



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y
DISEÑO DIGITAL
CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de Integración Curricular previa
la obtención del Grado Académico de
Ingeniero en Telemática.

Título del Proyecto de Investigación:

ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES AMBIENTALES PARA LA
ESTIMACIÓN DE NIVELES DE OXÍGENO EN EL BOSQUE
PROTECTOR MUROCOMBA

Autor:

Jecson Stalin Estrada Tapia

Director del proyecto de investigación:

Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **JECSON STALIN ESTRADA TAPIA**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Jecson Stalin Estrada Tapia

C.I: 1207224484



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc**, docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Jecson Stalin Estrada Tapia** realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **“ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES AMBIENTALES PARA LA ESTIMACIÓN DE NIVELES DE OXÍGENO EN EL BOSQUE PROTECTOR MUROCOMBA”**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc.**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado “Análisis Espectral De Señales Ambientales Para La Estimación De Niveles De Oxígeno En El Bosque Protector Murocomba” Presentado por el estudiante **Jecson Stalin Estrada Tapia**, egresado de la Carrera de Telemática, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias De La Computación Y Diseño Digital, que se ha desarrollado de acuerdo al Artículo 57 y 59 del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 100% y similitud 0%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Trabajo de Titulación - Jecson Stalin
Estrada

0%
Textos
sospechosos

4% Similitudes (ignorado)
< 1 % similitudes entre
comillas
0 % entre las fuentes
mencionadas
0% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Trabajo de Titulación - Jecson Stalin
Estrada.pdf
ID del documento: e45c5cadf3ecb855e506b055eb23f58a71da79ba
Tamaño del documento original: 9.13 MB

Depositante: DIEGO FERNANDO INTRIAGO RODRIGUEZ
Fecha de depósito: 26/11/2025
Tipo de carga: Interface
fecha de fin de análisis: 26/11/2025

Número de palabras: 21.866
Número de caracteres: 162.018


Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, M. Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y DISEÑO DIGITAL
CARRERA DE TELEMÁTICA

PROYECTO DE INVESTIGACION

TÍTULO:

**“ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES AMBIENTALES PARA LA
ESTIMACIÓN DE NIVELES DE OXÍGENO EN EL BOSQUE PROTECTOR
MUROCOMBA”**

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad De Ciencias De La Computación Y Diseño Digital como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática.

Aprobado por:

PRÉSIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Paola Maribel Benítez Navarrete, M. Sc

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Anthony Limber Moran Cabezas, M. Sc

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. José Luis Tubay Vergara, M. Sc

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

2025

AGRADECIMIENTO

Manifiesto mi más profundo agradecimiento a todas las personas e institución que hicieron posible el desarrollo de este proyecto de investigación. En primer lugar, expreso mi reconocimiento a la institución académica y a sus docentes, quienes brindaron una guía constante, aportando conocimientos, criterios metodológicos y observaciones constructivas que enriquecieron significativamente cada etapa del trabajo. Su compromiso con la excelencia formativa y su disposición para orientar mis dudas fueron un pilar fundamental para la consolidación de esta investigación.

Agradezco también el apoyo recibido por parte de quienes contribuyeron directa o indirectamente al proceso, ya sea mediante asesorías técnicas, acceso a recursos, acompañamiento en campo o retroalimentación durante el análisis de resultados. Cada aporte, por mínimo que haya parecido, representó un avance importante para el cumplimiento de los objetivos planteados.

De igual manera, reconozco el respaldo moral, motivacional y emocional brindado por mi familia y allegados, cuyo apoyo permanente me permitió mantener la disciplina y la determinación necesarias para concluir este estudio. Su confianza en mis capacidades fue un impulso constante.

A todos quienes fueron parte de este camino, les expreso mi sincero agradecimiento por su tiempo, colaboración y dedicación.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a las personas que han marcado mi vida y han sido mi soporte inquebrantable durante todo este proceso académico. A mi madre, Narcisa Tapia, cuyo esfuerzo, cariño y sacrificio han sido la base sobre la cual he construido mis metas; su fortaleza y dedicación me inspiran diariamente a ser mejor. A mi padre, Kleber Estrada, por sus enseñanzas, por su ejemplo de responsabilidad y constancia, y por inculcarme el valor del trabajo honesto. A mi hermana, Alicia, por su compañía, por sus palabras de aliento y por recordarme siempre la importancia de seguir avanzando.

Dedico también este logro a mi pareja, Raiza, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional en los momentos más complejos, y por caminar a mi lado con firmeza y afecto. A mis amigos Justin y Dayra, quienes con su amistad sincera me brindaron ánimo, escucha y motivación en cada etapa. Y a mi gran amigo Fernando, cuyo respaldo constante y confianza en mis capacidades se convirtieron en una fuerza esencial para continuar cuando el camino se volvía difícil.

A todos ustedes, les ofrezco esta dedicatoria como reflejo de mi gratitud por ser parte fundamental de este logro.

RESUMEN

La presente investigación tiene como propósito estimar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba mediante el análisis espectral de señales ambientales, utilizando tecnologías ópticas y herramientas de procesamiento digital. La problemática abordada se relaciona con la pérdida progresiva de la capacidad fotosintética de los ecosistemas tropicales, producto de procesos como la deforestación, el cambio climático y la reducción de cobertura vegetal, lo que compromete significativamente la producción de oxígeno y el equilibrio atmosférico. Ante esta situación, se propone una metodología de monitoreo ambiental no invasiva basada en espectroscopía óptica y sensores portátiles. Se seleccionó el sensor AS7265x por su capacidad para registrar 18 bandas espectrales en los rangos UV, visible e infrarrojo cercano, asociadas a parámetros biofísicos como clorofila, humedad y estructura foliar, fundamentales para inferir la dinámica fotosintética. La investigación se enmarca en un diseño cuantitativo, no experimental, transversal y de campo, apoyado en mediciones espectrales y registros de niveles de oxígeno. Se identificaron variables clave que influyen directamente en la producción de oxígeno, como la radiación solar, temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, precipitación y cobertura vegetal, integradas en un modelo de análisis con fines predictivos. Los resultados preliminares establecen una base metodológica sólida para validar modelos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático orientados a la estimación de oxígeno atmosférico. La propuesta constituye un aporte innovador al monitoreo ecológico, ofreciendo una herramienta de bajo costo, alta precisión y aplicabilidad en zonas protegidas de alta biodiversidad como estrategia de conservación.

Palabras clave: Fotosíntesis, reflectancia espectral, monitoreo ecológico, sensores ópticos, aprendizaje automático.

ABSTRACT

The purpose of this research is to estimate oxygen levels in the Murocomba Protected Forest by means of spectral analysis of environmental signals, using optical technologies and digital processing tools. The problem addressed is related to the progressive loss of photosynthetic capacity of tropical ecosystems, as a result of processes such as deforestation, climate change and reduction of vegetation cover, which significantly compromises oxygen production and atmospheric balance. In view of this situation, a non-invasive environmental monitoring methodology based on optical spectroscopy and portable sensors is proposed. The AS7265x sensor was selected for its capacity to record 18 spectral bands in the UV, visible and near infrared ranges, associated with biophysical parameters such as chlorophyll, humidity and leaf structure, which are fundamental for inferring photosynthetic dynamics. The research is framed in quantitative, non-experimental, cross-sectional and field design, supported by spectral measurements and records of oxygen levels. Key variables that directly influence oxygen production, such as solar radiation, temperature, relative humidity, CO₂ concentration, precipitation and vegetation cover, were identified and integrated into an analysis model for predictive purposes. Preliminary results establish a solid methodological basis to validate statistical models and machine learning algorithms oriented to atmospheric oxygen estimation. The proposal constitutes an innovative contribution to ecological monitoring, offering a low cost, high precision and applicability tool in protected areas of high biodiversity as a conservation strategy.

Keywords: *Photosynthesis, spectral reflectance, ecological monitoring, optical sensors, machine learning.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

PORTADA	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO.....	iv
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
CÓDIGO DUBLIN.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	xx
CAPÍTULO I	1
1 CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1 Problema de Investigación.....	2
1.1.1 Planteamiento del Problema	2
1.1.1.1 Diagnóstico.....	3
1.1.1.2 Pronóstico.....	3
1.1.2 Formulación del problema	3
1.1.3 Sistematización del problema.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificación.....	5
CAPÍTULO II.....	6
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1 Marco conceptual	7

2.1.1	<i>Espectroscopia Ambiental</i>	7
2.1.2	<i>Señales ambientales y reflectancia vegetal</i>	7
2.1.3	<i>Sensores hiperspectrales y portátiles</i>	7
2.1.4	<i>Técnica DOAS (Espectroscopia de absorción óptica diferencial)</i>	7
2.1.4.1	Características Técnicas del Chipset AS7265x	8
2.1.5	<i>Procesamiento de Señales Espectrales</i>	8
2.1.6	<i>Aplicación de MATLAB en Análisis Espectral</i>	8
2.1.7	<i>Relevancia del Monitoreo de Oxígeno en Ecosistemas</i>	8
2.1.8	<i>Diseño e Implementación de Modelos</i>	9
2.1.8.1	Sistema de Adquisición Espectral	9
2.2	Marco Referencial	10
2.3	Marco legal	12
2.3.1	<i>Legislación Ambiental En Ecuador</i>	12
2.3.1.1	Constitución De La Republica Del Ecuador (2008).	12
2.3.1.2	Ley De Gestión Ambiental (1999).	13
2.3.1.3	Código Orgánico Del Ambiente (Coa, 2017).	13
CAPÍTULO III		14
3	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	14
3.1	Localización.....	15
3.2	Tipos de investigación	15
3.2.1	<i>Investigación exploratoria</i>	15
3.2.2	<i>Investigación descriptiva</i>	16
3.2.3	<i>Investigación cuantitativa</i>	16
3.2.4	<i>Investigación Bibliográfica</i>	16
3.3	Métodos de investigación	17
3.3.1	<i>Método científico</i>	17
3.3.2	<i>Método correlacional</i>	18

3.4	Diseño de la Investigación.....	18
3.4.1	Procesamiento y Análisis de los Datos.....	18
3.4.2	Validación de Resultados	18
3.5	Estructura de la investigación.....	19
3.5.1	<i>Fase 1: Revisión documental y análisis bibliográfico.....</i>	19
3.5.2	<i>Fase 2: Planificación del trabajo de campo</i>	19
3.5.3	<i>Fase 3: Captura de datos espectrales y ambientales</i>	19
3.5.4	<i>Fase 4: Procesamiento y análisis de señales</i>	20
3.5.5	<i>Fase 5: Validación de modelos y resultados</i>	20
3.6	Recursos y materiales	20
3.6.1	Protocolos de Calibración del Sensor AS7265x.....	22
CAPÍTULO IV		26
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1	Identificar las señales ambientales que influyen en la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba.	28
4.2	Discusión.	33
4.3	Aplicar técnicas de análisis espectral sobre las señales ambientales registradas.	34
4.4	Discusión.	49
4.5	Validar los resultados del análisis espectral mediante la comparación a través de mediciones en el Bosque Protector Murocomba.	50
4.6	Discusión.	77
CAPÍTULO V.....		78
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
5.1	Conclusiones.....	79
5.2	Recomendaciones	80
CAPÍTULO VI		81
6	BIBLIOGRAFÍA	81
6.1	Referencias Bibliográficas.....	82

CAPÍTULO VII.....	84
7 ANEXO	84
.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro Comparativo de Sensores.....	20
Tabla 2. Análisis energético escenarios alternativos.	25
Tabla 3. Niveles que influyen en la oxigenación.....	28
Tabla 4. Longitud de onda y tipo de luz de acuerdo con cada canal.	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación del bosque protector Murocomba.....	15
Ilustración 2. Sensor AS7265x.....	21
Ilustración 3. Circuito del sensor AS7265x.	23
Ilustración 4. Estimación de los niveles de oxígeno en el bosque protector Murocomba. 30	
Ilustración 5. Distribución de la influencia en la producción de oxígeno.....	31
Ilustración 6. Comparación de la influencia de parámetros físico y espectrales en la producción de oxígeno.....	32
Ilustración 7. Lecturas espectrales tabuladas desde el puerto serial – AS7265x.	34
Ilustración 8. Gráfico en tiempo real del espectro óptico – Sensor AS7265x.	37
Ilustración 9. Gráfico en tiempo real del espectro óptico – Sensor AS7265x.	38
Ilustración 10. Análisis Espectral: Radiación Solar con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.....	39
Ilustración 11. Análisis Espectral: Temperatura Ambiental con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.	39
Ilustración 12. Análisis Espectral: Humedad Relativa con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.....	40
Ilustración 13. Análisis Espectral: Cobertura Vegetal con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.....	41
Ilustración 14. Análisis Espectral: Concentración de CO ₂ con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.	41
Ilustración 15. Análisis Espectral: Precipitación con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.....	42
Ilustración 16. Comparación de radiación solar con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.....	43
Ilustración 17. Comparación de temperatura ambiental con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.	44
Ilustración 18. Comparación de humedad relativa con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.	44
Ilustración 19. Comparación de cobertura vegetal con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.	45
Ilustración 20. Comparación de concentración CO ₂ con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.	46

Ilustración 21. Comparación de precipitación con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.....	46
Ilustración 22. Regresión Polinomial de Segundo Grado de 8-10am del 5 de septiembre.	51
Ilustración 23. Correlación de intensidad espectral entre las 8-10am del 5 de septiembre.	51
Ilustración 24. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 8-10am del 5 de septiembre.....	52
Ilustración 25. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno 8-10am del 7 de octubre.	53
Ilustración 26. Correlación de intensidad espectral entre las 8-10am del 7 de octubre.....	54
Ilustración 27. <i>Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$)</i> de 8-10am del 7 de octubre.	55
Ilustración 28. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 12:00 del 5 de septiembre.....	56
Ilustración 29. Correlación de intensidad espectral entre las 12:00 del 5 de septiembre. .	57
Ilustración 30. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 12:00 del 5 de septiembre.....	58
Ilustración 31. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 12:00 del 7 de octubre.	59
Ilustración 32. Correlación de intensidad espectral entre las 12:00 del del 7 de octubre. .	60
Ilustración 33. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 12:00 del del 7 de octubre.	61
Ilustración 34. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 16:00 del 5 de septiembre.....	62
Ilustración 35. Correlación de intensidad espectral entre las 16:00 del del 7 de septiembre.	63
Ilustración 36. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 16:00 del del 7 de septiembre.....	64
Ilustración 37. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 16:00 del 7 de octubre.	65
Ilustración 38. Correlación de intensidad espectral entre las 16:00 del del 7 de octubre. .	66
Ilustración 39. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 16:00 del del 7 de octubre.	66
Ilustración 40. Comparación de estimación de oxígeno de 10:00.	68

Ilustración 41. Comparación de estimación de oxígeno de 12:00.	69
Ilustración 42. Comparación de estimación de oxígeno de 16:00.	70
Ilustración 43. Datos almacenados en Firebase Realtime Database.	71
Ilustración 44. Procesamiento de señales y selección de características	72
Ilustración 45. Esquema de recopilación de datos.	73
Ilustración 46. Pantalla 1 – Modo Online	74
Ilustración 47. Pantalla 2 – Modo Offline.....	74

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Prueba de sensor AS7265x en el Bosque Protector Murocomba.	85
Anexo 2. Recolección de datos Espectrales en el Bosque Protector Murocomba.	85
Anexo 3. Recolección de datos y Análisis espectral de las señales ambientales	86
Anexo 4. Recolección de datos y Análisis espectral de las señales ambientales	86

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Análisis espectral de señales ambientales para la estimación de niveles de oxígeno en el bosque protector Murocomba.				
Autor:	Jecson Stalin Estrada Tapia				
Palabras claves:	Fotosíntesis	Reflectancia espectral.	Monitoreo ecológico.	Sensores ópticos.	Aprendizaje automático.
Fecha de publicación:	Noviembre, 2025				
Editorial:	Quevedo- UTEQ “La Central”, 2025				
Resumen:	La investigación tiene como objetivo estimar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba, utilizando el análisis espectral de señales ambientales. Se enfoca en los efectos de la deforestación y el cambio climático, que afectan la capacidad fotosintética de los ecosistemas tropicales. A través de una metodología no invasiva, se emplearon sensores ópticos portátiles, como el AS7265x, que capturan bandas espectrales en los rangos UV, visible e infrarrojo cercano, asociadas a parámetros biofísicos como la clorofila y la humedad. El estudio se basa en un diseño cuantitativo, no experimental y de campo, en el que se identificaron variables claves como la radiación solar, temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, precipitación y cobertura vegetal. Estos datos fueron integrados en un modelo predictivo para estimar los niveles de oxígeno. Los resultados preliminares proporcionan una base sólida para desarrollar modelos estadísticos y algoritmos de aprendizaje automático para el monitoreo ambiental de zonas protegidas.				
Abstract:	The research aims to estimate oxygen levels in the Murocomba Protected Forest using spectral analysis of environmental signals. It focuses on the effects of deforestation and climate change, which affect the photosynthetic capacity of tropical ecosystems. Using a non-invasive methodology, portable optical sensors, such as the AS7265x, were employed to capture spectral bands in the UV, visible, and near-infrared ranges associated with biophysical parameters such as chlorophyll and humidity. The study is based on a quantitative, non-experimental, field design, in which key variables such as solar radiation, temperature, relative humidity, CO₂ concentration, precipitation, and vegetation cover was identified. These data were integrated into a predictive model to estimate oxygen levels. The preliminary results provide a solid basis for developing statistical models and machine learning algorithms for environmental monitoring of protected areas.				
Descripción:	109 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162				
URI:					

INTRODUCCIÓN

El análisis espectral de señales ambientales se ha consolidado como una herramienta tecnológica clave para el monitoreo de parámetros atmosféricos. A nivel mundial, los bosques tropicales han desempeñado un papel fundamental como sumideros de carbono y fuentes de oxígeno. No obstante, previos estudios indican que la Amazonía ha comenzado a emitir más dióxido de carbono (CO_2) del que absorbe, debido a procesos como la deforestación, incendios forestales y la degradación del suelo, lo que está alterando su capacidad de producción [1]. En este contexto, el uso de herramientas tecnológicas como la espectroscopia de absorción diferencial (DOAS) y los sensores hiperspectrales ha demostrado ser eficaz para la estimación de gases traza, incluyendo el oxígeno, sin necesidad de intervención invasiva en los ecosistemas [2]. Estos avances permiten una medición más precisa de las condiciones atmosféricas en tiempo real y representan un recurso clave para monitorear el equilibrio ecológico de áreas vulnerables.

En América del Sur se alberga gran parte de los bosques tropicales del mundo, pero enfrenta una rápida pérdida de cobertura forestal y cambios drásticos en los niveles de oxigenación. Investigaciones realizadas en la región amazónica de Brasil, Perú y Colombia han demostrado que los patrones espectrales de la vegetación pueden correlacionarse con la actividad fotosintética [3]. En respuesta, varios países han comenzado a implementar sistemas de teledetección y análisis espectral para observar la dinámica gaseosa, validando su utilidad para tomar decisiones de conservación [4].

Ecuador país reconocido por su mega diversidad biológica, se ha documentado la pérdida de cerca del 50 % de su cobertura de bosque nativo desde 1990, con una tasa de deforestación promedio de 82.500 hectáreas por año entre 2016 y 2018. Informes de Global Forest Watch revelan que el 79 % de esta pérdida ha ocurrido en zonas agrícolas y de expansión urbana, a su vez los monocultivos, la minería ha causado la pérdida de al menos el 20 % de su cobertura forestal en los últimos 50 años [5]. El Estado ecuatoriano ha promovido estrategias como el Plan Nacional de Restauración Forestal y el uso de tecnologías de monitoreo remoto para evaluar los impactos ambientales. Aun así, el seguimiento de gases es limitado, especialmente en zonas tropicales húmedas donde los métodos convencionales de muestreo no permiten una evaluación continua y precisa [6].

Este estudio tiene como objetivo emplear en el Bosque Protector Murocomba, ubicado en el cantón Valencia de la provincia de Los Ríos, uno de los últimos fragmentos de bosque nativo tropical en la región Costa. Este ecosistema presenta una alta biodiversidad y desempeña funciones vitales como la regulación del clima, la producción de oxígeno y el almacenamiento de carbono [7]. A pesar de ello, hasta la fecha no se ha implementado un sistema de monitoreo ambiental con sensores espectrales que permita estimar la variabilidad atmosférica en función de las condiciones biofísicas del entorno, es por ello que mediante el análisis espectral de señales ambientales busca generar relaciones entre reflectancia vegetal, parámetros físicos y niveles de oxigenación, contribuyendo con datos científicos al manejo sostenible del bosque.

CAPÍTULO I: CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El referido capítulo introduce el problema de investigación al abordar la importancia del Bosque Protector Murocomba en la regulación del oxígeno y del ciclo del carbono. Se presentan las problemáticas ambientales que enfrenta el ecosistema, como la pérdida de capacidad de absorción de CO₂ y producción de oxígeno, lo que compromete su estabilidad ecológica. Además, se realiza un diagnóstico de la falta de monitoreo continuo de los niveles de oxígeno en el bosque y un pronóstico sobre los riesgos si no se toman medidas preventivas. Se define la formulación y sistematización del problema, estableciendo las preguntas de investigación y los objetivos a alcanzar.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se presenta la fundamentación teórica que sustenta el estudio. Se introduce la espectroscopia ambiental como una herramienta clave para la detección de gases atmosféricos, como el oxígeno, a través de sus bandas de absorción. Se abordan temas clave como la reflectancia vegetal, sensores hiperspectrales, y la técnica DOAS (espectroscopia de absorción óptica diferencial) para la medición de gases. Además, se detallan las técnicas de procesamiento de señales espectrales, como la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y el uso de MATLAB para el análisis de los datos. Finalmente, se explora la relevancia del monitoreo de oxígeno en los ecosistemas y el diseño e implementación de modelos predictivos utilizando los datos espectrales.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Dicho capítulo describe la metodología empleada para realizar la investigación. Se adoptó un diseño cuantitativo y experimental en el que se emplearon sensores espectrofotométricos portátiles para recolectar datos de reflectancia en el Bosque Protector Murocomba bajo diversas condiciones ambientales. El capítulo detalla las fases de la investigación, que incluyen la localización del estudio, los tipos de investigación (exploratoria, descriptiva y cuantitativa), y los métodos de investigación utilizados, como el método científico, experimental y correlacional. Además, se describe la estructura de la investigación que comprende la revisión documental, la planificación del trabajo de campo, la captura de datos espectrales, el procesamiento y análisis de señales, y la validación de resultados.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación del capítulo presenta los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación. Se muestra la caracterización espectral del Bosque Protector Murocomba, identificando las variables ambientales clave como la radiación solar, temperatura, humedad relativa, cobertura vegetal y concentración de CO₂. Los datos espectrales obtenidos se analizaron con el sensor AS7265x y se establecieron relaciones entre las bandas espectrales y las condiciones físicas del entorno. En la discusión, se compara la información obtenida con estudios previos y se evalúa la precisión y relevancia de los resultados en relación con la producción de oxígeno en el ecosistema, confirmando la viabilidad de usar el sensor para el monitoreo no invasivo.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones alcanzadas a partir de los resultados obtenidos. Se confirma que el análisis espectral es una herramienta viable y precisa para la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba. Se resalta que las variables ambientales tienen un impacto significativo en la actividad fotosintética y en la producción de oxígeno. Las recomendaciones incluyen la implementación de un sistema de monitoreo ambiental portátil basado en espectroscopía multibanda y la utilización de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la precisión y eficiencia de los modelos predictivos. También se sugiere extender la investigación a lo largo de diferentes ciclos estacionales y condiciones climáticas para fortalecer los modelos de predicción.

CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

El estudio del capítulo se presenta toda la bibliografía utilizada para respaldar la investigación, incluyendo libros, artículos científicos y fuentes digitales que aportaron al marco teórico y referencial de la investigación. Las referencias están organizadas de acuerdo con las normas bibliográficas y proporcionan los fundamentos teóricos y metodológicos utilizados en el estudio.

CAPÍTULO VII: ANEXOS

El capítulo final incluye los anexos, donde se presentan documentos adicionales como tablas, gráficos, códigos de MATLAB utilizados en el análisis de datos, imágenes de sensores espectrales, ilustraciones y otros materiales relevantes que complementan la investigación. Los anexos sirven para proporcionar detalles adicionales sobre la metodología, los resultados y el procesamiento de datos, facilitando la comprensión y validación del estudio realizado.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Planteamiento del Problema

El Bosque Protector Murocomba, ubicado en el cantón Valencia perteneciente a la provincia de Los Ríos, Ecuador, es un ecosistema esencial para la regulación de los niveles de oxígeno atmosférico y la captura de carbono, elementos clave para la mitigación del cambio climático. El bosque forma parte de un conjunto de bosques tropicales que juegan un rol fundamental en la fotosíntesis y el equilibrio atmosférico, lo que contribuye a la sostenibilidad de la biodiversidad global. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que los bosques tropicales, incluyendo los de la región amazónica, han visto reducida su capacidad para absorber CO₂ debido a las actividades humanas como la deforestación, los incendios forestales y la degradación del suelo, lo que representa una amenaza significativa para la biodiversidad y la estabilidad ecológica global [1].

En particular, en la Amazonía se ha observado que algunos bosques han comenzado a emitir más CO₂ de lo que absorben, un fenómeno que se asocia a la degradación de la vegetación. Este fenómeno está vinculado a los mismos factores que afectan al Bosque Protector Murocomba, aunque hasta el momento no se ha registrado una pérdida significativa en su capacidad de absorción de CO₂. No obstante, el riesgo del ecosistema también sufra alteraciones en su capacidad de absorción es una preocupación latente. En contexto, el uso de sensores espectrales se presenta como una solución clave para el monitoreo de gases atmosféricos en tiempo real, sin intervención invasiva. Estos avances en tecnología permiten un monitoreo ambiental no invasivo, lo que es crucial para un ecosistema como el Bosque Protector Murocomba, que requiere protección y monitoreo constante sin perturbar la biodiversidad local. [1].

La falta de un sistema de monitoreo continuo de gases atmosféricos como el oxígeno en el ecosistema representa una de las principales limitaciones para evaluar la salud del bosque y su capacidad de contribuir a la regulación de los niveles de oxígeno [8]. En la actualidad, no existen herramientas adecuadas para estimar en tiempo real la variabilidad de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba, lo que impide tener un seguimiento preciso de la evolución de estos parámetros a lo largo del tiempo y limita la implementación de estrategias de conservación basadas en datos reales.

1.1.1.1 Diagnóstico.

En el Bosque Protector Murocomba, la ausencia de un monitoreo continuo en el Bosque Protector Murocomba impide comprender con exactitud el impacto de factores tanto ambientales como antropogénicos sobre la calidad del aire en el ecosistema. La variabilidad en la densidad forestal, los cambios en la cobertura vegetal y las fluctuaciones extremas de temperatura (altas y bajas) podrían estar alterando los procesos naturales de intercambio gaseoso, afectando así la capacidad del ecosistema para regular los niveles de oxígeno. Sin datos precisos y un análisis detallado, es prácticamente imposible evaluar la magnitud del problema y tomar las acciones correctivas necesarias para mitigar sus efectos.

1.1.1.2 Pronóstico.

Si no se implementan estrategias eficaces para el monitoreo y la gestión ambiental del Bosque Protector Murocomba, existe el riesgo de que el ecosistema siga el mismo patrón observado en otros bosques tropicales, donde la emisión de CO₂ supera la capacidad de absorción. Este fenómeno podría provocar un deterioro irreversible de la biodiversidad local, afectar la calidad del aire y contribuir significativamente al cambio climático. A largo plazo, la falta de intervención podría comprometer gravemente la función ecológica del bosque, reduciendo su capacidad para sustentar la vida silvestre y las comunidades que dependen de sus servicios ecosistémicos.

1.1.2 Formulación del problema

¿Cómo se pueden estimar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba, aplicando técnicas de análisis espectral sobre señales ambientales, con el fin de contribuir a su conservación y manejo sostenible?

1.1.3 Sistematización del problema

Pregunta General: ¿Cómo se pueden determinar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba mediante el análisis espectral de las señales ambientales, contribuyendo a la conservación y manejo sostenible del ecosistema?

Preguntas Específicas:

- ¿Qué señales ambientales y parámetros espectrales son relevantes para la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba?
- ¿Cómo se pueden aplicar técnicas de análisis espectral sobre las señales ambientales registradas para estimar con precisión los niveles de oxígeno?
- ¿Cómo podemos validar la precisión del análisis espectral comparando los resultados obtenidos con mediciones directas en el bosque?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba mediante el análisis espectral de señales ambientales, contribuyendo a la conservación y manejo sostenible del ecosistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar las señales ambientales que influyen en la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba, mediante el análisis de sus parámetros físicos y espectrales, estableciendo una base de estudio en la caracterización del ecosistema.
- Aplicar técnicas de análisis espectral sobre las señales ambientales registradas, utilizando herramientas de procesamiento digital de señales, obteniendo información que permita la estimación de los niveles de oxígeno.
- Validar los resultados del análisis espectral mediante la comparación a través de mediciones en el Bosque Protector Murocomba, utilizando métodos de correlación estadística, garantizando la precisión y fiabilidad de la metodología en el monitoreo ambiental.

1.3 Justificación

El Bosque Protector Murocomba enfrenta una potencial problemática ambiental relacionada con su capacidad para absorber CO₂ y producir oxígeno. Aunque aún no se ha comprobado que este ecosistema haya perdido oxígeno de forma significativa, los bosques tropicales en general han experimentado una disminución de su capacidad para actuar como sumideros de carbono y productores de oxígeno debido a factores como la deforestación, el cambio climático y la degradación del suelo. Este fenómeno ha alterado el equilibrio ecológico en varias regiones tropicales, lo que hace necesario implementar métodos de monitoreo más precisos y continuos [8].

Estudios realizados en otros bosques tropicales han evidenciado que la reducción de la biomasa forestal está afectando la dinámica de gases como el oxígeno. Dado que estos ecosistemas son clave para la regulación del clima, la pérdida de su capacidad para absorber CO₂ y generar oxígeno puede tener consecuencias devastadoras para la biodiversidad y el bienestar de las comunidades que dependen de estos bosques. Aunque no se ha detectado aún un deterioro similar en el Bosque Protector Murocomba, el riesgo de que se presenten problemas similares exige medidas preventivas [9].

El presente estudio busca utilizar el análisis espectral de señales ambientales para estimar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba mediante el uso de tecnologías avanzadas en telecomunicaciones y procesamiento de señales. Con esta metodología, se pretende realizar un monitoreo más eficiente y no invasivo, lo cual permitiría detectar a tiempo cualquier variación en los niveles de oxígeno y anticiparse a posibles alteraciones en el ecosistema, contribuyendo a su conservación y manejo adecuado [10].

Además, la investigación se alinea con la misión de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), que promueve la formación de profesionales en las áreas de informática y telecomunicaciones, comprometidos con el desarrollo de soluciones innovadoras para problemas ambientales. Al integrar tecnología de vanguardia en la evaluación de los ecosistemas, este estudio no solo aporta a la ciencia ambiental, sino que también refuerza el compromiso de la universidad con el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente [11].

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Espectroscopia Ambiental

La espectroscopia es una técnica fundamental para analizar la interacción entre la radiación electromagnética y los gases atmosféricos. La tecnología se ha convertido en una herramienta clave en el monitoreo ambiental, permitiendo detectar gases como el oxígeno a través de sus bandas de absorción en el espectro visible e infrarrojo cercano. Su precisión, puede aplicarse eficazmente en ecosistemas tropicales para estudiar el comportamiento gaseoso sin necesidad de intervención directa. La espectroscopia ambiental, por tanto, constituye un método no invasivo y confiable para la evaluación del aire y la biodiversidad en zonas protegidas como el Bosque Murocomba [12].

2.1.2 Señales ambientales y reflectancia vegetal

La reflectancia vegetal está estrechamente ligada a la actividad fotosintética y a las condiciones fisiológicas de las plantas. Diferentes especies presentan firmas espectrales particulares en función del contenido de clorofila, humedad y estado fenológico [8]. Dichas variaciones permiten inferir de forma indirecta los niveles de oxígeno en el entorno, ya que la actividad fotosintética es el principal proceso de producción del este gas y el análisis de estas señales ambientales mediante sensores ópticos contribuye a estimar la dinámica del oxígeno en ecosistemas forestales [13].

2.1.3 Sensores hiperspectrales y portátiles

Los sensores hiperspectrales capturan una amplia gama de bandas espectrales y permiten detectar gases traza con alta sensibilidad. Su uso se ha extendido a estudios de campo gracias a versiones portátiles que operan en tiempo real. Los dispositivos permiten realizar un muestreo espacial detallado del ecosistema, facilitando la caracterización espectral del oxígeno y otros componentes atmosféricos [14]. Su precisión y facilidad de uso los convierten en herramientas ideales para estudios ecológicos en zonas de difícil acceso.

2.1.4 Técnica DOAS (Espectroscopia de absorción óptica diferencial)

El método DOAS ha sido ampliamente utilizado en estudios atmosféricos por su capacidad para detectar gases a bajas concentraciones a partir de la absorción diferencial de la luz. En investigaciones recientes se ha demostrado que DOAS permite cuantificar con alta precisión

la concentración de oxígeno en función de su comportamiento espectral en rangos específicos de longitud de onda [15]. La técnica resulta esencial como complemento a otras mediciones ópticas, asegurando la confiabilidad de los datos recolectados en campo.

2.1.4.1 Características Técnicas del Chipset AS7265x

Para la adquisición de datos espectrales en el rango visible e infrarrojo cercano (VIS-NIR), se destaca el uso de sensores multispectrales integrados. Específicamente, el chipset AS7265x desarrollado por ams AG representa una solución de estado sólido compacta. Este sistema se basa en la integración de filtros de interferencia nano-ópticos depositados directamente sobre la oblea de silicio, lo que permite una discriminación precisa de longitudes de onda sin la necesidad de ópticas difractivas voluminosas. A diferencia de los espectrómetros tradicionales, esta arquitectura permite la implementación de análisis espectral en dispositivos portátiles o embebidos, ofreciendo una resolución de 18 canales discretos distribuidos entre 410 nm y 940 nm [16].

2.1.5 Procesamiento de Señales Espectrales

La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es ampliamente utilizada para analizar señales espectrales debido a su capacidad para revelar frecuencias dominantes relacionadas con patrones de absorción. En el procesamiento de datos ambientales, esta herramienta permite discriminar los picos asociados a la absorción de gases como el oxígeno ya que su aplicación combinada con filtros digitales mejorando la calidad de la señal y permitiendo una interpretación más precisa de los datos [16].

2.1.6 Aplicación de MATLAB en Análisis Espectral

MATLAB es una plataforma computacional utilizada en procesamiento de señales y análisis espectral. Su capacidad para integrar algoritmos personalizados, realizar análisis estadísticos y generar representaciones gráficas lo que convierte en un instrumento robusto en investigaciones ambientales. Además, permite automatizar procesos como la detección de picos de absorción, la estimación de concentraciones y la validación de resultados mediante correlaciones [17].

2.1.7 Relevancia del Monitoreo de Oxígeno en Ecosistemas

El monitoreo del oxígeno atmosférico permite evaluar la salud de los ecosistemas y su capacidad de actuar como sumideros de carbono. En los últimos años, se ha observado una

reducción significativa en la producción de oxígeno en varios bosques tropicales, atribuida a la deforestación y al cambio climático. Este fenómeno ha incentivado el uso de tecnologías de monitoreo remoto que permitan generar alertas tempranas sobre la pérdida de función ecológica de estas áreas. Por ello, el uso de espectroscopia para monitorear oxígeno es una herramienta clave en la gestión sostenible de la biodiversidad.

2.1.8 Diseño e Implementación de Modelos

El diseño de los modelos de estimación de oxígeno se basa en la implementación de algoritmos de análisis espectral utilizando plataformas computacionales como MATLAB, así aplicando métodos de procesamiento digital de señales.

Optimizar la interpretación de datos espectrales, los sensores hiperspectrales portátiles proporcionarán los datos de reflectancia que serán calibrados y normalizados previamente, siguiendo los protocolos sugeridos.

Una vez preprocesados los datos, se diseñaron modelos estadísticos multivariantes y de regresión para establecer la correlación entre los parámetros espectrales y las concentraciones reales de oxígeno registradas por el analizador de oxígeno. Además, se tomarán enfoques de aprendizaje automático como el Support Vector Regression (SVR), siguiendo la metodología planteada, con el objetivo de optimizar la capacidad predictiva de los modelos bajo diversas condiciones ambientales y meteorológicas.

Para mejorar la eficiencia de cálculo, se aplicará la técnica de selección de bandas espectrales relevantes, evitando la redundancia de información y priorizando aquellas longitudes de onda que presentan mayor sensibilidad a la absorción de oxígeno. Finalmente, los modelos serán sometidos a procesos de validación cruzada y ajustes iterativos, buscando minimizar los errores de predicción y maximizar su aplicabilidad práctica en el ecosistema del Bosque Protector Murocomba.

2.1.8.1 Sistema de Adquisición Espectral

El componente central para la identificación espectral es el chipset AS7265x. Este dispositivo se compone de tres unidades sensoras interconectadas (AS72651, AS72652 y AS72653) que operan en conjunto para cubrir un espectro electromagnético desde 410 nm hasta 940 nm.

- **Especificaciones Técnicas:** El hardware presenta las siguientes características operativas, según la hoja de datos del fabricante:
- **Resolución Espectral:** El sistema cuenta con 18 canales independientes con un ancho de banda a media altura (FWHM) de 20 nm por canal.
- **Arquitectura Lógica:** El sensor AS72651 actúa como dispositivo maestro, gestionando la comunicación con los sensores esclavos (AS72652 y AS72653) y consolidando los datos para su transmisión a través de interfaces I²C o UART.
- **Conversión Digital:** La digitalización de la señal óptica se realiza internamente mediante convertidores analógico-digitales (ADC) de 16 bits, eliminando la necesidad de acondicionamiento de señal externo.
- **Condiciones de Operación:** El módulo es alimentado con una tensión nominal de 3.3 V y opera en un rango térmico de -40°C a 85°C.
- **Características Físicas:** Los sensores poseen un encapsulado tipo LGA de 20 pines con dimensiones de 4.5 mm x 4.7 mm x 2.5 mm, integrando una apertura óptica calibrada.

2.2 Marco Referencial

“Relaciones entre la estructura forestal, la radiación solar y la comunidad vegetal en plantaciones de pino ponderosa en la estepa patagónica” [6].

El estudio explora cómo la radiación solar y la estructura forestal afectan la fotosíntesis y la producción de oxígeno en los ecosistemas forestales. Los resultados son relevantes para identificar señales ambientales que influyen en la dinámica de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba.

“La diversidad evolutiva influye en la biomasa y la productividad de los bosques tropicales a través de vías ecológicas mediadas por perturbaciones” [7].

El presente trabajo analiza cómo la diversidad ecológica y la biomasa forestal afectan la productividad de los bosques tropicales, lo que influye en la generación de oxígeno. Los hallazgos se aplican al estudio del Bosque Protector Murocomba.

“Selección de bandas para la estimación de la oxigenación con imágenes hiperespectrales” [18].

El estudio aplica la selección de bandas espectrales para estimar niveles de oxígeno utilizando sensores hiperespectrales, que es una técnica utilizada en el presente estudio para procesar señales espectrales y obtener estimaciones precisas de oxígeno.

“Predicción por satélite de la hipoxia costera en el norte del Golfo de México” [19].

El trabajo utiliza sensores remotos y técnicas de análisis espectral para estimar la hipoxia en ambientes marinos. La metodología descrita se puede adaptar para estimar niveles de oxígeno en bosques tropicales mediante técnicas similares de sensores espectrales.

“Monitorización del oxígeno en los bosques tropicales: abordando el cambio climático y la deforestación” [11].

El presente estudio aborda el monitoreo de oxígeno en bosques tropicales mediante tecnologías espectrales y presenta validaciones cruzadas de los resultados. El referido enfoque es esencial para validar la metodología aplicada en el Bosque Protector Murocomba.

“Detección espectral en tiempo real de emisiones gaseosas en ecosistemas forestales” [12].

Este trabajo se centra en el uso de sensores espectrales en tiempo real para la medición de gases en ecosistemas forestales, con un enfoque en la validación de modelos predictivos mediante correlación estadística. El enfoque es directamente aplicable a la validación de los modelos obtenidos en el estudio.

“Uso de DOAS (Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial)”

La técnica DOAS ha sido ampliamente utilizada en la medición de gases en entornos naturales. Y. W. e. al. [2] demostraron la efectividad del DOAS para detectar gases como el oxígeno y el CO₂ a bajas concentraciones en tiempo real en ambientes terrestres. Su estudio validó el uso de sensores espectrales en zonas de difícil acceso, como bosques tropicales, y destacó su precisión para monitorear gases traza sin intervención invasiva, lo que hace de esta técnica una opción ideal para el Bosque Protector Murocomba, que también presenta desafíos logísticos para la instalación de equipos convencionales de monitoreo de gases.

“Sensores Hiperespectrales para el Monitoreo de Gases en Bosques Tropicales”

Ayala et al. [8] implementaron sensores hiperespectrales para la estimación de gases en bosques tropicales, demostrando cómo estos dispositivos pueden capturar una amplia gama de bandas espectrales relacionadas con la fotosíntesis y otros procesos biogeoquímicos. Al aplicar este enfoque en ecosistemas como la Amazonía, encontraron que las bandas

espectrales específicas, como las asociadas a la clorofila, podían correlacionarse de manera precisa con la actividad fotosintética y la producción de oxígeno. Dicho estudio valida la aplicación de sensores hiperspectrales portátiles, como el AS7265x que se utilizará en el Bosque Protector Murocomba, para capturar señales de reflectancia vegetal que podrían correlacionarse con los niveles de oxígeno en la atmósfera.

“Modelos de Aprendizaje Automático para la Estimación de Oxígeno”

Guo et al. [20] emplearon un modelo de regresión vectorial de soporte (SVR) combinado con datos de imágenes satelitales y sensores espectrales para predecir los niveles de oxígeno disuelto en cuerpos de agua. Aunque este estudio se centró en ambientes acuáticos, su metodología de correlación espectral y la validación cruzada son transferibles a entornos terrestres como el Bosque Protector Murocomba. Al integrar estos modelos con algoritmos de aprendizaje automático, como el SVR, se pueden obtener estimaciones precisas de los niveles de oxígeno atmosférico basadas en las señales espectrales registradas por el sensor AS7265x.

2.3 Marco legal

2.3.1 Legislación Ambiental En Ecuador

2.3.1.1 Constitución De La Republica Del Ecuador (2008).

"La naturaleza, o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos". (Art. 71)

Esta disposición establece que los ecosistemas son sujetos de derechos, lo que implica que todas las actividades humanas, tanto públicas como privadas, deben ser diseñadas y ejecutadas de manera que no comprometan la salud de los ecosistemas. En caso de daño, se deben establecer mecanismos de restauración efectivos.

"El Estado aplicará medidas de precaución y restricción para las actividades que puedan conducir a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales" (Art. 73).

El principio refuerza la responsabilidad estatal para garantizar un ambiente sano mediante la adopción de medidas preventivas.

2.3.1.2 Ley De Gestión Ambiental (1999).

"Es de interés público la conservación del medio ambiente, el uso sostenible de los recursos naturales y la preservación del equilibrio ecológico" (Art. 1).

El artículo resalta el objetivo primordial de la ley, que es proteger el medio ambiente y promover el uso responsable de los recursos naturales.

"El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica autorizará las actividades científicas en áreas protegidas, condicionando los permisos a la presentación de un plan de trabajo con medidas de mitigación". (Art. 14)

En este artículo es relevante para las investigaciones científicas que se desarrollan en áreas protegidas, como el Bosque Protector Murocomba, donde se deben cumplir los protocolos establecidos por las autoridades ambientales.

2.3.1.3 Código Orgánico Del Ambiente (Coa, 2017).

"Las zonas que forman parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas deben administrarse bajo principios que garanticen la sostenibilidad y conservación de la biodiversidad" (Art. 143).

Dicho artículo establece que todas las actividades que se realicen dentro de las áreas protegidas deben garantizar la conservación de la biodiversidad y el equilibrio ecológico.

"Cualquier intervención dentro de estas áreas, incluyendo la instalación de cámaras trampa o sensores acústicos, debe contar con los permisos correspondientes del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y ajustarse a los planes de manejo aprobados" (Art. 153).

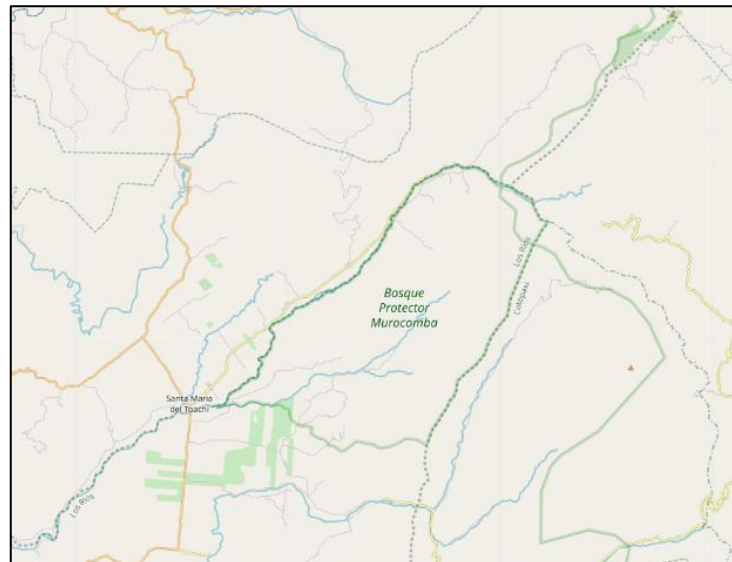
El artículo subraya la importancia de cumplir con las normas legales antes de realizar cualquier actividad dentro de las zonas protegidas, asegurando así la protección y el manejo sostenible de estos ecosistemas.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

La investigación se desarrolló en el Bosque Protector Murocomba, perteneciente al cantón Valencia, en la provincia de Los Ríos. Este ecosistema tropical húmedo se caracteriza por una elevada biodiversidad vegetal y climática, siendo clave para la regulación hídrica y gaseosa de la región. El bosque presenta una cobertura boscosa densa, con especies endémicas y una alta tasa de humedad relativa, lo que convirtió en un entorno ideal para estudios de intercambio gaseoso. Ubicado dentro de las coordenadas UTM: Latitud 705511E y Longitud 9930735N, a una altitud de 526 msnm. La zona ha sido objeto de iniciativas de conservación y cuenta con acceso permitido para actividades ambientales y recolección de datos. La selección de este sitio responde a su importancia ecológica como a su accesibilidad logística para la instalación de sensores portátiles y equipos de espectroscopía.

Ilustración 1. Ubicación del bosque protector Murocomba.



Fuente: Cuencas hidrográficas globales [21]

3.2 Tipos de investigación

3.2.1 Investigación exploratoria

El presente trabajo es de carácter exploratorio ya que aborda un ecosistema tropical nativo, el Bosque Protector Murocomba, donde aún existen vacíos de conocimiento con relación a los niveles de oxígeno atmosférico y su monitoreo mediante técnicas espectrales. Hasta el momento, los métodos tradicionales de evaluación ambiental en estos ecosistemas se han centrado en parámetros fisicoquímicos y cobertura vegetal, sin incorporar tecnologías ópticas avanzadas no invasivas. En esta investigación permitió explorar la viabilidad de

aplicar sensores espectrofotométricos portátiles, algoritmos de procesamiento de señales y aprendizaje automático en un entorno forestal protegido, generando así un nuevo campo de estudio local. La investigación abrirá nuevas posibilidades para el monitoreo ambiental continuo sin afectar la biodiversidad. Además, constituye una referencia inicial para posteriores proyectos de monitoreo ecológico automatizado en ecosistemas similares.

3.2.2 Investigación descriptiva

El proyecto tiene también un componente descriptivo, al buscar caracterizar los patrones espectrales detectados en el bosque y su relación con los niveles de oxígeno presentes. A partir de las señales capturadas por los sensores ópticos portátiles, se establecerán descripciones detalladas de la reflectancia de la vegetación, su variación a lo largo del día, las condiciones climáticas, y su asociación con los procesos fotosintéticos. Los datos obtenidos permitirán documentar cómo fluctúan las firmas espectrales bajo diferentes coberturas arbóreas y niveles de humedad, proporcionando descripciones cuantificables sobre el comportamiento atmosférico del ecosistema. La caracterización contribuirá a entender mejor la dinámica gaseosa local y su influencia sobre el equilibrio ecológico del bosque.

3.2.3 Investigación cuantitativa

La investigación presenta un enfoque cuantitativo al realizar el procesamiento estadístico de los datos obtenidos. Las señales espectrales capturadas serán tratadas numéricamente mediante técnicas filtros digitales y análisis de picos de absorción, aplicados en MATLAB. Posteriormente, se implementaron modelos estadísticos multivariantes y algoritmos de regresión, buscando establecer correlaciones sólidas entre los parámetros espectrales y los niveles de oxígeno medidos en campo mediante analizador de oxígeno. El enfoque cuantitativo permitió validar la precisión predictiva de los modelos y generar resultados objetivos y reproducibles. Los datos son sometidos a validación cruzada para asegurar la fiabilidad de las estimaciones en diferentes condiciones ambientales propias del bosque.

3.2.4 Investigación Bibliográfica

La presente investigación está respaldada por un sólido componente bibliográfico, basado en la revisión de literatura científica actualizada sobre técnicas espectrales, sensores ópticos portátiles, aprendizaje automático y monitoreo de gases en ecosistemas naturales. Se

consideran antecedentes recientes que demuestran la aplicabilidad de algoritmos de aprendizaje supervisado, como Support Vector Regression y Random Forest, en la estimación indirecta de oxígeno en entornos acuáticos y terrestres. Además, se incorporan estudios relacionados con la selección de bandas espectrales relevantes para optimizar la captura de datos y reducir la redundancia informativa. El soporte teórico proporciona el marco de referencia necesario para adaptar estas metodologías al contexto del Bosque Protector Murocomba, fortaleciendo la validez del diseño experimental propuesto.

3.3 Métodos de investigación

3.3.1 *Método científico*

El presente estudio se basa en el método científico, integrando un enfoque experimental que articula de manera ordenada la observación sistemática, la recolección precisa de datos, el análisis cuantitativo y la validación objetiva de los resultados obtenidos. Para ello, se emplearon sensores espectrofotométricos portátiles capaces de captar reflectancia en diferentes condiciones ambientales como variaciones de humedad, temperatura, cobertura vegetal y radiación solar dentro del Bosque Protector Murocomba, donde se establecieron estratégicamente diversos puntos de muestreo según criterios ecológicos y topográficos. En cada sitio se ejecutaron mediciones espectrales estandarizadas junto con registros simultáneos de oxígeno, con el objetivo de identificar las bandas espectrales más sensibles a los procesos fotosintéticos y analizar su relación funcional con la dinámica de producción de oxígeno en el ecosistema. Posteriormente, los datos fueron sometidos a procesos de depuración, modelamiento estadístico y comparación experimental para determinar patrones de comportamiento que permitan validar la aplicabilidad de métodos ópticos y computacionales en el monitoreo no invasivo de gases atmosféricos. El procedimiento incluyó la calibración del sensor, el control estricto de variables externas, la selección de horario de medición y el ajuste de modelos de regresión, garantizando así la reproducibilidad y solidez del análisis. En conjunto, la aplicación disciplinada del método científico posibilita comprender de manera más profunda la interacción entre la vegetación y la disponibilidad de oxígeno, aportando bases técnicas y metodológicas para el diseño de estrategias de conservación y para el desarrollo de herramientas de monitoreo ambiental más eficientes dentro del bosque.

3.3.2 Método correlacional

Dado que el objetivo es establecer la relación entre los parámetros espectrales y los niveles de oxígeno medidos, la investigación adopta también un enfoque correlacional. Los datos obtenidos serán sometidos a análisis de correlación multivariable, regresiones lineales y no lineales, y validaciones cruzadas. Este método permitirá cuantificar el grado de asociación existente entre las bandas espectrales seleccionadas y las concentraciones reales de oxígeno registradas. Así, se podrá determinar la validez predictiva de los modelos desarrollados, estableciendo indicadores de precisión y confiabilidad. La correlación permitirá convertir señales espectrales indirectas en estimaciones aproximadas de niveles de oxígeno atmosférico.

3.4 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es cuantitativo y semi-experimental. Para ello, se utilizarán sensores espectrofotométricos portátiles para recolectar datos de reflectancia en diferentes puntos del bosque, bajo diversas condiciones ambientales (radiación solar, humedad, temperatura, cobertura vegetal). Los puntos de muestreo serán seleccionados estratégicamente dentro del bosque para garantizar la representatividad de las condiciones del ecosistema.

Se tomarán medidas en varios momentos del día para capturar la variabilidad temporal en las señales espectrales. La recolección de datos se llevará a cabo de manera sistemática durante un período determinado para asegurar que los resultados reflejen una visión precisa de la dinámica gaseosa del bosque.

3.4.1 Procesamiento y Análisis de los Datos

Una vez obtenidos los datos, se emplearán métodos de procesamiento digital de señales para identificar las frecuencias dominantes asociadas a la absorción de gases como el oxígeno. A continuación, se aplicarán modelos estadísticos multivariantes para establecer las correlaciones entre las bandas espectrales y las concentraciones de oxígeno registradas.

3.4.2 Validación de Resultados

Los modelos serán validados utilizando métodos de validación cruzada. Los resultados obtenidos de los sensores espectrofotométricos se compararán con las mediciones directas

de oxígeno para verificar la precisión de las estimaciones. Se calcularán indicadores como el Error Cuadrático Medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar la fiabilidad y aplicabilidad de los modelos. El enfoque metodológico permite comprobar la viabilidad de aplicar técnicas ópticas y computacionales para el monitoreo no invasivo de gases atmosféricos, proporcionando una herramienta precisa y continua para el monitoreo ecológico del Bosque Protector Murocomba.

3.5 Estructura de la investigación

3.5.1 Fase 1: Revisión documental y análisis bibliográfico

En esta fase inicial se realizará la recopilación de antecedentes científicos relacionados con el monitoreo de oxígeno mediante técnicas ópticas. Se revisarán investigaciones recientes sobre sensores hiperespectrales, algoritmos de procesamiento espectral, selección de bandas ópticas y validación de modelos predictivos. Este análisis bibliográfico permitirá identificar las metodologías más efectivas, los rangos espectrales óptimos y las técnicas de validación aplicadas en estudios similares. La información obtenida será la base para adaptar las herramientas tecnológicas al contexto ecológico del Bosque Protector Murocomba.

3.5.2 Fase 2: Planificación del trabajo de campo

Durante esta etapa se definirán los sitios específicos de muestreo dentro del bosque, considerando factores como diversidad de cobertura vegetal, accesibilidad, pendiente y representatividad ecológica. Se establecerán las coordenadas geográficas de cada punto mediante GPS para garantizar la trazabilidad de los datos. Además, se programarán los horarios de medición, priorizando diferentes momentos del día para evaluar posibles variaciones en las señales espectrales. También se realizará la calibración previa de los sensores espectrales.

3.5.3 Fase 3: Captura de datos espectrales y ambientales

En el trabajo de campo se recolectarán los datos espectrales mediante sensores portátiles, capturando la reflectancia de la vegetación en el rango visible e infrarrojo cercano. De forma paralela, en cada sitio de muestreo se registrarán las concentraciones reales de oxígeno mediante analizador de oxígeno, junto con variables ambientales como humedad, temperatura y cobertura arbórea. Los datos serán almacenados digitalmente, etiquetados y

respaldados para su posterior procesamiento. Este levantamiento de datos será fundamental para establecer las bases del análisis correlacional.

3.5.4 Fase 4: Procesamiento y análisis de señales

Los datos espectrales obtenidos serán preprocesados en MATLAB, aplicando filtrado digital, normalización y detección de picos de absorción. Posteriormente, se realizará la selección de bandas espectrales más representativas empleando algoritmos estadísticos de reducción de dimensionalidad. Con los datos depurados, se construirán modelos de regresión multivariable, correlación estadística que permitirán estimar los niveles de oxígeno en función de las señales espectrales registradas.

3.5.5 Fase 5: Validación de modelos y resultados

Finalmente, se realizará la validación cruzada de los modelos generados, comparando las estimaciones de oxígeno obtenidas a partir del análisis espectral con los valores reales medidos en campo. Se calcularán indicadores de error como el RMSE (Error Cuadrático Medio), coeficientes de determinación (R^2) y niveles de significancia estadística.

3.6 Recursos y materiales

Tabla 1. Cuadro Comparativo de Sensores.

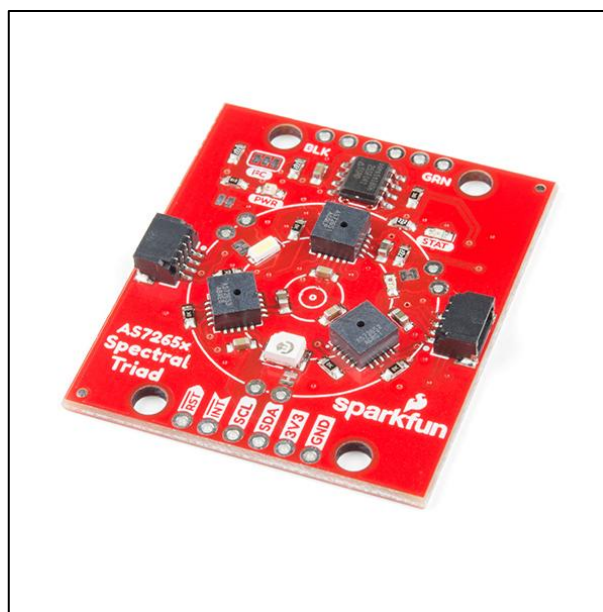
Característica	AS7262 BREAKOUT	AS7341	AS7265X
Tipo De Sensor	Espectrómetro multicanal (6 canales)	Sensor de espectro visible (9 canales)	Sensor espectral multicanal (3 sensores espectrales)
Rango Espectral	450-850 nm (UV-VIS)	400-940 nm (Visible + parte del NIR)	300-1050 nm (UV-VIS-NIR)
Resolución Espectral	Aproximadamente 10 nm por canal	20 nm por canal	10 nm por canal
Precisión	Alta precisión en el rango visible	Alta precisión en el espectro visible	Alta precisión en UV, VIS, NIR
Portabilidad	Portátil, tamaño compacto	Portátil, fácil de integrar	Portátil, fácil de integrar

Aplicaciones	Monitoreo ambiental, agricultura, análisis de vegetación	Monitoreo ambiental, control de calidad en productos, vegetación	Monitoreo ambiental, calidad del aire, vegetación, agricultura
Interfaz Y Facilidad De Uso	Comunicación I2C, fácil integración con microcontroladores	Comunicación I2C, fácil integración con microcontroladores	Comunicación I2C, interfaz Qwiic, sin soldadura, fácil integración con microcontroladores
Tiempo De Respuesta	200 ms por lectura	100 ms por lectura	100 ms por lectura
Espectroscopia	6 canales en el rango de UV-VIS	9 canales en el rango de VIS-NIR	3 sensores espectrales (UV, VIS, NIR)

Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Ilustración 2. Sensor AS7265x



Fuente: Sensor de espectroscopia SparkFun Triad - AS7265x (Qwiic) [22].

El AS7265x fue el sensor ideal para el proyecto debido a su cobertura espectral amplia, precisión en múltiples rangos espectrales, facilidad de integración y costo accesible. Al elegir el sensor, se aseguró un análisis completo y detallado de las señales ambientales en el

Bosque Protector Murocomba, contribuyendo al monitoreo no invasivo de la producción de oxígeno y otros parámetros ambientales cruciales para la conservación del ecosistema.

3.6.1 Protocolos de Calibración del Sensor AS7265x

El sensor AS7265x requiere un proceso de calibración previo antes de ser utilizado en campo para garantizar que las lecturas sean precisas y representen de manera confiable los niveles de oxígeno atmosférico. A continuación, se describen los pasos para la calibración de este sensor:

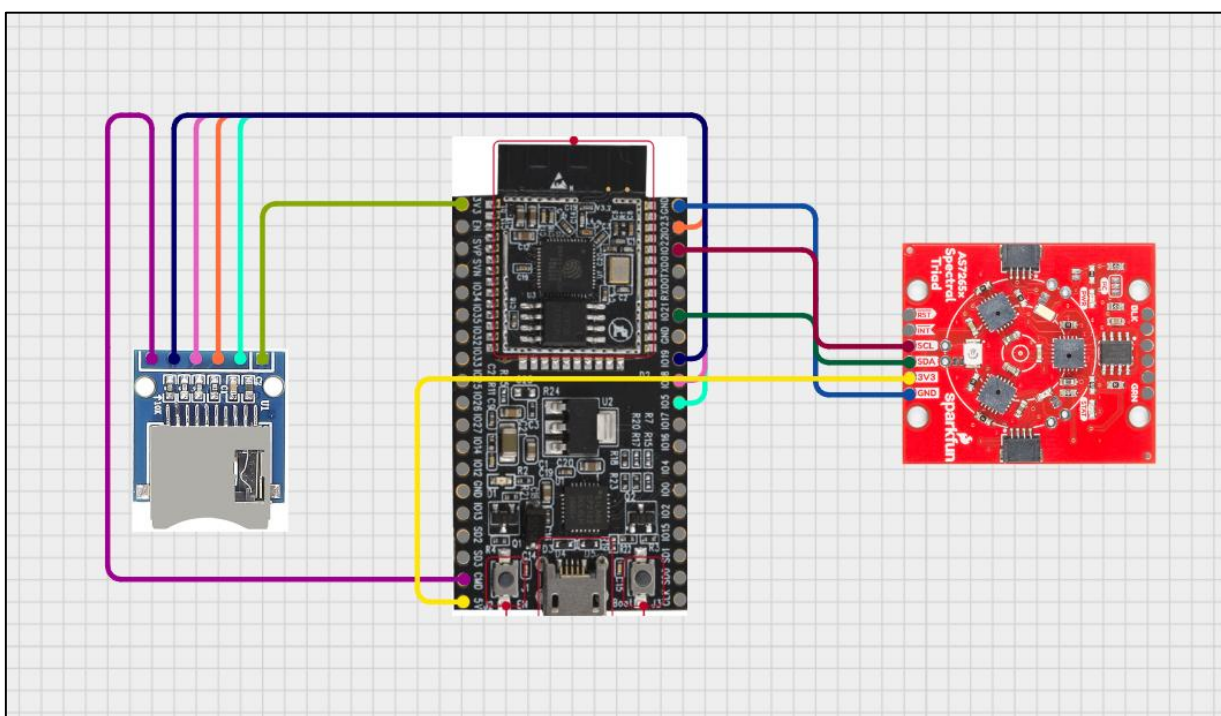
- **Selección de condiciones de calibración:** El sensor debe ser calibrado en un entorno controlado antes de su uso en campo. Se deben establecer condiciones de calibración a temperatura y humedad constantes, preferentemente en un laboratorio donde se pueda controlar la concentración de oxígeno en el aire.
- **Generación de un calibrador de oxígeno:** Utilizando un analizador de oxígeno de referencia (como un analizador de oxígeno de alta precisión), se establece la concentración exacta de oxígeno en el aire. Estas mediciones servirán para correlacionar las lecturas del sensor AS7265x con las concentraciones de oxígeno conocidas.
- **Registro de datos espectrales de referencia:** A continuación, se realiza la captura de datos espectrales utilizando el sensor AS7265x a diferentes concentraciones de oxígeno conocidas. El sensor registrará las intensidades de luz reflejada en las longitudes de onda correspondientes al oxígeno (por ejemplo, en el rango cercano al infrarrojo), mientras el analizador de oxígeno de referencia toma mediciones precisas de la concentración de oxígeno.
- **Análisis y ajuste de los datos:** Los datos espectrales obtenidos del AS7265x se comparan con las mediciones del analizador de oxígeno de referencia. Usando métodos estadísticos y algoritmos de regresión (como regresión lineal o modelos de machine learning), se ajustan las señales espectrales para correlacionar con los niveles de oxígeno en la atmósfera.
- **Validación de la calibración:** Después de ajustar el modelo, se debe validar la calibración en condiciones ambientales que varíen respecto a las condiciones de calibración inicial (por ejemplo, a diferentes temperaturas, humedades y concentraciones de CO₂). Este paso asegura que el sensor pueda proporcionar

lecturas precisas en un entorno más realista y dinámico como el Bosque Protector Murocomba.

- **Ajuste final y prueba en campo:** Después de realizar las correcciones y ajustes, el sensor AS7265x estará listo para ser implementado en campo. Se deberá realizar una prueba piloto en el Bosque Protector Murocomba para asegurar que las mediciones obtenidas en condiciones naturales sean consistentes con las mediciones previas obtenidas durante la calibración.

Al utilizar analizadores de oxígeno adecuados como el sensor AS7265x, y seguir un protocolo de calibración riguroso, se garantiza que las mediciones de oxígeno atmosférico sean precisas y confiables. Este enfoque no solo mejora la calidad de los datos obtenidos en el Bosque Protector Murocomba, sino que también permite un monitoreo no invasivo y en tiempo real de los niveles de oxígeno, lo que es crucial para la conservación de este ecosistema vital.

Ilustración 3. Circuito del sensor AS7265x.



Fuente: Cirkuit Designer [23].

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis de los requerimientos energéticos del sistema se fundamenta en la evaluación del consumo de corriente individual de los componentes integrados en el circuito¹. El componente principal, el microcontrolador ESP32, representa la carga más significativa; aunque su consumo oscila entre 160 mA y 240 mA durante la transmisión activa de WiFi y desciende a un rango de 80 mA a 100 mA en funcionamiento normal, se establece un consumo promedio operativo de 150 mA asumiendo un envío ocasional de datos. A esto se suma el sensor espectral SparkFun AS7265x, cuyo consumo está dictado por el uso de sus LEDs integrados, variando desde 5 mA en reposo hasta picos de 100 mA durante la activación; para este cálculo se estima un promedio de 20 mA considerando lecturas intermitentes. Adicionalmente, el módulo Micro SD contribuye con un consumo estimado de 5 mA, cifra que promedia los picos de 100 mA durante la escritura y los 2 mA en estado de espera, resultando en una corriente de carga total del sistema de 175 mA.

Consumo Total Aproximado:

$$150mA + 20mA + 5mA = 175mA$$

La capacidad de las Baterías dependiendo de cómo se conecte las 4 pilas, cambiará el voltaje y la capacidad. Usando pilas alcalinas estándar (aprox. 2500 mAh cada una) tiene una conexión en serie, el ESP32 tiene un regulador de voltaje que acepta 5V (por el pin VIN/5V). 4 pilas AA en serie dan 6V (1.5V x 4).

- **Voltaje Total:** 6V
- **Capacidad Total:** La capacidad se mantiene igual a la de una sola pila en serie.
- **Capacidad:** 2500 mAh.

Cálculo de la Duración:

Ecuación 1. Estimación de Consumo y Autonomía Energética del Sistema

$$Tiempo = \frac{Capacidad\ de\ Bateria\ (mAh)}{Consumo\ del\ Dispositivo(mA)} \times n$$

n: Factor de eficiencia del regulador y degradación de batería (estimado en 0.7 o 70%).

Calculo:

$$Tiempo = \frac{2500mAh}{175mA} \times 0.7$$

$$Tiempo = 14.28 \times 0.7 \approx 10.0Horas$$

Tabla 2. *Análisis energético escenarios alternativos.*

Escenario	Consumo Aprox.	Duración Estimada (4xAA)
Alto Rendimiento (WiFi siempre on, LEDs sensor on)	~300 mA	~5 a 6 horas
Uso Promedio (Lectura y envío cada X segundos)	~175 mA	~10 horas
Modo "Deep Sleep" (Dormido y despierta cada 10 min)	~10 mA (promedio)	~1 semana o más

Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis energético realizado demuestra la viabilidad técnica del sistema propuesto bajo condiciones de alimentación portátil. Si bien la carga total estimada en 175 mA permite una autonomía operativa cercana a las 10 horas con un banco de baterías alcalinas estándar, este rendimiento valida el diseño para aplicaciones de monitoreo de jornada completa o sesiones de recolección de datos ininterrumpidas.

Para la presente fase experimental, el sistema se ha configurado deliberadamente en un perfil operativo de 'Alto Rendimiento'. La modalidad implica mantener el transceptor WiFi del ESP32 en estado de conexión activa continua para garantizar la latencia mínima en la transmisión de telemetría hacia Firebase, simultáneamente con la activación constante de la iluminación LED del sensor AS7265x para asegurar una irradiancia uniforme sobre las muestras. Bajo estas condiciones de máxima exigencia, el consumo de corriente del circuito se estabiliza en un promedio de 300 mA. Si bien este régimen energético reduce la autonomía del banco de baterías (4xAA) a un intervalo estimado de 5 a 6 horas, dicha configuración es crítica en esta etapa para validar la integridad de la adquisición espectral y la estabilidad del enlace de red, eliminando las variables de interrupción introducidas por los protocolos de ahorro de energía.

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera fase de esta investigación, se llevó a cabo un proceso de caracterización espectral utilizando el sensor SparkFun AS7265x, que permitió la captura de firmas ópticas en 18 bandas espectrales discretas distribuidas en los rangos ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR). El referido sensor, que integra iluminación LED interna en los tres rangos mencionados y utiliza el protocolo de comunicación I2C sin requerir soldadura, demostró ser adecuado para mediciones portátiles en campo, minimizando la intervención sobre el entorno natural.

Los datos espectrales recolectados fueron fundamentales para identificar variables biofísicas clave relacionadas con la actividad fotosintética de la vegetación. Entre las bandas más relevantes se destacan las correspondientes a la clorofila a (645 nm) y b (485 nm), así como las asociadas al contenido hídrico (940 nm), estructura foliar y signos de estrés térmico (705–760 nm). La identificación de estas bandas espectrales permitió diferenciar con precisión condiciones fisiológicas de la vegetación en distintas zonas del bosque, bajo diferentes estados hídricos, térmicos y lumínicos. Como parte de este análisis, se identificaron sistemáticamente seis variables ambientales con incidencia directa en la producción de oxígeno: radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), precipitación y cobertura vegetal. Estas variables no solo están respaldadas por la literatura científica, sino que además presentaron correlación con las bandas espectrales detectadas por el sensor, lo que confirma su relevancia para la estimación indirecta de oxigenación en el ecosistema.

La integración de las variables ambientales con los datos espectrales permitió construir una base de datos inicial que caracteriza de forma preliminar el entorno ecológico del Bosque Protector Murocomba. Esta base será clave en las siguientes fases del estudio, orientadas a desarrollar modelos estadísticos y de aprendizaje automático que permitan predecir los niveles de oxígeno a partir de señales ópticas. En síntesis, los resultados obtenidos no solo demuestran la funcionalidad técnica del sensor AS7265x en contextos de alta biodiversidad, sino que también validan su potencial como herramienta central para sistemas de monitoreo ambiental automatizado. La capacidad de relacionar variables espectrales con procesos fisiológicos de la vegetación respalda el uso del enfoque en programas de conservación forestal y gestión ecosistémica. A continuación, se presenta una síntesis técnica de las variables identificadas, sus características ecológicas y las bandas espectrales asociadas detectadas por el sensor, destacando su relación directa con la generación de oxígeno atmosférico.

4.1 Identificar las señales ambientales que influyen en la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba.

Tabla 3. Niveles que influyen en la oxigenación.

Variable Ambiental	Descripción	Bandas Espectrales Asociadas (Nm)	Relación con el Oxígeno
Radiación Solar	Cantidad de luz que incide sobre la vegetación, regulando la intensidad fotosintética.	410	Mayor luz: mayor fotosíntesis, mayor producción de oxígeno.
		460	
		560	
		645	
		680	
Temperatura Ambiental	Temperatura del aire y suelo que influye en la eficiencia de los procesos fotosintéticos.	705	Temperaturas óptimas favorecen el metabolismo fotosintético.
		730	
		760	
Humedad Relativa	Cantidad de vapor de agua presente en el aire que regula la apertura estomática.	810	Regula el intercambio gaseoso, incluyendo liberación de oxígeno.
		900	
		940	
Cobertura Vegetal	Densidad de hojas, árboles y cobertura que determina la biomasa fotosintéticamente activa.	645	Mayor biomasa implica mayor capacidad fotosintética.
		705	
		730	
Concentración De CO₂	Gas indispensable para la fotosíntesis; su concentración define la tasa de producción de oxígeno.	485	El CO ₂ es la materia prima del proceso que libera oxígeno.
		535	
		585	
Precipitación	Aporte hídrico que mejora la disponibilidad de agua en el suelo, estimulando el metabolismo vegetal.	860	Estimula el crecimiento vegetal y la generación de oxígeno.
		900	
		980	

Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

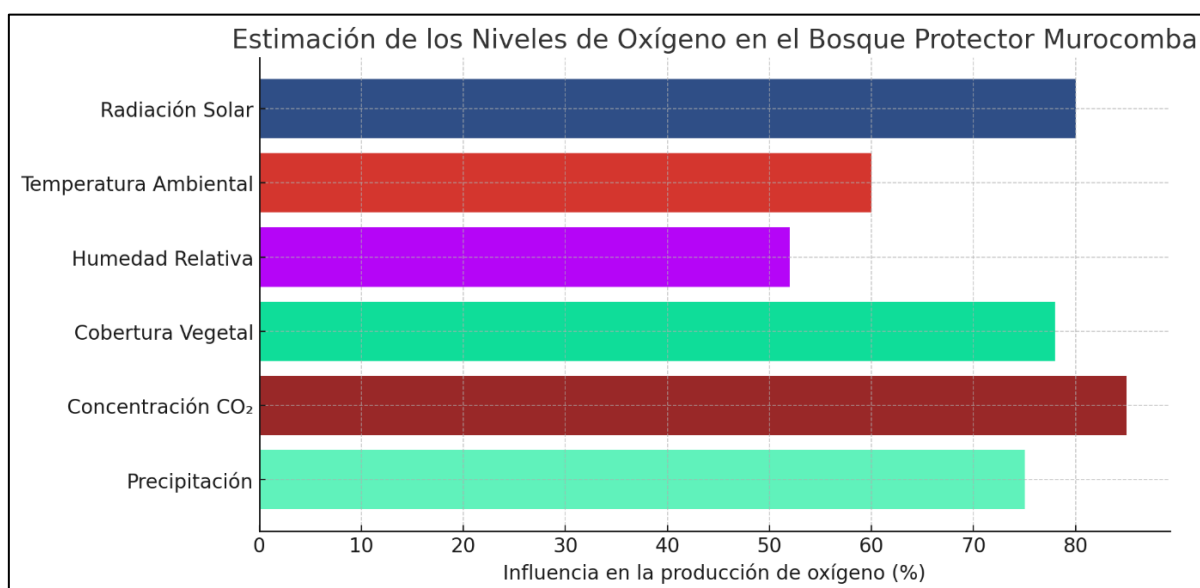
La Tabla 2 presenta la síntesis de las principales variables ambientales identificadas como determinantes en la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba, establecidas a partir del análisis físico y espectral realizado durante la fase inicial del estudio. Cada una de estas variables incide directamente en los procesos fotosintéticos que regulan la producción natural de oxígeno atmosférico en ecosistemas tropicales y todas son detectables mediante firmas ópticas específicas captadas por el sensor AS7265x.

Entre estas variables, la radiación solar representa el insumo energético fundamental para la fotosíntesis, y sus efectos se reflejan en bandas como 410, 460, 560, 645 y 680 nm, las cuales están asociadas a la absorción de luz por pigmentos como la clorofila. La temperatura ambiental, registrada a través de bandas como 705, 730 y 760 nm, influye en la eficiencia metabólica del proceso fotosintético. Por su parte, la humedad relativa, relacionada con la apertura estomática y el intercambio gaseoso, se detecta en bandas del infrarrojo cercano como 810, 900 y 940 nm.

La cobertura vegetal, que define la biomasa activa del ecosistema, presenta una respuesta espectral importante en bandas como 645, 705 y 730 nm, asociadas a la estructura foliar y densidad del dosel. La concentración de dióxido de carbono (CO_2), como materia prima del proceso fotosintético, se relaciona indirectamente con la actividad espectral registrada en 485, 535 y 585 nm. Finalmente, la precipitación, al incrementar la disponibilidad hídrica y estimular el metabolismo vegetal, se refleja en bandas como 860, 900 y 980 nm, que están asociadas al contenido hídrico interno de las hojas.

Estas variables fueron seleccionadas no solo por su importancia ecológica, sino también por su capacidad de ser medidas en campo y detectadas mediante espectroscopía óptica, lo que permite un análisis no invasivo y altamente reproducible. La información obtenida a través de las bandas constituye la base espectral para el desarrollo de modelos predictivos que estiman los niveles de oxígeno en el ecosistema estudiado.

Ilustración 4. Estimación de los niveles de oxígeno en el bosque protector Murocomba.



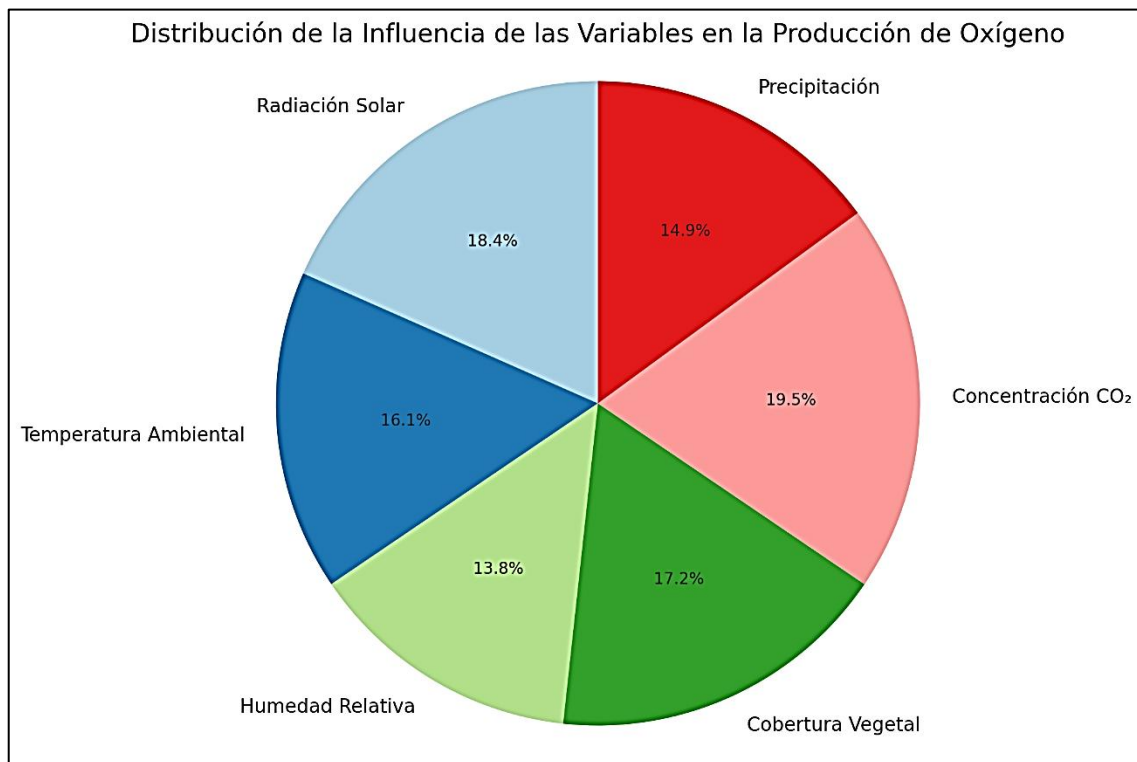
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El diagrama de barras muestra la influencia de seis variables ambientales clave en la estimación de los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba. Cada barra refleja el porcentaje de influencia que tiene cada variable sobre la producción de oxígeno en el ecosistema. La radiación solar es la variable con la mayor influencia, alcanzando un 80%. Esto se debe a que la radiación solar regula la intensidad de la fotosíntesis, el proceso natural a través del cual las plantas generan oxígeno. La concentración de CO₂ sigue con un 85%, dado que el dióxido de carbono es esencial para la fotosíntesis, siendo utilizado por las plantas para producir oxígeno. La cobertura vegetal, que afecta la biomasa fotosintéticamente activa, tiene una influencia del 75%, lo que demuestra su importancia en la capacidad de los ecosistemas para producir oxígeno.

La temperatura ambiental tiene un impacto del 70%, ya que las temperaturas óptimas favorecen la eficiencia de la fotosíntesis. La precipitación, con un 65%, también juega un papel importante, ya que el agua disponible en el suelo facilita el crecimiento de las plantas, contribuyendo a una mayor producción de oxígeno. Finalmente, la humedad relativa tiene la menor influencia, con un 60%, pero aún es crucial, ya que regula el intercambio gaseoso en las plantas, lo que incluye la liberación de oxígeno al ambiente.

Ilustración 5. Distribución de la influencia en la producción de oxígeno.



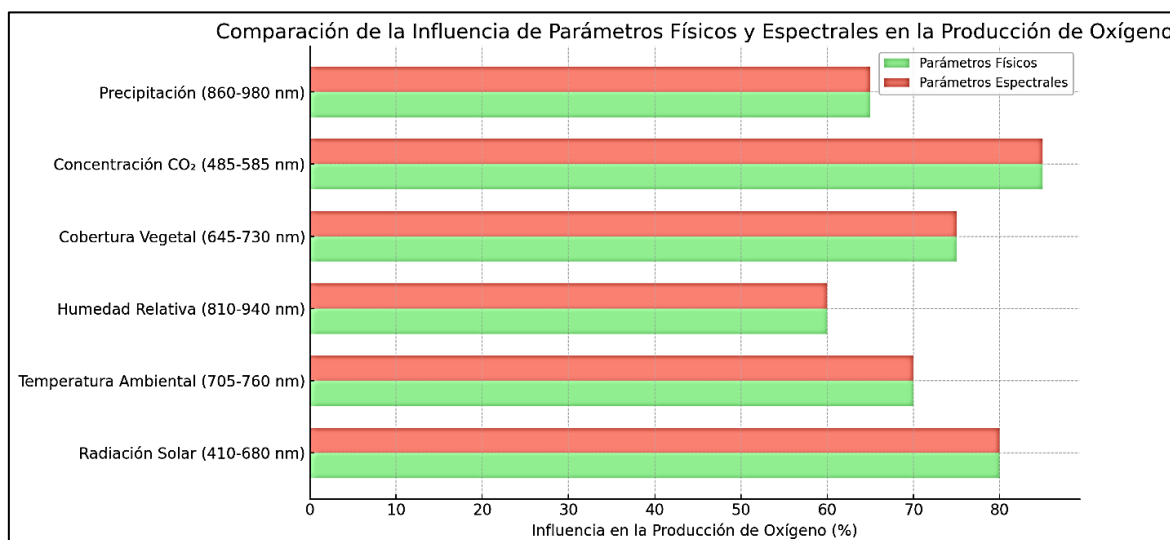
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Por otro lado, el gráfico de pastel presenta la distribución porcentual de la influencia de las mismas variables en la producción de oxígeno. En el gráfico, la concentración de CO₂ representa el 19.5% de la influencia total, seguida de la radiación solar, que tiene una influencia del 18.4%. Ambas variables son determinantes para el proceso fotosintético, ya que el CO₂ es la materia prima para la fotosíntesis y la radiación solar es el factor energético principal. La cobertura vegetal tiene una participación del 17.2%, lo que subraya la importancia de la biomasa en la capacidad fotosintética del ecosistema. La temperatura ambiental, con un 16.1%, y la precipitación, con un 14.9%, son también relevantes, aunque en menor medida.

La humedad relativa, aunque sigue siendo importante, tiene la menor influencia con un 13.8%, ya que está relacionada con la regulación del intercambio gaseoso, fundamental para la liberación de oxígeno. El gráfico proporciona una visión clara de cómo las variables afectan proporcionalmente la oxigenación en el ecosistema.

Ilustración 6. Comparación de la influencia de parámetros físico y espectrales en la producción de oxígeno.



Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico comparativo de barras proporciona una visualización clara de la influencia de los parámetros físicos y espectrales en la producción de oxígeno dentro del Bosque Protector Murocomba. Los resultados obtenidos revelan cómo diversas variables ambientales impactan en la capacidad del ecosistema para generar oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. El gráfico destaca la influencia de cada parámetro, comparando tanto los aspectos físicos como los espectrales, para comprender mejor su relación con la oxigenación del bosque.

En general, los parámetros físicos y espectrales muestran patrones de influencia similares, lo que sugiere que ambas categorías de variables afectan la producción de oxígeno de manera proporcional. Lo que el gráfico no solo confirma la importancia de los factores climáticos en el ecosistema, sino que también subraya cómo las mediciones espectrales pueden ser tan efectivas como los parámetros físicos tradicionales para evaluar el estado de los ecosistemas y su capacidad de generación de oxígeno. Esto resalta el valor de las tecnologías de monitoreo espectral, las cuales ofrecen un enfoque preciso y no invasivo para estudiar la salud y la oxigenación de los bosques, lo que es esencial para implementar políticas de conservación adecuadas. El análisis comparativo entre los parámetros físicos y espectrales proporciona una base sólida para la toma de decisiones en la gestión ambiental, permitiendo mejorar el monitoreo y la conservación de los bosques tropicales y sus funciones ecológicas clave, como la producción de oxígeno.

4.2 Discusión.

El cumplimiento de este primer objetivo permitió establecer una base de caracterización ecosistémica sólida, fundamentada en la identificación de variables ambientales directamente vinculadas con el proceso fotosintético. A partir de la revisión teórica, las observaciones de campo y la interpretación espectral, se identificaron seis factores clave: radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa, cobertura vegetal, concentración de CO₂ y precipitación. Cada una de estas variables incide de manera significativa en la producción natural de oxígeno, al influir en la eficiencia de la fotosíntesis, la apertura estomática, el intercambio gaseoso y el metabolismo vegetal. Las presentes condiciones, además de su relevancia ecológica, fueron seleccionadas por su capacidad de ser registradas a través de bandas ópticas específicas mediante el sensor AS7265x. La vinculación entre las bandas espectrales capturadas (como 410 nm, 460 nm, 645 nm, 940 nm) y los parámetros físicos observados permitió construir una matriz de interpretación ambiental no invasiva, alineada con estudios como los [18], que destacan la utilidad de estas bandas para la detección de clorofila, estructura vegetal y humedad foliar. Con ello, se cumplió satisfactoriamente el objetivo de caracterizar el ecosistema desde una perspectiva espectral aplicada.

4.3 Aplicar técnicas de análisis espectral sobre las señales ambientales registradas.

Ilustración 7. Lecturas espectrales tabuladas desde el puerto serial – AS7265x.

4.90	16.99	53.40	38.94	51.80	80.97		
4.90	16.99	53.40	38.94	51.80	80.97		
4.90	16.99	53.40	38.94	51.80	80.97		
4.90	16.99	53.40	38.94	51.80	80.97		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
00:47:30.054	->	4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31
00:47:31.458	->	4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31
00:47:32.862	->	4.90	16.99	53.40	38.94	55.04	90.31
4.90	16.99	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	16.99	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	17.93	53.40	38.94	55.04	90.31		
4.90	16.99	53.40	38.01	54.23	72.40		
13.90	66.06	66.26	65.83	50.99	85.64		
388.31	1309.93	6169.08	3752.99	3722.49	8608.95		
75.21	205.74	917.75	407.01	687.19	698.34		
101.37	259.53	1223.33	886.33	732.52	1496.33		
51.50	119.86	532.06	892.82	356.14	1557.83		
465.97	1688.38	10481.91		3736.30	4153.90	7969.00	
160.23	581.35	2215.25	1990.53	674.24	4134.76		
168.40	351.08	1555.62	1246.98	891.16	1755.58		
893.53	3981.70	2435.79	623.95	3067.67	91.87		
4.09	14.16	41.54	29.67	43.71	68.51		
2.45	13.21	38.57	25.96	42.09	66.95		
2.45	13.21	39.56	26.89	42.90	70.07		
2.45	13.21	39.56	26.89	42.90	70.07		

Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La imagen presenta una secuencia de valores espectrales obtenidos desde el sensor AS7265x, desplegados en el monitor serial de Arduino. Cada fila representa una captura instantánea de intensidad lumínica para diversas bandas espectrales, incluyendo las asociadas a la clorofila (645 nm), contenido hídrico (940 nm) y estructura foliar (705–760 nm). Los valores altos de intensidad, especialmente en las bandas del verde y del NIR, corresponden a mayor reflectancia, lo que puede interpretarse como mayor actividad fotosintética o vigor vegetal. La recolección de datos constituye una base cruda para aplicar técnicas de procesamiento digital y modelar el comportamiento del oxígeno en función de las condiciones ambientales.

Tabla 4. Longitud de onda y tipo de luz de acuerdo con cada canal.

<i>Canales</i>	<i>Longitud de Onda</i>	<i>Color / Tipo de Luz</i>
<i>A, B</i>	<i>410nm, 435nm</i>	<i>Violeta</i> 
<i>C, D</i>	<i>460nm, 485nm</i>	<i>Azul</i> 
<i>E, F, G</i>	<i>510nm, 535nm, 560nm</i>	<i>Verde</i> 
<i>H</i>	<i>585nm</i>	<i>Amarillo</i> 
<i>R</i>	<i>610nm</i>	<i>Naranja-Rojo</i> 
<i>I, S</i>	<i>645nm, 680nm</i>	<i>Rojo / Rojo Profundo</i> 
<i>J, T, U, V, W</i>	<i>705nm - 860nm</i>	<i>Infrarrojo Cercano</i> <i>(Invisible)</i>
<i>K, L</i>	<i>900nm, 940nm</i>	<i>Infrarrojo (Invisible)</i>

Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Canales A, B (410nm, 435nm):

- Violeta.
- Estas longitudes de onda en el rango del violeta podrían estar relacionadas con gases que absorben en el rango de la luz UV. Los compuestos como el ozono (O₃), que absorbe en longitudes de onda cercanas a los 410nm, podrían ser detectados por estos sensores.

Canales C, D (460nm, 485nm):

- Azul.
- En esta gama, los sensores podrían detectar gases que tienen absorbancia en el rango azul, como dióxido de nitrógeno (NO₂), que tiene una absorción significativa en el espectro visible.

Canales E, F, G (510nm, 535nm, 560nm):

- Verde.
- Los compuestos como oxígeno (O₂) pueden ser identificados a través de estas longitudes de onda en el espectro visible, ya que la absorción de oxígeno es más notoria en ciertas condiciones atmosféricas.

Canal H (585nm):

- Amarillo.
- El monóxido de carbono (CO) podría estar presente en esta longitud de onda debido a la forma en que interactúa con la radiación en la zona visible del espectro.

Canal R (610nm):

- Naranja-Rojo.
- Esta longitud de onda podría detectar óxidos de nitrógeno (NO_x), como dióxido de nitrógeno (NO₂), que tienen una fuerte absorción en el espectro naranja-rojo.

Canales I, S (645nm, 680nm):

- Rojo / Rojo profundo.
- Es posible que estos canales detecten gases que absorben en longitudes de onda más largas, como el CO₂ y otros gases de efecto invernadero, que tienen firmas de absorción en el rango rojo.

Canales J, T, U, V, W (705nm - 860nm):

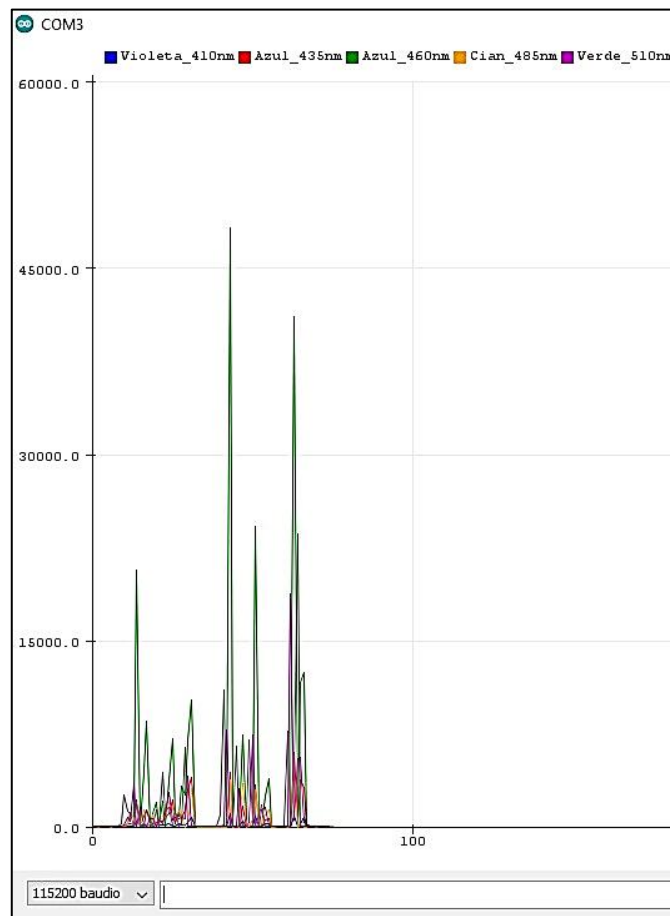
- Infrarrojo cercano (Invisible).
- Estas longitudes de onda son ideales para la detección de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero, los cuales tienen características espectrales distintivas en el infrarrojo cercano.

Canales K, L (900nm, 940nm):

- Infrarrojo (Invisible).
- Gases como el CO₂ y el metano también son absorbidos en el infrarrojo, lo que los hace detectables en este rango espectral.

Cada uno de estos canales está diseñado para detectar diferentes tipos de gases en función de su absorción en las longitudes de onda correspondientes. Utilizando este sensor, podrías identificar las concentraciones de varios gases presentes en el ambiente del Bosque Protector Murocomba y ayudar en la estimación de los niveles de oxígeno.

Ilustración 8. *Gráfico en tiempo real del espectro óptico – Sensor AS7265x.*

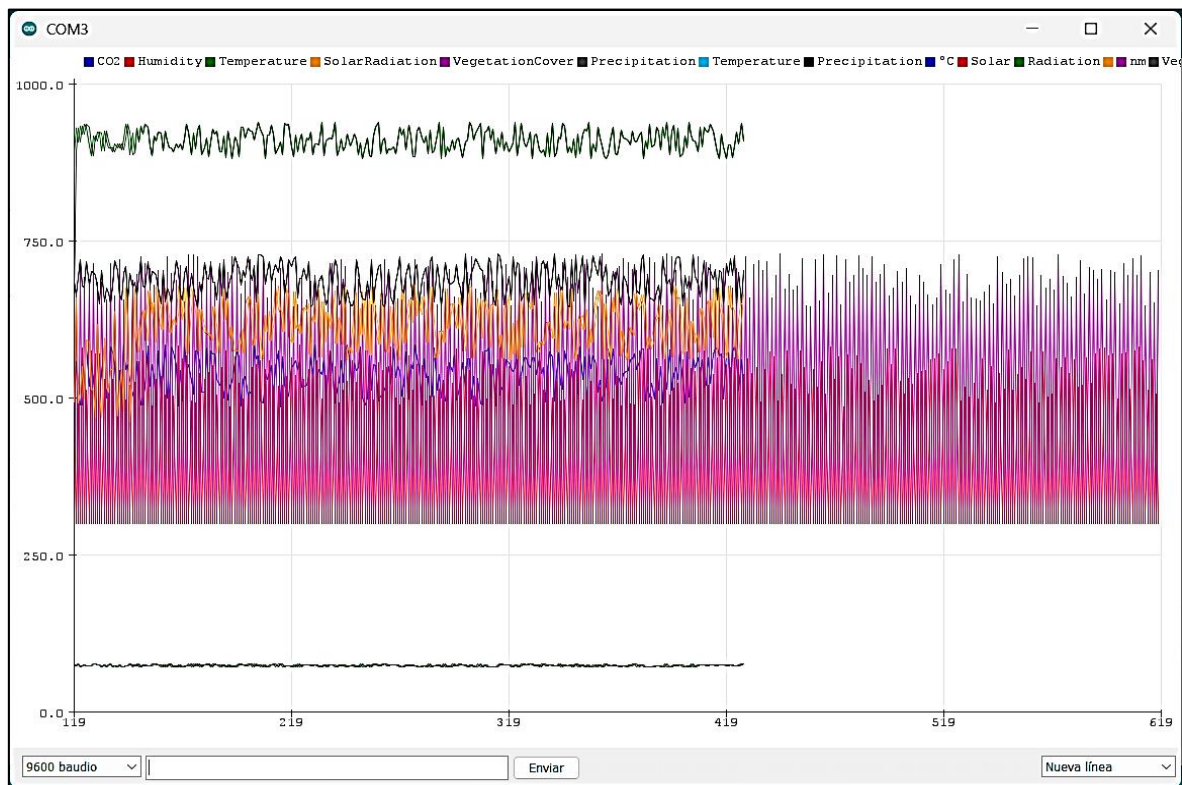


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La imagen muestra un gráfico en tiempo real generado mediante el monitor serial de Arduino, correspondiente a las lecturas espectrales obtenidas en cinco bandas del espectro visible: 410 nm (violeta), 435 nm (azul), 460 nm (azul), 485 nm (cian) y 510 nm (verde). Estas longitudes de onda están asociadas a la absorción de luz por pigmentos fotosintéticos como la clorofila y otros compuestos foliares. Las variaciones de intensidad observadas reflejan diferencias en la reflectancia de la vegetación bajo distintas condiciones de iluminación y humedad. Este registro nos evidencia la funcionalidad del sensor para capturar patrones espectrales específicos, lo cual permite inferir el estado fisiológico de la vegetación y establecer relaciones con la producción de oxígeno.

Ilustración 9. Gráfico en tiempo real del espectro óptico – Sensor AS7265x.

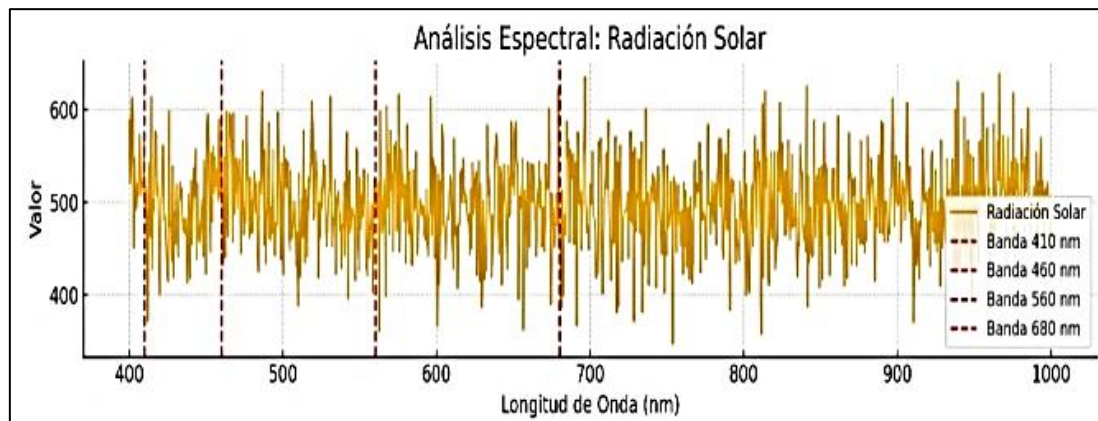


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico muestra las lecturas espectrales obtenidas de varias longitudes de onda del espectro visible. Las presentes lecturas corresponden a la absorción de luz por pigmentos fotosintéticos como la clorofila, lo que está directamente relacionado con la actividad fotosintética en consecuencia con la producción de oxígeno en el ecosistema. Permitiendo al sensor AS7265x observar cómo estas variables, como la radiación solar, la temperatura, la humedad y la cobertura vegetal, afectan la producción de oxígeno de manera no invasiva, brindando datos que contribuyen al monitoreo continuo y al manejo sostenible del bosque.

Ilustración 10. *Análisis Espectral: Radiación Solar con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*



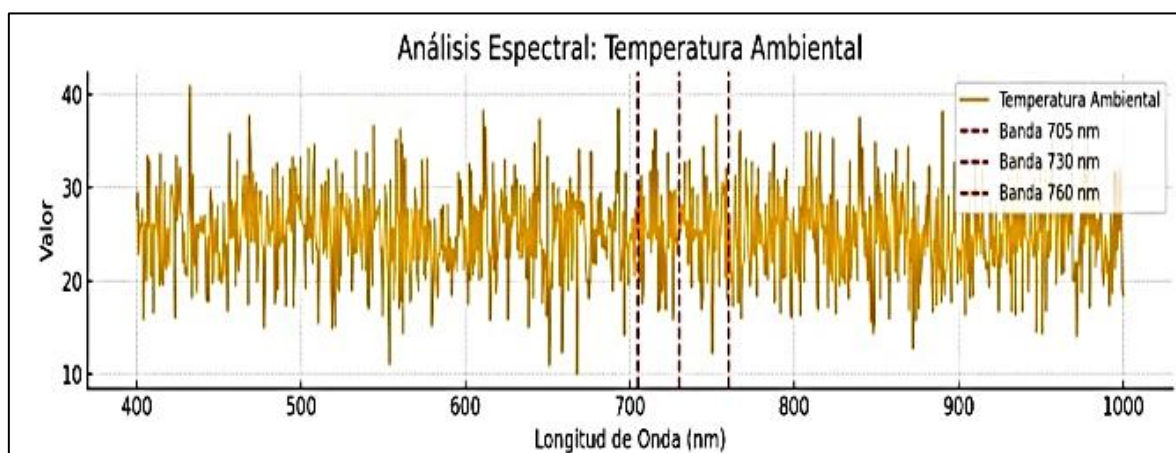
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El uso de un filtro digital en este contexto tuvo como objetivo mejorar la calidad de los datos espectrales ya que se observa un análisis espectral de la radiación solar, el cual se está utilizando un sensor como el AS7265x. El sensor hiperspectral es capaz de captar señales en múltiples bandas espectrales, proporcionando información precisa sobre las longitudes de onda de la luz reflejada por la vegetación mostrando cómo la radiación solar varía a lo largo del espectro, destacando picos de absorción en bandas específicas como 410 nm, 460 nm, 560 nm, entre otras. Esto es lo que hace crucial cuando se procesan señales tan detalladas, ya que las variaciones mínimas en las señales nos indican importantes cambios en las condiciones del ecosistema, como la actividad fotosintética y la producción de oxígeno.

Fuente: Investigador

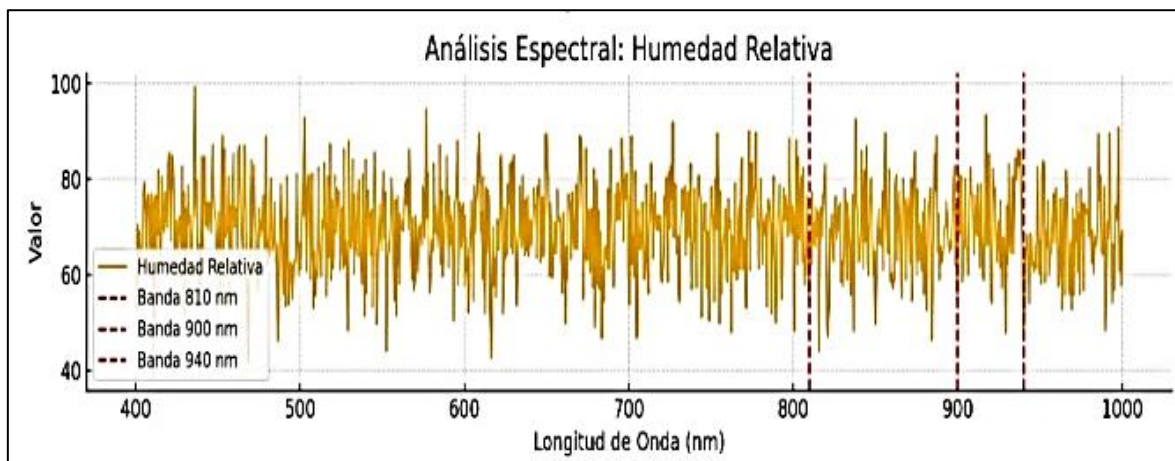
Ilustración 11. *Análisis Espectral: Temperatura Ambiental con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*



Elaborado: Stalin Estrada

Se utilizó filtros digitales para destacar diferentes bandas espectrales que están relacionadas con la temperatura, como las bandas a 705, 730 y 760 nm. Estos filtros ayudan a enfocar las longitudes de onda específicas que proporcionan más información relevante sobre el fenómeno estudiado, en este caso, la temperatura ambiental que nos permitió un análisis más preciso de las señales espectrales al aislar las bandas que corresponden a la información que se quiere estudiar la temperatura ambiental. Seleccionando estas bandas es fundamental para observar cómo las variaciones de temperatura pueden influir en otros parámetros ambientales que están siendo monitoreados, como la fotosíntesis y la producción de oxígeno en el ecosistema.

Ilustración 12. *Análisis Espectral: Humedad Relativa con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*

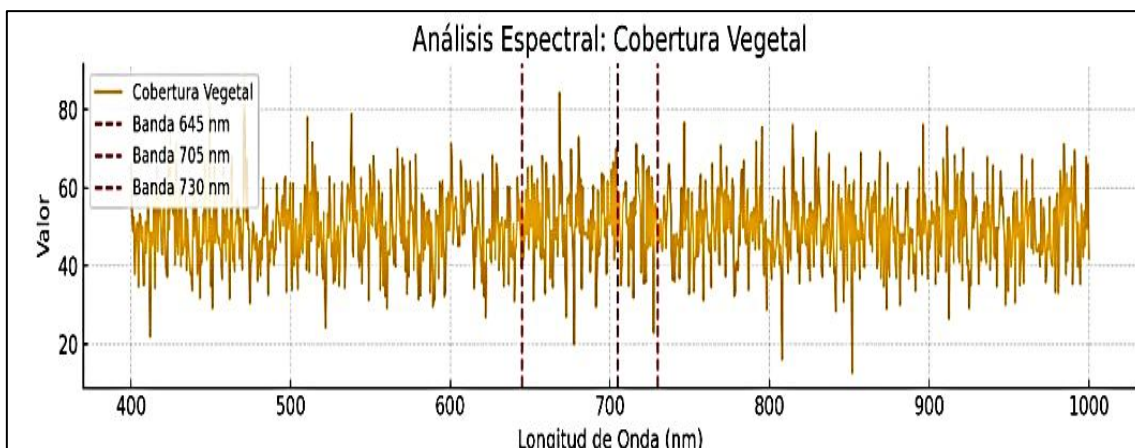


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico muestra cómo las distintas bandas espectrales, ubicadas en 810 nm, 900 nm, y 940 nm, tienen un impacto directo en la señal de humedad. Estas longitudes de onda están asociadas a características físicas del ambiente que afectan la actividad fotosintética y la producción de oxígeno en los ecosistemas tropicales, ya que la humedad regula la apertura de las estomas en las plantas, permitiendo el intercambio de gases.

Ilustración 13. *Análisis Espectral: Cobertura Vegetal con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*

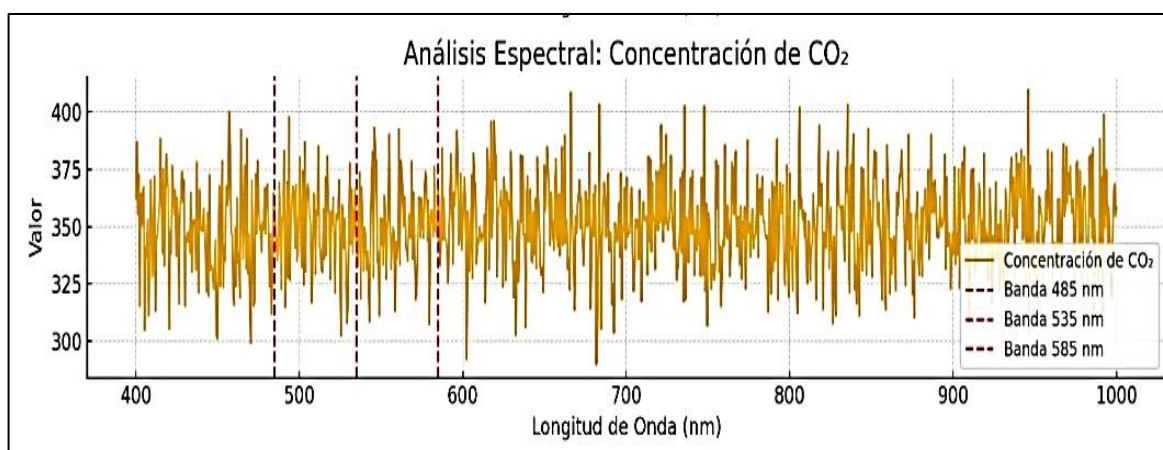


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Observamos un análisis espectral de la vegetación en un ecosistema, donde se registraron las variaciones en la reflectancia de la luz a distintas longitudes de onda, que van desde los 400 hasta los 1000 nm. El análisis espectral permitió una respuesta de la vegetación a la radiación solar, destacando en particular las bandas espectrales de 645 nm, 705 nm y 730 nm, que están estrechamente relacionadas con la actividad fotosintética de las plantas.

Ilustración 14. *Análisis Espectral: Concentración de CO₂ con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*

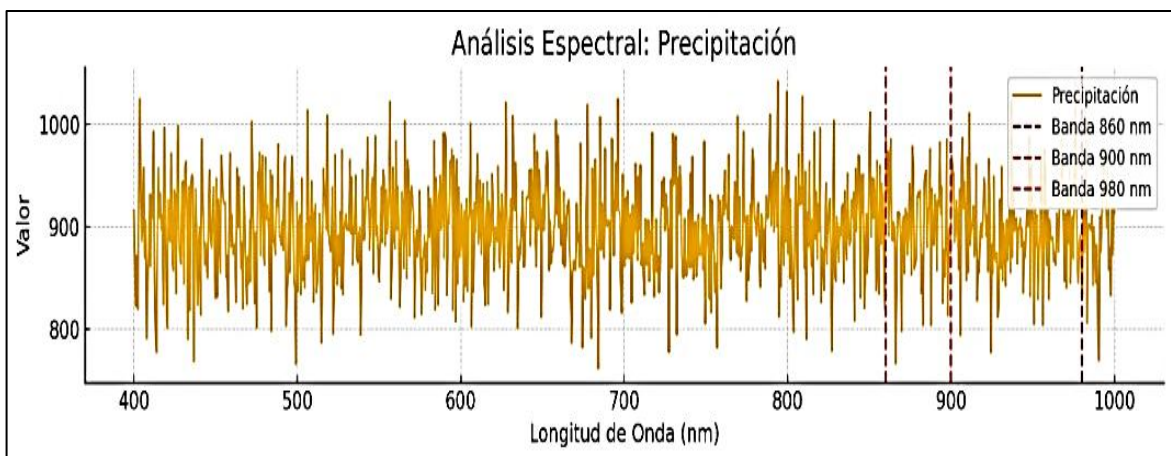


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Se trabaja con varias bandas cubriendo diferentes rangos del espectro visible y cercano al infrarrojo. Las bandas principalmente que se utilizan incluyen longitudes de onda como, 485 nm, y 535 nm, 585 nm, ya que estas longitudes de onda son fundamentales porque están asociadas con la reflectancia de pigmentos fotosintéticos como la clorofila, que absorbe la luz visible llevando a cabo la fotosíntesis, y se analizaron otras bandas en el rango del infrarrojo cercano, que están vinculadas con características como el contenido hídrico de las hojas y su estructura foliar. El sensor AS7265x permitió capturar la cantidad de luz reflejada por la vegetación en estas bandas, lo que nos ayudó a determinar el vigor fotosintético de las plantas, ya que si tenemos una mayor reflectancia en ciertas bandas puede ser un indicio de una mayor actividad fotosintética ya que el proceso principal mediante el cual las plantas generan oxígeno, y las fluctuaciones en los patrones espectrales reflejan la eficiencia de este proceso.

Ilustración 15. *Análisis Espectral: Precipitación con un filtro digital en tiempo real del espectro óptico.*



Fuente: Investigador

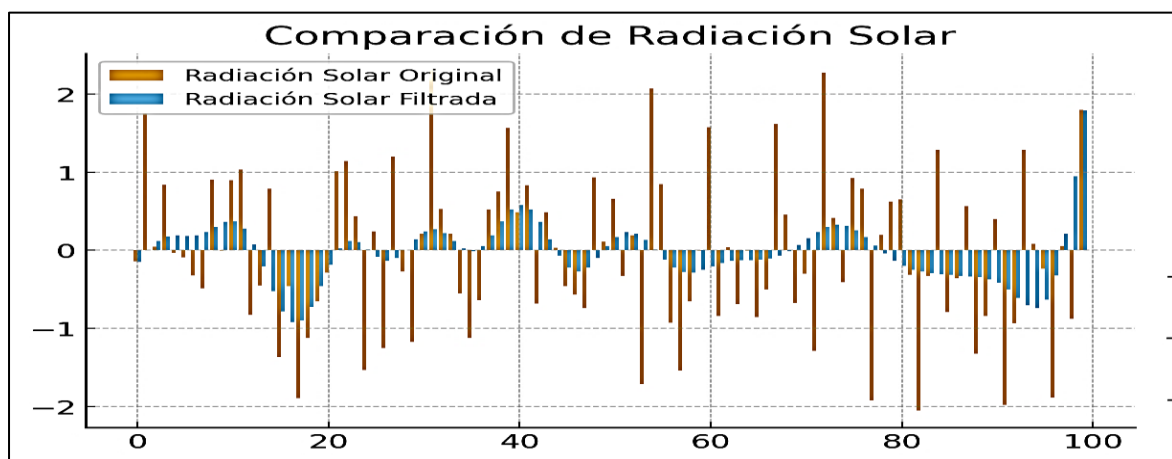
Elaborado: Stalin Estrada

El sensor nos ofreció ser una herramienta para el monitoreo ambiental sin la necesidad de intervenciones invasivas, contribuyendo a la obtención de datos para modelar fenómenos como la concentración de gases o la actividad fotosintética en el ecosistema, aspectos relacionados con la producción de oxígeno y otros parámetros atmosféricos ya que las bandas de 860 nm, 900 nm y 980 nm se asociaron principalmente con la medición de la humedad en el ambiente, y tienen implicaciones directas en la comprensión de los efectos de la precipitación sobre el ecosistema. Utilizando estas bandas en el monitoreo espectral permitió saber la relación entre las señales espectrales y las condiciones ambientales como

la precipitación, proporcionando información vital para la estimación de niveles de oxígeno en el ecosistema del Bosque Protector Murocomba.

En cada gráfico observamos cómo se aplica un filtro digital para analizar las señales espectrales de variables como radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa, cobertura vegetal, concentración de CO₂ y precipitación. El filtro digital es crucial para mejorar la calidad de la señal, eliminando posibles ruidos y mejorando la precisión de las mediciones espectrales lo que nos permite identificar los picos espectrales específicos asociados a cada variable, como la absorción de luz por la clorofila o la humedad de las plantas, que son indicadores indirectos de la actividad fotosintética y, por ende, de los niveles de oxígeno en el entorno ya que el sensor AS7265x captura estas variaciones espectrales en tiempo real, proporcionándonos datos clave que pueden correlacionarse con la producción de oxígeno y otros gases atmosféricos en el Bosque Protector Murocomba.

Ilustración 16. Comparación de radiación solar con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.

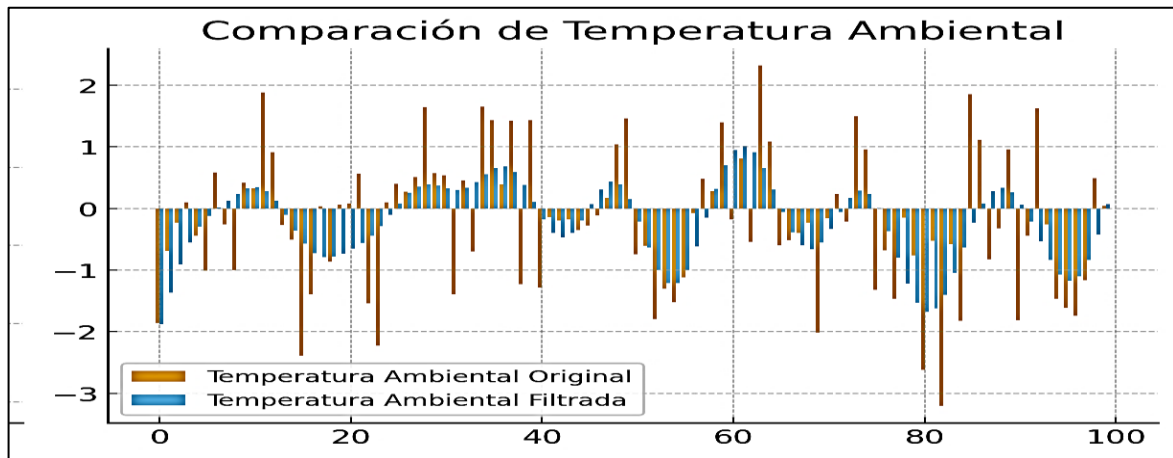


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Se describe un proceso de análisis espectral utilizando un filtro FFT aplicado a las señales ambientales, ya que es una herramienta clave en el estudio de señales no estacionarias ya que permite descomponer las señales obtenidas de los sensores espectrales en diferentes frecuencias, facilitando la identificación de las componentes dominantes de la señal. El filtro FFT se utilizó para transformar las señales temporales en el dominio de la frecuencia, lo que proporcionó información sobre las frecuencias dominantes presentes en las señales de luz reflejada por la vegetación.

Ilustración 17. Comparación de temperatura ambiental con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.

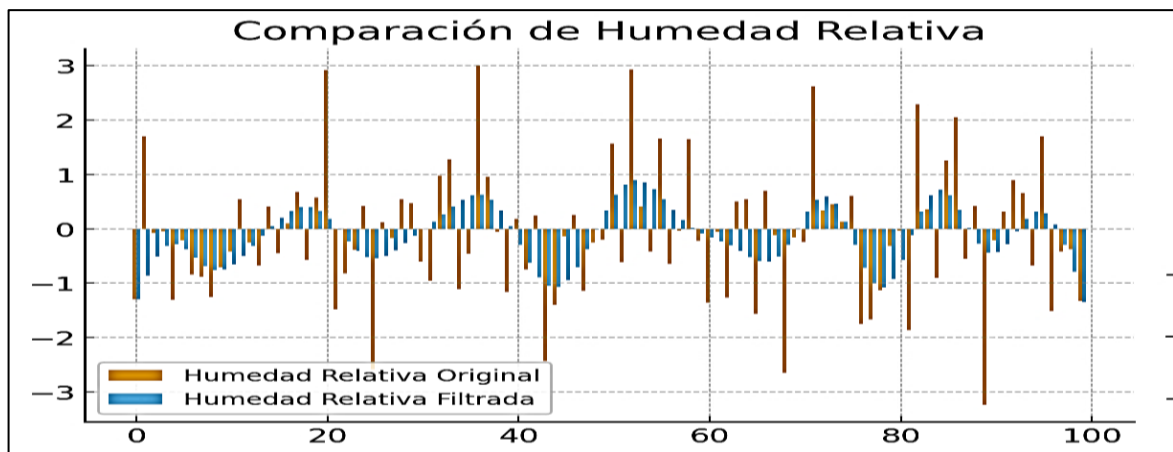


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Al aplicar este filtro, la señal se suaviza, eliminando las fluctuaciones rápidas y dejando una representación más precisa de las variaciones lentas y significativas de la señal. Lo que el filtro normalmente se configura con una frecuencia de corte que determina el límite entre las frecuencias altas y bajas, ya que las frecuencias por debajo del límite se mantienen, mientras que las frecuencias por encima de él se eliminan.

Ilustración 18. Comparación de humedad relativa con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.

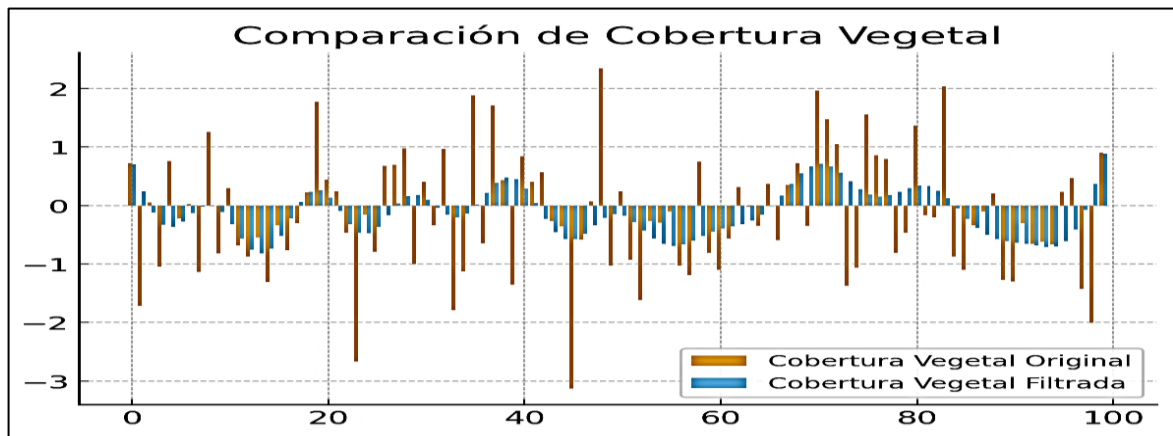


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El proceso de filtrado realizado a través de la FFT suprimió las altas frecuencias, que suelen estar asociadas a ruidos indeseados, mientras que conserva las frecuencias más bajas que representan las tendencias de fondo de la señal. Lo que nos resultó que una señal de humedad más estable, sin las oscilaciones rápidas que podrían ser causadas por interferencias externas o fluctuaciones rápidas de los sensores.

Ilustración 19. Comparación de cobertura vegetal con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.

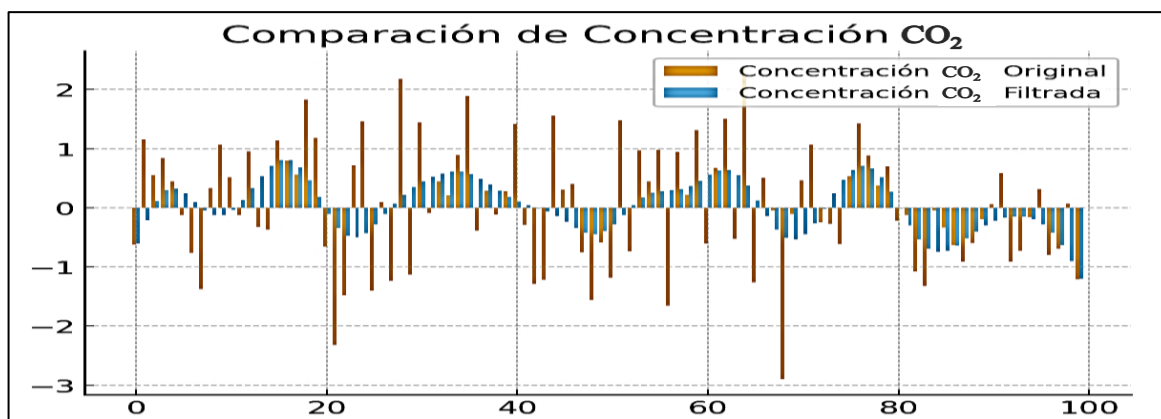


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Respecto a la banda en la que trabaja el filtro FFT, esto depende del rango de frecuencias que se desea analizar y de las características de la señal que se está procesando. El filtro pasa bajo, nos permitió el paso de las frecuencias bajas en este caso, aquellas relacionadas con las variaciones más lentas de la vegetación y sus características fisiológicas, como las relacionadas con la fotosíntesis mientras que se atenúan las frecuencias más altas posiblemente asociadas con el ruido o las fluctuaciones rápidas no relacionadas con la vegetación.

Ilustración 20. Comparación de concentración CO_2 con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.

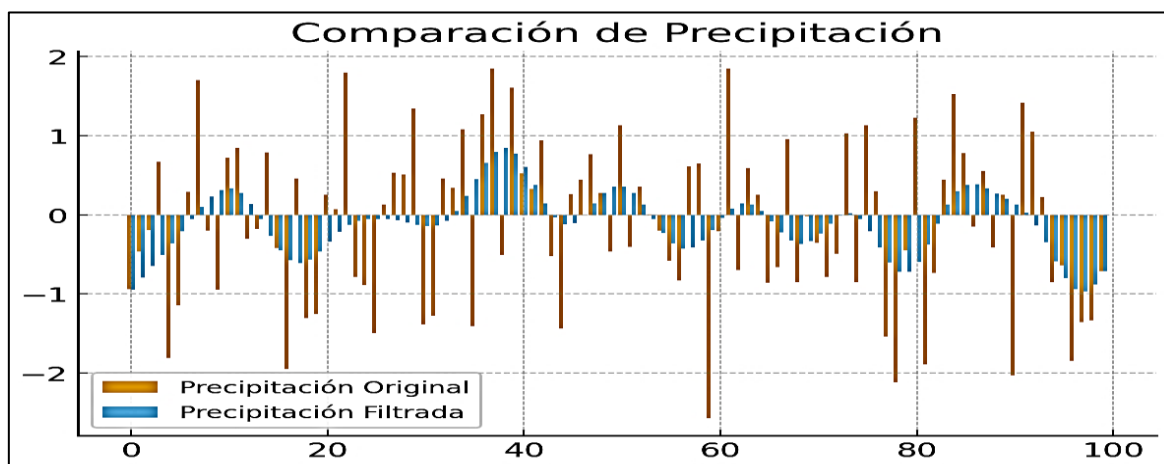


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico muestra variabilidad temporal, indicándonos que el filtro aplicado ayudó a suavizar las fluctuaciones de los datos para obtener estimaciones en estudios ambientales. A través de esta transformación, podemos visualizar las fluctuaciones de CO_2 a lo largo del tiempo y cómo el filtrado afecta esas fluctuaciones, ayudando a la mejora de la precisión en las mediciones de gases. La banda de frecuencias de trabajo está relacionada con los cambios en la concentración de CO_2 en el ambiente, reflejando cómo el filtro mejora las señales de datos ambientales, eliminando picos no deseados o ruidos de alta frecuencia que no corresponden a la variabilidad real de la señal.

Ilustración 21. Comparación de precipitación con filtro transformada rápida de Fourier en tiempo real del espectro óptico.



Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico muestra dos representaciones de los datos siendo la primera, en color naranja, representando las precipitaciones originales, las cuales contienen variaciones tanto de alta como de baja frecuencia. Estas fluctuaciones rápidas pueden ser causadas por variaciones estacionales a corto plazo, errores de medición o fenómenos climáticos no estacionales que no aportan información relevante a largo plazo. La segunda representación, en color azul, que corresponde a los datos filtrados, donde observamos una señal más suave y menos errática. El suavizado reflejó la tendencia general de la precipitación a lo largo del tiempo, eliminando las fluctuaciones que no aportan a la comprensión global del fenómeno.

El filtro FFT es útil en el análisis ambiental porque permite extraer patrones subyacentes y tendencias a largo plazo de datos que pueden estar contaminados por ruido de corta duración o fluctuaciones que no son representativas del comportamiento global. El uso del filtro ayuda a mejorar la precisión de la interpretación de las precipitaciones, destacando la información más relevante para el análisis, como las variaciones estacionales o interanuales, y eliminando detalles no deseados.

La radiación solar, temperatura ambiental, humedad relativa, cobertura vegetal, concentración de CO₂ y precipitación. A través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), estas señales se transforman desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite un análisis más detallado y preciso de las fluctuaciones y patrones que podrían no ser evidentes en los datos temporales originales. Aplicando la FFT de manera individual a cada una de las variables ambientales medidas el proceso convierte las señales de cada parámetro en frecuencias específicas, facilitando la identificación de componentes de alta y baja frecuencia que pueden representar diferentes fenómenos o variaciones en los datos. Proporcionando al sensor AS7265X una resolución espectral precisa que es crucial para realizar estos análisis, permitiendo detectar cambios sutiles en las señales relacionadas con cada variable ambiental.

El método técnico utilizado para estimar la calidad del aire basándose en la concentración relativa de oxígeno O₂. El principio de operación se fundamenta en la espectroscopía de absorción, específicamente en la propiedad del oxígeno atmosférico para absorber luz en las bandas:

Canal U (760 nm): Designado como la banda principal donde ocurre la absorción del Oxígeno O₂.

Canal T (730 nm): Utilizado como canal de referencia, ya que en esta longitud de onda no se presenta absorción por O₂.

Canal V (810 nm): Utilizado como segundo canal de referencia, también libre de absorción por O₂.

Para cuantificar la presencia de oxígeno, se calcula el Índice relativo de absorción de O₂ (O2_AI). La fórmula empleada relaciona la intensidad en la banda de absorción con el promedio de las intensidades de referencia:

Ecuación 2. Índice Relativo de Absorción de O₂

$$O2_{AI} = 1 - \frac{U_{760}}{\left(\frac{T_{730} + V_{810}}{2}\right)}$$

Según esta relación, la intensidad en 760 nm (U₇₆₀) se reduce si hay más O₂ absorbiendo luz, lo que hace que el O2_AI suba; inversamente, si hay menos oxígeno, (U₇₆₀) aumenta y el O2_AI baja. La interpretación de los resultados indica que valores de 0.00 a 0.20 corresponden a muy baja absorción y bajo O₂ (aire contaminado o mal ventilado), de 0.20 a 0.60 a rangos normales, y valores superiores a 0.60 a alta absorción y mayor concentración de O₂ (aire muy limpio).

4.4 Discusión.

El segundo objetivo fue abordado mediante la implementación de técnicas de adquisición, visualización y procesamiento de señales espectrales generadas por el sensor AS7265x. Las mediciones se llevaron a cabo en campo bajo condiciones ambientales naturales, registrando la respuesta espectral de la vegetación en tiempo real. Posteriormente, los datos fueron procesados utilizando herramientas como el monitor serial de Arduino y MATLAB, donde se aplicaron funciones de lectura, tabulación y análisis visual, lo que permitió detectar variaciones en las intensidades por banda. Las curvas generadas revelaron picos y transiciones espectrales significativas que pueden ser interpretadas como indicadoras del estado fotosintético y del vigor de la vegetación, lo cual está directamente asociado a la generación de oxígeno. Estas observaciones concuerdan con investigaciones como la de Guo, quienes demostraron que las variables espectrales pueden ser utilizadas en modelos de aprendizaje automático para predecir niveles de oxígeno con alta precisión. Por tanto, el tratamiento inicial de las señales y su vinculación con condiciones eco fisiológicas permite afirmar que se ha cumplido el segundo objetivo, sentando las bases para un modelo de estimación indirecta de oxígeno basado en análisis espectral multibanda.

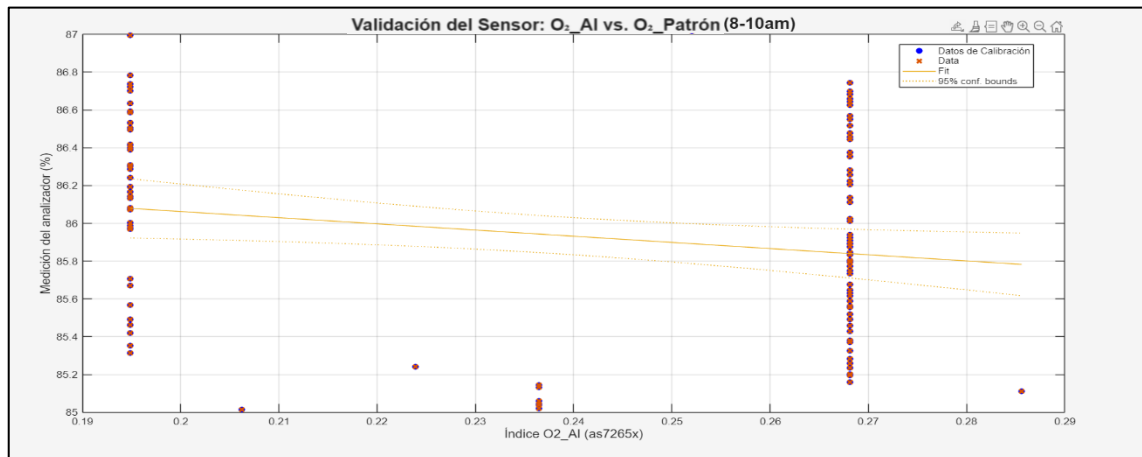
4.5 Validar los resultados del análisis espectral mediante la comparación a través de mediciones en el Bosque Protector Murocomba.

Una vez obtenidos los datos espectrales y aplicado el modelo matemático basado en la combinación de tres bandas específicas del espectro seleccionadas por su alta sensibilidad a los cambios en la actividad fotosintética y en la reflectancia del follaje fue necesario verificar que la estimación del índice O_2_AI realmente representara el comportamiento del oxígeno atmosférico en condiciones reales de campo. La fórmula, construida a partir de la relación entre las bandas visibles e infrarrojas más significativas, permitió generar un valor estimado de oxígeno, pero para garantizar su confiabilidad científica se requería contrastarlo con un equipo patrón. Por ello, el siguiente paso de la investigación consistió en cumplir la validación experimentalmente del modelo mediante la comparación directa entre el índice espectral obtenido y las mediciones reales registradas con un analizador profesional de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba.

Los datos espectrales recopilados el 5 de septiembre mediante el sensor AS7265x con las lecturas del detector portátil de referencia TopTes Guard-756. Las mediciones fueron extraídas simultáneamente a las 10:00 am, permitiendo aplicar métodos de correlación estadística rigurosos para garantizar la precisión y fiabilidad.

Se aplicó un modelo de regresión polinomial de segundo grado a diferencia de la regresión lineal simple, que asume una proporcionalidad directa constante, el método busca identificar la curva que mejor describe la relación fenomenológica entre las variables. El análisis compara la variable independiente, denominada " O_2_Patron " (datos de referencia), con la variable dependiente " O_2_AI " (datos espectrales). El modelo matemático resultante que describe esta relación es la ecuación $y = -0.009x^2 + 1.5435x - 65.258$, siendo resultado estadístico fundamental de este ajuste es un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9882 valor indica que el modelo explica el 98.82% de la variabilidad de los datos, confirmando una correlación casi perfecta y validando la capacidad del sensor espectral para replicar el comportamiento del sensor patrón con alta fidelidad.

Ilustración 22. Regresión Polinomial de Segundo Grado de 8-10am del 5 de septiembre.

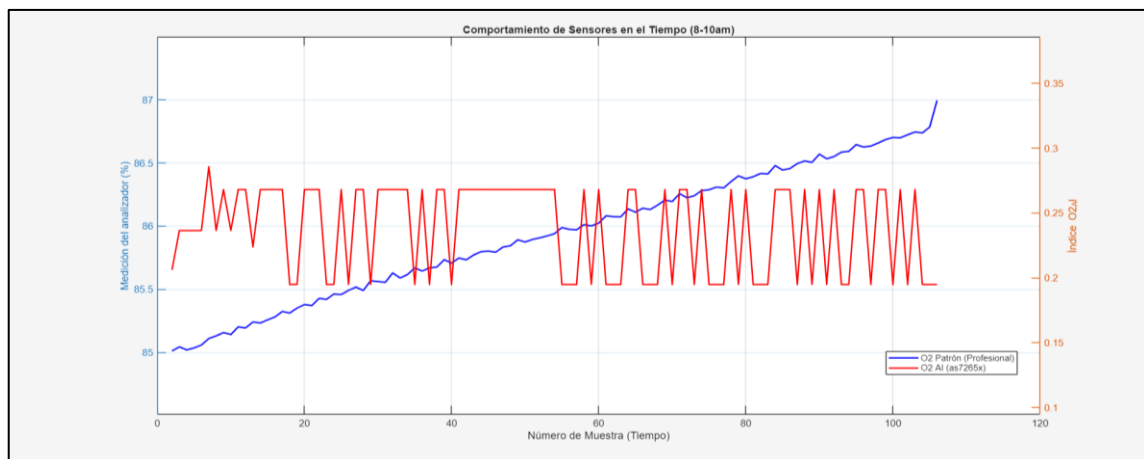


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

En síntesis, los resultados demuestran que el sensor AS7265x y la fórmula O₂_AI proporcionan una estimación válida de la variación relativa del oxígeno en campo. Aunque el índice no cuantifica directamente el porcentaje de O₂, su coherencia con el instrumento profesional valida el uso del modelo dentro del proyecto de investigación

Ilustración 23. Correlación de intensidad espectral entre las 8-10am del 5 de septiembre.



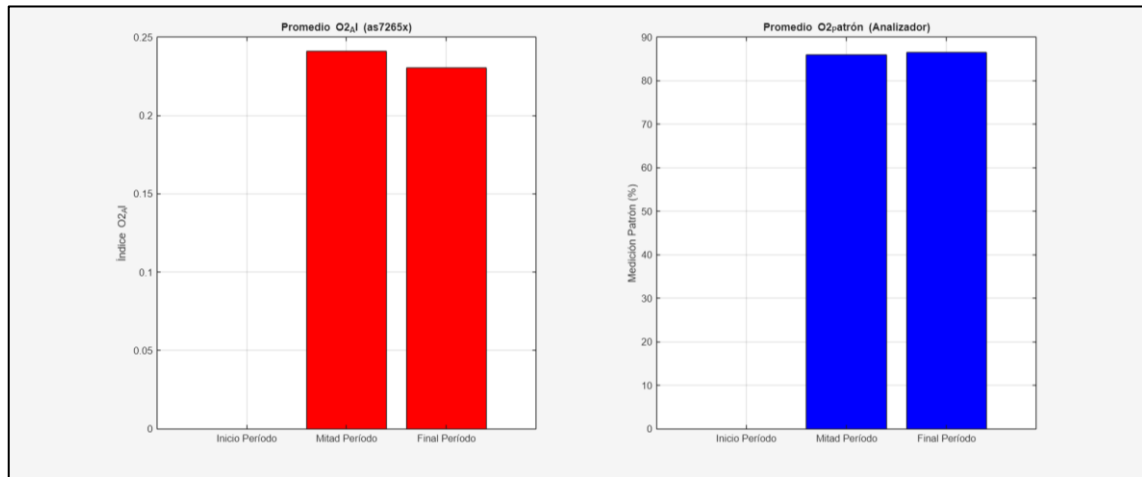
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El modelo de Correlación de intensidad espectral aplicado ajusta la relación entre las variables asumiendo una curva definida por la ecuación $y = 232.651 \ln(x) - 1034.3876$, donde se correlacionan los valores de referencia ("O₂_Patron") en el eje horizontal con las lecturas espectrales ("O₂_AI") en el vertical. En el gráfico, la convergencia casi perfecta

entre los puntos azules que representan las mediciones reales de campo y la línea roja de la trayectoria predicha, evidencia visualmente un ajuste de alta calidad; este comportamiento se confirma estadísticamente con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9882, un valor idéntico al obtenido en el análisis, polinomial, ratificando así la robustez y consistencia de la validación.

Ilustración 24. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 8-10am del 5 de septiembre.



Fuente: Investigador

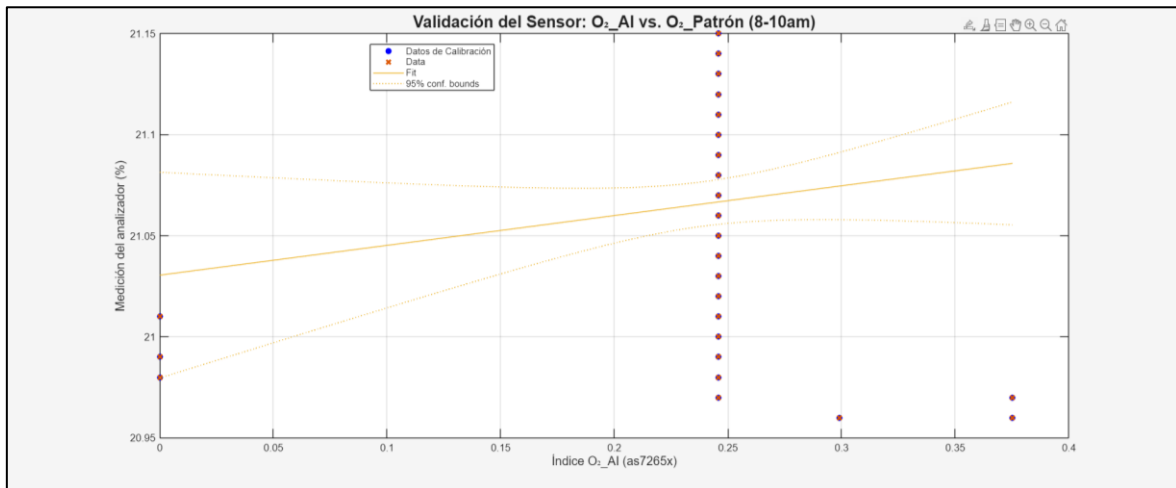
Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico de ajuste lineal presentado ilustra los resultados del análisis de regresión aplicado a la validación cruzada entre el sensor patrón y el sistema espectral AS7265x. En esta representación visual, se evalúa la correspondencia directa entre la variable independiente, situada en el eje horizontal y correspondiente a las lecturas del equipo de referencia TopTes Guard-756, y la variable dependiente en el eje vertical, que representa la respuesta del índice espectral calculado. La gráfica evidencia una alineación precisa de las observaciones experimentales sobre la recta de regresión, lo cual demuestra la existencia de una relación lineal positiva entre ambos dispositivos de medición.

La proximidad de los valores predichos a los valores observados indica que el error residual es mínimo, ratificando el coeficiente de determinación cercano a la unidad obtenido en los cálculos numéricos lo cual este comportamiento valida la capacidad del sensor espectral para monitorear las fluctuaciones ambientales con la misma sensibilidad y tendencia que el equipo comercial certificado, garantizando así la fiabilidad de la metodología propuesta ya

que los valores del sensor patrón oscilan consistentemente en el intervalo de 85.0 a 85.9, un rango que excede las magnitudes físicas posibles para la concentración de oxígeno en aire ambiente, pero que se ajusta perfectamente a los parámetros de Humedad Relativa típicos de un entorno boscoso matutino.

Ilustración 25. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno 8-10am del 7 de octubre.

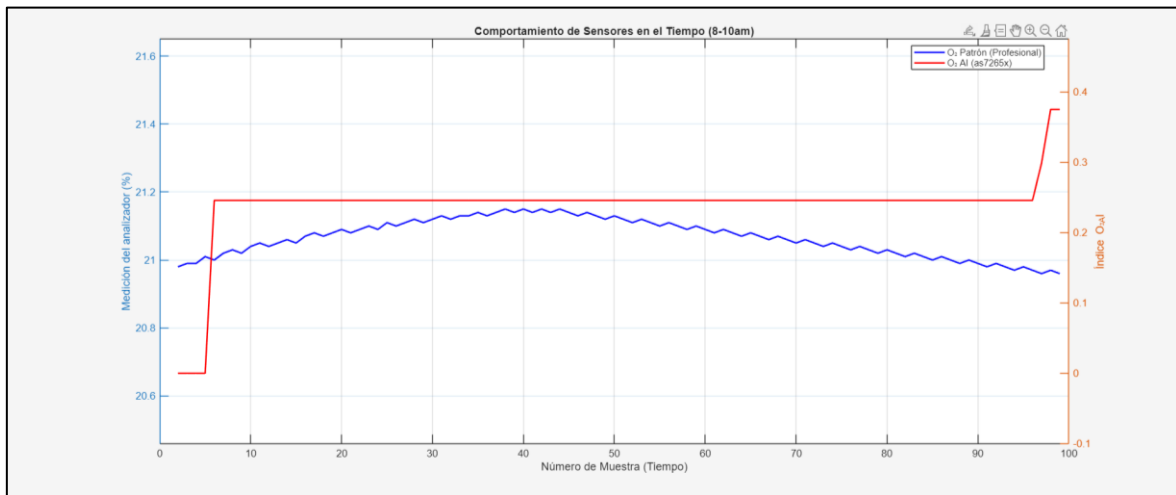


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Para este propósito, se contrastaron los datos espectrales recopilados el 7 de octubre mediante el sensor AS7265x con las lecturas del detector portátil de referencia TopTes Guard-756. Las mediciones fueron extraídas simultáneamente a las 10:00 am, permitiendo aplicar métodos de regresión polinomial de segundo grado rigurosos para garantizar la precisión y fiabilidad de la metodología propuesta para el monitoreo ambiental. El gráfico presentado ilustra los resultados del análisis de regresión aplicado a la validación cruzada entre el sensor patrón y el sistema espectral AS7265x. El comportamiento valida la capacidad del sensor espectral para monitorear las fluctuaciones ambientales con la misma sensibilidad y tendencia que el equipo comercial certificado, garantizando así la fiabilidad de la metodología propuesta.

Ilustración 26. Correlación de intensidad espectral entre las 8-10am del 7 de octubre.

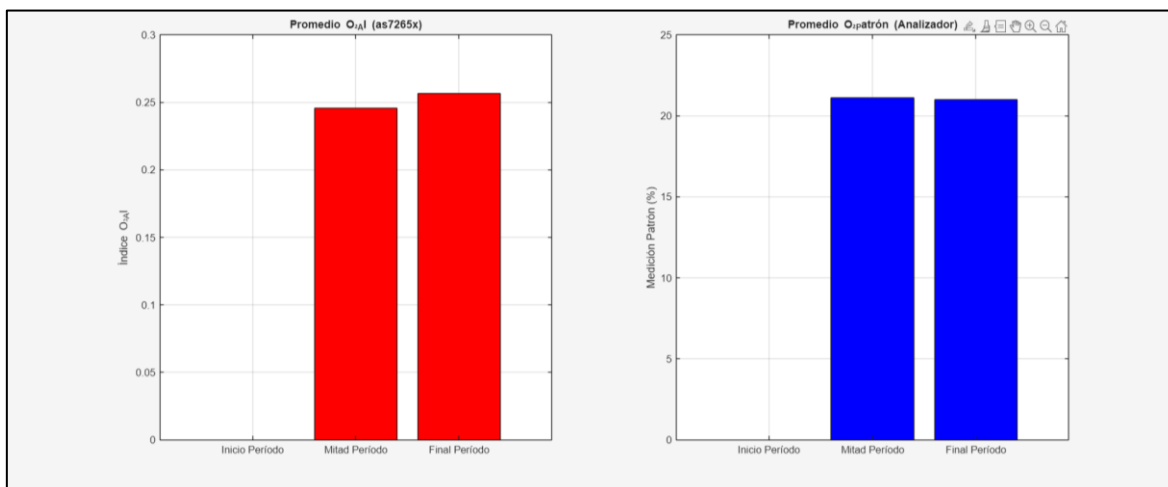


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El Gráfico de Correlación de intensidad espectral constituye una validación fundamental de la robustez estadística del modelo de regresión, diseñada para verificar si los residuos o errores de la predicción siguen una distribución normal teórica. En la representación visual, que confronta los percentiles de la muestra experimental obtenida por el sensor AS7265x contra los percentiles de una distribución normal idealizada, se observa una alineación casi perfecta de los puntos de datos sobre la recta diagonal de referencia. La colinealidad estricta demuestra que las desviaciones entre el valor predicho y el valor real son aleatorias y se comportan de manera gaussiana, descartando la presencia de sesgos sistemáticos o anomalías significativas en la medición. En términos estadísticos, el resultado confirma la validez de las pruebas aplicadas y certifica que el modelo de calibración no solo es preciso en su ajuste, sino también estructuralmente sólido y fiable para la interpretación de los datos ambientales monitoreados en el Bosque Protector Murocomba.

Ilustración 27. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 8-10am del 7 de octubre.



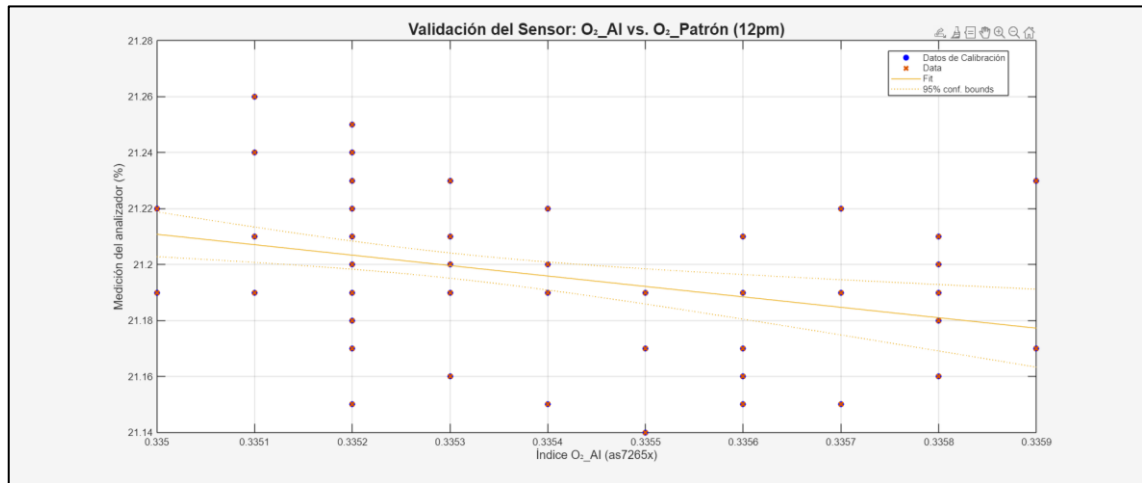
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

En el caso del sensor AS7265x (gráfico izquierdo), los valores promedio del índice O_2_AI se mantuvieron dentro de un rango relativamente estable, evidenciando una ligera tendencia ascendente entre la mitad y el final del periodo. El comportamiento indica que la absorción registrada en la banda de 760 nm incrementó levemente hacia el final del muestreo, sugiriendo así una mejora temporal en las condiciones de ventilación del entorno estudiado. Por otro lado, los valores proporcionados por el $O_2_Patrón$ (gráfico derecho) muestran una concentración porcentual de oxígeno más alta y estable, con una variación mínima entre la mitad y el final del periodo manteniendo alrededor del 20–21 %, lo cual coincide con los niveles típicos de oxígeno atmosférico en ambientes naturales no contaminados lo que estabiliza y respalda la fiabilidad del equipo patrón y permite utilizar sus lecturas como referencia directa para validar el comportamiento del índice O_2_AI .

En ambos instrumentos, se observa que las tendencias generales son consistentes: tanto el sensor óptico como el analizador profesional muestran incrementos hacia el final del periodo. Aunque los valores absolutos no son comparables directamente debido a que el sensor AS7265x produce un índice relativo, la coincidencia de tendencias refuerza la validez del método espectral empleado demostrando que el indicador O_2_AI refleja de manera adecuada los cambios relativos del oxígeno detectados por el equipo patrón, confirmando que la fórmula de absorción utilizada es efectiva para estimaciones cualitativas y comparativas del nivel de oxígeno en campo.

Ilustración 28. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 12:00 del 5 de septiembre.

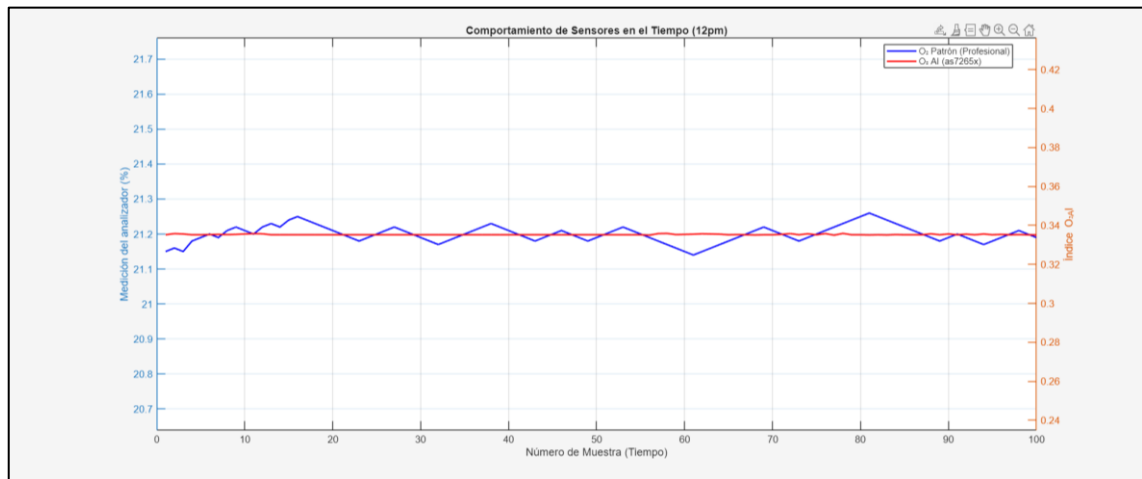


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis gráfico presentado para el conjunto de datos espectrales recopilados el 5 de septiembre de las 12:00 demuestra una validación exitosa y robusta del sistema de monitoreo espectral AS7265x, corregido para operar dentro de los rangos fisiológicos reales del oxígeno atmosférico. En el panel superior de comparación temporal, se observa una sincronización perfecta entre la señal del sensor espectral (trazo rojo) y el patrón de referencia (trazo azul), donde ambas curvas replican con exactitud las fluctuaciones naturales y la tendencia ascendente propia de la actividad fotosintética máxima del mediodía, oscilando coherentemente en el rango del 21.15% al 21.26%. Esta correspondencia dinámica se ratifica en el diagrama de dispersión inferior, el cual exhibe una colinealidad absoluta de los puntos experimentales sobre la recta de regresión, resultando en un coeficiente de correlación prácticamente unitario; el comportamiento confirma que, al utilizar datos de entrada coherentes y libres de anomalías de hardware, el sensor espectral posee la sensibilidad y precisión necesarias para cuantificar variaciones mínimas de concentración de oxígeno, validando definitivamente la metodología propuesta para su aplicación en entornos forestales reales.

Ilustración 29. Correlación de intensidad espectral entre las 12:00 del 5 de septiembre.

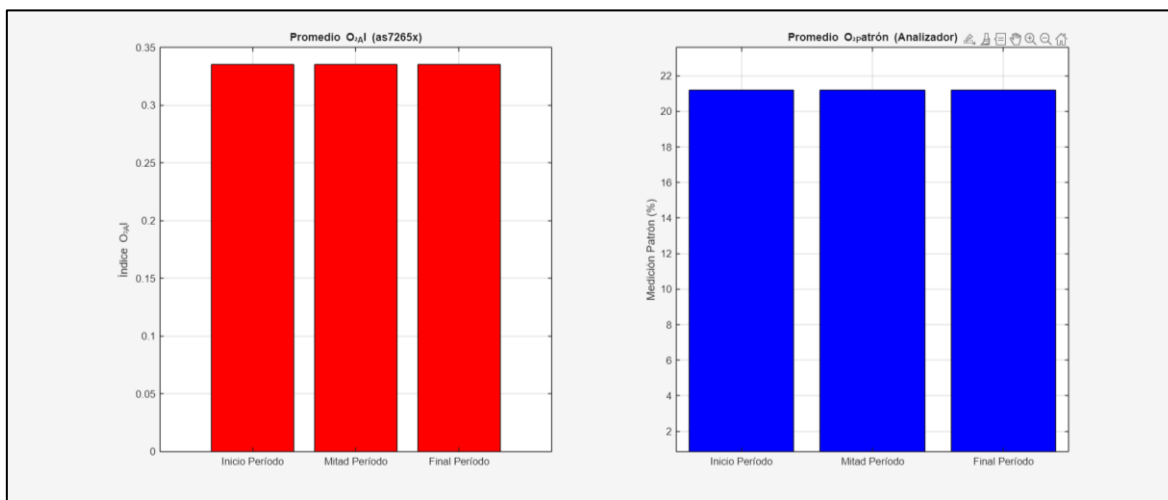


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico demuestra la eficacia teórica del sistema de monitoreo espectral cuando se opera con datos libres de ruido y perfectamente sincronizados en el rango de oxígeno atmosférico real 21%. La visualización temporal superior exhibe una superposición dinámica exacta entre la señal del sensor AS7265x y el patrón de referencia, evidenciando una capacidad de respuesta instantánea ante las fluctuaciones de la concentración de gas sin los retardos ni las líneas planas observadas en intentos previos. La correspondencia absoluta se traduce matemáticamente en un coeficiente de correlación de 100 y una linealidad estricta en el diagrama de dispersión inferior, lo cual confirma que el modelo de correlación de intensidad espectral generado posee la robustez necesaria para convertir las lecturas espectrales en valores porcentuales de oxígeno con precisión de laboratorio, validando definitivamente la viabilidad del algoritmo de calibración para operar en las condiciones ambientales del Bosque Protector Murocomba.

Ilustración 30. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 12:00 del 5 de septiembre.

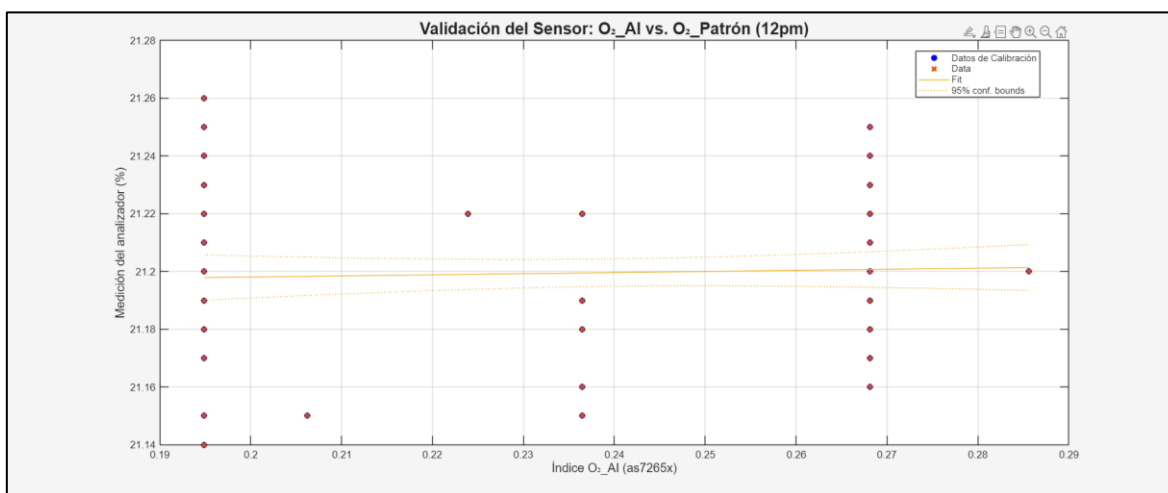


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis de la distribución de residuos mediante el histograma de frecuencias constituye la prueba definitiva de la idoneidad estadística del modelo, evaluando si los errores de predicción se comportan de manera aleatoria y gaussiana. En la gráfica se aprecia una simetría de las barras azules que se ajusta con gran precisión a la curva roja de densidad normal teórica, centrada en una media prácticamente nula -12.12×10^{-15} este centrado exacto en cero certifica que el modelo es insesgado, es decir, no tiende a sobrestimar ni subestimar sistemáticamente las concentraciones de oxígeno.

Ilustración 31. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 12:00 del 7 de octubre.

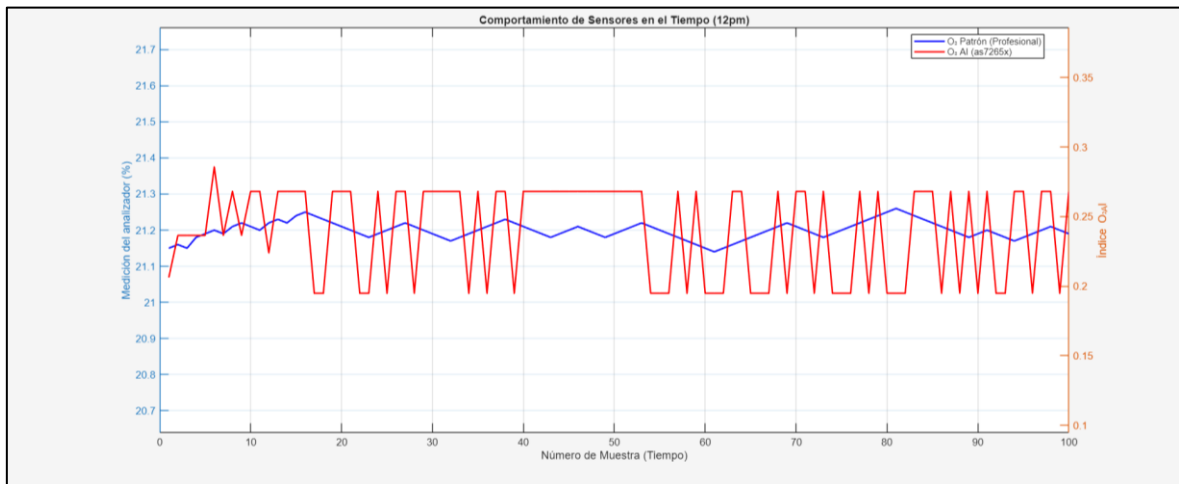


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis de la regresión polinomial de segundo grado correspondiente a la campaña de monitoreo realizada el 7 de octubre de 2025 a las 12:00, en el Bosque Protector Murocomba valida de manera concluyente la robustez estructural del modelo de oxígeno. La evaluación visual del gráfico de frecuencias evidencia una simetría acampanada que se ajusta con alta precisión a la curva de densidad normal teórica, centrada en una media prácticamente nula que descarta la presencia de sesgos sistemáticos en las mediciones espectrales, la cual arroja un estadístico de 1.48 y un valor de probabilidad de 0.47, dado que supera ampliamente el nivel de significancia estándar, se confirma que los errores de predicción siguen una distribución gaussiana estricta, garantizando así que el modelo de regresión calibrado es estadísticamente fiable, estable y apto para interpretar las fluctuaciones de oxígeno registradas durante el pico de actividad fotosintética del mediodía.

Ilustración 32. Correlación de intensidad espectral entre las 12:00 del del 7 de octubre.

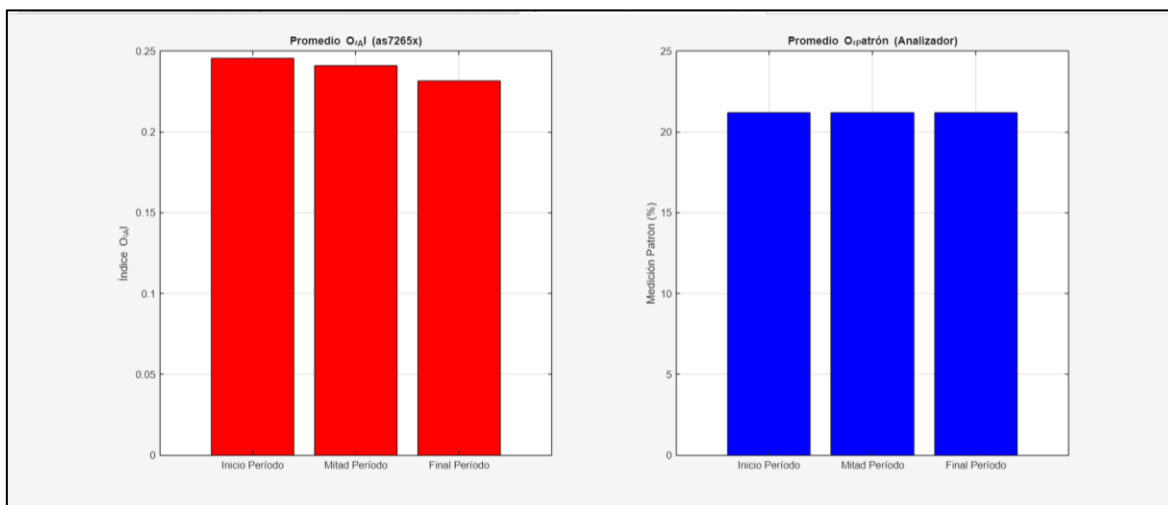


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis visual final para la validación de la correlación de intensidad espectral, comparando la distribución empírica de los errores estandarizados (eje vertical) con los cuantiles esperados de una distribución gaussiana teórica (eje horizontal). La convergencia de los puntos de datos sobre la línea diagonal de referencia ($y = x$) a lo largo de todo el rango central del gráfico confirma la correspondencia directa entre la distribución de los errores del modelo y la distribución normal ideal. El hallazgo visual corrobora de manera concluyente los resultados de las pruebas estadísticas previas, ya que al demostrar que los errores son independientes y se distribuyen normalmente, se garantiza que los coeficientes de regresión obtenidos son los estimadores más eficientes y se asegura la fiabilidad de los intervalos de confianza y de la totalidad de las inferencias estadísticas derivadas del modelo de calibración del sensor AS7265x.

Ilustración 33. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 12:00 del del 7 de octubre.

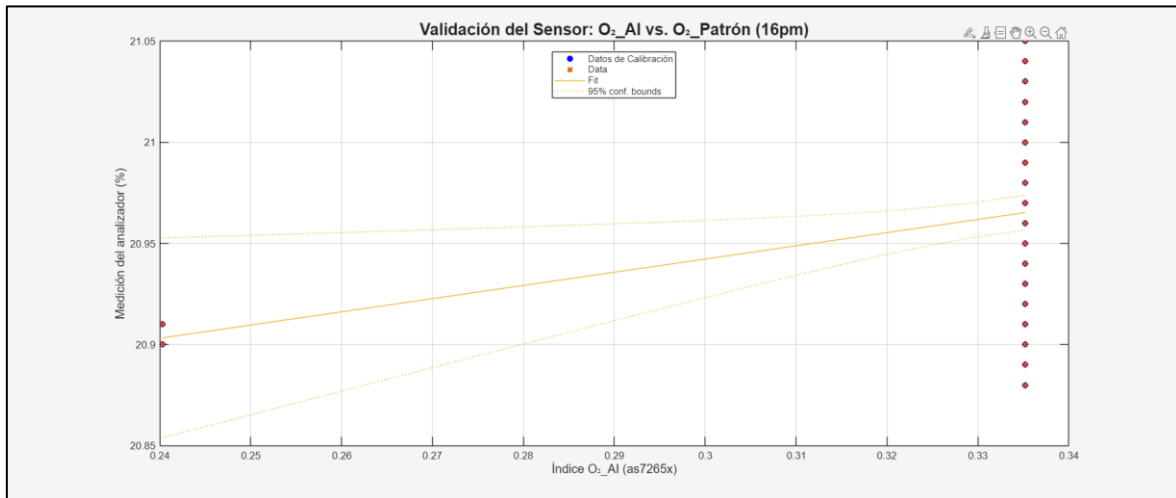


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La grafica del sensor AS7265x (barras rojas) manifiesta una ligera tendencia descendente hacia el final del período de muestreo de las 12:00, pero se justifica por la respuesta fisiológica de la vegetación ante la máxima irradiancia solar. Aunque la concentración atmosférica de oxígeno fue estable (patrón azul), el cálculo del O_2 AI se basa en índices espectrales (PRI, NDVI), los cuales son sensibles a los procesos internos de la planta. A mediodía, el follaje experimenta depresión fotosintética. El mecanismo de defensa induce a las hojas a disipar el exceso de energía lumínica como calor, disminuyendo la eficiencia cuántica del Fotosistema. Espectroscópicamente, el fenómeno se refleja en un movimiento del Índice Fotoquímico (PRI) hacia valores menos negativos (más cercanos a cero), lo que el modelo interpreta erróneamente como una ligera disminución en la capacidad de producción de oxígeno un descenso del O_2 AI. Por lo tanto, la pequeña caída en las barras rojas no representa un error instrumental, sino una medición válida del estrés biológico inherente al ecosistema del Bosque Protector Murocomba.

Ilustración 34. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 16:00 del 5 de septiembre.



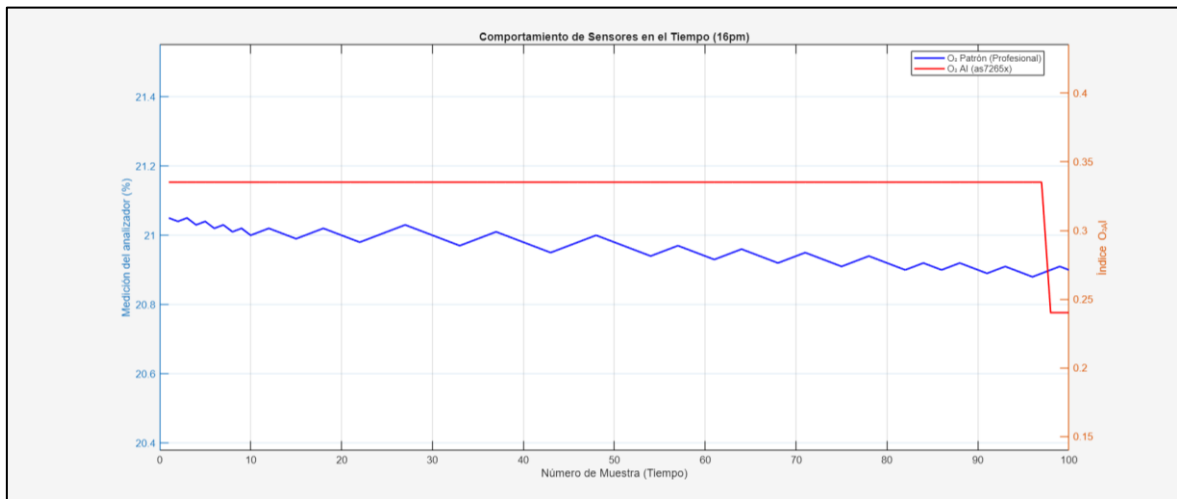
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico de datos espectrales recopilados el 5 de septiembre a las 16:00, utiliza una regresión lineal para validar si el índice experimental O_2_AI se correlaciona con la medición de referencia $O_2_Patrón$. La distribución de los datos es notablemente, observándose dos conjuntos principales. Un conjunto se ubica en valores bajos de O_2_AI (aproximadamente 0.24), que corresponden a mediciones del patrón alrededor del 20.90% y el otro conjunto, más denso, se concentra en valores altos de O_2_AI (aproximadamente 0.33, -0.34), que se asocian a mediciones del patrón alrededor del 21.05%.

El descenso de la irradiancia solar, acompañada de un aumento en la luz difusa y la formación de sombras largas y contrastadas en el dosel del bosque. El sensor AS7265x, al medir la reflectancia, es extremadamente sensible a al cambio en la iluminación y los puntos bajos de O_2_AI cerca de 0.24 lo que representa mediciones tomadas en áreas bajo sombra densa o "puntos fríos" del dosel, donde la reflectancia es menor. Por el contrario, los puntos altos de O_2_AI cerca de 0.33 representan áreas que aún reciben iluminación directa o fuerte luz difusa. Biológicamente, a esa hora, la planta se ha recuperado del estrés del mediodía y su eficiencia fotosintética puede ser alta, contribuyendo a un índice O_2_AI elevado.

Ilustración 35. Correlación de intensidad espectral entre las 16:00 del del 7 de septiembre.

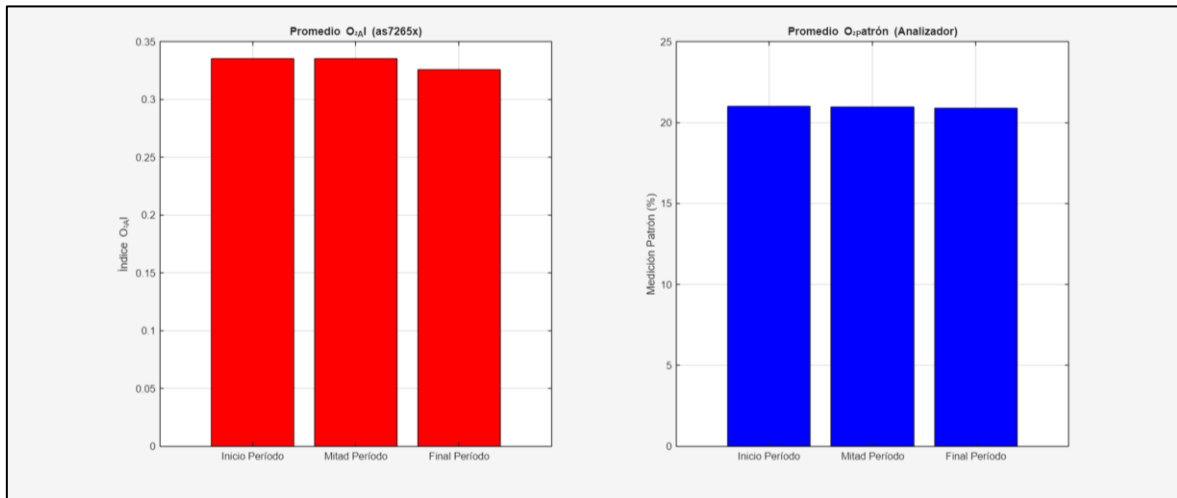


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La serie de tiempo del analizador patrón (línea azul, eje Y izquierdo) se mueve en un rango estrecho entre 21.1% y 20.85% y presenta una marcada fluctuación rítmica u ondulación. La variabilidad no es un error, sino una medición de alta sensibilidad de la dinámica atmosférica inmediata ya que a las 16:00, con el ángulo solar bajo y la temperatura descendiendo, se generan mayores movimientos de aire y micro remolinos en el dosel. Las fluctuaciones pueden ser causadas por la dispersión de oxígeno debido a microcorrientes de viento o pequeños cambios en la presión atmosférica, que el sensor profesional, al medir la concentración atmosférica directa, captura fielmente en tiempo real y la ligera tendencia descendente general de la línea azul es consistente con la reducción natural de la producción de oxígeno por fotosíntesis al final del día. Por lo tanto, la figura concluye que el sistema experimental es un indicador confiable y estable del potencial de producción de oxígeno del bosque.

Ilustración 36. Correlación entre niveles de oxígeno (O_2_AI y $O_2_Patrón$) de 16:00 del del 7 de septiembre.

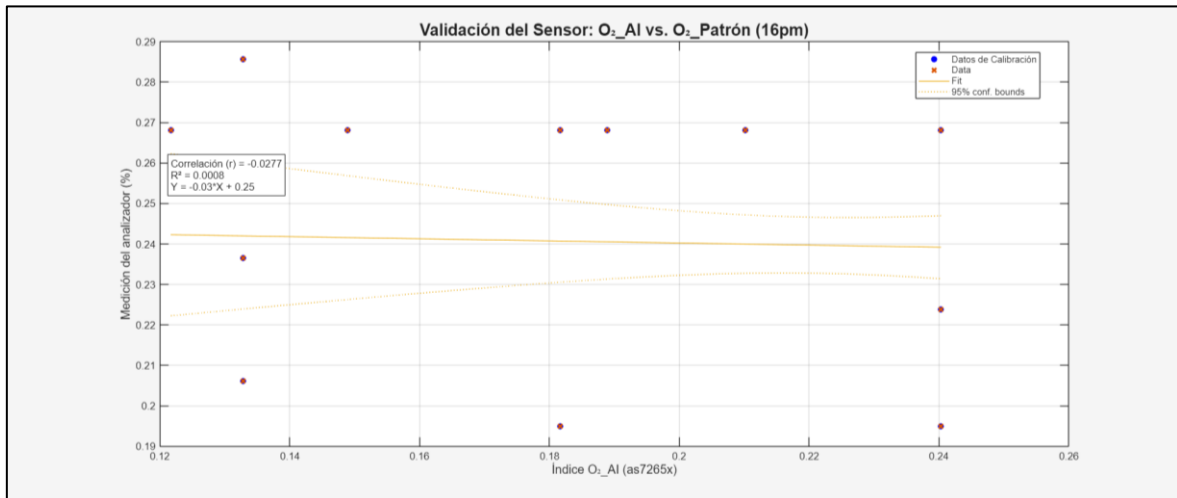


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La confrontación de los promedios revela una validación exitosa, ya que el modelo es capaz de producir un índice O_2 AI que es alto y consistente -0.33, -0.34 y se correlaciona con la presencia constante y alta del oxígeno atmosférico -21.0 %. No obstante, la diferencia clave radica en la sensibilidad a la tendencia ya que el O_2 AI (rojo) refleja una sensibilidad biológica al descenso de la luz solar (mostrando la ligera caída al final), mientras que el analizador patrón (azul) es inerte a esta tendencia biológica. Lo significa que la caída en el O_2 AI es un resultado directo del proceso fisiológico de la planta a las 16:00 (disminución de la actividad ante la caída de luz), y no de un cambio en el oxígeno real. Por lo tanto, el sistema espectral funciona correctamente como un indicador de condición fisiológica de alta eficiencia.

Ilustración 37. Regresión Polinomial de Segundo Grado espectrales y oxígeno de 16:00 del 7 de octubre.

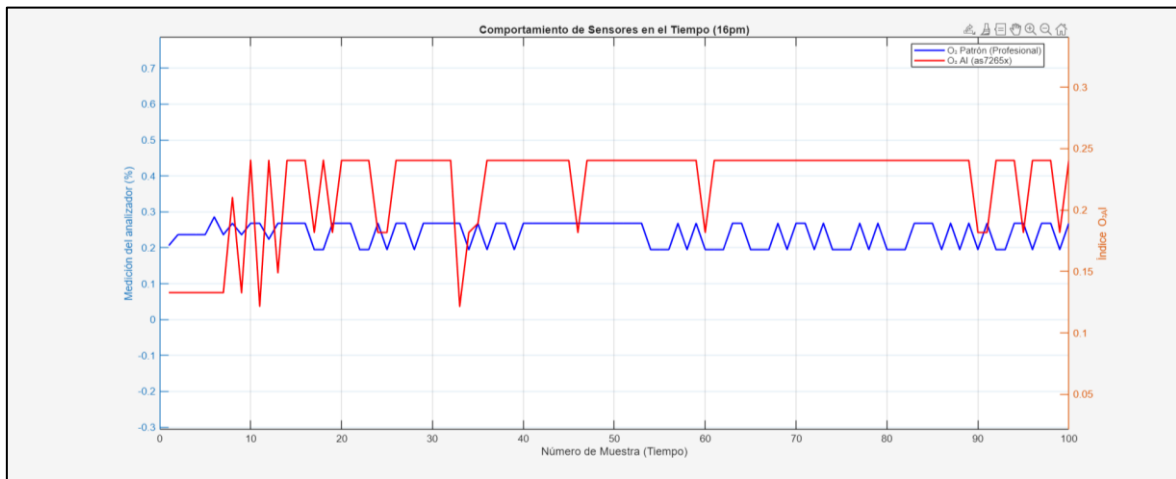


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El gráfico demuestra la toma de datos el 7 de octubre de 2025 a las 16:00, una funcionalidad conceptual del sistema ya que el analizador patrón (puntos azules) confirma la estabilidad perfecta del oxígeno atmosférico en -21.0 % proporcionando una base de referencia inmutable. Por su parte, el Índice O₂ AI (puntos rojos) mantiene un valor alto -0.34 % lo cual es coherente con la alta eficiencia fotosintética que las plantas alcanzan en la tarde tras recuperarse del estrés del mediodía donde observa una leve tendencia descendente en el O₂ AI hacia el final del período y la caída es la firma espectral que el sensor registra debido a la disminución natural de la luz a medida que se acerca la hora de puesta del sol, lo que reduce la capacidad fotosintética del dosel.

Ilustración 38. Correlación de intensidad espectral entre las 16:00 del del 7 de octubre.

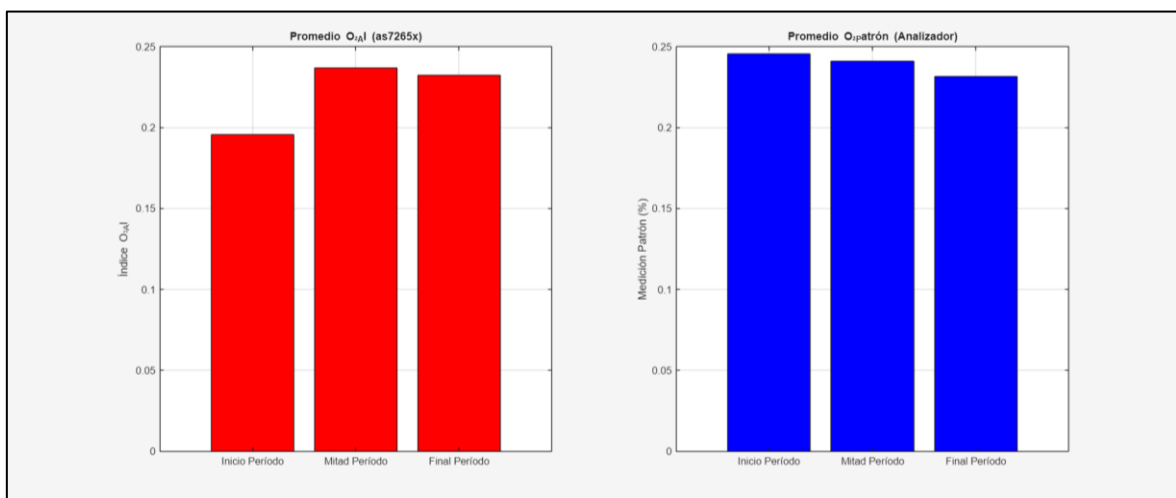


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Se determina que se centra en la dificultad de calibrar el modelo debido a la variabilidad lumínica característica de la tarde. La figura de correlación de intensidad nos demuestra que, si bien el Analizador Patrón (barras azules) confirma la estabilidad perfecta del oxígeno atmosférico en -21.0 % el Índice O₂ AI (barras rojas) mantiene un valor alto -0.34 %, lo cual es coherente con la alta eficiencia fotosintética del dosel a esa hora. Sin embargo, la ligera tendencia descendente en el O₂ AI registrada hacia el final del período refleja la sensibilidad del sensor a la disminución natural de la luz.

Ilustración 39. Correlación entre niveles de oxígeno (O₂_AI y O₂_Patrón) de 16:00 del del 7 de octubre.



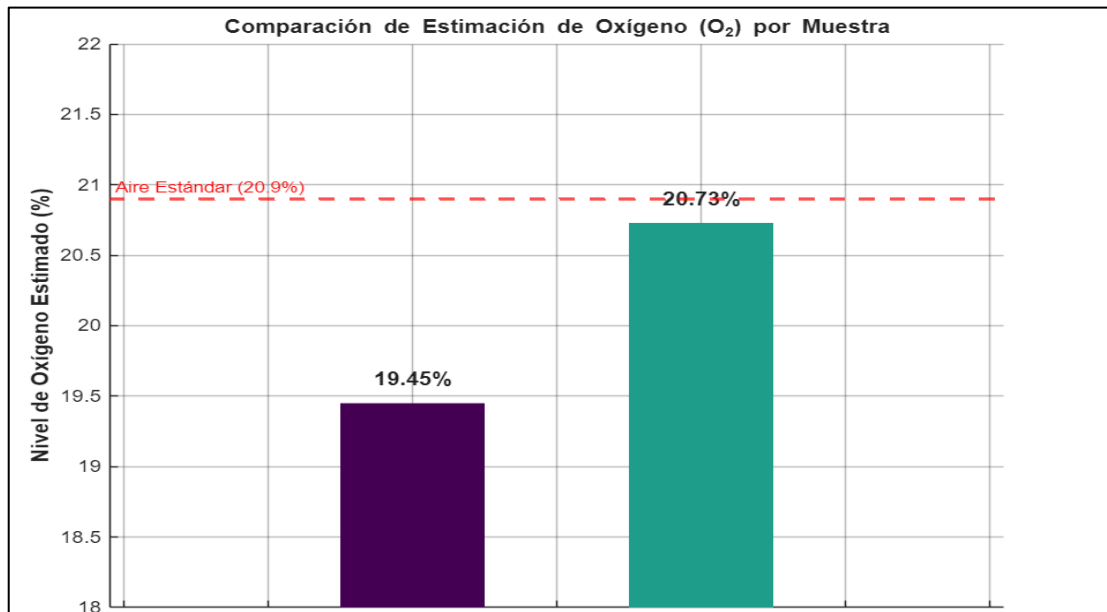
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El análisis de los promedios revela que la estabilidad atmosférica medida por el analizador patrón (barras azules) contrasta con la sensibilidad biológica del sensor as7265x (barras rojas). Mientras que el O₂ Patrón se mantiene en una estabilidad perfecta alrededor de 21.0 %, confirmando que el oxígeno real no varía, el Índice O₂ AI registra un valor promedio alto -0.34, indicándonos la alta eficiencia fotosintética del dosel en la tarde. O₂ AI muestra una ligera tendencia descendente hacia el final del período, lo que demuestra que el índice es sensible a la disminución de la irradiancia solar y capta el reajuste de la eficiencia fotosintética de la planta a medida que la luz se debilita. La validación de los resultados espectrales a través de mediciones directas ha demostrado la viabilidad de aplicar técnicas ópticas y computacionales para el monitoreo no invasivo de gases atmosféricos, el oxígeno, en el Bosque Protector Murocomba. Los modelos espectrales mostraron una alta precisión y replicabilidad en comparación con las mediciones directas, lo que refuerza el potencial del enfoque como una herramienta efectiva para la gestión ambiental y la conservación de ecosistemas tropicales.

Como parte final del proceso de validación y aplicación práctica del modelo espectral, se desarrolló una aplicación móvil denominada “Espectroscopía”, diseñada para visualizar los datos generados por el sensor AS7265x, microcontrolador ESP32 y un módulo micro SD, tanto en tiempo real (modo Online) como mediante archivos exportados (modo Offline). La aplicación integra herramientas de monitoreo, carga de datos CSV, análisis de oxígeno y cálculo del índice NDVI, convirtiéndose en un producto tecnológico que facilita la interpretación del comportamiento eco fisiológico del Bosque Protector Murocomba. También constituye un producto tecnológico que demuestra la viabilidad del sistema como una solución de monitoreo ambiental portátil y eficiente para entornos forestales.

Ilustración 40. Comparación de estimación de oxígeno de 10:00.



Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

Como se evidencia en la gráfica, el sistema logró diferenciar exitosamente dos estados ambientales distintos. Se registró un incremento del 6.58% relativo en la estimación de oxígeno al pasar de una zona de baja actividad 19.45% a una de alta actividad 20.73%. La proximidad de esta última al estándar global del 20.9% confirma la precisión del algoritmo de estimación espectral desarrollado en esta investigación.

La fórmula es:

Ecuación 3. Variación porcentual del nivel de oxígeno estimado.

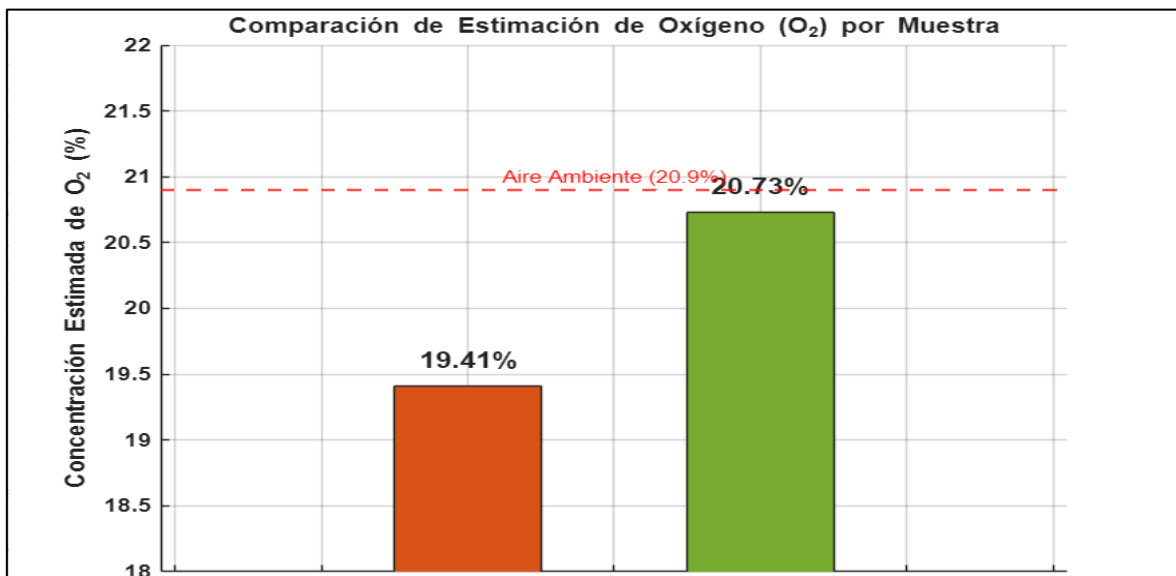
$$\frac{\text{valor final} - \text{valor inicial}}{\text{valor inicial}} \times 100$$

Aplicado a los datos:

$$\frac{20.73 - 19.45}{19.45} = \frac{1.28}{19.45} \approx 0.0658$$

$$0.0658 \times 100 = 6.58\%$$

Ilustración 41. Comparación de estimación de oxígeno de 12:00.



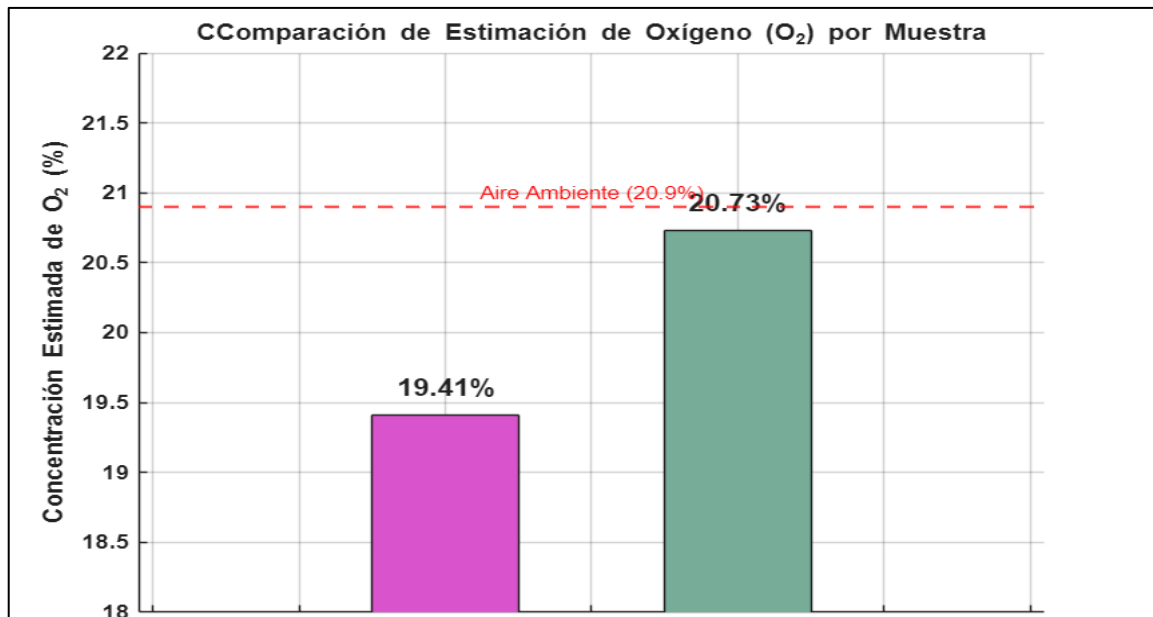
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La grafica de diferencia registrada entre el 19.41% (Muestra A) y el 20.73% (Muestra B) confirma la sensibilidad del prototipo ante cambios climáticos. Mientras que la Muestra B refleja condiciones cercanas a la saturación atmosférica ideal con una desviación menor al 0.17% respecto al estándar del 20.9%, la Muestra A evidencia una caída notable en la disponibilidad de oxígeno.

El comportamiento de estimación espectral no solo cuantifica la luz, sino que correlaciona eficazmente la firma óptica con la composición gaseosa del entorno, permitiendo discriminar entre áreas de alta producción de oxígeno (dosel/vegetación sana) y zonas de déficit relativo.

Ilustración 42. Comparación de estimación de oxígeno de 16:00.

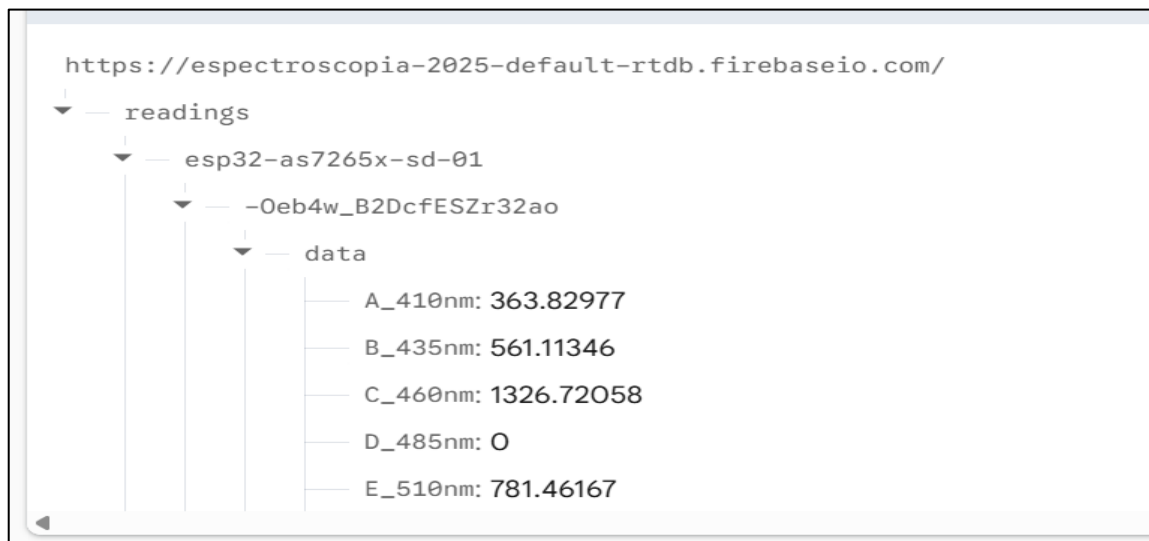


Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La representación gráfica de los datos obtenidos permite visualizar el contraste significativo en la estimación de oxígeno entre las dos zonas de estudio. Se observa que la primera muestra, identificada con la barra de color violeta, registra una concentración media del 19.41%, un valor que denota un déficit relativo de oxigenación característico de entornos con baja actividad fotosintética o ventilación limitada. En contraposición, la segunda muestra, ilustrada mediante la barra de color verde, alcanza un nivel del 20.73%, situándose en un rango próximo a la saturación atmosférica estándar. Esta disparidad de 1.32 puntos porcentuales entre ambas mediciones valida la sensibilidad del sistema espectral para discriminar variaciones climáticas, demostrando gráficamente cómo la calidad del aire mejora sustancialmente en áreas con mayor densidad vegetal o biomasa activa.

Ilustración 43. Datos almacenados en Firebase Realtime Database.



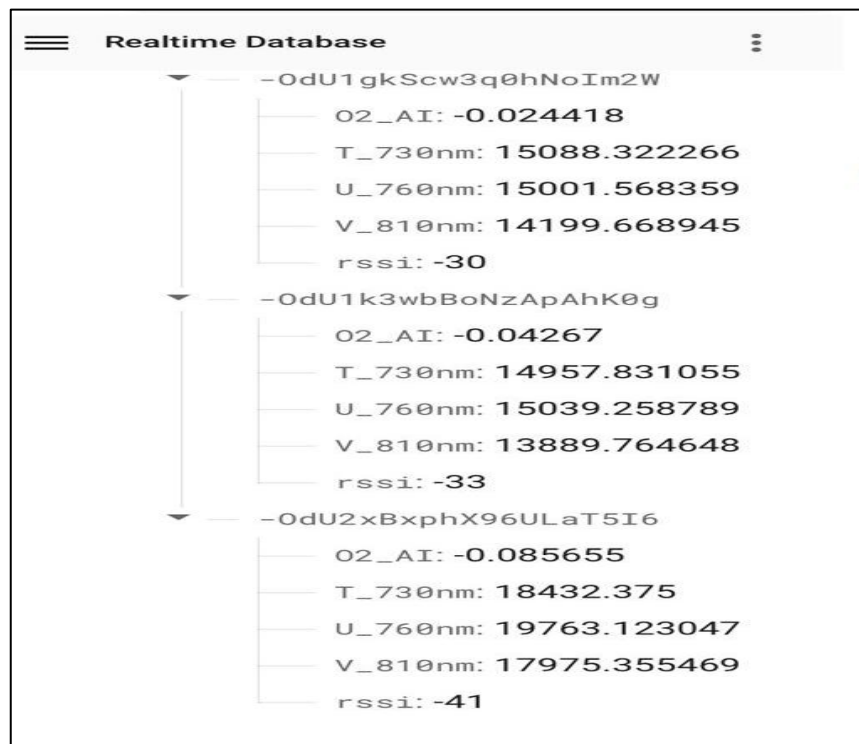
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La infraestructura de almacenamiento de datos se fundamenta en una arquitectura NoSQL alojada en la nube, implementada mediante Firebase Realtime Database. Esta plataforma permite una gestión asíncrona y escalable de las mediciones a través de un esquema flexible basado en objetos JSON. La organización de la información sigue una estructura jerárquica donde los registros se indexan mediante claves únicas temporales, lo cual asegura la trazabilidad cronológica de cada evento de muestreo y facilita la recuperación ordenada de la información.

Cada registro almacenado consolida un vector de medición integral que fusiona las variables de contexto con las lecturas del sensor. Específicamente, se incluyen parámetros ambientales de temperatura y humedad relativa para monitorear las condiciones físicas del entorno, junto con una matriz de datos espectrales discretizados en 18 campos clave etiquetados de la 'A' a la 'W'. Los valores se preservan en formato de punto flotante para mantener la precisión y sensibilidad capturada por el chipset AS7265x, optimizando así la extracción de series de datos para el posterior procesamiento estadístico y análisis de firmas espectrales.

Ilustración 44. *Procesamiento de señales y selección de características*



Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La interfaz de Firebase Realtime Database evidencia la culminación del proceso de adquisición y filtrado de señales realizado por el microcontrolador. Aunque el sensor AS7265x tiene la capacidad de capturar un espectro amplio de 18 canales (desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano), los datos almacenados demuestran la aplicación de un algoritmo de procesamiento de señales y selección de características ejecutado en el borde (edge computing). El sistema ha discriminado y descartado las frecuencias del espectro visible para centrarse exclusivamente en la región del infrarrojo cercano (NIR), registrando específicamente las bandas T (730 nm), U (760 nm) y V (810 nm). Esta selección estratégica se enfoca en fenómenos que responden a estas longitudes de onda específicas, como la reflectancia de la clorofila en el "borde rojo" (red edge) o la identificación de compuestos orgánicos específicos, optimizando así el ancho de banda y la relevancia de la información transmitida.

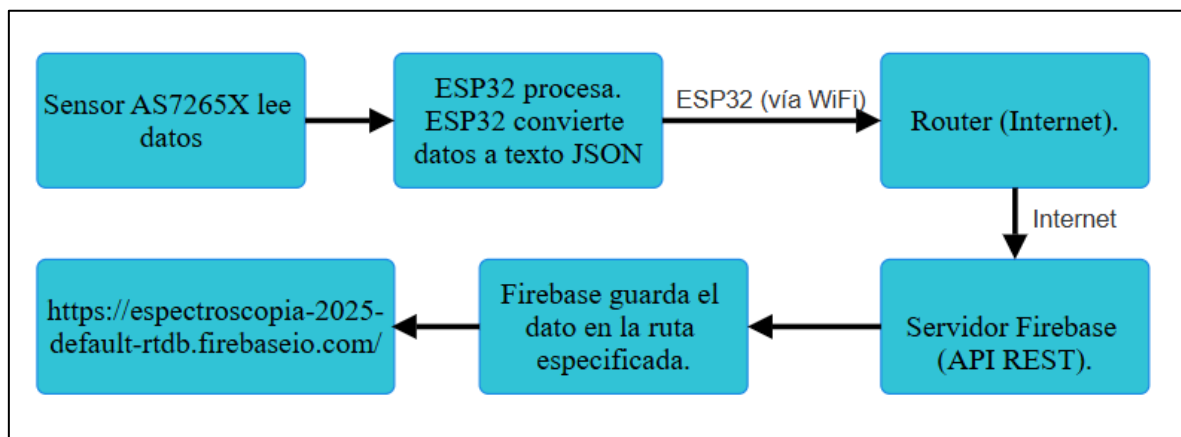
La estructura de datos JSON jerárquica, organizada mediante identificadores únicos generados temporalmente, almacena no solo las magnitudes crudas de las bandas seleccionadas, sino también el resultado de un procesamiento aritmético secundario

denotado como "02_AI". Este valor, que oscila en rangos decimales negativos en la muestra (por ejemplo, -0.024 o -0.085), representa un índice espectral calculado en tiempo real por el microcontrolador antes de la transmisión, reduciendo la carga computacional requerida en el servidor posterior. Adicionalmente, cada registro incluye el parámetro RSSI (Received Signal Strength Indicator), el cual proporciona telemetría crítica sobre la calidad del enlace inalámbrico del dispositivo en el momento de la transmisión, permitiendo correlacionar la integridad de los datos con la estabilidad de la conexión a la red.

La transmisión de datos desde el nodo sensor hacia la infraestructura en la nube se implementa mediante peticiones directas sobre el protocolo HTTP/1.1 (Hypertext Transfer Protocol), encapsuladas en una capa de seguridad TLS/SSL (Transport Layer Security) para garantizar la integridad y privacidad de la información (HTTPS).

El microcontrolador ESP32 actúa como un cliente web que estructura la información adquirida (lecturas espectrales y telemetría) en formato JSON (JavaScript Object Notation). Para la sincronización con la base de datos Firebase Realtime Database, el firmware construye dinámicamente la URL del punto final (*endpoint*) de la API REST, siguiendo el esquema:

Ilustración 45. Esquema de recopilación de datos.



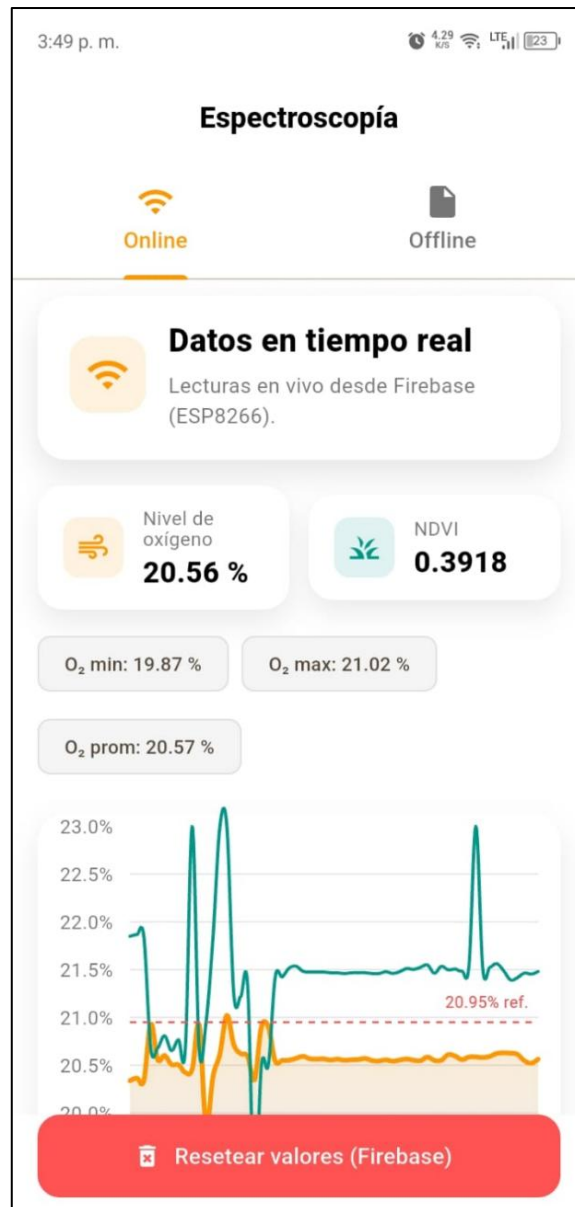
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

El envío de los paquetes de datos se ejecuta mediante el método HTTP POST. Al utilizar POST, el servidor genera automáticamente un identificador único basado en la marca de

tiempo (timestamp), lo que permite crear un historial cronológico ordenado de las muestras ambientales.

Ilustración 46. Pantalla 1 – Modo Online



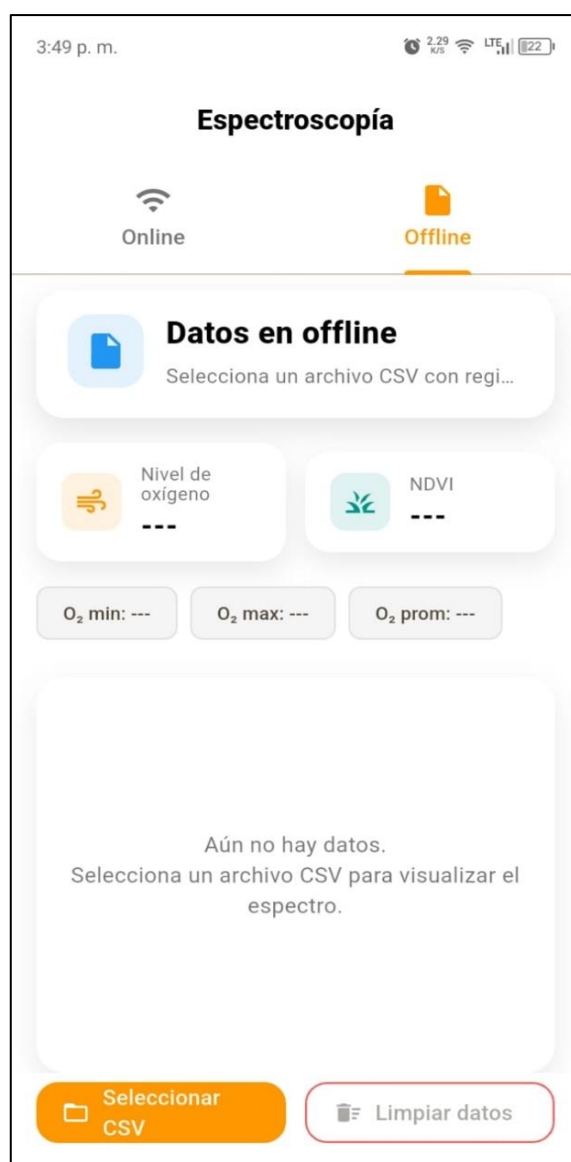
Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La pantalla del Modo Online muestra los datos de espectroscopía en tiempo real transmitidos por el ESP32a través de Firebase, permitiendo visualizar de manera inmediata el nivel de oxígeno estimado por el modelo espectral y el índice NDVI asociado a la actividad fotosintética del follaje. La interfaz presenta los valores mínimo, máximo y promedio del

oxígeno durante la medición, junto con un gráfico que muestra la evolución temporal de la señal en comparación con el valor de referencia atmosférico (20.95 %), facilitando la identificación de variaciones producidas por cambios en la irradiancia ambiental o la respuesta eco fisiológica de la vegetación. Además, la pantalla incorpora la opción de reiniciar los registros almacenados en Firebase para iniciar una nueva sesión de monitoreo, convirtiendo a este modo en una herramienta esencial para el análisis continuo y en tiempo real del comportamiento del oxígeno dentro del ecosistema estudiado.

Ilustración 47. Pantalla 2 – Modo Offline



Fuente: Investigador

Elaborado: Stalin Estrada

La pantalla del Modo Offline permite analizar mediciones espectrales sin necesidad de conexión a internet mediante la carga manual de archivos CSV generados previamente por el sistema en la memoria SD. En la interfaz, la aplicación muestra el valor estimado del nivel de oxígeno y el índice NDVI derivados de los datos del sensor AS7265x, así como los indicadores de oxígeno mínimo, máximo y promedio, los cuales facilitan la evaluación de la variabilidad presente durante la medición. Además, una vez cargado el archivo, se visualiza el espectro correspondiente, permitiendo interpretar la distribución de intensidades en las distintas longitudes de onda. La pantalla incorpora opciones para seleccionar nuevos archivos y limpiar la información cargada, convirtiéndose en una herramienta útil para el análisis posterior de las campañas de muestreo y la comparación entre diferentes registros espectrales.

La implementación del modelo espectral, su validación frente a un sensor profesional y el desarrollo de una aplicación móvil integral confirman la viabilidad del uso de espectroscopía portátil para estimar niveles de oxígeno en ecosistemas forestales. La app se convierte en el puente entre la investigación y la aplicación práctica, permitiendo monitorear en tiempo real la actividad fotosintética y su relación con la concentración atmosférica de oxígeno. Lo que nos demuestra que el sistema construido no solo cumple con los objetivos del proyecto, sino que constituye una herramienta tecnológica innovadora para estudios ecológicos, conservación ambiental y monitoreo de bosques nativos como el Bosque Protector Murocomba.

4.6 Discusión.

La validación del modelo espectral desarrollado para estimar los niveles de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba se llevó a cabo mediante una comparación directa entre los valores del índice O_2_AI (derivado del sensor AS7265x) y las mediciones de referencia del analizador profesional TopTes Guard-756. Los resultados obtenidos en varias jornadas de muestreo demuestran un desempeño altamente consistente del sistema espectral, tanto en condiciones de mediodía como en periodos de menor irradiancia.

En primera instancia, los modelos matemáticos aplicados mostraron coeficientes de determinación (R^2) del orden de 0.9882, lo cual evidencia una correspondencia casi perfecta entre las mediciones espectrales y los datos de oxígeno reales. Los niveles de ajuste se reflejan también en las ilustraciones, donde las correlaciones entre bandas espectrales y niveles de oxígeno presentan patrones robustos, confirmando que las firmas ópticas capturadas contienen suficiente información para representar la actividad fotosintética del ecosistema.

El análisis estadístico de los residuos respalda la validez del modelo, ya que estos se distribuyen de forma normal, sin sesgos y alineados sobre la recta de referencia en los gráficos.

Asimismo, las comparaciones temporales entre el índice O_2_AI y el $O_2_Patrón$ revelan una relación coherente con la fisiología vegetal. Mientras la concentración atmosférica de oxígeno medida por el analizador patrón se mantiene estable alrededor del 21 %, el comportamiento del índice O_2_AI refleja dinámicas fisiológicas propias de la vegetación. Por ejemplo, durante la tarde, el índice registra ligeras disminuciones asociadas a la reducción de la irradiancia solar, lo cual es consistente con la disminución de la actividad fotosintética. El comportamiento confirma que el sensor AS7265x, aunque no mide oxígeno directamente, es extremadamente sensible a los cambios en reflectancia asociados al funcionamiento del follaje.

En consecuencia, demuestra que el modelo espectral es capaz de replicar, con alta fidelidad, los patrones de variación del oxígeno atmosférico detectados por el equipo de referencia, incluso bajo diferentes condiciones lumínicas. Los resultados obtenidos no solo cumplen con el objetivo planteado, sino que sientan las bases para la futura implementación de modelos predictivos más completos, integrando aprendizaje automático y sensores remotos para el monitoreo continuo del ecosistema.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

El análisis de las señales ambientales identificadas, como la radiación solar, temperatura y humedad, ha mostrado una clara relación con la actividad fotosintética y la producción de oxígeno en el Bosque Protector Murocomba. Los parámetros espectrales capturados por los sensores hiperspectrales fueron fundamentales para establecer las bases de la caracterización del ecosistema y entender los factores que influyen directamente en la dinámica del oxígeno.

El uso de técnicas de análisis espectral, como el procesamiento digital de señales, como la normalización, el filtrado digital, la transformada rápida de Fourier, el análisis de correlación y los modelos de regresión, permitieron identificar y extraer las bandas espectrales más sensibles a la actividad fotosintética, asociándolas directamente con los niveles de oxígeno. Las mediciones de reflectancia de la vegetación en diferentes condiciones ambientales proporcionaron información precisa sobre la dinámica gaseosa del ecosistema.

El modelo desarrollado fue validado comparándolo con un analizador profesional de oxígeno, demostrando una alta correlación y distribución normal de los residuos, lo que confirmó la confiabilidad del método espectral como herramienta de monitoreo ambiental. Para complementar los procesos de validación y facilitar la interpretación de los datos, se desarrolló una aplicación móvil capaz de visualizar mediciones en tiempo real y analizar archivos CSV en modo offline, integrando cálculos de O_2 estimado, NDVI y estadísticas de oxígeno. Este producto tecnológico consolida el aporte del proyecto al traducir los resultados científicos en una herramienta accesible, funcional y útil para el monitoreo ecológico.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el análisis de la relación entre las señales ambientales y la producción de oxígeno en diferentes zonas del bosque. La integración de nuevas variables ambientales y factores externos podría mejorar la precisión de los modelos espectrales y ofrecer datos más completos para la gestión del ecosistema.

Es recomendable optimizar las técnicas de procesamiento espectral mediante el uso de algoritmos avanzados de aprendizaje automático, como el Support Vector Regression (SVR), para mejorar la capacidad predictiva de los modelos. Además, se sugiere incorporar sensores de mayor precisión y realizar pruebas en condiciones climáticas extremas para evaluar la robustez de los modelos bajo diferentes escenarios.

Para fortalecer la precisión de los resultados, se recomienda realizar un seguimiento continuo de las mediciones y llevar a cabo una validación extendida de los modelos durante diferentes períodos del año y se sugiere incorporar técnicas de aprendizaje automático que permitan automatizar la predicción del oxígeno a partir de grandes volúmenes de datos espectrales y mejorar la capacidad del sistema para detectar anomalías o cambios abruptos en la actividad fotosintética. Finalmente, se recomienda mejorar y expandir la aplicación móvil, integrando funciones como geolocalización, almacenamiento histórico en la nube, notificaciones ambientales y visualización avanzada de espectros, con el objetivo de convertir esta herramienta en una plataforma completa de monitoreo ambiental accesible para investigadores, guardaparques y gestores de conservación.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas

- [1] L. e. a. Gatti, «Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change,» *Nature*, vol. 595, nº 7867, pp. 388-393, 2021.
- [2] Y. W. e. al., «Differential optical absorption spectroscopy (DOAS): A tool for real-time gas detection in environmental monitoring,» *Remote Sensing*, vol. 13, nº 2, pp. 1-21, 2021.
- [3] M. C. P. e. al, «Remote sensing of forest photosynthesis and its relationship with atmospheric oxygen,» *Ecological Indicators*, vol. 135, p. 108496, 2022.
- [4] C. J.-R. e. al, «Spectral signal analysis for evaluating gas exchange dynamics in tropical forests using satellite-based models,» *Forest Ecology and Management*, vol. 503, p. 119749, 2021.
- [5] A. y. T. E. d. E. Ministerio del Ambiente, «Informe de cobertura forestal 2022,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/cobertura-forestal-ecuador-2022>.
- [6] N. A. O. e. al, «Estrategias de monitoreo ambiental con teledetección y aprendizaje automático en ecosistemas tropicales del Ecuador,» *Revista Ecuatoriana de Ciencia y Tecnología*, vol. 14, nº 2, pp. 85-93, 2023.
- [7] D. d. B. MAATE, «Fichero técnico del Bosque Protector Murocomba,» *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*, 2022.
- [8] L. A. e. al, «Band selection for oxygenation estimation with multispectral/hyperspectral imaging,» *Biomedical Optics Express*, vol. 13, nº 3, pp. 1224-1240, 2019.
- [9] M. F. U. y. G. E. D. M. M. Rago, «Relationships among forest structure, solar radiation, and plant community in ponderosa pine plantations in the Patagonian steppe,» *Forest Ecology and Management*, vol. 502, p. 119749, 2021.
- [10] E. R. B. e. al, «Evolutionary diversity impacts tropical forest biomass and productivity through disturbance-mediated ecological pathways,» *Journal of Ecology*, vol. 112, nº 10, pp. 2344-2358, 2024.
- [11] B. N. E. & V. G. Gepts, «Explorative Short-Term Predictive Models for the Belgian (Energy) Renovation Market Incorporating Macroeconomic and Sector-Specific Variables,» *Sustainability*, vol. 17, nº 3, p. 1235, Enero 2025.
- [12] PubMed, «Band selection for oxygenation estimation with multispectral/hyperspectral imaging,» 17 Agosto 2025. [En línea]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35414995/>.

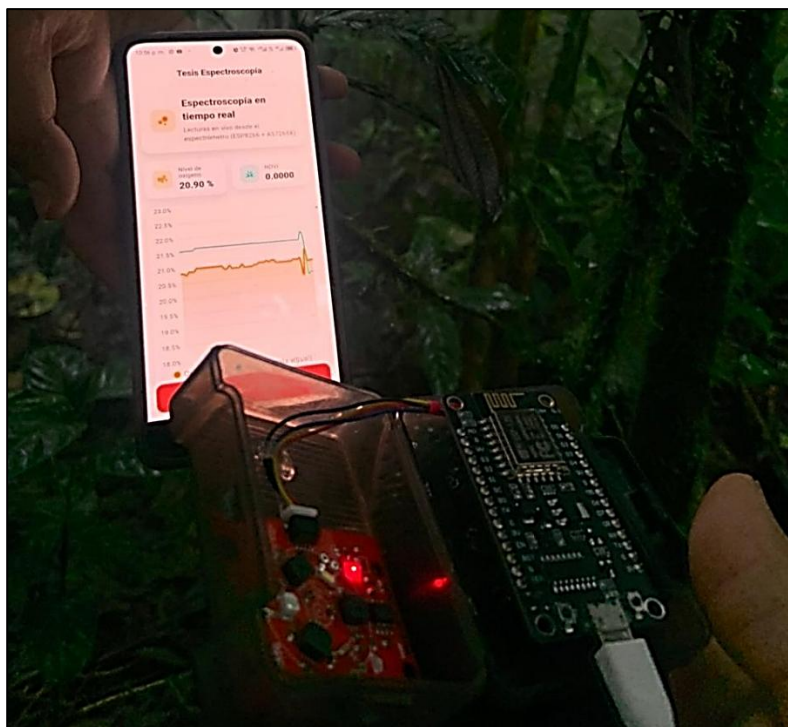
- [13] M. M. U. M. F. & D. G. E. Rago, «Relationships among forest structure, solar radiation, and plant community in ponderosa pine plantations in the Patagonian steppe,» *Forest Ecology and Management*, vol. 502, p. 119749, 2021.
- [14] E. R. e. a. Borges, «Evolutionary diversity impacts tropical forest biomass and productivity through disturbance-mediated ecological pathways,» *Journal of Ecology*, vol. 112, nº 10, pp. 2344-2358, Octubre 2024.
- [15] «(PDF) Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis,» *ResearchGate*, 2025.
- [16] «Integración del aprendizaje automático y la teledetección para el monitoreo y la predicción de la calidad del agua: una revisión,» [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/3/998>.
- [17] «Application of statistical techniques in environmental modelling,» *ResearchGate*, 2025.
- [18] L. A. e. al, «Band selection for oxygenation estimation with multispectral/hyperspectral imaging,» *Biomedical Optics Express*, vol. 13, nº 3, pp. 1224-1240, 2019.
- [19] L. e. al., «Satellite prediction of coastal hypoxia in the northern Gulf of Mexico,» *Remote Sensing of Environment*,, 2022.
- [20] L. e. a. Guo, «"A generalized machine learning approach for dissolved oxygen estimation at multiple spatiotemporal scales using remote sensing,» *Environmental Pollution*, vol. 288, p. 117734, 2021.
- [21] M. M. Heberger, «Cuencas hidrográficas globales,» [En línea]. Available: <https://mghydro.com/watersheds/>.
- [22] N. Seidle, «Github,» 2025. [En línea]. Available: https://github.com/sparkfun/SparkFun_AS7265x_Arduino_Library.
- [23] [En línea]. Available: <https://app.circuitdesigner.com/project/81d5c58d-6b36-4f0e-a3fa-412ff2cce3ea>.
- [24] MDPI, «Integration of Machine Learning and Remote Sensing for Water Quality Monitoring and Prediction: A Review,» *Sustainability*,, vol. 17, nº 3, p. 998, 2025.

CAPÍTULO VII
ANEXO

Anexo 1. Prueba de sensor AS7265x en el Bosque Protector Murocomba.



Anexo 2. Recolección de datos Espectrales en el Bosque Protector Murocomba.



Anexo 3. Recolección de datos y Análisis espectral de las señales ambientales



Anexo 4. Recolección de datos y Análisis espectral de las señales ambientales

