetooth SPP (protocolo de puerto serie), está tecnología está esbozada para realizar conexiones inalámbricas mediante el puerto serial del dispositivo al cual lo enlacemos, de esta forma se realizará la conexión mediante bluetooth con el dispositivo celular en el cual se visualizará los datos que estemos obteniendo del espectrómetro.

Figura 9. Modulo HC-06 [26].

La tecnología bluetooth esta de forma predeterminada en la mayoría de los dispositivos lo cual nos brinda una ventaja al momento de utilizar este componente, también es independiente del sistema operativo gracias a esta compatibilidad lo hace completo para realizar proyectos en diferentes plataformas.

Servomotor

Un servomotor es un pequeño motor este componente puede girar de 0 a 180 grados manteniendo un control preciso de posición angular, su voltaje de operación es de 5v lo cual lo hace que sea muy completo para realizar proyectos en diferentes áreas.

Figura 10. Servo moto [27].

Pantalla Lcd 16x2 I2C

Las LCD de 16x2 tienen dos controladores que se conectan a un microcontrolador por medio de I2C. En la comunicación I2C existe la posibilidad de compartir conexiones entre distintos dispositivos, en este caso se usan el SDA y SCL, que permiten el uso de otros pines como 5V y tierras. Esto facilita el cableado y permite recibir información de cualquier microcontrolador, además la pantalla puede mostrar un total de 32 caracteres alfanuméricos que incluyen espacios, y puede dividir estos caracteres en dos filas de 16 [28], En nuestro proyecto ayuda en el control de encendido del sistema.

Figura 11. Pantalla Lcd i2c [29].

Fototransistor LEN 3DU33

Los fototransistores y fotodiodos son transductores electroópticos relacionados que en funciones como detección de posición/presencia, medición de luz, y detección de pulso óptico a alta velocidad es capaz de convertir la luz que es incidente en corriente eléctrica [30].

Figura 12. Fototransistor 3DU33 [30].

El fotodetector se utiliza para detección de luz infrarroja cercana, acoplamiento óptico, codificadores, decodificadores, identificación de características, control de procesos, recepción láser, etc., tiene las características de alta sensibilidad y gran fotocorriente, sus dimensiones se presentan en la figura siguiente.

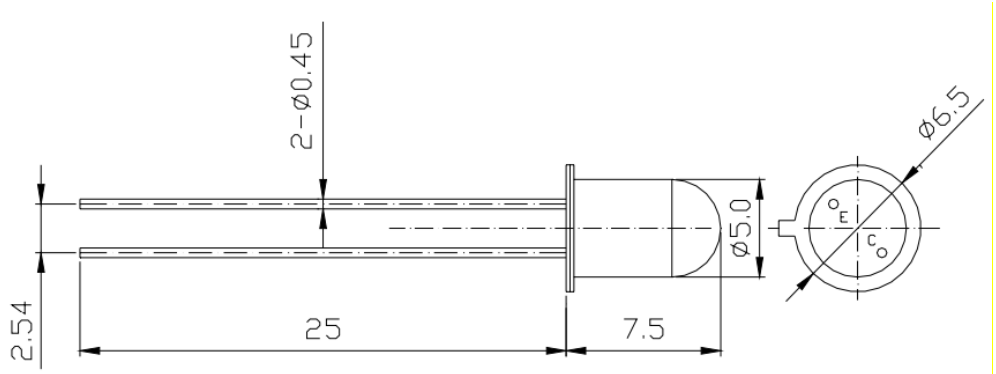


Figura 13. Dimensiones del fotodiodo 3DU33 [31].

Al fototransistor lo configuramos para que trabaje en polarización inversa de esta manera se logra obtener lecturas más rápidas y precisas. Tenemos la configuración de la siguiente manera en uno de los pines va conectado VCC, y el otro tenemos conectado una resistencia de 10 Kohm a GND y a su vez de la conexión entre la resistencia y el pin negativo sacamos la señal del fototransistor, es muy importante tomar en cuenta que valor de resistencia vamos a colocar al fototransistor.

Se realizo varias pruebas con resistencias de distinto valor para comprobar el comportamiento del fototransistor, entonces la resistencia de carga afecta la corriente generada por el fototransistor y por ende afecta el voltaje de salida.
Se empezó conectando una resistencia de 100 Ohm la resistencia es pequeña entonces la corriente que pasa por el fototransistor es alta y el voltaje también será alto, esto en condiciones de obscuridad la luz apenas se notará, y los valores que nos entregue el fototransistor no variaran mucho.

Al conectar una resistencia de 10 Kohm la resistencia es mayor por ende la corriente que pasa por el fototransistor será menor, con esto la variación de luz en condiciones de obscuridad será mayor y se nota en los valores que nos entrega el fototransistor.
Entonces se deduce que con resistencia de valor alto tendremos mayor rango de lecturas más sensibles en condiciones de poca luz. Para seleccionar la resistencia correcta utilizamos la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{R = \frac{V}{I}} \qquad \textbf{(2)}$$

Entonces:

$$R = \frac{5V}{0.5\ mA}$$

$$R = \ 10000\ \Omega = 10K\Omega$$

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

Este capítulo detalla los aspectos metodológicos que guiaron la ejecución de la investigación, abordando el tipo de investigación, método de investigación, procedimiento y análisis, población de estudio y tamaño de la muestra, así como el método de análisis y procesamiento de datos.

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación para el trabajo de titulación "Diseño de un sistema óptico portátil para caracterización de muestras de agua de fuente remota en la Parroquia Cubijies" es una investigación de tipo descriptiva y exploratoria, esto debido a que se realiza una revisión de la literatura sobre métodos de caracterización de muestras de agua, especialmente aquellos que utilizan sistemas ópticos portátiles.

3.2. Método de investigación

3.2.1. Investigación descriptiva

El método descriptivo está más centrado en la parte de recopilar, organizar, resumir y mostrar los datos de manera que se pueda proporcionar una descripción completa y precisa de un fenómeno o situación. Mediante este método se podrá seleccionar parámetros claves para el análisis de agua de fuentes remotas.
A partir de una investigación descriptiva se realizará visitas de campo a las fuentes remotas para observar directamente los métodos actuales de caracterización utilizados por las comunidades locales, con esto podremos recopilar datos in situ sobre la calidad del agua.

3.2.2. Investigación experimental

La investigación experimental en el diseño de sistemas ópticos portátiles para la caracterización de muestras de agua de fuentes remotas asocia la investigación con la recolección de muestra, y con la modificación de ciertas variables independientes para medir sus efectos en el entorno controlado, así como en las variables dependientes. Esta forma permite la comprobación absoluta conjunta y el ineludible de la efectividad del sistema durante su operación en un sistema controlado, aunque los sistemas de referencia para el modelo de comportamiento real deben ser verificados antes de poner en práctica.

3.3. Procedimiento y análisis

En la figura 14 se muestra el diagrama del proceso que se seguirá para el desarrollo del proyecto de investigación.

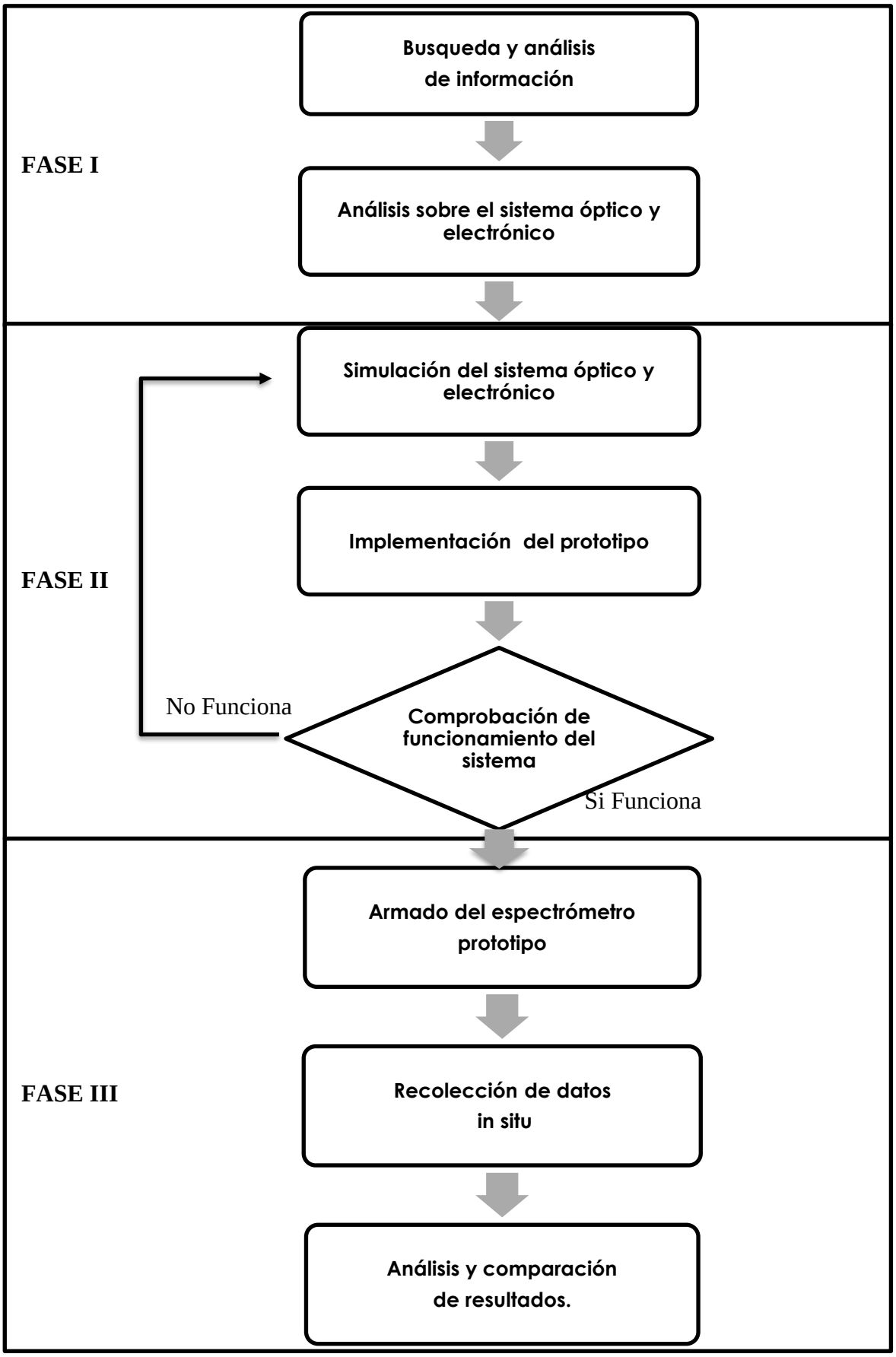


Figura 14. Diagrama de flujo.

De acuerdo con el diagrama de bloques se trabajará en el proyecto por faces mismas que se detallan a continuación.

3.3.1. Fase I Búsqueda y análisis de información.

Se realizará la búsqueda y análisis de la información sobre todo lo concerniente a los sistemas ópticos, componentes principales, la red de difracción, entre otros datos que serán de gran interés para el desarrollo de la misma manera se analiza información de cada uno de los componentes electrónicos que se utilizarán en la implementación del sistema.

3.3.2. Fase II Simulación del sistema óptico y electrónico.

Simulación del sistema óptico y electrónico

Una vez que se tiene la información correspondiente a la investigación se realizará la simulación del sistema óptico y el sistema electrónico, para realizar las respectivas simulaciones se realiza la busque de cada uno de los componentes con sus características mismas que nos servirán al momento de realizar la comprar para el armado del prototipo.

Para el sistema óptico se realiza la búsqueda de los lentes en páginas en la web como "edmundoptics.com" y en "thorlabs.com" se realiza la simulación con diferentes lentes de diferentes medidas y características hasta encontrar los componentes adecuados. Se encontró lentes adecuados en la página de edmundoptic con las siguientes características.

Lentes de 3.0mm Dia. x 9.0mm FL, MgF_2 Coated, Plano-Convex Lens

Tabla 2. Tabla de características lentes [32].

Características	Descripción
Diámetro (mm)	3.00 +0.0/-0.025
Efectividad Focal EFL (mm)	9.00 @ 587.6nm
Distancia focal trasera BFL (mm)	8.01
Revestimiento	MgF_2 (400-700nm)
Sustrato	N-BK7
Calidad de la superficie	20-10
Potencia (P-V) @ 632,8nm	1.5λ
Tolerancia de la distancia focal (%)	±1
Tipo	Plano-Convex Lens
Longitud de onda (nm)	400 – 700 nm
Espesor central CT (mm)	1.50 ±0.05
Radio R_1 (mm)	4.65

Para el diseño del sistema óptico se evaluaron diferentes herramientas de software que facilitaran el proceso, al final la decisión se centró entre el programa ANSYS (un conjunto de herramientas de simulación multipropósito) y FreeCAD (un software de diseño asistidos por computadora de código abierto), se seleccionó el programa FreeCAD en su versión 0.21.2, debido a sus características como su versatilidad, capacidad de simulación óptica y facilidad de uso que optimizó el proceso de diseño.

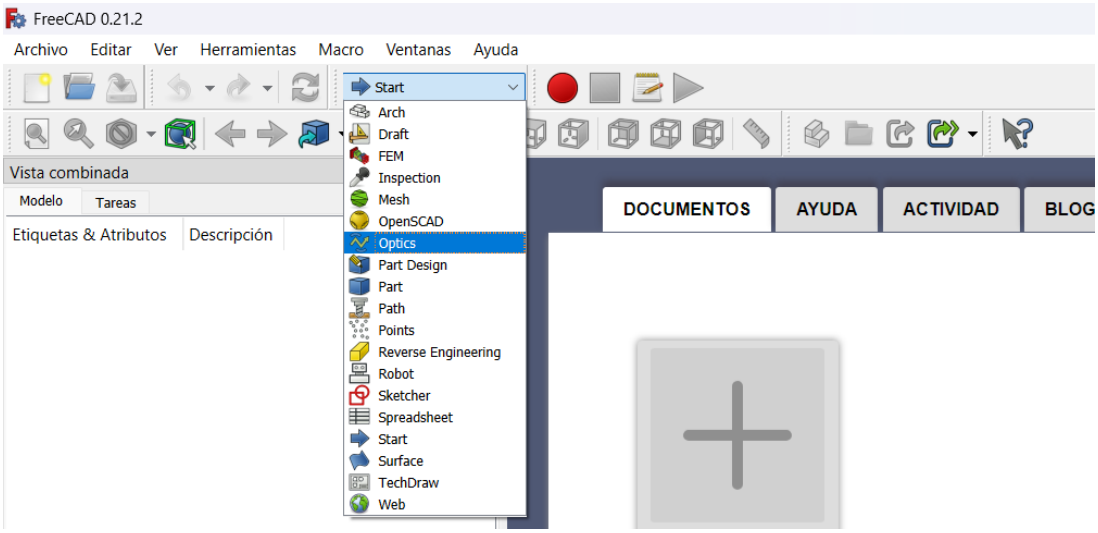


Figura 15. Interfaz del módulo óptica en FreeCAD.

Una vez creada la plantilla de trabajo, se habitaron las opciones necesarias para el diseño del sistema óptico, incluyendo opciones para lentes, espejos, lentes de difracción, lentes de absorción y redes de absorción, entre otros elementos básicos para la configuración del sistema propuesto.

Figura 16. Panel de opciones ópticas disponibles en FreeCAD para el diseño de sistemas ópticos.

Una funcionalidad con la que cuenta FreeCAD que resulto útil para el presente proyecto fue la capacidad de importar archivos en formato ".step", estos archivos, disponibles en repositorios especializados como Edmund Optics, contienen las especificaciones precisas de las lentes utilizadas en el proyecto (Ver Anexos 1 y 2), permitiendo simular con exactitud las características físicas reales de los componentes ópticos.

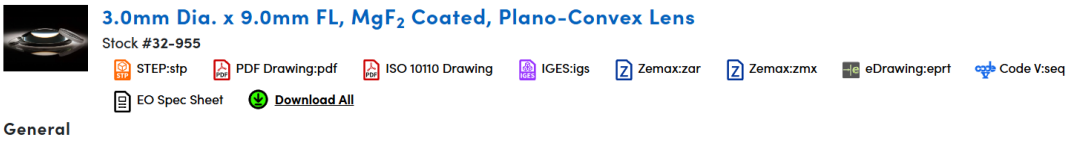


Figura 17. Proceso de importación de archivo. step en FreeCAD para la incorporación de especificaciones reales de lentes.

En la configuración de la simulación, se implementó un diodo emisor de luz (LED) de espectro blanco como fuente de iluminación, la trayectorias óptica diseñada incluye una primera lente convexa que enfoca el haz luminoso hacia la red de difracción, la cual disperso la luz hacia un segundo lente convexo idéntico, este último redirigió la radiación hacia un fotodetector modelo 3DU33, es importante destacar que el diseño contemplaba la ubicación de la cubeta de análisis entre la segunda lente y el fotodetector, permitiendo así la interacción de la luz con la muestra de agua a caracterizar.

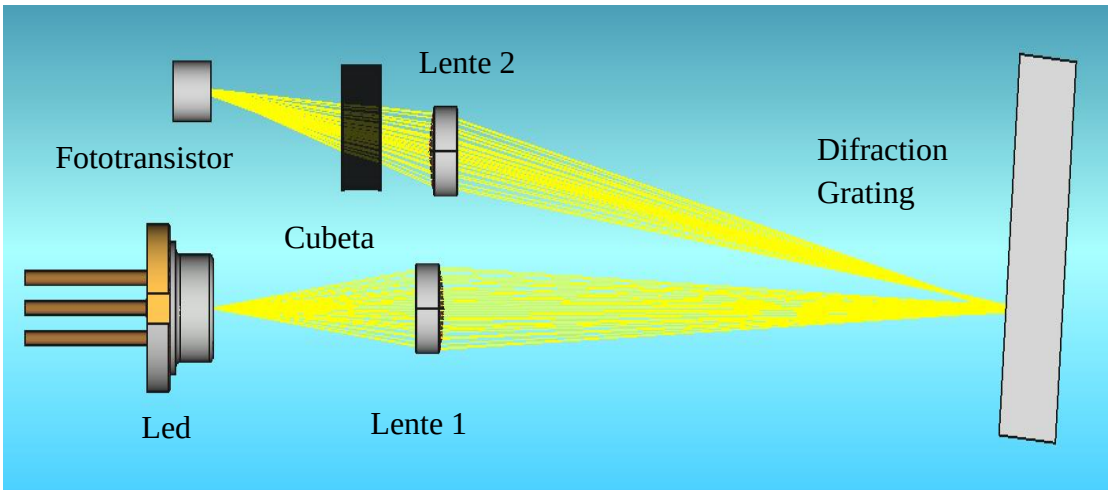


Figura 18. Simulación del sistema óptico en FreeCAD mostrando la disposición del LED; los lentes, la red de difracción y el fototransistor.

En cuanto a los componentes del sistema electrónico se presenta las tablas características de cada elemento mismas que son de vital importancia para determinar el consumo de corriente y funcionamiento de cada uno.

El arduino nano es un dispositivo microcontrolador que es el que controla todo el sistema muy completo adecuado para este proyecto debió a que se trata de un sistema muy compacto para poderlo transportar. Este componente fue seleccionado como microcontrolador principal del sistema debido a su diseño compacto, bajo consumo de energía y es ideal para proyectos portátiles, permite integrar múltiples componentes en un espacio reducido, sin comprometer la capacidad de procesamiento ni la cantidad de entradas y salidas necesarias para el control del sistema.

Tabla 3. Especificaciones Técnicas del Arduino nano [25].

Características	Descripción
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de Operación	5 V
Memoria Flash	32 KB de los cuales 2 KB utilizados por el gestor de arranque.
SRAM	2 KB
Velocidad del Reloj	16 MHz
Analógico EN Pines	8
EEPROM	1 KB
Corriente de CC por Pines de E/S	20 mA (I/O Pines)
Voltaje de Entrada	7-12V
Pines de E/S digitales	22 (6 de los cuales son PWM)
Salida PWM	6

Uno de los componentes que se utilizó en el sistema es el módulo bluetooth HC-06 mediante este dispositivo se realiza la comunicación entre el espectrómetro y un dispositivo móvil en el cual se visualiza y se almacena los datos que se obtiene del análisis de muestras liquidas.

Tabla 4. Especificaciones Técnicas Modulo HC-06 [33].

Características	Descripción
Voltaje de operación	3.3V – 5VDC
Corriente de operación	< 40mA
Chip	BC417143
Bluetooth	V2.0+EDR
Frecuencia	Banda ISM de 2,4 GHz
Sensibilidad	84dBm a 0.1%
Alcance	10 metros
Velocidad de transmisión	1200bps hasta 1.3Mbps
Baudrate por defecto	9600,8,1, n.

Para poder mover la red de difracción en un ángulo de 0 a 14 grados se utiliza el servo motor SG-90 con este dispositivo se puede controlar el ángulo, la velocidad y el tiempo de giro para que puedan pasar todos los colores primarios que nos entrega la red de difracción que es un pedazo de DVD la cual se encuentra posicionada en la parte superior del servo motor.

Tabla 5. Especificaciones técnicas servo SG90 [34].

Características	Descripción
Modulación	Análogo
Torque	4.8V: 25.0 oz-in (1.80 kg-cm)
Velocidad	4.8V: 0.10 sec/60°
Peso	0.32 oz (9.0 g)
voltaje de operación	4.8V

La pantalla LCD i2c la utilizamos para visualizar la secuencia de inicio y funcionamiento del espectrómetro. Es un componente de bajo consumo de recursos y compacto lo cual lo hace adecuado para el proyecto que es de espacio reducido.

Tabla 6. Especificaciones técnicas LCD i2C [40].

Características	Descripción
Voltaje de alimentación	5V CC
Tipo display	Alfanumérico
Tamaño zona de display	66 x 16mm
Tipo de Controlador	HD44780
Número de pines	16 [35]

El phototransistor que se utilizó en el sistema es el 3DU33 de silicio se opta por este componente por su amplio rango de espectro de luz visible y cercano al infrarrojo que va desde los 400 nm hasta los 1100 nm esto lo hace que sea muy sensible a la luz emitida o reflejada desde la fuente. Tiene una alta fotocorriente entre 0.5 y 1 mA lo que permite que detecte con mayor precisión la variación de la intensidad de luz que le llegue.

Tabla 7. Especificaciones Técnicas [36].

Variable	Descripción
Mayor voltaje de funcionamiento	50 VDC
Material	Silicio
Corriente Oscura	≤ 0,15 µA
Corriente fotoeléctrica	≥ 2 mA
Tiempo de respuesta	≤ 10 µs
Alcance del espectro	400-1.100 nm
Pico de longitud de onda	880 nm
Máximo consumo de energía	100 mW

Para el desarrollo del subsistema electrónico, se utilizó el software Proteus debido a su amplia biblioteca de componentes y capacidad de simulación, el proceso de diseño se inició con la elaboración de un inventario de todos los componentes necesarios, incluyendo resistencias, conectores, capacitores, fuente de alimentación, sensores y microcontroladores, el enfoque metódico permitió una planificación adecuada antes de proceder con la simulación del circuito.

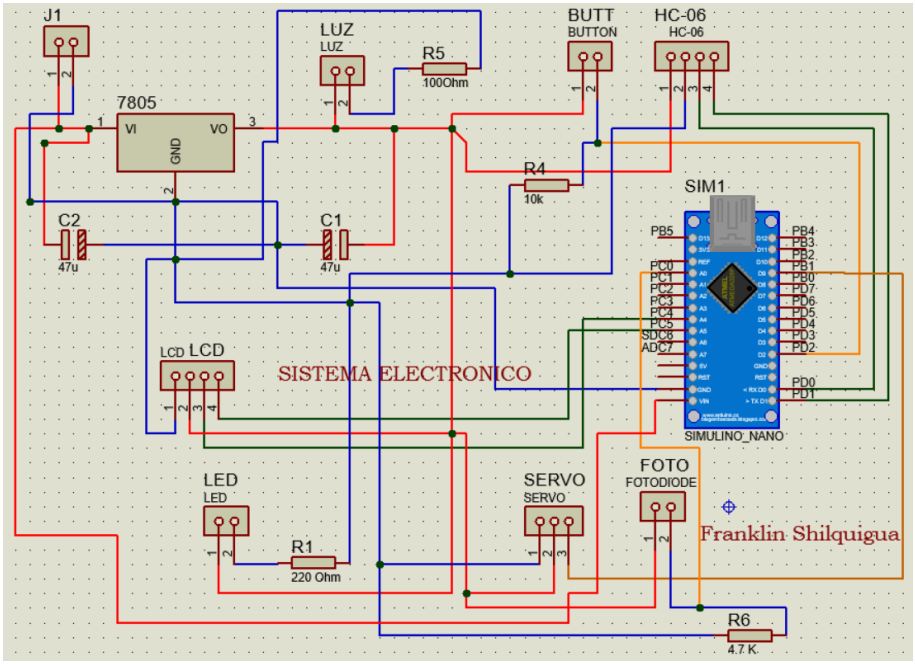


Figura 19. Diseño esquemático del sistema en Proteus.

Tras la finalización y verificación del esquema, se realizó el diseño de la placa de circuito impreso (PCB). Junto con los componentes del esquema, organicé las piezas de manera que se minimizara su interferencia electromagnética y se optimizara el espacio. Las rutas de conexión se dibujaron en la capa superior. El ancho de las rutas, considerando el flujo de corriente, era adecuado, así como los espacios entre las rutas.

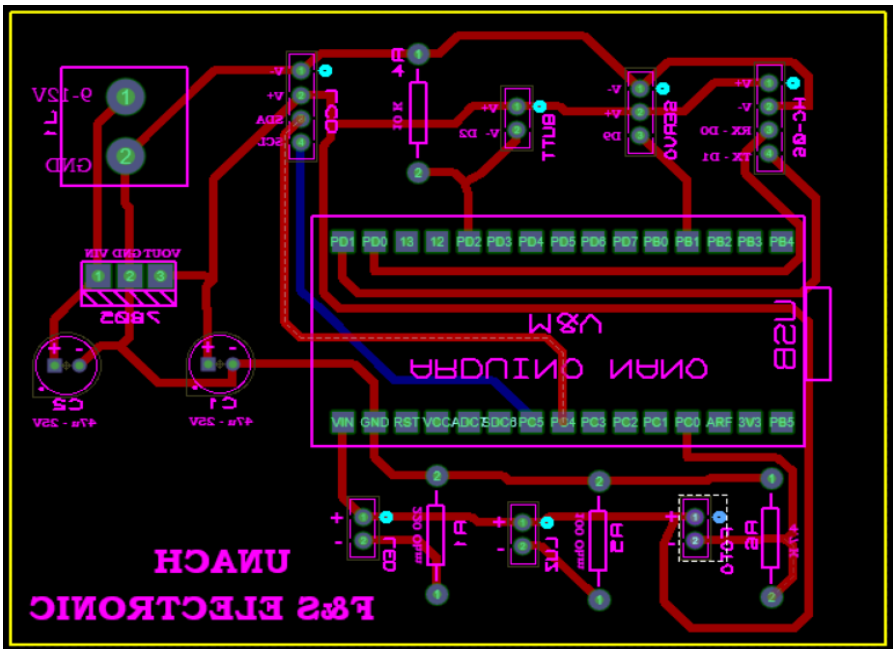


Figura 20. Diseño del PCB en Proteus mostrando la distribución de componentes y trazado de pistas.

Dentro del periodo de diseño, se aplicado la visualización 3D que permite el programa para la consideración de ciertos aspectos de la física del circuito, por ejemplo, zonas de posible interferencia mecánica y la altura de cada componente, lo que permitió evitar posibles errores previos a la fabricación.

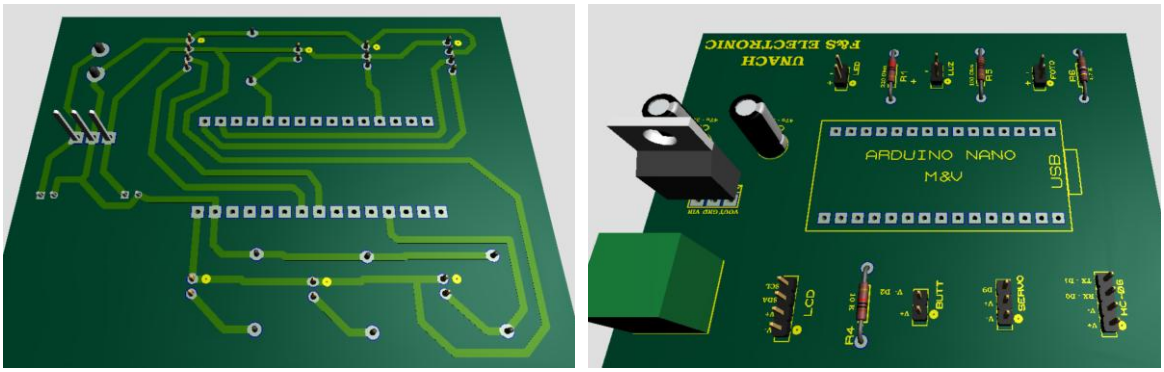


Figura 21. Visualización tridimensional del circuito electrónico con componentes en Proteus.

Implementación del prototipo

Para la fabricación de la PCB, se implementó utilizando el método de transferencia térmica. Se logró un diseño de circuito preciso ya que el diseño se imprimió en papel fotográfico utilizando una impresora láser. El diseño del circuito se transfirió a la placa baquelita recubierta de cobre aplicando uniformemente calor con un hierro tradicional.

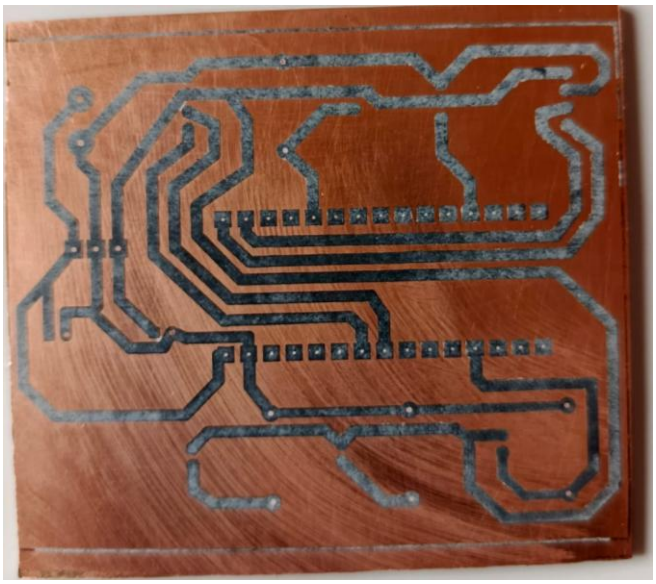


Figura 22. Impresión láser del diseño del circuito en papel fotográfico para transferencia térmica.

Posterior, se sometió la baquelita al proceso de corrosión química mediante una solución de percloruro férrico, con el objetivo de eliminar el cobre excedente y dejar únicamente y dejar únicamente las pistas conductoras definidas en el diseño, el procedimiento se realizó con las debidas precauciones de seguridad y control del tiempo de exposición para evitar el deterioro de las pistas.

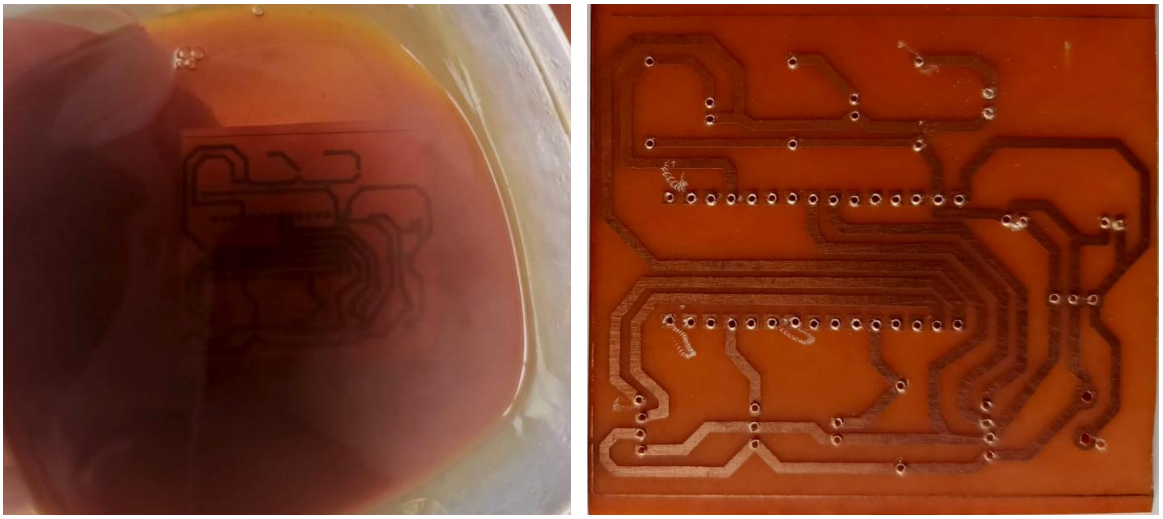


Figura 23. Proceso de corrosión química de la PCB y resultado final tras la limpieza.

Luego de completar el proceso de corrosión y limpieza de la placa, el siguiente paso consistió en perforar agujeros para los distintos elementos. Para esto, se emplearon brocas de todo tipo que contaban con el diámetro correcto para cada tipo de terminal. En las etapas finales, los componentes fueron soldados y se comprobaron las conexiones eléctricas a ver si el circuito era operable, lo cual comprobó que no había sido dañado al manipularse en las pruebas funcionales.

El sistema electrónico diseñado incluye amplificadores de señal, conversores de analógicos a digitales y elementos de procesamiento, de tal manera que se pueden procesar las señales ópticas que resultan de la interacción de la luz con las muestras de agua. La arquitectura electrónica fue diseñada para el bajo consumo energético, aumentando la portabilidad del sistema.

Comprobación de funcionamiento del sistema.

Se realizó el ensamblaje físico de los componentes ópticos y electrónicos en un prototipo inicial para confirmar su funcionamiento y hacer los ajustes necesarios; durante esta fase se tuvo un gran cuidado en el manejo de los elementos ópticos, especialmente las lentes, de acuerdo con protocolos estrictos, debido a su vulnerabilidad a rayones y daños superficiales, cualquier imperfección en estas piezas impediría la transmisión de luz atrapada y, por lo tanto, la precisión de las mediciones espectrales.

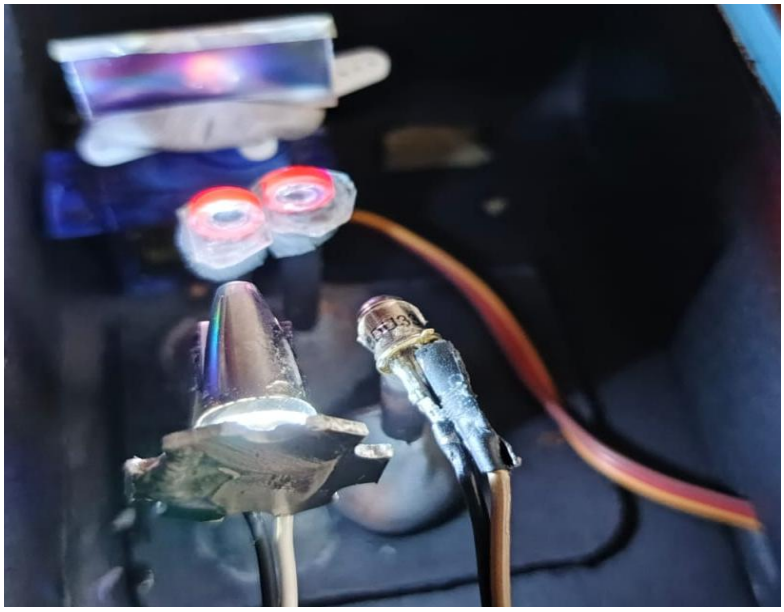


Figura 24. Configuración experimental de los componentes ópticos montados en el dispositivo de prueba inicial.

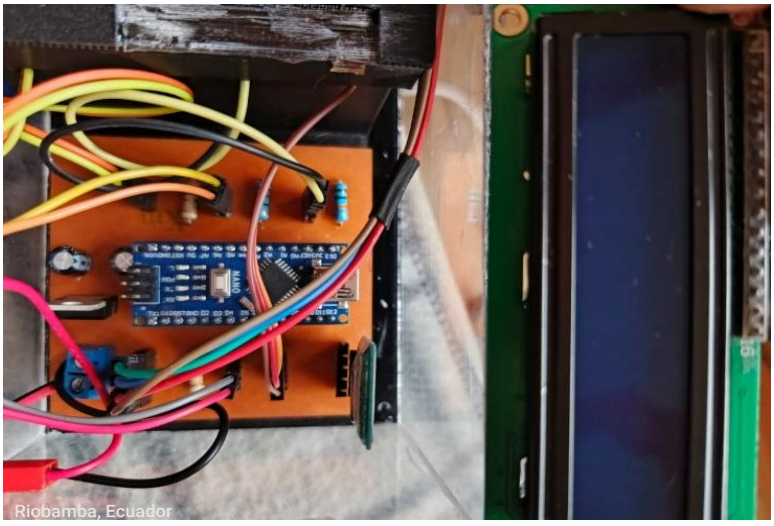


Figura 25. Sistema electrónico con cada uno de sus componentes soldados.

3.3.3. Fase III Armado del espectrómetro prototipo

Del trabajo de investigación se implementará el sistema para poder probar el funcionamiento y posterior empezar con la recolección de datos, estos datos serán comparados con otros resultados de otros equipos de similares características, con este análisis podremos saber que tan efectivo será nuestro sistema, y podremos realizar cambios, ajustar parámetros para tener resultados lo más correctos posible de acuerdo con la muestra que se tome para el análisis.

Armado del espectrómetro prototipo

Tras la verificación funcional de los sistemas electrónicos y ópticos por separado, se procedió al diseño de un encapsulado definitivo mediante tecnología de fabricación aditiva, se optó por la impresión tridimensional en material polimérico de color negro, seleccionado específicamente por sus propiedades de absorción lumínica, la característica resultó necesaria para evitar la infiltración de luz ambiental en el compartimento óptico, lo que permitió optimizar la relación señal-ruido y aumentar la exactitud de las mediciones espectrales.

Figura 26. Encapsulado mediante impresión 3D en filamento negro.

La fase final de implementación consistió en la integración de los sistemas ópticos y electrónicos en el prototipo final, esta fase requirió especial cuidado en el alineamiento de los componentes ópticos y la calibración del sistema para reproducir las mediciones. El diseño modular implementado en el diseño aquí descrito favoreció el acceso a los bloques internos en caso de daños futuros que requirieran modificaciones o cambios.

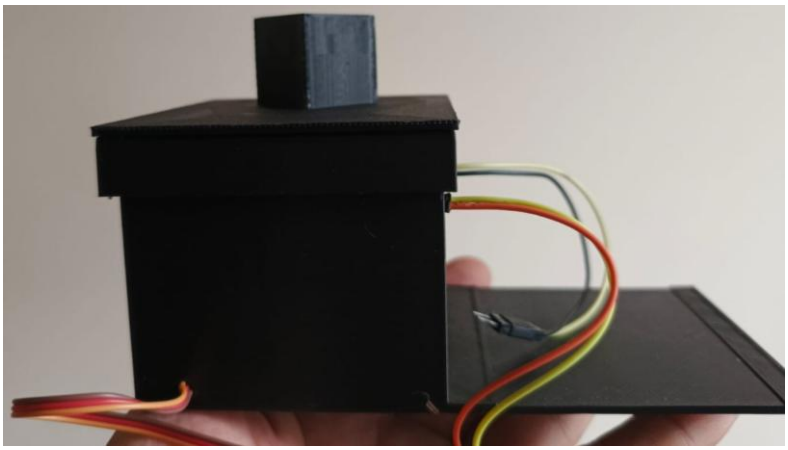


Figura 27. Sistema óptico integrado en el encapsulado de impresión 3D de color negro.

El prototipo final incorporó además del encapsulado principal para el sistema óptico un compartimento transparente para la ubicación de los componentes electrónicos esta configuración dual respondió a la necesidad de aislar cromáticamente el sistema óptico mientras se mantenía la accesibilidad visual a los indicadores y elementos de control electrónicos.

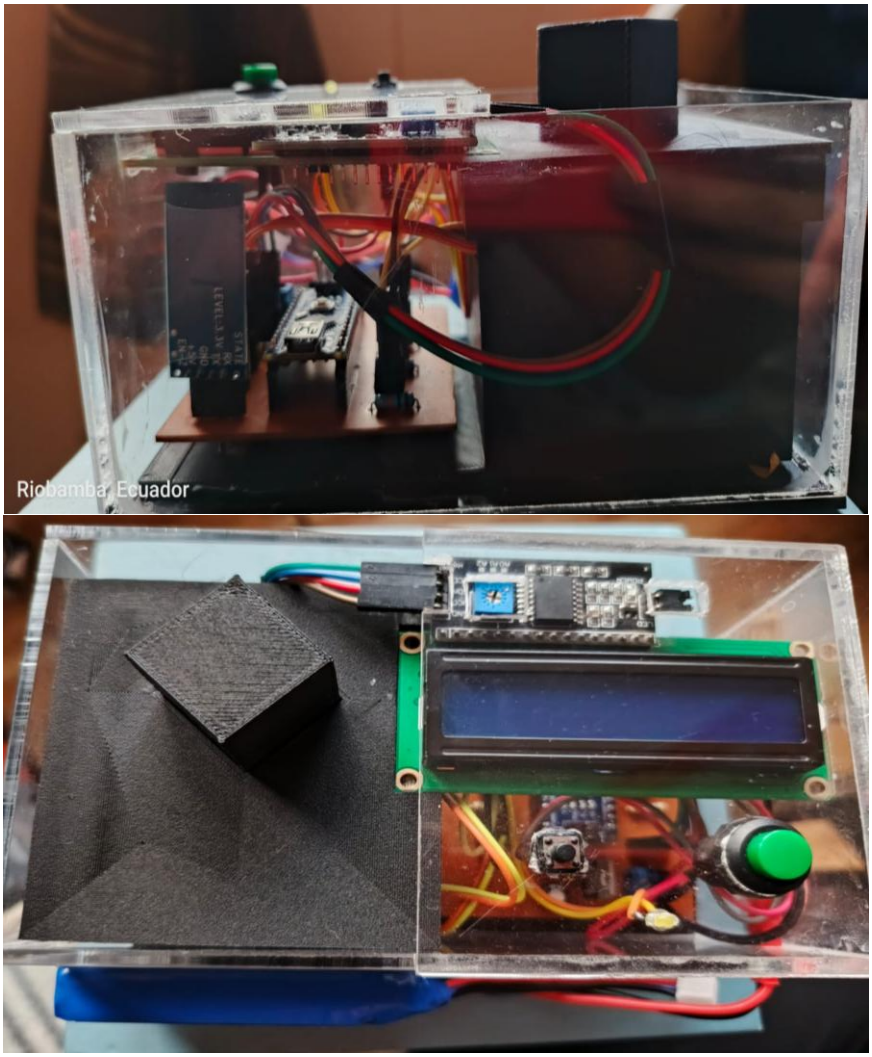


Figura 28. Vistas múltiples del prototipo completo mostrando la integración de los componentes electrónicos y ópticos en sus respectivos encapsulados.

La disposición interna de los componentes se realizó considerando la minimización de las distancias de interconexión entre los elementos ópticos y electrónicos, reduciendo así potenciales pérdidas de señal y facilitando la disipación térmica adecuada de los componentes activos, el soporte mecánico para los elementos ópticos se diseñó con tolerancias precisas para mantener la alineación del eje óptico durante la operación del dispositivo y su transporte.

Recolección de datos in situ

La recolección de muestras para el análisis se las realizo en 4 puntos estratégicos en la provincia. El primero punto de muestreo se ubicó el rio chambo sector puente de Guasazo. La segunda muestra se tomó de la vertiente de agua localizada en la parroquia cubijies. La tercera toma de muestras se la realizo en el rio Chibunga en el parque ecológico y finalmente la cuarta toma de muestras para el análisis se realizó en el rio guano.
Cada uno de los puntos fue georreferenciado se detalla en la siguiente tabla y los resultados de la toma de muestras y análisis in situ se presentan en los anexos 4 y 5.

Tabla 8. Tabla de georreferencia de los puntos análisis.

Punto de muestreo	Latitud	Longitud	Descripción
Punto 1	1°38'21"S	78°34'01"W	Rio Chambo sector puente de Guasazo.
Punto 2	1°38'20"S	78°35'40"W	Vertiente de agua parroquia Cubijies.
Punto 3	1°41'18"S	78°39'04"W	Rio Chibunga parque ecológico.
Punto 4	1°36'32"S	78°38'41"W	Rio Guano sector parque de las fuentes.

3.4. Técnicas de recolección de datos

3.4.1. Fuentes de información

Para el desarrollo del trabajo de titulación se realiza la búsqueda de información en las plataformas digitales como:

- Dspace repositorio de la universidad nacional de Chimborazo.
- IEEE Xplore.
- Google Academic.

3.4.2. Instrumento para la recolección de datos

El instrumento de investigación que se utiliza para la recolección de datos es el dispositivo óptico implementado se almacenaran los datos en una computadora para su posterior análisis, así también los repositorios de universidades, informes científicos, investigaciones, son de gran importancia para la verificación y comparación de datos.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población estará constituida por los datos generados en las variables que serán analizadas en la investigación, efectividad de medida del sistema, turbidez, potencia de luz.

3.5.2. Muestra

No es requerido calcular una muestra se ha seleccionado toda una población.

3.6. Operación de variables

3.6.1. Variable dependiente

Tabla 9. Variable independiente.

Variable	**Descripción**	**Indicadores**	**Métodos y herramientas**
Efectividad de medida del sistema	Las redes de difracción.	Error de medida	Sistema óptico.

3.6.2. Variable independiente

Tabla 10. Variable dependiente.

Variable	Descripción	Indicadores	Métodos y herramientas
Turbidez	Cantidad de partículas del suelo disueltos en el agua.	Densidad g/ml	Sistema óptico portátil y el sistema comercial.
Potencia de luz	Cantidad de energía luminosa emitida por una fuente de luz en una unidad de tiempo.	Potencia en Watts.	Sistema óptico portátil y el sistema comercial.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación del funcionamiento del prototipo comparando los resultados obtenidos con otros dispositivos comerciales

Para realizar la evaluación del funcionamiento del prototipo se tomaron muestras en cuatro emplazamientos: el rio Chambo, el rio Guano, el rio Chibunga y en una vertiente de agua, el equipo comercial es el espectrofotómetro DR-2010, cuyo sistema óptico se presenta en la figura 29, donde a luz procedente de una bombilla de tungsteno de larga duración se refleja en un exclusivo espejo parabólico y se dispersa con un doble paso a través del prisma de alta dispersión, la longitud de onda seleccionada se visualiza en una rendija móvil, lo que garantiza un ancho de banda espectral más uniforme, el sistema óptico calibrado en fábrica proporciona lecturas precisas de hasta 2 unidades de absorbancia.

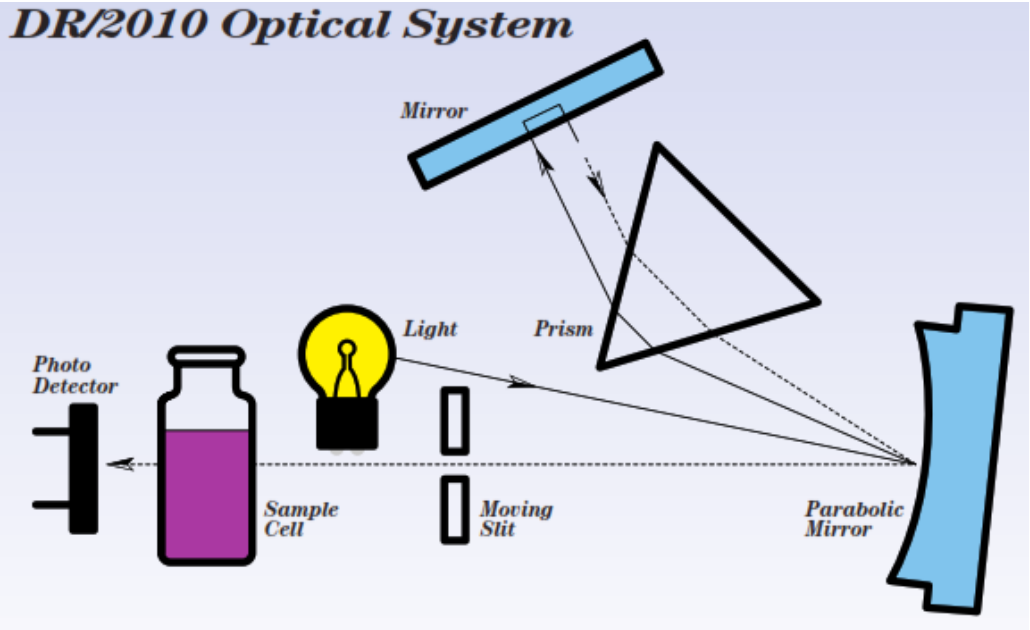


Figura 29. Sistema óptico del espectrofotómetro DR-2010 [33].

Con este equipo se pudo tomar de cada muestra 31 mediciones de su absorbancia, en el rango de longitud de onda que va de 400 a 700 nm, alternado valores que van de 10 en 10, (400, 410, 420, y así sucesivamente hasta llegar al 700); en cambio con el prototipo se obtuvieron 648 lecturas de la transmitancia en un rango de trabajo que va desde los 400 nm a 1100 nm de longitud de onda.

Para poder realizar la comparación se estableció primero que, en dispositivo creado, el cambio entre las longitudes de ondas es constante (incremento uniforme) comenzando por 400 nm y terminando en 1100 nm, pudiéndose calcular el tamaño de paso entre cada lectura:

$$Tamaño\ de\ paso = \frac{(Valor\ maximo - Valor\ minimo)}{(Número\ de\ lecturas - 1)} = \frac{(1100 - 400)}{(648 - 1)}$$
$$= \frac{700}{647} \approx 1{,}082$$

El denominador es 647 porque hay 648 puntos, lo que implica 647 intervalos entre ellos, entonces para cualquier lectura el valor de la longitud de onda es:

$$Longitud\ de\ onda = 400 + (numero\ de\ lectura - 1) * tamaño\ de\ paso$$

Con ello primera lectura:

$$Longitud\ de\ onda = 400 + (1 - 1) * 1{,}082 = 400$$

Segunda lectura:

$$Longitud\ de\ onda = 400 + (2 - 1) * 1{,}082 = 400{,}541$$

Y así sucesivamente.

Lo segundo que se estableció, es la absorbancia por medio de la ecuación:

$$Absorbancia = \log\left(\frac{Valor\ Agua}{Valor\ muestra}\right)$$

De esta forma se obtuvieron los 648 valores de absorbancia para las cuatro muestras estudiadas.

Finalmente, se procedió a ubicar los valores de absorbancia correspondientes a las longitudes de ondas registradas en el aparato comercial para realizar la comparación, en las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos en ambos equipos para los tres ríos y la vertiente de agua.

4.1.1. Resultados de muestra Río Chambo

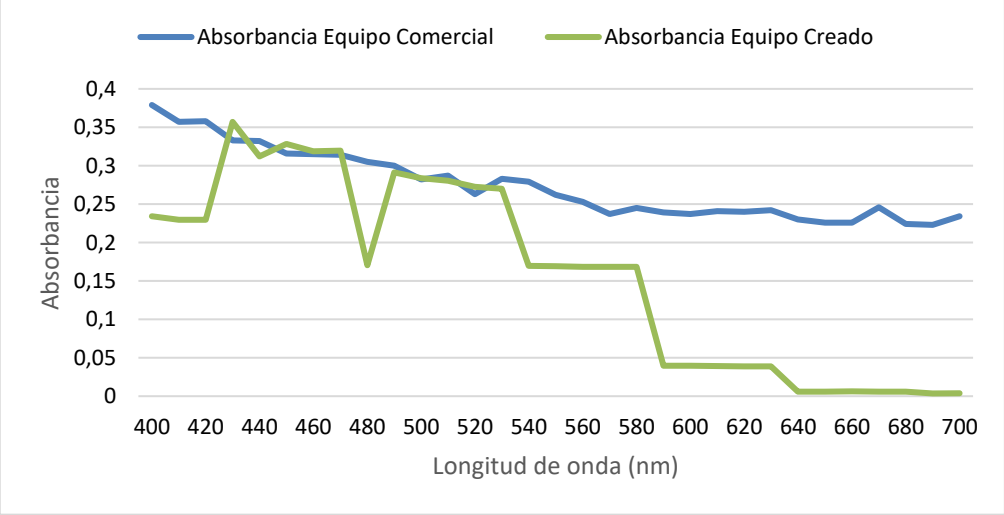


Figura 30. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Chambo.

A partir del análisis de los datos en la FIGURA 30 para la muestra de agua del río Chambo, se puede observar el patrón de comportamiento a partir de la comparación entre el espectrofotómetro comercial DR-2010 y el equipo prototipo. En el rango de longitudes de onda más bajas (400 – 420 nm) la unidad comercial registró valores de absorbancia más altos que la unidad prototipo (alrededor de 0.36 a 0.38) mientras que el prototipo registró 0.23. Esto es una diferencia aproximada de 0.13 a 0.15 unidades de absorbancia. A 430 nm ambos instrumentos mostraron valores de absorbancia más altos; el prototipo midió 0.36 y 0.333 en el dispositivo comercial, siendo este el único punto donde el prototipo supera la lectura del dispositivo comercial.

Dentro del rango de longitud de onda media (440 - 470 nm), ambos instrumentos muestran tendencias similares. La unidad comercial, sin embargo, fue de manera estricta más baja (0.314 - 0.332) para longitudes de onda más cortas, mientras que el prototipo era moderadamente más alto (0.31 - 0.33) en este rango en relación con su unidad.
Hubo una divergencia más pronunciada a 480 nm donde la absorbancia del prototipo colapsó en 0.17 mientras que la absorbancia del dispositivo prototipo continuaba descendiendo 0.305. El prototipo subió a 0.29 a 490, casi igualando al dispositivo comercial de 0.30, después de lo cual ambos instrumentos midieron valores notablemente iguales entre 500 a 530 nm.

Entre 540 y 580 nm, el prototipo mantuvo lecturas constantes de 0.17, mientras que el equipo comercial mostró mayor variabilidad, con valores que disminuyeron de 0.279 a 0.245, la divergencia más significativa se produjo en longitudes de onda más largas (590 - 700 nm), donde el prototipo mostró valores de absorbancia muy bajos (0.04 entre 590 y 630 nm, 0.01 entre 640 y 680 nm y 0 entre 690 y 700 nm), por el contrario, el equipo comercial mantuvo lecturas de absorbancia relativamente constantes en torno a (0.23 – 0.24) en todo este rango.

El patrón de disminución en la respuesta de sensibilidad a longitudes de onda más largas en el dispositivo sugiere una restricción en la capacidad del dispositivo para detectar la absorbancia en la región roja y del infrarrojo cercano. La capacidad del equipo comercial para mantener lecturas consistentes a lo largo del espectro indica un rendimiento superior en la detección de los constituyentes del agua que absorben en longitudes de onda más largas. Los datos del Río Chambo también muestran que ambos instrumentos lograron su acuerdo más cercano en el rango verde (500 - 530 nm), lo que puede sugerir un rango operativo óptimo para el prototipo al analizar muestras de agua de río con condiciones similares a las del Río Chambo.

Se aplico un análisis descriptivo mediante el uso del software estadístico SPSS 26.

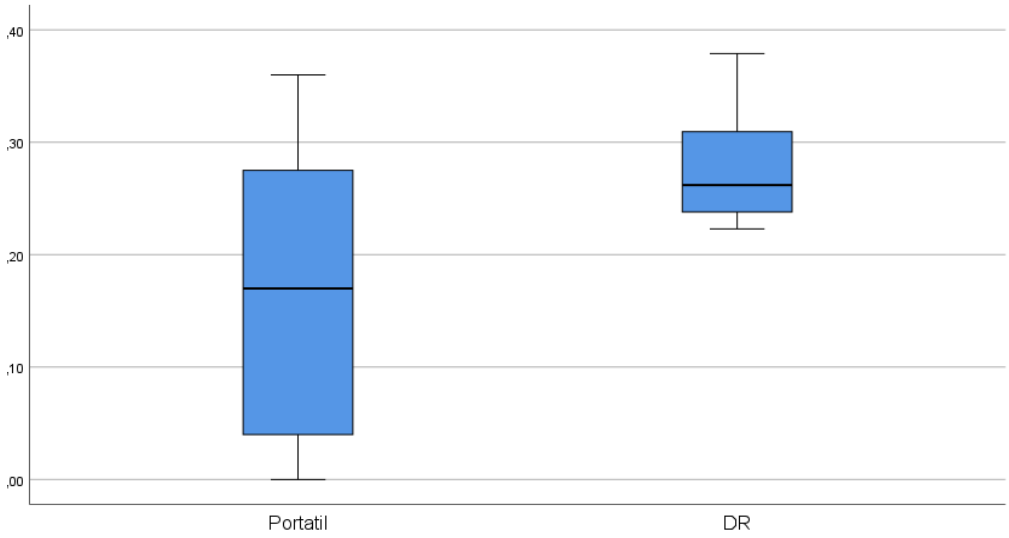


Figura 31. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Chambo.

El diagrama de caja correspondiente a las mediciones de absorbancia para la muestra del río Chambo muestra que el prototipo portátil tiene una mayor varianza en los valores registrados que la unidad comercial DR-2010. Se puede observar que el rango intercuartílico para el prototipo es mucho mayor, lo que demuestra una amplia dispersión y variabilidad en las mediciones; mientras que el DR-2010 tiene un rango intercuartílico más estrecho, lo que indica una mayor consistencia. Además, el valor de la mediana de las mediciones con el prototipo es menor que el del DR-2010, lo que significa que, en promedio, el prototipo tiene valores de absorbancia más bajos. El gráfico apoya los resultados del análisis descriptivo que indica que, aunque el prototipo es operativo, persiste la preocupación por la precisión y estabilidad de la unidad comercial.

También se realizó el análisis estadístico de Bland - Altman que permite analizar gráficamente las diferencias entre lecturas a lo largo de un rango de medición, lo que puede revelar la presencia de patrones sistemáticos de variación; este análisis se llevó a cabo con un complemento para Excel llamado Real Statistics.

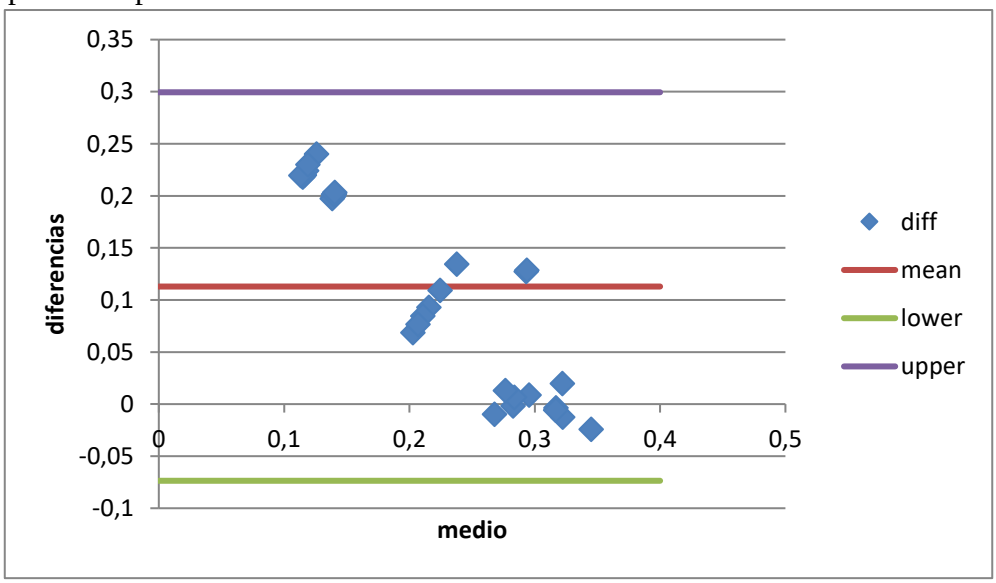


Figura 32. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Chambo.

Con respecto al río Chambo, es notable que la mayor parte de los datos para esta medición se concentran en torno al valor de diferencia media (línea anaranjada) de aproximadamente 0.11, con límites de acuerdo (líneas azul y verde) entre -0.07 y 0.3. En cuanto a la dispersión, esta sigue un patrón diferente: en donde las medias de absorbancia son más bajas (a la izquierda del gráfico), las diferencias entre instrumentos son más elevadas y positivas, indicando que el instrumento comercial sobrestima los valores en comparación al prototipo. A medida que los promedios aumentan, las diferencias empiezan a reducirse, y en algunos casos, las diferencias pueden llegar a ser neutrales o débilmente negativas.

4.1.2. Resultados de muestra Río Guano

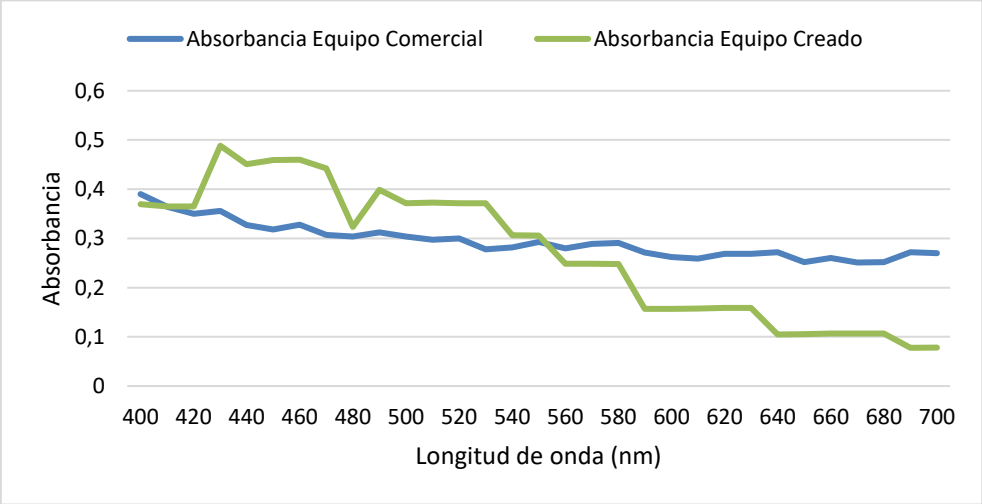


Figura 33. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Guano.

Como se presenta en la FIGURA 33 de las muestras recolectadas en el rio Guano, los dos equipos tuvieron un registro similar de absorbancia en el rango de los 400 nm a los 700 nm, pero si se presentan diferencia a destacar.

Dentro del rango de los 400 nm a los 420 nm, las mediciones son prácticamente iguales con diferencias menores a los 0,02, sin embargo, en la zona intermedia del espectro, los valores arrojados por el prototipo son muy superiores que, del equipo comercial, mostrando incrementos de 0,134 unidades a los 430 nm y casi 0,14 unidades entre los 450 nm y los 460 nm.

A longitudes de onda mayores a 480 nm, la diferencia entre ambos aparatos se vuelve más difícil de predecir, puesto que, de 480 nm a 530 nm, los valores se estabilizan de forma relativa, pero la diferencias siguen siendo muy perceptibles. El equipo comercial muestra una ligera tendencia a bajar los valores de absorbancia dentro del rango, y por otra parte, el equipo portátil presenta más variaciones en las longitudes de ondas del rango.

La diferencia más notable aparece en el rango de longitud de onda más larga (590 – 700 nm) donde el prototipo registró consistentemente valores de absorbancia más bajos que la unidad comercial por un margen considerable. A (690 - 700 nm), la diferencia es de

aproximadamente 0.19 unidades de absorbancia, el prototipo registrando 0.08 y el dispositivo comercial aproximadamente 0.27.

Todas estas discrepancias pueden deberse a diferentes factores, como las diferencias en el diseño óptico (la unidad comercial utiliza una lámpara de tungsteno con un espejo parabólico y un prisma de alta dispersión, mientras que el prototipo utiliza una rejilla de difracción), diferencias en la sensibilidad del detector de espectro, o en los estándares del método de calibración. En este caso, la resolución de muestra significativamente mayor del prototipo (648 mediciones tomadas de 400 a 1100 nm en comparación con 31 mediciones tomadas de 400 a 700 nm por la unidad comercial) puede afectar las diferencias de medición debido a la forma en que se calculan o se interpolan los valores intermedios.

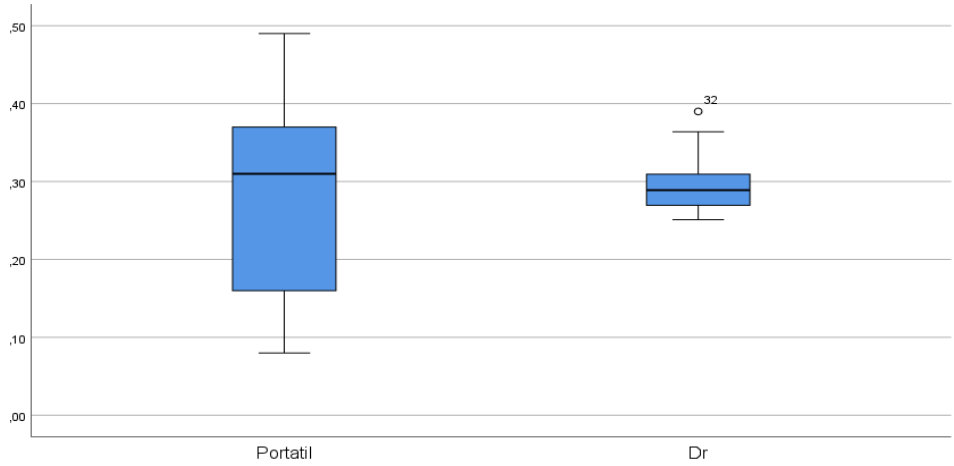


Figura 34. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Guano.

El diagrama de cajas compara los valores de absorbancia obtenidos para la muestra del río Guano entre el equipo portátil desarrollado y el equipo comercial DR-2010. Se observa que el equipo portátil presenta una mayor dispersión de los datos con un rango intercuartílico más amplio y valores que van aproximadamente de 0.09 a 0.5 lo que indica una mayor variabilidad en las mediciones. En cambio, el equipo DR-2010 muestra una distribución de datos más compacta con menor variabilidad y algunos pocos valores atípicos. Esto sugiere que, aunque ambos equipos presentan valores de absorbancia en un rango similar el equipo comercial ofrece una mayor consistencia en las mediciones mientras que el prototipo portátil muestra una mayor amplitud de los resultados.

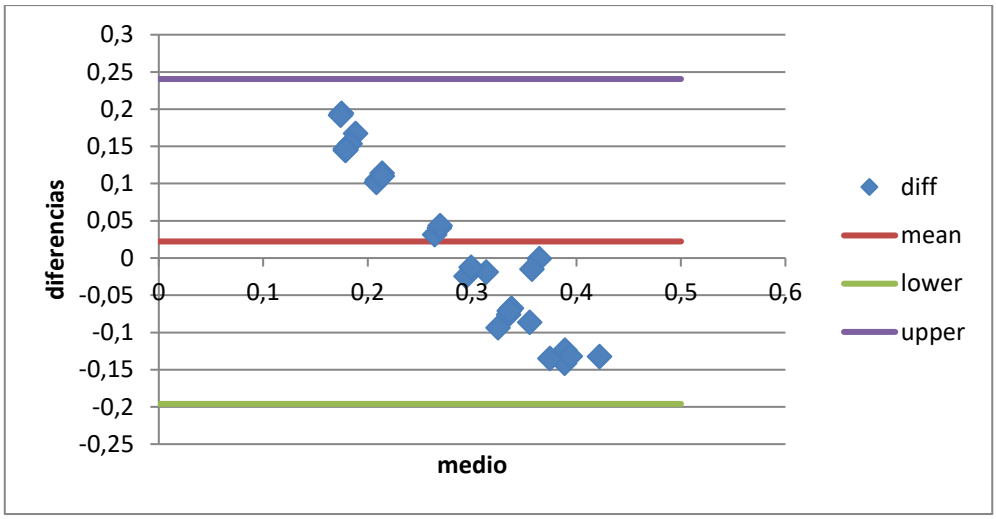


Figura 35. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Guano.

En el análisis de Río Guano realizado mediante el método de Bland-Altman, se presenta una tendencia consistente entre dispositivos, aunque con mayor dispersión. La media de la diferencia permanece cercana a 0.02, con límites de concordancia (-0.2, 0.24). Es posible observar la singular inversión desde discrepancias positivas (mayores en el comercial) para absorbancias medias bajas a diferencias negativas para absorbancias más elevadas. Esta torsión implica que, a ciertos niveles de absorbancia, el prototipo parece sobreestimar, mientras que, a otros, subestima.

4.1.3. Resultados de muestra Río Chibunga

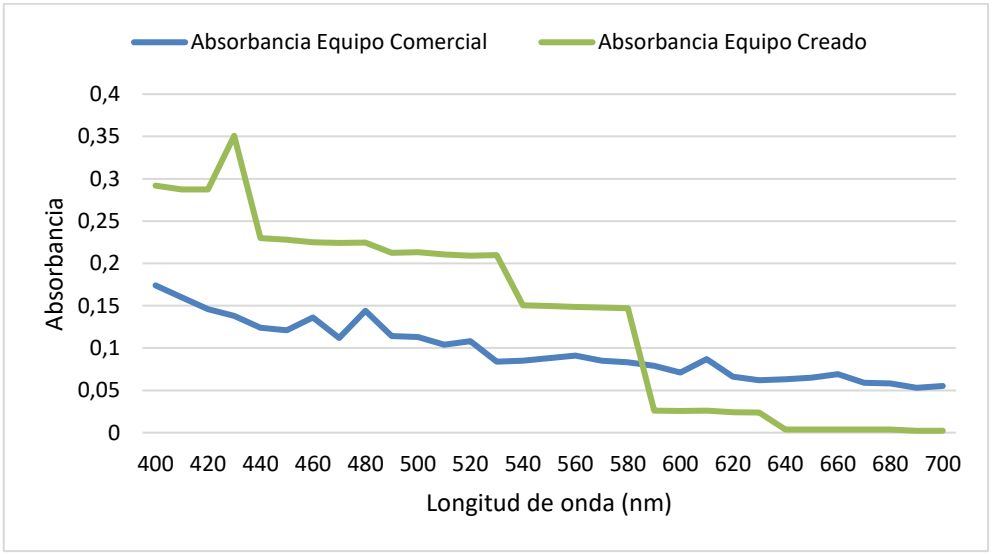


Figura 36. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra río Chibunga.

Al observar la FIGURA 36 , que incluye una comparación de las mediciones de absorbancia tomadas con el espectrofotómetro DR – 2010 y el prototipo construido para la muestra de agua tomada del río Chibunga, emergen comportamientos muy interesantes.

A menores longitudes de onda (400-420 nm), el prototipo midió de forma consistente absorbancia arriba 0.29, mientras que en el aparato comercial fluctuó de 0.174 a 0.146. Hasta incluso 430 nm, donde el prototipo alcanzó su máximo con 0.35 A, la unidad comercial midió 0.138 A, parpadeando 0.212 discrepancia. Y así sucede aún el resto con las diferencias mantenidas a 0.12 a 0.14 unidades de absorbancia.

En el rango que va de los 440 nm a los 530 nm, el prototipo casi no vario el valor de absorbancia (entre los 0,21 y 0,23), mientras que el equipo comercial presento mayor variabilidad, (con un 0,084 a 0,144). Así también, dentro del rango, los valores medidos por el prototipo superaron al equipo comercial, con diferencias que oscilaron entre las 0,09 y 0,13 unidades de absorbancia.

Un cambio notable ocurre en 540-580 nm, donde el prototipo midió valores de absorbancia uniformes de 0.15, a diferencia de la unidad comercial que registró 0.083 y 0.091 en un rango inferior, superando el rango, pero con menos diferencia que las bandas anteriores. Las regiones de mayor divergencia se encontraban en la región de longitud de onda más larga de 590-700 nm; a 590-610 nm el prototipo registró valores de absorbancia muy bajos de 0.03, posteriormente valores aún más bajos de 0.02 a 620-630 nm, y por último en 640-700 nm lecturas nulas de absorbancia. Por el contrario, el equipo comercial seguía registrando absorbancia medible dentro de este rango, de 0.053 a 0.087 en estas longitudes de onda.

Los patrones descritos anteriormente indican posibles limitaciones en la respuesta del prototipo a longitudes de onda más largas, especialmente aquellas superiores a 640 nm donde se registró una absorbancia constante de cero. A pesar de esto, la capacidad del equipo comercial para detectar diferencias sutiles en la absorbancia dentro de este rango indica una mayor sensibilidad para mediciones de baja concentración a estas longitudes de onda; cualquier diferencia obtenida puede resultar de diferentes diseños ópticos, sensibilidades del detector o técnicas de procesamiento de señales utilizadas en ambos instrumentos.

Es de hacer notar que, a diferencia de las muestras del río Guano, en el caso del río Chibunga el equipo portátil reporta valores sistemáticamente más altos que el equipo comercial. La inversión en la tendencia comparativa podría estar relacionada con componentes específicos presentes en cada río que afectan de manera diferente la respuesta óptica de ambos dispositivos revelando una sensibilidad potencialmente distinta a diferentes compuestos disueltos o en suspensión.

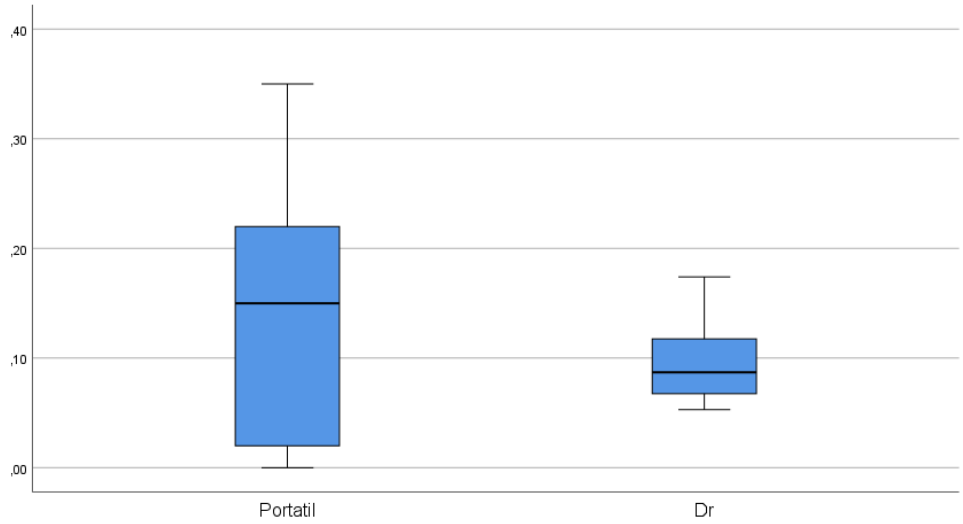


Figura 37. Diagrama de cajas para resultados de muestra río Chibunga.

En el diagrama de cajas de la figura 37 se denota que el equipo experimental presenta una dispersión mayor que el equipo DR-2010, con un rango de absorbancia que va de 0 a 0,35 para el prototipo, mientras que el equipo comercial presentó uno de 0,05 a 0,17. Así también, el valor de la mediana del prototipo experimental es mayor a la del equipo comercial, implicando que el equipo experimental sobreestima el valor de absorbancia al compararse con el valor referencial, mientras que el equipo comercial presenta valores con más consistencia y estabilidad.

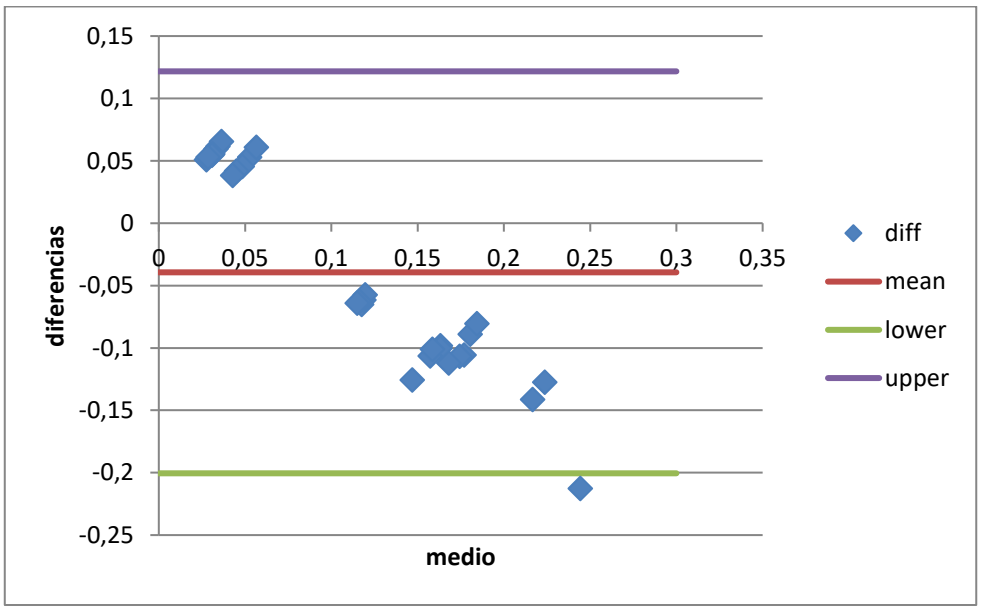


Figura 38. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra río Chibunga.

El gráfico del río Chibunga presenta un patrón más complejo con una diferencia media de aproximadamente -0.04 y límites de rango de consenso de -0.2 a 0.12. La dispersión de los puntos muestra una relación no lineal con respecto a los valores promedio de absorbancia. Algunos puntos agrupados en la parte superior izquierda indican diferencias positivas para valores bajos de absorbancia, mientras que la mayoría de los puntos ubicados en la parte

central indican diferencias negativas significativas, lo que significa que en este rango el prototipo tiende a registrar valores más altos en relación con la unidad comercial.

4.1.4. Resultados de muestra vertiente de agua

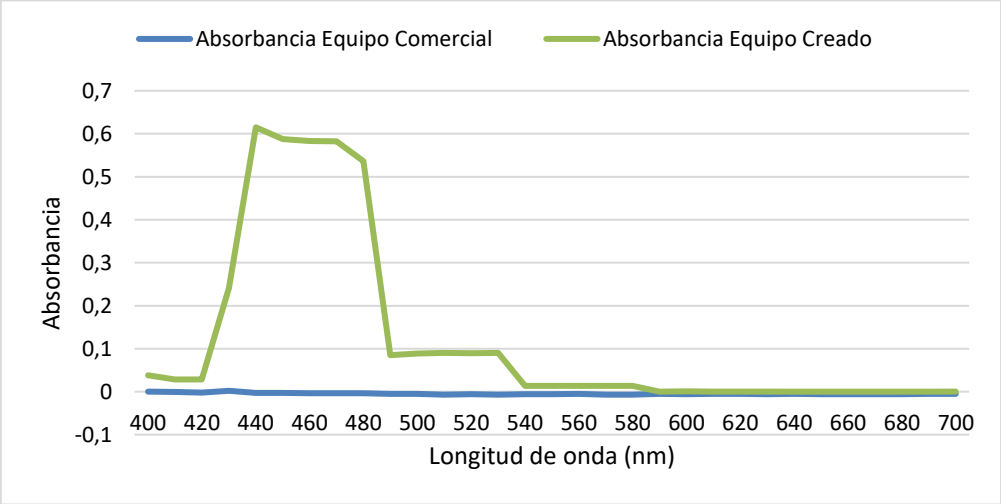


Figura 39. Comparación de valores de absorbancia entre equipos muestra vertiente de agua.

Al examinar la FIGURA 39, que compara las lecturas del espectrofotómetro DR-2010 con el prototipo, se revelan diferencias que deben considerarse en cuanto a cómo estos instrumentos describen esta fuente de agua de la fuente.

Los valores de absorbancia determinados por el espectrofotómetro fueron, comercialmente, notablemente bajos y mayormente negativos, variando de 0 a -0.007 en todo el espectro considerado (400 – 700 nm). En el mejor de los casos, tales mediciones son extrañas, y es muy probable que la muestra de agua tomada de la fuente fuera mucho más transparente que el agua utilizada en la calibración. Esto sugiere que el agua de la fuente era increíblemente pura.
En contraste, los integrantes del prototipo de equipo exhibieron un comportamiento sumamente diferente al registrar absorbancia positiva en múltiples longitudes de onda. Para longitudes de onda menores (400 – 420 nm), el prototipo registró absorbancia baja pero positiva de 0.03 – 0.04. A 430 nm se observó un incremento discontinuo en la absorbancia que alcanzó 0.24, seguido de un notable pico de 0.61 en el intervalo 440 – 480 nm y posteriormente disminuyó de forma gradual a 0.54. Esta es la divergencia más relevante entre los dos instrumentos, donde al menos 0.60 unidades de absorbancia de diferencia hay entre estos se considera sumamente relevante.

Se observó otro cambio abrupto a 490 nm, donde las lecturas de absorbancia del prototipo descendieron a 0.09 y se mantuvieron estables hasta 530 nm, entre 540 y 580 nm, los valores disminuyeron aún más hasta 0.01 y, finalmente, entre 590 y 700 nm, el prototipo registró valores de absorbancia cero, coincidiendo con las lecturas del equipo comercial (aunque este último mostró valores ligeramente negativos).

Las diferencias profundas en el rango de longitud de onda media, específicamente entre 440 - 480 nm, generan amplios cuestionamientos concernientes a la sensibilidad y calibración de ambos instrumentos. La detección por parte del prototipo de picos de absorbancia significativos en la región azul-verde del espectro donde el equipo comercial no registró ninguno, sugiere mayor sensibilidad a ciertos componentes del agua o bien, interferencias en el sistema óptico del prototipo. El escalonado de las lecturas del prototipo donde se observan mesetas distintivas en (0.59 - 0.58), 0.09, 0.01 y 0 unidades de absorbancia, sugieren también alguna estructura de control de la cuantificación en su sistema de medición o en el analógico a digital.

Los resultados obtenidos con el agua de vertiente ponen de manifiesto una limitación importante del equipo portátil desarrollado: su dificultad para discriminar con precisión muestras de muy baja absorbancia, dicha limitación podría estar relacionada con la sensibilidad del detector utilizado habilidad de la fuente de luz o incluso con el proceso de calibración del cero del instrumento.

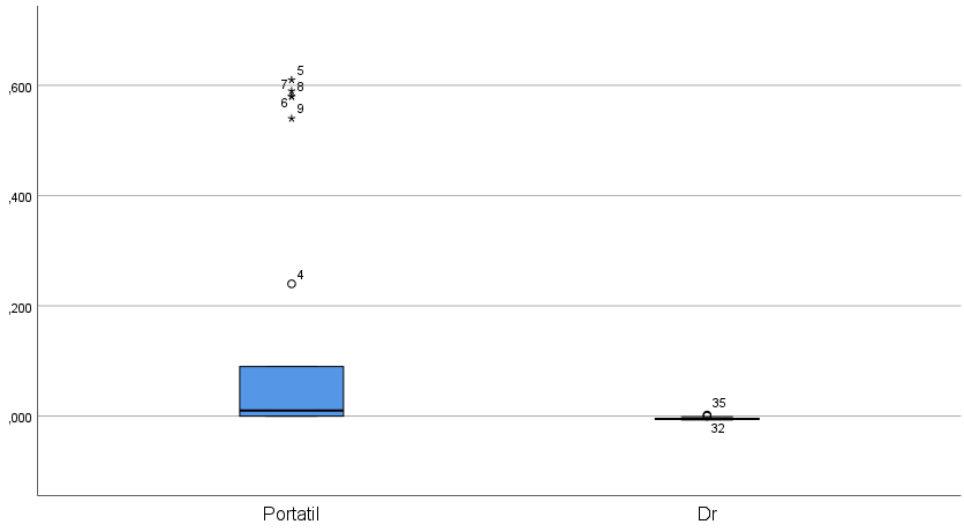


Figura 40. Diagrama de cajas para resultados de muestra vertiente de agua.

El diagrama de cajas para la vertiente de agua muestra una clara diferencia entre el equipo portátil y el equipo comercial DR-2010. El equipo portátil presenta varios valores atípicos elevados, principalmente entre 0.25 y 0.65, mientras que la mayor concentración de sus mediciones está cerca de cero, indicando alta variabilidad y presencia de posibles interferencias o errores en algunas mediciones. En cambio, el equipo DR-2010 mantiene sus valores mucho más concentrados, con una dispersión mínima y mediciones cercanas al valor cero mostrando mayor estabilidad y consistencia de los resultados, lo que evidencia que el prototipo portátil necesita mejoras para lograr una medición más precisa y controlada en muestras de vertientes de agua, también se debe considerar que la red de difracción esta creada de un DVD no podría entregar los colores nítidos en el rango de longitud de onda a diferencia de una red de difracción profesional esto podría interferir en los resultados de cada muestra que se analizó.

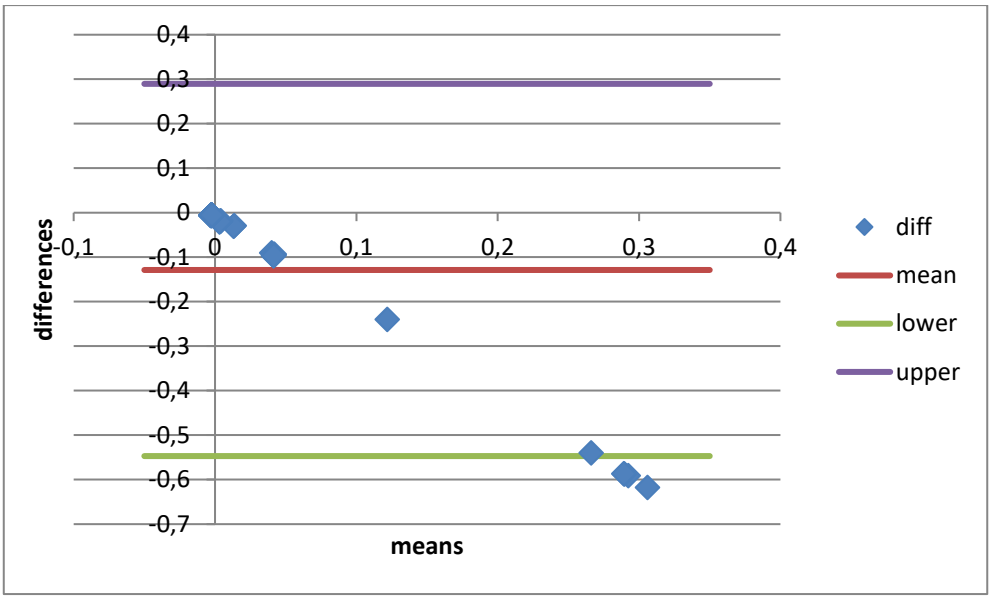


Figura 41. Análisis Bland-Altman para resultados de muestra vertiente de agua.

Finalmente, la vertiente de agua presenta la mayor discrepancia en el comportamiento de todos los casos analizados, exhibiendo una media de diferencia aproximada de -0.13 y límites de concordancia de -0.55 y 0.29. La distribución de estos puntos muestra una clara tendencia negativa, indicando que las diferencias son en su mayoría menores a cero, estas son más pronunciadas en valores medios próximos a 0. Esto indica que el prototipo más absorbente en relación al equipo comercial se encuentra muchas diferencias extremadamente grandes que alcanzan -0.6, esto refleja las discrepancias significativas que ya se observaban en los datos, principalmente en el intervalo (440 - 480 nm).

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La concepción y desarrollo de un espectrofotómetro económico y portátil han demostrado ser viales desde el punto de vista tecnológico, dado que se logró ensamblar el aparato usando materiales accesibles y tecnología de código abierto. Con la arquitectura modular se logró una integración eficiente de los subsistemas ópticos, electrónicos y de procesamiento de datos, dando como resultado un prototipo operativo que cumplió con los requisitos mínimos necesarios de diseño.

La adopción de sistemas ópticos y electrónicos portátiles constituye un progreso notable para la región de Cubijíes y sus alrededores en el análisis de muestras de agua. El prototipo creado ha evidenciado su competencia para identificar variaciones en la absorbancia de diversos cuerpos de agua, cubriendo desde ríos con alta turbidez como Chambo y Guano, hasta fuentes más puras como la vertiente de agua, lo que resalta la efectiva medición de ambos casos en único equipo de medición.

En lo que respecta a la evaluación del desempeño del prototipo comparándolo con el espectrofotómetro comercial, se llevaron a cabo análisis descriptivos de correlaciones y análisis Bland-Altman, los cuales revelaron un cierto grado de concordancia. Sin embargo, no se verificó una concordancia equilibrada en algunas muestras, lo cual dependió del tipo de muestra y del rango espectral analizado. Las discrepancias fueron más evidentes en los extremos espectrales, particularmente entre 590 y 700 nm, donde se ha comprobado que el prototipo subestima los valores de absorbancia en comparación con el dispositivo comercial. La variabilidad en las mediciones se atribuye especialmente al uso de un sistema de difracción improvisado, un fragmento de DVD, en lugar de componentes ópticos profesionales, lo que impactó negativamente en la resolución y precisión del ángulo de separación de colores, además que generó una menor sensibilidad en las regiones del rojo y cerca del infrarrojo también, por lo que representa a mejorar en el equipo a futuro.

Los hallazgos indicen que existe un grado de concordancia aceptable entre las mediciones espectrofotométricas de los dos equipos, especialmente en el rango de 500 a 530 nanómetros para las muestras de los ríos Chambo y Guano, lo que evidencia la alta precisión del prototipo en dicho segmento espectral. No obstante, se observaron algunas diferencias significativas, como en el caso del río Chibunga, donde el prototipo presentó valores considerablemente más altos que el dispositivo comercial, lo que sugiere que la respuesta del sistema podría depender de la composición particular de la muestra. La discrepancia más notable se detectó en la muestra de la vertiente de agua, donde el dispositivo comercial reportó valores cercanos a cero mientras que el prototipo mostró picos de absorbancia en diversas longitudes de onda. Esto pone de manifiesto las dificultades para medir valores de baja absorción. Los análisis estadísticos clasificaron esta muestra como la que, en términos generales presentó la mayor desviación del modelo. En términos generales, el prototipo mostró una variación de 2 a 3,8

veces mayor en comparación con el dispositivo comercial en muestras de ríos, mientras que la muestra de la vertiente de agua evidenció una desviación aún más pronunciada.

5.2. Recomendaciones

Se propone llevar a cabo una calibración precisa del prototipo, especialmente debido a las discrepancias observadas con la unidad comercial en los extremos del rango de longitud de onda del infrarrojo. Esto podría implicar el desarrollo de algoritmos de corrección específicos para ciertos cuerpos de agua, lo que incrementaría la confiabilidad y exactitud del instrumento en diversas condiciones de campo.

Además, se sugiere mejorar la precisión geométrica del sistema óptico del prototipo. Para ello, es necesario sustituir el sistema de difracción personalizado tipo DVD por uno fabricado según estándares ópticos adecuados y con especificaciones ópticas certificadas. Esto mejoraría la precisión espectral y las mediciones de colorimetría. Además, se recomienda que los componentes de detección en las regiones de rojo a infrarrojo cercano, para los cuales el prototipo era menos sensible, utilicen fotodetectores más sensibles o filtros ópticos con mejor relación señal-ruido en estas longitudes de onda.

Para futuras investigaciones, sería valioso expandir el estudio comparativo incluyendo análisis de parámetros químicos específicos como concentraciones de metales pesados, nutrientes o contaminantes orgánicos, correlacionando estos valores con los perfiles espectrales obtenidos por el prototipo, permitiéndose desarrollar modelos predictivos que puedan inferir la calidad del agua directamente de los datos espectrales sin necesidad de análisis químicos complementarios, incrementando la utilidad del dispositivo en aplicaciones de monitoreo ambiental en áreas remotas como la parroquia Cubijies.

Se recomienda realizar pruebas de campo más extensas que evalúen aspectos como la durabilidad del equipo, consumo energético y facilidad de uso por personal no especializado, factores cruciales para garantizar la adopción exitosa de esta tecnología en el monitoreo regular de fuentes hídricas en zonas rurales o de difícil acceso, cumpliendo así plenamente con la visión inicial del proyecto de crear un sistema verdaderamente portátil y práctico para la caracterización de muestras de agua de fuentes remotas.

Se sugiere realizar un estudio de optimización centrado en el diseño del sistema utilizando técnicas de modelado óptico computacional, prestando especial atención a la rejilla de difracción. Un análisis de esta naturaleza sería posible porque podría medir el impacto de utilizar una rejilla de difracción improvisada en la variabilidad de las mediciones y determinar si algunos otros factores adicionales han estado contribuyendo a las discrepancias. Los resultados de estos modelos guiarían la toma de decisiones sobre la mejor manera de asignar los recursos disponibles para lograr el mayor retorno económico en precisión y confiabilidad del dispositivo portátil.

BIBLIOGRAFÍA

[1] B. NG, «¿Qué es un espectrómetro? Explicación del espectrómetro UV, VIS e IR». [En línea]. Disponible en: https://wavelength-oe.com/es/what-is-a-spectrometer/

[2] F. J. Avila-Camacho, L. M. Moreno-Villalba, G. I. Cerón-Montes, A. Garrido-Hernández, C. A. Cardoso-Chávez, y C. J. Pacheco-Piña, «Diseño de un espectrofotómetro UV-VIS de bajo costo para la industria bioquímica: Una Revisión», *ICBI*, vol. 9, n.º Especial2, pp. 19-28, dic. 2021, doi: 10.29057/icbi.v9iEspecial2.7788.

[3] W. Lomas, «Diseño e implementación de un sistema óptico que utiliza la técnica de transmisión en líquidos para detección de contaminantes de hidrocarburos destilados.», Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2019. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20161/1/CD%209620.pdf

[4] A. Serrano, «Diseño y construcción de equipo de medición para el monitoreo de pH, conductividad y temperatura del agua», Tesis de ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, 2020. [En línea]. Disponible en: https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1611/SERAQL08T.pdf?sequence=1

[5] E. Guairacaja, «Diseño e implementación de un prototipo para la potabilización de agua mediante esterilizador ultravioleta monitoreado de forma remota en la parroquia Punín», Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, Guayaquil, 2021. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21126/1/UPS-GT003440.pdf

[6] C. López, «Diseño de un sistema de transmisión-recepción óptico sumergible para identificar contaminantes en agua de experimentación en el rango de 200nm a 400nm (UV)», Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024.

[7] D. Aisalla, «Diseño e implementación de un sistema IoT para el monitoreo de PH, oxígeno disuelto, turbidez y temperatura en el acuicultivo de trucha aguas cristalinas en la parroquia de Pungalá», Tesis de ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/23202/1/98T00468.pdf

[8] E. L. G. Ontaneda, «Diseño e implementación de un prototipo de sistema espectral para adquirir datos de los diferentes espectros de la luz visible.», Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, 2018. [En línea]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19529

[9] G. Morales, «Implementación de un prototipo para monitoreo remoto de calidad de agua y visualización de datos mediante un dashboard web.», Tesis de tecnología, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2024. [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/25979/1/CD%2014695.pdf

[10] J. Luque, «Propuesta de implementación de sensores de nivel de agua con macromedidor en reservorio R-2 para la identificación temprana de fallos operacionales, Arequipa - 202», Tesis de ingeniería, Universidad Continental, Arequipa, 2023. [En

línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13076/2/IV_FIN_108_TE_Luque_Huaman_2023.pdf

[11] L. Ponce, «Estudio Exploratorio De La Calidad De Agua Del Sistema De Riego Chambo – Guano De La Provincia De Chimborazo», Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2019. [En línea]. Disponible en: http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/6306

[12] C. Imbaquingo, F. Marcelo, O. Bustamante, B. José, y A. C. R. Rivera, «Determinación de la calidad de agua mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la microcuenca Sicalpa, Cantón Colta.», Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2023. [En línea]. Disponible en: http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/10579

[13] W. X. Ibáñez-Moreno, J. P. Arcos-Logroño, y J. M. Narvaez-Brito, «Técnicas espectroscópicas utilizadas para determinar la calidad del agua Spectroscopic techniques used to determine water quality Técnicas espectroscópicas usadas para determinar a qualidade da agua», vol. 6, n.º 9, 2021.

[14] V. Vargas, «Evaluación De La Calidad De Agua Mediante El Uso De Macroinvertebrados Acuáticos Como Bioindicadores En La Microcuenca Del Río Patulú», Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2018. [En línea]. Disponible en: http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/4606

[15] P. L. M. Zambrano, «Informe De Trabajo De Titulación Previa A La Obtención Del Título De Ingeniero En Medio Ambiente», 2021.

[16] C. Montero y B. Antonio, «Análisis de la calidad del agua de consumo en la red de distribución de agua potable del sector urbano del cantón Chambo.», Tesis de ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12984

[17] H. instruments, «¿Qué es la turbidez? » HANNA® instruments Ecuador», HANNA® instruments Ecuador. [En línea]. Disponible en: https://hannainst.ec/blog/analisis-de-agua-boletines/que-es-la-turbidez/

[18] R. D. García, «Instrumentos que revolucionaron la química: la historia del espectrofotómetro», *Avances en Química*, 2018.

[19] «Diffraction Gratings Tutorial». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.thorlabs.com

[20] K. M, «5.11.5 Transmission Diffraction Grating | OCR A Level Physics Revision Notes 2017», Save My Exams. [En línea]. Disponible en: https://www.savemyexams.com/a-level/physics/ocr/17/revision-notes/5-newtonian-world--astrophysics/5-11-em-radiation-from-stars/5-11-5-transmission-diffraction-grating/

[21] C. Javier, A. Rocío, y A. Isela, «Uso Y Aplicación De Aminoácidos Como Posibles Materiales Semiconductores Optoeléctricos», vol. 33.

[22] «Espectro electromagnético». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.espectrometria.com/espectro_electromagntico

[23] «La ley de Snell de la refracción». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/snell/snell.htm

[24] «Física General para Ciencias Agronómicas». Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://multimedia.uned.ac.cr/pem/fisica_ciencias_agronomicas/pag/mod_4.html

[25] «Arduino Nano», Arduino Official Store. Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://store.arduino.cc/products/arduino-nano

[26] G. A. P. Duchi, «Diseño e implementación de un prototipo de electrocardiógrafo móvil utilizando redes móviles para monitorización de la frecuencia cardiaca en tiempo real.», Tesis de ingeniería, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2024. [En línea]. Disponible en: http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/21498

[27] G. J. L. Tonato, «Desarrollo De Un Prototipo Robótico Tipo Insecto Con Control De Lazo Cerrado Para Recorrer Una Pista Con Obstáculos», Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, Quito Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible en: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19167

[28] M. A. Rivera Gallardo, «Módulo Autónomo Para El Aprendizaje De Los Principios Básicos De La Cinemática De Una Partícula En El Ámbito Universitario», Universidad Tecnica de Israel, Quito Ecuador, 2020.

[29] TECmikro Ecuador, «LCD 16x2 con I2C», TECmikro Ecuador. Accedido: 9 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://tecmikro.com/led-lcd/351-lcd-16x2-i2c.html

[30] «Phototransistor 3DU33», Ardunel online. Accedido: 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ventas.ardunel.com.bo/componentes-electronicos/646-phototransistor-3du33.html

[31] «Phototransistor». Core electronics, 2022. [En línea]. Disponible en: https://core-electronics.com.au/phototransistor.html

[32] «Techspec Magnesium Fluoride Coated Plano Convex Lenses». Accedido: 9 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.edmundoptics.com/f/mgfsub2sub-coated-plano-convex-pcx-lenses/13462/

[33] «Módulo Bluetooth HC-06 esclavo», MEGATRONICA. Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://megatronica.cc/producto/modulo-bluiethoot-hc-06/

[34] «SG90 micro servo 9G - Electronica JNC». Accedido: 28 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.electronicajnc.com/web/producto/sg90-micro-servo-9g/, https://www.electronicajnc.com/web/producto/sg90-micro-servo-9g/

[35] C. E. E. Inagán, «“Sistema de control de acceso automático por medio de temperatura corporal para».

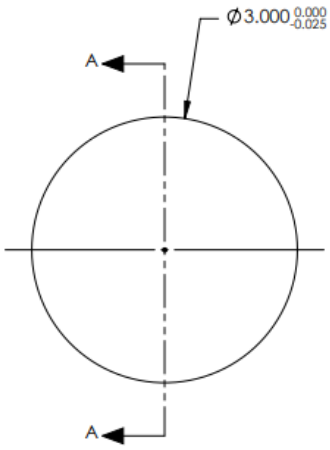
[36] Mybotic, «Photo-Transistor 5mm (3DU33)». Accedido: 28 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mybotic.com.my/photo-transistor-5mm-3du33

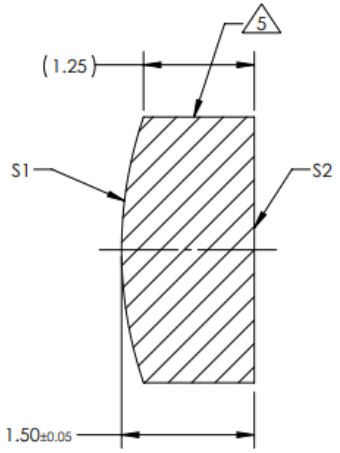
ANEXOS

ANEXO 1: DATASHEET LENTES ÓPTICOS.

NOTES:

1. SUBSTRATE:
   GRADE A FINE ANNEALED
   SCHOTT: N-BK7 517/642
2. ROHS COMPLIANT
3. CENTERING TOLERANCE (AT 587.6nm):
   BEAM DEVIATION (HALF ANGLE): <3 ARCMIN
4. COATING (APPLY ACROSS COATING APERTURE)
   S1 & S2: ¼ WAVE MgF2 @ 550nm
   R(AVG) < 1.75% FROM 400-700nm (N-BK7)
5. FINE GRIND SURFACE
6. POWER, IRREGULARITY, AND SURFACE QUALITY SPECIFICATIONS APPLY ACROSS CLEAR APERTURE
7. FOCAL LENGTH (EFL): 9.00mm±1%
   BACK FOCAL LENGTH (BFL): 8.01mm
8. PROTECTIVE BEVEL AS NEEDED
9. DESIGN WAVELENGTH: 587.6nm





SECTION A-A

FOR INFORMATION ONLY:
DO NOT MANUFACTURE PARTS TO THIS DRAWING

	S1	S2
SHAPE	CONVEX	PLANO
RADIUS	4.65	INFINITY
SURFACE QUALITY	20 - 10	20 - 10
MIN CLEAR APERTURE	Ø2.50	Ø2.50
MIN COATING APERTURE	Ø2.50	Ø2.50
POWER AT 632.8nm	3.00 RINGS	3.00 RINGS
IRREGULARITY AT 632.8nm	0.50 RINGS	0.50 RINGS

SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE
DIMENSIONS ARE FOR REFERENCE ONLY

Edmund Optics®

THIRD ANGLE PROJECTION

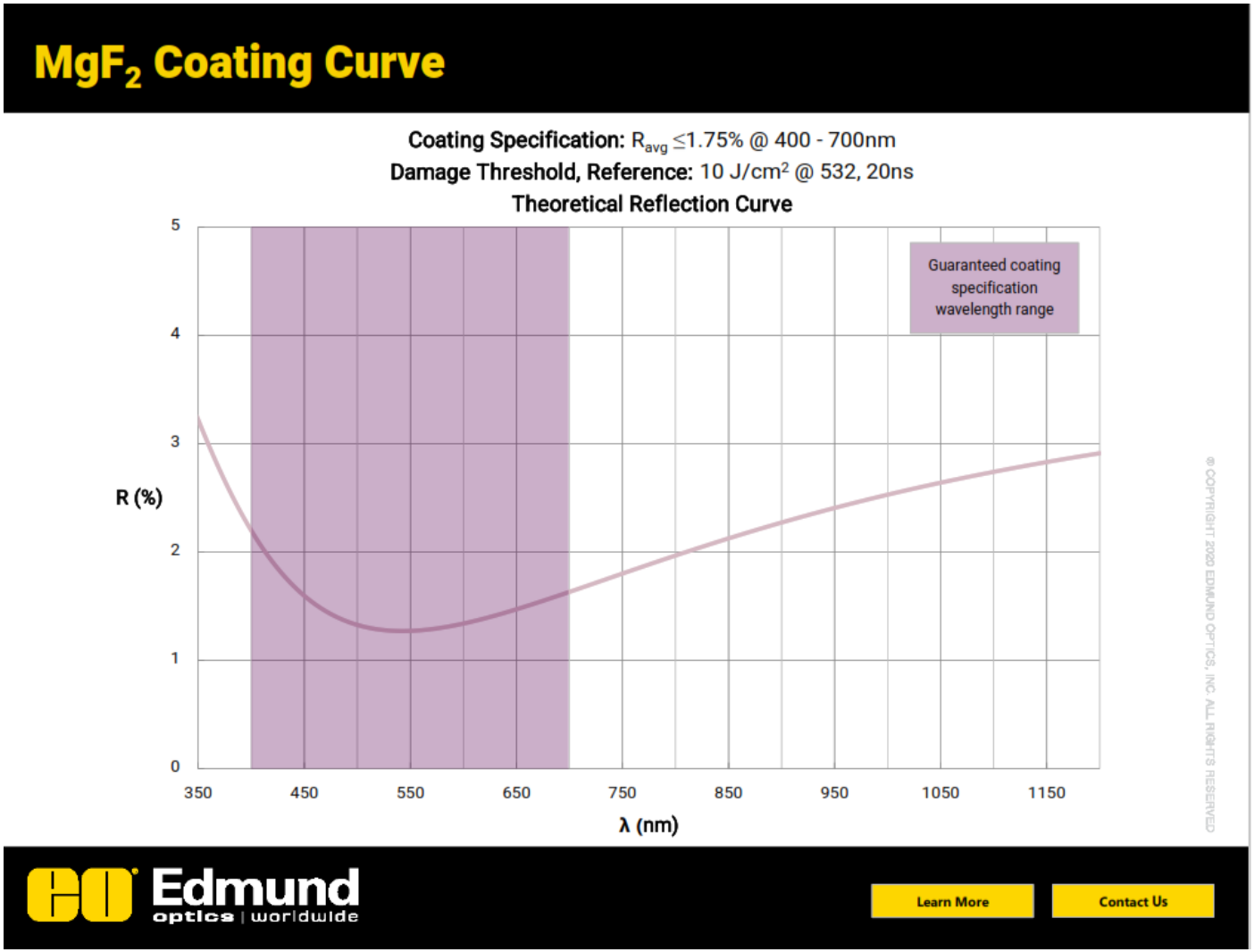
TITLE: 3.0mm Dia. x 9.0mm FL, MgF2 Coated, Plano-Convex Lens

ALL DIMS IN: mm

DWG NO: 32955

SHEET 1 OF 1

ANEXO 2: CURVA DEL REVESTIMIENTO DE FLUORURO DE MAGNESIO DE LOS LENTES ÓPTICOS

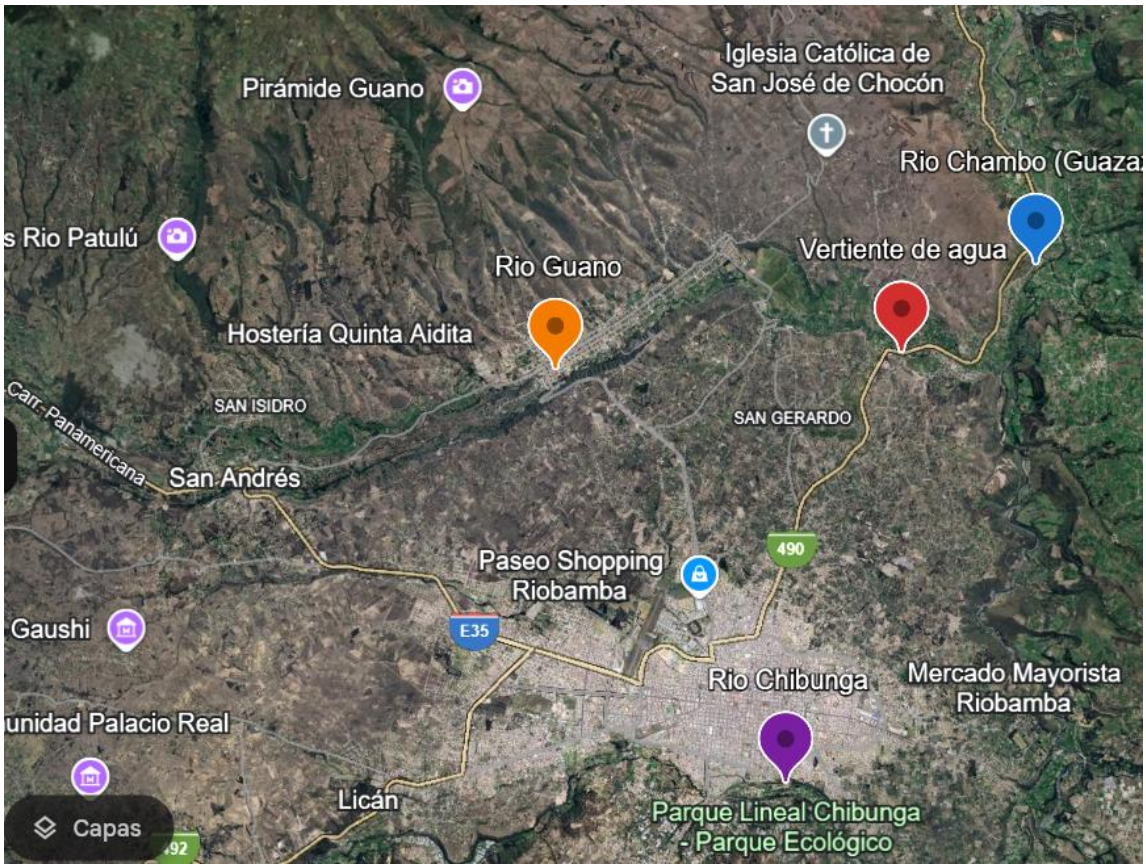


ANEXO 3: CÓDIGO DE ARDUINO IDE

```
#include <VarSpeedServo.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

VarSpeedServo miServo;
const int botonPin = 2;
int estadoBoton = 0;
float anguloActual = 13;

const int fotoDiodoPin = A0;
int valorFotoDiodo = 0;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
bool leyendoDatos = false;
int contadorLecturas = 0;
const int LECTURAS_POR_ANGULO = 24;

// Función para mostrar mensajes en la pantalla LCD
void mostrarMensaje(String mensaje1, String mensaje2) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(mensaje1);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(mensaje2);
}
void setup() {
  miServo.attach(9);
  miServo.write(13);
  pinMode(botonPin, INPUT);
  pinMode(fotoDiodoPin, INPUT);

  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  // Mensaje de inicio
  mostrarMensaje("Cargando...", "");

  // Simulación de barra de progreso en la LCD
  for (int i = 0; i <= 16; i++) {
    lcd.setCursor(i, 1);
    lcd.print("*");
    delay(200);
  }

  // Mensaje de bienvenida
  mostrarMensaje("Sistema Optico", "Bienvenido");
  delay(2000);
```

```
  // Mensaje de espera hasta que se presione el botón
  mostrarMensaje("Esperando", "Lectura de Datos");
}
void loop() {
  estadoBoton = digitalRead(botonPin);

  // Si el botón es presionado y el servo está en la posición inicial (13°)
  if (estadoBoton == HIGH && anguloActual == 13) {
    mostrarMensaje("Almacenando", "Datos");
    leyendoDatos = true;
    contadorLecturas = 0;

    int tiempoTotal = 10000;
    int pasos = 26;  // Cantidad de pasos (de 13° a 0° en intervalos de 0.5°)
    int delayPorPaso = tiempoTotal / pasos;

    // Bucle que mueve el servo desde 13° hasta 0° en pasos de 0.5°
    for (float angulo = 13; angulo >= 0; angulo -= 0.5) {
      miServo.write(angulo, 5);
      delay(10);

      // Realiza varias lecturas en cada posición del servo
      for (int i = 0; i < LECTURAS_POR_ANGULO; i++) {
        valorFotoDiodo = analogRead(fotoDiodoPin);
        contadorLecturas++;
        // Imprime la lectura en el monitor serial
        Serial.print("Lec ");
        Serial.print(contadorLecturas);
        Serial.print(": ");
        Serial.println(valorFotoDiodo);
        delay(delayPorPaso / LECTURAS_POR_ANGULO);
      }
    }
    anguloActual = 0;

    // Mensaje en la pantalla LCD indicando que el servo está regresando
    mostrarMensaje("Regresando", "");

    // Regresa el servo a 13° en pasos de 0.5°
    for (float angulo = 0; angulo <= 13; angulo ++) {
      miServo.write(angulo, 50);
      delay(75);
    }
    anguloActual = 13;
    mostrarMensaje("Esperando", "Lectura de Datos");
  }
  delay(20);
}
```

ANEXO 4: GEORREFERENCIAS DE LOS PUNTOS DE ANALISIS

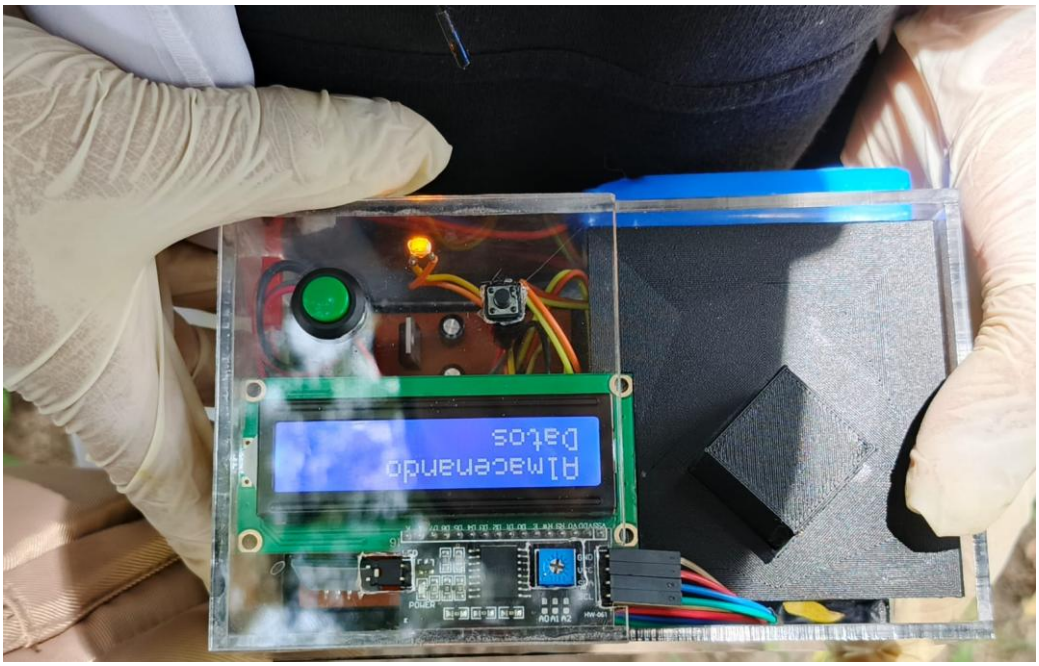


ANEXO 5: TOMA Y ANALISIS DE MUESTRAS IN SITU

Chimborazo, Ecuador

W 78.6 S 1.6
2025/03/31 14:07

Guano, Ecuador


Almacenando
Datos