



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

Evaluación de la utilidad de los sensores remotos
Landsat- 8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad
de agua en la Laguna de Apoyo, 2021

Autor

Br. Jolendy Abigail Torrez Aguilera

Asesores

Ing. Luis Tercero Montenegro
Mp. Mario Gutiérrez Alarcón

Presentado a la consideración del honorable comité evaluador como
requisito final para optar al título profesional Ingeniería en Recursos
Naturales con mención Gestión Ambiental

**Managua, Nicaragua
Febrero, 2024**

El presente trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, como requisito parcial para optar al título profesional de:

INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES
CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL

Miembros del tribunal examinador

Msc. Raquel Izabá Ruiz
Presidente

Msc. Harvin Bonilla Escoto
Secretaría

Dr. Fernando Mendoza Jara
Vocal

Lugar y fecha (días / mes / año): _____

DEDICATORIA

Con la culminación de esta etapa en mi vida dedicó primeramente a Dios, que me brindo la fuerza y conocimientos para poder culminar mis estudios profesionales.

A mis padres, Mariela Aguilera, Victorino Cuadra, mi pareja Jorge Jiménez y familiares. Con mucho esfuerzo y comprensión que cada uno de ellos, me brindaron para seguir adelante y cumplir mis metas.

A los docentes, que siempre me apoyaron para seguir adelante con mis estudios a pesar de todos los obstáculos que se presentaron y compañeros de clases por compartir conocimientos, experiencias y métodos de formación profesional.

A mis tutores, Ing. Luis Tercero Montenegro y Mp. Mario Gutiérrez Alarcon por el acompañamiento, asesoría y tolerancia en del desarrollo de la investigación.

AGRADECIMIENTO

Con la Culminación de mis estudios profesionales y trabajo de tesis quiero agradecer a Dios, por brindarme la oportunidad a mi persona culminar mis estudios y ampliar mis conocimientos con la finalización de mi tema de investigación que aporta a mi desarrollo como profesional.

Agradecer a mis padres, pareja y familiares por el apoyo y cariño que me aportó a seguir adelante sin rendirme a pesar de las adversidades.

A docentes, que me impulsaron a seguir adelante, Ing. Ernesto Tünnerman que descanse en paz, MSc. Alex Castellón, Ing. Claudio González agradecerle a cada uno por apoyarme y alentarme a mejorar como persona y profesional.

A mis asesores, Ing. Luis Tercero y Mp. Mario Gutiérrez que a pesar de las dificultades que he pasado me han apoyado para seguir adelante y culminar mi meta con méritos y metas que me aportan a mejorar mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Universidades (CNU) por financiar, impulsar investigaciones que apoyen a estudiantes a trabajar en varios métodos de culminación de estudios profesionales.

Agradecer a la Alcaldía de Catarina y Guarda Bosques del (MARENA) por su acompañamiento y colaboración en cada campaña de muestreo en La Laguna de Apoyo. A la Universidad Nacional Agraria (UNA) por desempeñarse en educar a profesionales, ampliando cada perspectiva de la educación superior. También por brindarme la oportunidad de ser becada durante el tiempo de estudio, lo que me permitió mantener mi rendimiento académico.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad evaluar la utilidad de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2, con la intención de construir una metodología de monitoreo continuo, de las fuentes de agua en este caso los parámetros de calidad de agua en la Laguna de Apoyo. El estudio se realizó, en cuatro campañas de muestreo en los meses de agosto a noviembre del año 2021, donde se recolectó muestras, para el análisis de los parámetros de calidad de agua: clorofila-a, turbidez se determinó en laboratorio, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica se determinó en campo. La metodología empleada se basa en lograr predecir los parámetros físico-químicos y evaluar el sensor que mejor logra predecir mediante el uso de la regresión multivariable, considerando los valores de reflectancia y los valores de cada parámetro. El análisis de los datos se realizó mediante los softwares de acceso libre, QGIS y R. Del sensor Landsat-8 se descargaron imágenes que presentaban nubosidad, afectando el análisis e interpretación de los datos, no presentó valores significativos para los coeficientes de correlaciones Spearman y tampoco al generar el modelo de predicción de multivariable. Con el sensor Sentinel-2 no presentó correlaciones con análisis estadístico Spearman para los primeros tres meses con ningún parámetro, con noviembre el parámetro de pH con las bandas espectrales: B04 = 0.45 correlación moderada presente en el espectro visible y B05 = 0.47 correlación moderada en el infrarrojo cercano y conductividad eléctrica con las bandas B02 = 0.46, B03 = 0.56 correlación moderada, B04 = 0.73 en el espectro visible, B05 = 0.78, B06 = 0.81, B07 = 0.81, B08 = 0.80 y B08A = 0.81 correlación fuerte en el infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta, Clorofila-a y Turbidez no se obtuvo correlaciones, ni valores significativos. En cuanto al generar el modelo los parámetros pH y CE, tienen una capacidad predictiva con pH un 21.6%, CE un 69.5%. Se concluye que con el sensor Landsat-8 no presentó ningún valor significativo para el modelo, Sentinel-2 presentó altos valores significativos para predicción con pH y CE dando a conocer que el mejor sensor para predecir es Sentinel-2.

Palabras Clave: Teledetección, Cartografía predictiva, análisis estadístico, Calidad de agua.

ABSTRACT

The purpose of this research work is to evaluate the usefulness of the remote sensors Landsat-8 and Sentinel-2, with the intention of building a methodology for continuous monitoring of water sources, in this case the water quality parameters in the Support Lagoon. The study was carried out in four sampling campaigns in the months of August to November 2021, where samples were collected for the analysis of water quality parameters: chlorophyll-a, turbidity was determined in the laboratory, hydrogen potential and electrical conductivity was determined in the field. The methodology used is based on predicting the physical-chemical parameters and evaluating the sensor that best predicts through the use of multivariable regression, considering the reflectance values and the values of each parameter. The data analysis was carried out using the free access software, QGIS and R. From the Landsat-8 sensor, images were downloaded that presented cloudiness, affecting the analysis and interpretation of the data; there were no significant values for the Spearman and nor when generating the multivariable prediction model. With the Sentinel-2 sensor it did not present correlations with Spearman statistical analysis for the first three months with any parameter, with November the pH parameter with the spectral bands: B04 = 0.45 moderate correlation present in the visible spectrum and B05 = 0.47 correlation moderate in the near infrared and electrical conductivity with the bands B02 = 0.46, B03 = 0.56 moderate correlation, B04 = 0.73 in the visible spectrum, B05 = 0.78, B06 = 0.81, B07 = 0.81, B08 = 0.80 and B08A = 0.81 strong correlation In the near infrared and shortwave infrared, Chlorophyll-a and Turbidity, no correlations or significant values were obtained. As for generating the model, the pH and EC parameters have a predictive capacity with pH 21.6%, EC 69.5%. It is concluded that with the Landsat-8 sensor it did not present any significant value for the model, Sentinel-2 presented high significant values for prediction with pH and EC, revealing that the best sensor to predict is Sentinel-2.

Keywords: Remote sensing, predictive cartography, statistical analysis, Water quality.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Sección	Páginas
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXO	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. MARCO DE REFERENCIA	4
3.1 Concepto de teledetección aplicada.....	4
3.1.1 Espectro Visible (VIS).....	6
3.1.2 Infrarrojo Cercano (NIR).....	6
3.1.3 Infrarrojo Medio (MIR)	6
3.1.4 Micro-ondas (MW).....	6
3.2 Conceptos de plataformas y sensores	7
3.2.1 Sensores remotos	7
3.3 Descripción del sensor Landsat 8 (USGS)	8
3.4 Descripción del sensor Sentinel 2 (ESA)	9
3.4 Estudios multitemporales en base la Teledetección	10
3.7 Referencia de rangos de los parámetros de calidad de Agua	12
3.7.1 Clorofila-a.....	13
3.7.2 Turbidez.....	15
3.7.3 Conductividad Eléctrica	16
3.7.4 Potencial de Hidrogeno	17
MATERIALES Y METODOS.....	18
4.1. Localización y descripción del área de estudio.....	18
4.2 Diseño metodológico.....	21
4.2.1 Planificación	25
4.3 Variables a evaluar.....	25

4.3.1 Descarga de imágenes	26
4.4 Análisis de datos.....	27
4.5.1 Correlación lineal simple.....	28
4.5.2 Modelo de regresión lineal múltiple.....	30
4.5.3 Cartografía predictiva	31
4.6 Materiales utilizados.....	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
5.1 Comportamiento de los parámetros físico-químicos de calidad de agua	33
5.2 Correlación con el sensor Landsat 8 y los parámetros físico-químicos de calidad de Agua	38
5.3 Correlación con el sensor Sentinel-2 y los parámetros físico-químicos de calidad de Agua.....	39
5.4 Modelos predictivos generados	45
5.5 Análisis del modelo predictivo	47
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	62
LITERATURA CITADA.....	63
ANEXOS	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Longitud de onda de las bandas Landsat-8.....	9
2. Longitud de onda de las bandas Sentinel-2.	10
3. Base de datos de clorofila-a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas.	14
4. Rangos del agua de turbiedad en fuentes de agua natural como los ríos, lagos, bahías y aguas del océanos.	16
5. Fecha de muestreos.....	26
6. Resumen de propiedades genéricas de la misión de landsat 4 al 8.....	28
7. Enfoque convencional para la implementación de coeficientes de correlación.	29
8. Valores máximos y mínimos de los parámetros de calidad de agua.	37
9. Rangos de correlación con el sensor landsat 8 de las cuatro campañas de muestreo.	38
10. Rangos de correlación con el sensor sentinel 2 y parámetros de calidad de agua....	40
11. Modelo de regresión multiple para la validación de predicción.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Espectro electro-magnético.	5
2. Ilustración sobre el funcionamiento de los sensores pasivos y activos.	8
3. Espectro de absorción de radiación electromagnética del agua.	¡ERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.	
4. Escala de pH.	17
5. Mapa de ubicación de la Laguna de Apoyo sitio del estudio.	20
6. Distribución de los puntos de muestreos. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
7. Flujo de para evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua.	24
8. Parámetro conductividad eléctrica.....	36
9. Parámetro potencial de hidrógeno	36
10. Parámetro turbidez.....	36
11. Parámetro clorofila-a	36
12. Imágenes descargadas en cada campaña realizada para el muestreo y análisis espacial, con el sensor landsat-8 con una resolución temporal de 15 días y resolución espectral de 15 y 30 pixeles color real rgb con la combinación de bandas 2, 3 y 4.....	39
13. Imágenes descargadas en cada campaña realizada para el muestreo y análisis espacial, con el sensor sentinel-2 (sentinel 2a y sentinel 2b) con una resolución temporal de 5 días y resolución espectral de 10 y 20 pixeles color real rgb con la combinación de bandas 2, 3 y 4.	41
f4. Panel de correlación lineal simple parámetro pH en el mes de noviembre.....	42
15. Histograma de raster de predicción de pH.....	52
16. Histograma de raster de predicción de CE	52
17. Valores proyectados de pH para noviembre.....	53
18. Valores proyectados de CE para noviembre.....	54
f19. Homocedasticidad pH	55
20. Homocedasticidad CE	55
21. Linealidad pH	56
22. Linealidad CE.....	56
23. Normalidad de los datos con el parámetro pH	57
24. Normalidad de los datos con el parámetro CE	57
25. Distancia de los valores de los datos de pH.....	58
26. Distancia de los valores de los datos de CE	58
27. Variación de los datos muestreados con los valores de la cartografía predictiva con pH.....	59
28. Variación de los datos muestreados con los valores de la cartografía predictiva con CE.....	59

ÍNDICE DE ANEXO

Anexo	Página
1. Descripción de multiparamétrico	68
2. Etapas del proceso de investigación	68
3. Análisis de datos	71

I. INTRODUCCIÓN

La importancia del estudio y uso de la teledetección, en la gestión integral de los recursos hídricos, se puede lograr generar valiosa información y recopilación a través de los sensores remotos, esto puede proporcionar conclusiones e información que aportan a mejorar futuras investigaciones, que parten como base, para una toma de decisiones en la planificación de programas o estrategias de gestión de los recursos hídrico, brindando aportes al fortalecimiento de la transparencia y la rendición de cuentas ante el incumplimiento de los parámetros establecidos en las normas de calidad de agua, por esto mismo se trabajó y utilizó la técnica de la teledetección que permite obtener información interpretable de la Tierra, que permite realizar análisis sin mantener contacto físico con ellos, mediante métodos que se emplean con energía electromagnética.

La investigación parte de la problemática que enfrentan los recursos hídricos, sobre todo los cuerpos lacustres de nuestro país; por tanto, esta investigación se ubica dentro de la línea de investigación de la Universidad Nacional Agraria “Planificación y gestión del territorio” y dentro de la sub-línea “Gestión integral de cuencas hidrográficas” la área de estudio Laguna de Apoyo fue declarada como área protegida por ser hábitat de fauna nativa de importancia para los objetivos mundiales de conservación; es un eslabón clave dentro del corredor natural de áreas protegidas en el Pacífico de Nicaragua; hospedero de flora, fauna y belleza natural; enclave turístico de enorme potencial e importante proveedor de servicios ambientales otorgados a la población aledaña. Además, por ser un lugar reconocido por la presencia de procesos de erosión, sismos y deslizamientos y por ser administrativamente compartida entre seis municipios y dos departamentos del país (Argeñal Sandoval, 2010).

La Laguna de Apoyo se encuentra entre los departamentos de Masaya y Granada. Ocupa el fondo de una antigua caldera de explosión y hundimiento (tipo Krakatoa) que se formó hace unos 21,000 años. A juzgar por el diámetro de la caldera (6 km) y la profundidad de la laguna, (estimada en 200 metros sin contar las paredes superiores de la caldera), la erupción del antiguo volcán que ocupaba antes el sitio debió haber arrojado al espacio más de 10 millones de metros cúbicos de material pulverizado (especialmente pómez),

siendo considerada como la explosión volcánica más grande acontecida en el país en los últimos cien mil años (FUNDENIC-SOS, 1991, pp. 2-4).

La investigación tiene la finalidad de evaluar la utilidad de la teledetección a través de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2, con el propósito de construir una metodología para el monitoreo de la calidad del agua con fines de desarrollo turístico sostenible en la Laguna de Apoyo, Masaya - Granada. Debido al crecimiento poblacional en áreas sensibles ambientalmente, aumenta la alteración de la calidad fisicoquímica del agua en la Laguna de origen volcánico y en el caso particular, experimenta cierto grado de contaminación por el vertido de aguas domésticas provenientes de la población circundante, la Laguna recibe una gran cantidad de turistas sobre todo en los meses de verano, lo que aumenta la presión sobre la calidad del recurso agua.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la utilidad de los sensores remotos Landsat- 8 y Sentinel-2 para el monitoreo de calidad de agua en la Laguna de Apoyo, 2021.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar análisis estadístico de los valores espectrales y correlación simple con cada uno de modelos matemáticos de predicción de cada parámetro: clorofila-a, pH, turbidez y conductividad eléctrica.
- Generar el modelo predictivo con regresión multivariable de los parámetros evaluados de calidad de agua.
- Generación de mapas predictivos de los parámetros de calidad de agua correlacionados.

III. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Concepto de teledetección aplicada

Una de las mayores ventajas de la teledetección aplicada es su uso para el estudio de diferentes fenómenos a lo largo del tiempo, viendo los cambios que se producen y obtener información relevante de un lugar específico que se desee estudiar los valores cambiantes que se utilizan como indicadores de alerta. Esta ventaja ha sido muy utilizada en medio ambiente, ya sea para ver el cambio de las masas forestales o de las masas de agua, o para seguir los procesos de recuperación tras un incendio o tras el vertido de un contaminante. También se pueden seguir procesos a largo plazo, en relación con el cambio climático, como es el caso de la desertificación. Estos estudios requieren una selección de imágenes temporales para realizar el análisis y visualizar que metodología es más efectiva para realizar cada proceso y extraer los valores de interés, una escala concreta de trabajo y una serie de métodos de análisis.

El concepto de la teledetección o percepción remota (“*Remote Sensing*”) es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, análisis y la interpretación del área terrestre. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales de accesos gratuitos que aportan a investigaciones como en este caso analizar la calidad de los sensores remotos para el desarrollo de estudios de grado (López-Montecinos, 2019, pp. 1-5).

Como su nombre indica, la teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto que se desea analizar y estudiar. Tú mismo, al leer estas líneas, estás efectuando un acto de percepción remota: un ente físico, la luz que emana de la fuente emisora, en este caso la pantalla de su PC, atraviesa cierta distancia hasta que es capturada por un sensor, los ojos, que la envían a un procesador que es tú cerebro. Los actuales sistemas de teledetección, a diferencia de los existentes en los inicios del desarrollo de estas tecnologías, han experimentado un vertiginoso desarrollo, especialmente en la última década, siendo una tecnología imprescindible en el seguimiento de múltiples procesos que afectan a la superficie terrestre y atmósfera

circundante, de gran impacto, especialmente, para nuestro planeta, como puede ser el cambio climático, la deforestación, la desertificación, etc. (López-Montecinos, 2019, pp. 2-5).

La teledetección es una interacción que se produce, reserva un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor, este flujo se divide en tres tipos:

1. Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado).
2. Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico).
3. Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar) Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa.

El espectro visible (se mide en μm (Micrómetros 0.4 a 0.7) o nm (Nanómetros 400 a 700) espectro visible) (Chuvieco, 2019, pp. 46-47).

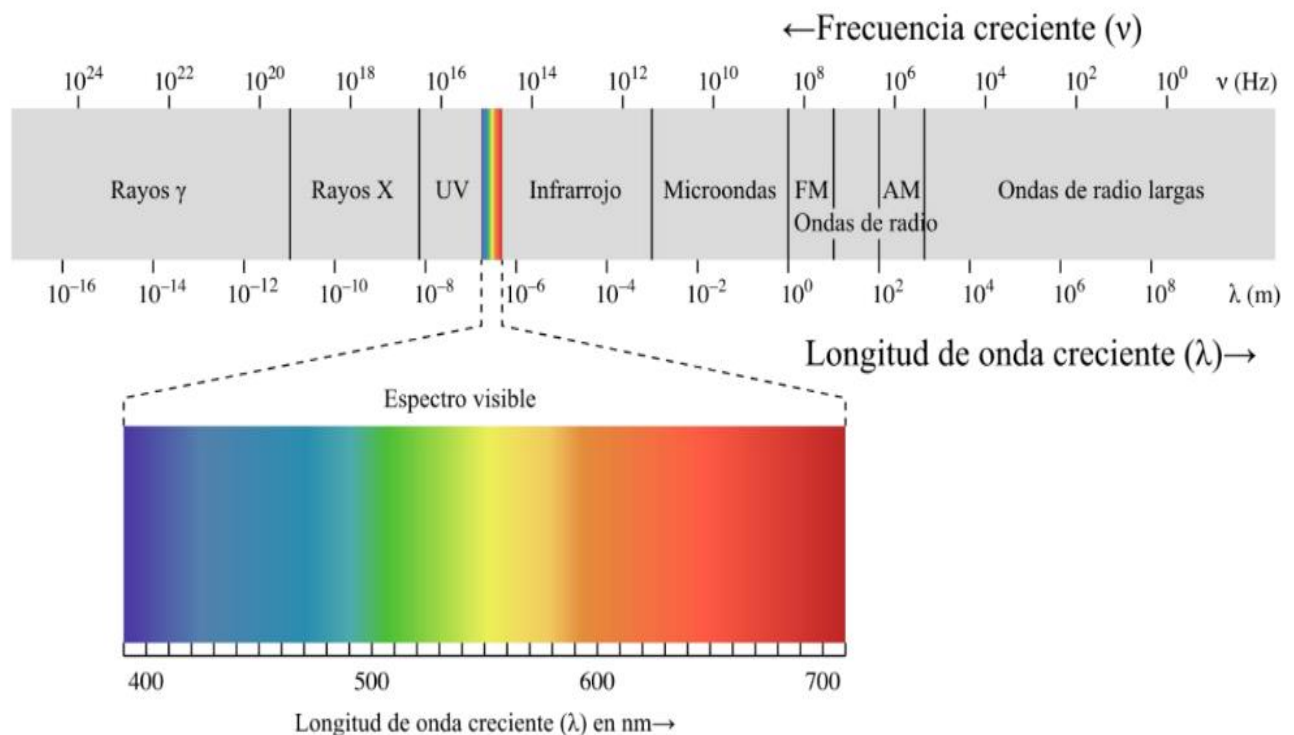


Figura 1. Espectro electro-magnético

Fuente: (Chuvieco, 2019, pp. 46-47)

3.1.1 Espectro Visible (VIS)

La retina del ojo humano es sensible a las ondas electromagnéticas con frecuencias entre $0.4 - 0.7\mu\text{m}$. Por lo tanto, esta banda de frecuencias se llama región visible del espectro electromagnético y coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima (Chaura, 2022, p. 320).

3.1.2 Infrarrojo Cercano (NIR)

Próximo o reflejado, la región del infrarrojo (IR) cercana NIR (*del inglés near IR*) $0.7-1.2\mu\text{m}$. Esta parte del espectro se encuentra un poco más allá de la capacidad de percepción del ojo humano y a veces se conoce también como el infrarrojo reflectante o infrarrojo fotográfico, porque parte de este espectro (la región $(0.7 - 0.9\mu\text{m}$ o $700 - 900\text{nm}$) se puede detectar con películas especiales. El NIR es de especial interés debido a su sensibilidad para determinar el estado fitosanitario. También permite diferenciar coberturas vegetales y contenidos de agua (Chaura, 2022, p. 221).

3.1.3 Infrarrojo Medio (MIR)

Esta región espectral se encuentra entre las regiones NIR y TIR. De $1.2 - 8\mu\text{m}$, la influencia de la energía del sol sigue siendo muy relevante, el intervalo entre $1.3 - 2.5\mu\text{m}$ es denominado Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) y es utilizado para estimar contenidos de humedad en vegetación y suelos. Esta región proporciona las mejores estimaciones del contenido de humedad del suelo y vegetación. De $3-8\mu\text{m}$, la señal se vuelve una mezcla continua de energía reflejada por el sol y emitida por la superficie, convirtiéndose el componente emitido más relevante a medida que las longitudes de onda se hacen más largas. El intervalo de $3 - 5\mu\text{m}$ es particularmente útil para detectar fuentes de altas temperaturas, como volcanes o incendios forestales (Chaura, 2022, p. 221).

3.1.4 Micro-ondas (MW)

Para radiaciones superiores a 1cm . Esta región espectral es donde funcionan los sistemas de radar. Su principal ventaja es la absorción atmosférica muy baja, lo que nos permite “ver” a través de las nubes. La radiación de MW también puede penetrar en las copas de los bosques a varias profundidades y muy útil en análisis de humedad del suelo y

rugosidad superficial. Requiere de la emisión de un haz energético por parte del sensor (Chaura, 2022, p. 222).

3.2 Conceptos de plataformas y sensores

Se entiende por **plataforma** los satélites (LANDSAT, METEOSAT, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (**sensores**) (*Plataformas, sensores y canales*, 2003, pp. 4).

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda (*Plataformas, sensores y canales*, 2003, pp. 3-4).

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo en cada una de esas dimensiones. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

Resolución espacial (tamaño de pixel).

Resolución temporal (tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio).

Resolución espectral (capacidad de discriminar entre longitudes de onda vecinas en el espectro, así como el número de bandas disponible).

Resolución radiométrica (número de intervalos de intensidad que puede captar el sensor).

3.2.1 Sensores remotos

Los sensores remotos son sistemas o instrumentos para captar información de un objeto a distancia (remoto sensor). La teledetección o percepción remota (*remote sensing*) se refiere a la adquisición de datos de la superficie terrestre con un sensor remoto, y al procesamiento e interpretación de esos datos. (*Amado-Alvarez et al.*, 2019).

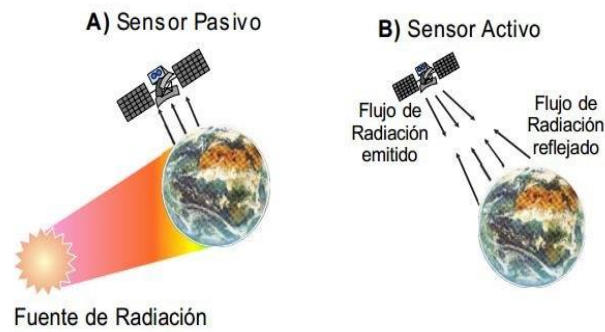


Figura 2. Ilustración sobre el funcionamiento de los sensores pasivos y activos.

Fuente: López-Montecinos, 2019, pp. 3-7

3.3 Descripción del sensor Landsat 8 (USGS)

Landsat 8 se destaca como un sensor pasivo se lanzó el 11 de febrero de 2013 desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California, en un cohete Atlas-V 401, con el carenado de carga útil extendida (EPF) de *United Launch Alliance*, LLC. La carga útil del satélite Landsat 8 consta de dos instrumentos científicos: el *Operational Land Imager* (OLI) y el *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Este sensor brinda cobertura estacional de la masa terrestre global con una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmico); y 15 metros (pancromática). Landsat 8 fue desarrollado como una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). La NASA dirigió las fases de diseño, construcción, lanzamiento y calibración en órbita, tiempo durante el cual el satélite se denominó Misión de Continuidad de Datos Landsat (LDCM). El 30 de mayo de 2013, el USGS se hizo cargo de las operaciones de rutina y el satélite se convirtió en Landsat 8. Las imágenes de Landsat 8 están formadas por 10 bandas de trabajo + 1 banda pancromática cuyas resoluciones se encuentran en 15, 30 y 100 metros (cuadro 1). Aunque su máxima resolución se encuentra en 30 metros, la banda pancromática permite equiparar todas las bandas a una resolución de 15 metros a través de la técnica *pansharpening*, una particular forma de remuestrear sus bandas a un tamaño homogéneo de 15 metros más pequeños (*Landsat 8 / Ciencia Landsat*, 2021); (Ruiz, 2020; Briceño, 2018; García, 2020 y Herrera, 2017).

Cuadro 1. Longitud de onda de las bandas Landsat-8

	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (m)
Landsat-8 OLI and TIRS Bands (µm)	Band 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Band 2 – Azul	0.45 - 0.51	30
	Band 3 – Verde	0.53 - 0.59	30
	Band 4 – Roja	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Pancromática	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Infrarrojo térmico (TIRS)	10.60 - 11.19	100
	1		
	Band 11 - Infrarrojo térmico (TIRS)	11.50 - 12.51	100
	2		

Fuente: Landsat-8 / Ciencia Landsat, 2021.

3.4 Descripción del sensor Sentinel-2 (ESA)

La misión Copernicus es un sensor pasivo Sentinel-2 comprende una constelación de dos satélites en órbita polar colocados en la misma órbita sincrónica del sol. El tiempo de revisita de 10 días en el ecuador con un satélite y 5 días con 2 satélites en condiciones sin nubes, lo que da como resultado 2-3 días en latitudes medias. Cada satélite Sentinel-2 pesa aproximadamente 1.2 toneladas. Sentinel-2A y Sentinel-2B se han lanzado con el lanzador europeo VEGA. Dos satélites Sentinel-2 idénticos operan simultáneamente, en fases a 180° entre sí, en una órbita sincrónica con el sol a una altitud media de 786 km. La posición de cada satélite Sentinel-2 en su órbita se mide mediante un receptor del Sistema de navegación por satélite global (GNSS) de doble frecuencia. La precisión orbital se mantiene mediante un sistema de propulsión dedicado. Conformado por 13 bandas espectrales (cuadro 2), (López López, 2021; Mehta, McCartney y Torres-Pérez, 2021; Delegido, 2016a y Delegido, 2016b).

Cuadro 2. Longitud de onda de las bandas Sentinel-2

Sentinel 2 Bands (µm)	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (m)
	Banda 1- Aerosol	0,43 - 0,45	60
	Banda 2 – Azul	0,45 - 0,52	10
	Banda 3 – Verde	0,54 - 0,57	10
	Banda 4 – Rojo	0,65 - 0,68	10
	Banda 5 - Borde rojo 1	0,69 - 0,71	20
	Banda 6 - Borde rojo 2	0,73 - 0,74	20
	Banda 7 - Borde rojo 3	0,77 - 0,79	20
	Banda 8 - Infrarrojo cercano (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
	Banda 8A - Infrarrojo cercano (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
	Banda 9- Vapor de agua	0,93 - 0,95	60
	Banda 10 – Cirrus	1,36 - 1,39	60
	Banda 11- SWIR 1	1,56 - 1,65	20
	Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Fuente: Sobre Copérnico / Copérnico, 2018.

3.4 Estudios multitemporales en base la Teledetección

Los resultados del estudio de Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2018, Chile obtenido indicadores de calidad de agua medidos el año 2016 en el Lago Vichuquén muestran un rango estrecho de valores entre sus mediciones; se categorizó el Lago Vichuquén como eutrófico en verano y mesotrófico en otoño, debido a que el promedio de los valores de la Cl-A en la temporada de verano fue de 14,1 µg/l, mientras que durante la temporada de otoño se obtuvo un promedio de 5,5 µg/l. los datos de Cl-a oscilaron entre 10,1 y 26,1 µg/l, y entre los 1,8 y 5 m en la temporada de verano. El comportamiento de los parámetros de calidad de agua en el Lago Vichuquén. En este estudio se describe que los cambios de las propiedades del agua responden tanto a los cambios temporales, sobre todo de temperatura, así como a las características del sistema lacustre estudiado reflejando que el tiempo o clima puede cambiar los parámetros físico-químicos (Briceño et al., 2018).

La determinación de cambios de las lagunas de gravera entre 1957 y 2000, se desarrolló técnicas de determinación de cambios mediante teledetección se fundamentan, principalmente, en la aplicación de una técnica en diferentes fechas y en determinar la diferencia entre ellas, de manera que se obtenga una imagen de cambios.

En el apartado 5.2 se analizaron las diversas técnicas para discriminar Lagunas de Gravera y la conclusión a la que se llegó es que una técnica a utilizar dependía de si la imagen era pancromática o multiespectral. Para la primera de estas imágenes, la técnica a utilizar sería la digitalización de las lagunas a partir de un análisis visual; sin embargo, si la imagen era multiespectral se analizaría el histograma de la banda del infrarrojo cercano. Estas técnicas se utilizaron en los apartados para localizar las lagunas en cada fecha ya que este estudio es en diferentes Lagunas.

Con los resultados, las técnicas de detección de cambios se pueden utilizar son:

1. Composición coloreada multitemporal.
2. Resta entre imágenes de diferentes años.
3. Cruce de imágenes binarias: cambios a partir de imágenes segmentadas y panel de muestreos para desarrollar comparaciones según el cambio que se presente temporalmente.

Para todos los casos se utilizará la banda del infrarrojo cercano para las imágenes multiespectrales debido a que la discriminación de las lagunas de gravera se ha realizado en función del análisis del histograma de dichas bandas para el desarrollo de la metodología, por último, se valoraron las composiciones de mapas a partir de la base de datos obtenidas a partir de los análisis temporales para medir parámetros de calidad de agua con la utilidad de los sensores valorando la situación de las Lagunas de Gravera (Gómez, 2003).

Con la utilidad de la teledetección se utiliza en diferentes estudios relacionados con el agua como es el caso de esta investigación, amplía la perspectiva de la hidrología como desde la perspectiva de la ecología realizando análisis que aportan a conocer los cambios temporales de las fuentes de agua. Ambas ciencias tienen en común el estudio de la calidad de las masas de agua y la teledetección, aunque ya se está utilizando, pero cada día se llega al alcance de mejorar las tecnologías para tener más accesibilidad a estos estudios y generar nuevas metodologías más completas, probado su potencial agiliza el análisis de muchos estudios y que poco a poco, se vaya desarrollando de tal forma que sea una herramienta común en la gestión de la calidad del agua.

Para llevar a cabo un estudio sobre la calidad del agua mediante teledetección se debe tener en cuenta las ventajas que esta técnica ofrece y todos los factores que intervienen en dichos procesos, como son los tipos de agua existentes, la interacción de la radiación solar con las masas de agua, los sensores y plataformas que podemos utilizar para estos estudios de manera de investigaciones, monitoreos continuos y un sinnúmero más de estudios que se puedan realizar con estas metodologías.

3.7 Referencia de rangos de los parámetros de calidad de Agua

La calidad del agua, de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS) y otros organismos internacionales, se puede resumir como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, en su estado natural o después de ser alteradas por el accionar humano. La calidad del agua, en general, se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares. Este concepto ha sido asociado principalmente al uso del agua para consumo humano, sin embargo, dependiendo de otros usos también se puede definir la calidad del agua en función de ello. El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial, debido al crecimiento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico (Peralta, 2021).

Los efectos naturales y antrópicos de cada parámetro en un sistema lacustre, un aumento de la conductividad puede indicar un aumento de SDT y de la salinidad, asimismo, la contaminación de los sistemas acuáticos superficiales, por lo general, está asociada a un incremento de los valores de conductividad esto alterando el índice de calidad de la fuente de agua. Los valores de pH muy por debajo de 7 pueden indicar ingreso de sustancias ácidas y anoxia, los valores muy elevados (pH básico) suelen indicar una sobresaturación de oxígeno debido a una elevada actividad fotosintética o una fuente de agua de origen volcánico, en la que se consumen iones hidrógeno del medio, factor que incrementa el pH o ambos casos pueden ser ocasionados por contaminación. La clorofila a es el pigmento común a todos los organismos productores primarios y tiene relación directa con la productividad primaria y el desarrollo vegetal, por lo que es utilizado como un indicador indirecto de la biomasa algas en los sistemas acuáticos. Puede utilizarse como indicador

del estado trófico considerando otros parámetros asociados (como nutrientes, composición biológica) (*Matas, 2000*).

El Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El objetivo 6 Pretende lograr un acceso universal y equitativo al agua potable y a servicios de saneamiento e higiene adecuados, así como mejorar la calidad del agua a nivel global (*Moran, 2016.*).

Las zonas de reservas de agua bien administradas, océanos, lagos y ríos, constituyen un punto de encuentro para las comunidades y presentan un atractivo económico para el turismo y los eventos deportivos. Sin embargo, a medida que las actividades humanas y el cambio climático influyen, se intensifican cambios en los cuerpos de agua y un mayor número de playas están expuestas a la contaminación (*FAO, 2013*).

En el año 2000 se publicó en La Gaceta, Diario Oficial de Nicaragua la Norma Técnica para la Clasificación de los Recursos Hídricos NTON 05 007- 98, la cual establece los parámetros para determinar los niveles de calidad exigibles de los cuerpos de agua (lagos, lagunas, lagos artificiales, manantiales, ríos, aguas subterráneas, estuarios y mares), de acuerdo con los usos a los cuales se destinen. Con el Objeto de determinar la capacidad y condiciones del aprovechamiento de los recursos hidráulicos y los niveles de calidad de vertimientos tolerables para cada cuerpo de agua, se establecen seis tipos de cuerpos de agua, en la cual la categoría 4 es destinada a aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia NTON 05 007- 98 (2000).

Tipo 4. Aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Las aguas de este Tipo se desagregan en dos categorías:

- Categoría 4-A Aguas para el contacto humano total;
- Categoría 4-B Aguas para el contacto humano parcial;

3.7.1 Clorofila-a

La concentración de clorofila-a se utiliza para estimar en forma indirecta la biomasa de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las algas. La clorofila-a también es un indicador del grado de contaminación

de los ecosistemas acuáticos y un importante índice del estado fisiológico del fitoplancton (Pinto *et al.*, 2001).

Para estimar la clorofila existen diferentes métodos, procedimientos y modelos matemáticos, desarrollados con el objeto de minimizar los errores ocasionados por la presencia de otros pigmentos fotosintéticos y de algunos compuestos químicos en el agua (APHA, 1998). Los métodos cromatográficos modernos permiten la cuantificación exacta de la clorofila y todos sus derivados (HPLC) (Sánchez Martínez, 2017).

La Clasificación basada en los muestreos derivados de 33 lagunas costeras sobre la concentración de clorofila a, se presentan un análisis y discusión sobre este parámetro y su aplicación para calcular un índice trófico establecido por Carlson en 1977. Por las diversas circunstancias ecológicas en que fue medido el pigmento, los resultados expuestos abarcan aspectos que permiten establecer algunas consideraciones, en donde lo más sobresaliente es la relación estrecha que manifiesta la clorofila con los suministros naturales o antropogénicos de nutrimentos (Contreras, 1994).

El indicador, funciona para identificar la concentración de clorofila a en La Laguna aporta a la investigación identificando el índice trófico y la conversión de la cantidad de clorofila al índice propuesto por Carlson se presenta en el (Cuadro 3), donde se exponen los valores promedio mínimo y máximo, así como el promedio real, que está explicado en la metodología.

Cuadro 3. Base de datos de clorofila-a como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas

Ampliación propuesta para los niveles tróficos				
Categorías	Intervalo en la condición de clorofila		Índice trófico mg/m³	
Ultraoligotrófico	0.000	0.122	0	9
Oligotrófico	0.123	0.340	10	19
Oligotrófico	0.350	0.940	20	29
Oligotrófico	0.950	2.600	30	39
Mesotrófico	2.700	7.200	40	49
Mesotrófico	7.300	20.000	50	59
Eutrófico	21.000	55.000	60	69
Eutrófico	56.000	155.000	70	79

Eutrófico e	156.000	425.000	80	89
Hipertrófico		> 426.000		> 90

Fuente: (Contreras, 1994).

3.7.2 Turbidez

La turbidez, expresada generalmente como unidades nefelométricas de turbidez (UNT), describe la pérdida de claridad del agua causada por partículas en suspensión (arcilla y sedimentos), partículas orgánicas (por ej., desechos vegetales) y organismos. La concentración de nematodos de vida libre en la fuente de agua cruda generalmente mantiene correspondencia con la turbiedad del agua. Mientras mayor sea la turbiedad, mayor será la concentración de los nematodos de vida libre (OMS, 2017).

La turbiedad del agua se determina a través de un turbidímetro, el cual está formado por una fuente de luz; un sistema de lectura de la luz, que pasa a través del agua contenida en un recipiente blanco transparente o de la luz que dispersan las partículas en una escala de medida o en unidades de turbiedad expresadas en nefelométricas de turbidez (NTU). La turbidez del agua es una propiedad óptica que hace que la luz sea dispersada y absorbida, en lugar de ser transmitida. La dispersión de la luz que pasa a través de un líquido es causada principalmente por los sólidos suspendidos. Cuanto mayor la turbidez, mayor la cantidad de luz dispersada. Dado que incluso las moléculas en un fluido muy puro dispersan un cierto grado de luz, ninguna solución tendrá turbidez cero. Se mide la luz dispersa que se hace pasar por la muestra, mediante un LED infrarrojo y dos detectores (luz dispersada y transmitida). Esta medida se expresa en NTU, que son equivalentes a FNU (Emaya, 2016.) .

Según la OMS (Organización Mundial para la Salud), la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5 NTU (cuadro 4), y estará idealmente por debajo de 1 NTU cumpliendo los valores según el rango permitido para usos recreacional o contacto parcial en las fuentes de agua natural (OMS, 1998).

Unidades más utilizadas:

- NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez.
- JTU: Unidad de Turbidez Efelométrica.

- FNU: Unidades Nefelométricas de Formacina.

Cuadro 4. Rangos del agua de Turbiedad en fuentes de agua natural como los ríos, lagos, bahías y aguas del océanos

Masa de agua	Nivel de turbidez
Masas de agua con pocas plantas y animales	0 JTU
Agua potable	<0.5 JTU
Agua subterránea típica	<1.0 JTU
Masas de agua con cantidad moderada de plantas y animales	1 - 8 JTU
Masas de agua con cantidades grandes de vida planctónica	10 - 30 JTU
Agua turbia o flujos en ríos de las tormentas de invierno	20 - 50 JTU

Fuente: (Folleto Informativo Turbidez, 2016.)

3.7.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica indicando presencia de iones disueltos; tiene un límite guía de 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en las concentraciones superiores a los límites permitidos de conductividad limitan el crecimiento de los cultivos y disminuye el rendimiento de las plantas se expresa en micromho por centímetro ($\mu\text{mho}/\text{cm}$), equivalentes a microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o milisiemens por centímetro (mS/cm) en el Sistema Internacional de Unidades. El intervalo de aplicación del método es de 10 a 10,000 o hasta 50,000 $\mu\text{mho}/\text{cm}$. Las conductividades fuera de estos valores son difíciles de medir con los componentes electrónicos (*Calidad del agua / Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula*, 2017).

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es el Organismo Nacional de Normalización, creada por el Decreto No. 1523 del Congreso de la República del 05 de mayo de 1962. Sus funciones están definidas en el marco de la Ley del Sistema Nacional de la Calidad de agua, con el Decreto 78-2005 del Congreso de la República. La característica físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano en Guatemala debe cumplir el rango de Conductividad eléctrica de 0 - 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. (COGUANOR, 2012)

3.7.4 Potencial de Hidrógeno

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno, y se define como $\text{pH} = \log(1/[\text{H}^+])$. Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de las fuentes de agua naturales, tienen un pH entre 6 y 8. Su medición se realiza fácilmente con un pH metro bien calibrado, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indican el pH. Los valores del pH han de ser referidos a la temperatura de medición, pues varían con ella. El pH se corrige por neutralización (Sánchez Martínez, 2017).



Figura 3. Escala de pH.

Fuente: (Dianelys Ondarse Álvarez, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se basa en la evaluación de dos sensores remotos que permitan el monitoreo constante de los parámetros de calidad de agua, de uso recreacional o vida acuática a bajo costo, debido a que el monitoreo de las aguas en campo y laboratorio con lleva un gran gasto económico. Se realizó un análisis de laboratorio y con equipo de campo para cada muestra recolectada de los cuatro parámetros (Potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, turbidez y clorofila- a), con la finalidad de calibrar los sensores remotos. La vigilancia de la calidad del agua continuamente es importante, esta metodología planteada en esta investigación se divulgará con las instituciones locales que velan por el bienestar de los cuerpos de agua, con el fin de dar una herramienta que permita llevar un monitoreo continuo sobre el estado de la Laguna de Apoyo.

4.1. Localización y descripción del área de estudio

La Laguna de Apoyo se encuentra alineada sobre la larga fractura volcánica que recorre la región del Pacífico de Nicaragua, ubicándose entre los volcanes Masaya y Mombacho. La caldera tiene forma circular, con algunas escotaduras en el borde lacustre. El territorio municipal ocupa la ladera oeste del Volcán de Apoyo, en cuyo cráter apagado se encuentra la conocida Laguna de Apoyo, situada a 70 m.s.n.m. El punto más alto del territorio es el Cerro de Pacaya a 622 m.s.n.m. Al norte del Municipio Catarina se forma de manera relevante una amplia cuenca de drenaje compuesta por una red de profundas cañadas. Al oeste se encuentra la denominada Zona de la Laguna (*Ficha Municipal Catarina, 2015*).

La Laguna de Apoyo está ubicada aproximadamente a 40 kilómetros de Managua la capital, entre los departamentos de Granada y Masaya, esta /reserva (natural comparte su territorio con los municipios de Granada, Dirimo, Diría, Catarina, San Juan de Oriente y Masaya, abarcando una extensión total de 123.54 km², de los cuales un poco más de un tercio es área protegida está protegida y circundada por una red de carreteras y caminos por las que se puede acceder a diferentes puntos del borde, La Laguna de Apoyo, con una superficie 21 km² situada a 70 m.s.n.m., con una temperatura superior a los 27° C (*Ficha Municipal Catarina, 2015*).

- La parte alta que tiene 500 m.s.n.m. con una temperatura entre los 22° C y 23°C.
- La precipitación anual del Municipio oscila entre los 1,200 y 1,400 mm (*Ficha Municipal Catarina, 2015*).

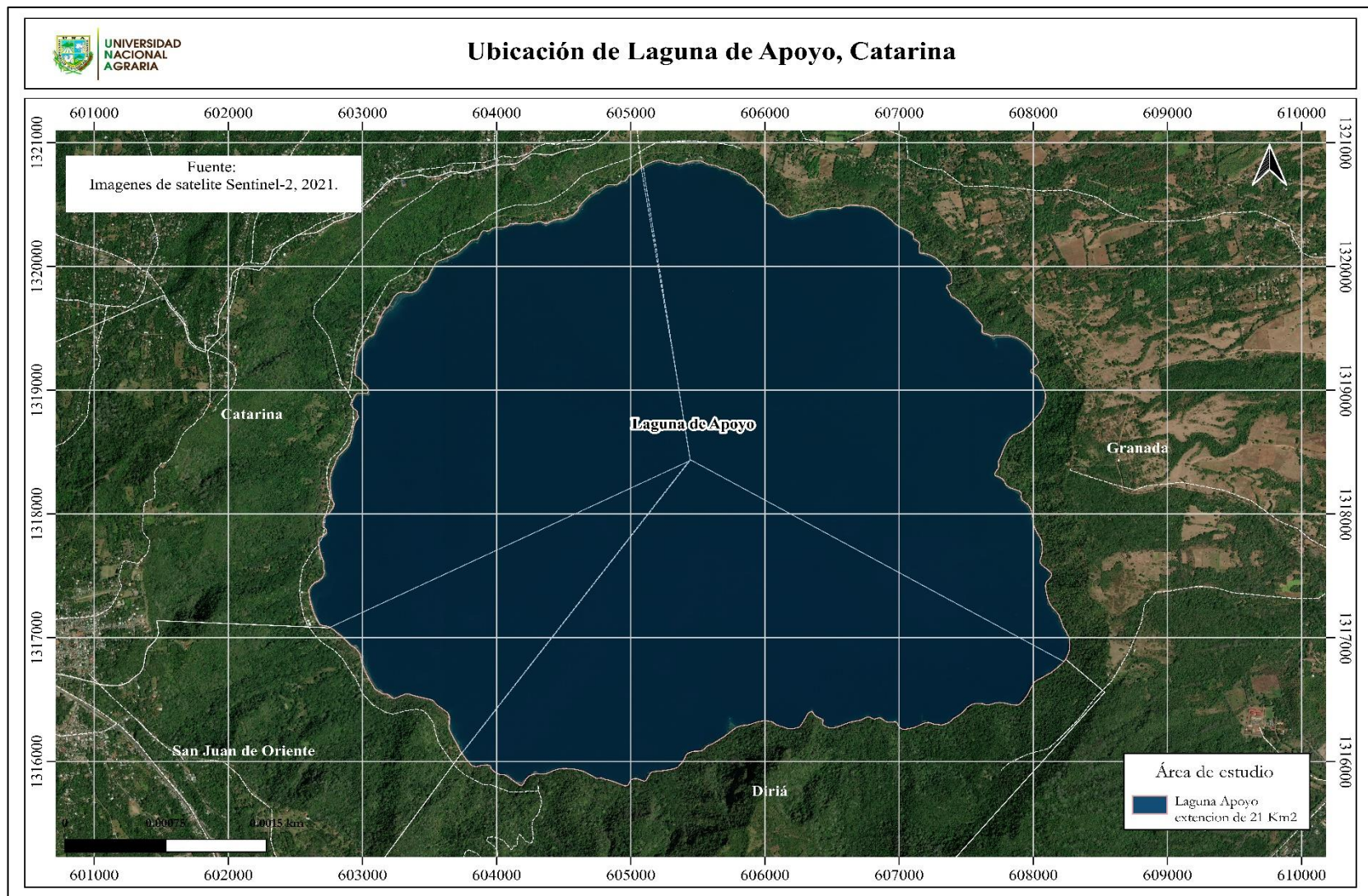


Figura 4. Mapa de ubicación de la Laguna de Apoyo sitio del estudio.

4.2 Diseño metodológico

El método utilizado para determinar las fluctuaciones de los parámetros fisicoquímicos del cuerpo de agua, se basó en una metodología de muestreo de puntos de manera aleatoria se seleccionó 30, estos distribuidos completamente en toda la Laguna de Apoyo con intervalos de 500 metros entre cada uno de ellos tratando de abarcar cada área del estudio para conocer mejor la distribución de los parámetros muestreados, se aplicaron cuatro repeticiones que se trabajó como campañas las cuales son: (primera campaña – agosto, segunda campaña – septiembre, tercera campaña – octubre, cuarta campaña – noviembre) se seleccionaron cuatro parámetros cada uno de ellos expresa un indicador depende del aumento o los bajos niveles.

Los parámetros seleccionados para el estudio, descripción:

1. El potencial de hidrogeno es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua esto se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua, los rangos van de 0 a 14, siendo el número 7 el rango promedio (rango neutral), menor indica acidez, mientras que un pH mayor a 7 indica que el agua es básica.
2. La conductividad eléctrica indica las sales disueltas en agua que descomponen los iones cargados positivamente y negativamente generando conductividad o capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio, calcio, potasio y magnesio. Los iones más negativos son cloruro, sulfato, carbonato, bicarbonato. Los nitratos y fosfatos no contribuyen de forma apreciable a la conductividad, aunque son muy importantes biológicamente todo esto establecidos en las fuentes de agua.
3. La turbidez es la cantidad de partículas o sedimentos en suspensión en el agua como: las algas, los sedimentos en suspensión, la materia orgánica y los contaminantes pueden enturbiar el agua.
4. Clorofila-a es un indicador promedio anual de la biomasa de microalgas y cianobacterias planctónicas. Los cuerpos de agua oligotróficos son poco

productivos, con aguas muy transparentes, totalmente saturadas de oxígeno, entre esas dos amplias categorías, se ubican los lagos mesotróficos, de fertilidad moderada y un lago poco profundo sea eutrófico, y es más probable que un lago profundo sea oligotrófico, todos indicadores de microalgas o algas que aportan la pigmentación de los cuerpos de agua.

La determinación y muestreo de los cuatro parámetros de calidad de agua, seleccionando los 30 puntos de manera aleatoria, en toda la superficie de la Laguna de Apoyo, de las cuatro campañas designadas para el muestreo. Dos de los parámetros medidos en campo, clorofila-a y turbidez, se recolectó de manera convencional solicitado y dictaminado por el laboratorio, donde se debe mantener la temperatura por debajo de 10 °C, envases que ellos mismos entregaron ya previamente esterilizados y rotulados para preservar las muestras de agua, para análisis microbiológicos por un periodo máximo de seis horas, en las cuatro campañas se muestreo por parámetro 120 envases de con muestras de agua. El parámetro potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica se determinaron de manera inmediata con instrumentos debidamente calibrados y esterilizado, las muestras se midieron en campo con un multiparamétrico, cada campaña se recolecto 120 nuestras dando un total de muestras recolectadas para el análisis de los datos y desarrollo de la investigación es de 480.

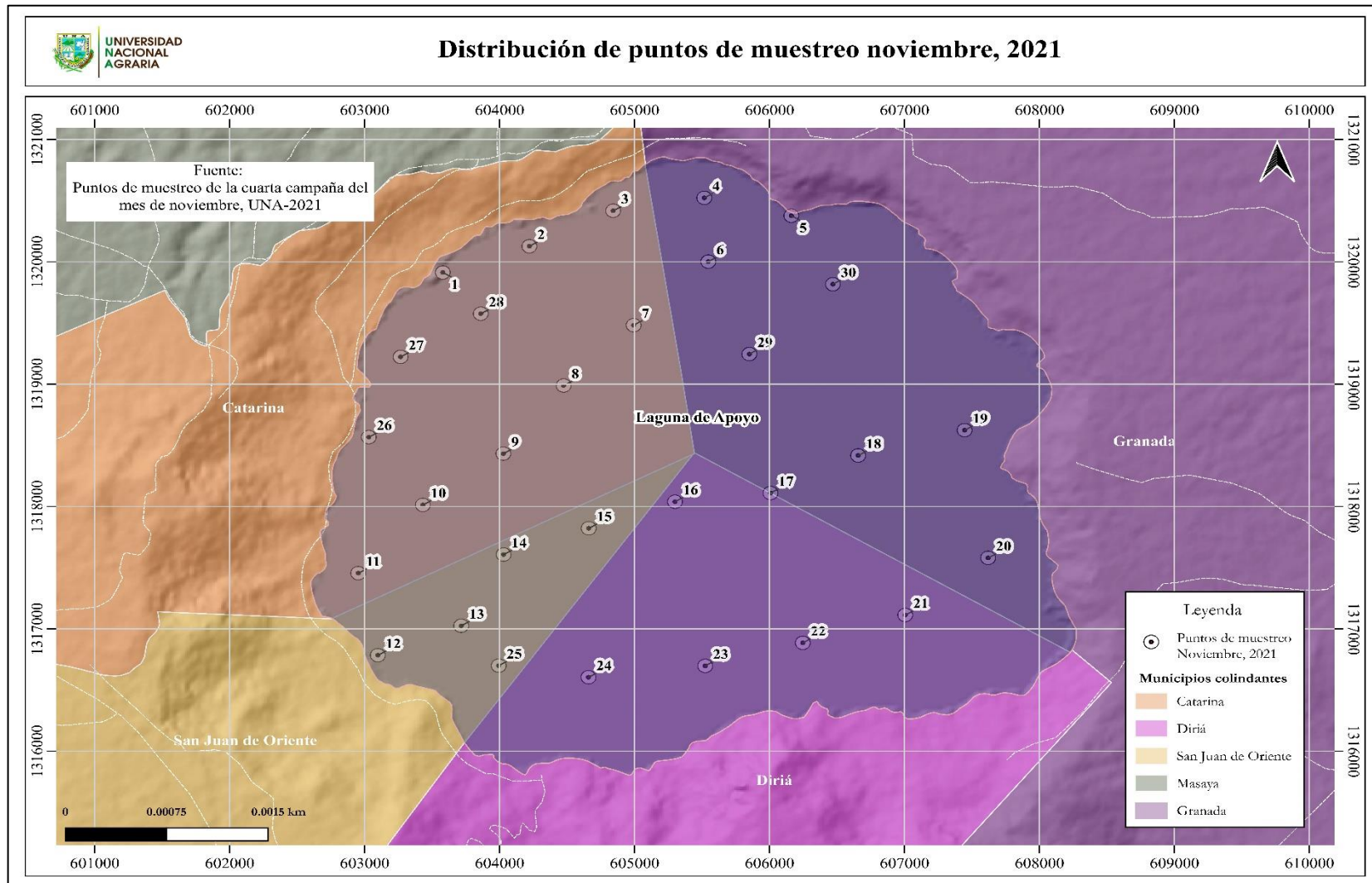


Figura 5. Distribución de los puntos de muestreos

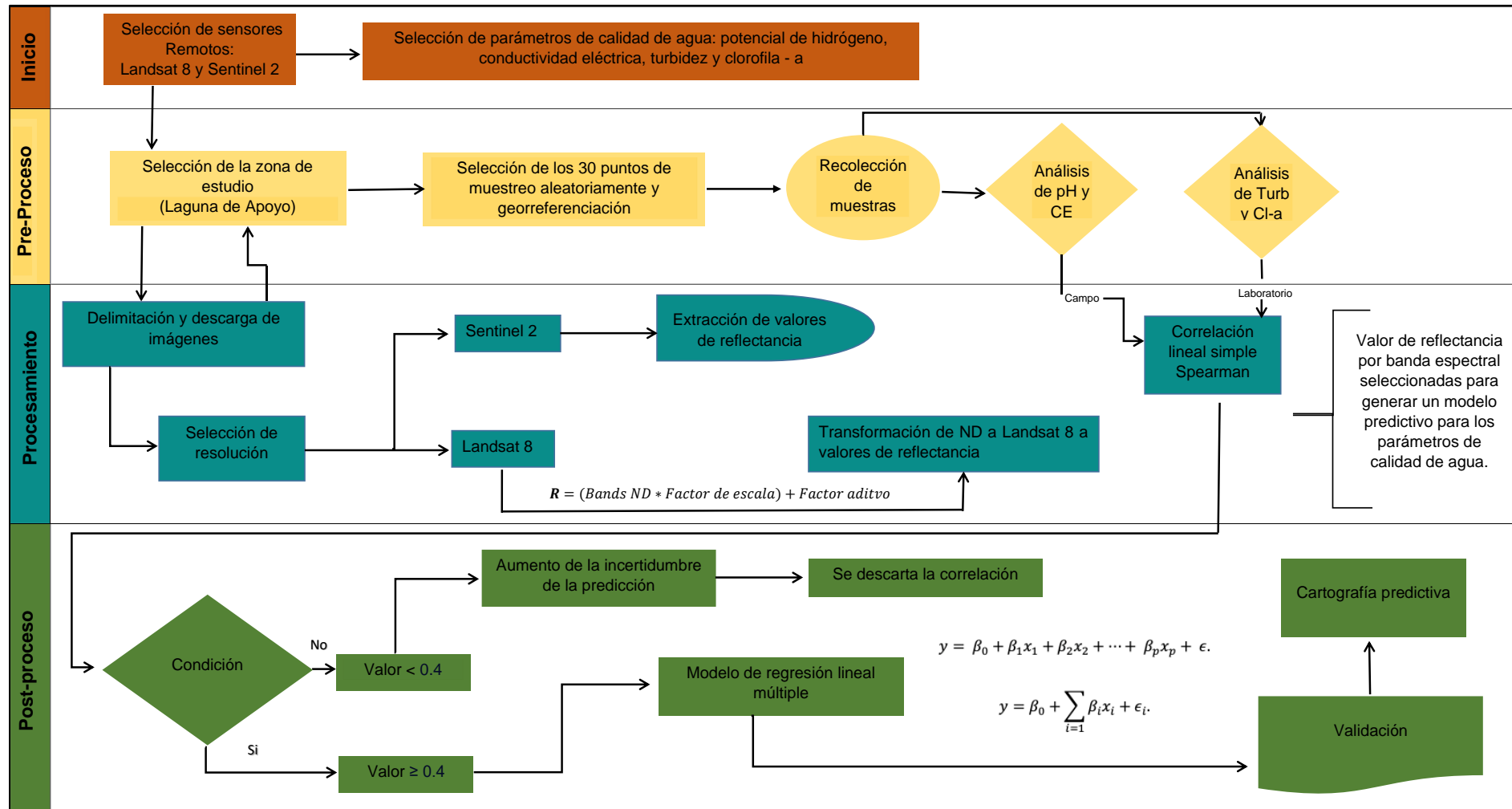


Figura 6. Flujo de para Evaluación de la utilidad de los sensores remotos Landsat 8 y Sentinel 2 para el monitoreo de calidad de agua.

4.2.1 Planificación

El desarrollo de la investigación se realizó en coordinaciones con las instituciones como; (La Alcaldía de Catarina para el acceso a la zona y la solicitud de acompañamiento en el desarrollo de la investigación, el MARENA para los permisos y acceso al área de estudio donde se utilizó lancha de motor en La Laguna de Apoyo, Reserva Natural, CNU con el aporte al desarrollo de nuevas investigaciones junco con la UNA).

Las metodología para la investigación se distribuyó con la fase de pre-proceso se realizaron recolección de muestras en campo para el análisis tanto en laboratorio como en gabinete de los parámetros de calidad de agua, así mismo se realizó las descargas de las imágenes, diseñando un calendario que coincida a fechas establecidas de cada recolección de muestra para lograr coordinar la actividad de descarga de las imágenes satelitales de cada sensor remoto Landsat-8 (USGS, Earth Explorer) y Sentinel-2 (ESA, Copernicus), una vez obtenidos los datos de campo con toda la información de reflectancia de las imágenes se procedió al análisis estadístico y espacial, el procesamiento se trabajó el procesamiento de imágenes, corte de la área de estudio extracción de valores de reflectancia y la aplicación de coeficiente de correlación de Spearman y el post-procesamiento se trabajó en el gabinete realizando los análisis de cada datos y muestreos para generar el modelo predictivo.

Por último, para que las autoridades municipales y entidades responsables del turismo nacional se apropien, empoderen de esta metodología, se realizó un taller de inducción a la metodología basada en los resultados obtenidos, a aplicar en el monitoreo de la calidad de agua a través de los sensores.

4.3 Variables a evaluar

Para determinar la calidad de agua en la Laguna de Apoyo para uso de turismo y recreación, se monitorearon los parámetros físico-químicos de clorofila-a ($\mu\text{g/L}$), turbidez (NTU), pH (escala de hidrogeno) y conductividad eléctrica (mS/cm). Los dos primeros parámetros fueron llevados para su análisis en laboratorio y el pH y conductividad

eléctrica, se determinaron en campo mediante un instrumento multiparamétrico para análisis de agua en cada campaña.

Se tomaron muestras de agua a una profundidad de 25 cm del espejo de agua en frascos plásticos de 3,750 ml para clorofila-a, frascos de 1,000 ml para turbidez, estos parámetros se resguardaron siguiendo los criterios de custodio y transporte de muestra, el cual son a una temperatura de 10 grados, establecidos por el laboratorio (CIRA/UNAN-Managua, 2022) (Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua), pH, conductividad eléctrica tomados en campo con un Multiparamétrico el muestreo se realizó mensualmente en cuatro campañas (Ver cuadro 5).

Cuadro 5. Fecha de Muestreos

Muestreos Mensuales	
Primera Campaña	31/08/21
Segunda Campaña	30/09/21
Tercero Campaña	21/10/21
Cuarta Campaña	17/11/21

4.3.1 Descarga de imágenes

Primeramente, se delimita sobre el mapa con un recuadro el área de estudio (Laguna de Apoyo). La descarga de imágenes Sentinel-2 se obtuvieron desde la plataforma Open Access Hub (link: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Esta plataforma permite tener imágenes con nivel de procesado L1C y L2A, las imágenes de nivel L2A, a diferencia de las imágenes de nivel L1C con resolución de 10 y 20 metros, corresponden a imágenes corregidas atmosféricamente que te ofrecerán datos de reflectancia más próximos a la realidad, por lo tanto, con niveles de color más realistas. Podrás diferenciarlas visualmente ya que las imágenes de nivel L2A son más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera con resoluciones de 20 y 10 m (*Sobre Copérnico / copérnico, 2018*).

Landsat-8 para la descarga de imágenes estas se obtuvieron desde la plataforma Earth Explorer USGS (Link: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). En cada campaña se obtuvieron entre 2 a 4 colección de imágenes con un porcentaje de nubosidad menor o igual al 40 % que variaban en cada mes el sensor Landsat-8, las imágenes con resolución de 30 y 60 metros, con un nivel de procesamiento de está calibrado radiométricamente pasando en el punto deseado cada 16 días (*Landsat 8 / Ciencia Landsat*, 2021).

Se realizó un procesamiento de cada imagen satelital de los sensores que se evaluaron, se trabajó en la calibración, rectificación radiométrica y definición de resolución espacial para facilitar la extracción de los datos, a su vez cada uno de los 30 puntos muestreados, se extrajo los valores de reflectancia y realizar promedio de cada campaña mensual que se analizó y se aplicaron métodos de índices espectrales, también se aplicó un análisis de distribución de los datos para cada parámetro físico-químico de calidad de agua medido en laboratorio y campo.

4.4 Análisis de datos

La obtención de los valores de reflectancia y el procesamiento de las imágenes se determinaron mediante el software “RStudio” y “QGIS”, de igual manera dichos datos fueron analizados en plataformas de acceso gratuito.

El sensor Sentinel-2 permite la descarga de imágenes con nivel de procesamiento L2A de Reflectancia del Fondo de la Atmosfera (BOA) en rango de 400 – 2,278 nm, por lo tanto, no se le aplicó ningún pre-procesamiento. El sensor LandSat-8 permite la descarga de imágenes de satélite en formato de Numero Digitales (ND) por este motivo se aplicó la ecuación 1, para la conversión de valores de reflectancia al Tope de la Atmosfera (TOA) por lo que se aplicó tratamiento de ortorectificación de imágenes para convertir los ND a valores de reflectividad a través de los factores descritos en el cuadro 6.

Cuadro 6. Resumen de propiedades genéricas de la misión de Landsat 4 al 8

<i>Propiedad</i>	<i>Reflectancia</i>	<i>Temperatura</i>
<i>Valor de relleno</i>	0	0
<i>Factor de escala</i>	0.000027	0.00341802
<i>Factor aditivo</i>	-0.2	+149.0
<i>Tipos de datos</i>	Int16U	Int16U
<i>Rango valido</i>	1 - 65455	1 – 65535

Fuente: (Chaura, 2022, p. 379).

$$R = (Bands\ ND * Factor\ de\ escala) + Factor\ aditivo \quad Ec. 1$$

4.5.1 Correlación lineal simple

Para la extracción de valores de reflectancia se utilizó “Rstudio”, este software es una interface entre otras existentes como RCommander - que permite contar con una interacción más fluida con el programa R. Básicamente se trata de una máscara para visualizar el software que tiene como principales ventajas el orden y la visualización de los procesos que son llevados a cabo con R, todo de manera simultánea. En este se generaron los análisis de distribución de las muestras, normalización de datos, las pruebas de correlaciones entre dos o más variables y la significancia de las bandas entre los parámetros evaluados, así como la determinación del modelo regresión lineal múltiple para predecir los parámetros de calidad de agua en la Laguna de Apoyo (R Core Team, 2022).

Para conocer si existe una fuerza de relación del espectro electromagnético de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2 que puedan predecir los parámetros fisicoquímicos de pH, conductividad eléctrica, clorofila-a y turbidez en los cuerpos de agua, se utilizó el método de correlación de datos de Spearman es un método estadístico no paramétrico que pretende identificar la intensidad de asociación entre dos variables, se aplicó este método debido a que se ajusta al tamaño de muestra utilizada de 30 muestras y además que los datos de variables ambientales presentan una distribución no paramétrica ya que no son variables que se pueden controlar durante la investigación, determinada en este estudio,

los rangos de determinación tienen como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta. El coeficiente se define por la siguiente fórmula. Cuando $\rho > 0.05$ la relación es directa entre las variables. Si $\rho < 0.05$ la relación es inversa y si $\rho = 0$ son independientes. Dicho coeficiente se puede expresar en términos de su estadístico como se expresa en la ecuación 2.

$$\gamma_s = \frac{\frac{n^3 - n}{12} - \sum_{i=1}^n \frac{di^2}{2}}{\sqrt{\left(\frac{n^3 - n}{12}\right)\left(\frac{n^3 - n}{12}\right)}} = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n di^2}{n^3 - n}$$

$-1 \leq \gamma_s \leq 1$

Ec. 2

Fuente: (Restrepo y González, 2007, p. 10).

La correlación es una técnica estadística se utilizó para mostrar la fuerza y la dirección de una relación lineal simple o múltiple, así como la proporcionalidad entre dos variables a más. Esta técnica indica si dos variables están relacionadas o no y la fuerza de esa relación utilizando el rango de magnitud absoluta del coeficiente de correlación observado entre los datos medidos y los valores de la reflectividad.

Se han sugerido varios enfoques para traducir el coeficiente de correlación en descriptores como relación "débil", "moderada" o "fuerte" la mayoría de los investigadores probablemente estarían de acuerdo en que un coeficiente de 0,9 es una relación muy fuerte, sin embargo, en este estudio se consideraron únicamente las correlaciones moderadas de 0.4 a correlaciones muy fuertes en la determinación de la ecuación de regresión lineal múltiple de predicción de los parámetros de calidad (cuadro 7), útil para el monitoreo periódico del cuerpo de agua.

Cuadro 7. Enfoque convencional para la implementación de coeficientes de correlación

Magnitud absoluta del coeficiente de correlación observado	Criterio
0.00 – 0.10	Correlación insignificante
0.10 – 0.39	Correlación débil
0.40 – 0.69	Correlación moderada
0.70 – 0.89	Correlación fuerte
0.90 – 1.00	Correlación muy fuerte

Fuente: (Schober et al., 2018).

4.5.2 Modelo de regresión lineal múltiple

La predicción de una variable en función de la otra, depende de la influencia que la o las variables independientes, pueda ejercer sobre la variable dependiente; para conocer la relación funcional que existe entre los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua con los rangos espectrales divididos en bandas espectrales de los sensores remotos Landsat-8 y Sentinel-2, se utilizó el análisis de regresión lineal múltiple, ya que permite identificar el modelo o función que relaciona a las variables, una vez estimado el modelo es posible predecir el valor de la variable dependiente en función de las variables independientes y dar una medida de la precisión o estimación. (Schober *et al.*, 2018)

Los modelos de regresión múltiple estudian la relación entre y una variable de interés (variable respuesta o dependiente) los parámetros de calidad de agua, y x un conjunto de variables explicativas o regresores las bandas espectrales de los sensores remotos, X_1, X_2, \dots, X_p . En el modelo de regresión lineal múltiple se supone que la función de regresión que relaciona la variable dependiente con las variables independientes es lineal, es decir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon.$$
$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \varepsilon_i. \quad \text{Ec. 3}$$

Fuente: (Restrepo, L., González, J., 2017)

- β_0 es el termino independiente. Es el valor esperado de Y cuando X_1, \dots, X_p son cero.
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ son los coeficientes parciales de la regresión: β_1 mide el cambio en Y por cada cambio unitario en X_1 , manteniendo X_2, X_3, \dots, X_p constantes.
- β_2 mide el cambio en Y por cada cambio unitario en X_2 , manteniendo X_1, X_3, \dots, X_p constantes.
- β_p mide el cambio en Y por cada cambio unitario en X_p , manteniendo X_1, \dots, X_{p-1} constantes.
- ε es el error de observación debido a variables no controladas.

Además, se puede especificar un predictor categórico y dos campos continuos auxiliares en un gráfico y se pueden utilizar para generar un modelo de regresión adecuado. Se implementaron los paquetes estadísticos en el Software Rstudio para todo el proceso de análisis de datos “MASS” (Venables, W. N. & Ripley, B. D., 2002), “GGally” (Schloerke, Larmarange, Briatte, Marbach, Thoen, Elberg and Crowley, 2021), “DescTools” (Signorell et al., 2021) “stargazer” (Hlavac & Marek, 2022), “readxl” (Wickham & Bryan, 2019), “ggpubr” (Kassambara, 2020), “ggplot2” (H. Wickham, 2016), “gridExtra” (Auguie, 2017) y “correlation” (Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., & Lüdecke, D., 2019). Un valor importante de una ecuación de regresión estimada es su capacidad para predecir los valores de cada rango de parámetro de calidad de agua a partir de los valores de las variables independientes.

Para evaluar la metodología y la distribución de los valores, se generó gráficos de homocedasticidad, para conocer la igualdad o dispersión de los valores, también la linealidad para identificar el sesgo promedio en todos los rangos medidos, el análisis de normalidad, también llamados contrastes de normalidad, para conocer la distribución normal con la misma media o desviación típica y finalizare para conocer la distancia estándar ya que proporciona una medida de resumen única de la distribución de los datos y la validación de la ecuación de multivariable.

4.5.3 Cartografía predictiva

La cartografía predictiva primeramente, una vez obtenida la ecuación del modelo de regresión lineal múltiple se implementaron los paquetes de análisis espacial ráster y GDAL del programa “RStudio” para poder interpolar los valores de la ecuación con las capas ráster cortadas de la Laguna de Apoyo y una vez generada la capa predictiva se visualizó mediante el programa “QGIS” donde se balancearon los colores de acuerdo a las clases categóricas que se generaron con los rangos de cada parámetro medido. (Bivand, Keitt & Rowlingson, 2023; Hijmans, 2023; R Core Team, 2022; QGIS Association, 2002)

4.6 Materiales utilizados

Envases, termos, hielo y bolsas para el custodio de las muestras de agua a analizarse en laboratorio de los parámetros: clorofila-a y turbidez.

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
- Multiparamétrico de bolsillo para la determinación de concentraciones de parámetros físico-químicas de agua (temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad).
- Soluciones calibradoras para los parámetros de conductividad eléctrica y pH.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el desarrollo de la investigación y la adquisición de experiencia, en el desarrollo de la evaluación de la calidad de los sensores remotos se basa en un enfoque sistemático para garantizar la inocuidad de fuentes de agua o lagunas como en este caso La Laguna de Apoyo. Estos resultados se basan en garantizar análisis multitemporales con el uso de los sensores remotos y evaluar la calidad de los mismos para conocer el que mejor logra predecir los parámetros de calidad y que los datos que logren dar a conocer la variabilidad de los parámetros y el comportamiento de la fuente. Con esta metodología se puede mantener un monitoreo continuo y garantizar que se cumplan con principios de prevención y seguridad de la reserva natural, que es el caso de este estudio, para mantener control microbiano y físico-químicas del agua con tan solo el procesamiento de las imágenes e interpretación de los datos, que se pueden destacar la importancia de la protección de la fuentes de agua, así que si algún dado momento se presenta alguna alteración o cambio natural, se puede mantener la documentación de estas alteraciones tomado en cuenta que el cambio climático y contaminación de fuentes de agua, produce cambios prolongados con consecuencias en la calidad del agua.

Se debe cumplir todos los estándares de calidad, utilizando políticas anti-degradación y métodos de implementación para mantener la calidad del agua en niveles aceptables según las normativas locales, nacionales o internacionales. Trabajado en base a los monitoreos constantes, también garantizar que se cumplan todos los rangos permisibles para consumo humano o contacto parcial. Las condiciones de las referencias deberían ser la base para los bio-criterios y parámetros físico-químicos cumpliendo con los rangos permitidos. Esta debe representar condiciones intactas o mínimamente deterioradas, depende del uso de la fuente de agua en este caso es de uso turístico en la Laguna de Apoyo.

5.1 Comportamiento de los parámetros fisicoquímicos de calidad de agua

El monitoreo de las fluctuaciones del parámetro potencial de hidrógeno (pH) presenta un promedio de los valores máximos y mínimos de las cuatro campañas con el parámetro. los valores de pH de menos de 7 significan que es más ácida, en 7 significa que es básica

y más de 7 alcalina. El resultado presente del muestreo en las cuatro campañas los valores de pH son algo variantes como por ejemplo las campañas dos y cuatro, se observa valores semejantes entre sí con los rangos de 8.50 a 8.00 rango, en el caso de la campaña uno los rangos van de 7.40 a 8.00 y la tercera campaña suben de 8.00 a 8.50 sobrepasando el valor promedio de los muestreos indicando que el agua es alcalina esto se puede observar en la figura 8. La alcalinidad en el agua se debe tienen un alto índice de minerales alcalinos ya que la fuente de agua que se seleccionó para la investigación es de origen de un cráter volcánico.

El parámetro conductividad eléctrica (CE) presenta un promedio de los valores máximos y mínimos de las cuatro campañas, la conductividad presenta la facilidad con que una corriente eléctrica pasa a través del agua en este caso la fuente donde se desarrollo la investigación donde los resultados del muestreo de las cuatro campañas con el valores del parámetro CE son algo variantes cada mes que se realizó el muestreo, por ejemplo las campañas dos y cuatro, se observa valores parecidos entre los rangos 4.00 a 5.00 mS/cm, en el caso de la campaña uno los rangos van de 5.00 a 5.50 mS/cm en este caso son más alto que el promedio indicando una variación y la tercera campaña suben a 5.30 a 5.50 mS/cm sobrepasando el valor promedio de los muestreos, sin embargo superar los valores paramétricos de conductividad en las normas generalizadas donde se toman en cuenta la medición de CE, el comportamiento de parámetro presenta altas presencia de sales disueltas que aumentan la conductividad que se midió en mS/cm se puede observar cada cambio de CE figura 8.

Los rangos de turbidez (Turb) en los muestreos, presentes en cada resultado generado de las cuatro campañas indicando que la turbidez mide la presencia de partículas en suspensión en la fuente de agua, en los valores estimados de cada mes presentan variaciones en las siguientes campañas dos y cuatro, se observa valores parecidos entre los rangos 0.10 a 1.00 NTU, en el caso de la campaña uno los rangos van de 0.50 a 4.00 NTU sobre pasa el promedio y la tercera campaña se eleva el valor 0.50 a 4.10 NTU sobrepasando el valor promedio de los muestreos, en la valoración de los resultados se observa que hay bajos nivel de particular en suspensión, la variabilidad presente en los muestreos se puede observar cada cambio en la figura 10.

Los valores clorofila-a (Cl-a) en los muestreos, realizados de las cuatro campañas, la medición de la Cl-a, se mide el indicador indirecto de la biomasa dándole un valor de presencia en la fuente. Los valores estimados de cada mes presentan variación en las siguientes campañas dos, tres y cuatro, se observa valores parecidos entre los rangos 0.75 a 2.70 $\mu\text{g/L}$, en el caso de la campaña uno los rangos van de 0.50 a 2.80 $\mu\text{g/L}$ sobrepasando el valor promedio de los muestreos, el parámetros medidos y los valores observados en el análisis de los datos, se clasifican como agua en estado, en esta clasificación se visualiza y se da valor al aumentó de presencia de pigmentación por alga esto se puede observar cada cambio en la figura 11.

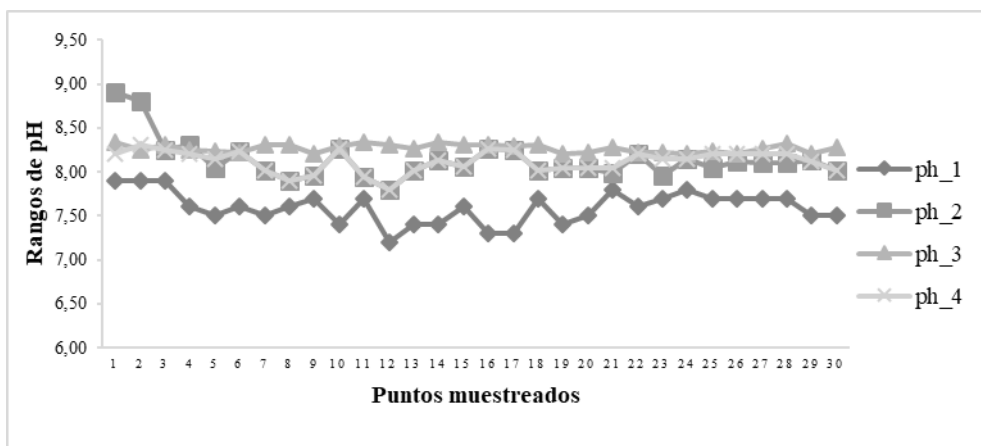


Figura 7. Parámetro potencial de hidrógeno

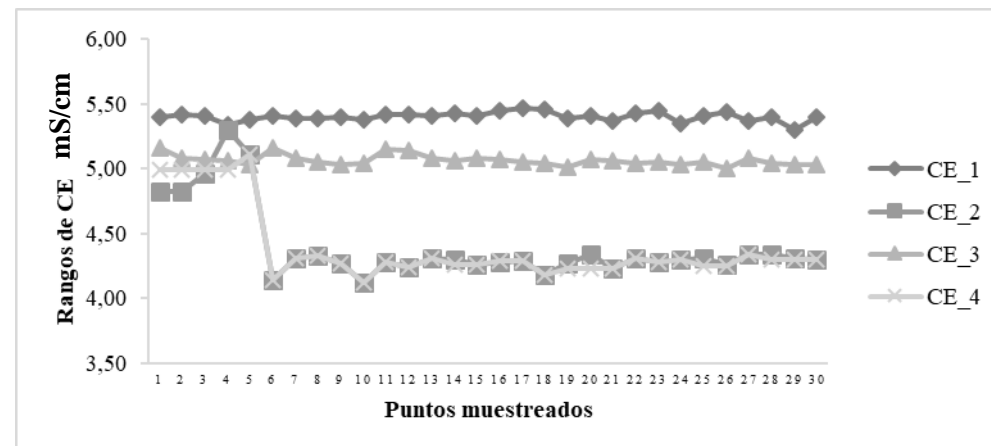


Figura 8. Parámetro conductividad eléctrica

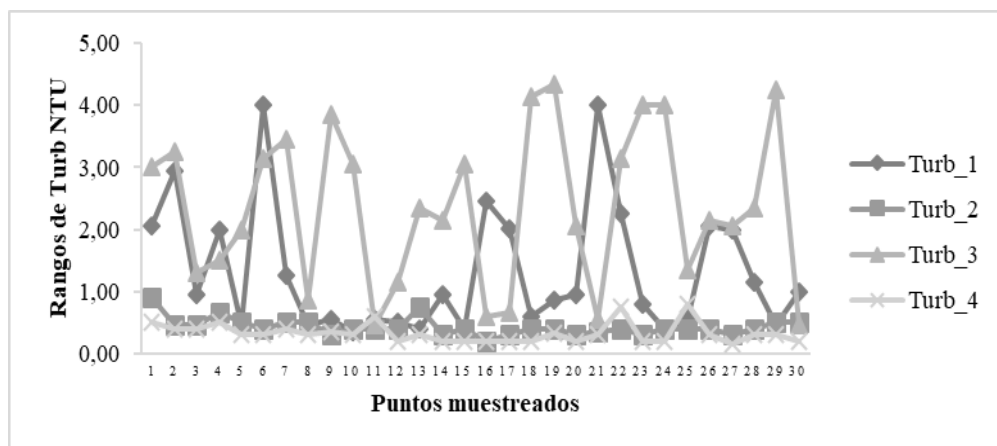


Figura 9. Parámetro turbidez

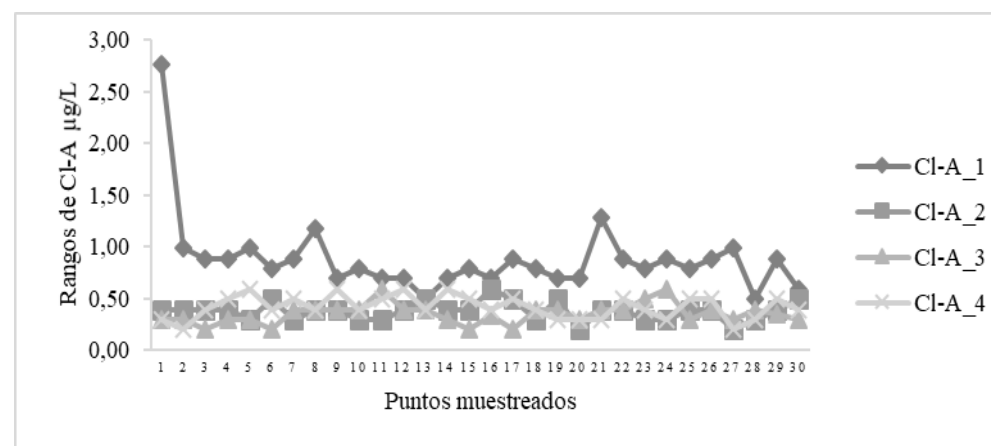


Figura 10. Parámetro clorofila-a

Cálculos de valores máximos y mínimos por campaña (pH rango de 7.20 a 8.90 escala), (CE rango de 4.12 a 5.47 mS/cm), (Turb rango de 0.20 a 4.35 NTU) y (Cl-a rango de 0 a 3 µg/L) presentes en el cuadro 8.

Cuadro 8. Valores máximos y mínimos de los parámetros de calidad de agua

Parámetro	AGO		SEP		OCT		NOV	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
pH	7.20	7.90	7.79	8.90	8.20	8.34	7.79	8.30
CE mS/cm	5.30	5.47	4.12	5.30	5.00	5.16	4.12	5.11
Turb NTU	0.35	4.00	0.20	0.90	0.45	4.35	0.15	0.80
Cl-a µg/L	0.49	2.76	0.20	0.59	0.45	0.59	0.20	0.59

Nota: Descripción de los parámetros, potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), turbidez (Turb) y clorofila-a (Cl-a).

5.2 Correlación con el sensor Landsat 8 y los parámetros físico-químicos de calidad de Agua

El sensor Landsat 8 se realizó correlación lineal simple de cada campaña con los valores de reflectancia y valores de cada parámetro medido. En este caso se presentó afectaciones por el clima y presencias de nubosidad en la imagen satelital descargadas posiblemente alterando los valores de reflectancia tanto como en el rango visible e infrarrojo cercano cuadro 9.

Cuadro 9. Rangos de Correlación con el Sensor Landsat 8 de las cuatro campañas de muestreo

<i>Campañas</i>		Rango infrarrojo cercano					
		Rango visible RGB			NIR		
	Parámetros	B02	B03	B04	B05	B06	B07
Agosto	pH	-0.125	-0.136	-0.135	-0.104	-0.165	-0.169
	CE	0.260	0.263	0.261	0.250	0.269	0.262
	Cl-a	-0.113	-0.123	-0.126	-0.099	-0.133	-0.126
	Turb	-0.210	-0.218	-0.221	-0.226	-0.263	-0.273
Septiembre	pH	0.292	0.298	0.292	0.260	0.252	0.262
	CE	0.046	0.064	0.038	0.141	0.059	0.032
	Cl-a	0.073	0.056	0.065	0.040	0.019	0.034
	Turb	-0.173	-0.167	-0.179	-0.149	-0.190	-0.189
Octubre	pH	-0.300	-0.289	-0.291	-0.227	-0.342	0.360
	CE	-0.223	-0.209	-0.213	-0.134	-0.219	-0.232
	Cl-a	0.104	0.091	0.090	0.012	0.093	0.110
	Turb	0.352	0.328	0.331	0.269	0.259	0.214
Noviembre	pH	0.272	0.219	0.246	0.190	0.290	0.238
	CE	0.308	0.369	0.323	0.399	0.340	0.317
	Cl-a	0.214	0.104	0.182	0.120	0.123	0.114
	Turb	0.262	0.235	0.230	0.257	0.236	0.265

El análisis de correlación de sensor Landsat 8, (cuadro 9) no presenta ninguna correlación significativa para el desarrollo de la metodología, posiblemente al extraer de los valores de reflectancia fueran afectados por la fuerte presencia de nubes en las imágenes satelitales descargadas, ocasionando la variación de los datos ya que en ninguna campaña o banda presentara correlaciones ≥ 0.4 ya que es la condición para la generación de cartografías predictivas.

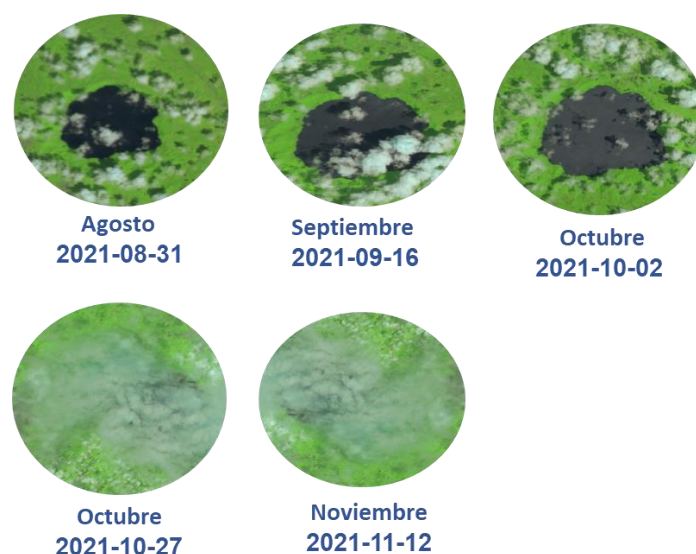


Figura 11. Imágenes descargadas en cada campaña realizada para el muestreo y análisis espacial, con el sensor Landsat-8 con una resolución temporal de 15 días y resolución espectral de 15 y 30 píxeles color real RGB con la combinación de bandas 2, 3 y 4.

En las imágenes Landsat-8 se logró observar la afectación más visible que es la nubosidad, afectando la extracción de valores de reflectancia y al generar el análisis estadístico de Spearman, generando correlaciones entre los rangos entre la correlación insignificante de 0.00 a 0.10 y correlación débil de 0.10 a 0.39 esto no aplicando a las reglas establecidas para la generación del modelo predictivo de multivariable, esto dando a entender que no se logra generar cartografías predictivas sobre pasando los niveles de los cuatro parámetros muestreados de las cuatro campañas.

5.3 Correlación con el sensor Sentinel-2 y los parámetros físico-químicos de calidad de Agua

El sensor Sentinel-2 se realizó correlación lineal simple de cada campaña con los valores de reflectancia y valores de cada parámetro medido. En este caso se presentó afectaciones por el clima y presencias de nubosidad en la imagen satelital descargadas en los meses de agosto, septiembre y octubre los valores de reflectancia se vieron afectados por la presencia de nubes. Los parámetros de calidad de agua que presentan correlación significativa son el parámetro pH y CE, presentando correlación con las bandas presentes

en el rango visible (B02, B03 y B04) e infrarrojo cercano (B05, B06, B07, B08 y B08A) cuadro 10.

Cuadro 10. Rangos de Correlación con el Sensor Sentinel-2 y parametros de calidad de agua

<i>Campañas</i>		Rango infrarrojo cercano NIR							
		Rango visible RGB			NIR	SWIR			
		B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B08A
Agosto	pH	0.043	0.071	0.083	0.086	0.073	0.072	0.042	0.096
	CE	-0.279	-0.274	-0.270	-0.190	-0.134	-0.147	-0.198	-0.200
	Cl-A	0.110	0.167	0.139	0.081	0.111	0.138	0.208	0.182
	Turb	-0.013	0.001	0.000	-0.051	-0.042	-0.072	-0.033	-0.088
Septiembre	pH	-0.050	-0.146	-0.174	-0.135	-0.101	-0.069	-0.145	-0.045
	CE	0.056	0.048	0.056	0.085	0.077	0.086	0.085	0.093
	Cl-A	0.054	0.030	0.014	-0.009	-0.023	-0.047	0.031	-0.064
	Turb	0.179	0.186	0.201	0.190	0.177	0.178	0.196	0.182
Octubre	pH	-0.050	-0.146	-0.174	0.135	0.101	0.069	-0.145	0.045
	CE	-0.334	-0.347	-0.352	-0.109	-0.108	-0.144	-0.313	-0.141
	Cl-A	0.152	0.185	0.172	0.101	0.130	0.134	0.155	0.120
	Turb	0.212	0.296	0.293	-0.074	-0.037	-0.007	0.277	-0.015
Noviembre	pH	0.261	0.292	0.453	0.465	0.317	0.277	0.279	0.285
	CE	0.459	0.563	0.731	0.780	0.809	0.810	0.797	0.806
	Cl-A	0.262	0.091	0.000	0.047	0.010	0.043	0.036	0.035
	Turb	0.104	0.167	0.300	0.327	0.260	0.312	0.284	0.268

El análisis de correlación para el sensor Sentinel-2, (Cuadro 10) en las primeras 3 campañas no presenta correlación al igual que las determinadas con el sensor Landsat 8, sin embargo, la última campaña correspondiente al mes de noviembre presenta fuerte correlación en los parámetros pH = B04, B05 y CE = B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08 y B08A, ya que el valor de correlación es ≥ 0.4 entre los parámetros, lo que cumple con los criterios establecidos en la metodología para la selección de correlaciones.

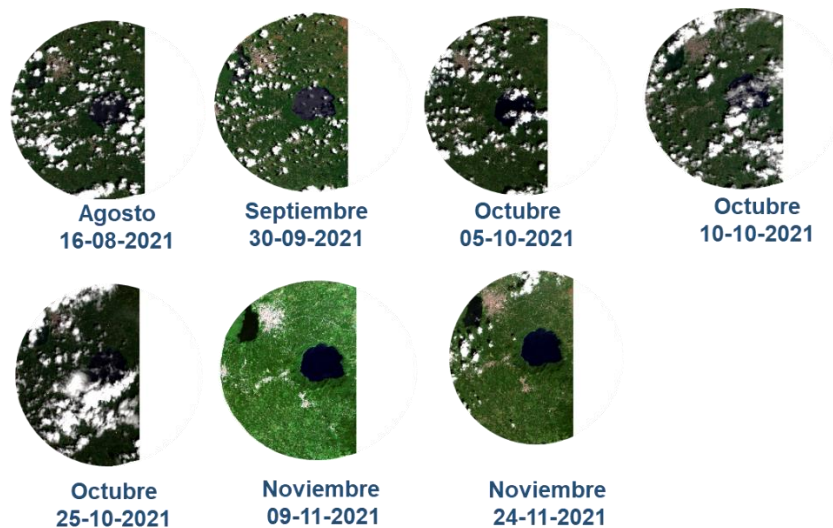


Figura 12. Imágenes descargadas en cada campaña realizada para el muestreo y análisis espacial, con el sensor Sentinel-2 (Sentinel 2A y Sentinel 2B) con una resolución temporal de 5 días y resolución espectral de 10 y 20 pixeles color real RGB con la combinación de bandas 2, 3 y 4.

En las imágenes Sentinel-2 se logró observar la afectación más visible que es la nubosidad en la campaña uno del mes de agosto, en la campaña dos del mes de septiembre y la campaña tres con el mes de octubre, afectado la extracción de valores de reflectancia y al generar el análisis estadístico de Spearman, generando correlaciones entre los rangos entre la correlación insignificante de 0.00 a 0.10 y correlación débil de 0.10 a 0.39 esto no aplica las reglas establecidas para la generación del modelo predictivo de multivariable, en la cuarta campaña del mes de noviembre presenta correlaciones con el parámetro pH en tan solo dos bandas con una correlación moderada y CE con correlaciones moderadas a fuerte, esto dando a entender que se logra generar cartografías predictivas y con los otros dos parámetros no logro presentar valores significativos en el caso de la correlación ya que presenta correlación insignificante y débil afectando los niveles significativo de la correlación para el modelo en los demás meses y parámetros de calidad de agua.

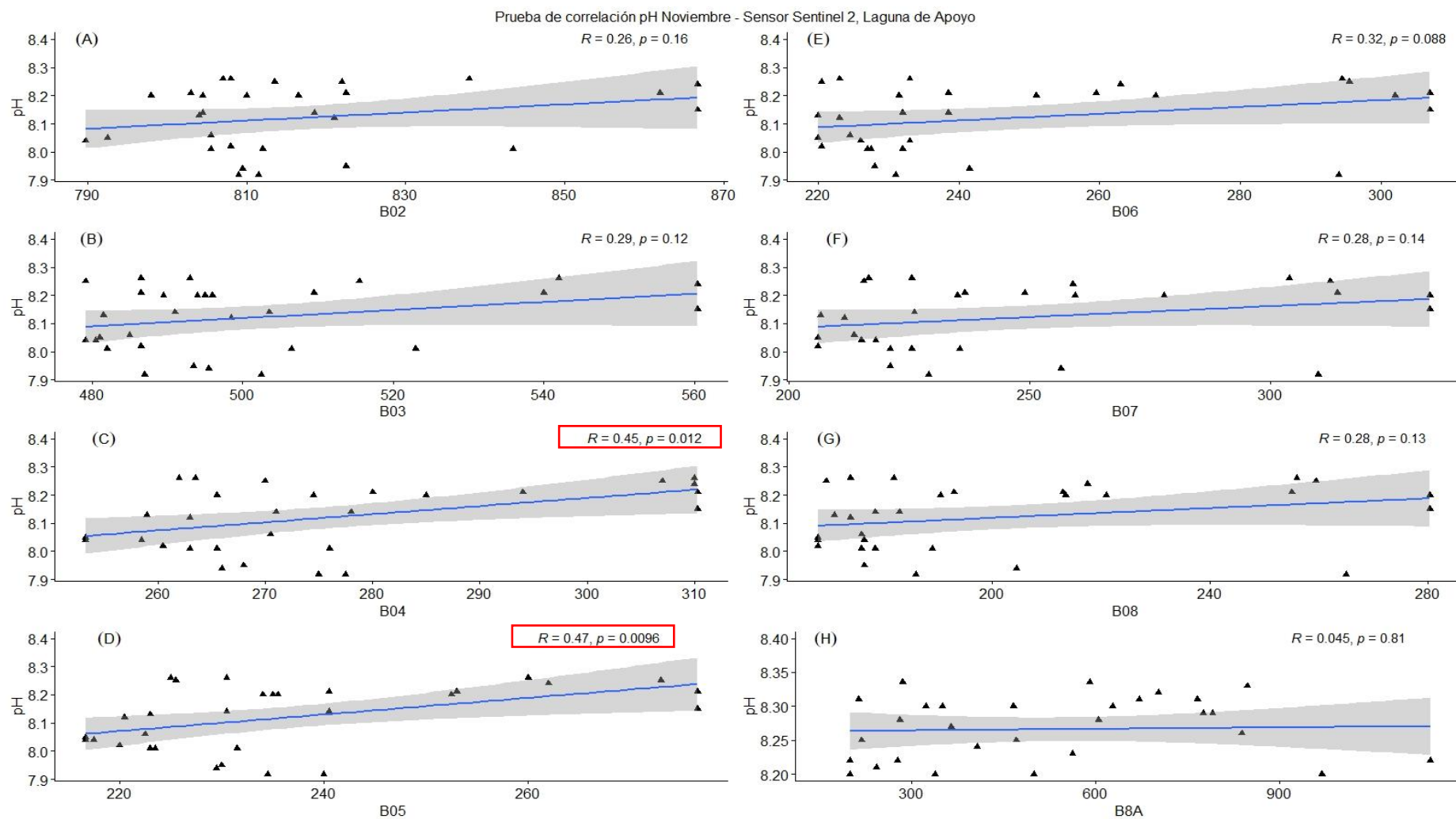


Figura 12. Panel de correlación lineal simple parámetro pH en el mes de Noviembre con el sensor sentinel-2.

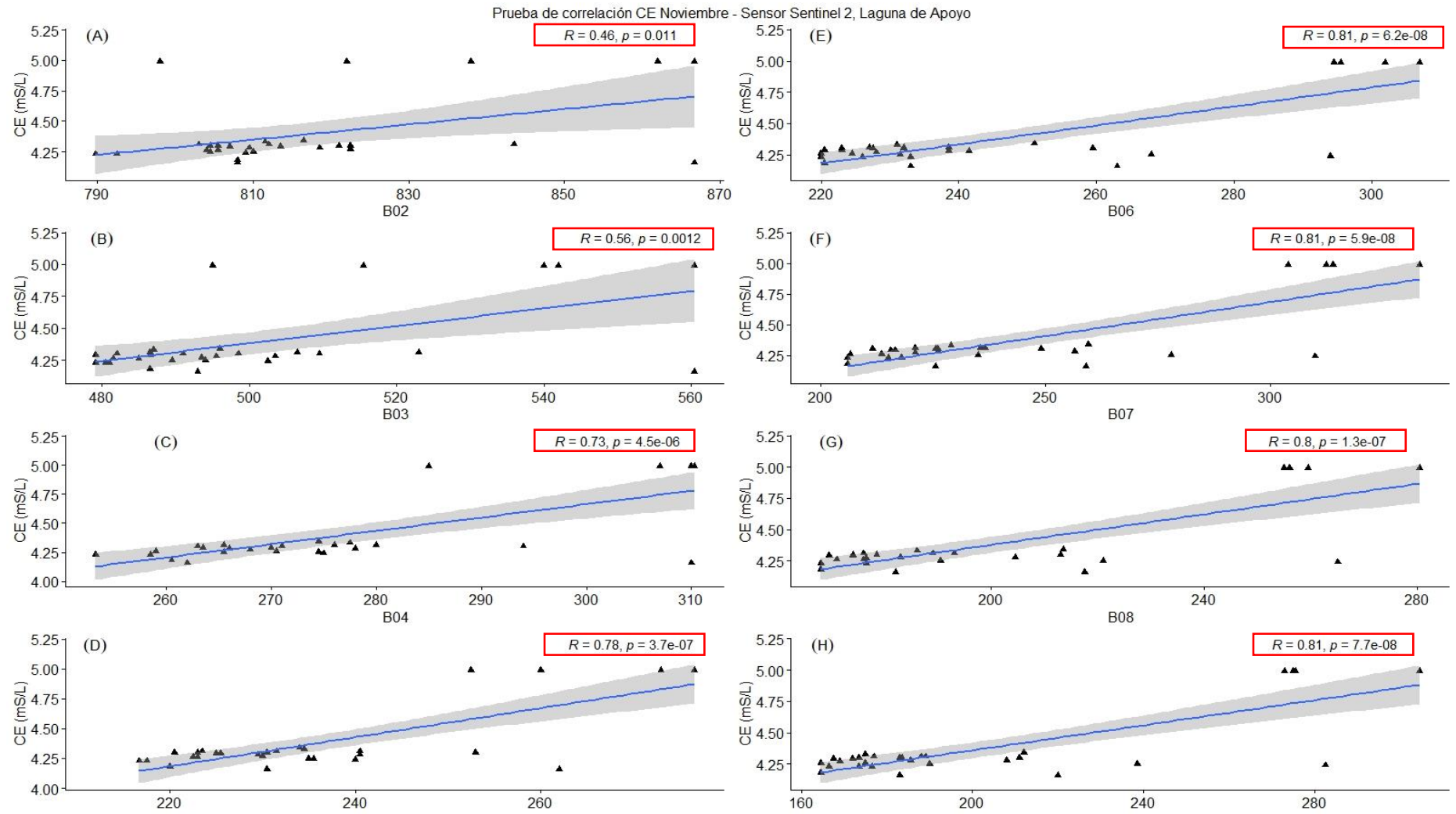


Figura 13. Panel de correlación lineal simple parámetro CE en el mes de Noviembre con el sensor sentinel-2.

Se logró trabajar con el mes de noviembre con los parámetros de calidad de agua, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica porque presenta correlaciones mayores de 0.4; con turbidez y clorofila-a no muestra valores moderados o altos de correlación, en base a esto afecta el desarrollo de la metodología por este motivo no se trabajó. Al generar el modelo con turbidez y clorofila-a se puede afectar los valores de predicción por este motivo también se descarta ya que pueden generar datos muy altos o muy bajos afectando los valores de predicción.

En el desarrollo de la investigación y análisis de los datos se observó que el sensor Landsat-8 se descarta por una variedad de motivos, su resolución temporal, la presencia de nubosidad en casi todas las imágenes descargadas desde su plataforma, que se utilizaron para realizar el desarrollo de la metodología y la evaluación de los sensores. Landsat-8 no logro la generación de cartografía de las cuatro campañas y los cuatro parámetros muestreados ya que no presentan correlaciones mayores o igual a 0.4, en el caso de Sentinel-2 se descartó las primeras tres campañas, solo

Dado que una correlación expresa el grado de asociación entre dos variables, ésta se puede clasificar según el sentido de la relación del tipo de correlación positiva, negativa o nula y rangos establecidos por (*Schober et al., 2018*) esto reflejado en cada correlación, en el desarrollo del análisis estadístico de los resultados de las cuatro campañas para los cuatro parámetros seleccionados para la generación de este estudio. El proceso estadístico Spearman que la fuerza de correlación que existe entre las dos variables, en este caso, las bandas del sensor Sentinel-2 y Landsat-8, se recolectó 30 muestras por campaña, logrando interpretar los datos de manera mensual tanto los datos analizados en campo y laboratorio.

El análisis estadístico, con Spearman con las bandas del sensor Sentinel-2 y el parámetro pH del mes de noviembre brinda la fuerza de correlación moderada para la banda B04 = 0.45 (figura 12, C) y B05 = 0.47 (figura 12, D), presentando fuerte correlación positiva altamente significativa con un valor $p = 0.0096$ y $p = 0.012$ correspondientemente, esta correlación moderada indica que el sensor tiene potencial predictivo para el parámetro determinado.

El análisis estadístico, con Spearman con las bandas del sensor Sentinel-2 y el parámetro CE del mes de noviembre brinda la fuerza de correlación que existe entre dos variables, muestra correlaciones para la banda B02 = 0.46 (figura 13, A), B03 = 0.56 (figura 13, B), B04 = 0.73 (figura 13, C),), B05 = 0.78 (figura 13, D),), B06 = 0.81 (figura 13, E),), B07 = 0.81 (figura 13, F),), B08 = 0.80 (figura 13, G) y B08A = 0.81 (figura 13, H), presentando fuerte correlación positiva, altamente significativa correspondientemente con un valor $p= 0.011$, $p= 0.0012$, $p= 4.5e-06$, $p= 3.7e-07$, $p= 6.2e-07$, $p= 5.9e-08$, $p= 1.3e-07$ y $p= 7.7e-08$, estas correlación moderada y alta indica que el sensor tiene potencial predictivo para el parámetro, determinado correlaciones altamente significativa para el desarrollo de la metodología.

Por otra parte, el autor Miguel Enrique Mendoza Chichipe, en Chachapoyas - Perú (2018) genero el análisis de regresión los datos espectrales con el sensor Sentinel 2, seleccionó las bandas que mejor se relacionó con el contenido de carbono aéreo con la banda rojo (B4), infrarrojo cercano (B8) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Esto se debe, a que la radiación tiene gran incidencia en los vegetales, ya que, por su composición, la banda roja e infrarroja son los que mayor interacción tienen con la misma obteniendo una $R^2 = 0.6181$, siendo este un modelo aceptable y para los parámetros estudiados en esta investigación también se contine correlaciones altamente significativas con estas 2 bandas (B04 y B08) con el mismo sensor Sentinel 2. (Mendoza Chichipe M, E., pdf, 2018.)

5.4 Modelos predictivos generados

La ecuación de regresión generadas en el estudio resultado del análisis de relación entre los parámetros de calidad de agua y los valores del espectro electromagnético que detecta el sensor remoto Sentinel-2. Los datos del parámetro pH correspondiente al mes de noviembre fueron los utilizados para generar el modelo predictivo para monitorear cambios en el agua de este parámetro el cual se puede hacer con la B05, teniendo esta una probabilidad para los coeficientes menor a $p<0.005$ ($p=2e-16$, $p=0.00957$) respectivamente por lo que se puede determinar que los coeficientes son significativos, sin embargo, el modelo tiene coeficiente de determinación bajo $R^2=0.2165$, lo cual indica que la variable independiente puede predecir aproximadamente el 21.65% de la variación

en la variable pH, a pesar de tener un coeficiente de determinación bajo el modelo es altamente significativo con $p < 0.005$ ($p = 0.009573$) y concluimos que si hay relación entre las dos variables.

La ecuación de regresión generadas con el sensor remoto Sentinel-2 y datos del parámetro CE correspondiente al mes de noviembre fueron los utilizados para generar el modelo predictivo para monitorear cambios en el agua de este parámetro el cual se puede hacer con la B04 y B07 teniendo esta una probabilidad para los coeficientes menor a $p < 0.005$ ($p = 1.3e-07$) y ($p = 7.7e-08$), respectivamente por lo que se puede determinar que los coeficientes son significativos, sin embargo, el modelo tiene coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.695$, lo cual indica que la variable independiente puede predecir aproximadamente el 69.50% de la variación en la variable CE, el modelo es altamente significativo con $p < 0.005$ ($1.309e-07$) y se concluyó que si hay relación entre las dos variables para lograr predecir el parámetro establecido con valores altamente significativos.

Parámetro	Formula	R^2 (%)	F	P value
pH	$pH = (7.422 + (0.029 * B05) + 0.1016)$	21.60 %	7.736	0.009573
CE mS/cm	$CE = (4.70 + (0.0044 * B04) + (0.004117 * B07) + 0.1602)$	69.50 %	30.12	1.309e-07

Las variables tomadas en cuenta al generar el modelo son: Coeficiente de determinación R^2 , valor de confianza en la predicción, el estadístico F es un test que se utiliza para evaluar la capacidad explicativa que tiene un grupo de variables independientes sobre la variación de la variable dependiente con las bandas espectrales y los datos de campo y el valor p es la probabilidad de observar un coeficiente.

Cuadro 11. Modelo de regresión multiple para la validación de predicción

R^2 : Coeficiente de determinación

F: Coeficiente análisis de varianza

P value: Probabilidad del valor estadístico calculado

Nota: El mes de noviembre con estos únicos parámetros que se logró generar la cartografía predictiva.

5.5 Análisis del modelo predictivo

Al obtener la ecuación del modelo de regresión multivariable, muestra una posible adecuación que se pueden correr el modelo adecuadamente y la tendencia creciente del mismo para que se ajuste a la necesidad del estudio y valorar con la visualización y análisis de las variables, como la Y la variable dependiente (variable cuyos valores se desea predecir y conocer los comportamiento de la misma), y X la variable independiente (también llamada variable explicativa y que se utiliza para predecir el valor de la variable dependiente) con la regresión lineal múltiple establecida que se ha estado trabajando para los dos parámetros, los cuales fueron con los únicos que se logró generar la cartografía predictiva (pH y CE), para conocer la distribución de los valores histograma y generar gráficos que aporta a validar y analizar el comportamiento para comparar los datos generado con la predicción.

En el histograma del ráster generado para la predicción del parámetro potencial de hidrógeno (pH), presenta los siguientes valores de predicción con la cuarta campaña que van de 7.6 a 7.9 en el inicio, el punto más alto con 8.20 bajando a 8.6 se puede lograr interpretar estos datos con la escala de pH, los cambios de rango para la cartografía se observan en la figura 15. La cartografía predictiva con el mes de noviembre con la B05 del sensor Sentinel-2, se seleccionó la gama de colores de celeste a azul logrando visualizar que el color de baja intensidad son los 7.76 a 8.00 y con la alta intensidad se observan de 8.0 a 8.47 en implantación de esta metodología que se estable como una alternativa económica para monitoreos continuos, en esta investigación se trabaja en conocer el sensor que brinda los rangos de cada parámetro vallan de la mano con los datos muestreados a si valorar y especificar la capacidad predictiva en base a evaluar las utilidades de este sensor, no se trabaja calidad de agua pero se utiliza normas nacionales o internaciones para conocer el indicio de los valores ya que cada parámetro es un indicador de calidad para las fuentes de agua como en este caso de este estudio de la Laguna de Apoyo, dando como resultado que con pH se logró predecir valores dentro de los rangos medidos en la cuarta campaña del mes de noviembre 2021.

El análisis del modelo predictivo, con la ecuación de regresión que se generó con este estudio con el cual se creó un gráfico de homocedasticidad donde se trabaja con residuos tipificados/valores y pronosticados, se utiliza para comprobar las hipótesis de la linealidad y homocedasticidad para el cual conocer si esta ecuación es un modelo es adecuado o no, en el caso de la ecuación generada para potencial de hidrógeno del mes de noviembre, no se debe observar ninguna tendencia ni comportamiento anómalo con los residuales estandarizados, pero si se observa valores fuera de la línea de media, visualizando que los puntos de muestreo están dispersos como 08, 16 y 12 son los más pronunciados esto valores se logran ver en la figura 19. El gráfico de linealidad se realizó para conocer los puntos que afectan la ecuación, la cual no permite que los valores alcancen estar en los rangos medidos los puntos son 16, 12 y 8, ver figura 21.

Con la gráfica de normalidad de los valores, también se conocen supuestos, ya que es necesarios para validar la inferencia respecto a los parámetros que se logró predecir con la ecuación y los puntos que afectan 08, 16 y 12, se refleja nuevamente en normalidad de los datos figura 23 y la última observación de estos mismos valores se reflejan en pero ahora en los siguientes puntos 05, 12 y 16 con esta estimaciones de los intervalos de confianza se pueden eliminar y se marca ajuste del modelo de predicción para su validación presentado la distancia de los valores figura 25.

La comparación de los datos, muestreados en campo del mes de noviembre tienen valores máximos en 8.3, mínimo en 7.79 y los datos generados del modelo predictivo con valores máximo en 8.05, mínimo en 7.71 y el promedio que esta entre la diferencia valores es de 0.27 en el rango de pH ver la figura 27, este comportamiento del parámetro reflejado a su vez en la cartografía predictiva que presenta un porcentaje de predicción de 21.60% los valores entra dentro del rango muestras tomadas en noviembre del 2021, esto indica que se logró predecir y que el modelo puede ser efectivo para el desarrollo de esta metodología.

El histograma del ráster generado para la predicción de conductividad eléctrica (CE), presenta variación en los datos, esto logrando visualizar los rangos con la predicción establecida por la cuarta campaña, los valores van de 0 a 4.0 mS/cm en el inicio y los valores más altos están en 4.0 hasta 12 mS/cm, observar los cambios en la figura 16. La

cartografía generada con este parámetro predictiva con el mes de noviembre con la B04 y B07 del sensor Sentinel-2, se seleccionó la gama de colores de mostaza a morado logrando visualizar que el color de baja intensidad son los 3.23 a 3.86 $\mu\text{mho/cm}$ y con la alta intensidad se observan de 3.86 a $>5.15 \text{ mS/cm}$ en cartografía generada con la metodología, ya expresada el resultado del parámetro CE, se logró predecir valores dentro de los rangos medidos en la cuarta campaña del mes de noviembre 2021.

El análisis del modelo predictivo, con la ecuación de regresión que se generó con este estudio con el cual se creó un gráfico de homocedasticidad donde se trabaja con residuos con la utilidad de la hipótesis de la linealidad y homocedasticidad se conoce la ecuación del modelo evaluando si es adecuado o no, en el caso de la ecuación generada para conductividad eléctrica del mes de noviembre, no se debe observar ninguna tendencia ni comportamiento anómalo con los residuales estandarizados, pero si se observa valores fuera de la línea de media, de los puntos de muestreo presentan dispersos son 1, 6 y 12 son los más pronunciados esto valores se logran ver en la figura 20.

El gráfico de linealidad se realizó para conocer los puntos que afectan la ecuación, la cual no permite que los valores alcancen estar en los rangos medidos los puntos son 26, 12 y 6, ver figura 22. Con la gráfica de normalidad de los valores, también se conocen supuestos, ya que es necesarios para validar la inferencia respecto a los parámetros que se logró predecir con la ecuación y los puntos que afectan 12, 6 y 1, se refleja nuevamente en normalidad de los datos figura 23 y la última observación de estos mismos valores se reflejan en pero ahora en los siguientes puntos 16, 12 y 5 con esta estimaciones de los intervalos de confianza se pueden eliminar y se marca ajuste del modelo de predicción para su validación con el parámetro de CE, que presenta la distancia de los valores figura 27.

La comparación de los datos, muestreados en campo del mes de noviembre tienen valores máximos en 5.11, mínimo en 4.12 mS/cm y los datos generados del modelo predictivo con valores máximo en 3.97, mínimo en 2.82 mS/cm y el promedio que esta entre la diferencia valores es de 1.11 en el rango de CE ver la figura 28, este comportamiento del parámetro reflejado a su vez en la cartografía predictiva que presenta un porcentaje de predicción de 69.50% los valores bajos pero entra dentro del rango de las muestras

tomadas en noviembre del 2021, esto indica que se logró predecir y que el modelo puede ser efectivo para el desarrollo de esta metodología ver figura 28.

Los resultados con el sensor Landsat-8 no se tomó en cuenta ya que con ningún parámetro y valores de reflectancia no presentaron valores significativos para la generar la ecuación multivariable, que ayuda a generar la cartografía predictiva, afectando la evaluación del sensor, se da a indicar que este mismo no es apto o fiable para generar esta metodología a su vez tomar en cuenta la temporada en que se logró desarrollar, ya que esto se puede afectar por la nubosidad que altera o presenta valores bajos la cual logra distorsionar el proceso al generar la metodología no se logró generar todo los procesos afectados por esto mismo. Los resultados con Sentinel-2 si se generó ecuaciones para visualizar la predicción con los parámetros de potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica, con los que no se pudo predecir son con turbidez y clorofila-a, las cuales no presentaron valores significativos, evaluando al sensor si se indica que se puede utilizar para generar este tipo de metodologías ya que con este estudio se trabaja en valorar la utilidad de ambos sensores con esta evaluación el que mejor desarrolla el procesos de este estudio es el sensor Sentinel-2.

Por otra parte, Bryan Andres Moscuíy Ruales, (2021), con el sensor Sentinel-2 encontraron correlaciones Pearson entre la banda B02 y B04 de 0.8137, lo cual indica que presenta una relación perfecta o casi perfecta donde es difícil separar el efecto de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente con un valor de probabilidad de $p= 0.4737$ con el parámetro clorofila-a, en este estudio de investigación se tomó en cuenta este mismo parámetro, pero no presentó ninguna correlación en ninguno de los 2 sensores (Sentinel-2 y Landsat-8), pero si se tuvo presencia las bandas (B02 y B04) en la regresión lineal simple, al realizar el modelo predictivo solo tiene presencia de la B04, a su vez el autor Moscuíy Ruales, (2021).

El Trabajo en la validación de la ecuación de regresión múltiple se utilizando el software R-Studio que mostro los valores de probabilidad de la variable, también en este estudio se valoró, también la prueba F de significancia general, y para la prueba T de significancia individual, para comprobar los supuesto se construyeron gráficos donde se relacionan los valores de reflectancia de las bandas 2 y 4 que fueron consideradas para el modelo final,

con los valores del parámetro estudiados, con el fin de reconocer la tendencia lineal, multicolinealidad, para verificar el supuesto se realizó una matriz de correlación, utilizando las variables explicativas donde se podrá comprobar si existe una multicolinealidad perfecta, utilizando la prueba de heterocedasticidad de Breusch-Pagan, el valor de probabilidad de esta prueba se determinó en el software RStudio, en el estudio de La Laguna de Apoyo donde se trabajó para conocer la utilidad de los sensores remotos se llevó a cabo también procesos donde se reflejó la tendencia de los resultados de cada ecuación de regresión lineal múltiple que se logró establecer para la generación de cartografías predictivas cada comportamiento de la variables están reflejadas en los gráficos (Moscuíy Ruales, 2021).

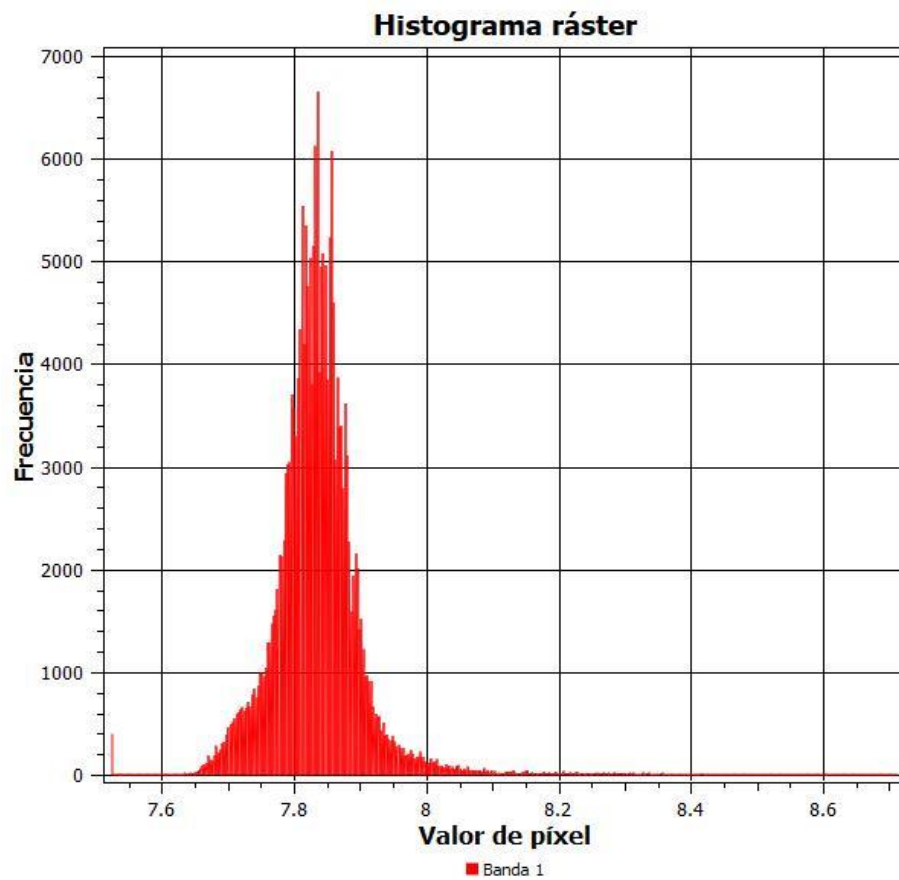


Figura 14. Histograma de raster de predicción de pH

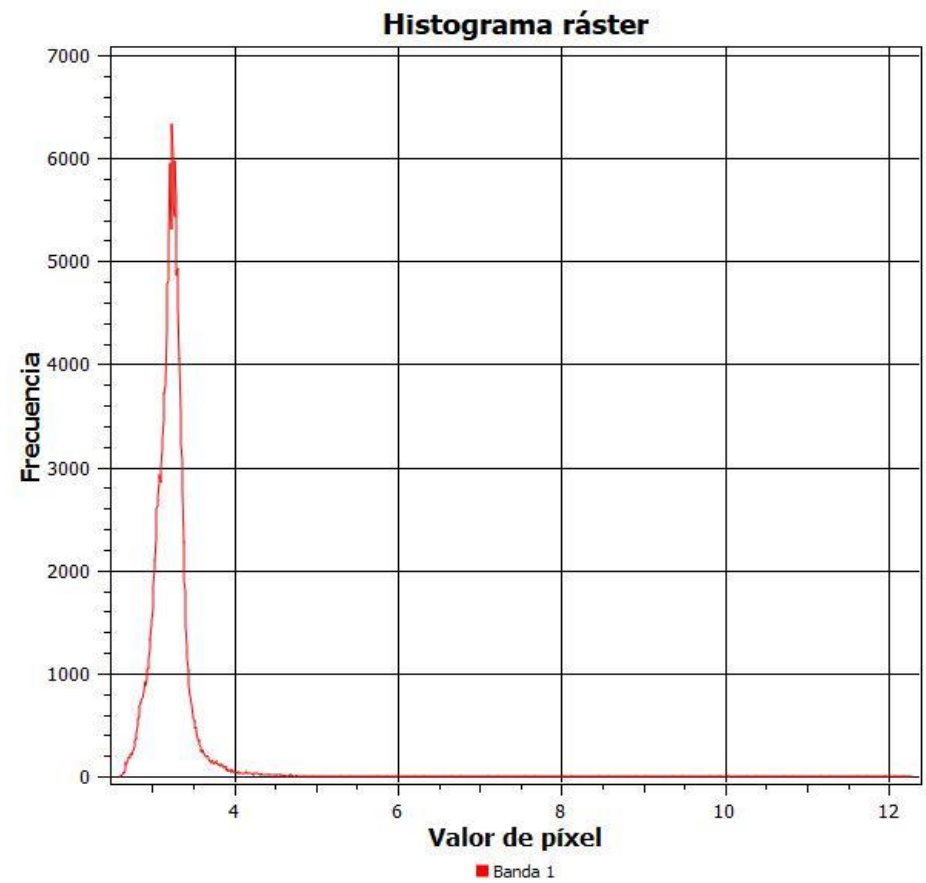


Figura 15. Histograma de raster de predicción de CE

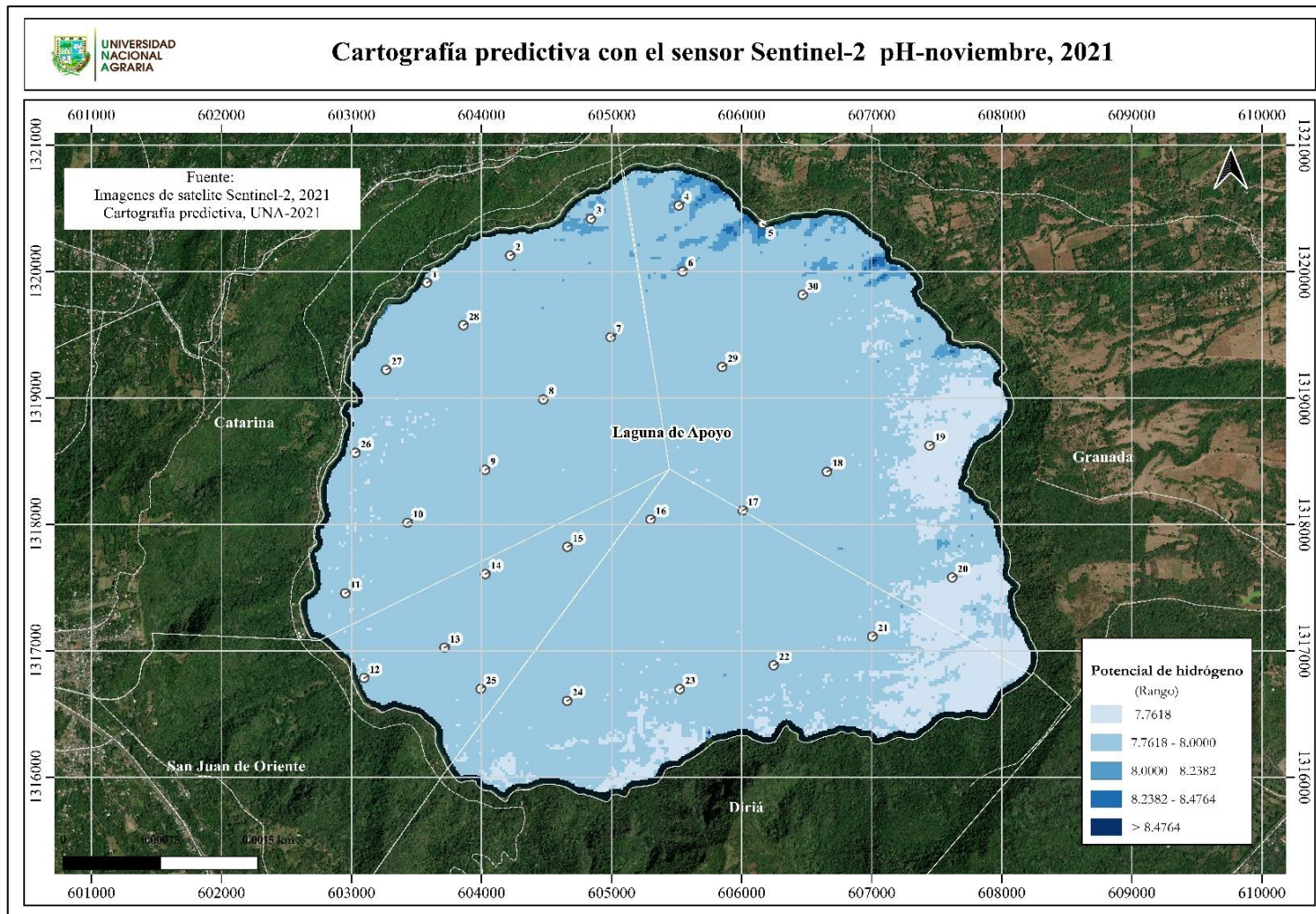


Figura 16. Valores proyectados de pH para noviembre

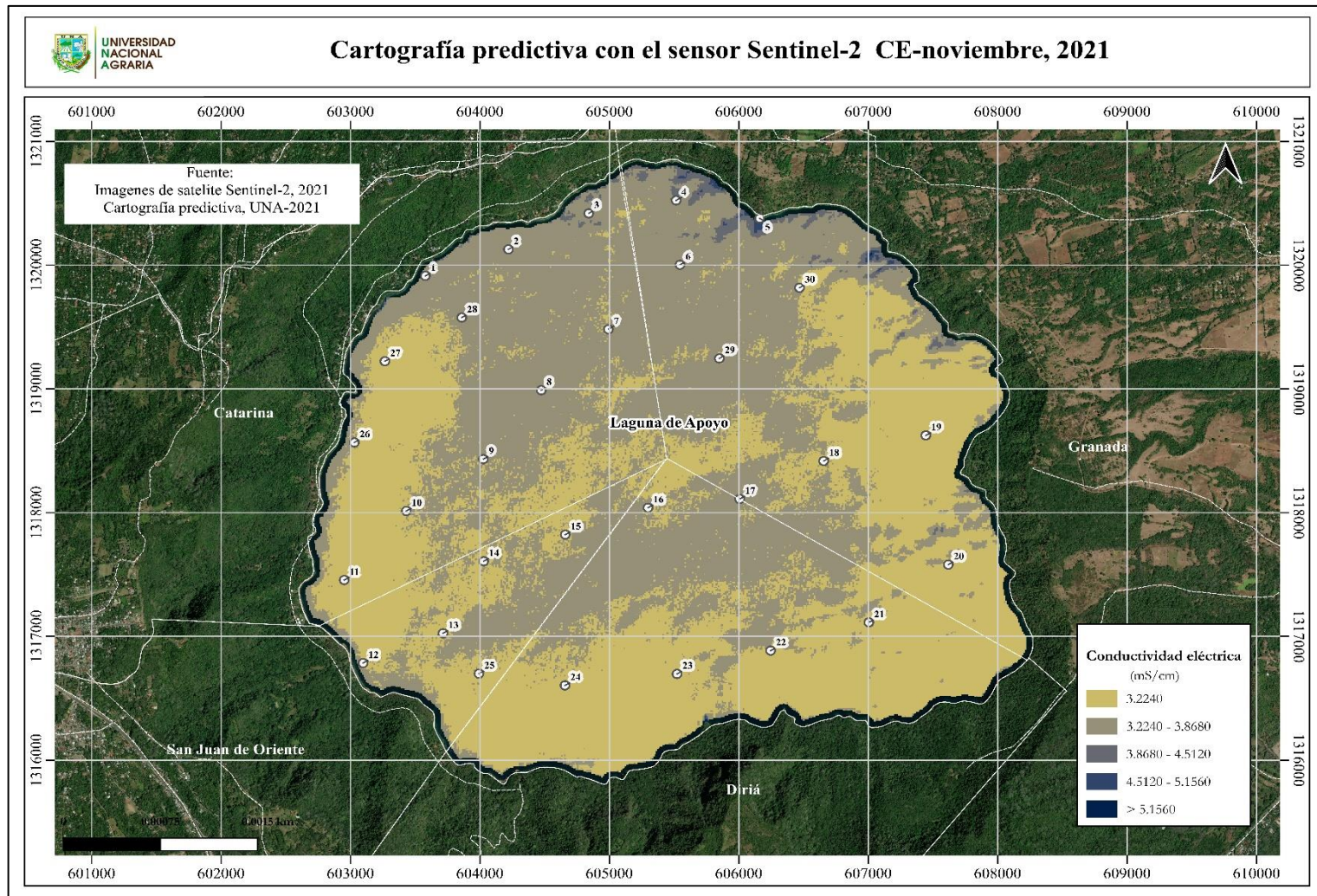


Figura 17. Valores proyectados de CE para noviembre

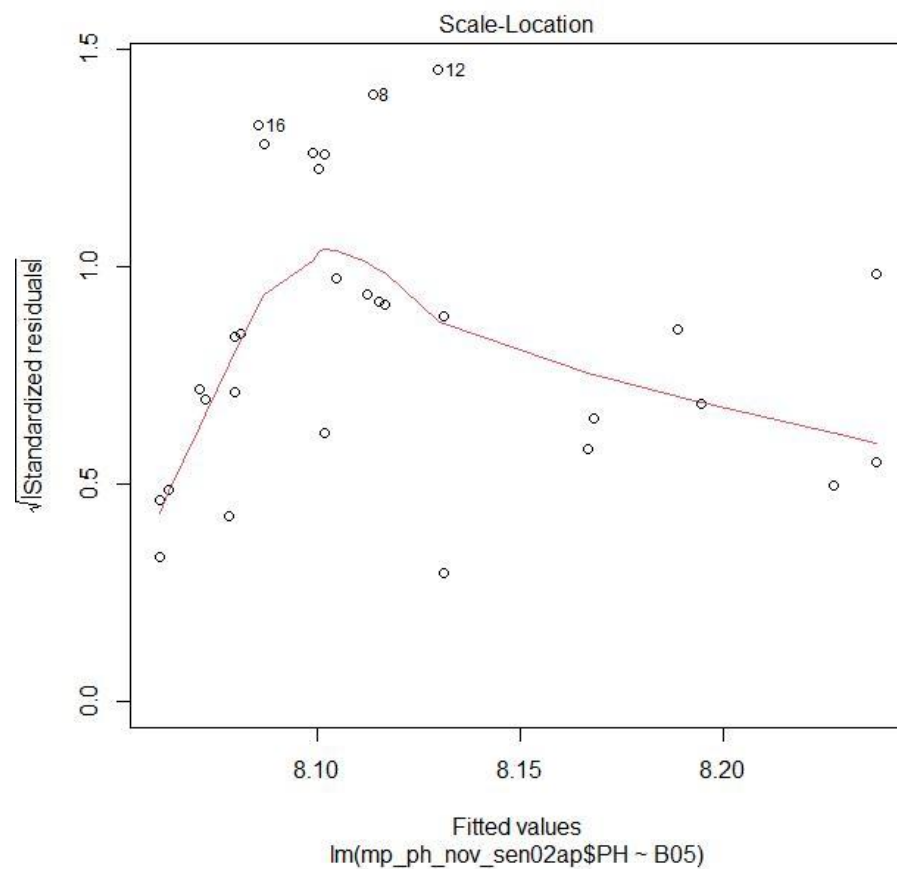


Figura 18. Homocedasticidad pH

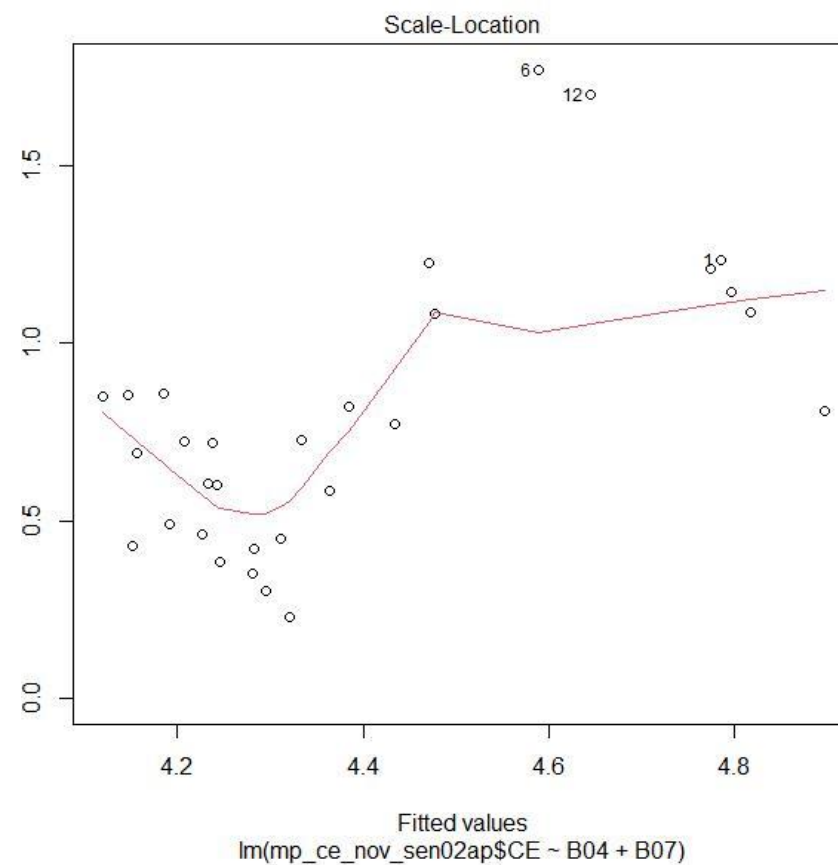


Figura 19. Homocedasticidad CE

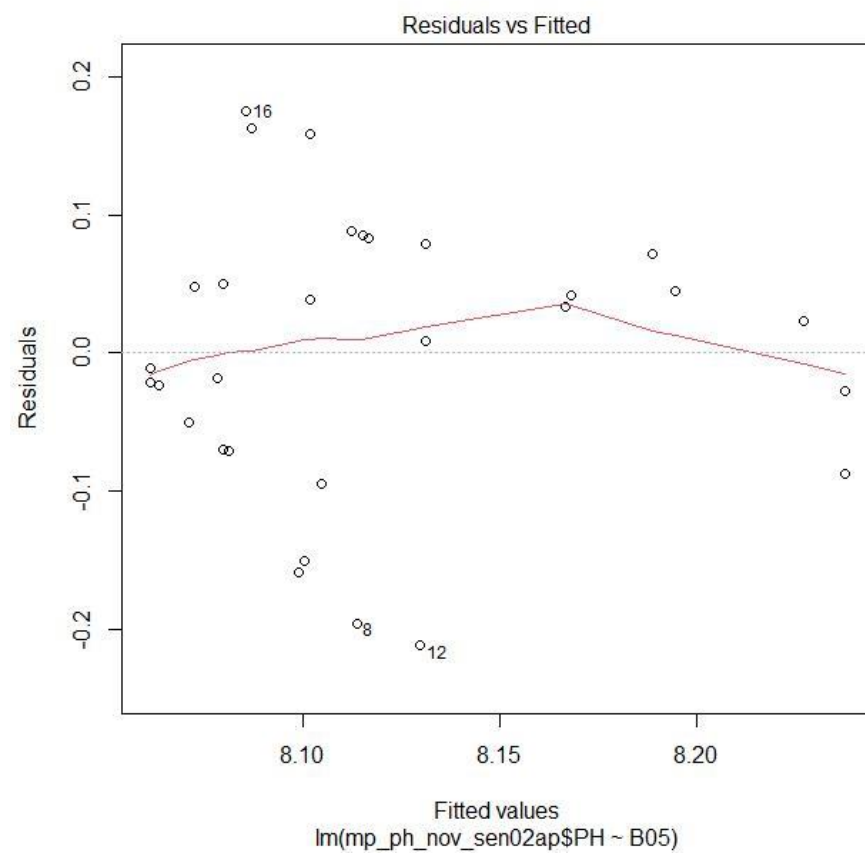


Figura 20. Linealidad pH

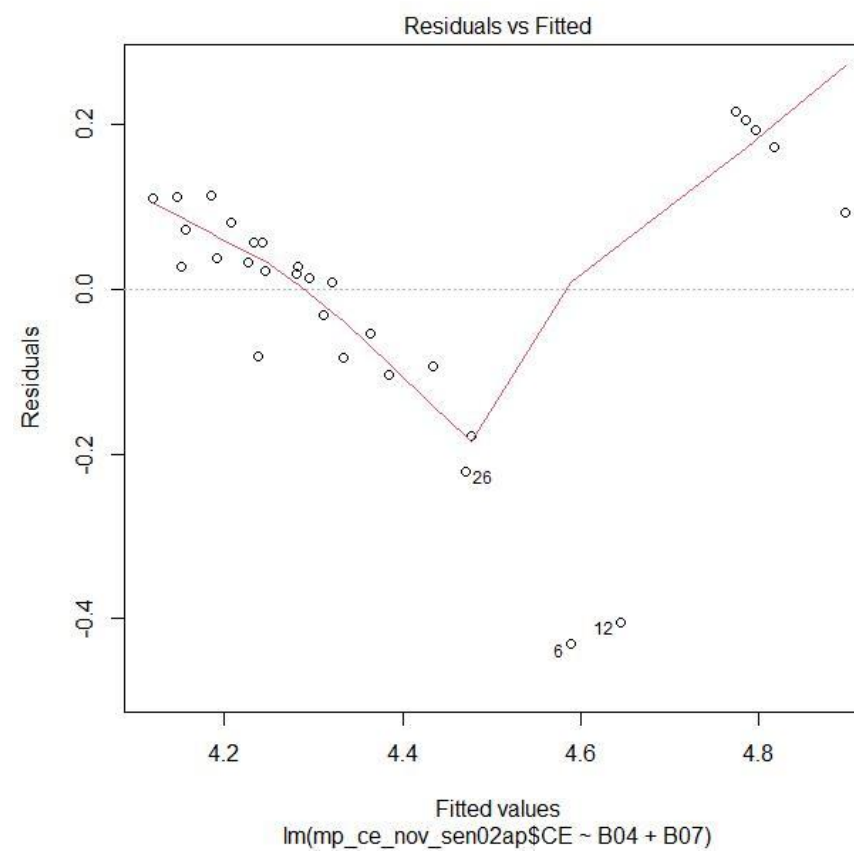


Figura 21. Linealidad CE

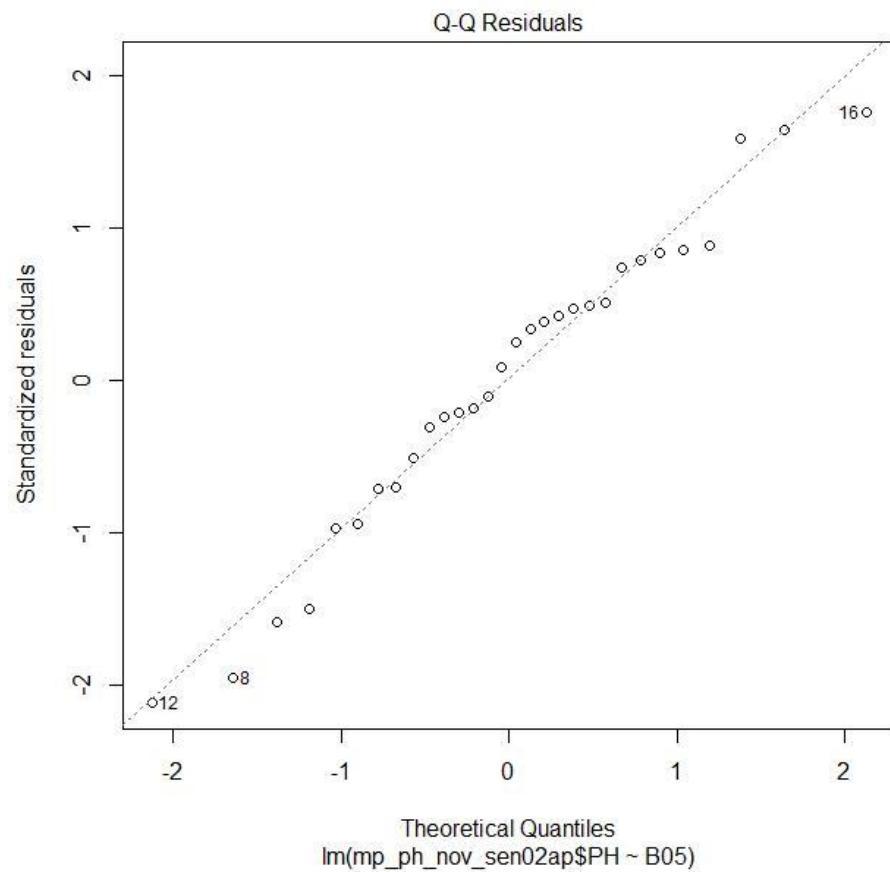


Figura 22. Normalidad de los datos con el parámetro pH

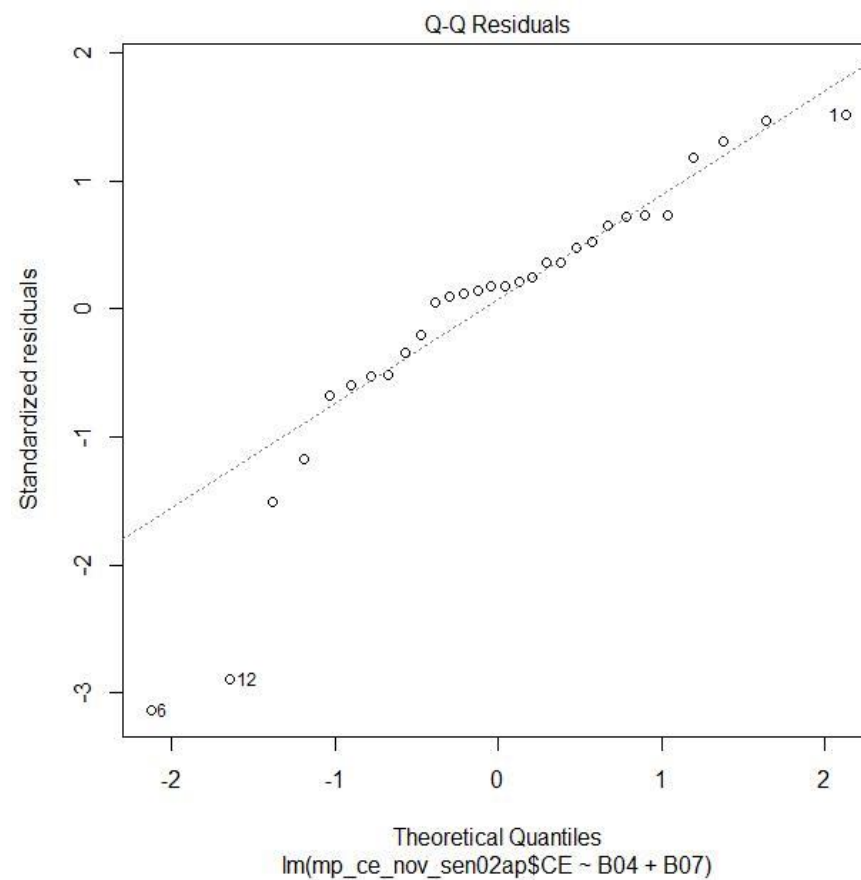


Figura 23. Normalidad de los datos con el parámetro CE

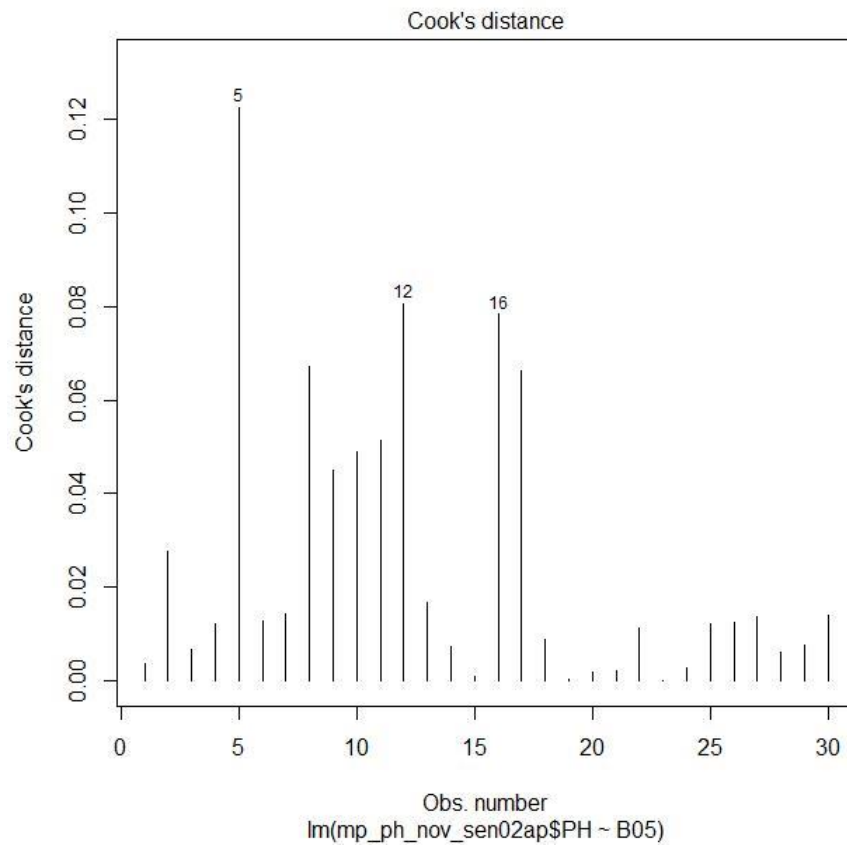


Figura 24. Distancia de los valores de los datos de pH

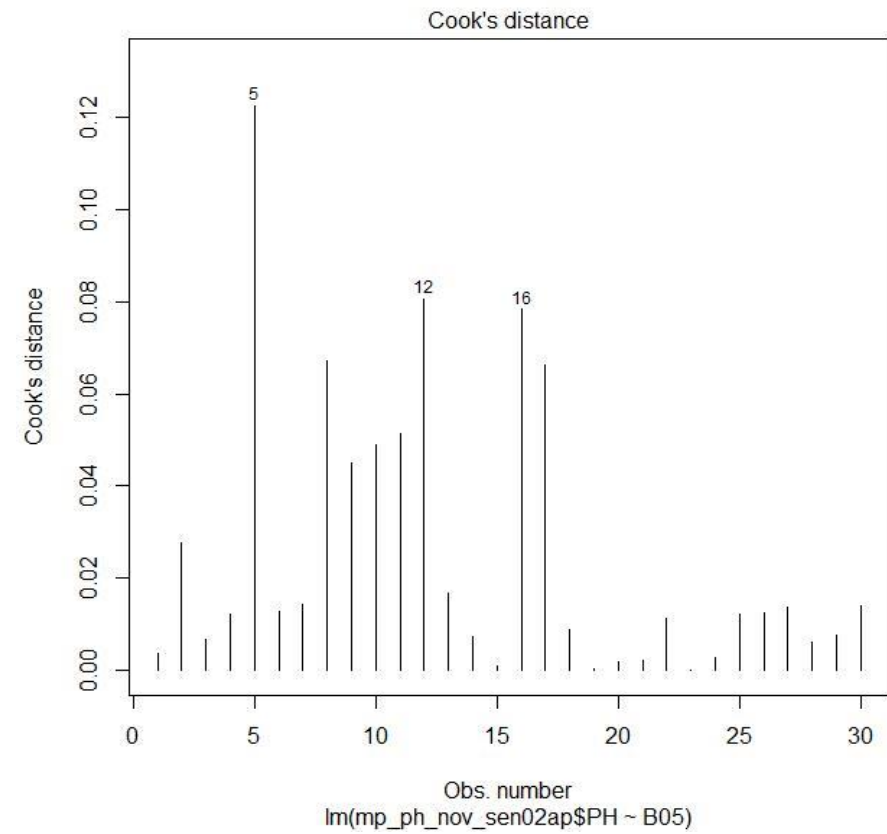


Figura 25. Distancia de los valores de los datos de CE

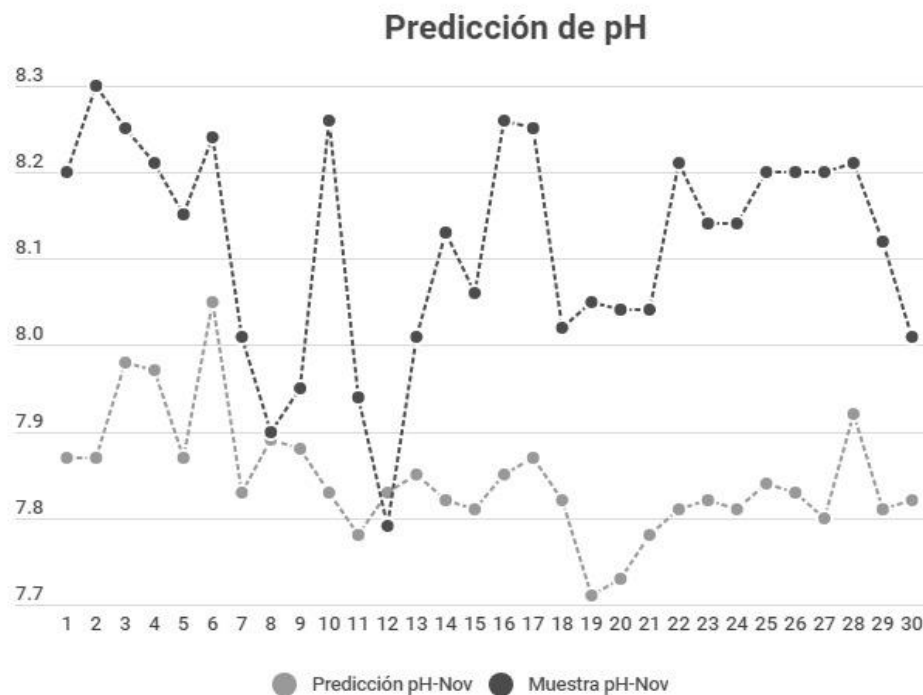


Figura 26. Variación de los datos muestreados con los valores de la cartografía predictiva con pH

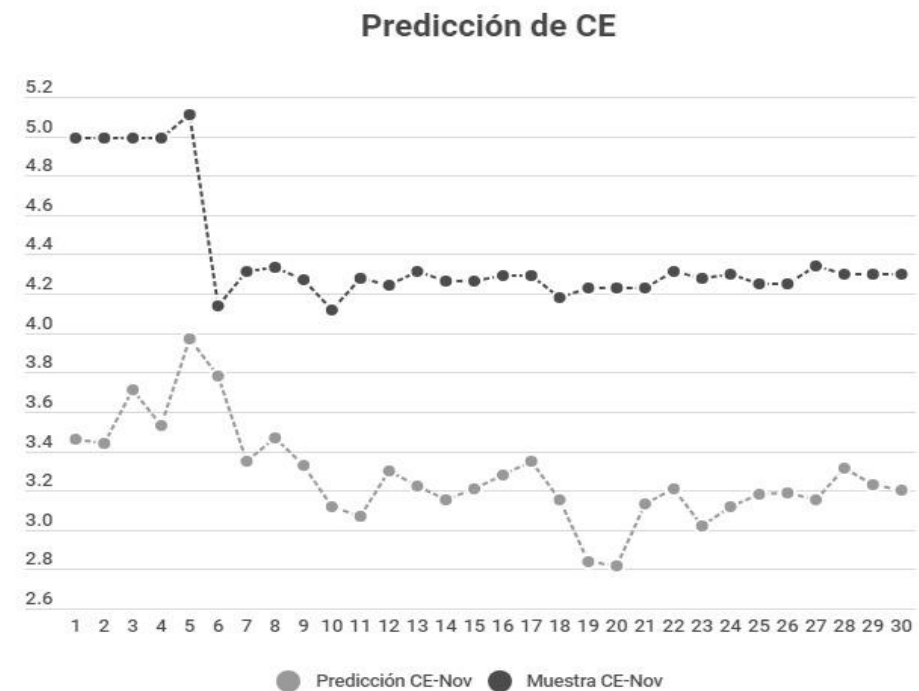


Figura 27. Variación de los datos muestreados con los valores de la cartografía predictiva con CE

CONCLUSIONES

Se concluye en la investigación de la evaluación y utilidad de ambos sensores, Sentinel-2 y Landsat-8 ambos se utilizaron en las cuatro campañas, se analizó las imágenes descargadas, se extrajo los valores de reflectancia, se trabajó con correlaciones y se seleccionó las que cumplen valores significativos esto aportó la selección, para crear el modelo de regresión y cartografía predictiva de los cuatro parámetros medidos, solo dos se desarrolló la metodología para la investigación lo cuales son pH y CE con Turb y Cl- a no presentó correlaciones significativas.

Se realizó el análisis estadístico de los valores espectrales de cada banda de los sensores seleccionados para la investigación, se visualizó la magnitud de correlación de cada banda espectral, con el sensor Landsat-8 las correlaciones de las cuatro campañas, entraron en el rango de insignificante y débil no cumpliendo las normas establecidas para el desarrollo de la metodología, con el sensor Sentinel-2 la magnitud de correlación de cada banda espectral de las cuatro campañas con los parámetros clorofila-a y turbidez entraron en el rango de insignificante y débil indicando que no se utilizaron y con pH y conductividad eléctrica entraron en el rango de moderado y alto con tan solo con noviembre estos parámetros si se utilizaron para los modelos matemáticos de predicción.

La generación de modelos matemáticos de predicción para los parámetros de calidad de agua se tomó en cuenta los que obtuvieron correlaciones moderadas y altas. El modelo únicamente se generó para dos parámetros (pH y CE), con pH presento un porcentaje de predicción del 21.60 % y CE un porcentaje de predicción del 69.50 %. Se generó y se logró interpretar la distribución espacial y temporal para predecir rangos promedios de estos parámetros (pH y CE) de los cuales se investigó los rangos permitidos según normas técnicas para la calidad de agua nacionales e internacionales y se identificó que los valores están por debajo de los permitidos indicando que ninguno afecta el contacto directo o parcial.

La generación de los mapas predictivos de los parámetros de calidad de agua con la ecuación de regresión multivariable, el mejor sensor para predecir en este estudio de

investigación es Sentinel-2 el cual presentó correlaciones significativas para el mes de noviembre, aplicando los métodos estadísticos y la ecuación de regresión, donde se trabajó los cambios de la reflectividad en el agua y la región del espectro visible que corresponde a las bandas B04 y del infrarrojo de onda corta las bandas B05 y B07 estas bandas espectrales aportaron a interpretar la distribución espacial y temporal para predecir rangos promedios de estos parámetros (pH y CE).

RECOMENDACIONES

- Promover investigaciones que logran aportar al análisis espacial tomando en cuenta las dos temporadas del año, así como, para conocer de manera significativa todos los valores para que el modelo facilite el monitoreo de calidad de agua.
- En próximos estudios tomar en cuenta fechas donde no afecte el clima para así tener mejores resultados de predicciones.
- Medir los parámetros en campo para disminuir el tiempo de la investigación para ser más práctico y económico.
- Alargar el tiempo de muestro para realizar más valoraciones estadísticas y obtener valores de correlación altos.

LITERATURA CITADA

- Alboukadel Kassambara (2020). *ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots*. R package version 0.4.0. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Alcaldía Catarina. (2015). *Ficha Municipal*.
- Amado-Alvarez, J., Pérez-Cutillas, P., Alatorre-Cejudo, L. C., Ramírez-Valle, O., Segovia-Ortega, E. F., & Alarcón-Cabañero, J. J. (2019). Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Geográfica de América Central*, 1(62), Article 62. <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.2>
- Andri Signorell et mult. al. (2021). *DescTools: Tools for descriptive statistics*. R package version 0.99.44. <https://CRAN.R-project.org/package=DescTools>
- Argeñal Sandoval, J. (2010). Resolución ministerial No. 001-2010. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/3133c0d121ea3897062568a1005e0f89/afbd6a56fcdee673062576ff00563ebd?OpenDocument>
- Baptiste Auguie (2017). *gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics*. R package version 2.3. <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>
- Barret Schloerke, Di Cook, Joseph Larmarange, Francois Briatte, Moritz Marbach, Edwin Thoen, Amos Elberg and Jason Crowley (2021). *GGally: Extension to 'ggplot2'*. R package version 2.1.2. <https://CRAN.R-project.org/package=GGally>
- Biblioteca Nacional de Chile. (2016). *Calidad de Agua*.
- Briceño, I., Pérez, W., San Miguel, D., & Ramos, S. (2018). Determinación de calidad de agua en el Lago Vichuquén, con imágenes de satélite Landsat 8, sensor OLI, año 2016, Chile. *Revista de Teledetección*, 52, 67. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.10126>
- Casal, G., Kutser, T., Domínguez-Gómez, J. A., Sánchez-Carnero, N., & Freire, J. (2013). Assessment of the hyperspectral sensor CASI-2 for macroalgal discrimination on the Ría de Vigo coast (NW Spain) using field spectroscopy and modelled spectral libraries. *Continental Shelf Research*, 55, 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.01.010>
- Chaura, D. A. V. (2022). *Ráster con R. Ráster con R*. https://www.academia.edu/70320964/R%C3%A1ster_con_R
- Chuvienco, E. (2017). *Teledetección, S.I.G. y Cambio Global*. *Geographicalia*, 29, 33. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1992291833
- CIRA/UNAN-Managua. (2022). *Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos de Nicaragua CIRA*. CIRA/UNAN-Managua. <https://cira.unan.edu.ni/>

- Contreras, F. (1994). *La clorofila a como base para un índice trófico en lagunas costeras Mexicanas*. <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1994-1-2/articulo438.html>
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdu, A., Pereira-Sandoval, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., Verrelst, J., Peña Peña, R., Urrego, E., Borràs, J., Sanchis Muñoz, J., Pezzola, A., Mosquera, Z., Quinto, Z., Gómez, J., & Moreno, J. (2016). *Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales*.
- Descripción general de la infraestructura | copérnico. (2021). <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/infrastructure-overview>
- Dianelys Ondarse Álvarez, D. (2021, julio 15). *PH - Concepto, escala de medidas, cómo se mide y ejemplos*. Concepto. <https://concepto.de/ph/>
- Discovski Riobóo, L. M. (2017). *Coeficiente Correlación*.
- Emilio Chuvieco Salinero. 2019. *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ed. Digital Reasons. ISBN: 978-84-120315-4-6. 595 pág. Disponible en CENIDA-UNA.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua*. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA - FAO Roma. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>
- Fraile, H. (1995). *Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cernadilla y Valparaíso (río Tera, Zamora)*. *Limnetica*, 11(2), 29-37. <https://doi.org/10.23818/limn.11.11>
- FUNDENIC-SOS, F. N. para el D. S. (1991). *Evaluación y Redefinición del Sistema de Áreas Protegidas Laguna de Apoyo de las Regiones Pacífico y Centro Norte de Nicaragua*. 15.
- García, M. G. Q. (2021). *Tesis para optar el grado de magister scientiae en ecología aplicada*.
- Gómez, J. (2003). *Estudio de la calidad del agua de lagunas de gravera mediante teledetección*.
- Guía de usuario de QGIS documentación de QGIS Documentation -. (2021). http://qgis.org/3.28/es/docs/user_manual/index.html
- H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016.
- Hadley Wickham and Jennifer Bryan (2019). *readxl: Read Excel Files*. R package version 1.3.1. <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>
- Herrera, M. (2019). *MONITOREO DE LA CALIDAD DE AGUA DEL LAGO JUNÍN MENDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL*.

<https://www.linkedin.com/pulse/monitoreo-de-la-calidad-agua-del-lago-jun%C3%ADn-mediante-marco-herrera/?originalSubdomain=es>

Hlavac, Marek (2022). *stargazer: Well-Formatted Regression and Summary Statistics Tables*. Rpackage version 5.2.3. <https://CRAN.R-project.org/package=stargazer>

Huicho, J. A. B. (2019). *Análisis espacio-temporal del comportamiento de la clorofila a mediante imágenes satelitales en la represa aguada blanca para el año 2017*.

Ingenierizando. (2022, julio 19). *Turbidez: Significado, unidades, causas, consecuencias...* Ingenierizando. <https://www.ingenierizando.com/conceptos/turbidez/>

Instituto Nacional del Agua (INA). (2022). *Del campo al satélite: Monitorear la calidad del agua por imagen geoespacial*. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/noticias/del-campo-al-satelite-monitorear-la-calidad-del-agua-por-imagen-geoespacial>

Invitaciones a Licitación de unidades C y D de Sentinels -1, -2 y -3 | copérnico. (2021). <https://www.copernicus.eu/en/invitations-tender-c-and-d-units-sentinels-1-2-and-3>

Landsat 8 | Ciencia Landsat. (2021, noviembre 30). <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

López López, W. J. de los Á. (2021). *Evaluación de la utilidad del sensor Sentinel-2 para la cartografía de cinco parámetros físicos-químicos de calidad de agua en la Laguna de Moyúa, Ciudad Darío, Matagalpa, febrero y julio 2020*.

López-Montecinos, C. (2019). *Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>

Makowski, D., Ben-Shachar, M. S., Patil, I., & Lüdtke, D. (2019). *Methods and Algorithms for Correlation Analysis in R*. *Journal of Open Source Software*, 5(51), 2306. doi:10.21105/joss.02306

Maragall, J. (2016). *Determinación de la turbidez*. 5.

Martínez García, I. (2017). *Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota (Water Quality monitoring in impoundments by means of remote observation technics)*.

Matas Palou, J. (2000). *Libro blanco del agua en España (Centro de Publicaciones Secretaría general Técnica Ministerio de Medio Ambi)*.

Matus Hernandez, M. A. (2019). *Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales (Orientación en Biotecnología)*.


Mehta, A., McCartney, S., & Torrez Perez, J. (2021). *Monitoreo de la Calidad de Aguas Costeras y Estuarinas Usando Datos de Teledetección e In Situ*.

- Mendoza Chichipe, M. E. (2018). *Estimación de carbono en plantaciones de Pinus patula mediante el análisis espectral de una imagen satelital sentinel-2, distrito de Luya Viejo, Amazonas*, 2018.
- Molina Garcia, J. (2022). *Técnicas de teledetección aplicadas al estudio de lagunas de Castilla La-Mancha a lo largo de una serie temporal*.
- Morán, M. (2018). Agua y saneamiento. Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- Moscuíy Ruales, B. A. (2021). *Aplicación de la Teledetección Satelital como herramienta para la determinación del estado trófico de la Laguna de Yambo*.
- NORMA Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 29001, (2012). <http://www.copresam.gob.gt/wp-content/uploads/2021/01/Norma-Tecnica-Guatemalteca-NTG29001.pdf>
- Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense No. 05-007-98 [con fuerza de ley]. Norma para la clasificación de los recursos hídricos. 11 de febrero del 2000. D.O. No. 30. [http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/\(\\$All\)/1A3A99B77290B980062573DF00594022?OpenDocument](http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/($All)/1A3A99B77290B980062573DF00594022?OpenDocument)
- OMS. (1998). Volumen 3 Vigilancia y control de los abastecimientos de agua a la comunidad.
- Organización Mundial de la Salud. (1998). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>
- Peralta, J. (2021). *LIBS en líquidos acústicamente levitados: Optimización de parámetros experimentales*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26311.42403>
- Preámbulo—Documentación de QGIS Documentation -. (2020). https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/training_manual/foreword/foreword.html#why-qgis
- QGIS Association. (Julio, 2002). QGIS Geographic Information System. <http://www.qgis.org>.
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Restrepo, G. C., Fuentes, H. C., Ruíz, R. M., & Aguirre, N. (s. f.). *Monitoreo del sistema de lagunas de estabilización del municipio de Santa Fé de Antioquia, Colombia*.
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, vol. 20, núm. 2, abril-junio, 2007. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295023034010>

- Robert J. Hijmans (2023). *raster: Geographic Data Analysis and Modeling*. R package version 3.6-20. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Ruiz, D. C. R. (2020). *Estimación de parámetros de calidad de agua en la Laguna Santa Elena usando imágenes satelitales*.
- Sánchez Martínez, D. V. (2017). *Calidad del agua* / Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/atotonilco/article/view/2202>
- Sánchez Martínez, D. V. (2017). *Calidad del agua*. Boletín Científico de la Escuela Superior Atotonilco de Tula, 4(7), Article 7. <https://doi.org/10.29057/esat.v4i7.2202>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). *Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation*. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Segura Maidana, C. (2015). *Folleto Informativo Turbidez*. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3150sp.pdf
- Sobre Copérnico | copérnico. (s.f.). Recuperado 25 de marzo de 2023, de <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- Truque, P. A. (2021). *Armonización de los estándares de agua potable en las Américas*. Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. pringer, New York. ISBN 0-387-95457-0

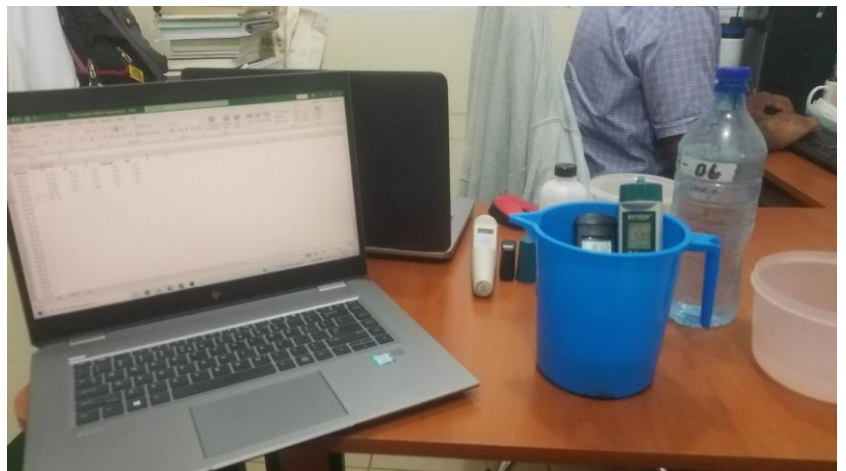
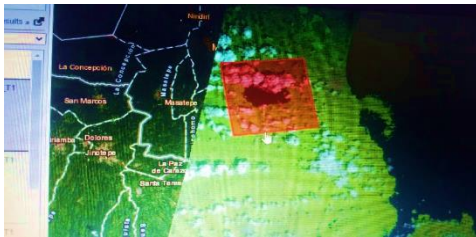
ANEXOS

Anexo 1. Descripción de Multiparamétrico

<i>Multiparamétrico</i>	
<p><i>Medidor digital de: conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos, Salinidad y pH, marca Extech Exstik II, de autocompensación de temperatura 2% por °C (EC500).</i></p> <p><i>Características: Mide 5 parámetros, incluidos conductividad, STD (sólidos totales disueltos), salinidad, pH y temperatura utilizando un electrodo. 9 unidades de medida: pH, $\mu\text{S}/\text{cm}$, mS/cm, ppm, ppt, mg/L, g/L, °C, °F.</i></p> <p><i>El gráfico de barra analógico indica las tendencias. La memoria almacena hasta 25 lecturas etiquetadas. Relación de conductividad a STD (sólidos totales disueltos) ajustable de 0,4 a 1,0; relación de salinidad de 0,5 no ajustable.</i></p>	 A vertical, green and white Extech Exstik II multiparameter probe. The device has a digital LCD screen at the top showing '14.13' and '22.5'. Below the screen are several buttons and indicators, including a 'HOLD' button and a 'CAL' button. The probe is labeled 'EXTECH' and 'Exstik II'.

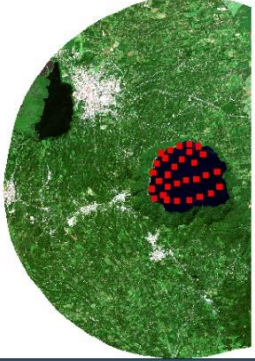
Anexo 2. Etapas del proceso de investigacion



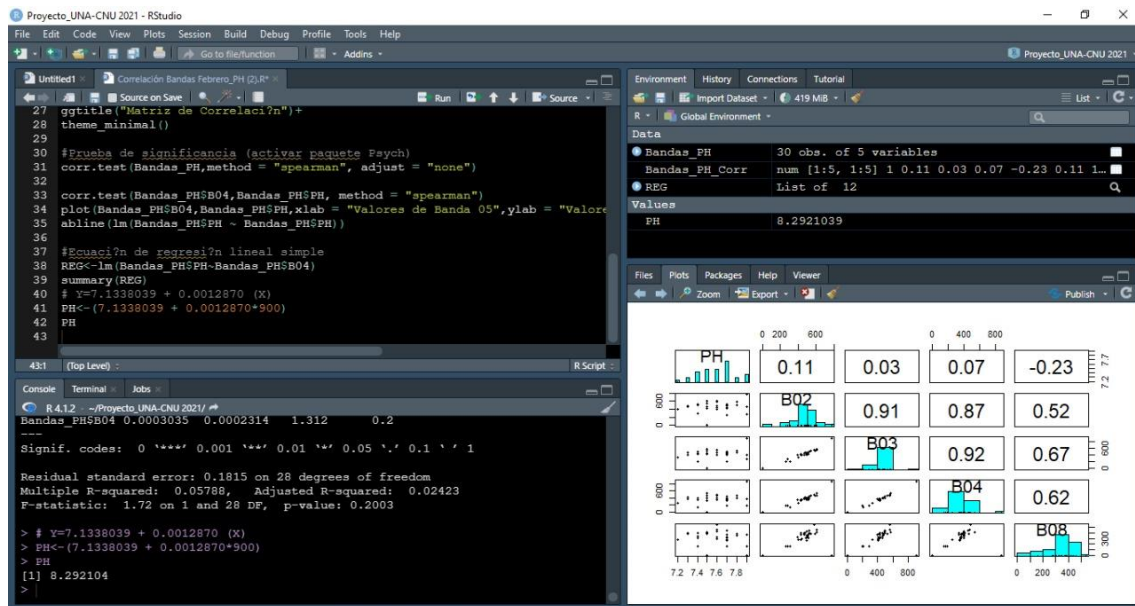


```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Agosto.R* Septiembre.R* Octubre.R* Noviembre.R*
Source on Save Run Go to file/function Addins
170 name <- shp_Apoyo@data$name
171
172 # Crear un data frame con los datos exportados y el ID
173 tabla_nov10m <- data.frame(name, Extract_nov10m)
174 tabla_nov20m <- data.frame(name, Extract_nov20m)
175 tabla_nov10m1 <- data.frame(name, Extract_nov10m1)
176 tabla_nov20m2 <- data.frame(name, Extract_nov20m2)
177
178 write.csv2(tabla_nov10m, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre10m_pcu.CSV')
179 write.csv2(tabla_nov20m, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre20m_pcu.CSV')
180 write.csv2(tabla_nov10m1, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre10m1_pfu.CSV')
181 write.csv2(tabla_nov20m2, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre20m2_pfu.CSV')
182
183 ##### Tratamiento de tablas #####
184
185 str(tabla_nov10m$T16PEU_20210806T155911_B04_10m)
186
1831 Tratamiento de tablas : R Script
Console Terminal Jobs
R 4.1.2 C:\UNA_CNU_2021\shp_apoyo\ 83
> # Seleccionar la columna name de la tabla de atributo
> name <- shp_Apoyo@data$name
> # Crear un data frame con los datos exportados y el ID
> tabla_nov10m <- data.frame(name, Extract_nov10m)
> tabla_nov20m <- data.frame(name, Extract_nov20m)
> tabla_nov10m1 <- data.frame(name, Extract_nov10m1)
> tabla_nov20m2 <- data.frame(name, Extract_nov20m2)
> write.csv2(tabla_nov10m, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre10m_pcu.CSV')
> write.csv2(tabla_nov20m, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre20m_pcu.CSV')
> write.csv2(tabla_nov10m1, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre10m1_pfu.CSV')
> write.csv2(tabla_nov20m2, file = 'S2A_Reflectancia_noviembre20m2_pfu.CSV')
>

Environment History Connections Tutorial
R Global Environment
tabla_nov10m 30 obs. of 9 variables
tabla_nov10m1 30 obs. of 9 variables
tabla_nov20m 30 obs. of 13 variables
tabla_nov20m2 30 obs. of 13 variables
Files Plots Packages Help Viewer
Zoom Export Publish


```

Las etapas de la investigación comprenden el, levantamiento de datos en campos y análisis de laboratorio, descargas de imágenes de satélite y preprocesamiento, análisis estadístico de los datos y, por último, redacción de informe técnico.

Anexo 3. Análisis de Datos

N°	Coordenadas		31/08/2021				30/09/2021				21/10/2021				17/11/2021			
	X	Y	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb
1	605950	1320543	7,9	5,4	2,76	2,05	8,90	4,82	0,39	0,90	8,20	4,99	0,30	3,00	8,34	5,16	0,30	0,50
2	605041	1320571	7,9	5,42	0,99	2,95	8,80	4,82	0,39	0,45	8,30	4,99	0,30	3,25	8,25	5,08	0,20	0,40
3	604252	1320231	7,9	5,41	0,89	0,95	8,25	4,96	0,39	0,45	8,25	4,99	0,20	1,30	8,31	5,07	0,39	0,40
4	603613	1319824	7,6	5,34	0,89	2,00	8,31	5,30	0,39	0,65	8,21	4,99	0,30	1,50	8,25	5,06	0,49	0,50
5	603153	1319254	7,5	5,38	0,99	0,45	8,05	5,11	0,30	0,50	8,15	5,11	0,30	2,00	8,23	5,03	0,59	0,30
6	602997	1318924	7,6	5,41	0,79	4,00	8,24	4,14	0,49	0,40	8,24	4,14	0,20	3,15	8,22	5,16	0,39	0,30
7	602881	1318123	7,5	5,39	0,89	1,25	8,01	4,31	0,30	0,50	8,01	4,31	0,39	3,45	8,30	5,08	0,49	0,40
8	602815	1317249	7,6	5,39	1,18	0,45	7,90	4,33	0,39	0,50	7,90	4,33	0,39	0,85	8,31	5,05	0,39	0,30
9	603295	1316764	7,7	5,40	0,69	0,55	7,95	4,27	0,39	0,30	7,95	4,27	0,39	3,85	8,20	5,03	0,59	0,35
10	603992	1317293	7,4	5,38	0,79	0,35	8,26	4,12	0,30	0,40	8,26	4,12	0,39	3,05	8,29	5,04	0,39	0,30
11	604531	1317711	7,7	5,42	0,69	0,55	7,94	4,28	0,30	0,40	7,94	4,28	0,59	0,45	8,34	5,15	0,49	0,60
12	605129	1318172	7,2	5,42	0,69	0,50	7,79	4,24	0,39	0,40	7,79	4,24	0,39	1,15	8,30	5,14	0,59	0,20
13	605699	1318456	7,4	5,41	0,49	0,40	8,01	4,31	0,49	0,75	8,01	4,31	0,39	2,35	8,26	5,08	0,39	0,30
14	606401	1318792	7,4	5,43	0,69	0,95	8,13	4,30	0,39	0,30	8,13	4,26	0,30	2,15	8,33	5,06	0,59	0,20
15	607092	1319114	7,6	5,41	0,79	0,40	8,06	4,26	0,39	0,40	8,06	4,26	0,20	3,05	8,30	5,08	0,49	0,20
16	607863	1319143	7,3	5,45	0,69	2,45	8,26	4,28	0,59	0,20	8,26	4,29	0,33	0,60	8,31	5,07	0,39	0,20
17	607890	1318715	7,3	5,47	0,89	2,02	8,25	4,29	0,49	0,30	8,25	4,29	0,20	0,65	8,29	5,05	0,49	0,20
18	607610	1318321	7,7	5,46	0,79	0,60	8,02	4,18	0,30	0,40	8,02	4,18	0,39	4,15	8,30	5,04	0,39	0,20
19	607157	1317726	7,4	5,39	0,69	0,85	8,05	4,27	0,49	0,40	8,05	4,23	0,39	4,35	8,20	5,01	0,30	0,33
20	606598	1317060	7,5	5,41	0,69	0,95	8,04	4,34	0,20	0,30	8,04	4,23	0,30	2,05	8,22	5,07	0,30	0,20
21	605744	1316364	7,8	5,37	1,28	4,00	7,99	4,23	0,39	0,35	8,04	4,23	0,39	0,55	8,28	5,06	0,30	0,30
22	605016	1316157	7,6	5,43	0,89	2,25	8,21	4,31	0,39	0,40	8,21	4,31	0,39	3,15	8,22	5,04	0,49	0,75
23	604218	1316329	7,7	5,45	0,79	0,80	7,95	4,28	0,30	0,30	8,14	4,28	0,49	4,00	8,22	5,05	0,39	0,20
24	603609	1316557	7,8	5,35	0,89	0,40	8,14	4,30	0,30	0,40	8,14	4,30	0,59	4,00	8,20	5,03	0,30	0,20

Anexo 3. Continuación...

N°	Coordenadas		31/08/2021				30/09/2021				21/10/2021				17/11/2021			
	X	Y	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb	pH	CE	Cl-a	Turb
25	603012	1316997	7,7	5,41	0,79	0,55	8,05	4,31	0,39	0,40	8,20	4,25	0,30	1,35	8,24	5,05	0,49	0,80
26	603488	1317524	7,7	5,44	0,89	2,05	8,12	4,26	0,39	0,40	8,20	4,25	0,39	2,15	8,20	5,00	0,49	0,30
27	603804	1318234	7,7	5,37	0,99	2,00	8,10	4,34	0,20	0,30	8,20	4,34	0,30	2,05	8,27	5,08	0,20	0,15
28	604324	1318798	7,7	5,40	0,49	1,15	8,11	4,34	0,30	0,40	8,21	4,30	0,39	2,35	8,32	5,04	0,30	0,30
29	604830	1319345	7,5	5,30	0,89	0,45	8,13	4,31	0,39	0,50	8,12	4,30	0,36	4,25	8,21	5,03	0,49	0,30
30	605341	1319785	7,5	5,40	0,59	1,00	8,01	4,30	0,49	0,50	8,01	4,30	0,30	0,45	8,28	5,03	0,39	0,20