



**Por un Desarrollo
Agrario Integral
y Sostenible**

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

Trabajo de Tesis

**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**

Autor

Br. Whitney Javiera de los Ángeles López López

Asesores

**Ing. Alex Martin Castellón Meyrat
Mp. Mario César Gutiérrez Alarcón
Ing. Luis Tercero Montenegro**

Managua, Nicaragua

Marzo, 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE

Trabajo de Tesis

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

Autor

Br. Whitney Javiera de los Ángeles López López

Asesores

Ing. Alex Martín Castellón Meyrat
Mp. Mario César Gutiérrez Alarcón
Ing. Luis Tercero Montenegro

Presentado a la consideración del honorable comité evaluador como requisito final para optar al título de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Managua, Nicaragua
Marzo, 2021

El presente trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable tribunal examinador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Medio Ambiente, como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERIA EN RECURSOS NATURALES
RENOVABLES

Miembros del tribunal examinador

Ing. Claudio González Espino
Presidente

MSc. Raquel Dolores Izabá Ruíz
Secretaría

Msc. Andrés Agustín López
Vocal

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

DEDICATORIA

La culminación de esta etapa de mi vida la dedico en primer lugar a nuestro Dios, nuestro padre celestial todo poderoso, quien me ha dado la vida, me ha permitido llegar hasta esta etapa, protegiéndome en todo momento, dándome sabiduría y fortaleza para lograr cumplir mis metas. Doy las gracias a nuestro Dios por darme la familia maravillosa que tengo, por permitirme estar al lado de ellos, por tenerlos en mi vida.

A mis padres, Cesar Javier García, Tania Alejandra López Pérez quienes, con sus esfuerzos diarios, sus consejos, su guía, con su amor de padres y su comprensión me han apoyado en todo momento de mi vida y me han guiado a ser una persona de bien.

A mi tía cristina que siempre estuvo para mi cuidándome, apoyándome cuando la necesitaba que nunca me dejo sola. A mis abuelos Irvin Javier López, Aura Lily Pérez; ya que gozo de la satisfacción de tenerlos a mi lado, dándome consejos, apoyo y motivación, para seguir adelante cumpliendo mis metas.

A mis tías que siempre han estado conmigo aconsejándome, dándome sus palabras de aliento y motivación. A cada una de las personas que han estado presentes en mi vida y han hecho uno u otra cosa por apoyarme a seguir adelante, enfrentando cualquier impedimento que se interponga.

AGRADECIMIENTO

Al concluir mi carrera universitaria con el trabajo de tesis quiero agradecer principalmente a nuestro Dios por darme la oportunidad de culminar mis estudios y concluir este trabajo investigativo. Por regalarme el don de la vida, salud para seguir con mis sueños y metas, darme sabiduría, fortaleza en los momentos difíciles. También por ponerme a personas muy especiales en mi vida por hacerme feliz, cuidarme y protegerme día a día.

A mis padres, familiares que con sus esfuerzos y ayuda me han apoyado en todo lo que ha estado a su alcance para poder culminar esta etapa importante en mi vida como son los estudios universitarios. A mi mamá Tania Alejandra primeramente por haberme dado la vida ya que siendo muy joven decidió luchar para darme lo mejor aguantando sacrificios y humillaciones, jamás me dejó desamparada a pesar de mis malacrianzas, gracias a ella hoy en día soy una profesional, le agradezco sus regaños porque sé que lo hacía por mi bien.

A mi segunda madre mi tía cristina que me cuidaba desde pequeña, ya que mi mamá se encontraba trabajando, le agradezco su cariño, comprensión y paciencia, ella es la única tía que ha acarreado con todos sus sobrinos, jamás nos ha dejado solos, siempre hemos contado con su amor, cariño incondicional, consejos, pero sobre todo sus palabras de aliento cuando enfrentaba una dificultad. A mi padre Cesar Javier García por haber apoyado a mi mamá con mis estudios, desde que se casó con mi mamá tomó el papel de padre y nos ha ayudado a salir adelante.

A mis abuelos Irvin Javier y Aura Lily por haberme apoyado incondicional durante estos años, me ayudaron y aconsejaron siempre confiaron en mí jamás me desampararon. A mis tías, Scarleth, Mireya, Eneyda por haberme ayudado cuando las buscaba y apoyaban en lo que podían. A mis tutores Alex Castellón, Mario Gutiérrez Alarcón, Luis Tercero Montenegro por haberme dado la oportunidad, de realizar esta investigación, depositando su confianza en mí, alentándome cuando no me creía capaz de terminar esta investigación, cuando tenía miedo de fallarles me dieron su apoyo incondicional, paciencia, comprensión, compartieron sus conocimientos, tiempo ayudándome a solucionar los obstáculos que se presentaron.

INDICE DE CONTENIDO

SECCION	PAGINA
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
INDICE DE CONTENIDO	iii
INDICE DE CUADRO.....	v
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE ANEXOS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
III. MARCO DE REFERENCIA.....	4
3.2. Calidad del agua.....	5
3.3. Sensores remotos	7
3.4. Comportamiento del agua en las regiones del espectro electromagnético	7
3.5. Imágenes satelitales.....	7
3.6. Procesamiento digital de imágenes	8
3.7. Método de corrección basado en la imagen.....	8
3.8. Sensor del satélite Sentinel-2A.....	9
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4.1 Ubicación del área de estudio.....	10
4.2. Descripción Biofísica	11

4.2.1. Clima	11
4.2.2. Suelo	11
4.2.3. Ecosistemas	12
4.3. Proceso Metodológico	15
4.3.1. Parámetros de calidad de agua evaluados.....	15
4.3.2. Adquisición de Imágenes.....	15
4.3.3. Análisis de correlación de los datos	17
4.3.4. Cartografía de los parámetros físico-químicos a partir del modelo de regresión lineal simple	21
V. RESULTADO Y DISCUSIÓN	22
5.1. Prueba de normalidad de los datos	23
5.2. Dispersión de los valores de los parámetros de calidad de agua y de los valores espectrales de las bandas	25
5.3. Modelo de regresión	26
5.4. Cartografía de los parámetros de calidad de agua a partir del sensor Sentinel-2	27
VI. CONCLUSIONES.....	36
VII. RECOMENDACIONES	37
VIII. LITERATURA CITADA.....	38
IX. ANEXOS.....	44

INDICE DE CUADRO

CUADRO	PAGINA
Cuadro 1. Colección de imágenes Sentinel-2A y Sentinel-2B, con nivel de procesado L2A. 17	
Cuadro 2. Enfoque convencional para interpretar un coeficiente de correlación, (Schober, Patrick; Boer, Christa; Schwarte, Lothar , 2018).19	
Cuadro 3. Correlación de los valores de parámetros de calidad de agua y los valores de las bandas meses de febrero y julio.....22	

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	PAGINA
Figura 1. Ubicación del área de estudio	10
Figura 2. Esquema de flujo de trabajo.....	14
Figura 3. Campana de Gauss, (Ott & Longnecker, 2015).....	20
Figura 4. Histograma de frecuencias de los valores de pH.	24
Figura 5. Histograma de frecuencias de los valores espectrales de la banda 05	24
Figura 6. Histograma de frecuencias de los valores de Salinidad.	24
Figura 7. Histograma de frecuencias de los valores espectrales de la banda 05.	24
Figura 8. Histograma de frecuencias de los valores de la Banda 05.	24
Figura 9. Histograma de frecuencia de los valores de Sólidos disueltos totales.	24
Figura 10. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con el pH febrero	25
Figura 11. Dispersión de los valores espectrales de la banda 08 con el pH julio.....	25
Figura 12. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con salinidad, febrero.....	25
Figura 13. Dispersión de los valores espectrales de la banda 09 con salinidad, julio	25
Figura 14. Dispersión de los valores espectrales de la banda 09 con sólidos disueltos totales, julio.....	25
Figura 15. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con sólidos disueltos totales, febrero.....	25
Figura 16. Mapa de predicción del parámetro pH del mes de febrero con la B05.....	28
Figura 17. Mapa de predicción del parámetro pH del mes de julio con la B08.	28
Figura 18. Mapa de predicción del parámetro salinidad del 07 de julio con la B09.	30
Figura 19. Mapa de predicción del parámetro salinidad del mes de febrero con la B05.	30
Figura 20. Mapa de predicción del parámetro salinidad del 17 de julio con la B09	30
Figura 21. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del 07 de julio con la B09.	32
Figura 22. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del mes de febrero con la B05.....	32
Figura 23. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del 17 de julio B09. ...	32
Figura 24. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del 07 de julio con la B09.	34
Figura 25. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del mes de febrero con la B09.	34
Figura 26. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del 17 de julio B09.	34

INDICE DE ANEXOS

ANEXO	PAGINA
Anexo 1. Características del equipo de campo Multiparamétrico de bolsillo.....	45
Anexo 2. Ubicación geográfica de los puntos muestreados el 27-02-2020.	46
Anexo 3. Ubicación geográfica de los puntos muestreados el 20-07-2020.	47
Anexo 4. Comparación de los parámetros físicos-químicos con los rangos permisibles de las normas para uso de pesca y recreación. (fuente propia, 2020).....	48
Anexo 5. Comparación de las bandas de los sensores remotos Sentinel-2, LandSat, Modis, Aster y Formosat. (Fuente propia,2020).	49
Anexo 6. Levantamiento de parámetros físico-químicos en la Laguna de Moyúa	50

RESUMEN

En el presente trabajo se hizo uso de la técnica de percepción remota a través de imágenes del sensor remoto Sentinel-2 para determinar parámetros físicos-químicos de calidad de agua en la Laguna Moyúa de ciudad Darío, Matagalpa los datos se obtuvieron a través de muestreo en campo, tanto en época seca como lluviosa medidos con un multiparamétrico digital de bolsillo in situ, para determinar cinco parámetros: pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólido disueltos totales y salinidad. Las imágenes espectrales se obtuvieron a través de la plataforma de COPERNICUS de la Agencia Espacial Europea (ESA por su sigla en inglés) colectados los datos se procedió a determinar las correlaciones existentes, previo se aplicó la prueba de normalidad por el método Shapiro-Wilk para confirmar si los datos presentaban una distribución normal y así establecer el tipo de correlación a aplicar. Las correlaciones se determinaron por medio de Spearman obteniendo para los meses en evaluación febrero y julio correlaciones moderadas entre los parámetros de calidad de agua salinidad, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, pH y las bandas espectrales 05, 08 y 09; los valores de correlación están entre los rangos 0.43 - 0.47, con moderadas a alta significancias estadísticas. La cartografía de los parámetros de salinidad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y pH puede ser monitoreada a través del sensor Sentinel-2 con las bandas espectrales B05, B08 y B09 estas bandas corresponden a la región del espectro visible infrarrojo cercano y de onda corta respectivamente

Palabras clave: correlación, sensores remotos, calidad de agua, predicción

ABSTRACT

In the present work, the remote perception technique is used through images of the Sentinel-2 remote sensor to determine physical-chemical parameters of water quality in the Moyúa Lagoon of Dario City, Matagalpa, the data were obtained through sampling in the field both in dry and rainy season, measured with a pocket digital multiparametric in situ, to determine five parameters: pH, temperature, electrical conductivity, total dissolved solids and salinity and the spectral images were obtained through the COPERNICUS platform of the European Space Agency (ESA) collected the data, the existing correlations were determined, previously the normality test was applied by the Shapiro-Wilk method to confirm if the data presented a normal distribution and thus decide the type of correlation to apply. The correlations were determined using Spearman, obtaining moderate correlations between the parameters of water quality salinity, total dissolved solids, electrical conductivity, pH and bands spectral 05, 08 and 09 for the months in the evaluation; the correlation values are between the ranges 0.43 - 0.47, with moderate to high statistical significance. The mapping of the parameters of salinity, electrical conductivity, total dissolved solids and pH can be monitored through the Sentinel-2 sensor with the bands B05, B08 and B09 these bands correspond to the region of the near infrared and short wave visible spectrum respectively.

Keywords: correlation, remote sensing, water quality, prediction

I. INTRODUCCIÓN

El recurso agua es de vital importancia para la sobrevivencia de la humanidad debido a esto fue incorporado en los Objetivo de Desarrollo Sostenibles (ODS) correspondiente al objetivo número 6 agua limpia y saneamiento, compromete a los países suscritos a “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”. (CEPAL 2019).

Para dar cumplimiento a dicho objetivo se considera clave mejorar la información sobre calidad del agua y protección de ecosistemas. Esto implica generar datos con mayor detalle, realizar verificaciones en el terreno y facilitar el acceso por medio de tecnologías web en apoyo a procesos de monitoreo y toma de decisiones a largo plazo. Existen varios parámetros indicadores de calidad del agua, estos se clasifican en físico, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden determinarse en campo, laboratorio, y más recientemente por medio de teledetección.

El presente trabajo se basó en la técnica de teledetección, mediante información descargada del sensor Sentinel-2, con el propósito de validar su utilidad para el monitoreo de la calidad de agua. La ventaja del uso de Sentinel-2 se debe a que es un sensor confiable, de alta resolución espacial (10 m) y espectral (13 bandas), con período corto de revisita (5 días), disponibilidad de 2 niveles de procesado de imagen (Level 1C, Level 2A), y de libre acceso. Para llevar a cabo el presente estudio, se realizaron muestreos de campo tanto en época seca como lluviosa, con el objetivo de conocer el comportamiento de los parámetros de calidad de agua en ambos períodos. El equipo de campo utilizado consistió en un multiparamétrico digital de bolsillo para determinar cinco parámetros: temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólido disueltos totales y salinidad.

Se seleccionó la Laguna de Moyúa como área de estudio piloto, dado que forma parte del Sistema Lagunar Las Playitas – Moyúa – Tecomapa, declarado como el sitio Ramsar No. 1980 en 2011 (Ramsar, 1990). Este sistema es considerado uno de los humedales más importante a nivel nacional debido a su belleza escénica, riqueza en biodiversidad, punto de descanso para especies migratorias y por presentar aguas permanentes a pesar de estar ubicado en el Corredor

Seco de Nicaragua, una de las zonas más vulnerables a los efectos del cambio climático (Madriz Flores, 2017).

La Laguna de Moyúa también es importante para el desarrollo de la economía local. Los pobladores de comunidades aledañas se dedican a la pesca, la agricultura bajo riego y utilizan sus aguas para fines domésticos. Sin embargo, la falta de regulación en usos agropecuarios, el poco cumplimiento de normativas ambientales y el uso irracional del recurso pueden degradar la calidad de agua de esta Laguna. (Madriz Flores, 2017).

La adquisición de las imágenes se realizó mediante el uso del portal web Copernicus, las cuales facilitaron la selección de las imágenes de mejor calidad disponibles. Con ayuda del software SIG y estadístico, se generaron los mapas basados en técnicas de extrapolación, correlaciones y significancia entre el nivel de reflectividad del agua con distintas bandas del sensor Sentinel-2.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Evaluar 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, 2020.

2.2 Objetivos específicos

- 1- Identificar las regiones espectrales de mayor correlación de los parámetros físicos químicos de calidad de agua medidos en campo.
- 2- Determinar los modelos de regresión lineal que permitan la predicción de los valores de los parámetros físicos químicos medidos en campo.
- 3- Generar la cartografía de los parámetros físicos químicos medidos en campo a partir de los modelos de predicción o regresión.

III. MARCO DE REFERENCIA

Históricamente, el monitoreo de la calidad del agua en lagos y lagunas se ha llevado a cabo mediante muestreos de campo y análisis en laboratorio. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por (Madriz Flores, 2017), quien estimó la calidad del agua de la Laguna de Moyúa entre 2015 y 2016. Para este estudio se consideraron parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, medidos en 6 puntos distribuidos en las costas de la Laguna y en pozos aledaños, cubriendo un área aproximada de 5 km² del espejo de agua de la Laguna. Los resultados de los análisis se confrontaron contra las normas CAPRE, OMS, canadienses, FAO e índice de Toledo. Los hallazgos demostraron que el agua de la Laguna no es apta para consumo humano y presenta ciertas limitaciones para irrigación. Algunos parámetros como el pH, K⁺, Mg⁺, CO₃ y HCO₃ sobrepasaron los umbrales permitidos.

Otro método útil para el monitoreo de la calidad del agua es el uso combinado de técnicas de teledetección y SIG. Estas técnicas han evolucionado en el tiempo, en sus inicios, los satélites disponibles como MERIS y MODIS, contaban con una adecuada resolución espectral de 15 y 36 bandas espectrales. Sin embargo, su resolución espacial de 250 m y 300 m respectivamente; (alonso, 2006-02-13) limitaba su aplicación al estudio de lagos grandes. Posteriormente, sensores como los LandSat 1 al 7 con una resolución espacial (30 metros), permitieron el monitoreo en cuerpos de agua pequeños, aunque con una limitada resolución espectral de 7 bandas (González, Ruiz, & Acosta, 2007-2003).

En la actualidad, existe acceso libre a una gran variedad de información satelital, pero se desconoce potencial de cada sensor para el monitoreo de calidad de agua. Uno de los sensores más prominentes es Sentinel-2, lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) el 23 de junio de 2015 el cual se caracteriza por su alta resolución espectral, espacial y temporal (ESA, 2000 - 2014).

Este estudio se enfocó en el uso de Sentinel-2 debido a su capacidad de registrar información en 13 bandas que abarcan espectro visible, NIR y SWIR. Esta diversidad permite analizar el comportamiento de distintas coberturas de la tierra (incluido el agua) en diferentes regiones del

espectro electromagnético. El tamaño de píxel en las imágenes, de 10 m y 20 m en la mayoría de sus bandas, garantiza un alto nivel de detalle. Su alta frecuencia de revisita permite obtener una imagen del mismo sitio cada 5 días (MASTERGIS, 2019). Por último, el libre acceso a los datos a través de múltiples portales web, garantiza que el monitoreo pueda ser ejecutado por un amplio rango de usuarios, incluidos los sectores académico, público y privado.

Estas características lo convierten en un sensor muy versátil para el monitoreo del medio ambiente, transformándolo en la fuente de información base para el desarrollo de diversos tipos de estudios como: determinación de cobertura de suelo bajo entornos (Morales, Elena, & Mosciaro, 2016- 2017), mapa de vegetación en México (ESA, 24 Octubre 2018), seguimiento y monitoreo de corales (EOMAP, 1 julio, 2016), identificación de regiones contaminadas en la superficie del Lago Villarrica, en el período 2017-2018 (Escobar Valdivia, 2019). No obstante, la revisión literaria evidencia pocos estudios que vinculen el uso de este sensor con el monitoreo de parámetros de calidad de agua.

En el marco del presente trabajo, se evaluó la aplicabilidad de Sentinel-2 para inferir valores de cinco parámetros fisicoquímicos de calidad de agua fácilmente medibles en campo, por medio de correlaciones entre puntos de control de campo con los valores de reflectancia del agua en distintas bandas. Los parámetros seleccionados fueron pH, salinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y temperatura.

3.2. Calidad del agua

La calidad del agua se ve afectada por una variedad de factores, tanto naturales como relacionados con la actividad del hombre; existen diferentes valores en los parámetros de calidad del agua, los cuales establecen una caracterización que determina en qué tipo de actividades puede ser utilizada. Los estándares y criterios más estrictos se aplican al agua para consumo humano, los siguen las que definen las características del habitat para los peces y a la vida silvestre, para usos recreativos, agriculturas e industrias, el cumplimiento de estos estándares de calidad implica pruebas y mediciones de las concentraciones de contaminantes físicos químicos y biológicos (CAPRE, 1994),

El pH es un parámetro que permite expresar la concentración de iones Hidrógeno [H⁺] o más exactamente la actividad de este ion. Escala de medición de 1 a 14 (7 neutro). Cuando las aguas superan los niveles de pH entre los 7 a 14, indica que es agua alcalina, igualmente indica que cuando el pH está entre 6.5 y 8.5 es favorable para la vida acuática en su hábitat. Según la Norma Regional de Calidad de agua (CAPRE, 1994), el valor recomendado para consumo humano debe estar entre los rangos de 6.5 a 8.5, pero cuando el pH es ácidos indican contaminación por vertidos mineros o industriales.

La salinidad es el contenido de sal disuelta en un cuerpo de agua. Dicho de otra manera, es válida la expresión salinidad para referirse al contenido salino en suelos o en agua. El porcentaje medio que existe en los océanos es de 10,9 % (35 gramos por cada litro de agua). (Madriz Flores, 2017)

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 [3000] $\mu\text{S}/\text{cm}$, en las concentraciones superiores a los límites permitidos de conductividad limitan el crecimiento de los cultivos y disminuye el rendimiento de las plantas. (Thelma, 2003).

Los sólidos totales disueltos, también conocidos como SDT, son compuestos inorgánicos que se encuentran en el agua, como sales, metales pesados y algunos rastros de compuestos orgánicos que se disuelven en el agua, cuando las concentraciones de SDT se encuentran en los rangos 50 a 600 mg/litro el agua llega a presentar un sabor agradable, que se deteriora progresivamente, pero si las concentraciones sobrepasan el límite superior de 1,500 mg/litro, puede resultar inaceptable debido a su insipidez. (Thelma, 2003)

La temperatura (°C) se refiere a la cantidad de energía lumínica que queda atrapada en los dos primeros metros de la columna de agua produciéndose un aumento en el cuerpo de agua. La temperatura en el agua está vinculada con la cantidad de energía calórica presente en el agua. Este parámetro permite definir el grado de estratificación térmica 17° dentro de un cuerpo de agua (Agrupación de láminas de agua de igual temperatura dentro de un cuerpo de agua) (Roldán, 1992).

En Laguna de Moyúa, Tisma y el Lago de Apanás, se realizaron mediciones de parámetros de calidad de agua en los cuales el pH, salinidad, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, fueron los parámetros utilizados en los 3 estudios).

3.3. 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. Más específicamente, la teledetección es la captación de las características físicas de la superficie terrestre, basada en mediciones de radiación reflejada y emitida de cada componente de esa superficie. (Amado Alvares, et al, 2018).

3.4. Comportamiento del agua en las regiones del espectro electromagnético

El comportamiento espectral del agua se identifica alta reflectividad en la zona del visible se sitúa alrededor del 5%, una parte se absorbe y la mayor parte se transmite (en agua limpia y clara) y menor en la región del infrarrojo cercano y medio, evidenciando un aumento en la absorción. En el infrarrojo el agua absorbe fuertemente la radiación, muy poca se transmite. Los factores que determinan el comportamiento espectral del agua son: la profundidad, los materiales en suspensión, y la rugosidad de la superficie. En relación con los materiales en suspensión, si estos tienen clorofila se traducirá en una respuesta en el espectro visible parecida a la de la vegetación. En relación con la rugosidad, si la superficie es lisa, se incrementan los efectos especulares, por lo que la reflectividad puede cambiar fuertemente en función de la posición relativa del sol y del sensor. (Chuvienco, E., 2010).

3.5. Imágenes satelitales

Una imagen de satélite está compuesta por una matriz digital de puntos (píxel), igual a una fotografía digital, capturada por un sensor montado a bordo de un satélite que orbita alrededor de la Tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita barre la superficie con un conjunto de

detectores que registran la reflexión de energía electromagnética, emisiones, temperatura, o variables de elevación topográfica o geofísica. Cada píxel tiene asociado un número denominado Nivel Digital (ND), el cual representa la intensidad o brillo promedio de un área mínima relativa dentro de la escena, generalmente, el rango de niveles digitales va de 0 a 255 (Posada, 2009). Estas imágenes se diferencian por el número de bandas, la región del espectro electromagnético que registra cada banda, el tamaño de la escena, su resolución espacial (nivel de detalle) y su resolución temporal (tiempo que tarda en recapturar la información de una zona específica) (Martínez & Díaz, 2005).

3.6. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital es el conjunto de métodos y técnicas orientado a la manipulación, análisis cualitativo y cuantitativo de las imágenes digitales, su corrección, mejoramiento, transformación y/o clasificación temática con el fin de generar información útil sobre objetos, áreas y fenómenos, sin estar en contacto con ellos. El propósito general de este procesamiento consiste en mejorar el conocimiento sobre los recursos naturales de la Tierra y del medio ambiente (Posada, 2009). Los procesamientos aplicados a las imágenes de este estudio son la georreferenciación, la corrección atmosférica y la corrección radiométrica.

3.7. Método de corrección basado en la imagen

El método está basado en el hecho de que áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia (agua, zonas de sombra) deben presentar una radianza espectral muy próxima a cero, cualquier reflectancia aparente en estas áreas es producto de la dispersión atmosférica y esta información puede ser usada para calibrar el resto de la imagen, restando los NDs mínimos a todos los NDs de cada banda. Los píxeles más oscuros pueden ser seleccionados examinando el histograma de los ND de una imagen o estableciendo un umbral (Chávez,1999).

3.8. Sensor del satélite Sentinel-2A

El satélite Sentinel-2A fue construido por Airbus Defence and Space agregará color al programa Copernicus a través de un instrumento multispectral que proporciona una calidad de imagen única. Copernicus es el nuevo nombre del Programa de Observación de la Tierra de la Comisión Europea, anteriormente conocido como GMES (Monitoreo Global para el Medio Ambiente y la Seguridad). (ESA, 24 Octubre 2018).

El sensor satelital Sentinel-2A se lanzó con éxito el 23 de junio de 2015 a las 03:51:58 am CEST desde un lanzador Vega desde el puerto espacial en Kourou, Guayana Francesa. El satélite Sentinel-2A es el primer satélite óptico de observación de la Tierra en el programa europeo Copernicus y fue desarrollado y construido bajo el liderazgo industrial de Airbus Defence and Space para la Agencia Espacial Europea (ESA). (ESA, 24 Octubre 2018).

El lapso de 13 bandas espectrales, desde el visible y el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta en diferentes resoluciones espaciales que van desde 10 a 60 metros en el suelo, lleva el monitoreo global de la tierra a un nivel sin precedentes. Las cuatro bandas con una resolución de 10 metros aseguran la continuidad con misiones como SPOT-5 o Landsat-8 y abordan los requisitos del usuario, en particular, para la clasificación básica de la cubierta terrestre. Las seis bandas a una resolución de 20 metros satisfacen los requisitos para una clasificación mejorada de la cobertura del suelo y para la recuperación de parámetros geofísicos. Las bandas a 60 metros están dedicadas principalmente a correcciones atmosféricas y cribado de nubes cirrus (ESA, 24 Octubre 2018).

El satélite Sentinel-2A es la primera misión civil de observación de la Tierra de su tipo que incluye tres bandas en el 'borde rojo', que proporcionan información clave sobre el estado de la vegetación. El satélite Sentinel-2A podrá ver cambios muy tempranos en la salud de las plantas debido a su alta resolución espacial y temporal y 3 bandas de borde rojo. Esto es particularmente útil para los usuarios finales y los formuladores de políticas para aplicaciones agrícolas y para detectar signos tempranos de escasez de alimentos en los países en desarrollo. (ESA, 24 Octubre 2018).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del área de estudio

La Laguna de Moyúa se localiza en el municipio de Ciudad Darío, departamento de Matagalpa, a 90 km de Managua sobre la Carretera Panamericana, se ubica en la coordenada céntricas $86^{\circ}02'80''$ longitud oeste y $12^{\circ}35'78''$ latitud norte. Desde el punto de vista hidrológico, forma parte del sistema lacustre Playita-Moyúa-Tecomapa (de acuerdo a la convención RAMSAR No 1980) y se encuentra dentro de la unidad hidrográfica N° 55-95189, (INETER et. al, 2014).



Figura 1. Ubicación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

4.2. Descripción Biofísica

4.2.1. Clima

Su clima es Sabana Tropical con temperaturas que oscilan entre 19°C a 34°C y rara vez baja a menos de 17°C o sube a más de 36°C, una temperatura media anual de 26.5°C. Las precipitaciones promedio anuales oscilan entre 800 y 1000 mm distribuidos entre mayo y octubre, con la presencia de canícula en los meses de julio y agosto (Madriz Flores, 2017). El clima varía con respecto a la altitud. En las partes altas las temperaturas decrecen y las precipitaciones incrementan, con una estación seca de cuatro meses. Las partes más bajas presentan mayor temperatura y menor precipitación y la época seca es más pronunciada con una duración de seis meses. (Suárez, 2003).

4.2.2. Suelo

De acuerdo con la geología las serranías que confinan la Laguna pertenecen al Grupo Coyol, con predominancia de rocas ignimbritas, dacíticas, tobas y en menor medida basaltos. En las zonas deposicionales se encuentra material cuaternario aluvial, proveniente de la erosión en las laderas circundantes. Este material se compone de arenas, limos y arcillas, esta última es la predominante. (Dietsch & Novoa, 2010).

La Laguna de Moyúa se encuentra confinada por un conjunto de cerros con elevaciones promedio de 580 msnm. Los más elevados, Loma Chichigua (618 msnm) y Loma San Cristóbal (592 msnm) que se encuentran al Norte de la Laguna. Otras elevaciones importantes son Loma La Cebadilla (550 msnm), Loma El Patacón (496 msnm) y Cerro Puertas Viejas (541 msnm).

Las laderas de estos cerros presentan pendientes de 20% a más (10° a más). Las zonas más escarpadas se encuentran al Norte de la Laguna, alrededor de los caseríos San Martín y El Paraíso. Las partes llanas con pendientes menores al 10% (5°), se presentan en la desembocadura de ríos afluentes, como río Los Limones al Oeste de la laguna (Madriz Flores, 2017). En el área se distinguen tres tipos de relieve, muy escarpada con 8.36% correspondientes a 7.03 km², escarpada con 71.40% equivalente a 60 km² y plana con 12.88% equivalente a 10.83

km². Las formas o tipo de relieve están en correspondencia con la erosión en el territorio, por tal razón es necesario tomar en cuenta el relieve cuando se interpreta la erosión en una determinada área de estudio. La erosión también está en dependencia del mal uso del suelo y los bosques, provocada por la extracción de leña, quemadas de bosques y cambios de uso de la tierra en relación con la vocación que estos presentan. (Dietsch & Novoa, 2010).

El área en estudio presenta relieve escarpado, muy escarpado, moderadamente escarpado y algunos sectores planos. Según mapas topográficos 1:5000, 35 constituyen grupos montañosos de topografía bastante accidentada que alcanza elevaciones de hasta 500 y 700 msnm. (Dietsch & Novoa, 2010).

Los suelos se han formado a partir de materiales aluviales y coluviales recientes. Se caracterizan por ser suelos profundos, de textura media fina a fina, bien estructurados, de drenaje bueno, fértiles y se adaptan bien a una agricultura bajo riego. Son adecuados para la mayoría de los cultivos tradicionales (granos básicos, sorgo, algodón y hortalizas). Estos suelos son predominantemente arcillosos en proporción al área cubierta, y su profundidad varía considerablemente. (Dietsch & Novoa, 2010).

4.2.3. Ecosistemas

Los humedales son terrenos anegados, que pueden ser temporalmente inundados y estar prácticamente cubiertos por vegetación acuática; se encuentran ubicados en los bordes marinos y al interior del territorio. De los cuales los ecosistemas existentes en la Laguna Moyúa son clasificados como grupo IB1a (1) (prioritario Bosque de bajura o submontano) con 7.898525644 ha, grupo IB1a (1)-2(secundarios Bosque deciduo de bajura o submontano) con 130.8216533 ha, grupo SA1b (2) (laguna tectónica) con 101.4686101 ha, grupo SPA1 (Sistema Productivo Agropecuario) con 459.6870208 ha. El uso potencial De la Laguna es el siguiente: Agua con 498.86 ha, Agrícola restringido y Sistemas pecuarios en zona seca con 24.0785 ha, Forestal y Sistema Agroforestal en zona seca con 10.50 ha, Silvopastoril y cultivos especiales en zona seca con 135.7391773 ha, esta información se extrajo de los shapefiles de ecosistemas de la laguna mediante la herramienta QGIS.

La población adyacente a la laguna de Moyúa contiene 52 familias que engloba a 251 personas viviendo alrededor de ella. Entre las actividades que éstas desarrollan se encuentran: actividades domésticas, pequeños comercios, agricultura intensiva a pequeña escala de granos básicos (maíz, frijoles, sorgo), cucurbitáceas (sandía) y hortalizas (pepino, ayote, pipián, tomate); y ganadería extensiva sin manejo silvopastoriles (Suárez, 2003).

La población nicaragüense que habita alrededor de la Laguna de Moyúa depende de esta para su subsistencia. Los residuos de detergente de uso doméstico y residuos de plaguicidas, fertilizantes de uso agrícola son algunos de los desechos que impactan negativamente este recurso hídrico. Esto y la extracción por riego sin ningún tipo de regulación corresponden una negligencia humana. (Suárez, 2003).

A continuación, se presenta el esquema de flujo de trabajo de la etapa de colección, preparación, análisis y procesamiento de los datos.

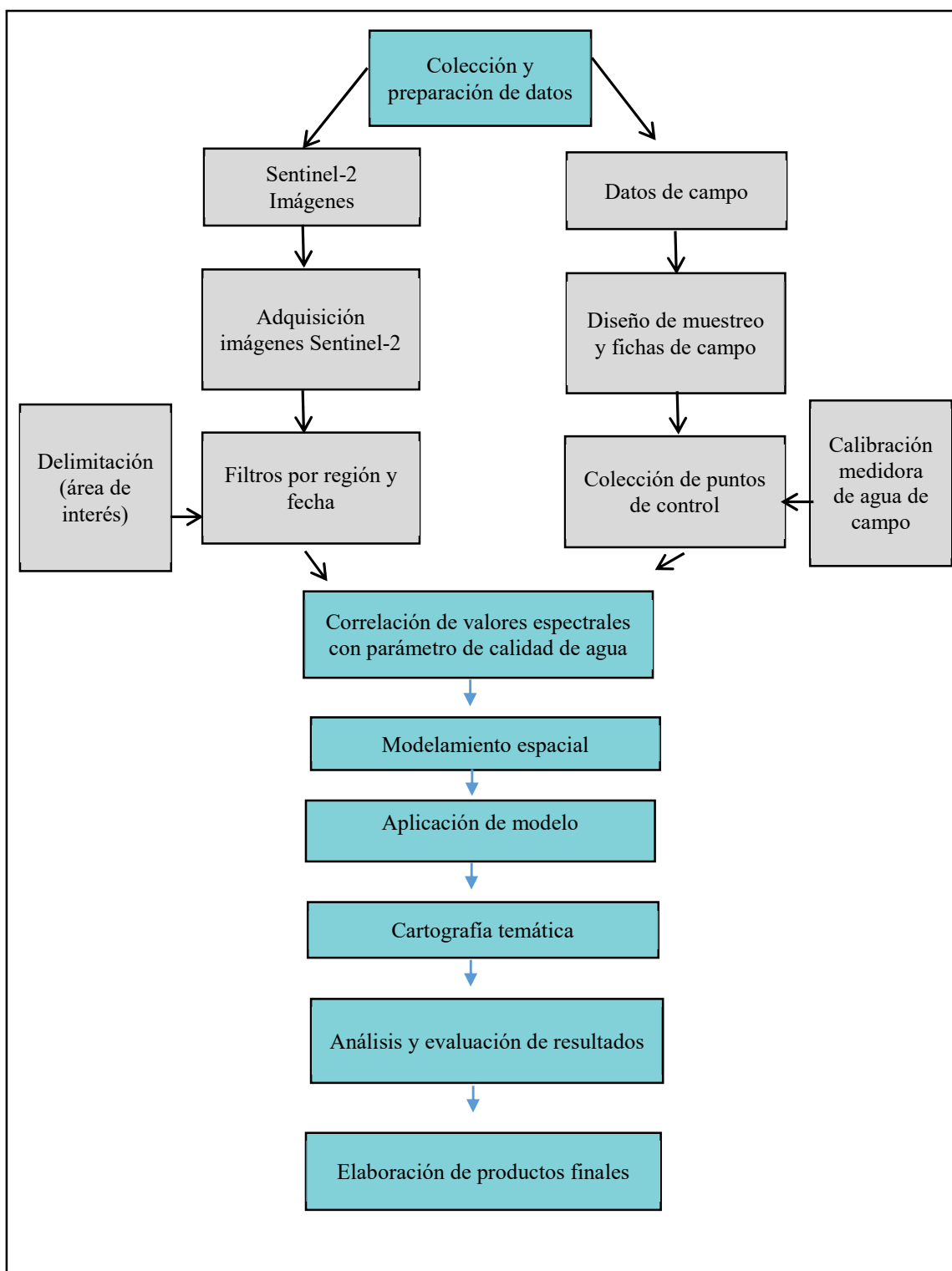


Figura 2. Esquema de flujo de trabajo

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Proceso Metodológico

El presente estudio comprendió dos fases: colección y preparación de los datos. La primera se ejecutó en época seca meses de febrero. La segunda se llevó a cabo en época lluviosa mes de julio del año 2020. Esto se debe a que las precipitaciones alteran la composición química y física del agua, y, por ende, su grado de calidad. (Martínez García 2017). En la cual se utilizaron fichas de campo donde se registraban la información de georreferenciación de los puntos de muestreo y los valores de los parámetros físico-químicos medidos haciendo uso del multiparamétrico de calidad de agua Extech Exstik II (Anexo 1).

Las imágenes utilizadas correspondieron del satélite Sentinel-2 multiespectral estas se descargaron de forma gratuita a través de la página web del Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

4.3.1. Parámetros de calidad de agua evaluados

La recolección de los parámetros de calidad de agua se realizó con un equipo de campo multiparamétrico marca Extech Extik II, el cual mide 5 parámetros: conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), SDT sólidos disueltos totales (mg/L), salinidad (mg/L), pH y temperatura ($^{\circ}\text{C}$). En la primera gira se muestrearon 11 puntos estos fueron medidos con el instrumento directamente en el cuerpo de agua. La segunda gira se realizó el 27/02/2020 se muestrearon 28 puntos que fueron recolectados el agua en botellas plásticas de 1L y medido los parámetros in situ, la tercera fue realizada el 20/07/2020, se utilizó el mismo método de recolección con 30 muestras recolectadas. (Anexo 1, 2, 3).

4.3.2. Adquisición de Imágenes

Para la adquisición de las imágenes satelitales se usó la plataforma Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), ocupando el Satélite Sentinel-2, esta plataforma permite tener acceso a imágenes con correcciones atmosféricas en niveles de procesados L1C y L2A. Las imágenes L1C constan de 13 bandas de trabajo, bajo resoluciones de 10, 20 y 60

metros y bajo nivel TOA (Top of Atmosphere). O lo que es lo mismo, los valores de los píxeles y el aspecto visual de las imágenes cuentan con la influencia de elementos presentes en la atmósfera. La corrección atmosférica permite pasar estas imágenes a un nivel de procesado L2A con un nivel de corrección BOA (Bottom of Atmosphere). Este segundo nivel de procesado corrige la influencia de la presencia atmosférica modificando los valores de píxel y generando imágenes más nítidas y claras, eliminando el tradicional aspecto visual de nieblilla blanquecina a lo largo de la imagen. Luego se procedió a una verificación geográfica y poder seleccionar el área de interés, marcando los puntos para formar un cuadro, seleccionando las fechas de las giras de campo o cercanas, e imágenes con menor cobertura de nubosidad.

a. Extracción de valores

Para extraer los valores de los píxeles de las bandas por punto muestreados se utilizó la herramienta *Muestra de valores ráster* esta se localiza en análisis ráster de la caja de herramientas de procesos, dicha herramienta extrae los valores de los píxeles que se intersectan con una capa de puntos de las muestras georreferenciadas en campo, generando como salida una capa de tipo vectorial con la información de los valores rásteres de cada una de las bandas procesadas durante el estudio.

b. Compilación de los valores de píxeles

Los valores de los píxeles muestreados por los puntos de campo se compilaron en una base de datos en Excel (Microsoft office), para cada mes se descargaron tres colecciones de imágenes Sentinel-2 por lo tanto, se procedió a determinar el promedio de valores de los píxeles para el mes muestreado, de esta manera obtener una media de valores de los píxeles.

Cuadro 1. Colección de imágenes Sentinel-2A y Sentinel-2B, con nivel de procesado L2A.

Mes	Código
Febrero	S2A_MSIL2A_20200203_T16PEV
	S2A_MSIL2A_20200203_T16PEU
	S2A_MSIL2A_20200213_T16PEU
	S2A_MSIL2A_20200213_T16PEV
	S2A_MSIL2A_20200223_T16PEU
	S2A_MSIL2A_20200223_T16PEV
Julio	S2B-MSIL2A_20200707_T16PEU
	S2B-MSIL2A_20200707_T16PEV
	S2B-MSIL2A_20200717_T16PFU
	S2B-MSIL2A_20200717_T16PEU

Para el procesamiento de las imágenes se utilizó la herramienta de SNAP, programa gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea, para procesar y analizar imágenes satelitales provenientes de la flota de satélites Sentinel. Esta aplicación permitió la visualización de las imágenes descargadas de manera escalonada a través de niveles de visualización para optimizar el renderizado de la visualización de las imágenes. Luego a través de la herramienta calculadora raster se determinó la media del valor espectral de cada punto por mes que se correlacionaron con los parámetros físico-químicos tomados en campo para los meses de febrero y julio.

4.3.3. Análisis de correlación de los datos

Para el análisis estadístico de los datos 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 las correlaciones lineales y la significancia de las bandas entre los parámetros evaluados (Garmendia Zapata, 2020).

La fórmula de la correlación lineal es:

$$r = \frac{N \Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{[N \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][N \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}}$$

Donde:

N = Número de valores o elementos

Σxy = la suma de los productos de las puntuaciones emparejadas

Σx = la suma de puntuaciones x

Σy = la suma de puntuaciones y

Σx^2 = Suma de cuadrados Puntuación x

Σy^2 = Suma de cuadrados Puntuación y.

Mediante la herramienta de “RStudio”, se procedió a determinar las correlaciones existentes entre los valores espectrales de las diferentes bandas (B01 a la B12) a excepción de la banda 10, esta banda es utilizada para detectar el Cirros que es una nube compuesta por cristales de hielo por ende no proporciona información sobre la superficie, en la reflectancia de superficie o BOA Level-2A; y los valores de los parámetros de calidad de agua (pH, temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y salinidad) medidos en campo. Con esta herramienta se pretende determinar la relación entre las dos variables y predecir una en función de la otra.

El coeficiente de correlación “R” puede ser evaluada entre $0 < r < \pm 1$ entre más se acerca a ± 1 , indica que hay una fuerte relación entre las variables evaluadas.

Cuadro 2. Enfoque convencional para interpretar un coeficiente de correlación, (Schober, Patrick; Boer, Christa; Schwarte, Lothar , 2018).

Magnitud absoluta del coeficiente de correlación observado	Interpretación
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

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 estaría de acuerdo en que un coeficiente de $<0,1$ indica una insignificante relación y $>0,9$ una relación muy fuerte, valores entre si son discutibles. Por ejemplo, un coeficiente de correlación de 0,65 podría interpretarse como un "bien" o Correlación "moderada", según la regla aplicada de pulgar. También es bastante caprichoso afirmar que una correlación coeficiente de 0,39 representa una asociación "débil", mientras que 0.40 es una asociación "moderada" (Schober, Patrick; Boer, Christa; Schwarte, Lothar , 2018).

Primeramente, se agruparon los valores de las variables evaluadas para observar su distribución, luego se elaboraron los histogramas de frecuencias para verificar la distribución (si es distribución normal o distribución no normal) de los datos, tanto de los valores espectrales de las bandas, como de los valores de los parámetros de calidad de agua; para confirmar si el conjunto de datos sigue o no una distribución normal, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk, la cual está recomendada para menos de 50 observaciones y así decidir el tipo de correlación a aplicar. La hipótesis que sigue dicha prueba, es la siguiente:

Ho: Las observaciones siguen una distribución normal.

Ha: Las observaciones no siguen una distribución normal.

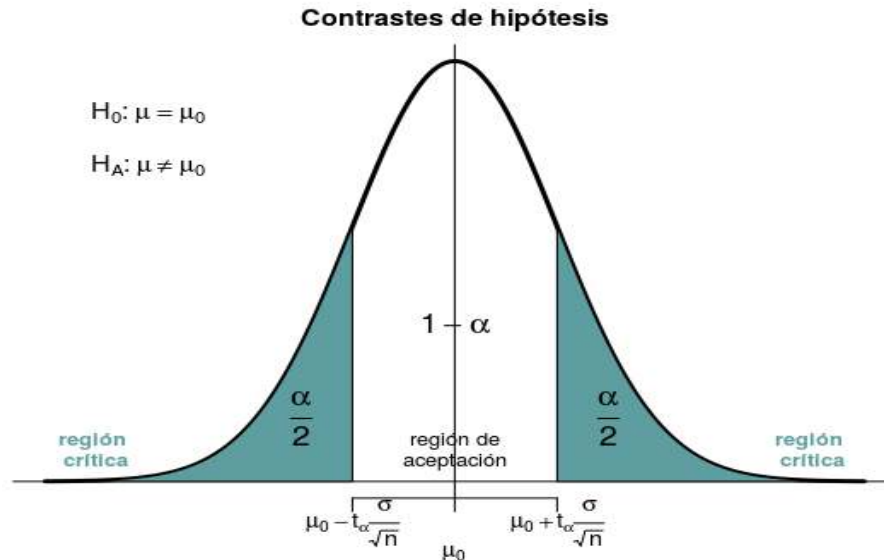


Figura 3. Campana de Gauss, (Ott & Longnecker, 2015).

La zona crítica es la región de rechazo de la hipótesis nula (H_0), es decir, si utilizamos un nivel de significancia (α) equivalente a 0.05, y el valor de la probabilidad (p-value) es menor a ese valor, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa (H_a), de lo contrario, si el valor de p-value es mayor, se acepta la hipótesis nula y se concluye que los datos siguen una distribución normal. Un valor de $\alpha = 0.05$, indica un riesgo del 5% de concluir que existe una distribución normal cuando en realidad no hay distribución.

El Coeficiente de Correlación de Spearman es la alternativa no paramétrica cuando hemos probado que los valores de las variables no se distribuyen de forma normal. Este coeficiente tiene la misma función que el Coeficiente de Correlación de Pearson, solamente que el algoritmo para su ejecución es diferente a fin de dar salida a un cálculo no paramétrico.

Las pruebas de correlaciones asumen la siguiente hipótesis:

H_0 : No hay correlación significativa

H_a : Hay correlación significativa.

4.3.4. Cartografía de los parámetros físico-químicos a partir del modelo de regresión lineal simple

El modelo de regresión utilizado fue el lineal simple el cual consiste en utilizar una variable independiente, la cual fueron los valores medidos en campo y una variable dependiente que fue los valores promedios espectrales de las bandas del sensor.

Luego de determinado el modelo de regresión línea, este se procedió a utilizar la *calculadora ráster* en QGIS que permite crear y ejecutar una expresión de Álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python que genera un ráster de salida extrapolado de los valores correlacionados que presenten alta significancia, se incorporó la fórmula para modelos de pronóstico de regresión lineal esta permite hallar el valor esperado de una variable aleatoria. La extrapolación espacial es la sub-disciplina de la predicción espacial distinta del método geoestadístico de interpolación. Este fue utilizado con el propósito de predecir los parámetros físicos químicos de calidad de agua y las relaciones de las bandas espectrales del sensor Sentinel-2 para luego estimar determinadas localizaciones espaciales de las áreas no muestreadas en la laguna Moyúa.

La fórmula utilizada fue

$$Y = a + bx$$

Donde

"y" sería la variable dependiente, es decir, aquella que viene definida a partir de la otra variable "x" (variable independiente). Para definir la recta hay que determinar los valores de los parámetros "a" y "b":

El parámetro "a" es el valor que toma la variable dependiente "y", cuando la variable independiente "x" vale 0, y es el punto donde la recta cruza el eje vertical. El parámetro "b" determina la pendiente de la recta, su grado de inclinación. La regresión lineal nos permite calcular el valor de estos dos parámetros, definiendo la recta que mejor se ajusta a esta nube de puntos.

V. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en la evaluación de la utilidad del sensor Sentinel-2 para la cartografía de los parámetros de calidad de agua evaluados en la Laguna de Moyúa.

Las correlaciones entre los parámetros de calidad de agua y los valores de las bandas espectrales B05, B08 y B09, presentaron valores moderados con significancias altas y moderadas. A continuación, se presenta un cuadro resumen de las correlaciones obtenidas y las ecuaciones de predicción:

Cuadro 3. Correlación de los valores de parámetros de calidad de agua y los valores de las bandas meses de febrero y julio.

Parámetro	Banda (X)	Valor r	Ecuación de regresión
Salinidad	B05 (febrero)	0.45 **	$Y = (110.216283 - (0.014810 (X)))$
	B09 (julio)	0.49 *	$Y = (7.131e+01 + (1.615e-03 *X))$
Conductividad Eléctrica	B05 (febrero)	0.49 **	$Y = (241.23289 - (0.03833 *X))$
	B09 (julio)	0.47 *	$Y = (1.513e+02 + (3.577e-03 *X))$
Sólidos Disueltos Totales	B05 (febrero)	0.57 **	$Y = (165.93169 - (0.02437 (X)))$
	B09 (julio)	0.47 **	$Y = 1.053e+02 + 12.693e-03 (X)$
pH	B08 (febrero)	0.45 *	$Y = (9.1091701 - (0.0005127 *X))$
	B05 (julio)	0.43 *	$Y = (7.1338039 + (0.0012870 *X))$

En el cuadro número 3 se puede observar que las correlaciones obtenidas entre las bandas espectrales y los parámetros de calidad de agua con sus respectivas significancias estadísticas, dos ** indican una significancia alta (valores mucho menores que el valor de significancia $\alpha = 0.05$), y un * que indica significancia moderada, también se puede observar la ecuación de regresión utilizada para cada parámetro.

5.1. Prueba de normalidad de los datos

Se aplicó la prueba de normalidad a través del histograma ver figuras 4, 5, 6, 7, 8 y 9 correspondientemente, y prueba de Shapiro-Wilk para los cinco parámetros de calidad de agua, y las bandas espectrales de la B01 - B012, se confirmó que los valores no presentan una distribución normal tanto para las bandas como para los parámetros de calidad de agua: salinidad, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y el pH.

A continuación, se presenta los histogramas de frecuencias para el comportamiento de la distribución de los datos de la banda B05 y los parámetros de calidad de agua: pH, Salinidad y Sólidos Disueltos Totales.

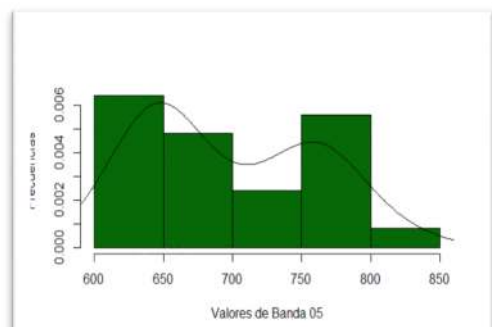


Figura 4. Histograma de frecuencias de los valores de pH.

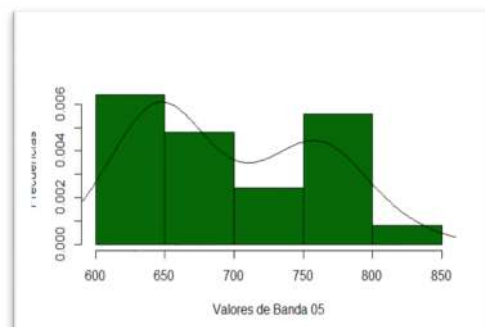


Figura 5. Histograma de frecuencias de los valores espectrales en la banda 05

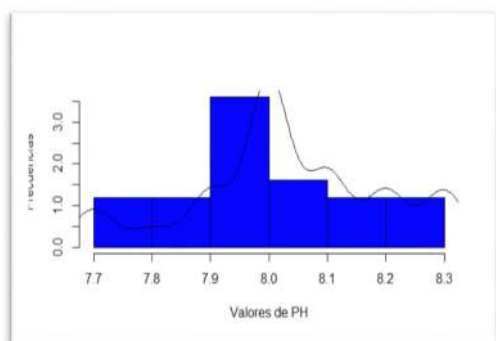


Figura 6. Histograma de frecuencias de los valores espectrales en la banda 05.

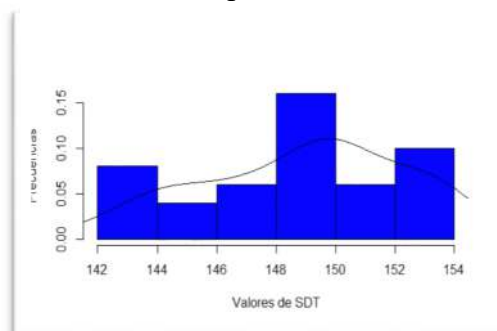


Figura 7. Histograma de frecuencias de los valores de Salinidad.

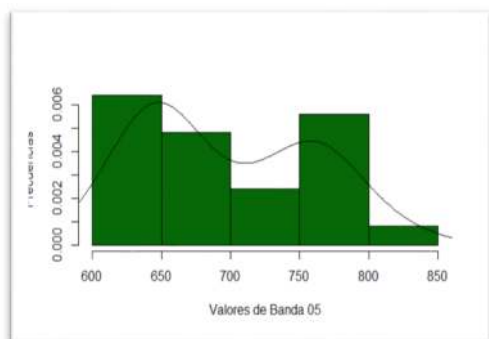


Figura 8. Histograma de frecuencias de los valores en la Banda 05.

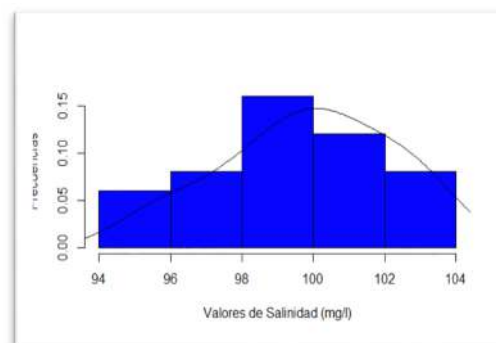


Figura 9. Histograma de frecuencia de los valores de Sólidos disueltos totales.

5.2. Dispersión de los valores de los parámetros de calidad de agua y de los valores espectrales de las bandas

A continuación, se presenta las figuras de dispersión de los parámetros con las bandas del sensor Sentinel-2 en los meses de febrero y julio.

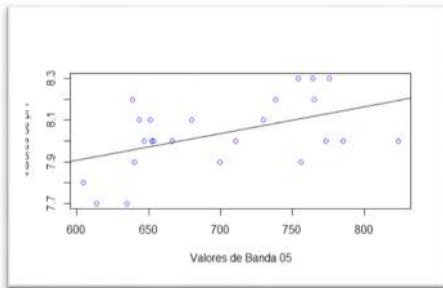


Figura 10. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con el pH febrero

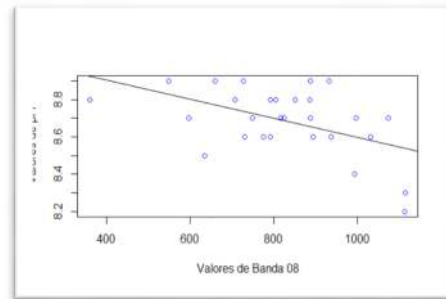


Figura 11. Dispersión de los valores espectrales de la banda 08 con el pH julio

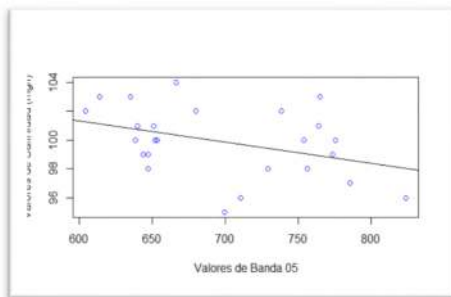


Figura 12. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con salinidad, febrero

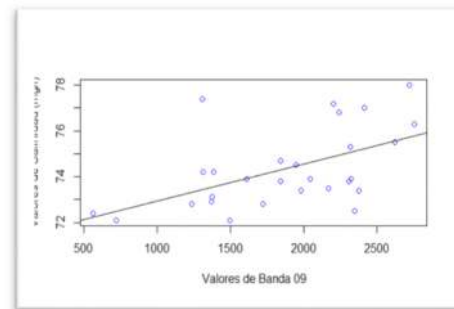


Figura 13. Dispersión de los valores espectrales de la banda 09 con salinidad, julio.

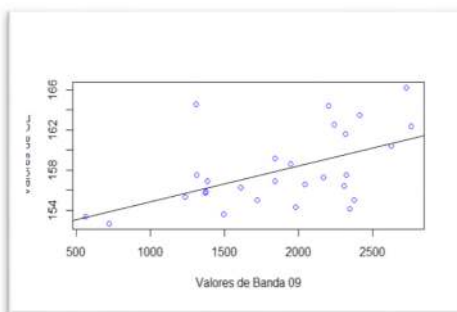


Figura 14. Dispersión de los valores espectrales de la banda 09 con sólidos disueltos totales, julio.

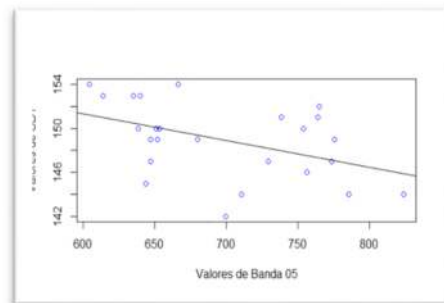


Figura 15. Dispersión de los valores espectrales de la banda 05 con sólidos disueltos totales, febrero.

Se encontraron correlaciones en el mes de febrero entre la banda espectral 05 y los parámetros de calidad de agua (Salinidad, Conductividad eléctrica, pH, Sólidos disueltos totales) así mismo estos parámetros presentaron en el mes de julio correlaciones con las bandas espectrales 08 y 09, como se puede observar en la figura 10 y 11 correspondientemente para el parámetro pH en los meses de estudio.

Para la B05 y B08 con respecto al parámetro de pH en el mes de febrero tuvo una relación con dirección positiva debido a que las observaciones presentan una agrupación en dirección superior izquierda según la figura 10 y julio relación con dirección negativa debido a que las observaciones presentan una agrupación en dirección inferior izquierda según la figura 11, y un coeficiente de correlación de 0.45, clasificado como correlación moderada, dado que la significancia es menor a 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula y se concluye que la relación entre las variables evaluadas es significativa.

Los valores espectrales de la banda 05 se utilizaron para predecir los niveles de pH, en la Laguna de Moyúa mediante la aplicación de la ecuación siguiente:

$$Y = (9.1091701 - (0.0005127 * X))$$

5.3. Modelo de regresión

Se aplicó el modelo de regresión lineal simple para generar los mapas, este consiste en la determinación ajustado (r) equivalente al 0.6685, es decir, el 66% de la variabilidad del parámetro pH es explicado o predicho por los valores espectrales de la banda 05. Esto nos demuestra que existe la probabilidad del 66% de predecir el valor de pH en el cuerpo de agua de la Laguna de Moyúa, utilizando la banda espectral 05 perteneciente al régimen espectral del Infrarrojo cercano del sensor Sentinel-2.

Al aplicar el coeficiente de correlación para el parámetro de pH en la $Y = a + bx$ y el valor de reflectancia de la banda 05 se obtiene un valor escala de pH 8.29. Correspondientemente para

los parámetros Salinidad se obtuvo un valor de 99.84928 mg/L, Sólidos Disueltos Totales se obtuvo un valor de 148.8727 mg/L.

En el mes de febrero el parámetro de calidad de agua pH, tuvo una correlación de 0.45, y una significancia de 0.02, con la banda 05, en el mes de julio tuvo una correlación de -0.43 y una significancia de 0.02 con la banda 08 estas bandas corresponden al espectro visible infrarrojo cercano, con estas correlaciones y significancias se generaron los mapas de predicción de los parámetros de calidad de agua pH (escala), Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos disueltos totales (mg/l) y Salinidad (mg/l).

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados mediante los métodos del Coeficiente de Correlación de Spearman y Pearson se verificaron que los valores tomados en campo del parámetro de calidad de agua temperatura, no presentaron correlación y significancia alguna, con las bandas espectrales, por ende, este parámetro no se puede predecir a través de la implementación del sensor en estudio.

5.4. Cartografía de los parámetros de calidad de agua a partir del sensor Sentinel-2

A continuación, se presentan los mapas de predicciones de los parámetros de calidad de agua pH, salinidad, sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, generados mediante el modelo de regresión lineal simple.

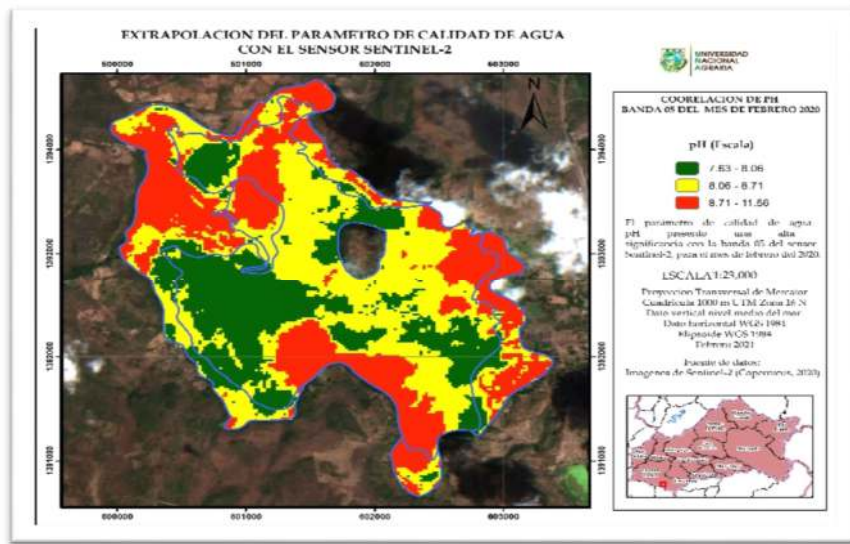


Figura 16. Mapa de predicción del parámetro pH del mes de febrero con la B05.

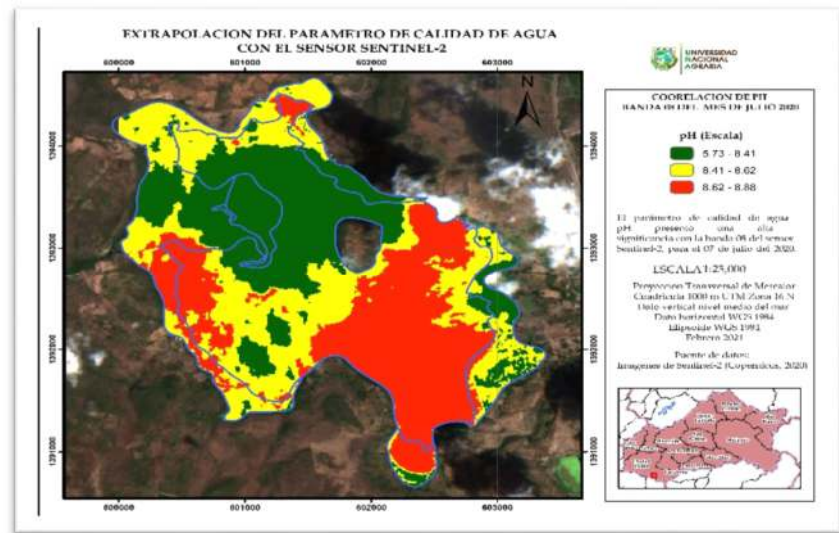


Figura 17. Mapa de predicción del parámetro pH del mes de julio con la B08.

El mapa del parámetro de pH para el mes de febrero se llevó a cabo la predicción con la banda espectral B05 obteniendo los siguientes valores Max: 10.1, Medio: 8.38, Min: 7.84 estos valores máximos están distribuidos en línea vertical de norte a sur; los valores mínimos de oeste a sur y los valores medios se encuentran dispersos en la Laguna. En el monitoreo tomado el día 07 de julio a través de la banda espectral B08 se observaron los valores predichos Max: 8.72, Medios: 8.51, Min: 6.35, los valores máximos los encontramos en el centro, oeste y sur; los mínimos se distribuyen de norte a sur, los valores medios están distribuidos en toda la Laguna.

De igual manera se realizó una predicción de los valores de pH el día 17 de julio, aquí solamente se reflejó un cambio en los rangos del parámetro que son Max: 8.86, Medio: 7.83, Min: 4.6, sin embargo la distribución espacial se observó igual a la predicción realizada el día 07 del mismo mes respectivamente; según la norma de calidad de agua OMS y Norma Técnica Obligatoria para la Clasificación de los Recursos Hídricos de la Calidad de Aguas Dulces en lagos y lagunas destinadas para balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva y subsistencia, los rangos permisibles de recreación tipo 4 son de 6.5 - 8.5, por lo tanto estos valores están dentro del rango permisible de la norma y se considera el cuerpo de agua evaluado útil para la recreación, Vidal Puerta (2017) con MODIS y Pérez Ortega (2011) con LandSat y SPOT, monitorearon este parámetro de calidad de agua y obtuvieron correlaciones con las bandas 01, 02, 03, 04, 05, 07 respectivamente con correlación de $r = 0.85$ (figura 16 y 17).

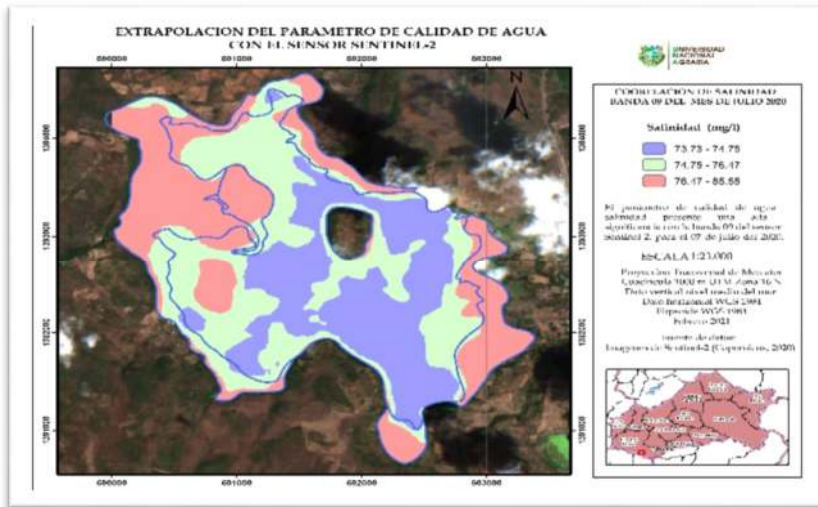


Figura 18. Mapa de predicción del parámetro salinidad del 07 de julio con la B09.

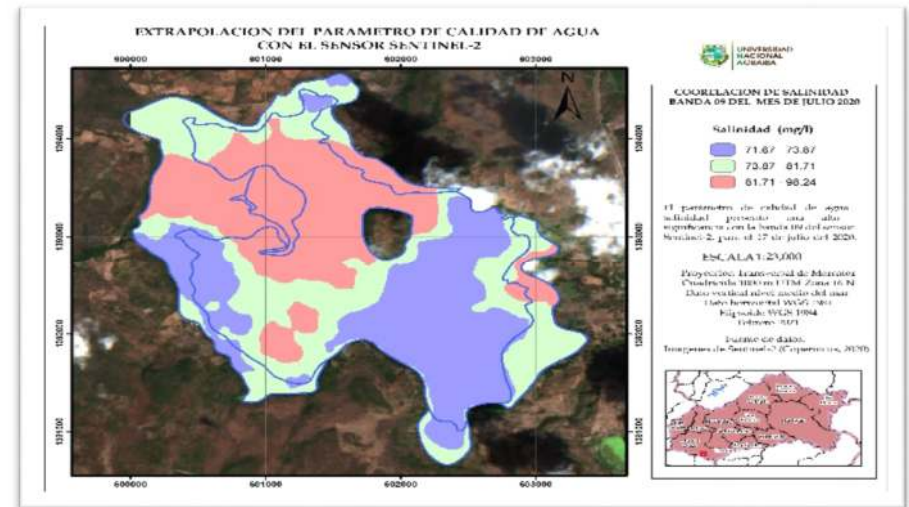


Figura 19. Mapa de predicción del parámetro salinidad del 17 de julio con la B09

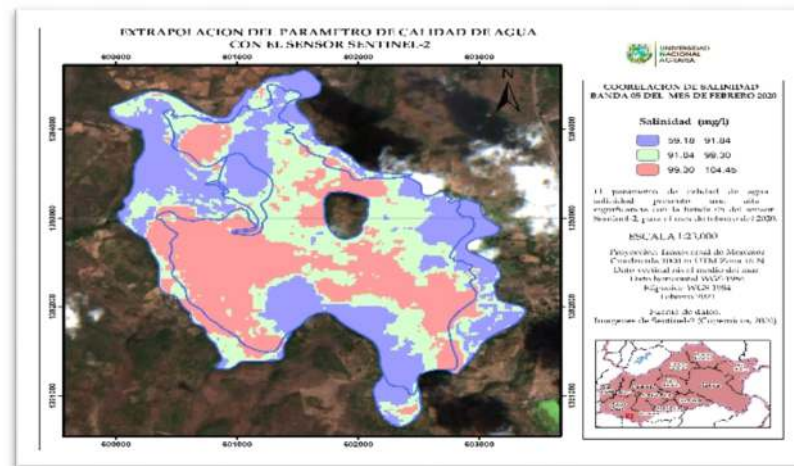


Figura 20. Mapa de predicción del parámetro salinidad del mes de febrero con la B05.

El mapa generado del parámetro de Salinidad predichos con la banda espectral B05 correspondiente al mes de febrero se pueden observar que los valores encontrados fueron Max: 101.87 mg/l, Medio: 95.53 mg/l, Min: 71.51 mg/l, distribuyéndose espacialmente los valores máximos en las direcciones oeste, norte y este, los valores mínimos de norte a sur y este, los valores medios están distribuidos en la Laguna. Así mismo el parámetro se monitoreo el día 07 de julio con la banda espectral B09 obteniéndose los siguientes valores Max: 81.01 mg/l, Medio: 75.61 mg/l, Min: 74.24 mg/l, estos son distribuidos espacialmente sobre la Laguna, los valores máximos los encontramos en el norte, sur y este, los valores mínimos están distribuidos al igual que los valores medios al centro de la Laguna.

También este parámetro se monitoreo el día 17 de julio con la banda espectral B09 encontrándose valores de predicción Max: 89.97 mg/l, Medio: 77.79 mg/l, Min: 72.77 mg/l, los valores máximos se localizan al norte, este y oeste, los valores mínimos de oeste a sur y los valores medios están dispersos; según las normas de calidad de agua OMS y CAPRE y las normas de clasificación de recursos hídricos NTON Norma Técnica Obligatoria para la clasificación de los Recursos Hídricos de la Calidad de Aguas Dulces en lagos y lagunas destinadas para balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva y subsistencia los rangos permisibles de recreación tipo 4 no tiene registro de salinidad pero existe un estudio del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), en el cual determina que el rango permisible de salinidad en cuerpos de agua dulces es de 1,000 mg/l, como los valores de la salinidad está por debajo de los 1,000 mg/l se considera que el cuerpo de agua puede ser utilizado para la recreación, este parámetro se ha monitoreado con SPOT por Pérez Ortega (2011) teniendo correlaciones y significancias con la banda 03 y una correlación de $r = 0.55$ (figura 18, 19 y 20).

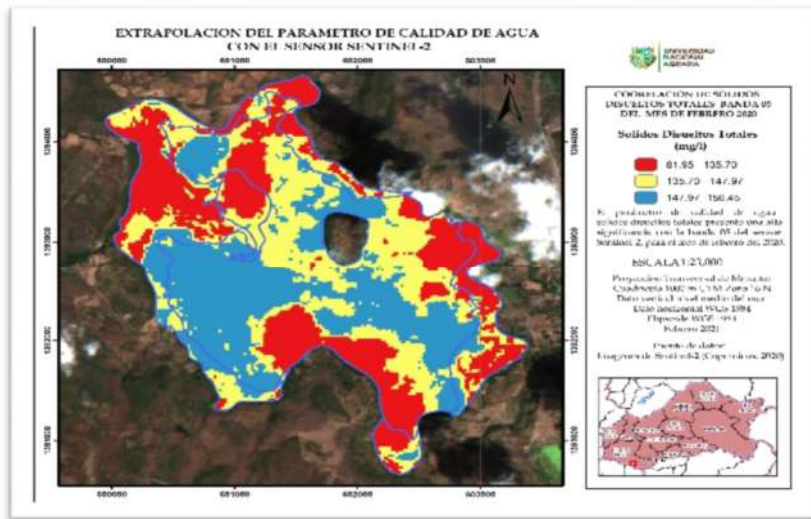


Figura 21. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del mes de febrero con la B05.

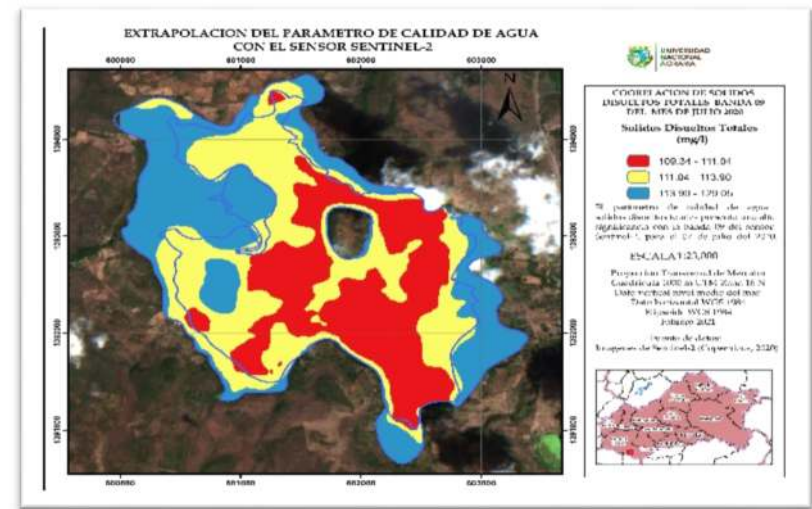


Figura 22. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del 07 de julio con la B09.

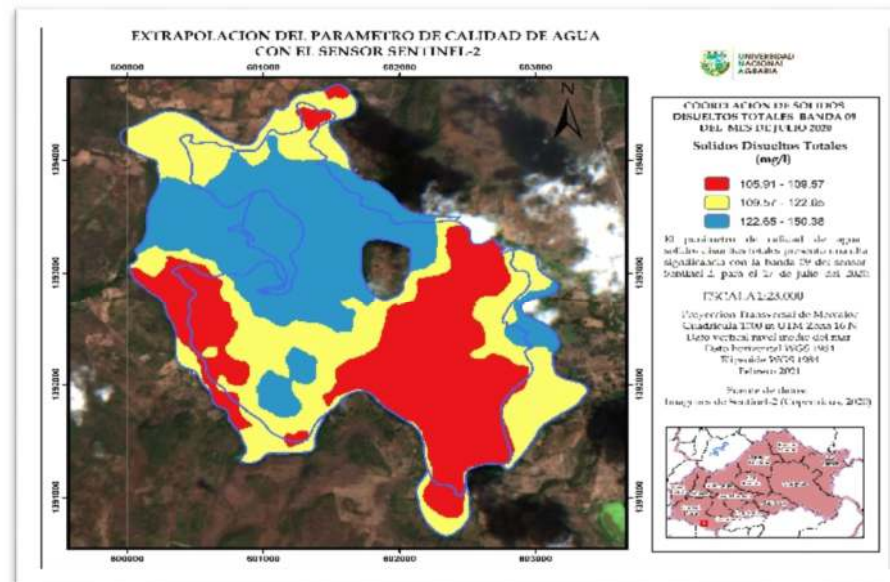


Figura 23. Mapa de predicción del parámetro sólidos disueltos totales del 17 de julio B09.

El mapa generado del parámetro Sólidos disueltos totales los valores predichos en el mes de febrero a través de la banda espectral B05 fueron de Max: 152.21 mg/l, Medio: 141.83 mg/l, Min: 108.82 mg/l estos tienen una distribución espacial que corresponde, los valores máximos se ubican en el oeste, norte a sur, los valores mínimos al sur, este y norte y los valores medios se encuentran distribuidos en toda la Laguna. También se realizó la predicción del parámetro el día 07 de julio, esta se determinó utilizando la banda espectral B09, ubicada en el régimen espectral del infrarrojo de onda corta, obteniendo valores en los rangos de Max: 121.47 mg/l, Medio: 112.47 mg/l, Min: 110.19 mg/l, distribuyéndose los valores máximos en toda el área inundable de la Laguna, los mínimos están en el centro, los medios están distribuidos en toda la Laguna.

Así mismo en el mes de julio el día 17 se determinaron valores de sólidos disueltos totales predichos con la banda espectral B09 los cuales fueron de Max: 136.51 mg/l, Medio: 116.11 mg/l, Min: 107.74 mg/l los valores máximos se ubican en el centro y en las orillas del este a oeste, los mínimos de sur a este, los valores medios están distribuidos en la Laguna; según la norma de calidad de agua OMS y NTON, Norma Técnica Obligatoria para la clasificación de los Recursos Hídricos de la Calidad de Aguas Dulces en lagos y lagunas destinadas para balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva y subsistencia los rangos permisibles de recreación tipo 4 son de 1,000 a 30,000 mg/l, como los valores de sólidos disueltos totales (SDT) esta por debajo de los 1,000 a 30,000 mg/l, se considera el cuerpo de agua en estudio útil para la recreación; este parámetro lo monitoreo Torbick en el 2015 con LandSat y OLI, obtuvieron correlaciones con las bandas 02, 03, 04 con correlaciones de $r = 0.80$ (figura 21, 22 y 23 respectivamente).

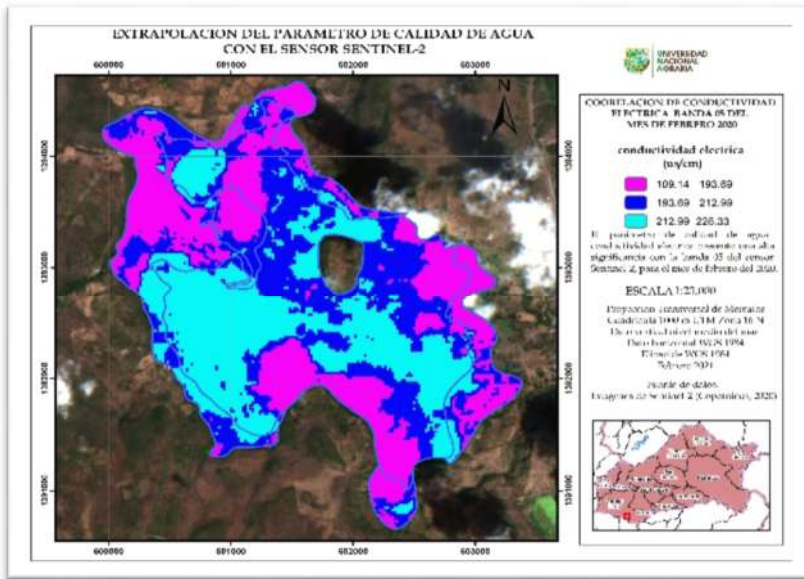


Figura 24. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del 07 de julio con la B09.

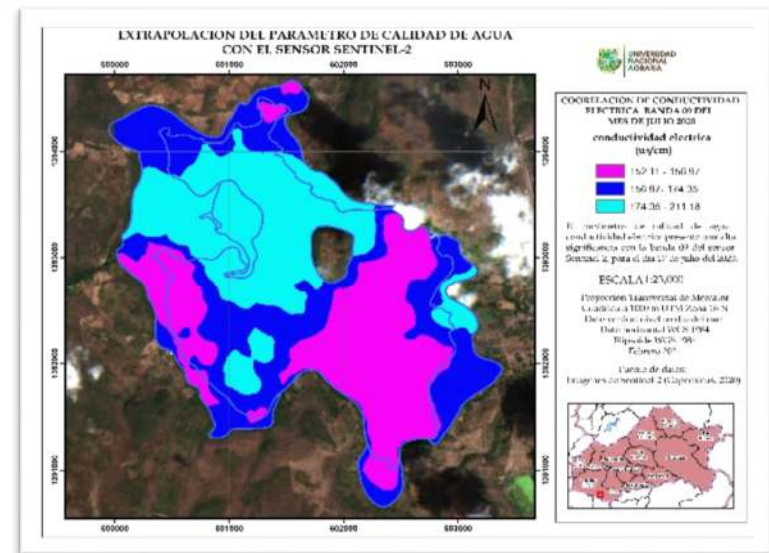


Figura 25. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del 17 de julio con la B09.

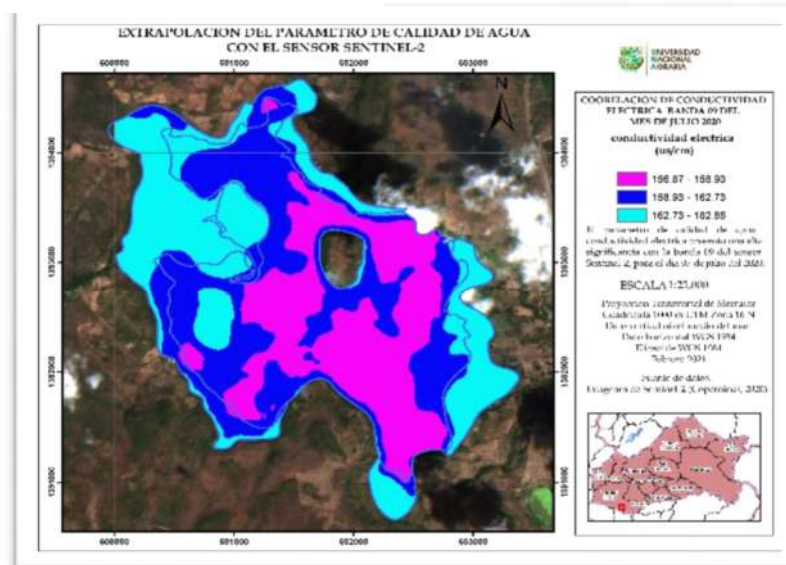


Figura 26. Mapa de predicción del parámetro conductividad eléctrica del mes de febrero con la B05

El mapa del parámetro de calidad de agua Conductividad eléctrica determinado a través de la banda espectral B05 se generaron los valores siguientes Max: 219.66 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Medio: 203.34 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Min: 151.41 $\mu\text{S}/\text{cm}$, distribuyéndose los valores máximos se ubican de oeste a sur, centro y norte, los mínimos en el área inundable, y los medios se encuentran distribuidos en la Laguna. Correspondientemente se monitoreo el parámetro en el mes de julio para el día 07, esta se realizó con la banda espectral B09, encontrándose los valores predichos a continuación Max: 172.79 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Medio: 160.83 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Min: 157.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo estos ubicados los valores máximos en el área inundable, los mínimos se ubican en el centro de la Laguna, los valores medios están distribuidos en la Laguna.

Por último, se realizó un segundo monitoreo en el mes de julio con el sensor remoto en estudio, utilizando la banda espectral B09 para el día 17 en la que se predijeron los siguientes valores Max: 192.76 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Medio: 165.96 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Min: 154.54 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores máximos se ubican en el centro, este y oeste, los mínimos de sur a oeste, los medios están en toda la Laguna, según la norma de calidad de agua NTON, Norma Técnica Obligatoria para la clasificación de los Recursos Hídricos de la Calidad de aguas Dulces en lagos y lagunas destinadas para balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva y subsistencia los rangos permisibles de recreación tipo 4-A son de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$; como los valores de la Conductividad eléctrica está por debajo de los 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se considera apta para el uso de recreación; Pérez Ortega y Vidal Puerta monitorearon este parámetro con ayuda de los sensores MODIS, LandSat y SPOT teniendo correlaciones con las bandas 03 y 04 con correlación de $r = 0.78$ (figura 24, 25 y 26 respectivamente).

VI. CONCLUSIONES

En la evaluación de la utilidad del sensor Sentinel-2 para predecir parámetros físicos químicos en cuerpos de agua se concluye que dicho sensor permite la predicción de 4 parámetros físicos químicos los cuales son: pH, Salinidad, Sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica. Esos valores de predicción pueden ser utilizados en plano o programas a pequeña escala como los programas de desarrollo territorial entre ellos planes turísticos, ordenamiento municipal, conservación de fuentes de agua, riego agrícola y saneamiento de cuerpo de agua.

Se determinó que las mejores regiones espectrales del sensor Sentinel-2 con los métodos estadísticos de correlaciones que experimentan cambios de la reflectividad en el agua, siendo la región del espectro del infrarrojo cercano que corresponde a las bandas B05 y B08, y la banda B09 del infrarrojo de onda corta, extendiendo su rango de radiación electromagnética entre los 705 nm a 940 nm, en donde se obtuvieron mejores correlaciones con 4 parámetros físico-químicos evaluados en el estudio.

De los parámetros de calidad de agua evaluados en el presente estudio, los que presentaron correlaciones moderadas y con significancias estadísticas fueron salinidad, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y pH con los valores de las bandas espectrales B05, B08 y B09 del sensor Sentinel-2.

La cartografía de los parámetros físico-químicos fue generado mediante los resultados del modelo de correlación lineal simple con las bandas espectrales del sensor, la espacialización de los valores extrapolados para los parámetros se determinó utilizando las herramientas SIG. Se encontró que los valores determinados están dentro de los rangos permisibles de acuerdo a las normas de calidad de agua OMS y Norma Técnica Obligatoria para la Clasificación de los Recursos Hídricos de la Calidad de Aguas Dulces en lagos y lagunas destinadas para balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva y subsistencia.

VII. RECOMENDACIONES

Los aportes del presente trabajo incluyen el desarrollo de un proceso metodológico semiautomatizado y datos de referencia que facilitan el establecimiento de un monitoreo de parámetros físico-químicos de calidad de agua enfocado a lagos y lagunas. Se considera que los resultados serán de mucha utilidad para instituciones gubernamentales, academia y otros organismos interesados en la preservación del recurso hídrico y los ecosistemas de humedal.

Replicar este estudio en otros cuerpos de agua con mayor dimensión del área, incrementar el número de muestras recolectadas de campo para obtener un mejor valor del coeficiente de determinación R^2 , realizar el mismo día del paso del satélite, ya que esto minimiza la incertidumbre alrededor de los datos colectados, seleccionar sitios donde no presente mucha nubosidad, utilizar sensor con una resolución más alta y otros parámetros como clorofila-a y la turbidez del agua, realizar una estimación de los modelos con regresión lineal múltiple, dar seguimiento continuo de la calidad del agua de esta laguna con las herramientas que integren datos in situ, laboratorios y de teledetección alargar el periodo de estudio.

Se recomienda replicar el presente estudio en diferentes cuerpos de agua de tamaños varios, considerar también aumentar el periodo de remuestreo en el mes que permita obtener valores medios tanto los tomados en campo como los observados por los sensores remotos, esto podría disminuir los errores de predicción por incidencia nubes sobre el cuerpo de agua.

VIII. LITERATURA CITADA

- Amado Álvarez, Jesús Pilar, & Pérez Cutillas, Pedro, & Ramírez Valle, Orlando, & Alarcón Cabañero, Juan José (2016). *Análisis De La Calidad Del Agua En Las Lagunas De Bustillos Y De Los Mexicanos (Chihuahua, México)*. *Papeles De Geografía*, (62), Undefined-Undefined. [Fecha De Consulta 25 De septiembre De 2019]. Issn: 0213-1781 Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/407/40749621009.pdf>
- Amado-Álvarez, J., Pérez-Cutillas, P., Alatorre-Cejudo, L., Ramírez-Valle, O., Segovia-Ortega, E., & Alarcón-Cabañero, J. (2018). *Análisis multispectral 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), 49 - 77. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 <https://doi.org/10.15359/rgac.62-1.2>
- Ambiental, C. T. (1999): Norma para la clasificación de los recursos hídricos. In *Norma técnica obligatoria nicaragüense* (pp. 27-37). ENACAL. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/b92aeea87dac762406257265005d21f7/1a3a99b77290b980062573df00594022?OpenDocument>
- Artero, C., Noguera Cervera, M., & Manuel Lázaro, A. (2012). *PH sensor. Instrumentation viewpoint*, (13), 23-25. Recuperado el día 16 de octubre del 2019 <https://www.carbotecnia.info/enciclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>
- Bazán, R., Corral, M., Pagot, M., Rodríguez, A., Oroná, C., Rodríguez, M. I., ... & Busso, F. (2005). *Teledetección y modelado numérico para el análisis de la calidad de agua del embalse Los Molinos, Córdoba, Argentina*. *Revista "Ingeniería hidráulica en México"*, 20(2), 121-135. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 https://www.researchgate.net/profile/Nancy_Larrosa/publication/228669812_Teledeteccion_y_modelado_numerico_para_el_analisis_de_la_calidad_de_agua_del_embalse_Los_Molinos_Cordoba_Argentina/links/02e7e526726d708e23000000/Teledeteccion-y-modelado-numerico-para-el-analisis-de-la-calidad-de-agua-del-embalse-Los-Molinos-Cordoba-Argentina.pdf
- Betancourt Aguilar, Carmen. (2016): *La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan/ Water quality for irrigation water, main measurement indicators and processes that affect them*. *Agroecosistemas*. 4. 47-61. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de https://www.researchgate.net/publication/321951119_La_calidad_del_agua_para_el_riego_Principales_indicadores_de_medida_y_procesos_que_la_impactan_Water_quality_for_irrigation_water_main_measurement_indicators_and_processes_that_affect_them
- Bonansa, M., Ledesma, C., Rodríguez, C., & Delgado, A. R. S. (2012). *Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Rio Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B*. *Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of*

- Applied Science*, 7(3), 61-71. Recuperado el día 10 de octubre de 2019
<https://www.redalyc.org/pdf/928/92824947015.pdf>
- 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), 67-78. Recuperado el día 15 de noviembre del 2019 <https://riunet.upv.es/handle/10251/114907>
- Camargo, J. A., & Alonso, A. (2007). *Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Revista Ecosistemas*, 16(2). Recuperado el día 16 de octubre del 2019 <https://quimica.laguia2000.com/general/dioxido-de-nitrogeno>
- Cano Casas, L., & Escobar Martínez, J. F. (2011). *Diseño de redes de monitoreo apoyadas por herramientas SIG y modelación geoespacial. Publicado en el 2011 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Published in 2010 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*, 18. Recuperado el día 10 de octubre de 2019
http://cursosihlla.bdh.org.ar/ET_Local_Regional_2014/Clase_3/3_Material_Lectura/AquaLAC-Numero1-Vol3.pdf#page=24
- CAPRE, N. (1994): *Normas de calidad del agua para consumo humano. Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centro América Panamá y República Dominicana. Primera edición revisada de, 20-21*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
de http://biblioteca.enacal.com.ni/bibliotec/Libros/pdf/CAPRE_Normas_Regional.pdf
- Castillo Lara, F. S. (2018): *Evaluación de la calidad ambiental del humedal refugio de vida silvestre sistema lagunar de Tisma, Masaya, Nicaragua (Doctoral dissertation, Universidad nacional Agraria)*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de
<http://repositorio.una.edu.ni/3682/>
- Chavarría López, A. K., & González Obregón, J. V. (2016). *Valoración participativa de servicios eco sistémicos prestados por el humedal RAMSAR de Moyúa, ciudad Darío, Matagalpa II semestre del 2015 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua)*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de
<http://repositorio.unan.edu.ni/2989/>
- Chediack, Sandra. (2018): *El agua y los humedales de San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
de https://www.researchgate.net/publication/322926007_El_agua_y_los_humedales_de_San_Cristobal_de_las_Casas_Chiapas_Mexico
- Del Milenio, E. D. L. E. (2003): *Ecosistemas y bienestar humano. Marco para la Evaluación. Resumen. Informe del Grupo de Trabajo sobre Marco Conceptual de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (EM)*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
de <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>

- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz, A., Pereira, M., Pasqualotto, N., Gibaja, G., ... & Sanchis, J. (2016). *Aplicaciones de Sentinel-2 a estudios de vegetación y calidad de aguas continentales*. In *Conference: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota Y Sistemas de Información Geográfica (SELPER)*. Recuperado el día 11 de octubre del 2019
https://www.researchgate.net/profile/Javier_Sanchis_Munoz/publication/311572126_Aplicaciones_de_Sentinel-2_a_estudios_de_vegetacion_y_calidad_de_aguas_continentales/links/5ae0ddfa458515c60f65f14c/Aplicaciones-de-Sentinel-2-a-estudios-de-vegetacion-y-calidad-de-aguas-continenciales.pdf
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Peña, R., & Moreno, J. (2014): *Modelo empírico para la determinación de clorofila-a en aguas continentales a partir de los futuros Sentinel-2 y 3. Validación con imágenes HICO*. *Revista de Teledetección*, (41), 37-47. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/44604/2295-8912-1-PB.pdf?sequence=1>
- Dietsch, L., & Novoa, E. (2010): *Diagnóstico Territorial Integral del municipio de Ciudad Darío*. *Encuentro*, (86), 42-54. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
<http://repositorio.uca.edu.ni/1112/>
- Domínguez, J. A. (2002): *Estudio de la calidad del agua de las lagunas de gravera mediante teledetección*. Tesis Doctoral Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
https://books.google.com.ni/books?id=6ywH9R9MSpgC&pg=SL1-PA18&lpg=SL1-PA18&dq=Estudio+de+la+calidad+del+agua+de+las+lagunas+de+gravera+mediante+teledetecci%C3%B3n.+Teisis&source=bl&ots=TJq1P2wYbF&sig=ACfU3U0JwB8KI-MTilqweeMggG50Xdsuyw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwi73dv50_HkAhUruVvKHUsYB6oQ6AEwAXoEAgQAQ#v=onepage&q=Estudio%20de%20la%20calidad%20del%20agua%20de%20las%20lagunas%20de%20gravera%20mediante%20teledetecci%C3%B3n.%20Teisis&f=false
- González, F., Ruiz, J., & Acosta, F. (2014): *Tutorial de teledetección espacial*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://escuela-doctorado.uah.es/tesis/tesis.asp?CdPlan=D92&expe=156&proy=1>
- Hernández, M. E. (2010): *Suelos de humedales como sumideros de carbono y fuentes de metano*. *Terra Latinoamericana*, 28(2), 139-147. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019
<https://www.globalnature.org/bausteine.net/f/7880/HumedalesyCarbono.pdf?fd=2>
- Hernández, R. J. A. (2018). *Estimación de parámetros ambientales a partir de imágenes Landsat 8 y mediciones in situ, en Bahía de La Paz, BCS*. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/2734>
- Hernández García, M. A. (2017). *Aplicación de SIG en la caracterización de las aguas de dos acuíferos de las comarcas de la Marina Alta-Safor (Doctoral dissertation)*. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 <https://riunet.upv.es/handle/10251/88840>


- INETER, A., & UNI, G. P. (2014): *Cuencas Hidrográficas de Nicaragua bajo la metodología Pfafstetter*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://www.ana.gob.ni/DocumentosSiAGUA/slideshow/Album%20Cuencas%20Nic%20Revisado.pdf>
- Iris Rodríguez, C., Duque, C., Calvache, M. L., & López Chicano, M. (2010). *Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero Motril-Salobreña, España*. *Geogaceta*, (49), 107-110. Recuperado el día 16 de octubre del 2019 https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130sp.pdf
- Jiménez-Ramón, J. A. (1999). *Los humedales de América Central: su importancia ecológica y económica*. *WWF Centroamérica*, 2, 4-6. Recuperado el día 16 de octubre del 2019 http://fundaciondelrio.org/files/doc/1384209065_Humedales%20de%20Nicaragua.pdf
- Madriz Flores, N. P. (2017): *Evaluación de la calidad física química y bacteriológica del agua de la laguna de Moyúa, Matagalpa (Humedal Ramsar N° 1980), periodo 2015-2016 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua)*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://repositorio.unan.edu.ni/8753/>
- Martínez García, I. (2017): *Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12587/Martinez%20Garcia%20Ines.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). *El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización*. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2), 0-0. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017
- Montoya, C., Loaiza, D., Cruz, C., Torres, P., Escobar, J. C., & Delgado, L. G. (2009). *Propuesta metodológica para localización de estaciones de monitoreo de calidad de agua en redes de distribución utilizando sistemas de información geográfica*. *Revista Facultad De Ingeniería*, (49), 129-140. Recuperado el día 10 de octubre de 2019 <http://aprendeenlinea.udea.edu.co/revistas/index.php/ingenieria/article/view/15967>
- Mouriño, C., & Fraga, F. (1985). *Determinación de nitratos en agua de mar*. Recuperado el día 16 de octubre del 2019 <https://www.ecoportal.net/temas-especiales/nitratos-en-el-agua-potable/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2013): *Afrontar la escasez del agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>

- Ott, R. L., & Longnecker, M. T. (2015). *An introduction to statistical methods and data analysis*. Nelson Education. Recuperado el día 9 de marzo del 2021 de <http://repositorio.ub.edu.ar/handle/123456789/4539>
- Perdomo Vanegas, A. (2017). *Predicción de parámetros físico químicos de calidad del agua mediante el uso de sensores remotos: caso estudio Embalse del Neusa (Master's thesis, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano)*. Recuperado el día 11 de octubre de 2019 <https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/1751>
- Pereira-Sandoval, M. A., Ruiz-Verdú, A., Jiménez, J. C., Tenjo, C., Delegido, J., Gibaja, G., ... & Moreno, J. (2016). *Ajuste de los algoritmos OC2 y OC3 de MODIS para la obtención de la concentración de clorofila-a en lagos oligotróficos con Landsat-8: validación en el lago Titicaca*. *Revista de Topografía AZIMUT*, (7), 45-52. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 <https://go.galegroup.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA559523961&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=abs&issn=1909647X&p=IFME&sw=w>
- Pérez Ortega, M. (2011). *Aplicaciones de la teledetección y sig. en la caracterización de humedales en la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid)*. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 https://eprints.ucm.es/13964/2/TFM_Maria_Perez.pdf
- Polvorinos, A. J., Forteza, M., & Hernández, M. J. (2001). *Monitorización de parámetros hídricos del embalse de Aracena mediante imágenes Landsat*. *Teledetección. Medio Ambiente y Cambio Global*, 334-337. Recuperado el día 11 de octubre del 2019 <http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida73.pdf>
- Rojas, R. (2002): *Guía para la vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano*. Lima: CEPIS/OPS. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guia/calde/2sas/d25/075%20vigilanciaycontrol_calidaddeagua/cepis_guia_vigilanciaycontrol_calidaddeagua.pdf
- Ruiz Ramírez, D. C. *Método de estimación de sólidos suspendidos totales como indicador de la calidad del agua mediante Imágenes satelitales* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá).recuperado el día 11 de octubre del 2019 <http://www.bdigital.unal.edu.co/57367/>
- Salvatierra, S. T. (2003): *Plan de gestión y desarrollo integral en subcuenca las playitas, Moyúa y Tecomapa, de la cuenca del río grande de Matagalpa, municipio de ciudad Darío*: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-Managua. Centro para la investigación en recursos acuáticos de Nicaragua (CIRA/UNAM). *Managua, Nicaragua*. Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <http://repositorio.unan.edu.ni/2354/>
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). *Correlation coefficients: appropriate use and interpretation*. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. Recuperado el día 25 de febrero del 2021 <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R., & Moreno, J. (2015). *Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes*

- Landsat-8. UD Y La geomática, (9), 37-46. Recuperado el día 15 de noviembre del 2019 <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/UDGeo/article/view/7942>*
- Torbick, N. y Corbiere, M. (2015). *Una evaluación de mapeo multiescala de las floraciones de algas nocivas cianobacterianas del lago Champlain. Revista internacional de investigación ambiental y salud pública, 12 (9), 11560-11578.* Recuperado el día 15 de noviembre del 2019 <https://www.mdpi.com/1660-4601/12/9/11560/htm>
- Truque, P. (2011): Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. *Organización de Estados Americanos, Washinton DC, EE. UU.* Recuperado el día 27 de septiembre del 2019 de <https://www.oas.org/dsd/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>
- Vidal Puerta, C. P., & Murillo Monsalve, J. S. *Monitoreo de factores físico-químicos que inciden en las floraciones de algas nocivas en el Mar Caribe Colombiano, usando imágenes satelitales [recurso electrónico]* (Doctoral dissertation). Recuperado el día 11 de octubre del 2019 <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/handle/10893/10337>
- Wilchez, C. D. M., Ospina, A. D. M., Enrique, C., Marín, M., & García, P. A. G. (2017). *Análisis geoestadístico y predicción espacial para el índice de calidad del agua en el río Bogotá. In Global Partnerships for Development and Engineering Education: Proceedings of the 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, July 19-21, 2017, Boca Raton, FL, United States (p. 104). Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions.* Recuperado el día 11 de octubre del 2019 http://www.laccei.org/LACCEI2017-BocaRaton/full_papers/FP104.pdf
- Yrigoyen, C. C. (2003). *Econometría espacial aplicada a la predicción-extrapolación de datos microterritoriales. Dirección General de Economía y Planificación.* Recuperado el día 16 de abril del 2020 https://www.researchgate.net/profile/Coro-Chasco/publication/256116969_Econometria_espacial_aplicada_a_la_prediccion-extrapolacion_de_datos_microterritoriales/links/02e7e521d2ac59ff20000000/Econometria-espacial-aplicada-a-la-prediccion-extrapolacion-de-datos-microterritoriales.pdf
- Zamora, J. R. (2009). *Parámetros físicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. Pensamiento Actual, 9(12), 125-134.* Recuperado el día 16 de octubre del 2019 https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/dureza_de_aguas.asp

IX. ANEXOS

Anexo 1. Características del equipo de campo Multiparamétrico de bolsillo.

EQUIPO DE CAMPO	
<p>Medidor digital de: conductividad eléctrica, Sólidos Disueltos, Salinidad y pH, marca Extech Exstik II, de autocompensación de temperatura 2% por °C (EC500).</p> <p>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. 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.</p>	 A vertical, handheld digital water quality tester. It has a green top section with a display screen showing '14.73'. Below the screen are several buttons and a small analog bar graph. The bottom section is white with a grey probe tip. The brand name 'EXTECH' is visible at the top and 'EXSTIK II' at the bottom.

Anexo 2. Ubicación geográfica de los puntos muestreados el 27-02-2020.

ID	X	Y
1	602068	1393483
2	602189	1393300
3	602613	1392994
4	602554	1392625
5	602586	1392041
6	602407	1391457
7	602134	1391733
8	601290	1391514
9	600867	1391728
10	600564	1392157
11	600622	1392618
12	600773	1392742
13	600652	1392925
14	601133	1393204

ID	X	Y
15	601224	1393204
16	601284	1393388
17	601192	1393572
18	600980	1393787
19	600740	1393632
20	600589	1393663
21	600709	1393878
22	600920	1393909
23	601070	1394064
24	601220	1394279
25	601432	1393942
26	601614	1393697
27	601676	1393451
28	601917	1393360

Anexo 3. Ubicación geográfica de los puntos muestreados el 20-07-2020.

ID	X	Y
1	602530	1393354
2	602560	1393122
3	602565	1392859
4	602586	1392546
5	602562	1391955
6	602493	1391483
7	602455	1391265
8	602351	1391035
9	602256	1391219
10	602184	1391541
11	602103	1391876
12	601867	1392170
13	601718	1392013
14	601564	1391909
15	601374	1392077

ID	X	Y
16	600852	1392330
17	600899	1392471
18	600986	1392714
19	601223	1392951
20	601262	1393167
21	601321	1393167
22	601174	1393646
23	600958	1393760
24	600774	1393777
25	601110	1393959
26	601388	1393775
27	601689	1393657
28	601764	1393561
29	601917	1393464
30	602224	1393373

Anexo 4. Comparación de los parámetros físicos-químicos con los rangos permisibles de las normas para uso de pesca y recreación. (fuente propia, 2020).

Parámetro	Unidad de medida	Limite Rango máximo-mínimo	NTON			Resultados promedio
			Para la clasificación de los recursos hídricos de la calidad de aguas dulce en lagos y lagunas	OMS	CAPRE	
PH	Escala	0-14	6.5 - 8.5	6.5-8.5	6.5- 8.5	8.37
Conductividad eléctrica	(S/m)	0,04- >100000	-----	----- ----	400	261.69
Solidos totales disueltos	Mg/l	500	30000	----- ---	1000	154.81
Salinidad	ppm				----- 1000	104.77
Temperatura	°C	28.6-31.6		10-30	18°c- 30°c	27.40

Anexo 5. Comparación de las bandas de los sensores remotos Sentinel-2, LandSat, Modis, Aster y Formosat. (Fuente propia,2020).

Espectro electromagnético	Bandas espectrales					
	Sentinel-2	LandSat 8	LandSat 5 y 7	Modis	Áster	Formosat-2
Ultra Azul	B1(443)	B1(0.43-0.45)				
Azul	B2 (490)	B2(0.45-0.51)	B1(0,45-0,52)	B3(0.459-0.479)		B1(0.45-0.90)
Verde	B3 (560)	B3(0.53-0.59)	B2(0,52-0,60)	B4(0.545-0.565)		B2(0.52-0.60)
Rojo	B4(665)	B4(0.64-0.67)	B3(0,63-090)	B1(0.62-0.67)		B3(0.63-0.69)
visible infrarrojo cercano	B5(705)	B5(0.85-0.88)	B4(0,76-0,90)	B2(0.841-0.876)	B1(0.52-0.60)	B4(0.76-0.90)
visible infrarrojo cercano	B6(740)	B6(1.57-1.65)	B5(1,55-1,75)		B2(0.63-0.69)	
visible infrarrojo cercano	B7(783)	B7(2.11-2.29)	B6(10,40-12,50)		B3N(0.78-0.86)	
visible infrarrojo cercano	B8(842)	B8(0.50-0.68)	B7(2,08-2,35)		B3B(0.78-0.86)	
visible infrarrojo cercano	B8a(865)	B9(1.36-1.38)	B8(0.52-0.90)			
Onda corta infrarroja	B9(940)	B10(10.60-11.19)		B5(1.230-1250)	B4(1.60-1.70)	
Onda corta infrarroja	B10(1375)	B11(11.50-12.51)		B6(1.628-1.652)	B5(2.145-2.185)	
Onda corta infrarroja	B11(1610)			B7(2.105-2.155)	B6(2.185-2.225)	
Onda corta infrarroja	B12(2190)				B7(2.235-2.285)	
Onda corta infrarroja					B8(2.295-2.365)	
Onda corta infrarroja					B9(2.360-2.430)	
Infrarrojo térmico					B10(8.125-8.475)	

Infrarrojo térmico					B11(8.475 -8.825)	
Infrarrojo térmico					B12(8.925 -9.275)	
Infrarrojo térmico					B13(10.25 -10.95)	
Infrarrojo térmico					B14(10.95 -11.65)	

Anexo 6. Levantamiento de parámetros físico-químicos en la Laguna de Moyúa

