



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

**CALIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA DE TRES PALOS,
MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA, MUNICIPIO DE
ACAPULCO, GUERRERO**

TESIS

Que para obtener el título de

BIÓLOGA

PRESENTA

LUCERO CLARETH APARICIO MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

M. EN C. ELISEO CANTELLANO DE ROSAS



Trabajo realizado por el apoyo del programa

UNAM-DGAPA- PAPIME PE209918

CIUDAD DE MÉXICO

2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia.

A mis padres, abuelo y hermana por apoyarme en cada decisión y proyecto que he tomado en esta vida

A mi **Universidad Nacional Autónoma de México** en especial a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** por permitirme ser la profesional que soñé desde la infancia.

A mi asesor M.en C. Eliseo Cantellano de Rosas por brindarme su apoyo, su paciencia y su conocimiento.

A mis amigos que siempre han estado conmigo en este camino y a los biólogos profesionales que me han orientado y brindado su apoyo y conocimiento.

Al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación por el apoyo económico recibido durante el proyecto.

Contenido

Resumen	5
I. Introducción.....	6
II. Marco Teórico	9
II.1. Lagunas Costeras en México.....	9
II.2. Calidad del agua.....	11
II.2.1 Temperatura:	11
II.2.2 pH:.....	12
II.2.3 Transparencia:	13
II.2.4 Conductividad eléctrica:.....	13
II.2.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno:.....	14
II.2.6 Demanda Química de Oxígeno:.....	14
II.2.7 Oxígeno Disuelto:	14
II.2.8 Nitritos:	16
II.2.9 Nitratos:	16
II.2.10 Amonio:.....	16
II.2.11 Coliformes:	17
II.2.12 Escherichia coli (E. coli)	18
II.3. Percepción remota	20
II.4. Percepción remota y calidad del agua	29
III. Problemática ambiental y justificación de la investigación	31
IV. Objetivos	32
V. Hipótesis.....	32
VI. Diseño de la investigación.....	32
VII. Resultados y discusión.....	41
VII.1. Parámetros de calidad del agua	41
VII.2. Índice de calidad del agua.	58
VII.3. Características espectrales del cuerpo acuático.....	60
VIII. Conclusiones	84
IX. Bibliografía	85
X. Recomendaciones.....	92

Índice de figuras

Figura 1. Laguna de Tres Palos (Guerrero, 2007).	10
Figura 2. Escala de pH (Cruz, 2014).....	13
Figura 3. Reacción de formas de nitrógeno (Rapal, 2010).	15
Figura 4. Dinámica de la luz en la atmósfera (Monsonis, 2017).	21
Figura 5. Espectro electromagnético (Chuvieco, 1996)	22
Figura 6. Firma espectral (Monsonis, 2017)	23
Figura 7. Firmas espectrales de los recursos naturales (Sobrino y Paolini, 2000)	24
Figura 8. Localización de la Laguna de Tres Palos. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 9. Estaciones de muestreo de la Laguna de Tres Palos. Fuente: elaboración propia....	35
Figura 10. Método in situ y ex situ (elaboración propia).....	36
Figura 11. Método in situ y ex situ (elaboración propia).....	Error! Bookmark not defined.
Figura 12. Método para el procesamiento de las imágenes satelitales (elaboración propia)....	40
Figura 13. Variación de la temperatura por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.....	42
Figura 14. Diagrama de cajas múltiples para la temperatura de la Laguna de Tres Palos.	42
Figura 15. Variación del pH por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	43
Figura 16. Diagrama de cajas múltiples para el pH de la Laguna de Tres Palos.....	44
Figura 17. Variación de la profundidad por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	45
Figura 18. Diagrama de cajas múltiples para la profundidad de la Laguna de Tres Palos.	45
Figura 19. Variación de transparencia por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	46
Figura 20. Diagrama de cajas múltiples para la transparencia de la Laguna de Tres Palos.....	46
Figura 21. Variación del oxígeno disuelto por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	48
Figura 22. Diagrama de cajas múltiples del oxígeno disuelto de la Laguna de Tres Palos.	48
Figura 23. Variación de la demanda química de oxígeno por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.....	49
Figura 24. Diagrama de cajas múltiples para la demanda química de oxígeno de la Laguna de Tres Palos.....	50
Figura 25. Diagrama de cajas múltiples para la demanda bioquímica de oxígeno de la Laguna de Tres Palos.....	51
Figura 26. Variación de la conductividad por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos. ...	52
Figura 27. Diagrama de cajas múltiples para la conductividad de la Laguna de Tres Palos. ...	53
Figura 28. Variación de los nitratos por puntos de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	54
Figura 29. Diagrama de cajas múltiples para los nitratos de la Laguna de Tres Palos.....	54
Figura 30. Variación de los nitritos por puntos de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	55
Figura 31. Diagrama de cajas múltiples para los nitritos de la Laguna de Tres Palos.	55
Figura 32. Variación de amonio por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.	56
Figura 33. Diagrama de cajas múltiples para el amonio de la Laguna de Tres Palos.	57
Figura 34. Variación de coliformes por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.....	57
Figura 35. Diagrama de cajas múltiples para coliformes de la Laguna de Tres Palos.....	58
Figura 36. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de abril.	61
Figura 37. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de abril.	62
Figura 38. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de julio.....	64
Figura 39. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de julio.....	66
Figura 40. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de septiembre.	68
Figura 41. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de septiembre.	69

Figura 42. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de octubre.	71
Figura 43. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de octubre.	72
Figura 44. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de febrero.	74
Figura 45. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de febrero.	76
Figura 46. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de marzo.	78
Figura 47. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de marzo.	80

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación del Índice de Calidad del Agua (Semarnat, 2007).....	18
Cuadro 2. Factores de ponderación asignados para cada parámetro para el índice de calidad del agua. Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF), 2007.	20
Cuadro 3. Intervalos espectrales de los sensores TM y ETM+	25
Cuadro 4. El uso y longitud de bandas espectrales Fuente: (Moreira, 2014).	26
Cuadro 5. Características del satélite Landsat 7 (Takashi, 2011).....	27
Cuadro 6. Resolución de las bandas espectrales (Takashi, 2011).	27
Cuadro 7. Valores y uso del ICA (González, 2006).	39
Cuadro 8. Resultados del ICA	59
Cuadro 9. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril.	61
Cuadro 10. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril.	63
Cuadro 11. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de julio.	64
Cuadro 12. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de julio.....	66
Cuadro 13. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de septiembre.	68
Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de septiembre.	70
Cuadro 15. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de octubre.....	71
Cuadro 16. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril octubre.	72
Cuadro 17. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de febrero.	74
Cuadro 18. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de febrero.....	76
Cuadro 19. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de marzo.....	78
Cuadro 20. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de marzo.	80

Resumen

La contaminación de los sistemas lagunares afecta el suministro de los servicios ecosistémicos por lo que es necesario conocer su condición ecológica, esta se realiza tradicionalmente con la determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos. Recientemente se han desarrollado métodos basados en imágenes de satélite para obtener información confiable relacionada con la calidad del agua. En las zonas costeras se intensifican las actividades socioeconómicas, como es el caso de la Laguna de Tres Palos, localizada en el municipio de Acapulco, Guerrero, que provocan daños a la salud de los ecosistemas. La mayor disponibilidad de imágenes de satélite podría apoyar el monitoreo de la calidad del agua de la Laguna, pero es necesario establecer la posible relación entre los índices biofísicos y los índices geomáticos para poder hacer las interpretaciones adecuadamente. En este trabajo se determinó la calidad del agua de la Laguna mediante parámetros físicos, químicos y biológicos (temperatura, pH, conductividad, profundidad, transparencia, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, coliformes totales, *E.coli*, nitritos, nitratos y amonio), y se obtuvieron las características espectrales (Landsat 7) del cuerpo acuático, tanto de bandas individuales como con índices de vegetación (NDVI) y agua (NDWI), analizando la regresión lineal y la correlación de Pearson entre índices geomáticos y de calidad del agua. El Índice de Calidad del Agua de la Laguna (National Science Foundation) fue de 43.7 % y las bandas que mejor reflejan una relación con los parámetros, fueron las 1, 3 y 4 del sensor ETM⁺, estas bandas tienen la regresión y correlación mayor a 0.90 para los parámetros transparencia, profundidad, pH, nitritos, DBO₅, y DQO. Asimismo, el NDVI y el producto de las bandas 3, 4 y 5 tienen relación aceptable, pero una mayor variabilidad con dichos parámetros. Se puede concluir que sí es posible realizar valoraciones de la calidad de agua de la Laguna sobre todo con parámetros de tipo físico y químicos.

I. Introducción

El agua es un elemento común y determinante en el planeta, rige los ciclos de vida, es un recurso fundamental para el desarrollo humano, mismo que se ha condicionado en la disposición y el progreso de los asentamientos rurales y urbanos. Por ello, la contaminación de los recursos hídricos es quizá uno de los problemas más graves de deterioro ambiental a los que el mundo y particularmente México se enfrenta, tanto por el daño a los ecosistemas y hábitats naturales, como por los riesgos sobre la salud humana y la sobre utilización de caudales de agua aprovechables (Jiménez y Aboites, 2010).

Dentro de los recursos acuáticos, destacan los sistemas lagunares que se ubican entre los ecosistemas naturales de mayor productividad ecológica, así como de gran importancia biológica y económica del planeta por la gran cantidad de servicios ecosistémicos que proporcionan. Son sitios de aguas interiores poco profundas conectadas periódicamente con el océano por un canal estrecho que se abre a través de una barrera de arena. Esta condición determina las fluctuaciones hidrodinámicas y los niveles de salinidad, estos pueden ser alterados por los aportes fluviales y los intercambios mareales, que alterna su dominancia en función de las principales épocas climáticas (Kjerfve, 1994).

Estos cuerpos de agua son susceptibles a la contaminación debido a que se encuentran ubicados al final de las cuencas de drenaje. La afectación de estos recursos hídricos superficiales puede incluir daños severos a la morfología de las cuencas, la calidad del agua y los recursos costeros. Destaca que estos cuerpos lagunares se han destinado para el desarrollo turístico por lo que la recreación y la pesca son actividades relevantes para los visitantes y la población local. Sin embargo, estas actividades impactan la condición ecológica e hidrodinámica de estos sistemas, afectando la disponibilidad y la calidad de sus recursos naturales. Por ello, el recuperar la función de las zonas degradadas y conservar lo que aún están en un proceso de afectación, amortiguando y mitigando los abusos de las actividades humanas, puede traducirse en beneficios económicos, así como una mejor calidad de agua para los pobladores y la vida silvestre (Håkanson *et al*, 2005).

Un ejemplo de cálculo del índice de calidad el agua es el establecido por la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF, 2006) en los Estados Unidos, diseñado para ser modelado con las siguientes variables: temperatura, pH, nitritos, nitratos, demanda bioquímica de oxígeno

(DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto (OD), turbiedad, sólidos totales, coliformes totales y *E. coli* (Quiroz *et al.*, 2017).

Este enfoque emplea como procedimiento una suma ponderada adaptada por Fernández (1999). Este método asigna los pesos de importancia a cada parámetro (factor de ponderación) procediendo a definir el porcentaje correspondiente a una escala de calidad.

La determinación de este índice se ha analizado tradicionalmente con los parámetros obtenidos en campo, sin embargo recientemente se han desarrollado métodos para emplear imágenes de satélite dentro de la percepción remota, esta disciplina que se define como una técnica aplicada para obtener información confiable sobre las propiedades de ciertas superficies u objetos desde distancias relativamente grandes, mediante la obtención de imágenes tomadas por diversos sensores montados sobre plataformas espaciales (Agencia Espacial Europea, 2010).

La problemática de un mal uso de las lagunas costeras y particularmente las necesidades de su valoración y monitoreo ha tenido como consecuencia, involucrar una nueva tecno-ciencia, como la percepción remota, que es un complemento a estudios orientados al medio ambiente en las distintas áreas de la ciencia y la tecnología, como por ejemplo en recursos pesqueros, estudios costeros, contaminación, geología, oceanografía, entre otros.

La percepción remota puede proporcionar los medios adecuados para estimar algunos de los parámetros relacionados con la calidad del agua, que generalmente son determinados por mediciones tradicionales. Con la mejora de los sensores satelitales (resolución espacial y espectral), las imágenes multiespectrales se han utilizado para vigilar las aguas continentales, mediante el uso de correlaciones entre la reflectancia medida por cada una de las bandas espectrales y las propiedades superficiales del agua.

A partir de las reflectancias en ciertas bandas espectrales, se han desarrollado índices espectrales basados en operaciones algebraicas con bandas específicas, como es el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés), que se ha utilizado en proyectos como “Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano” donde hace referencia a una caracterización geomorfológica del paisaje, con el propósito de obtener información acerca del comportamiento espectral de las distintas unidades geomorfológicas y sus coberturas asociadas (Ariza *et al.*, 2018).

Este NDWI corresponde un nuevo método que se ha desarrollado para delinear las características de aguas abiertas y mejorar su representación en imágenes digitales de detección remota. El NDWI utiliza la radiación reflejada en el infrarrojo cercano y la luz verde visible, para mejorar la presencia de tales características al tiempo que elimina la presencia de las características del suelo y de vegetación terrestre. Se sugiere que el NDWI también puede proporcionar a los investigadores estimaciones de turbidez de cuerpos de agua (McFeeters, 1996).

Por otro lado, el NDVI, es un sistema para el monitoreo remoto de vegetación en una escala temporal y espacial sinóptica. Este índice está desarrollado por una combinación algebraica de bandas espectrales de sensores remotos, que pueden revelar información valiosa como el estado de la estructura vegetativa en la cobertura vegetal, la capacidad fotosintética, la densidad y la distribución de las hojas, así como el contenido de agua en las deficiencias minerales de las hojas. El índice de vegetación debe ser menos sensible a los factores que afectan la reflectancia espectral, como las propiedades del suelo, las condiciones atmosféricas, la iluminación solar y la geometría visual (Genesis y Yengoh, 2015).

Derivado de lo anterior, la importancia de una determinación de calidad del agua, es de mayor relevancia en las zonas costeras turísticas de México, donde se intensifican las actividades socioeconómicas. Un ejemplo de ello es el municipio de Acapulco, en el estado de Guerrero que desde hace varios años se ha incrementado el desarrollo turístico y la demanda de los recursos acuáticos y terrestres, provocando daños a la salud de los ecosistemas naturales y de la población humana.

II. Marco Teórico

II.1. Lagunas Costeras en México

México es un país privilegiado por su situación geográfica, se ubica a nivel mundial entre los países con mayor extensión de litorales marinos (11,500 km de costas), principalmente en el Golfo de México existen 23 sistemas lagunares, destacados por estos cuerpos que se ubican entre los ecosistemas de mayor productividad y aprovechamiento económico (Rivera y Azuz, 2014).

Por ello, el desarrollo acelerado de las actividades económicas y el crecimiento poblacional en zonas costeras y zonas urbanas, han alterado los ciclos biogeoquímicos, cambiando negativamente la salud de los frágiles ecosistemas costeros. Son altamente productivas, ya que su importancia radica en que proporcionan diversos servicios ecosistémicos a la sociedad, entre ellos la pesca, la acuicultura, turismo, paisaje, recreación, estabilidad y protección a la propia zona costera (Lara-Lara, 2008).

Estos cuerpos acuáticos litorales tienen en su mayoría, comunicación con el mar y son el resultado del encuentro entre dos masas de agua, una continental y otra marina tienden a la degradación ambiental, por actividades que se pueden realizar en su entorno, viéndolo desde el punto de vista biológico, la productividad de algunas lagunas litorales es de la más altas registradas en la naturaleza por lo que se consideran la fuente de abastecimiento de las personas que viven alrededor de ella (Knoppers y Kjerfve, 1991).

Debido a los aportes continentales, a la influencia del océano y a las altas tasas de aportación de sedimentos, son unos ambientes muy favorables para el desarrollo de grandes poblaciones de aves, mamíferos, peces, y lugares de atracción turística importante (Contreras, 2005).

Derivado de esto, una laguna costera se denomina una zona de mezcla donde masas de agua, de origen epicontinental por medio de bocas naturales, canales artificiales o mareas. Junto con la morfología y dinámica de corrientes, favorece a la formación de diferentes ambientes, que representan un adecuado hábitat de reclutamiento y crecimiento para un número significativo de especies de importancia comercial (De la Lanza *et al.*, 2008).

La tendencia de las lagunas costeras es cerrar temporalmente o permanentemente su comunicación con el mar, como ya se ha mencionado anteriormente, el resultado de lo extraño

de sus patrones climáticos e hidrológicos, aporta grandes cantidades de sedimentos o cambios químicos, físicos y biológicos en estos cuerpos, en especial en la temporada de lluvias, en la época de estiaje. Esto ha conducido al aislamiento de las lagunas, desde su formación actual, acelerando su azolvamiento, favoreciendo cambios biogeoquímicos y predisponiendo a mayores impactos antropógenicos.

Por ejemplo, en el caso de la Laguna de Tres Palos, donde además de encontrarse aislada del mar es alimentada por el Río La Sabana, que a partir de la década de los años 70's ha presentado un crecimiento poblacional e industrial en su cuenca y en la Laguna, incluyendo el aeropuerto de la Ciudad de Acapulco, actividades que han modificado la composición de este cuerpo de agua y por consiguiente modificado el estatus de la calidad de su agua.

La Laguna de Tres Palos (figura 1) desemboca en el Océano Pacífico en forma de barra, con condiciones de hipoxia y anoxia en el fondo de la laguna, que llevan a clasificarla como una laguna eutrofizada y con una calidad de agua mala. Esta laguna, es representativa y de la que se toma el nombre del poblado de Tres Palos, municipio de Acapulco (De la lanza *et al.*, 2008).

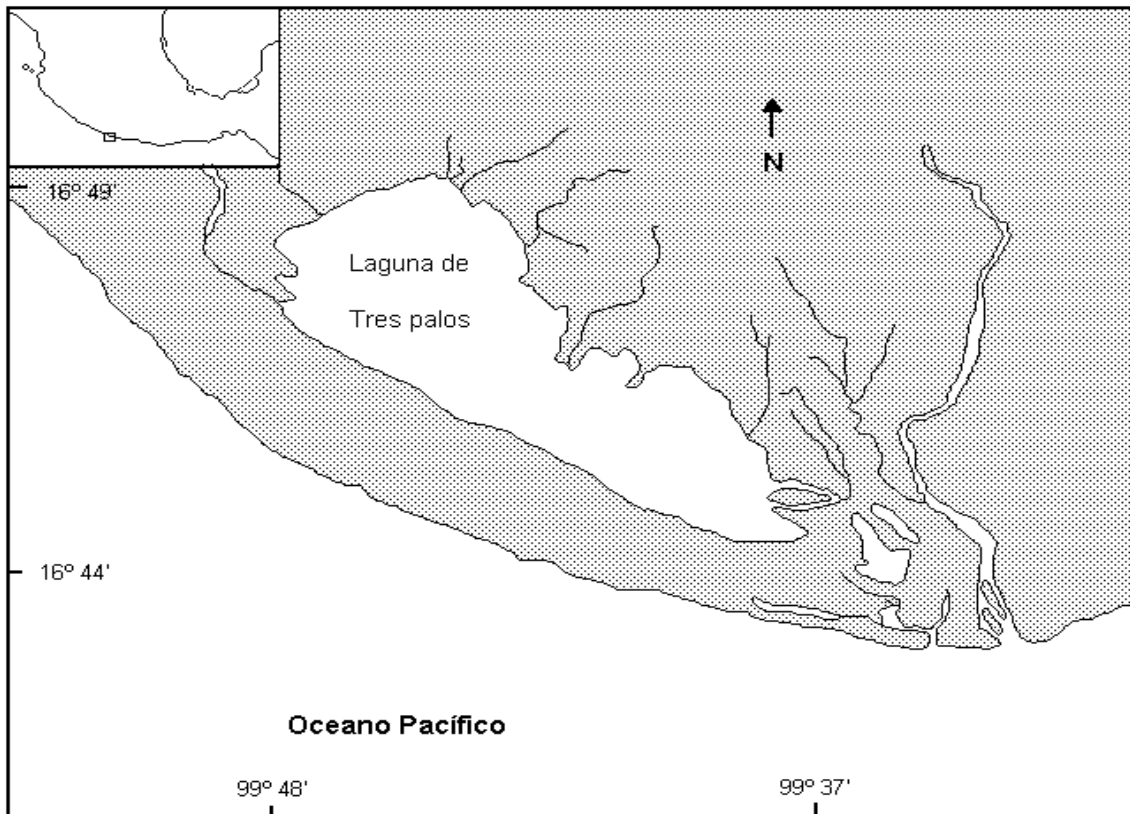


Figura 1. Laguna de Tres Palos (Guerrero, 2007).

II.2. Calidad del agua.

La calidad del agua es la capacidad intrínseca que tiene para responder a los usos que se obtienen de ella; desde el punto de vista ecosistémico, son aquellas condiciones que deben darse en el agua para que esta mantenga un ecosistema equilibrado y para que cumpla un determinado objetivo de calidad, midiéndose de acuerdo a distintos parámetros mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de las cualidades naturales y se clasifica para un uso determinado, se describe por características químicas, físicas y biológicas para mantener un ecosistema equilibrado.

Por ello, se considera una variable descriptora del medio hídrico, tanto desde el punto de vista de su caracterización ambiental, como desde la perspectiva de la planificación y gestión hidrológica, ya que delimita la aptitud del agua para mantener los ecosistemas y atender las diferentes demandas. Asimismo, se puede ver modificada tanto por causas naturales como por factores externos, cuando los que degradan la calidad natural del agua y algunos que son ajenos al ciclo hidrológico se habla de contaminación.

En México, los problemas de calidad del agua son severos, por lo que es necesario un monitoreo, eficaz, regulado y actualizado, incluyendo diferentes parámetros especialmente aquellos que guardan una relación tanto con los contaminantes potenciales, que pueden estar presentes en el agua superficial del cuerpo acuático en estudio, como con el uso de la misma. Los parámetros comúnmente evaluados son: temperatura, pH, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitritos, nitratos, parámetros bacteriológicos incluyendo coliformes fecales y *Escherichia coli* (Jiménez, 2010).

A continuación, se hace una descripción de los parámetros citados:

II..2.1 Temperatura:

Es una medida del grado de calor de un cuerpo acuático, se expresa en unidades de grado celsius (°C) y se mide con un termómetro o potenciómetro, los cuerpos de agua en general no deben rebasar los 40°C, ya que pueden causar daños a la flora y fauna acuática, así como favorecer reacciones químicas secundarias, como la reducción de los niveles de oxígeno y acelerar el crecimiento de bacterias, al igual que es un parámetro de gran importancia es un indicador de la calidad del agua que influye, sobre otros indicadores de este recurso, como el

pH, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la desinfección, la absorción de oxígeno, disminución de gases entre otros. Indica los desniveles térmicos de la materia, las descargas de agua a altas temperaturas, pueden causar daños a la flora y fauna de las aguas receptoras al interferir con la reproducción de las especies, incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos (Fuentes y Massol, 2002).

Este parámetro en conjunto con la luz, determinan los procesos de fotosíntesis y ambos dependen a su vez de la latitud, altitud y la regionalidad del sistema acuático, determina grandemente en los procesos de circulación, renovación de masas de agua o de confinamiento, advección, mareas, etc.

La temperatura del agua está influenciada por las condiciones ambientales de la zona y la incidencia de luz solar, ya que la energía luminosa es absorbida exponencialmente con respecto a la profundidad y la mayor parte del calor es retenido o absorbido en la capa superior del sistema (Camacho *et al.*, 2009).

La mayoría de estos sistemas lacustres, se pueden presentar una discontinuidad térmica provocando una división en estratos de la columna del agua, que se caracteriza por la presencia de tres capas de agua de diferente temperatura que son: *epilimnion* capa superior de agua con circulación y mayor temperatura, *metalimnion* donde se ubica la termoclina, estrato que representa una marcada discontinuidad termal e *hipolimnion* capa profunda de agua con temperatura fría y relativamente tranquila y anoxia (González, 2006).

II.2.2 pH:

El pH es un indicador de la condición ácida o alcalina de una sustancia establecida dado por la concentración de iones (H^+) y el número de iones hidroxilo (OH^-). El pH del agua puede variar entre 0 a 14, que es un factor muy importante porque determinados procesos químicos pueden tener lugar a un determinado pH. Por ejemplo, las reacciones del cloro solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 5 y 8.

Las mediciones del pH son muy importantes ya que valores muy altos o muy bajos son tóxicos para organismos acuáticos. El valor de pH se sustenta por iones hidronio y se representa como:

$$pH = - \log [H^+]$$

En una escala de 0 a 14 un pH de 7 representa una solución neutra donde las concentraciones de H^+ y OH^- tienen el mismo valor. En aguas naturales es altamente influenciado por la presencia de diferentes compuestos de amonio, carbonatos, sulfatos, nitratos, que afectan la distribución y diversidad de los organismos; además de determinar la naturaleza de muchas reacciones químicas que ocurren en el ambiente acuático (González, 2006).

El intervalo adecuado para que se desarrolle la vida acuática varía de 6.5 a 9 unidades, ya que el agua de un cuerpo acuático que representa un valor de pH igual a 7 es neutra, entre 7 y 14 se considera alcalina y por debajo de 7 ácida (Cartró, 2003; González, 2006).

Para ejemplificar la escala del pH:



Figura 2. Escala de pH (Cruz, 2014).

II.2.3 Transparencia:

La transparencia es producida por la cantidad de materia suspendida como arcilla o materia orgánica e inorgánica finamente dividida, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros organismos por lo que mide como turbiedad es la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas, y por ello depende no sólo de su concentración sino también de su tamaño y forma (Abarca, 2007).

II.2.4 Conductividad eléctrica:

La conductividad del agua es una expresión numérica para transportar o conducir una corriente eléctrica. Este parámetro depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se realice la determinación. Por lo tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad (Contreras, 1993).

Asimismo expresa la concentración total de sales solubles contenidas en el cuerpo acuático, dado que la solución tiene la capacidad para transmitir corriente eléctrica y se reporta en microsiems/cm (uS/cm).

II.2.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno:

La demanda bioquímica de oxígeno en los cinco días (DBO₅) es una prueba que mide la cantidad de oxígeno consumido en la degradación bioquímica de la materia orgánica mediante procesos biológicos aerobios, existen diversas variantes de la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno, entre ellas las que se refieren al periodo de incubación. La más frecuente es la determinación de DBO₅ a los cinco días (González, 2006).

II.2.6 Demanda Química de Oxígeno:

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro químico, que representa una medida de toda la materia orgánica e inorgánica presente en disolución y/o suspendida que puede ser químicamente oxidada por la acción de agentes oxidantes, bajo condiciones ácidas y se mide como miligramos de “oxígeno” equivalentes a la fracción orgánica disuelta y/o suspendida por litro de disolución (González, 2016).

Es un parámetro lo suficientemente rápido para determinar el grado de contaminación del agua y puede ser empleado para estimar la eficacia de una planta de tratamiento de aguas residuales. Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm, o algo superiores (Guzmán y Rojas, 1976).

II.2.7 Oxígeno Disuelto:

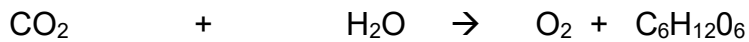
Es el oxígeno que está disuelto en el agua (OD), se obtiene de la aireación y la fotosíntesis de las plantas acuáticas principalmente algas. La concentración de oxígeno en el agua, depende de la presión que tenga en la atmósfera y de la temperatura del agua, se asume que la concentración del oxígeno a 25°C, es de 8.32 mg/L (Lankford, 1977).

Presenta una condición fundamental para mantener la salud de un ecosistema acuático, el nivel de OD puede ser un indicador de la contaminación del agua, el oxígeno disuelto se obtiene de la aireación y la fotosíntesis de las plantas acuáticas principalmente algas. La concentración de oxígeno en el agua, depende de la presión que tenga en la atmósfera y de la temperatura del agua, se asume que la concentración del oxígeno a 25°C, es de 8.32 mg/L (Lankford, 1977).

Este es un indicador de que el agua, tiene una alta carga orgánica, provocada por aguas residuales, al igual es fundamental para la vida acuática y la supervivencia de especies, esto se logra por difusión del aire del entorno y como un producto de desecho de la fotosíntesis, la fórmula simplificada la fotosíntesis, se presenta a continuación:

Fotosíntesis (en presencia de luz y clorofila):

Dióxido de carbono + agua → oxígeno + nutriente rico en carbono



En la dinámica acuática su concentración varía a lo largo del día, durante las primeras horas de la mañana generalmente las concentraciones de OD son bajas y se presenta una baja saturación; más tarde a medida que se incrementa el proceso de la fotosíntesis, se puede observar un incremento gradual y constante, que puede alcanzar al atardecer una sobresaturación. La producción y abundancia de este gas está limitada por factores como la temperatura, la biomasa de productores primarios, la transparencia, la cantidad de nutrimentos, la materia orgánica en descomposición y los organismos consumidores.

Nutrimentos:

El nitrógeno (N) se presenta en las siguientes formas: nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) entre otros, este ciclo es sumamente dinámico y complejo sobre todo los procesos microbiológicos responsables de la mineralización, fijación y des nitrificación del nitrógeno de los suelos, por lo que el ritmo del mismo depende de factores como la humedad del suelo, la temperatura y el pH (González, 2016).

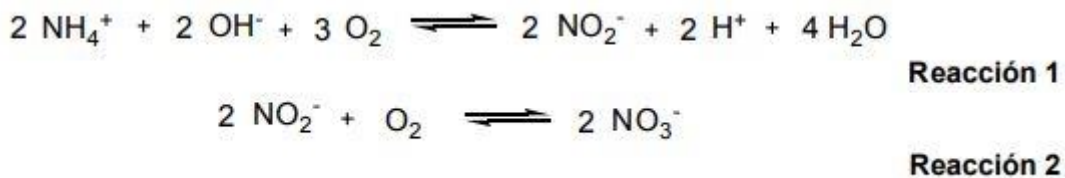


Figura 3. Reacción de formas de nitrógeno (González, 2016).

La desnitrificación se produce en condiciones anóxicas, como en las tierras húmedas, donde el nitrato se deriva de dos fuentes: naturales y artificiales, en las aguas superficiales de las primeras, los nitritos se originan de la descomposición por microorganismos de la materia nitrogenada orgánica, como las proteínas y excretas de las plantas y animales. Las segundas

son los fertilizantes nitrogenadas, además los nitritos son responsables del fenómeno de la eutrofización, la cual es el enriquecimiento desmesurado del agua con nutrientes (Constantino, 2016).

II.2.8 Nitritos:

El nitrito es considerado como una etapa intermedia en el ciclo del nitrógeno, puede estar presente en el agua como resultado de la descomposición biológica de materiales proteicos. En agua superficiales crudas, las huellas de nitritos indican contaminación fecal reciente. También se puede producir el nitrito en las plantas de tratamiento o en los sistemas de distribución de agua, como acción de bacterias sobre el nitrógeno amoniacal (Constantino, 2016).

En aguas superficiales bien oxigenadas, el nivel de nitrito no suele superar el 0.1 mg/L. Asimismo, cabe resaltar que el nitrito se halla en un estado de oxidación intermedio entre el amoníaco y el nitrato. Los nitratos en concentraciones elevadas reaccionan dentro el organismo con aminas y amidas secundarias y terciarias formando nitrosaminas de alto poder cancerígeno y tóxico. Los valores entre 0.1 y 0.9 mg/L pueden presentar problemas de toxicidad dependiendo del pH, asimismo valores por encima de 1.0 mg/L son totalmente tóxicos y representan un impedimento para el desarrollo de un ecosistema fluvial en buenas condiciones (Constantino, 2016).

II.2.9 Nitratos:

El nitrato es un nutriente esencial para muchos autótrofos fotosintéticos y en algunos casos, ha sido identificado como el determinante del crecimiento de estos, usualmente están presentes en bajas concentraciones de aguas naturales, es frecuentemente la forma inorgánica más abundante del elemento. Las concentraciones naturales raramente exceden los 10 mg/L y son más concentraciones menores a 1 mg/L (Constantino, 2016).

II.2.10 Amonio:

El amonio es un compuesto inorgánico de nitrógeno que se forma en las depuradoras durante la degradación biológica de compuestos orgánicos de nitrógeno. En presencia de oxígeno, el amonio se puede convertir en nitrato (nitrificación). En el agua la nitrificación produce un elevado consumo de oxígeno, y además el amonio es un abono que fomenta el crecimiento de las algas. En las depuradoras de aguas residuales normalmente sólo se suele controlar e informar la parte de nitrógeno del amonio, es decir, el así denominado nitrógeno de amonio

(NH₄⁻). En las depuradoras pequeñas de la clase de depuración no existe un valor límite para el nitrógeno de amonio. A partir de la clase de depuración N el valor límite es de 10 mg/L. Puesto que el proceso de nitrificación es muy sensible a la temperatura los valores límite sólo son aplicables a una temperatura del agua residual superior a 12°C (Bautista *et al*, 2011).

Las concentraciones altas de nitratos generalmente se encuentran en el agua en zonas rurales por la descomposición de la materia orgánica y los fertilizantes utilizados. Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitritos y nitratos. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua.

El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato. Es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente en nitratos y que, generalmente, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y también por factores abióticos (Antón y Lizaso, 2001).

II.2.11 Coliformes:

Los coliformes son bacterias en forma de bacilos, Gram negativos, no esporulados, aerobios o anaerobios capaces de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas en un lapso máximo de 48 h a 35 ± 1 °C, aunque algunos pueden ser fermentadores tardíos o no fermentadores, como *Citrobacter* y *Serratia*, respectivamente. Este grupo está conformado por cuatro géneros principalmente: *Enterobacter*, *Escherichia*, *Citrobacter* y *Klebsiella*. La mayoría de estos organismos se encuentran en vida libre, es decir, en el medio ambiente y materia en descomposición, excepto el género *Escherichia* que vive sólo en organismos de sangre caliente (Ramos *et al*, 2008).

El grupo de los coliformes totales incluye microorganismos que pueden sobrevivir y proliferar en el agua. Por consiguiente, no son útiles como índice de agentes patógenos fecales, pero pueden utilizarse como indicador de la eficacia de tratamientos y para evaluar la limpieza e integridad de sistemas de distribución y la posible presencia de biopelículas (Ramos *et al*, 2008).

II.2.12 Escherichia coli (*E. coli*)

Es una bacteria que pertenece a la familia *Enterobacteriaceae*, es un huésped constante del intestino del hombre y de los animales de sangre caliente, que puede causar infecciones gastrointestinales, por su especificidad está considerada como un buen índice de contaminación fecal recurrente, la cual está relacionada con las descargas de aguas residuales domésticas (Organización Mundial de la Salud, 2006).

Índice de calidad del agua

En los últimos años el manejo de los cuerpos acuáticos cada vez se ha ido innovando por la demanda de estudios que se podrían necesitar, con base a esto surgen nuevos métodos que sirven para determinar la calidad del agua, como es el Índice de la calidad del agua que básicamente es una expresión simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros de la naturaleza química, física y biológica, y que está relacionada con la calidad natural del cuerpo acuático. Los índices implementados actualmente para el monitoreo de los cuerpos de agua permiten evaluar la calidad, aptitud, sostenibilidad y grado de conservación de los mismos, a través del cálculo de su correspondiente ICA (SEMARNAT, 2007).

Esta actividad permite la detección temprana de cambios en la calidad del recurso, sin embargo el monitoreo se convierte en una herramienta de gran importancia para su vigilancia, los indicadores ambientales nacen como respuesta a la necesidad de obtener información relevante sobre diversos temas ambientales.

El índice de calidad indica el grado de contaminación del agua como se expresa en el Cuadro 1. Está como porcentaje del agua pura, agua altamente contaminada, tendrá un cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%, como se ejemplifica en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Clasificación del Índice de Calidad del Agua (Semarnat, 2007).

Excelente	AZUL	91-100
Buena	VERDE	71-90
Media o regular	AMARILLO	51-70
Mala	NARANJA	26-50
Pésima o muy contaminada	ROJO	0-25

El agua debe cumplir con una serie de características físicas y químicas para poder ser consumidas, por esta razón el agua se examina minuciosamente y se califica con respecto a los índices mínimos o máximos permitidos para chequear que efectivamente el agua es aceptable o deseable, estas características óptimas se deben garantizar hasta el momento mismo del consumo (Semarnat, 2007).

A continuación se enlistan:

- a) Características físicas: turbiedad, color, olor, sabor y temperatura.
- b) Características químicas: pH, nitritos, nitratos y amonio.
- c) Características biológicas: Coliformes totales y *E coli*.

El ICA es útil para observar la tendencia evolutiva del estado de los cuerpos acuáticos a lo largo de los años, además son indicadores cualitativos del estado en un cuerpo en estudio. Deben ser complementarios entre sí, ya que en general un deterioro en la calidad del agua puede manifestarse en varias formas: presencia de pesticidas, metales pesados o carga orgánica.

A continuación se presentan el índice de calidad del agua de la Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF, por sus siglas en inglés).

Este índice representa el nivel de calidad del agua de un río, lago o cuenca y es utilizado en los Estados Unidos desde 1970 para el monitoreo de la evolución de los cambios de calidad a lo largo del tiempo, puede ser empleado para comparar con otras fuentes en la región o en el mundo.

La determinación de este índice requiere de nueve parámetros indicadores (n) que son: el oxígeno disuelto, los coliformes fecales, el pH, la demanda química de oxígeno, el cambio de temperatura, los fosfatos totales, los nitritos, la turbiedad y los sólidos disueltos totales. La estimación de este índice consiste en la sumatoria del producto de los valores de Sub *i* (la asignación de cada uno de los parámetros interpolados en su respectiva curva de calidad según el resultado obtenido del análisis) y el factor de ponderación (w) de cada uno de estos parámetros

$$NSF = \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

Sub i= valor Q obtenido del parámetro i según el resultado del análisis.

Wi= factor de ponderación del parámetro i.

Σ = la suma ponderada de los parámetros asignados.

Cuadro 2. Factores de ponderación asignados para cada parámetro para el índice de calidad del agua. Fundación de Sanidad Nacional de los Estados Unidos (NSF), 2007.

Parámetro	Factor de ponderación
Oxígeno disuelto (% SO)	0,17
Coliformes fecales (colonias/100 mL)	0,16
pH (unidades)	0,11
Demanda Bioquímica de oxígeno (mg/L)	0,11
Cambio de temperatura (°C)	0,10
Fosfatos totales (mg/L PO ₄ ³⁻ -P)	0,10
Nitratos (mg/L NO ₃ ⁻)	0,10
Turbiedad (NTU)	0,08
Sólidos disueltos totales (mg/L)	0,07

II.3. Percepción remota

De acuerdo con Chuvieco (1996) la percepción remota o teledetección es la ciencia, técnica y arte de obtener e interpretar información desde la distancia, usando sensores que no tienen contacto físico con el objeto que está siendo observado. Este término está restringido a métodos que emplean la energía electromagnética como medio de detección y medida de las características de los objetos. Este tipo de energía incluye: la luz, el calor, las ondas de radio y excluye los estudios eléctricos, magnéticos y gravimétricos, que miden los campos de fuerza (Fonseca, 1987).

Esta disciplina permite adquirir imágenes de la superficie terrestre, marina y atmósfera desde sensores instalados en plataformas espaciales. Por ser una técnica que no está en contacto directo con el objeto requiere que entre el sensor y el objeto haya un flujo de información, el cual es conocido como radiación electromagnética, la cual puede ser emitida por el objeto o proceder de otro cuerpo mediante reflexión. Todos los cuerpos u objetos (seres vivos, plantas u objetos inanimados) emiten radiación electromagnética, la cantidad y tipo de radiación que

emiten depende básicamente de su comportamiento al contacto con la luz y de su temperatura. Asimismo, el mayor emisor de esta radiación en el sistema solar es el sol y la radiación que refleja la Tierra y los objetos situados en ella es la que se utiliza comúnmente en estudios de teledetección. Otro tipo de emisión es el que puede provenir del mismo sensor, por lo que en su sistema incorpora un rayo emisor de radiación. En la figura 4 se muestra la dinámica de la radiación proveniente por el sol que refleja y es emitida por un objeto terrestre debido a que esta se basa en el calor presente del mismo (Sobrino y Paolini, 2000).

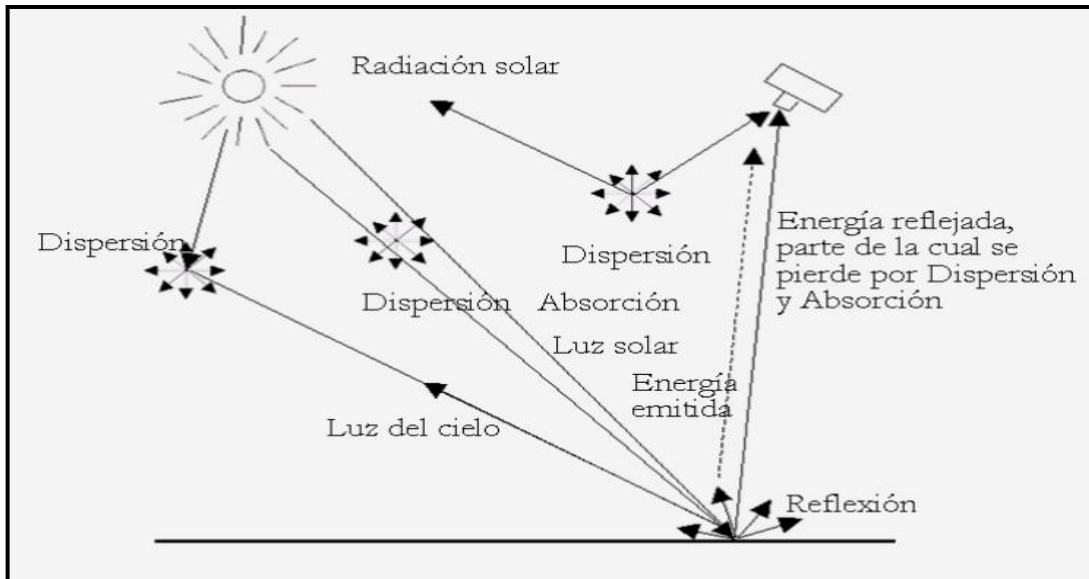


Figura 4. Dinámica de la luz en la atmósfera (Monsonis, 2017).

Un sistema de percepción remota está compuesto por los siguientes componentes:

1. Fuente de energía: Es el emisor de la radiación electromagnética que llegará a la superficie terrestre y que posteriormente será detectada por el sensor.
2. Cubierta terrestre: Formada por distintas masas de vegetación, suelo, agua o infraestructura, estas reciben la radiación electromagnética proveniente de la fuente de energía y la refleja o emite de acuerdo a sus características físicas.
3. Sistema sensor: constituido por el sensor mismo y la plataforma que lo sustenta. Este sistema tiene como función captar la energía emitida por la cubierta terrestre.
4. Sistema de recepción: En este sistema recibe la información transmitida por la plataforma y la guarda en un formato específico y apropiado.

La fuente de energía se expresa a través de un espectro electromagnético y se comporta como una onda de energía fluctuante que viaja a la velocidad de la luz. La onda consiste en campos

eléctricos y magnéticos que fluctúan en ángulos rectos para cada uno y de acuerdo a la dirección de la trayectoria. Dicho espectro se agrupa en intervalos para diferentes ondas de energía, caracterizadas por su longitud o distancia, medida en nanómetros o micrómetros, entre sucesivos picos o valles (Bedón, 2012). El espectro electromagnético, se extiende desde las longitudes de onda más cortas (incluyendo los rayos gamma y los rayos X) hasta las longitudes de onda más largas (incluyendo las microondas y las ondas de radio).

En la siguiente figura (5) se muestran los intervalos aproximados que destacan la porción visible al ser humano apenas abarca un ínfimo rango del espectro electromagnético que circula alrededor de nosotros, la luz no visible ilumina el mundo de formas muy diversas (Sobrino y Paolini, 2000).

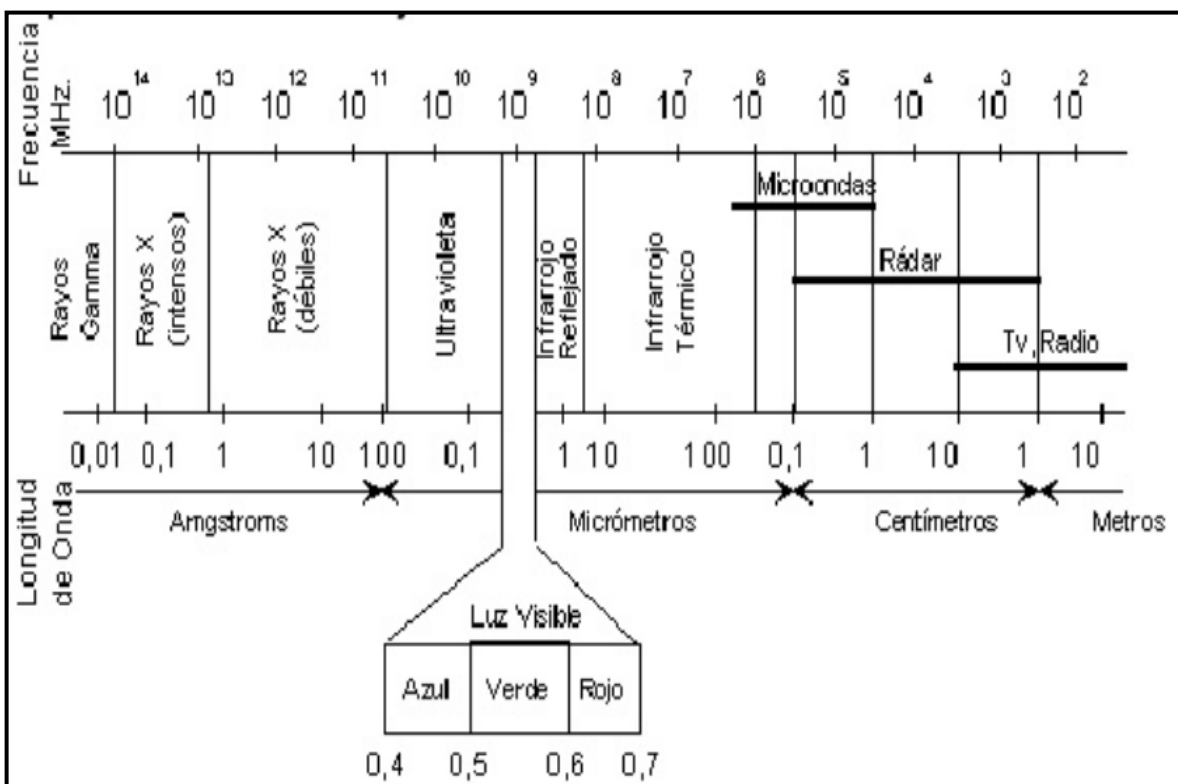


Figura 5. Espectro electromagnético (Chuvieco, 1996)

Asimismo, los sensores remotos son instrumentos sensibles, capaces de captar y evaluar objetos colocados a distancia. Al tomar en cuenta que la fuente emisora de energía puede pertenecer al sistema de percepción remota o ser independiente, se clasifican a los sensores en dos grupos:

- Sensores Pasivos: Son aquellos que reciben la energía emitida por otra fuente (generalmente el sol) y reflejada por los objetos (fotografía, barredor multiespectral y sistemas térmicos).
- Sensores Activos: Son aquellos que poseen la fuente de energía, de manera que emiten la radiación hacia el objeto y luego detectan la energía reflejada (radar).

A partir de la dinámica de interacción y comportamiento entre determinada longitud de onda y los cuerpos presentes en el terreno, es posible caracterizar dichos objetos con un firma espectral, la cual se define como el comportamiento diferencial que presenta la radiación reflejada (reflectancia) o emitida (emitancia) desde algún tipo específico de superficie u objeto terrestre en los distintos rangos del espectro electromagnético.

Este comportamiento se realiza presentando los datos de reflectancia (%) en el eje Y, la longitud de onda λ en el eje X (figura 6). Al unir los puntos con una línea continua se origina una representación bidimensional que constituye la firma espectral de ese objeto. Esta propiedad representa las características físicas o químicas del objeto que interaccionan con la energía electromagnética y varía según las longitudes de onda (Sobrino y Paolini, 2000).

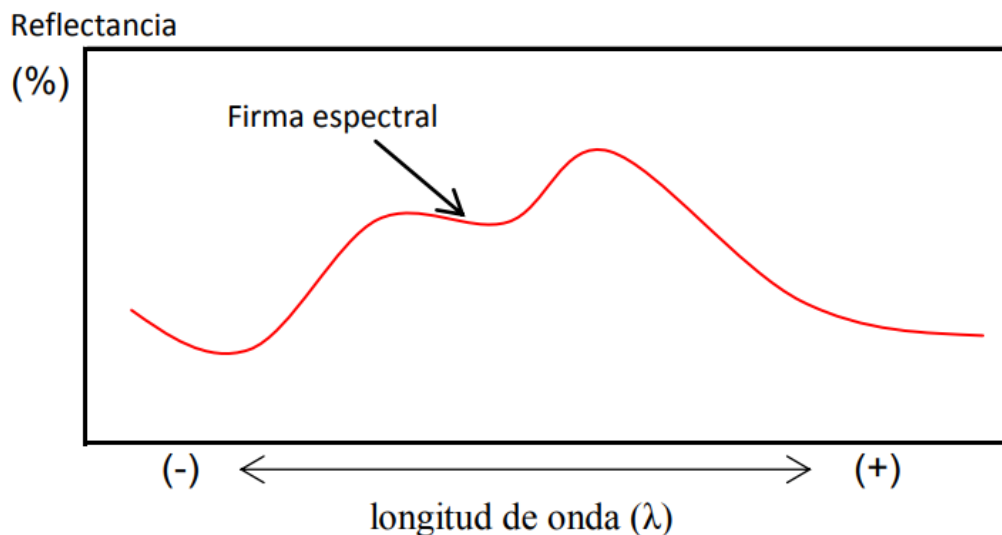


Figura 6. Firma espectral (Monsonis, 2017)

Todo objeto tiene una firma espectral, en el caso de los recursos naturales, cada uno cuenta con una, desde un objeto pequeño, hasta los recursos naturales, como es vegetación, suelo y agua.

En el caso de la siguiente figura 7, se muestran las firmas espectrales de los recursos naturales y la absorción de cada recurso natural.

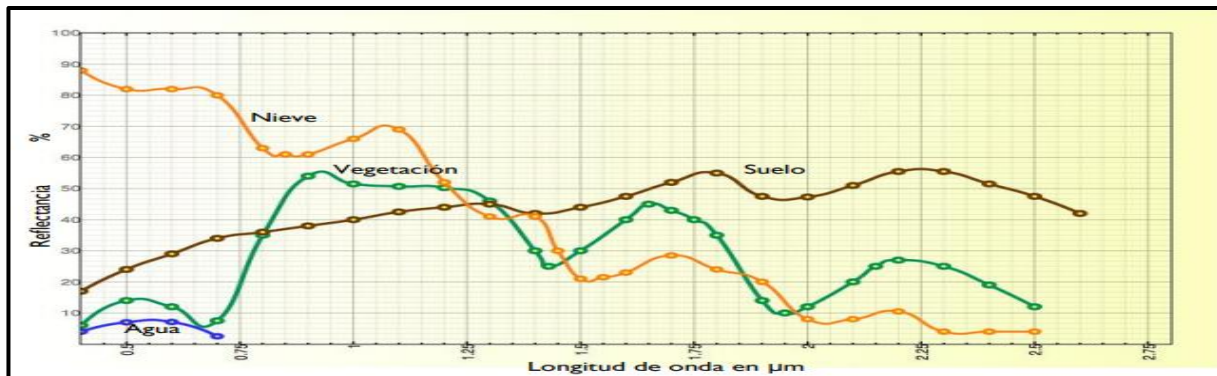


Figura 7. Firmas espectrales de los recursos naturales (Sobrinó y Paolini, 2000)

La propiedad usada para cuantificar estas firmas es llamada reflectancia espectral que es la razón de la energía reflejada y la energía incidente como una función de la longitud de onda. Se captan mediante un sensor espectral que mide la reflectancia en muchas bandas, por ejemplo, un conjunto de detectores puede medir energía roja reflejada dentro de la parte visible del espectro mientras que otro conjunto mide la energía del infrarrojo cercano (Meliá *et al.*, 1986).

Resoluciones en una imagen de sensores remotos

Se denomina resolución de un sistema sensor a la capacidad de registrar discriminando información en detalle. La resolución en un sensor depende del efecto combinado de todas sus partes. Existen diferentes resoluciones por ejemplo:

Resolución espacial:

Es una medida del detalle espacial de una imagen, se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen de satélite. Asimismo se refiere a la finura de detalles visibles en una imagen: cuanto menos es el área terrestre representa por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial (Endrosa, 2011).

Resolución espectral:

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Una imagen producida por un sistema de sensoria miento puede consistir de una longitud de onda de banda ancha, unas pocas bandas anchas, o varias longitudes de onda de bandas estrechas.

Consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor (Endrosa, 2011).

Resolución radiométrica:

Se refiere a la capacidad del sensor para detectar variaciones en la radiación espectral que recibe. Se refiere a la cantidad de niveles de gris que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente (Endrosa, 2011).

Resolución temporal

Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra (Endrosa, 2011).

Este proceso involucra una interacción entre la radiación incidente y los objetos de interés, así como la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes.

El acceso y la disponibilidad de imágenes satelitales se incrementa en los últimos años por lo que se ha ampliado su uso en la planeación y manejo de recursos naturales. Existen diversos materiales a partir de algunos sensores que a continuación se describen dos de los más comunes y relevantes para este trabajo que corresponde a Landsat 5 y Landsat 7 (Sobrino y Paolini, 2000).

Las bandas del espectro visible y del infrarrojo mantienen la resolución espacial de 30 m del Landsat 5 (canales 1, 2, 3, 4, 5 y 7). Las bandas del infrarrojo térmico pasan a ser adquiridas con resolución de 60 metros, contra 120 metros del Landsat 5. La nueva banda Pancromática (canal 8) tiene 15 m de resolución espacial. El siguiente cuadro (3) comparativo ilustra las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM del Landsat 5 y el sensor ETM+ del Landsat 7. Los valores, expresados en micrones, representan los límites de longitudes de onda a los que es sensible cada banda espectral (Chander, 2009).

Cuadro 3. Intervalos espectrales de los sensores TM y ETM+ (Moreira, 2014).

Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7	Banda 8
TM	0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.08-2.35	
ETM+	0.45-0.52	0.53-0.61	0.63-0.69	0.78-0.90	1.55-1.75	10.4-12.5	2.09-2.35	0.52-0.90

Cuadro 4. El uso y longitud de bandas espectrales Fuente: (Moreira, 2014).

Bandas espectrales	Longitud de onda <i>um</i>	Aplicaciones
1	0.45-0.52 (azul)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo de aguas costeras • Diferenciación entre suelo y vegetación diferenciación entre vegetación conífera
2	0.52-0.60 (verde)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo de vegetación , • Calidad del agua
3	0.63-0.90 (rojo)	<ul style="list-style-type: none"> • Absorción de la clorofila • Diferenciación de especies vegetales • Áreas urbanas, uso del suelo agrícola <ul style="list-style-type: none"> • Calidad del agua
4	0.76-0.90 (infrarrojo cercano)	<ul style="list-style-type: none"> • Delineamiento de cuerpos de agua • Mapeo geomorfológico <ul style="list-style-type: none"> • Mapeo geológico • Áreas de incendios • Áreas húmedas
5	1.55-1.75 (infrarrojo medio)	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de suelo • Medidas de humedad de la vegetación • Diferenciación entre nubes y nieve
6	10.40-12.50 (infrarrojo termal)	<ul style="list-style-type: none"> • Mapeo de estrés térmico en plantas <ul style="list-style-type: none"> • Corrientes marinas • Mapeo hidrotermal
7	2.08-2.35 (infrarrojo medio)	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación de minerales • Mapeo hidrotermal
8	0.52-0.90 (Pancromático)	<ul style="list-style-type: none"> • Canal pancromático, resolución 15 metros

La gama de satélites Landsat, fue lanzada el 07 de marzo de 1972, con esto se abrió una nueva percepción del planeta con una resolución tanto temporal como espectral desconocida hasta entonces. El objetivo de esta gama de satélites fue diseñado con el fin de obtener datos de los recursos terrestres. La serie de satélites Landsat 1, 2, 3, 4, 5, 6,7 y 8 es una de las mejores series históricamente hablando.

Landsat 7 cuenta con unas características especiales, como se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 5. Características del satélite Landsat 7 (Takashi, 2011).

Características del satélite Landsat 7	
Anchura de barrido	185 kilómetros
Altitud	705 kilómetros
Quantización	8 bits
Capacidad de almacenamiento a bordo	~375 Gb
Inclinación	Solar-sincrónica, 98.2 grados
Paso ecuatorial	Descendente: 10:00 am +/- 15min
Vehículo de lanzamiento	Delta II
Fecha de lanzamiento	Abril 1999

Las imágenes Landsat 7 cuentan con un sensor ETM+ que dispone de lectura de 8 canales o bandas situadas en distintas zonas del espectro electromagnético, mientras que el sensor TM dispone de 7 bandas (cuadro 6).

Cuadro 6. Resolución de las bandas espectrales (Takashi, 2011).

Bandas espectrales	Resolución del terreno (m)
1	30
2	30
3	30
4	30
5	30
6	60
7	30
8	15

La resolución temporal mide el tiempo transcurrido desde la obtención de una imagen de un punto de la tierra, hasta la siguiente imagen del mismo punto. En el caso del satélite Landsat 7 tiene una resolución temporal de 16 días (Fernández, 1999).

El sensor ETM+ provee imágenes con 8 bandas, una banda más que el sensor TM, que corresponde a una banda pancromática (banda 8) de 15 metros de resolución espacial. El área de cobertura aproximada de la escena es de 170 x 183 kilómetros.

El empleo de las anteriores imágenes de satélite puede realizarse en bandas individuales pero también en índices espectrales, resultado de operaciones algebraicas entre bandas específicas, entre los índices más comunes sobresalen dos, el NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) y el NDWI (Índice de diferencial de agua normalizado). Entre las técnicas derivadas de bandas satelitales multiespectrales, se destacan el empleo de los índices de vegetación, este índice implica una transformación que implican efectuar una combinación matemática, entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen. Estos índices están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espacio-temporales del comportamiento de la vegetación (Masek *et al.*, 2001).

En el caso de NDVI se utiliza como indicador del vigor de la vegetación, en estudios relacionados a comportamientos de vegetaciones boscosas, naturales, presencia de vegetación. Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales luz infrarroja cercana. Considerando que pueden existir otras coberturas con alta reflectancia en el infrarrojo, u otras con alta absorción en el rojo, el empleo de solo una banda puede conducir a errores. Sin embargo, sólo la vegetación viva produce invariablemente ambas respuestas, de modo que si se calcula el cociente de la reflectancia infrarroja por la roja, o su diferencia, como la primera siempre aumenta conforme la segunda disminuye, el cociente (o diferencia) será mayor cuanto más vegetación haya, por el efecto aditivo que una mayor abundancia de vegetación produce (Gonzaga, 2014).

Este índice es el más utilizado para todo tipo de aplicaciones, la razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y $+1$), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes entre otros (Sánchez, *et al*, 2000). Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además permite la comparación entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera. El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación del

índice debe, asimismo, considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anual, para distinguir oscilaciones naturales de la vegetación con los cambios en la distribución temporal y espacial, causados por otros factores.

- El agua tiene reflectancia mayor en el infrarrojo que en el rojo, por lo tanto valores negativos de NDVI.

- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos aunque no muy elevados.

- La vegetación densa, sana y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

- Las nubes presentan valores similares en el R e IRC, por lo que su NDVI es cercano a 0.

Por otro lado, NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizado) establece la identificación de masas de agua y zonas elevadas de saturación de humedad por medio de imágenes satelitales, de esta forma se puede emplear este índice como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses. El Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) es un nuevo método que se ha desarrollado para delinear las características de aguas abiertas y mejorar su presencia en imágenes digitales de detección remota. El NDWI utiliza la radiación infrarroja cercana reflejada y la luz verde visible para mejorar la presencia de tales características al tiempo que elimina la presencia de características de suelo y vegetación terrestre. Se sugiere que el NDWI también puede proporcionar a los investigadores estimaciones de turbidez de los cuerpos de agua utilizando datos digitales de detección remota (McFeeters ,1996).

II.4. Percepción remota y calidad del agua

La necesidad social y económica requiere que la calidad de los recursos hídricos disponibles, este monitoreada con un control más preciso, incluyendo indicadores de agua, mediante recopilación de muestras de campo *in situ* y *ex situ* para medir a una alta precisión. Aunque esto es un proceso intensivo en mano de obra que consume tiempo y dinero, por ello con los avances en la ciencia espacial y el creciente uso de las aplicaciones informáticas y el aumento de las técnicas de teledetección se han convertido en herramientas útiles para lograr la aplicación de técnicas que permiten controlar e identificar de una manera más eficaz y legible a través de un procesamiento de un proceso químico, físico y biológico que han estado en uso

desde la década de 1970 y continúa a ser ampliamente utilizado en la evaluación de la calidad del agua.

La calidad del agua en término general, describe su potencial para ser utilizada o si el ambiente puede estar en peligro por los componentes que la constituyen, por eso su estudio y control indispensable, ya que es un elemento esencial para todo ser vivo; ahora bien, la región del espectro electromagnético que incluye la luz visible e infrarroja se utiliza para determinar indicadores de la calidad del agua midiendo la energía electromagnética reflejada, mientras que en la región de término infrarrojo mide directamente la energía emitida, en el caso de la región de microondas únicamente se puede emplear en la búsqueda de contaminantes superficiales (Aguirre, 2011).

Asimismo, pueden establecer relaciones entre parámetros de calidad del agua y la reflectancia, debido a que la intensidad y color de la luz es modificada por el volumen del agua y sus contaminantes de esta forma, puede generarse relaciones empíricas entre mediciones de reflectancia y la calidad del agua de una muestra.

De tal manera el uso de la percepción remota en la evaluación de la calidad del agua puede ser una herramienta útil. Durante la última década, esta disciplina ha puesto una fuerte capacidad de monitorear y evaluar la calidad de las aguas continentales, utilizando con frecuencia las bandas visibles e infrarrojo cercano del espectro solar.

Aunque las capacidades de estas técnicas para evaluar la calidad del agua son innegables, por sí sola no es suficientemente precisa y debe ser utilizado en conjunto con los métodos de muestreos tradicionales y levantamiento de campo.

Algunas de las ventajas mencionadas son:

- Da una vista sinóptica de todo el cuerpo de agua para un monitoreo de la variación espacial y temporal.
- Es posible tener una vista sincronizada de la calidad el agua en un grupo de lagos más de varias cuencas hidrológicas.
- Proporciona un registro histórico exhaustivo de la calidad del agua y representa tendencias en el tiempo.

Lo anterior coincide con lo expuesto por Espinal (2013) donde con ayuda del espectro electromagnético, la percepción remota permite obtener información a distancia de parámetros específicos como son, químicos, físicos y biológicos, esto depende de la energía que refleja al

sensor, que lo trasmite. Entre la superficie y el sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la luz reflectada.

III. Problemática ambiental y justificación de la investigación

Si bien ya existen diversas aplicaciones de la teledetección y estudios que comprueban un resultado comparativo con los parámetros físicos, químicos y biológicos relacionados con la calidad del agua, se identifica la falta de información para determinar la relación específica entre cada uno de los parámetros utilizados en el monitoreo de los cuerpos acuáticos, incluyendo el ICA, con las diferentes bandas espectrales, así como con las combinación entre ellas. Esto es particularmente relevante porque dicha relación está determinada por las condiciones específicas de cada cuerpo acuático, y en este caso para la Laguna de Tres Palos. Al investigar sobre el uso de los satélites en la determinación y monitoreo de la calidad del agua en la Laguna de Tres Palos se estará en posibilidad de contar con información que ayude a su adecuada planeación, monitoreo y manejo. El crecimiento poblacional y económico poco planificado de las zonas costeras, particularmente con desarrollos urbanos y turísticos ha generado diversos problemas ambientales. Esto es relevante en las comunidades de los alrededores de la Laguna de Tres Palos, en el municipio de Acapulco, que generan desperdicios domésticos y municipales en los márgenes del río de la Sabana, siendo la principal fuente de su contaminación, que en los últimos años, han sido receptores de ingresos excesivos de nutrientes y contaminantes aportando descargas residuales a esta Laguna, impactando drásticamente los recursos hídricos en su forma física, química y biológica; por tal motivo, es necesario conocer la condición de calidad del agua de la laguna de manera periódica, pero sobre todo de manera más eficiente, por lo que es necesario valorar el uso de la percepción remota. En México existen 125 lagunas costeras en condiciones similares de contaminación por lo que los resultados de este trabajo puedan dar pauta para estudios similares en ellas.

Esto puede ser posible debido a la mayor disponibilidad de imágenes de satélite, que hoy en día se brindan, sin embargo es necesario establecer la posible relación entre los índices físicos y los índices geomáticos, lo cual podría depender de las respuestas espectrales del agua de la Laguna a los diferentes parámetros que determinan su calidad. De esta manera se podría

desarrollar un método que permita dicha valoración frecuente e incluso conocer su situación hacia años anteriores y posteriores.

IV. Objetivos

General:

- Determinar la calidad del agua mediante la integración de índices biofísicos y geomáticos, en la Laguna de Tres Palos, municipio de Acapulco.

Específicos:

- Evaluar la calidad del agua de la Laguna de Tres Palos, mediante parámetros físicos, químicos y biológicos.
- Procesar imágenes de satélite para obtener índices que reflejen las características espectrales del cuerpo acuático.
- Conocer la relación entre índices de percepción remota con los parámetros e índices de calidad del agua.

V. Hipótesis

Si se conoce que las bandas espectrales 1,2 y 3 y el índice NDWI han sido utilizados para reflejar la condición de calidad de los cuerpos de agua, entonces su combinación mostrará la mejor relación con los índices de calidad de agua basada en parámetros físicos, químicos y biológicos.

VI. Diseño de la investigación

Área de estudio

La Laguna de Tres Palos desemboca en el Océano Pacífico en forma de barra, la localidad más representativa y de la que toma el nombre es el poblado de Tres Palos, Municipio de Acapulco, con aproximadamente 5,000 habitantes indígenas, se localiza entre los 16° 47' y 16° 49' de latitud norte y 99°39 y 99° 47' de longitud oeste, posee una extensión aproximada de 55 km². Se sitúa entre el río de la Sabana que es la principal fuente de abastecimiento de la Laguna, proveniente del cerro de San Nicolás, y el río Papagayo que sale al mar a 2.5 km hacia el sur de la misma.

Tiene una superficie aproximada de 5,500 ha, como se muestra en la figura 8, la Laguna de Tres Palos tiene dimensiones de 16 km de longitud y 6 km de ancho. En época de lluvias los vientos predominantes son del SE y durante los meses de secas son de NE, La evaporación media anual es de 1,900 a 2,000 mm (Rosas *et al.*, 2011).

Se encuentra geológicamente formada en la era cenozoica en el periodo cuaternario con un suelo lacustre, la intensidad del oleaje costero aunada a la disponibilidad de sedimentos ha producido un corrimiento litoral el cual ha creado la barrera que separa la laguna. Por lo que se conecta estacionalmente con éste a través de un canal, por lo cual su salinidad es muy baja durante todo el año, pero disminuye con dirección hacia la barrera. El cuerpo de agua presenta modificaciones de la densidad del agua en las estaciones; durante el período de primavera - verano se presentan vientos dominantes del sureste, con velocidad promedio de 4.6 m/s (INEGI, 2015).

Este cuerpo lagunar es un importante generador de empleo, servicios turísticos y de recreación por la localidad de Tres Palos esta localidad situada en el Municipio de Acapulco de Juárez en el Estado de Guerrero con 5001 habitantes (Cruz, 2014).

No está considerada como ANP (área natural protegida) y las actividades que se pueden realizar son la pesca, el comercio, la agricultura y la ganadería.

De manera particular, el Río La Sabana nace en el cerro San Nicolás, en la Sierra Madre del Sur a una altitud de 1,600 msnm, con un desarrollo de 57 km hasta la Laguna (INEGI, 2015).

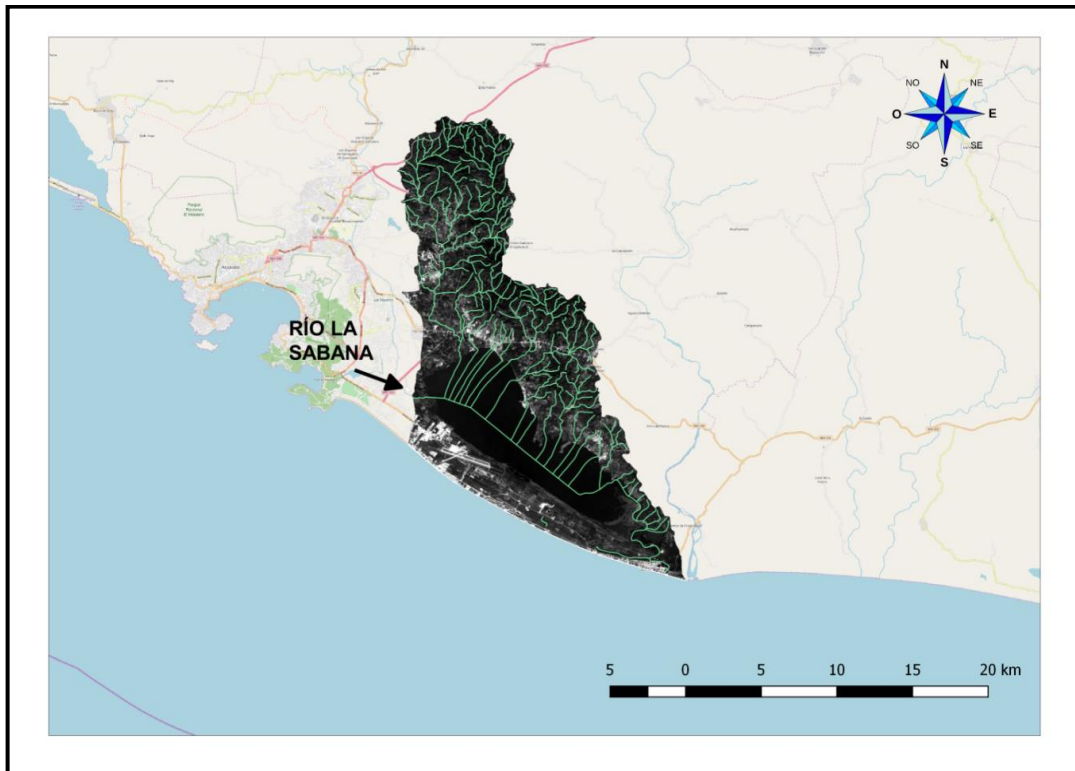


Figura 8. Localización de la Laguna de Tres Palos. Fuente: elaboración propia.

Método para campo

El trabajo se desarrolló en dos fases, trabajo de campo y procesamiento de imágenes satelitales.

En la primera fase, se realizó un muestreo *ex situ* e *in situ* definiendo cinco estaciones de muestreo a lo largo de la Laguna de Tres Palos llamados Embarcadero, Río, Centro, Verado y Boca de Canal como se muestra en la figura 9, tomando en consideración la ubicación de las descargas de agua y el eje de la parte central de la Laguna, con ayuda del visualizador Google Earth los muestreos se realizaron con una embarcación con motor fuera de borda, en cada punto de muestreo se tomaron las referencias geográficas con un receptor GPS utilizando el *datum* WGS 84.

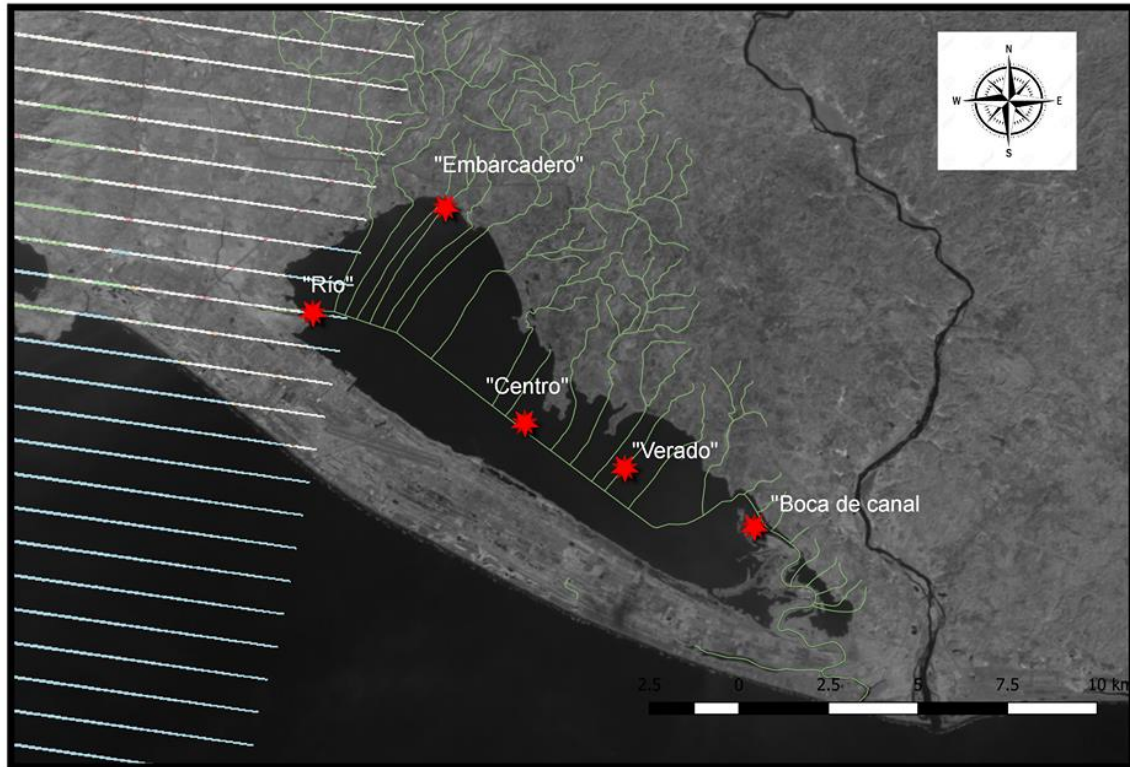


Figura 9. Estaciones de muestreo de la Laguna de Tres Palos. Fuente: elaboración propia

Las muestras de agua se tomaron desde la embarcación a nivel de superficie de forma manual y a una profundidad promedio de 4.1 m con una botella Van Dorn, en frascos de polietileno y de forma manual con botellas blancas de 1L previamente etiquetadas. Se conservaron las muestras en refrigeración a 4°C hasta su análisis, con el fin de evitar su deterioro o contaminación.

Se hicieron registros *in situ* de la temperatura, pH, conductividad, profundidad, transparencia, y oxígeno disuelto, con su respectivo aparato de medición, potenciómetro, conductímetro, disco de Secchi y multiparámetro portátil. De manera *ex situ*, se realizaron parámetros como demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), Coliformes totales y *E.coli*, nitritos, nitratos, amonio, para posteriormente procesar con técnicas especializadas según las normas oficiales vigentes y los métodos estandarizados y aprobados por la APHA (1995), siguiendo el manual Hach (1997) figura 11.

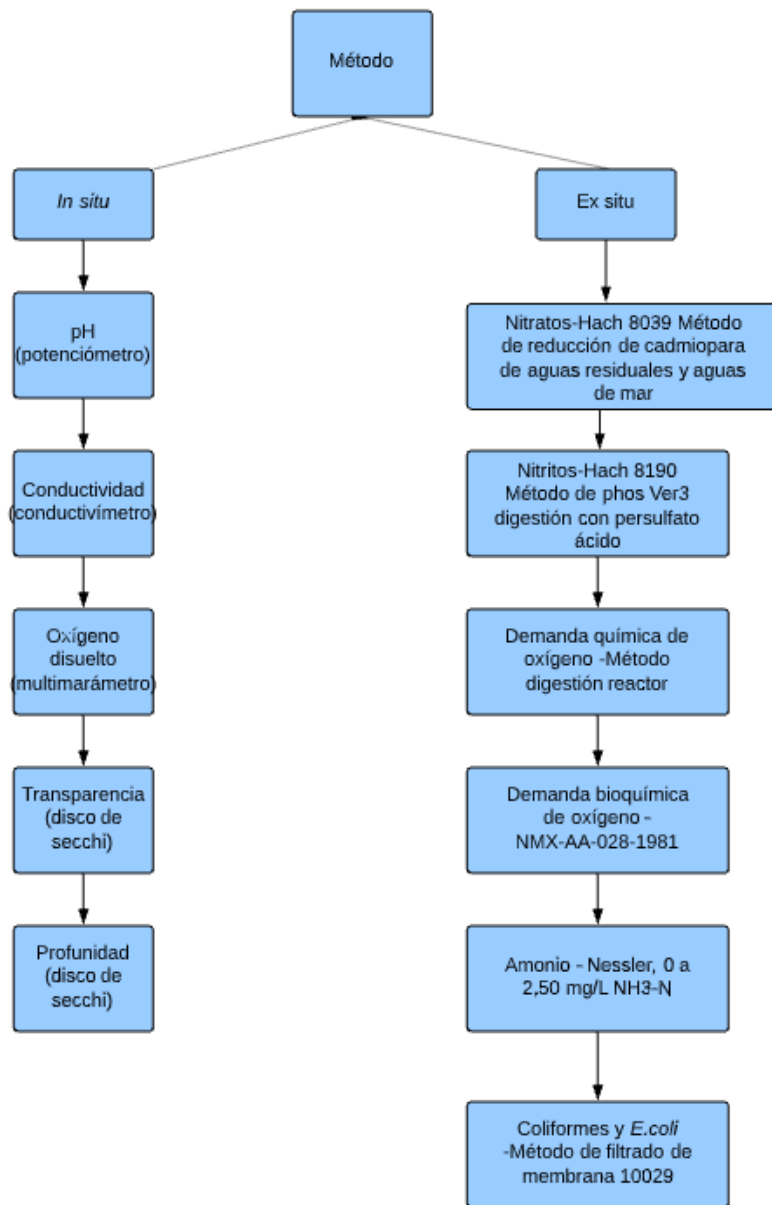


Figura 10. Método in situ y ex situ (elaboración propia).

Los nitritos se determinaron por el método 8190 Método de PhosVer 3 que consiste en una digestión con persulfato ácido, el cual reacciona con ácido para formar una sal de diazonio intermedia, misma que se empareja con el ácido cromotrópico para producir un complejo de color rosa directamente proporcional a la cantidad presente de nitrito; posteriormente se mide la absorbancia a una longitud de onda 543 nm.

Asimismo, se utilizó el método Hach 8039 (Método de reducción con cadmio) para detectar nitratos en agua con intervalo de detección de 0 a 30 mg/L de $\text{NO}^3\text{-N}$. En general tiene como principio que en presencia de cadmio metálico se reducen los nitritos presentes en la muestra a nitrito. El ión nitrito que se ha formado, reacciona en un medio ácido con ácido sulfúrico para formar una sal de diazonio intermedio que se acopla a ácido gentísico para formar un producto de color ámbar (Hach, 1999).

Para evaluar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) siguiendo el método de la norma NMX-AA-028-SCFI-1981, que consiste en medir la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para efectuar la oxidación de la materia orgánica presente en aguas naturales y residuales y se determina por la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto al cabo de cinco días de incubación a 20°C . Por su parte, para la determinación de la demanda química de oxígeno (DQO) se utilizó el método Digestor de reactor, cuyo principio parte de una gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos que son oxidados con una mezcla de ácido crómico y sulfúrico a ebullición. La muestra se coloca a reflujo en una disolución de ácido fuerte con un exceso conocido de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Después de la digestión, el dicromato no reducido se midió espectrofotométricamente y a partir de la lectura que indica la cantidad de dicromato consumido se calculó la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

Asimismo, la detección simultánea de coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*) se realizó por filtración en membrana (método Hach 10029), que se basa en la filtración de una muestra directa o una alícuota de la muestra a través de una membrana de celulosa que retiene los organismos, la membrana se coloca dentro de una caja Petri en un cojinete absorbente saturado con medio de cultivo líquido m-ColiBlue24 y se incuba durante 24 h a $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Un indicador enzimático en el medio hace que las colonias de coliformes totales cultivadas en el medio m-ColiBlue 24 se tiñan de color rojo, mientras que las colonias *E. coli* son de color azul. La selectividad de los indicadores enzimáticos elimina la necesidad de confirmación, además, este método es comparable con el del número más probable (Hach, 1999). Previo al análisis de los datos, una regresión lineal y una correlación de Pearson.

Cálculo del Índice de Calidad del Agua

Para determinar el índice de calidad del agua, se tomó el Índice de la Fundación Nacional de Saneamiento (NSF, 2006), con el objetivo de poner un número o escala a la contaminación basándose en variables, por ejemplo: oxígeno disuelto, coliformes fecales, pH, DBO_5 ,

temperatura, nitritos, turbidez y sólidos totales, asimismo, se asignan pesos de importancia a cada parámetro (Factor de ponderación W_i). A partir de la ponderación para cada variable, se procedió a calcular su correspondiente subíndice (Q-valor) para lograr esto, se tuvo a la mano el valor numérico de la variable en estudio y se ubicó dentro de las curvas de calidad, definiendo de este modo el porcentaje que le corresponde dentro de la escala de calidad (González, 2006; Samboni, *et al.*, 2007; Montoya, 1997). Los puntajes obtenidos para cada parámetro (Q-valor) es multiplicado por un peso (Factor de ponderación final) y los productos son sumados para obtener el índice que es un valor aritmético de la calidad del agua. Si por alguna razón, alguna de estas variables llegara a faltar, el valor total del índice puede ser calculado por la distribución de sus pesos entre las demás variables, haciendo uso del prorrateo por cociente (González, 2006).

Para determinación del ICA, se empleó la fórmula ya establecida (NSF-National Sanitation Foundation, 2006):

$$\text{ICA: } \sum_{i=1}^9 (Sub_i * w_i)$$

ICA: Índice de Calidad de Agua

Sub_i: Subíndice del Parámetro i

W_i: Factor de Ponderación para el Subíndice i

N = Número de parámetros

En el cálculo del ICA, los factores de ponderación se utilizaron para cada parámetro de acuerdo a los siguientes valores (Chávez, 2015).

Cuadro 7. Valores y uso del ICA (González, 2006).

Valor de ICA General	Uso como Agua Potable	Uso en agricultura	Uso en Pesca y Vida Acuática	Uso Industrial	Uso Recreativo
100	Excelente calidad, no requiere purificación	No Requiere purificaron para riego	Adecuada para el desarrollo de todas las especies	No se requiere purificación	Cualquier tipo de deporte acuático
90	Purificación menor requerida	Purificación menor para cultivos que requieren alta calidad de agua	Límite para peces muy sensitivos	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación	Cualquier tipo de deporte acuático
70	Dudoso su consumo sin purificación	Utilizable en la mayoría de los de los cultivos	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	No requiere tratamiento para la mayoría de industrias de operación normal	Precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
50	Tratamiento potabilizador necesario	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos	Vida acuática limitada a especies muy resistentes	Tratamiento para mayoría de usos	Dudosa para contacto con el agua
25	Dudosa para consumo	Inaceptable para riego	Inaceptable para actividad pesquera y vida Acuática	Uso restringido	Contaminación visible, evitar cercanía

Método para el procesamiento de imágenes satelitales.

Se obtuvo información teórica sobre cuerpos de agua y su relación con la teledetección en artículos especializados, así como de estudios recientes de la Laguna de Tres Palos, para posterior la utilización de las imágenes satelitales, las cuales fueron descargadas de la página web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) especialmente del sensor Landsat 7 con fechas cercanas (máximo 10 días) a la de cada muestreo.

Asimismo, se obtuvieron las capas vectoriales del SIATL (simulador de flujos de agua de cuencas hidrológicas), para recortar solamente la cuenca hidrológica RH-19 Costa Grande, donde se encuentra la zona de estudio utilizando una capa de escurrimientos.

El procedimiento de las imágenes satelitales, se elaboró con el software libre Qgis 2.8, se realizó una corrección atmosférica, un recorte de cada banda espectral, y la obtención de reflectancia de cada punto de muestro por mes y por punto específico.

El procedimiento para la obtención de los índices de percepción remota se realizó conforme a Genesis y Yengoh (2015), como a continuación se menciona:

El cálculo del NDVI se realizó mediante la siguiente fórmula (Landsat 7):

$$\text{NDVI: } (4-3) / (4+3)$$

Con las bandas

Banda 3

Banda 4

NDWI.

El cálculo de NDWI se realizó, mediante la siguiente fórmula de la combinación de bandas espectrales (Landsat 7):

$$\text{NDWI: } (4-5) / (4+5)$$

Con las bandas

Banda 4

Banda 5

Con el resultado del Índice de Calidad del Agua y el resultado obtenido de los índices espectrales, se realizó un análisis estadístico de normalidad para los datos en campo, un análisis de regresión lineal y una correlación de Pearson (Figura 12).

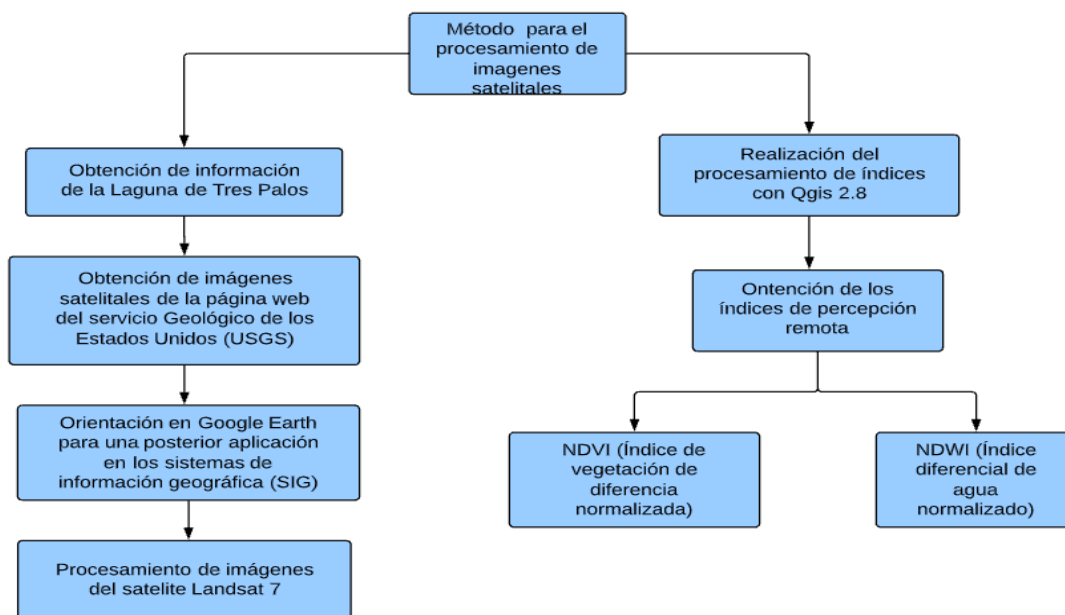


Figura 11. Método para el procesamiento de las imágenes satelitales (elaboración propia).

VII. Resultados y discusión

VII.1. Parámetros de calidad del agua

Para realizar la interpretación de los resultados se empleó como referencia la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA CE-CCA-001/89, la primera establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, misma que es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. La segunda podrá calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, en la acuacultura, o para la protección de la vida silvestre.

Con respecto a la temperatura, la Laguna presentó un promedio de 29.9 °C, con un mínimo de 25.4°C se presentó en el punto de “Embarcadero” en el mes de octubre y un máximo de 34.2 °C en el sito “Boca de canal” en el mes de julio (figuras 13 y 14). Esto último, es superior a lo reportado por De la Lanza (2008) con 29.4 C° y por (Sevilla, 1971) con 28.5 °C, para el mismo cuerpo acuático. De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas de aguas residuales en aguas costeras, la temperatura de la Laguna de Tres Palos no sobrepasa el límite de los 40°C. Sin embargo en algunos puntos de muestreo, sobrepasan los 32°C, el cual es el límite máximo para los CE-CCA-001/89 para la Protección de la vida acuática en agua dulce, marina y estuarios.

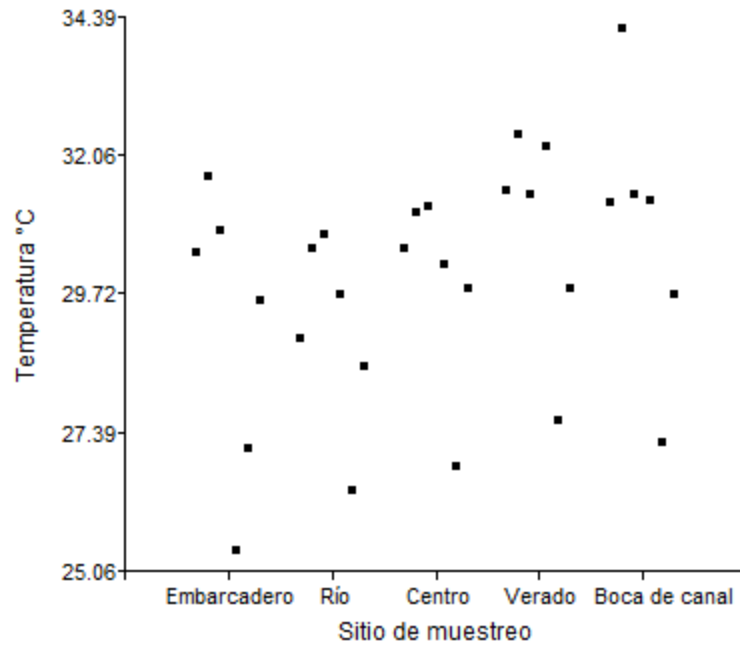


Figura 12. Variación de la temperatura por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

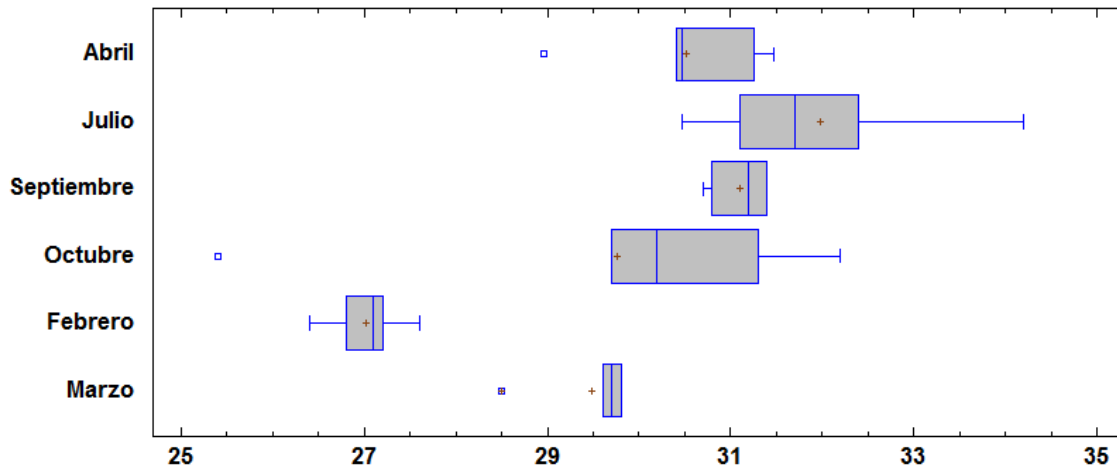


Figura 13. Diagrama de cajas múltiples para la temperatura de la Laguna de Tres Palos.

El pH tuvo un promedio de 8.6, ubicándose el valor máximo de 9.51 en los puntos “Verado” y “Boca de canal”, los meses de abril y julio, mientras que el mínimo fue 6.2 en el sitio “Río” en los meses de abril y julio. Estos valores obtenidos no superan el límite máximo permisible para la descarga de aguas residuales a aguas de bienes nacionales que va de 5 a 10 (NOM-001-SEMARNAT-1996). Mendieta (2006) reporta un pH de 7.8 para una laguna costera similar a la

Laguna en estudio, mientras que en otros trabajos (Ortiz, 2014) fue de 6.7 y Ortega (2011) registró un pH de 6.5. Por ello, como se aprecia en la figura 16, destaca que la Laguna de Tres Palos tiende a la basicidad (> 8.6), a causa de las actividades que se realizan en el sitio su zona de influencia, como son descargas de aguas residuales, y probablemente por el mayor intercambio de CO₂ atmosférico y el agua, el cual genera ácido carbónico (HCO₃⁻). La inestabilidad de este compuesto hace que se formen sales, las cuales quedan disueltas en el agua como carbonatos (CO₃⁻) y bicarbonatos (HCO₃⁻) asociados a iones de carga positiva (Na⁺, K⁺ y Ca²⁺). Al existir mayor cantidad de esos compuestos, se provoca un aumento del pH (Contreras, 2012; Broecker, 1974). Debido a que el agua de origen continental tiende a la neutralidad, se observa que los registros de pH más bajos encontrados en la Laguna son los sitios más alejados del mar y más cercana a la desembocadura en el punto “Río” (figura 15).

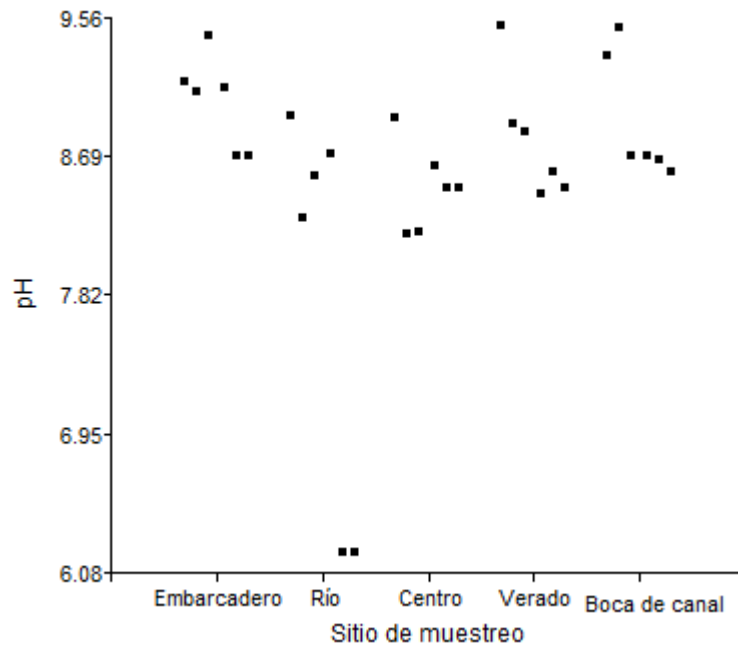


Figura 14. Variación del pH por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

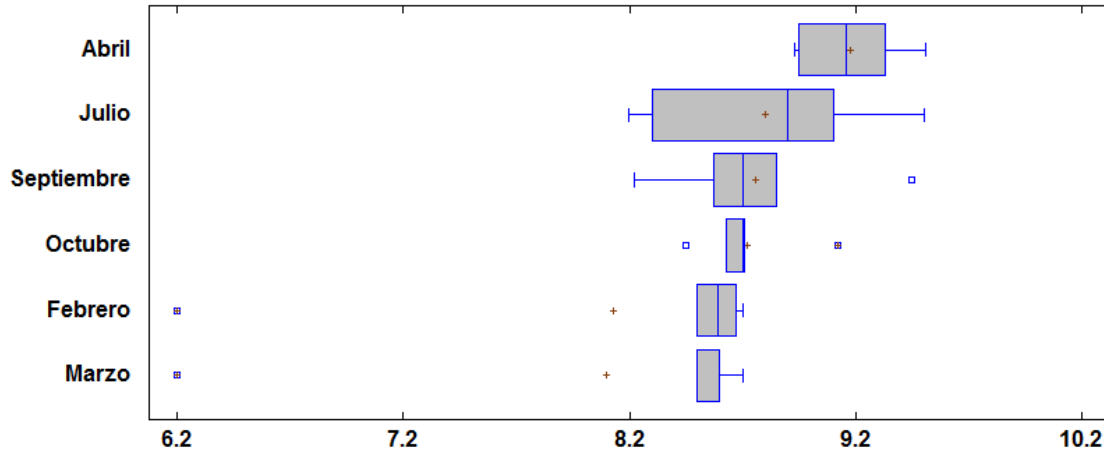


Figura 15. Diagrama de cajas múltiples para el pH de la Laguna de Tres Palos.

Para el caso de la profundidad, en la Laguna se encontró un promedio de 4.0 m con variaciones batimétricas que van desde un máximo de 7.0 m en el “Verado” en el mes de marzo y un mínimo de 0.7 m en “Río” en abril. En la figura 17 se muestra claramente que la mayor profundidad es hacia el centro de la Laguna y hacia el “Verado”. Estos valores destacan por ser mayores que la Laguna cercana (Coyuca) la cual apenas presenta profundidad promedio de 2.5 m (Cruz, 2014), encontrando que la Laguna Tres Palos, es de las Lagunas más profundas del municipio de Acapulco y la zona aledaña (POET-Benítez, 2009).

La variación de la profundidad también está influida por las temporadas de lluvia y secas, así como por el rompimiento temporal de la barra, lo que altera directamente el comportamiento hidrológico de la Laguna. La temporada de lluvias propicia aumento del nivel del agua pero los pobladores realizaron la apertura de la barrera durante unos días provocando que los niveles disminuyan considerablemente en algunos sitios cercanos a la barrera figura 18.

abril (figura 19 y 20). La disminución de la transparencia ocasiona que la luz, no propicie una hidrodinámica deseable, afectando otros procesos como la saturación de oxígeno disuelto, la fotosíntesis, la acumulación de nutrientes o bien, en algún otro fenómeno meteorológico que puede influir: En el caso de este trabajo la reflectancia puede ser relevante porque la transparencia es diferente dependiendo de ciertas longitudes de onda por el efecto de que las partículas en suspensión dispersan menos luz.

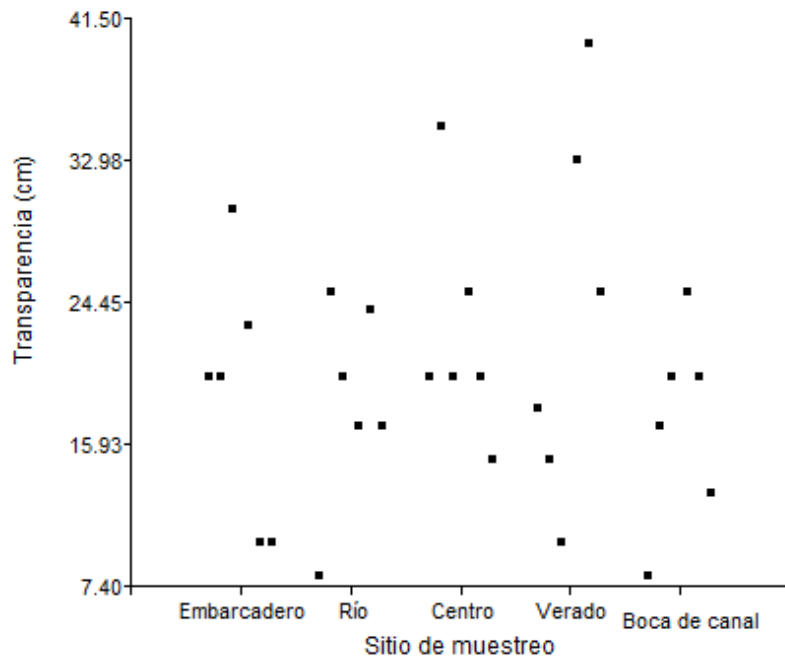


Figura 18. Variación de transparencia por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

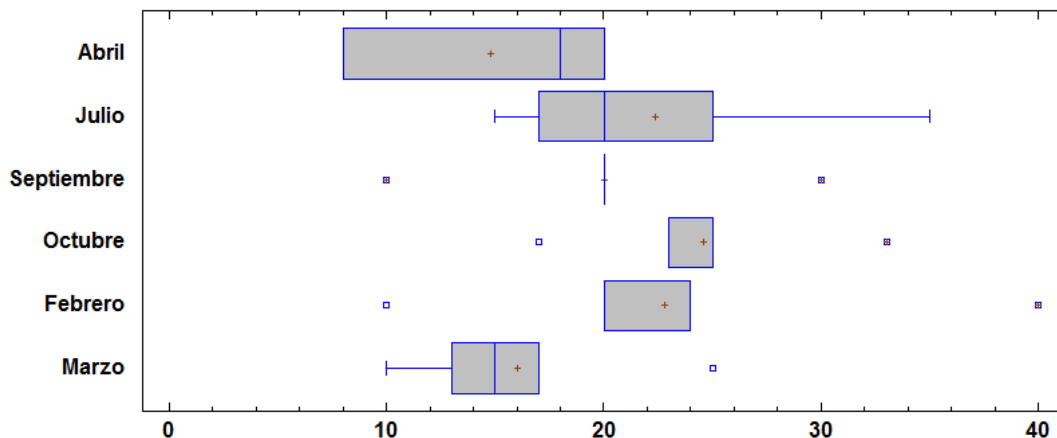


Figura 19. Diagrama de cajas múltiples para la transparencia de la Laguna de Tres Palos.

El oxígeno disuelto (OD) presentó un promedio de 5.38 mg/L y valores máximos de 8.6 mg/L en el sitio "Verado" en septiembre (figura 21) lo cual en principio no afectaría directamente una condición adecuada de la Laguna ya que este valor sobrepasa la recomendación establecida en los CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA CE-CCA-001/89 (5.0 mg/L) para la protección de la vida acuática (agua dulce-agua marina/áreas costeras). Si embargo, claramente se puede distinguir una disminución del oxígeno en el periodo abril - septiembre (figura 22), destacan los 2.43 mg/L en el "Centro" en el mes de septiembre, los cuales están por debajo de la norma y en este caso si ocasionaría problemas ambientales. Mientras menos oxígeno exista, las condiciones van a decaer ocasionando la muerte de animales acuáticos en el sitio. Esto puede atribuirse a la aportación de materia orgánica desde el exterior de la Laguna, sobre todo en los sitios con actividad turística y agrocuaria como es el caso del sitio "Centro" y "Boca de canal".

La situación actual destaca porque en trabajos de fecha no tan lejana señalan porcentajes de saturación similares

(González, 2016) pero los de hace varias décadas fueron mucho mayores (Sevilla, 1971; De la Lanza, 2003), lo que puede estar evidenciando el deterioro ecológico de la Laguna.

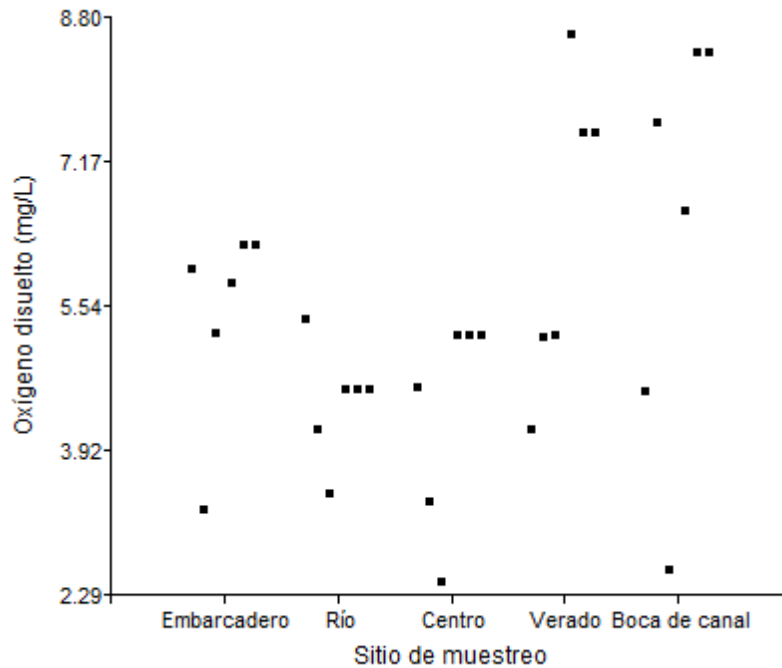


Figura 20. Variación del oxígeno disuelto por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

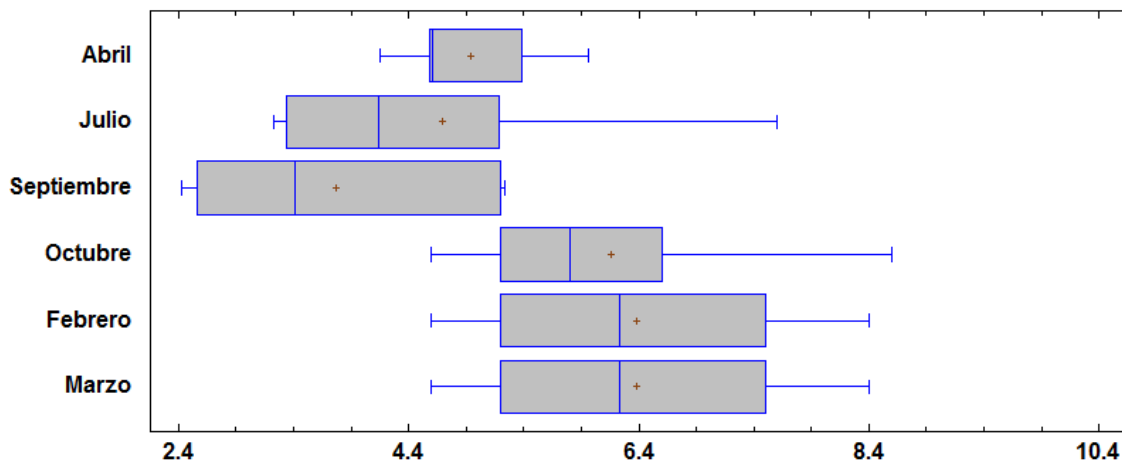


Figura 21. Diagrama de cajas múltiples del oxígeno disuelto de la Laguna de Tres Palos.

Para el caso de la demanda química de oxígeno (DQO) se presentó un promedio de 222.4 mg/L mientras que puntos de muestreo con un máximo de 654 mg/L fue en “Centro” del mes de abril y un mínimo de 38 mg/L en “Embarcadero” mes de septiembre, como se muestra en la figura 24. Se presentó variabilidad elevada (figura 23) la cual es mayor en comparación con otros trabajos reportados por De la Lanza *et al.*, (2008) con 96-476 mg/ L. Realmente no existe

una normatividad mexicana en el marco de la calidad del agua que regule el límite máximo de DQO, pero la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, según lo publicado en la Gaceta Oficial del Distrito Federal; septiembre 2001, permite establecer los valores obtenidos para DQO un valor de 120 mg/L y 100 mg/L para ríos, lagos y estuarios humedales naturales y protección a la vida acuática, Por lo que las concentraciones indican que la Laguna contiene altos niveles de materiales no biodegradable, siendo el resultado de un aumento de descargas provenientes de la cuenca al cuerpo receptor por los servicios de drenaje, rellenos sanitarios en el municipio.

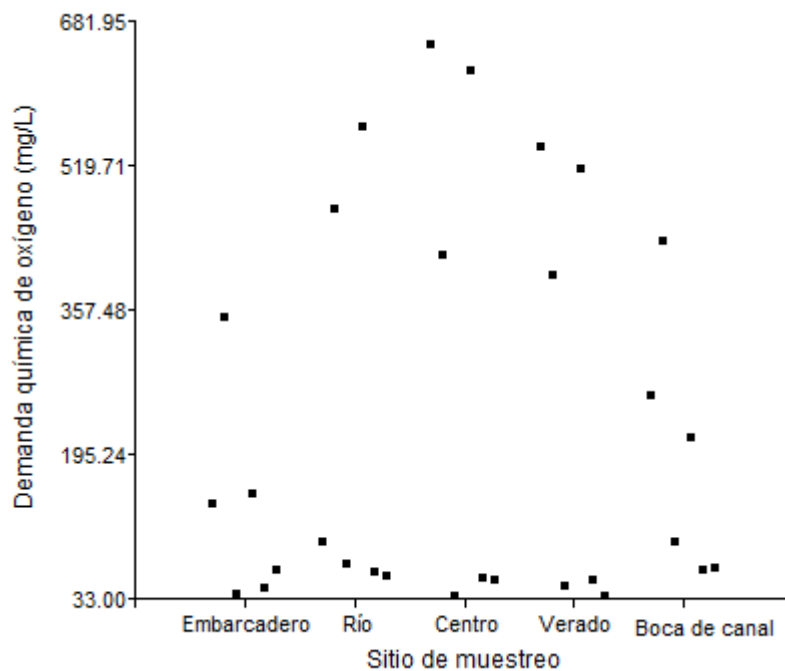


Figura 22. Variación de la demanda química de oxígeno por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

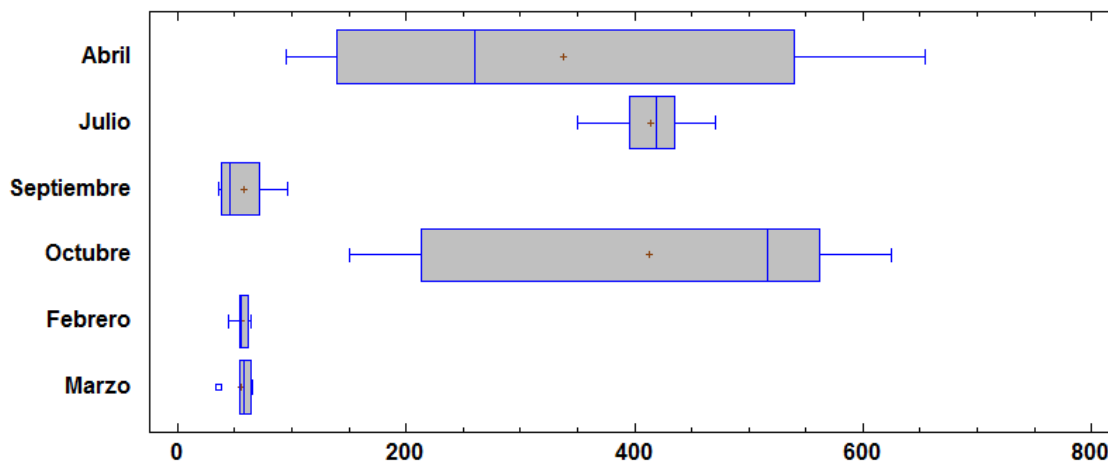


Figura 23. Diagrama de cajas múltiples para la demanda química de oxígeno de la Laguna de Tres Palos.

Con respecto a la demanda bioquímica de oxígeno, los puntos de muestreo presentaron un promedio de 59.7 mg/L, siendo el punto con mayor concentración el de 117 mg/L en “Centro” del mes de marzo y el mínimo con 6.54 mg/L en “Boca de canal” mes de octubre (figura 25 y 26), algo similar a los reportado por De La Lanza (2008) con un intervalo de 43.6 a 116.0 mg/L, los cuales sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para uso recreativo (75 mg/L), al igual se rebasa para la protección de vida silvestre (30 mg/L). Esta situación es similar a la Laguna de Tres Palos (Cruz, 2014) con un promedio mensual de 82.4 ± 33.6 mg/L, observando poca diferencia con respecto a la Laguna de Tres Palos.

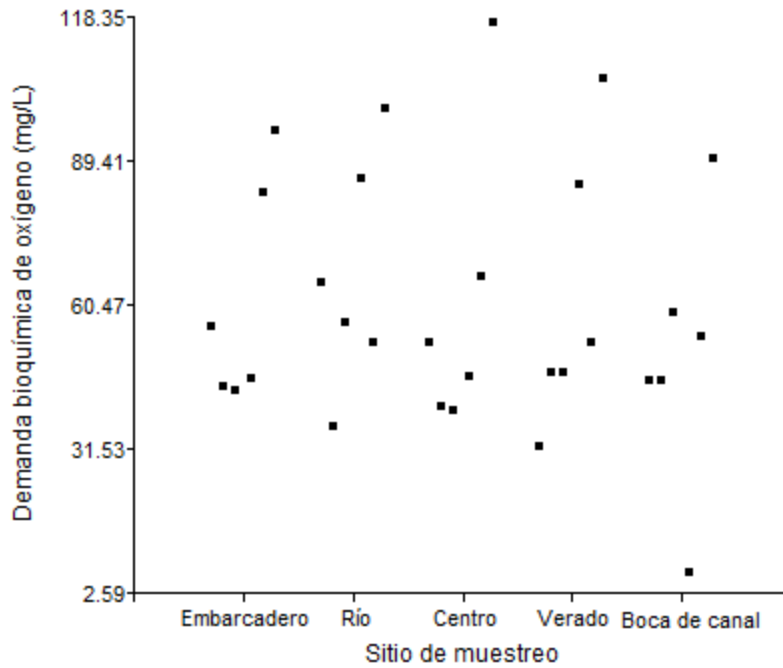


Figura 25. Variación de la demanda bioquímica de oxígeno por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

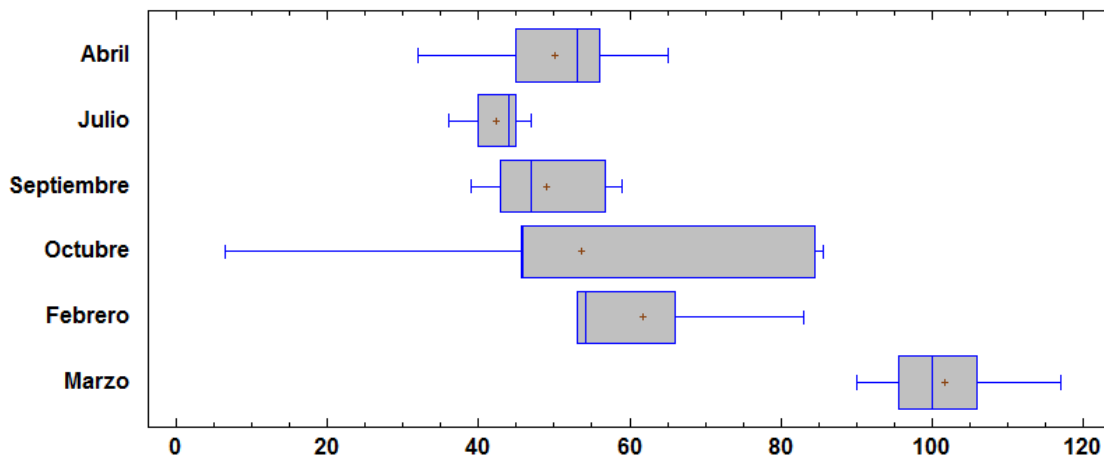


Figura 24. Diagrama de cajas múltiples para la demanda bioquímica de oxígeno de la Laguna de Tres Palos.

Con respecto a la conductividad, los puntos de muestreo presentaron un promedio de 2.88 mS/cm, siendo la mayor concentración en “Boca de canal” con 3.88 mS/cm del mes de febrero

y octubre, mientras que el más bajo fue “Río” con 1.98 mS/cm del mes de febrero y marzo (figura 26).

Estos puntos de muestreo fueron variables, por la re suspensión de partículas sedimentarias por la re-circulación del agua.

De acuerdo con Aguirre (2011) es posible observar a través de su respuesta reflectiva, que se trata de una zona de transición, en la que se combina la influencia de aguas relativamente claras del cuerpo principal de la Laguna con un aporte alto de partículas dispersoras y de transporte de sedimentos provenientes de aguas continentales.

En otros trabajos reportados, Espinal (2013) una Laguna costera es muy bajo a la de estudio, presentó un promedio de 602.7 ± 41 , que en comparación con esta Laguna es mucho menor su conductividad, al igual en otro trabajo reportado de una Laguna del mismo sitio que la Laguna de Tres Palos Cruz (2014) presentó un promedio de 2.1 ± 0.5 mS/cm mucho menor a la Laguna en estudio. El comportamiento de la conductividad, está relacionada con el aporte de las dos masas de agua, continental y marina, y los escurrimientos locales de las zonas, así como las actividades que se realizan dentro de la laguna. La materia orgánica y las partículas provocan una disminución de la luz, afectando las actividades fotosintéticas de las plantas y algas, que ocasiona una baja en la concentración de oxígeno.

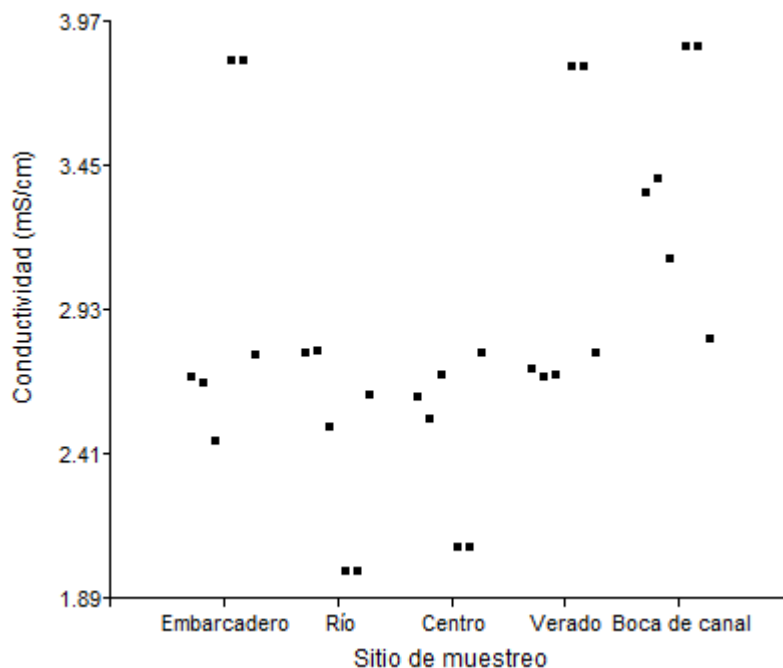


Figura 25. Variación de la conductividad por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

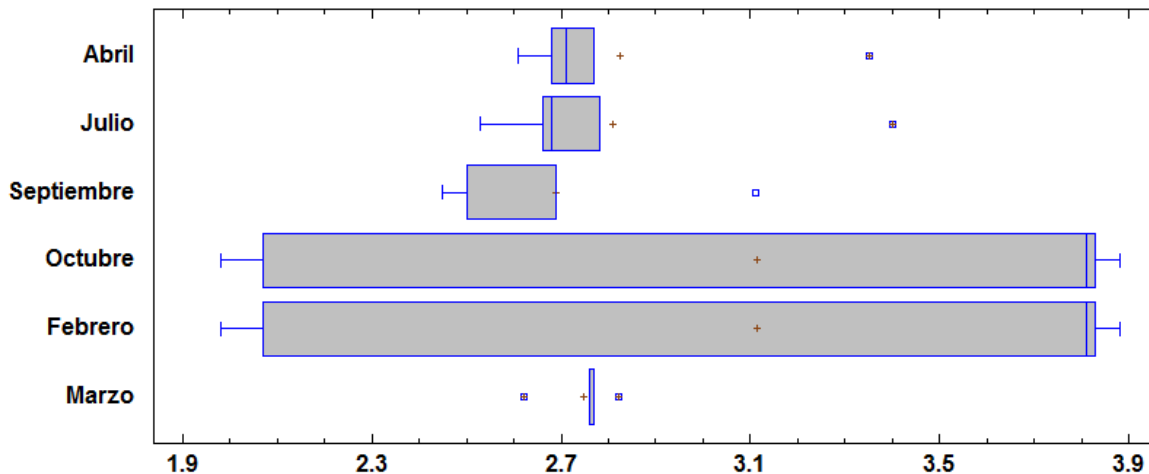


Figura 26. Diagrama de cajas múltiples para la conductividad de la Laguna de Tres Palos.

En el caso de los nitratos, el promedio fue de 8.20 mg/L con el punto de muestreo significativamente más alto en el “Embarcadero” con 16.7 mg/L del mes de marzo, mientras que el más bajo fue el “Río” con 1.3 mg/L del mes de septiembre (figura 28 y 29).

Estos resultados, en casi todos los puntos, sobrepasan los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua para el abastecimiento de agua potable y uso pecuario (5.0 mg/L). Los nitratos pueden provenir de las actividades antropógenicas, siendo las agrícolas una de las principales y primeras evidencias de fuentes de contaminación, así como los residuos provenientes de las comunidades aledañas en las cuales se encuentran vertederos a cielo abierto, también las descargas de aguas domésticas que desembocan directamente a la Laguna. Los puntos de mayor nivel de nitratos pueden atribuirse a que en el sitio “Embarcadero” se encuentran muy cerca de una área de recolecta de peces, en donde los pobladores dejan una gran cantidad de residuos orgánicos, mientras que se esperaría una mayor contaminación en el sitio “Centro” ya que en ese lugar la población establece redes de pesca y hay una gran actividad de cosecha. Lo anterior contrasta con la Laguna de Coyuca (Cruz, 2014) en donde se presentó un promedio 3.3 ± 2.4 mg/L con un resultado irregular en todos sus puntos de muestreo, lo que determina una contaminación más severa orientada hacia una eutrofización en la Laguna de Tres Palos.

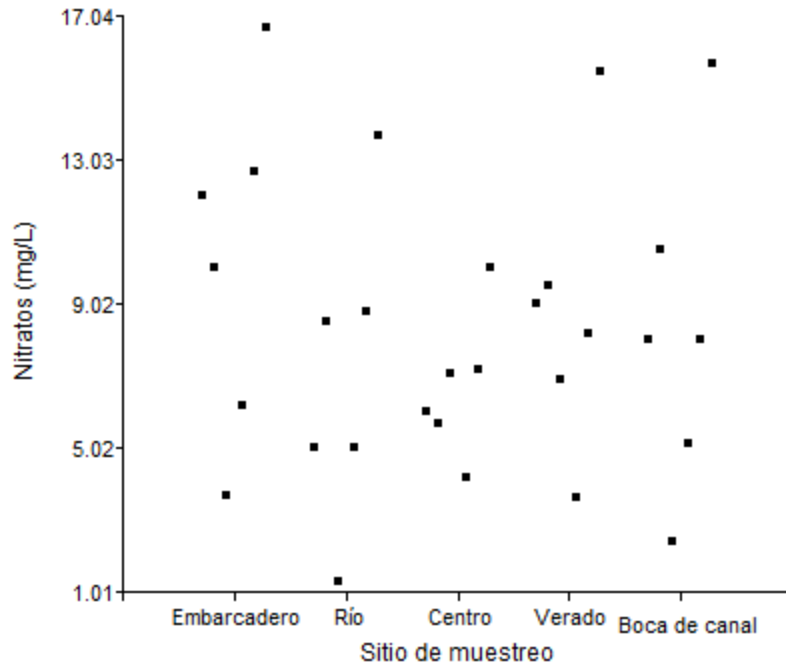


Figura 27. Variación de los nitratos por puntos de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

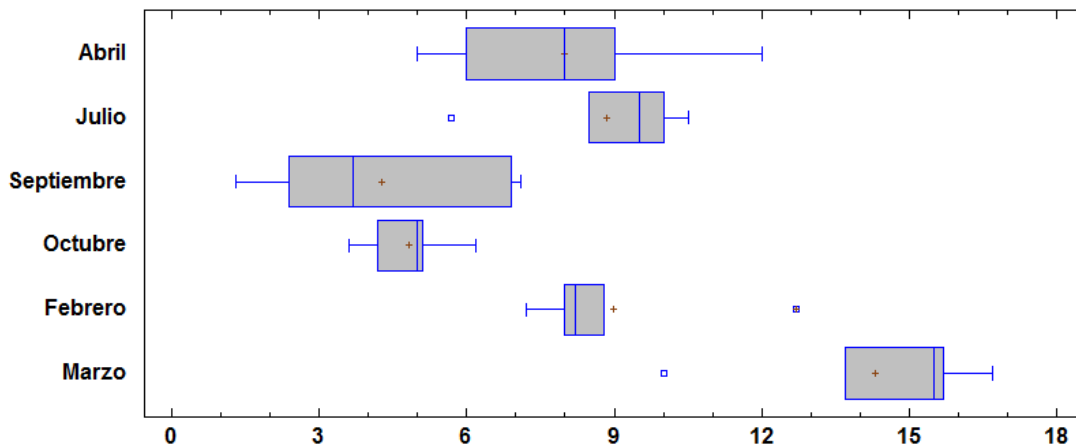


Figura 28. Diagrama de cajas múltiples para los nitratos de la Laguna de Tres Palos.

En el caso de los nitritos, se presentó un promedio de 22.8 mg/L sobresaliendo tres sitios por valores más altos, como por ejemplo “Embarcadero” con 16.7 mg/L del mes de marzo y el mínimo fue “Río” con 1.3 mg/L del mes de septiembre (figura 30). Esto puede atribuirse a las actividades que se realizan en el punto de “Embarcadero”, mientras que en el caso del mes de octubre, entra en la época de lluvias, donde existe una mayor dilución.

En trabajos reportados de otra Laguna en el municipio de Acapulco, de acuerdo a Cruz (2014) con 3.3 ± 2.4 mg/L lo que indica que existe mucha diferencia entre ambas lagunas y sobre todo una acumulación de nutrimentos en la Laguna de Tres Palos, volviéndola vulnerable a una eutrofización. A causa de esto, se encuentra muy por encima de los límites máximos permisibles en los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua para límites para el abastecimiento de agua potable y uso pecuario 0.05 mg/L

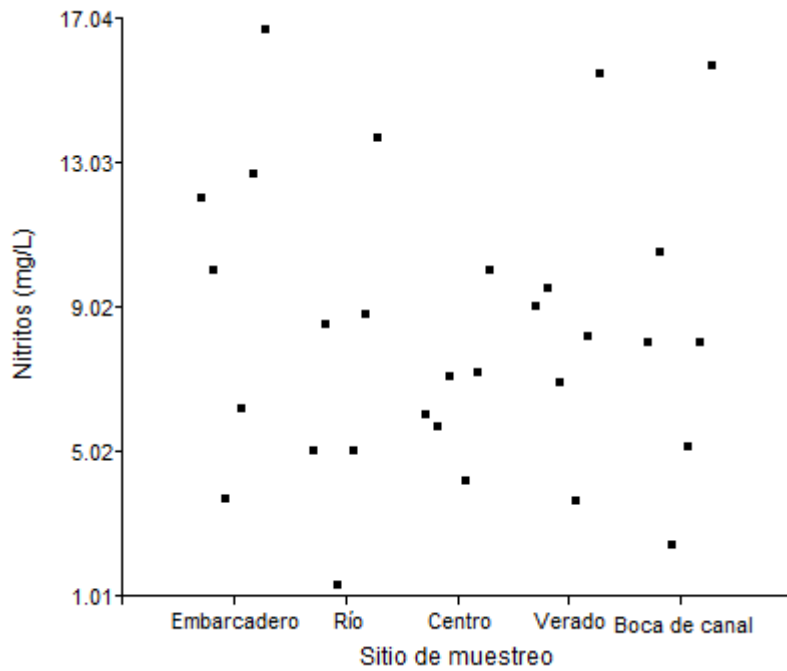


Figura 29. Variación de los nitritos por puntos de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

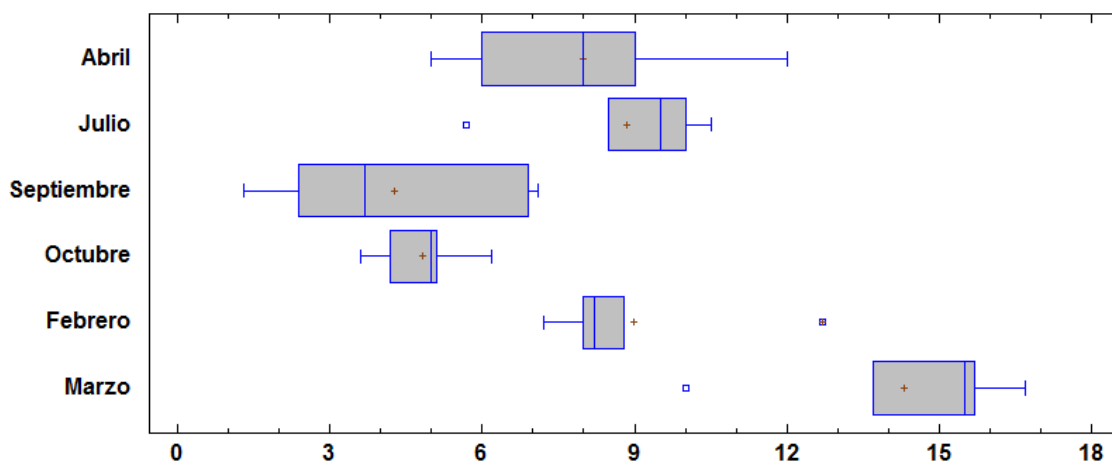


Figura 30. Diagrama de cajas múltiples para los nitritos de la Laguna de Tres Palos.

En el caso del amonio, se presentó un promedio de 0.23 mg/L con varios sitios por arriba de 0.35 mg/L sobre todo en el mes de julio, mientras que los más bajos fueron en febrero y marzo (figura 31 y 32), muy probablemente por descargas de aguas residuales las cuales contienen materia orgánica, así como infiltraciones de fertilizantes derivadas de las áreas de cultivo. En otros trabajos se han reportados concentraciones más elevadas, como es el caso de De la Lanza (2014) quien registró una media de 0.124 mg/L de amonio en la Laguna.

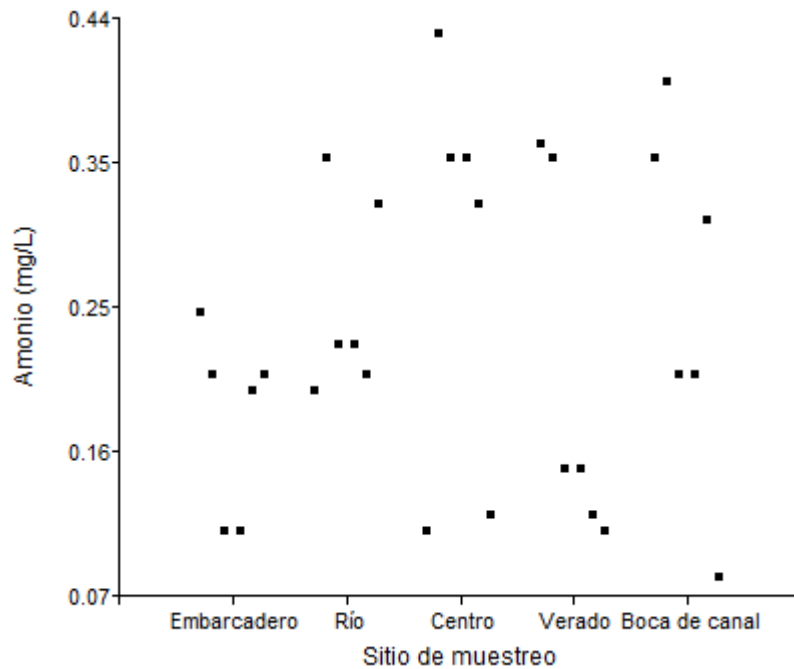


Figura 31. Variación de amonio por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

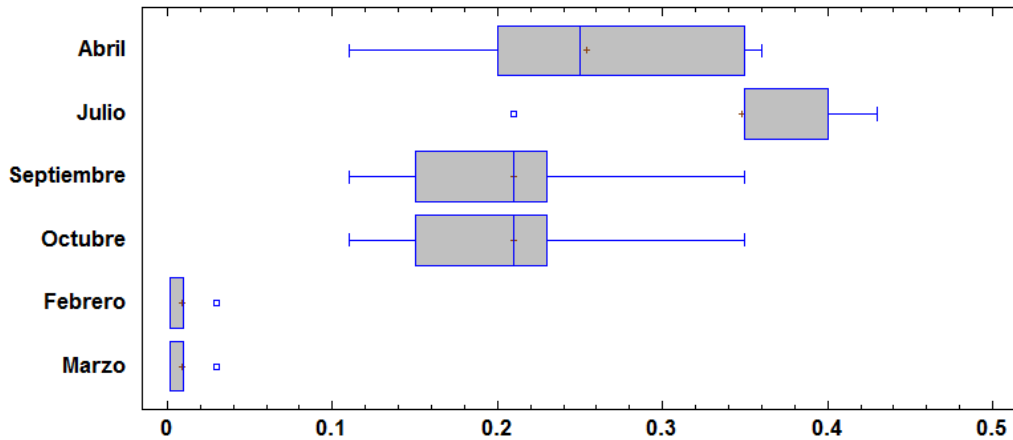


Figura 32. Diagrama de cajas múltiples para el amonio de la Laguna de Tres Palos.

Para el caso del análisis biológico, se presentó un promedio de 184.73 UFC de coliformes totales, lo cual es similar a la Laguna de Coyuca (Cruz, 2014), con valores bajos en los meses de febrero y marzo, mientras que valores altos en abril y julio (figura 25 y 26). De acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 para servicios al público con contacto directo, no se sobrepasan los límites máximos permisibles (240 UFC).

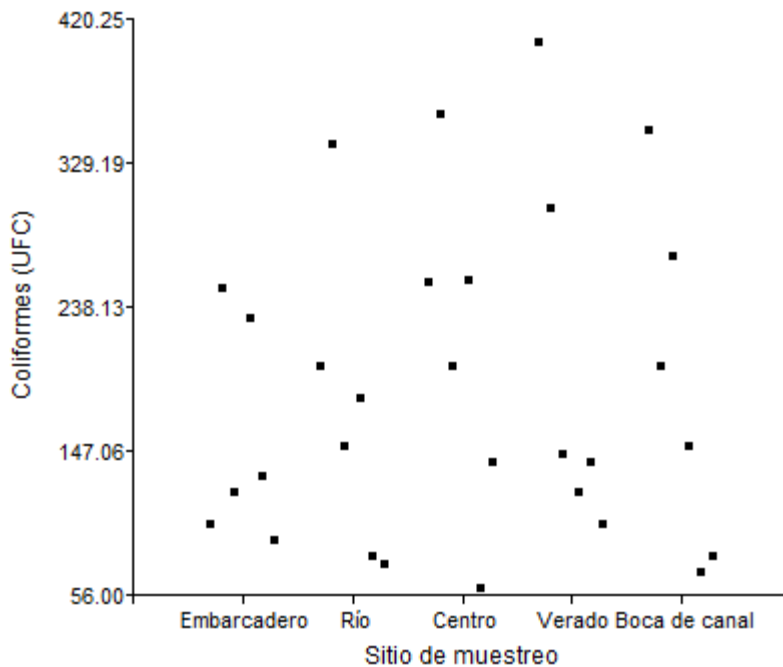


Figura 33. Variación de coliformes por sitio de muestreo de la Laguna de Tres Palos.

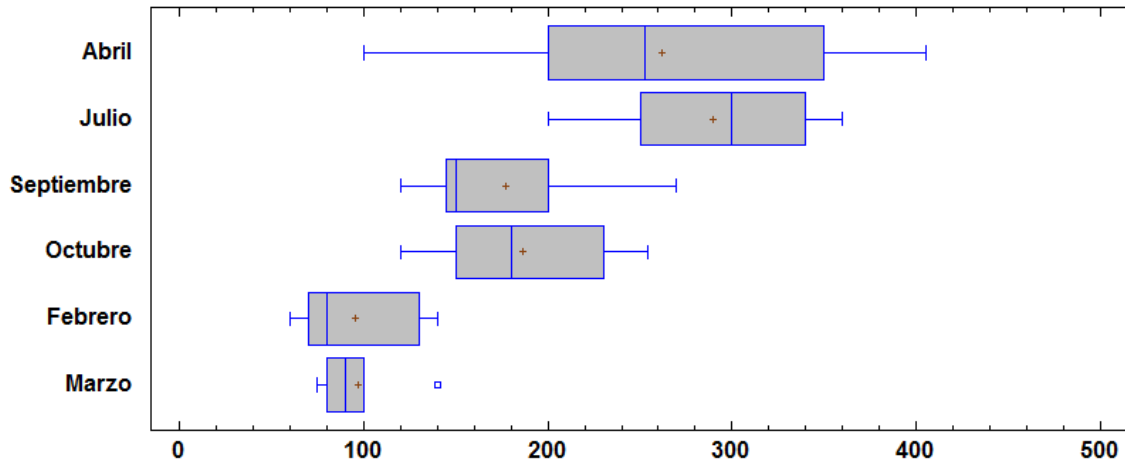


Figura 34. Diagrama de cajas múltiples para coliformes de la Laguna de Tres Palos.

VIII.2. Índice de calidad del agua.

En este trabajo, además de los parámetros físicos, químicos y biológicos individuales de la Laguna, y con la intención de relacionarlos con el procesamiento digital de las imágenes de satélite, es recomendable buscar una relación con los índices de calidad, los cuales integran los anteriores parámetros. A continuación, se describen estos resultados comparándolos con otros cuerpos acuáticos y en relación a su ubicación de la Laguna a través del tiempo.

De acuerdo con el índice calculado de la manera indicada en el apartado de métodos, el resultado del índice de calidad el agua ubica a la Laguna de Tres Palos en una categoría mediana con un ICA de 43.7% del valor obtenido del índice totalizado (cuadro 8).

De acuerdo a la escala de clasificación Fundación Nacional de Saneamiento (NSF, 2006), el uso recomendable que se le puede emplear al cuerpo de agua para uso potable, se denomina como dudosa para consumo, en el caso del uso agrícola, se determina como inaceptable para riego, como para actividades pesqueras y de vida acuática, en el caso del trabajo que se determina para el uso recreativo, se obtuvo en: evitar cercanía.

La pesca puede ser insegura, las especies sensibles a las bajas concentraciones de oxígeno y la acumulación de nutrientes pueden verse limitadas, el uso recreativo con contacto directo es limitado dada la presencia de bacterias y como agua para uso industrial, requiere tratamiento para la mayoría de los usos.

Cuadro 8. Resultados del ICA

Clasificación del ICA-NSF					
Laguna de Tres Palos	Variables		Valor cuantitativo en la escala de calidad (%)	Valor cualitativo en la escala de calidad	
	Mes -Año	Abril 2018		54.1	Media o regular
		Junio 2018		57.7	Media o regular
		Septiembre 2018		40.44	Mala
		Octubre 2019		43.07	Mala
		Febrero 2019		30.84	Mala
		Marzo 2019		34.18	Mala
	Sitios	Punto 1 "Embarcadero"		37.9	Mala
		Punto 2 "Río"		40.4	Mala
		Punto 3 "Centro"		46.7	Mala
		Punto 4 "Punto de verado"		46.5	Mala
		Punto 5 "Boca del canal"		45.3	Mala
	ICA-General			43.7	Mala

Se observó que todos los parámetros ponderizados, tiene un peso importante, pero las variables de coliformes, nitritos, DQO y DBO₅ tienen una fuerte influencia sobre el índice de calidad, de esta manera, los valores bajos de estos parámetros aumentan la posibilidad de obtener de mejor calidad, mientras que para valores superiores la determinaran. Por lo mismo, la importancia de considerar a los nutrimentos en este índice se debe a que sus concentraciones sirven de criterio para reconocer un problema de eutrofización de cuerpos acuáticos.

El obtener el índice de calidad del agua como un sistema regulatorio y de monitoreo, son necesarios para garantizar la existencia de un recurso de calidad, apropiado para cada caso específico, es recomendable incluir en la legislación y normas algún índice que pueda utilizarse como medio administrativo para lograr y mantener sus propiedades para el mayor número de usuarios.

El criterio de la obtención de un índice podría parecer reducido, para un análisis integral de un cuerpo de agua, pero representa un buen indicador de lo que sucede en su entorno cercano como lo que ocurre a través del tiempo, además de que puede complementarse con la interpretación puntual de los parámetros específicos de acuerdo a sus casos específicos.

VII.3. Características espectrales del cuerpo acuático

A partir de las valoraciones de parámetros físicos, químicos y biológicos y su integración en el ICA (NSF, 2006), se consideraron los valores de reflectancia de imágenes satelitales para relacionarlos mutuamente. Esta relación es tanto con bandas espectrales y parámetros de calidad del agua, así como con índices espectrales, mediante una regresión lineal y una correlación de Pearson. A continuación se describen los aspectos generales y los más relevantes por banda, parámetros e índices (regresión lineal y correlación).

Para este mes de abril es posible resaltar que las bandas que tienen coeficientes igual o mayores a 0.90 son la banda 1 y 6 con respecto a los parámetros como nitratos con 0.95 y conductividad con 0.99, respectivamente. Destacan muy bajos coeficientes de regresión lineal en el caso de todos los índices y productos de bandas, excepto en el caso de amonio para NDVI (0.86) y DBO₅ (0.81). Para el caso del índice espectral que mejor regresión lineal obtuvo para varios parámetros fue el NDWI con tres parámetros que van desde 0.72, 0.77 y 0.81 para coliformes, transparencia y DBO₅, respectivamente. Destaca que para el caso de los productos de bandas espectrales no se tuvieron valores mayores a 0.70 (figura 36 y cuadro 9).

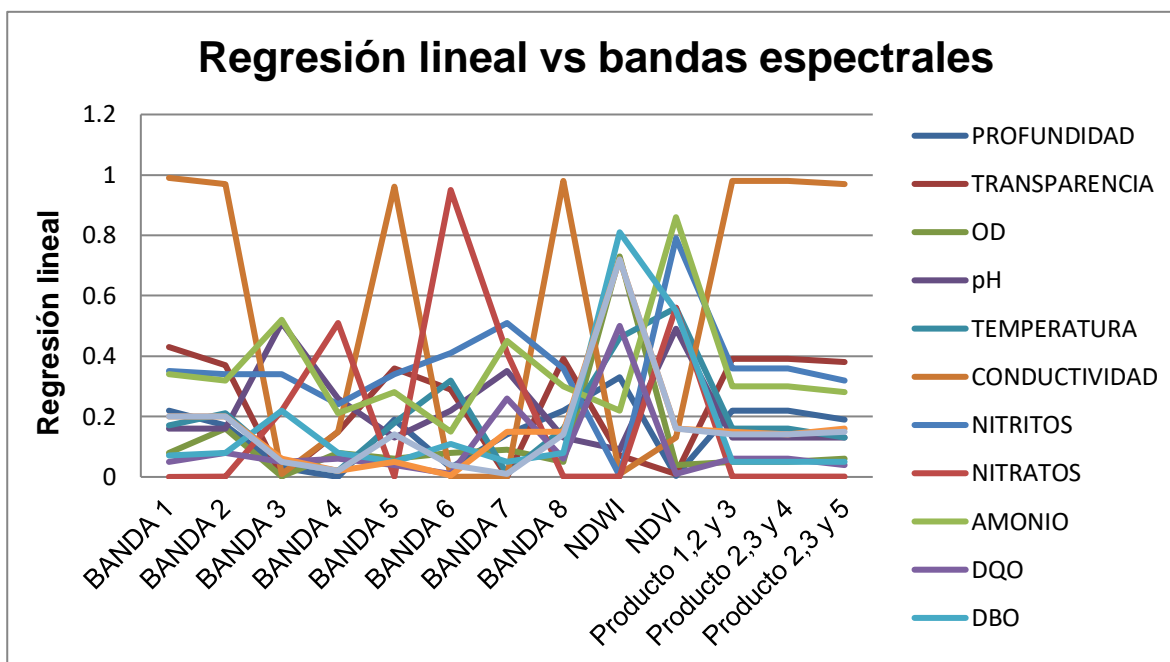


Figura 35. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de abril.

Cuadro 9. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril.

Coeficiente de regresión lineal	
Banda 1	Transparencia 0.43, Conductividad 0.99, Nitritos 0.35
Banda 2	Conductividad 0.97, Transparencia 0.37, Nitritos 0.34
Banda 3	pH 0.51, Amonio 0.52, Nitritos 0.34,
Banda 4	Nitratos 0.51, pH 0.26
Banda 5	Transparencia 0.36, Nitritos 0.34
Banda 6	pH 0.32, Nitritos 0.41, Nitratos 0.95, Amonio 0.28
Banda 7	pH 0.35, Nitritos 0.51, Nitratos 0.41, Amonio 0.45, DQO 0.26
Banda 8	Transparencia 0.39, Conductividad 0.98, Nitritos 0.36
NDWI	Profundidad 0.33, Transparencia 0.77, Temperatura 0.46, Amonio 0.22, DBO ₅ 0.81, Coliformes 0.72
NDVI	Temperatura 0.56, Nitritos 0.79, Amonio 0.86,

	DBO ₅ 0.55
Producto de bandas 1, 2 y 3	Transparencia 0.49
Producto de bandas 2, 3 y 4	Transparencia 0.39, Nitritos 0.36
Producto de bandas 3, 4 y 5	Transparencia 0.38, Nitritos 0.32

En el caso de la correlación de Pearson del mes de abril, las bandas que mejor correlación obtuvieron, fueron la 3, 4 y 6 con parámetros de pH (0.72), amonio (0.73) y nitratos (0.97). En el caso de los índices espectrales, el NDVI, obtuvo un coeficiente de correlación con tres parámetros pH con 0.95, amonio con 0.93 e ICA con 0.95. Para el caso de los productos de bandas espectrales, obtuvieron un coeficiente de correlación menor de 0.90, sin embargo, tuvieron los mismos parámetros como son transparencia, nitritos, amonio e ICA (figura 37 y cuadro 10).

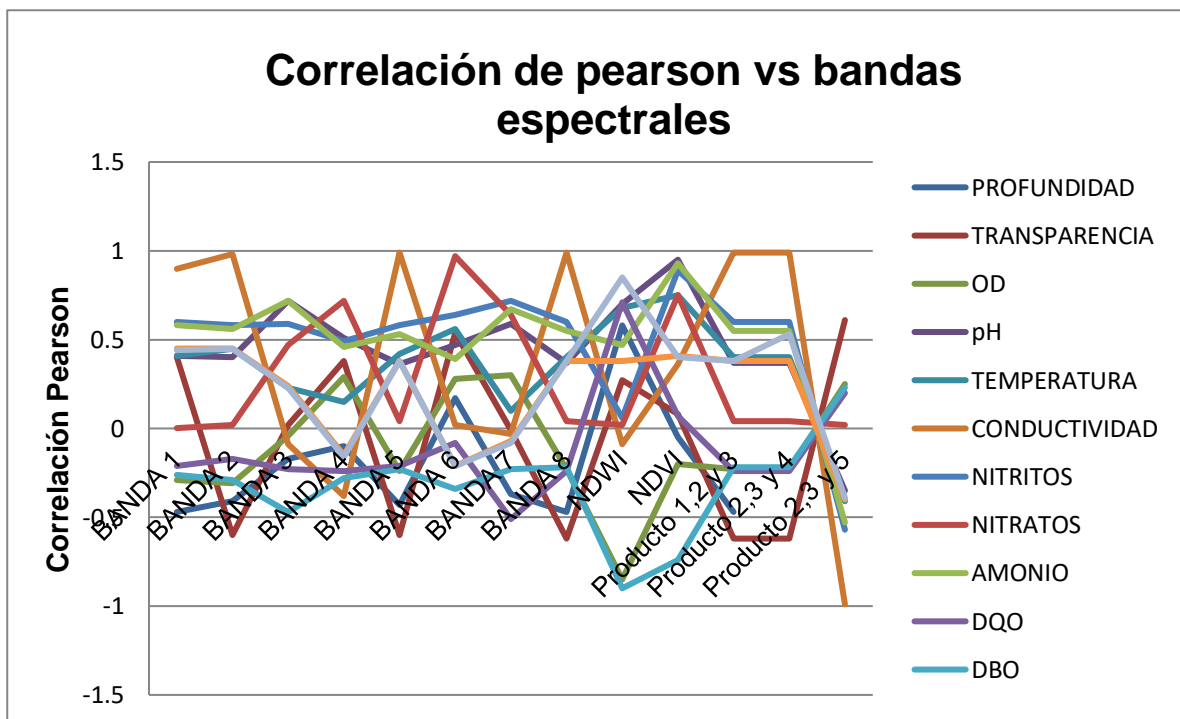


Figura 36. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de abril.

Cuadro 10. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril.

Correlación de Pearson	
Banda 1	Profundidad 0.47, pH 0.41, Amonio 0.58, Coliformes 0.45
Banda 2	Profundidad 0.41, OD 0.31, Nitritos 0.58, Amonio 0.56, Coliformes 0.45
Banda 3	pH 0.72, Nitritos 0.59, Amonio 0.73, DBO ₅ 0.47, Nitratos 0.47
Banda 4	Transparencia 0.38, pH 0.51, Nitratos 0.72, DBO ₅ 0.47, Amonio 0.72
Banda 5	Profundidad 0.43, Temperatura 0.42, Nitritos 0.58, Amonio 0.53, Coliformes 0.38
Banda 6	Transparencia 0.54, pH 0.47, Nitritos 0.64, Nitratos 0.97, DBO ₅ 0.41
Banda 7	Profundidad 0.37, pH 0.59, Nitritos 0.72, Nitratos 0.64, Amonio 0.67, DQO 0.51
Banda 8	Profundidad 0.47, Transparencia 0.62, pH 0.37, Nitritos 0.72, Nitratos 0.64, Amonio 0.55
NDWI	Profundidad 0.58, OD 0.85, pH 0.70, Temperatura 0.68, Amonio 0.47, DQO 0.71, ICA 0.85
NDVI	Profundidad 0.58, Transparencia 0.85, pH 9.5, Temperatura 0.68, Amonio 0.93, DQO 0.71, ICA 9.5 Nitritos 0.89
Producto de bandas 1, 2 y 3	Transparencia 0.62, Nitritos 0.60, Amonio 0.55
Producto de bandas 2, 3 y 4	Transparencia 0.62, Nitritos 0.60, Amonio 0.55, ICA 0.53
Producto de bandas 3, 4 y 5	Profundidad 0.61, Nitritos 0.57, Amonio 0.53, ICA 0.39

En el caso de la regresión lineal del mes de julio, la banda con valor mayor del coeficiente de regresión (0.72) fue la 3 con el parámetro de profundidad (figura 38 y cuadro 11). Mientras que para el caso de los índices espectrales NDWI y NDVI los valores de regresión más altos fueron amonio y OD con 0.63 y 0.74, respectivamente. Para el caso de los productos de bandas espectrales el OD sobresalió al presentar elevada regresión en dos productos de bandas la 1,2 y 3 con el producto 2,3 y 4, mientras que nitritos tuvo elevado valor (0.82) en el producto 2, 3 y 4.

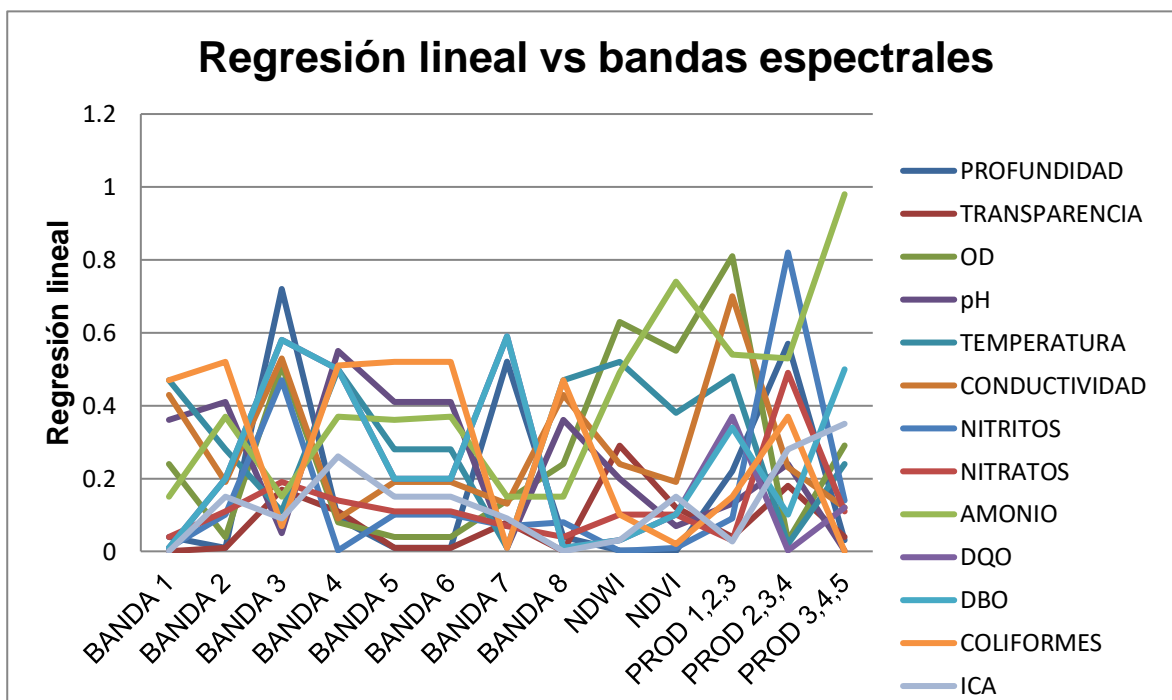


Figura 37. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de julio.

Cuadro 11. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de julio.

Regresión lineal	
Banda 1	Temperatura 0.47, Conductividad 0.43, Coliformes 0.47
Banda 2	pH 0.41, Amonio 0.37, Coliformes 0.52
Banda 3	Profundidad 0.72, OD 0.51, Nitritos 0.47, DBO ₅ 0.58, Coliformes 0.52, Conductividad 0.53

Banda 4	pH 0.55, Coliformes 0.51
Banda 5	pH 0.41, Amonio 0.36
Banda 6	pH 0.41, Amonio 0.37, Coliformes 0.52
Banda 7	Profundidad 0.52, Amonio 0.59, DBO ₅ 0.59
Banda 8	Temperatura 0.47, Conductividad 0.43
NDWI	OD 0.63, Temperatura 0.52, Amonio 0.49
NDVI	OD 0.55, Temperatura 0.38, Amonio 0.74
Producto de bandas 1, 2 y 3	Profundidad 0.22, OD 0.81, Temperatura 0.43, Amonio 0.54
Producto de bandas 2, 3 y 4	OD 0.81, Nitritos 0.82, Amonio 0.53
Producto de bandas 3, 4 y 5	Amonio 0.48, ICA 0.35

Para el caso de la correlación de Pearson del mes de julio la banda que mejor correlación tuvo (0.85) fue la 3 con el parámetro de profundidad, mientras que para los índices espectrales destacó el caso de NDVI para amonio (0.86), seguida de OD con 0.74. En el caso de los productos de bandas espectrales, la mejor correlación correspondió a los producto (1, 2, y 3) y (2, 3 y 4) con los parámetros de OD con 0.90 y nitritos con 0.90, respectivamente (Figura 39 y cuadro 12).

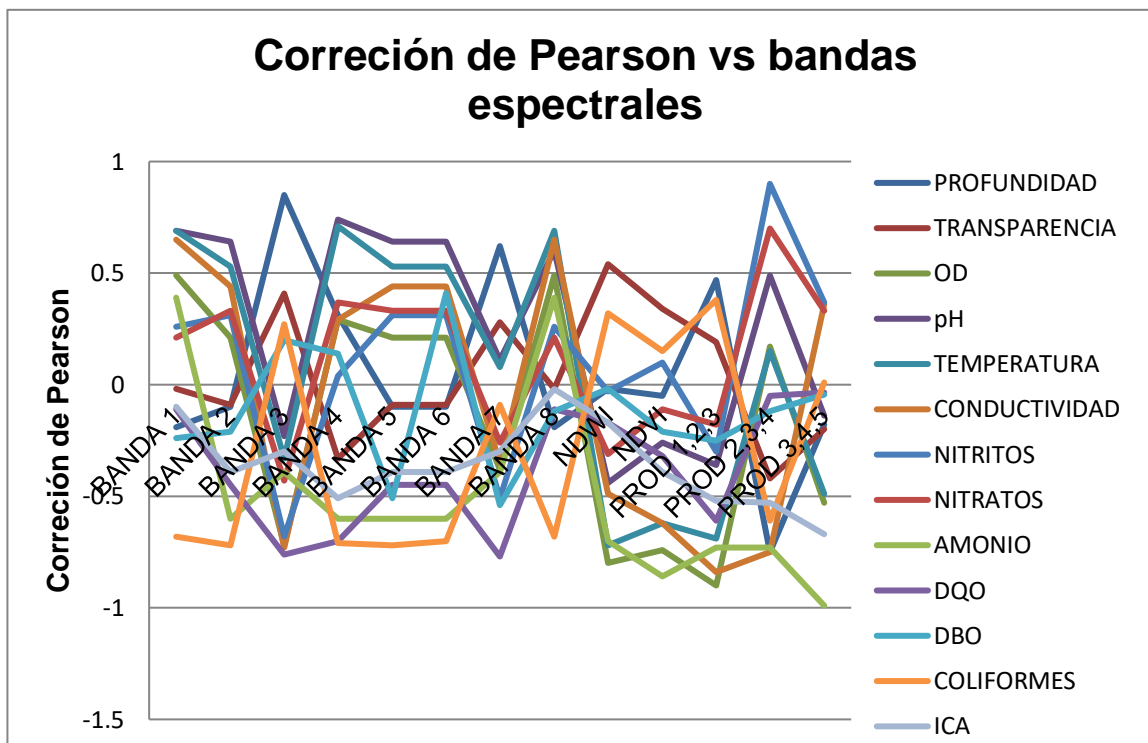


Figura 38. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de julio.

Cuadro 12. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de julio.

Correlación Pearson	
Banda 1	OD 0.49, pH 0.69, Temperatura 0.69, Conductividad 0.65, Coliformes 0.68
Banda 2	pH 0.64, Temperatura 0.53, Conductividad 0.44, Amonio 0.60, DQO 0.45, Coliformes 0.72
Banda 3	Profundidad 0.85, Transparencia 0.41, OD 0.72, Conductividad 0.73, Nitritos 0.68, DQO 0.76
Banda 4	pH 0.74, Temperatura 0.71, Amonio 0.60, DQO 0.70, Coliformes 0.71
Banda 5	Temperatura 0.53, Amonio 0.6, DQO 0.70, Coliformes 0.71

Banda 6	pH 0.64, Temperatura 0.53, Amonio 0.6, Coliformes 0.70
Banda 7	Profundidad 0.62, Nitritos 0.51, DQO 0.77, DBO ₅ 0.54
Banda 8	OD 0.49, pH 0.60, Temperatura 0.69, Conductividad 0.65, Coliformes 0.68
NDWI	OD 0.49, Conductividad 0.65, Coliformes 0.68
NDVI	OD 0.74, Temperatura 0.62, Amonio 0.86
Producto de bandas 1, 2 y 3	Profundidad 0.47, OD 0.90, Temperatura 0.69, Conductividad 0.84, Amonio 0.73, DQO 0.61, ICA 0.52
Producto de bandas 2, 3 y 4	Profundidad 0.75, Transparencia 0.42, pH 0.49, Nitritos 0.90, Nitratos 0.7, Amonio 0.73, Coliformes 0.61
Producto de bandas 3, 4 y 5	OD 0.53, Temperatura 0.49, ICA 0.67

En el caso de la regresión lineal del mes de septiembre (figura 40 y cuadro 13) la mayoría de los coeficientes son bajos (transparencia con 0.68) o muy bajos (nitritos con 0.26). Sin embargo la banda 4 tuvo un coeficiente de 0.88 con el parámetro OD. Por otro lado, destaca el índice espectral NDVI obtuvo un coeficiente de regresión, con pH, de 0.92 y nitritos con 0.98. Para el caso de los productos de bandas espectrales, todos los parámetros tuvieron bajos coeficientes de correlación, excepto el caso de transparencia con 0.71.

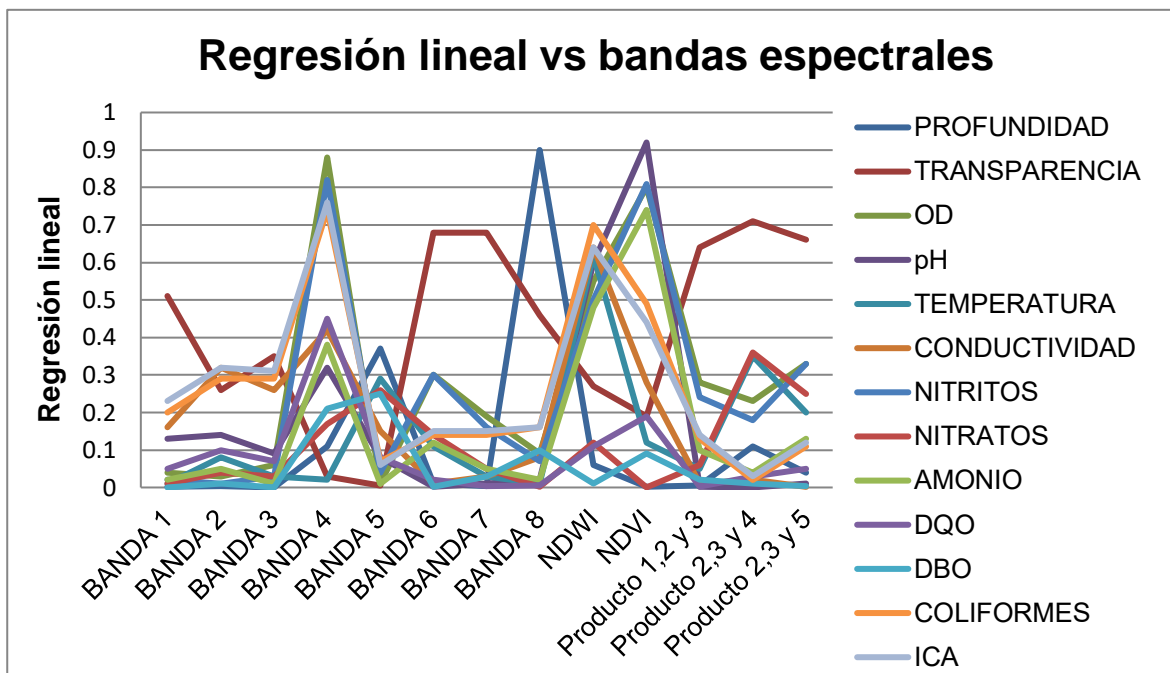


Figura 39. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de septiembre.

Cuadro 13. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de septiembre.

Regresión lineal	
Banda 1	Transparencia 0.51
Banda 2	Coliformes 0.29
Banda 3	Transparencia 0.35, Conductividad 0.26
Banda 4	OD 0.88, Conductividad 0.38, DQO 0.45
Banda 5	Profundidad 0.37, Nitratos 0.26,
Banda 6	Transparencia 0.68,
Banda 7	Transparencia 0.68
Banda 8	Transparencia 0.46
NDWI	OD 0.55, Temperatura 0.62, Conductividad 0.64, Amonio 0.48
NDVI	pH 0.92, Nitritos 0.98, Amonio 0.74

Producto de bandas 1,2 y 3	Transparencia 0.64, Nitritos 0.24
Producto de bandas 2,3 y 4	Transparencia 0.71, Temperatura 0.35
Producto de bandas 3,4 y 5	Transparencia 0.66, OD 0.33 Nitritos 0.33

Para el caso de la correlación de Pearson del mes de septiembre (figura 41 y cuadro 14), las bandas con mejor correlación fueron la 1 (transparencia con 0.90) y la 4 (OD con 0.94 e ICA con 0.91), mientras que el NDWI destaca con el parámetro de coliformes al presentar la mayor correlación (0.84) y el NDVI con OD (0.89) y amonio (0.86). En el caso de los productos de las bandas espectrales, los tres productos (1,2 y 3), (2, 3 y 4) y (3, 4 y 5), obtuvieron un coeficiente alto en el parámetro de transparencia como es de (0.82), (0.89) y (0.81), respectivamente.

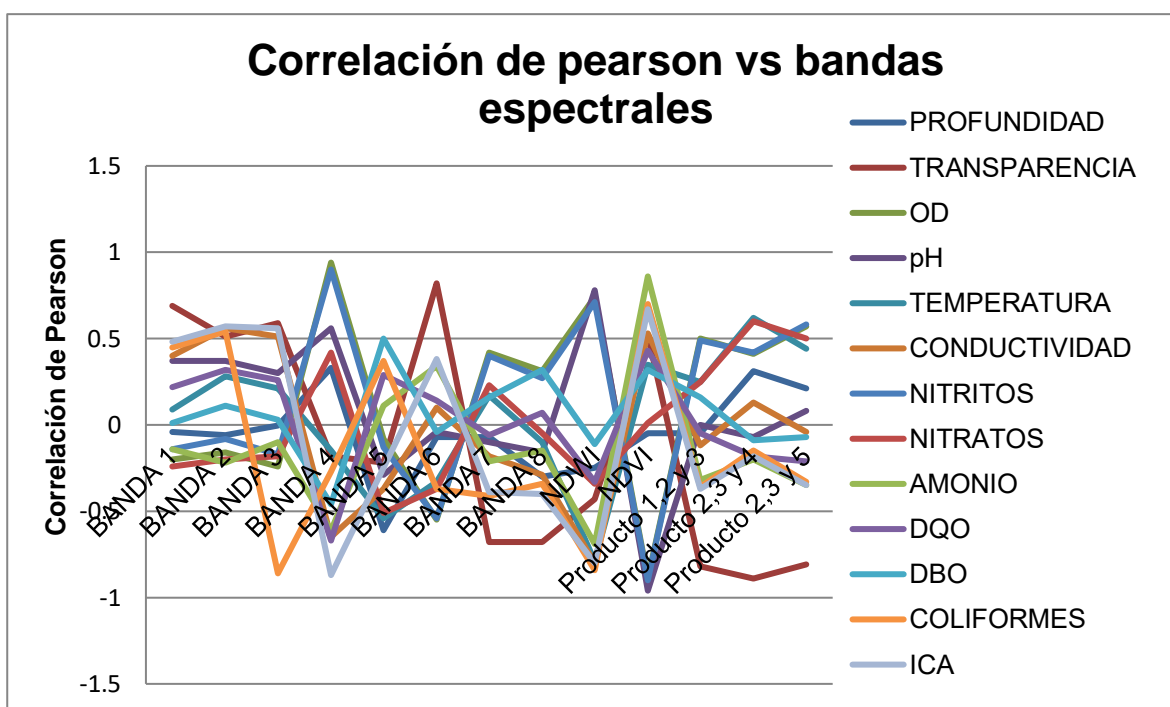


Figura 40. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de septiembre.

Cuadro 14. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de septiembre.

Correlación De Pearson	
Banda 1	Transparencia 0.90, pH 0.37, Coliformes 0.45, ICA 0.48
Banda 2	Transparencia 0.51, pH 0.37, Conductividad 0.56, Coliformes 0.54
Banda 3	Transparencia 0.59, Conductividad 0.51, Coliformes 0.86
Banda 4	OD 0.94, pH 0.56, Conductividad 0.65, Amonio 0.61, DQO 0.57, ICA 0.91
Banda 5	Profundidad 0.61, Temperatura 0.54, Nitratos 0.51, DBO ₅ 0.50, Coliformes 0.37
Banda 6	Transparencia 0.82, OD 0.55, Temperatura 0.54, Nitritos 0.54, Nitratos 0.37, Coliformes 0.37, ICA 0.38
Banda 7	Transparencia 0.45, OD 0.42, Coliformes 0.41, ICA 0.39
Banda 8	Transparencia 0.68, Conductividad 0.29, Coliformes 0.34
NDWI	Transparencia 0.43, OD 0.74, pH 0.78, Temperatura 0.79, Nitritos 0.71, Amonio 0.69, Coliformes 0.84
NDVI	Transparencia 0.52, OD 0.89, pH 0.96, Amonio 0.86, DQO 0.43, ICA 0.67
Producto de bandas 1,2 y 3	Transparencia 0.82, Temperatura 0.25, Nitritos 0.49, Coliformes 0.36
Producto de bandas 2,3 y 4	Transparencia 0.89, OD 0.41, Temperatura 0.62
Producto de bandas 3,4 y 5	Transparencia 0,81, OD 0.57, Temperatura 0.44, Nitritos 0.58, Nitratos 0.5, Amonio 0.35, Coliformes 0.33, ICA 0.54

Para el caso de la regresión lineal del mes de octubre (cuadro 15 y figura 43), la banda que mejor regresión lineal presentó fue la banda 2 con el parámetro de profundidad (0.85), mientras

que en caso de los índices espectrales, el NDWI obtuvo un coeficiente de 0.83 con pH y NDVI (DBO₅ 0.92). En el caso de los productos de bandas espectrales solo hubo tres coeficientes elevados, en el caso del producto 1,2 y 3 (DBO₅ con 0.85) 2,3 y 4 (pH con 0.85 y temperatura con 0.82).

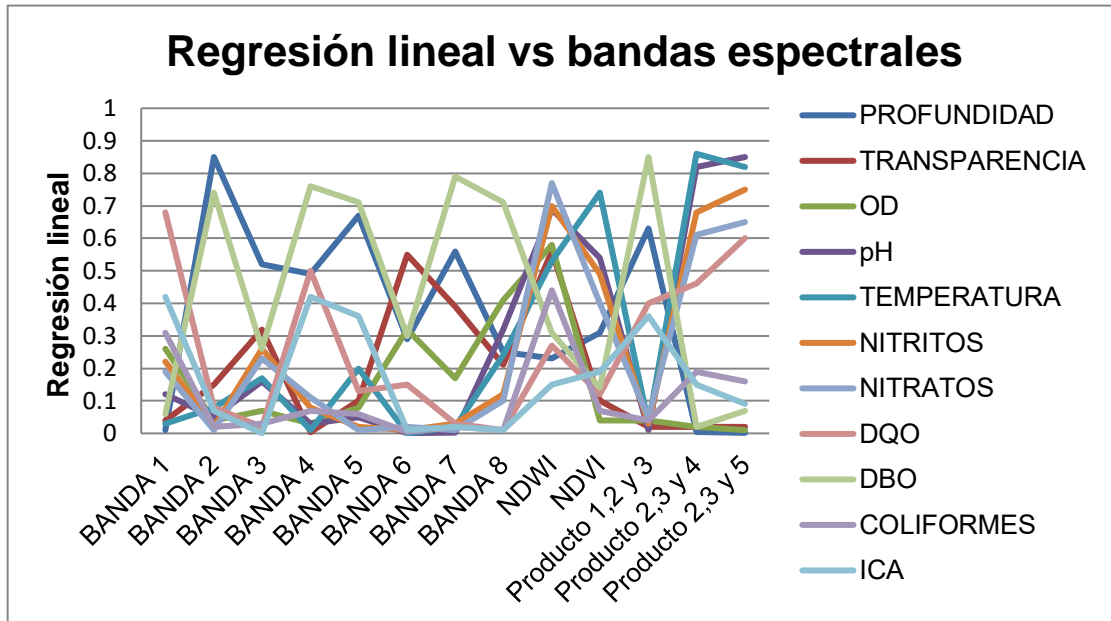


Figura 41. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de octubre.

Cuadro 15. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de octubre.

Regresión Lineal	
Banda 1	OD 0.26, Nitritos 0.22, DQO 0.68
Banda 2	Profundidad 0.85, DBO ₅ 0.74
Banda 3	Profundidad 0.52, Transparencia 0.32, Nitritos 0.26, Nitratos 0.23, DBO ₅ 0.76
Banda 4	Profundidad 0.67, DQO 0.71, DBO ₅ 0.78
Banda 5	Profundidad 0.67, DBO ₅ 0.71
Banda 6	Transparencia 0.55
Banda 7	Profundidad 0.56
Banda 8	OD 0.41, DBO ₅ 0.71

NDWI	Transparencia 0.56, OD 0.58, pH 0.72, Nitratos 0.77, Coliformes 0.44
NDVI	pH 0.54, Temperatura 0.74, Nitritos 0.40
Producto de bandas 1, 2 y 3	Profundidad 0.63, DQO 0.40, DBO ₅ 0.85, ICA 0.36
Producto de bandas 2, 3 y 4	pH 0.84, Nitritos 0.68, Nitratos 0.61, DQO 0.46
Producto de bandas 3, 4 y 5	pH 0.85, Temperatura 0.82, Nitritos 0.75, Nitratos 0.65

En el caso de los productos de bandas espectrales, el producto (1, 2 y 3) obtuvo un coeficiente de 0.85 para DBO₅.

Para el caso de la correlación de Pearson del mes de octubre sobresale el parámetro DBO₅ con valores mayores a 0.80 en tres bandas y el NDVI, además la banda 1 con profundidad (0.85). También destaca que para los tres productos de banda los parámetros que profundidad, temperatura y pH tuvieron coeficientes mayores a 0.90 (Figura 43 y cuadro 16).

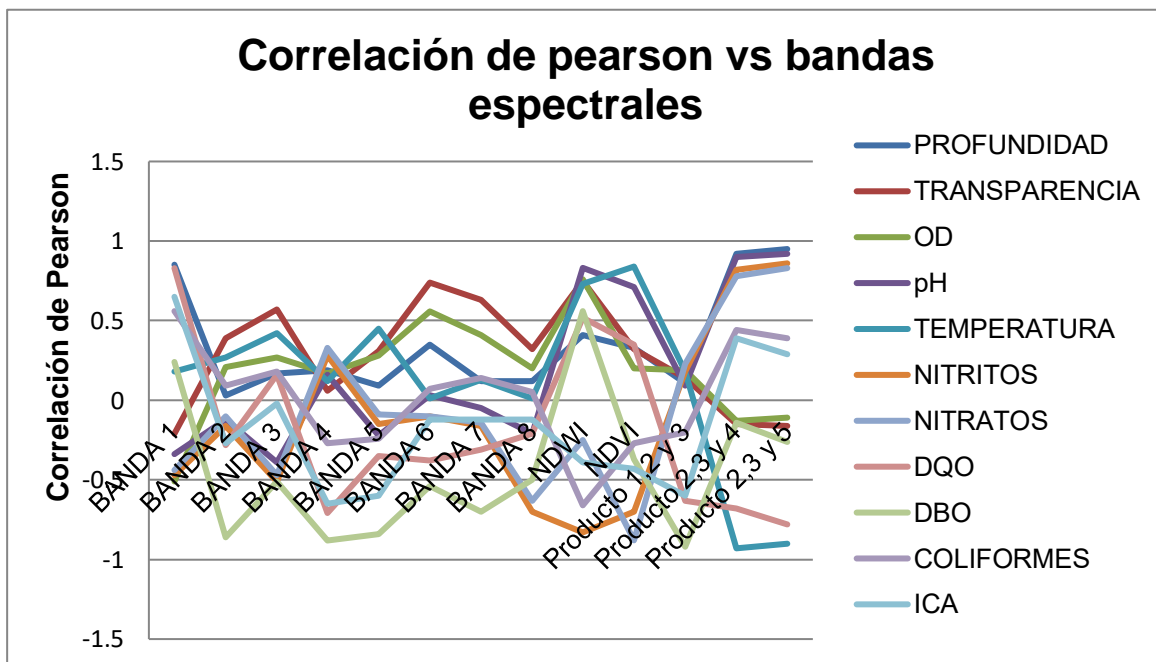


Figura 42. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de octubre.

Cuadro 16. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de abril octubre.

Correlación de Pearson	
Banda 1	Profundidad 0.85, OD 0.51, Nitritos 0.47, Nitratos 0.44, Coliformes 0.56, ICA 0.65
Banda 2	Transparencia 0.39, DBO ₅ 0.86
Banda 3	Transparencia 0.57, Temperatura 0.42, Nitritos 0.51, Nitratos 0.47, DBO ₅ 0.51
Banda 4	Temperatura 0.45, DQO 0.71, DBO ₅ 0.88, ICA 0.27
Banda 5	Transparencia 0.31, Temperatura 0.45, DQO 0.35, DBO ₅ 0.84, ICA 0.6
Banda 6	Transparencia 0.74, OD 0.56, DQO 0.38, DBO ₅ 0.54
Banda 7	Transparencia 0.63, OD 0.41, DQO 0.31, DBO ₅ 0.70
Banda 8	Transparencia 0.32, Nitritos 0.7, Nitratos 0.63
NDWI	Transparencia 0.75, OD 0.76, pH 0.83, Temperatura 0.73, Nitritos 0.83, DQO 0.52, DBO ₅ 0.56, Coliformes 0.66, ICA 0.39
NDVI	DQO 0.63, DBO ₅ 0.92
Producto de bandas 1, 2 y 3	Profundidad 0.92, pH 0.90, Temperatura 0.93, Nitritos 0.82, Nitratos 0.78, DQO 0.68, Coliformes 0.44
Producto de bandas 2, 3 y 4	Profundidad 0.95, pH 0.92, Temperatura 0.90, Nitritos 0.86, Nitratos 0.83, DQO 0.78, Coliformes 0.40
Producto de bandas 3, 4 y 5	Profundidad 0.95, pH 0.90, Nitratos 0.83, DQO 0.74

Para el caso del mes de febrero, la banda espectral que tuvo mejor regresión lineal fue la banda 5 con dos parámetros, amonio (0.95) y OD (0.86), mientras que en el caso de los índices espectrales, el NDVI presentó el coeficiente más alto para amonio con 0.84. Para los productos

de las bandas, las tres combinaciones no rebasan a coeficiente de 0.80, siendo los parámetros de amonio, nitritos y DQO (figura 44 y cuadro 17).

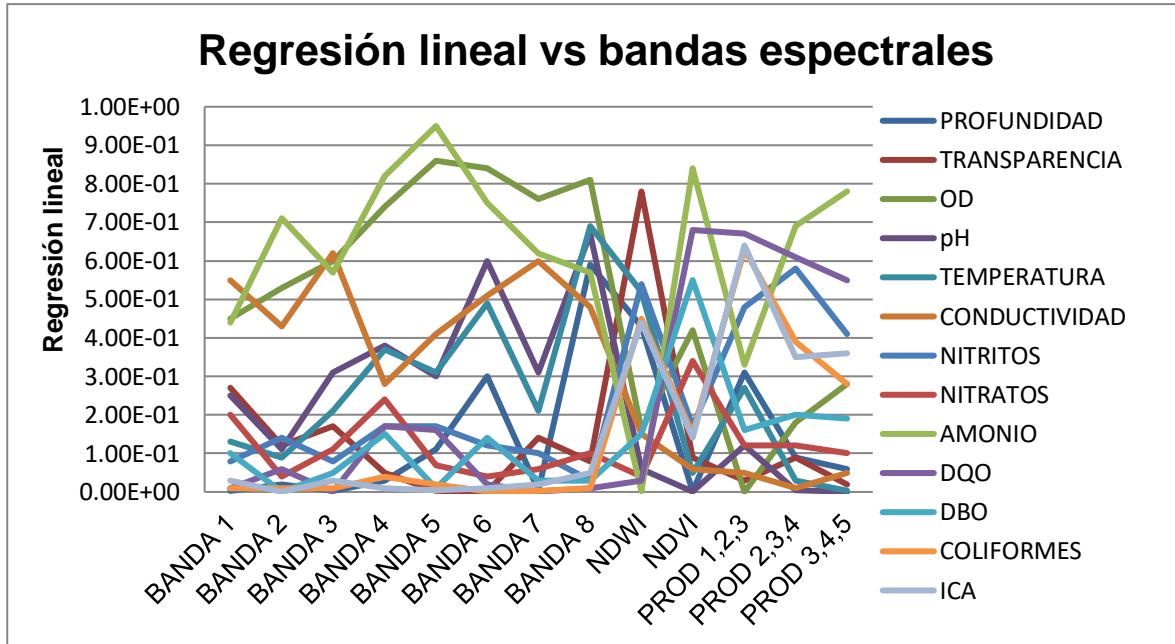


Figura 43. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de febrero.

Cuadro 17. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de febrero.

Regresión lineal	
Banda 1	OD 0.45 Conductividad, 0.44
Banda 2	OD 0.53, Conductividad 0.43, Amonio 0.71
Banda 3	pH 0,31, Conductividad 0.62, Amonio 0.57
Banda 4	OD 0.74, Amonio 0.84
Banda 5	OD 0.86, pH 0.3, Conductividad 0.41, Amonio 0.95
Banda 6	OD 0.86, Temperatura 0.49, Amonio 0.75

Banda 7	OD 0.76, Conductividad 0.60, Amonio 0.63
Banda 8	Profundidad 0.59, OD 0.81, pH 0.67, Temperatura 0.69
NDWI	Profundidad 0.43, Transparencia 0.78, Temperatura 0.52, Coliformes 0.45
NDVI	OD 0.42, Amonio 0.84, DQO 0.64, DBO ₅ 0.55
Producto de bandas 1,2 y 3	Nitritos 0.48, Amonio 0.33, DQO 0.77
Producto de bandas 2, 3 y 4	Nitritos 0.58, Amonio 0.69, DQO 0.61
Producto de bandas 3, 4 y 5	Nitritos 0.45, Amonio 0.78, DQO 0.55

En el caso de la correlación del mes de febrero, las bandas que mejor coeficiente de correlación presentaron fueron las bandas 1 y 3 con el parámetro de profundidad con 0.93 y amonio con 0.98 (figura 45 y cuadro 18). En el caso de los índices espectrales, ambos índices tuvieron el coeficiente de correlación de Pearson bajos, aunque en el caso de NDVI, el amonio fue de 0.84. Para los productos de bandas espectrales, igual todos los coeficientes, fueron bajos siendo amonio el más alto con 0.78.

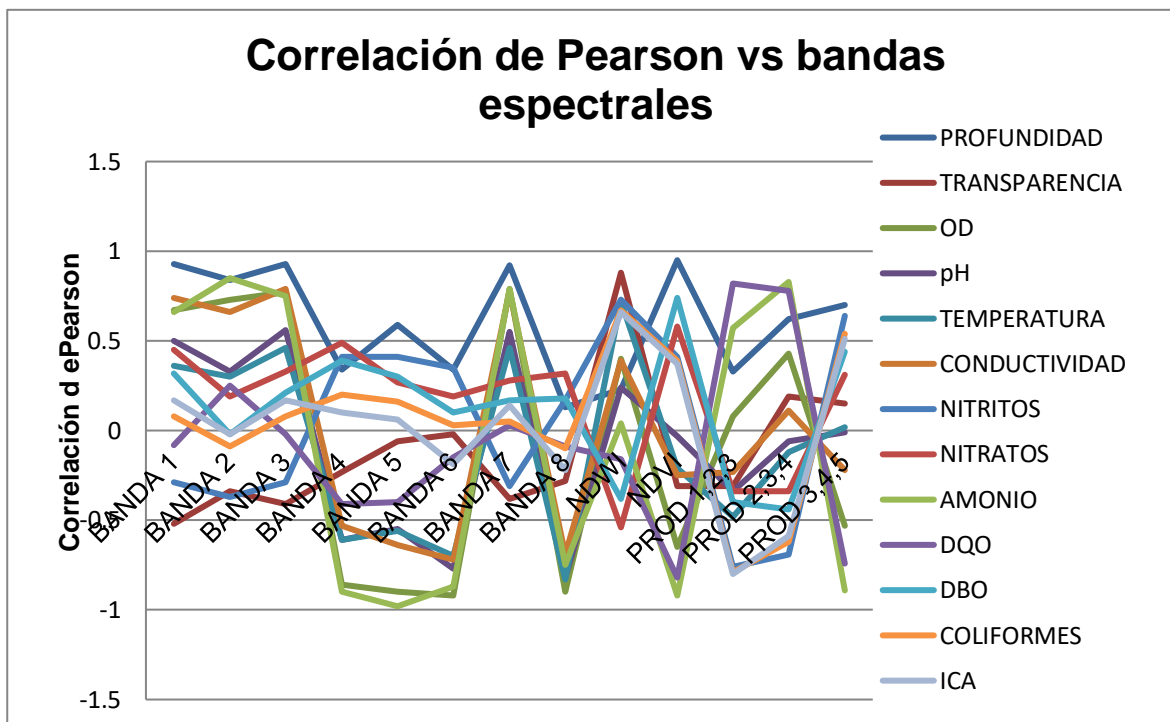


Figura 44. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de febrero.

Cuadro 18. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de febrero.

Correlación de Pearson	
Banda 1	Profundidad 0.93, Transparencia 0.52, OD 0.67, Temperatura 0.36, Conductividad 0.74, Nitratos 0.45, Amonio 0.66
Banda 2	Profundidad 0.84, OD 0.73, Conductividad 0.66, Amonio 0.85
Banda 3	Profundidad 0.93, Transparencia 0.41, OD 0.77, Conductividad 0.79, Amonio 0.75
Banda 4	OD 0.86, pH 0.61, Temperatura 0.81, Nitritos 0.41
Banda 5	Profundidad 0.59, pH 0.55,

	Temperatura 0.64, Nitritos 0.41, Amonio 0.98
Banda 6	OD 0.84, pH 0.49, Conductividad 0.51, Amonio 0.75
Banda 7	OD 0.76, Conductividad 0.60, Amonio 0.62
Banda 8	Profundidad 0.59, OD 0.81, pH 0.67, Temperatura 0.69, Amonio 0.57
NDWI	Profundidad 0.43, Transparencia 0.78, Temperatura 0.52, Nitritos 0.54, Coliformes 0.45
NDVI	Nitratos 0.34, Amonio 0.84, DQO 0.68, DBO ₅ 0.55
Producto de bandas 1, 2 y 3	Nitritos 0.48, DQO 0.67, Coliformes 0.63.
Producto de bandas 2, 3 y 4	Amonio 0.69, ICA 0.35
Producto de bandas 3, 4 y 5	Nitritos 0.41, Amonio 0.78, DQO 0.55, ICA 0.36

En el caso de la regresión lineal del mes de marzo (figura 46 y cuadro 19) las bandas con coeficiente de regresión lineal elevado, fueron la banda 1 (DQO con 0.90), las banda 2 y 3 (con DBO₅ 0.84). Para el caso de los índices espectrales, destacaron las regresiones de nitritos (NDWI) y DQO (NDVI), mientras destaca DQO que en el caso de los productos de bandas espectrales, 1,2 y 3 (0.91) 2, 3 y 4 (0.91) y 3, 4 y 5) con 0.95.

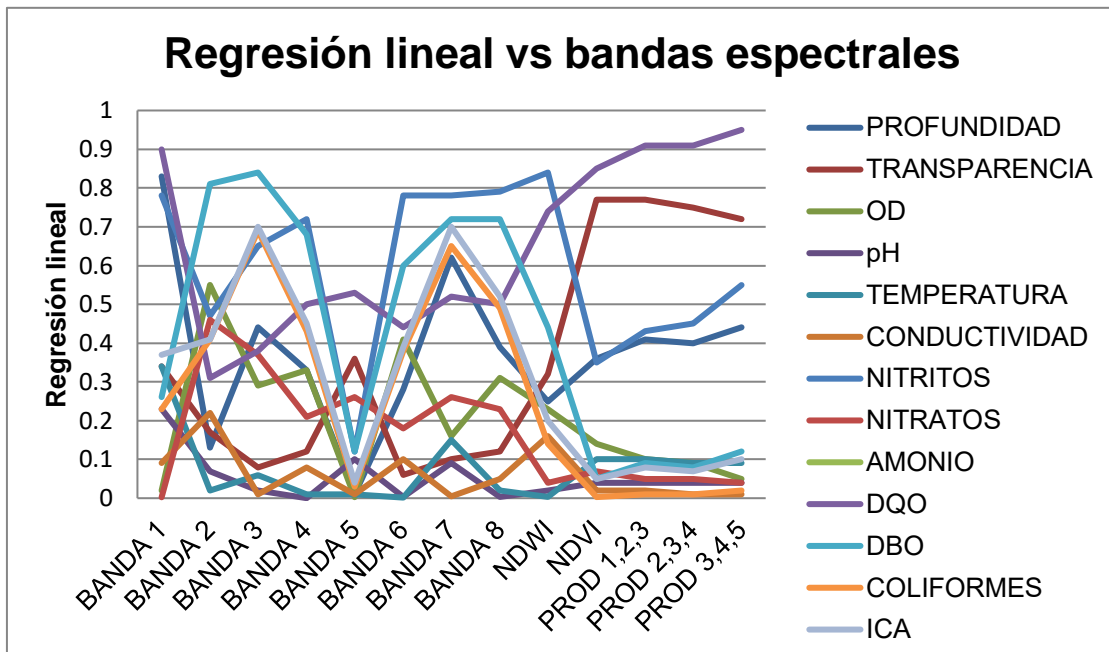


Figura 45. Regresión lineal vs bandas espectrales del mes de marzo.

Cuadro 19. Coeficiente de regresión lineal más relevantes por bandas y por parámetro, mes de marzo.

Regresión Lineal	
Banda 1	Profundidad 0.83, Nitritos 0.78, DQO 0.90, Temperatura 0.34, Transparencia 0.34
Banda 2	OD 0.55, Conductividad 0.22, Nitritos 0.47, Nitratos 0.46, DQO 0.31, DBO5 0.81, Coliformes 0.41, ICA 0.41
Banda 3	Profundidad 0.44, Nitritos 0.65, DBO5 0.84, Nitratos 0.37, Coliformes 0.69
Banda 4	Nitritos 0.72, DBO5 0.68, Coliformes 0.43, ICA 0.45
Banda 5	Transparencia 0.36, DQO 0.53
Banda 6	OD 0.41, Nitritos 0.78, DQO 0.44, DBO5 0.6, Coliformes 0.38, ICA 0.39
Banda 7	Profundidad 0.62, Nitritos 0.78, DQO 0.52, Coliformes 0.65

Banda 8	Profundidad 0.39, OD 0.31, Nitritos 0.79, DQO 0.72, Coliformes 0.49, ICA 0.53
NDWI	Nitritos 0.84, DQO 0.44
NDVI	Transparencia 0.77, Nitritos 0.35, DQO 0.85,
Producto de bandas 1, 2 y 3	Profundidad 0.4, Transparencia 0.75, Nitritos 0.43, DQO 0.91
Producto de bandas 2, 3 y 4	Transparencia 0.75, Nitritos 0.45, DQO 0.91
Producto de bandas 3, 4 y 5	Profundidad 0.44, Transparencia 0.72, Nitritos 0.55, DQO 0.95

En el caso de la correlación de Pearson del mes de marzo, las bandas que mejor coeficiente de correlación, fueron la 1 (profundidad con 0.91 y DQO con 0.95), la 2 (DBO₅) y la 3 (con DBO₅ 0.92 e ICA con 0.84) (figura 46 y cuadro 20). Mientras que en el caso de los índices espectrales NDVI tuvieron coeficiente de correlación mayor a 0.90 en el caso de los nitritos con 0.92 y DQO con 0.95, Así como NDWI con nitritos (0.92). Para el caso de los productos de bandas espectrales los coeficientes mayores fueron con DQO 1, 2 y 3 (0.95), 2, 3, y 4 (0.94) y 3, 4 y 5 (0.98).

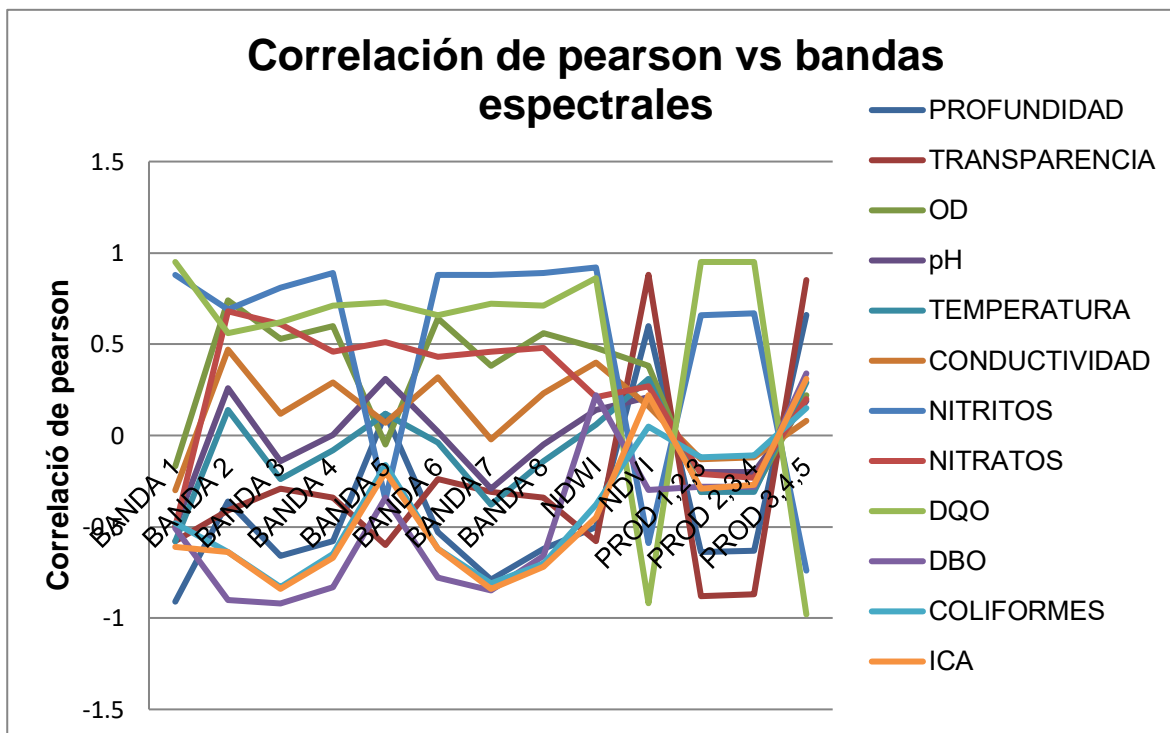


Figura 46. Correlación de Pearson vs bandas espectrales del mes de marzo.

Cuadro 20. Coeficiente de correlación de Pearson más relevantes por bandas y por parámetro, mes de marzo.

Correlación Pearson	
Banda 1	Profundidad 0.91, Transparencia 0.59, Temperatura 0.58, Nitritos 0.88, DQO 0.95, DBO ₅ 0.51, ICA 0.61
Banda 2	Transparencia 0.41, OD 0.74, Nitritos 0.69, Nitratos 0.68, DQO 0.56, DBO ₅ 0.90, Coliformes 0.64, ICA 0.64
Banda 3	Profundidad 0.66, OD 0.63, Nitritos 0.81, Nitratos 0.61, DBO ₅ 0.92, Coliformes 0.83, ICA 0.84
Banda 4	Profundidad 0.58, OD 0.6, Nitritos 0.89, DQO 0.71, DBO ₅ 0.83, Coliformes 0.65, ICA 0.67
Banda 5	Transparencia 0.6, Nitratos 0.51,

	DQO 0.73
Banda 6	Profundidad 0.53, OD 0.64, Nitritos 0.88, DQO 0.66, DBO ₅ 0.78, Coliformes 0.62, ICA 0.62
Banda 7	Profundidad 0.79, Nitritos 0.88, DQO 0.72, DBO ₅ 0.85, Coliformes 0.81, Ica 0.84
Banda 8	Profundidad 0.62, OD 0.56, Nitritos 0.89, Nitratos 0.48, DQO 0.71, DBO ₅ 0.66, Coliformes 0.7, ICA 0.72
NDWI	Profundidad 0.50, Transparencia 0.58, Nitritos 0.92, ICA 0.45 conductividad 0.4, DQO 0.86
NDVI	Profundidad 0.60, Transparencia 0.88, Nitritos 0.59, DQO 0.92
Producto de bandas 1,2 y 3	Profundidad 0.64, Transparencia 0.88, Nitritos 0.66, DQO 0.95
Producto de bandas 2,3 y 4	Profundidad 0.63, Transparencia 0.87, Nitritos 0.67, DQO 0.94
Producto de bandas 3,4 y 5	Profundidad 0.66, Transparencia 0.85, Nitritos 0.74, DQO 0.98

De los anteriores resultados, destacan los parámetros DBO₅, profundidad, amonio, transparencia y DQO que en conjunto presentan los mayores valores de los coeficientes de regresión y correlación, estos resultados son relevantes, se han realizado trabajos (por ejemplo Coutiño, 2012) en los cuales determinan un análisis de la calidad de agua e incluso combinaciones de bandas y cálculo el NDVI, pero sin una cuantificación de la relación entre valores geomáticos y valores paramétricos (biofísicos).

De las bandas antes reportadas y de acuerdo tanto con la Agencia Espacial Europea (que como se señaló en la hipótesis, reportan las bandas 1, 2 y 3) como con el trabajo de Clay (2016), existe cierta coincidencia, por lo que reporta que las bandas azul y roja (1 y 3) presentan elevada regresión (0.90) con turbidez, pero en este trabajo sólo se encontraron regresiones entre 0.60 y 0.80 para la banda 1 (0.85) y (0.88) en las combinaciones que incluyen la banda 3, para los meses de septiembre y marzo. Similarmente, el mismo autor, en el caso del parámetro de profundidad, reportó valores de correlación mayores a 0.80 para las bandas azul, verde y roja (1, 2 y 3). En este trabajo, destaca la coincidencia con la banda 1 que resalta para los meses de julio, octubre, febrero y marzo, tanto en época de secas como de lluvias, con valores de regresión y correlación (0.83 A 0.97) y en menor medida, la banda 3 y finalmente la banda 2. Es decir que para el caso de la Laguna de Tres Palos, la banda 1 refleja adecuadamente transparencia y profundidad. Esto coincide con lo reportado por Moges et al, (2017) quienes destacan a la banda 1 (además de la 2) con regresiones altas (mayor a 0.80) para los parámetros de transparencia con el disco de Secchi. Cabe agregar que las bandas 2 y 3 reflejan probablemente dichos parámetros y sólo resaltan en algunos casos, sobre todo en productos de bandas. Similarmente, Martínez (2017), reporta una buena relación del parámetro de claridad del agua (determinado con el disco de Secchi) con las bandas 2 y 4 con una regresión de 0.81.

Por otro lado, se encuentran resultados contrastantes a lo reportado por Elhag et al, (2019) en el lago de Wadi Baysh, Arabia Saudita con respecto a nitritos ya que encuentran elevadas correlaciones (0.94) para las bandas roja y verde (2 y 3), que en el caso de Landsat 7 son las mismas con 10 μm de variación entre bandas, sólo fueron relativamente elevadas (0.68 a 0.81) en dos meses. En cambio, los valores más altos pueden considerarse para los índices NDVI, seguidos de NDWI con valores (0.88 a 0.98) para tres meses.

Cabe destacar lo señalado por la hipótesis de este trabajo (Agencia Espacial Europea) en el sentido que banda 2 y 4 son las que mejor refleja las condiciones de calidad del agua. Sin embargo en este caso, en general no se encontraron regresiones y correlaciones elevadas para esta banda, salvo en casos puntuales como en la regresión y correlación del mes de septiembre, febrero octubre y marzo, ya que mostraron elevada relación para los parámetros relacionados con la materia orgánica, principalmente DBO_5 (0.74 a 0.90) y DQO (0.73). Por lo anterior, podría puntualizarse de que dicha contribuyen a explicar la calidad del agua pero específica con dichos parámetros.

En el caso del índice de calidad del agua (ICA), no se encontraron regresiones y correlaciones con valores mayores a (0.90), por lo que se puede decir que no tiene relación con la combinación de parámetros, si no que individual.

Para el caso de amonio, no se encontraron reportes de relaciones con bandas específicas, sino más bien complejas relaciones entre varias bandas. Tal es el caso de Markogianni *et al.*, (2018) quienes encontraron la relación $NH_4^+ = -0.323 + 0.136 \times [(B1 - B4) / (B3 - B4)]$. En este caso se encuentra cierta relación, sobre todo destaca que la banda 4, tanto de manera de bandas individuales como en índices espectrales. Así, se encuentra que valores elevados (0.72 a 0.84) para la banda 4 (0.74 hasta 0.86) para NDVI distribuir las tanto en época de secas como de lluvias.

Con respecto a la temperatura, diversos Ledesma, et al (2013) determinaron una correlación mayor a 0.70 con respecto a las bandas 4 y 6 (en un intervalo de 25 – 30 °C). Sin embargo, es el caso de este trabajo, también se obtuvieron coeficientes altos (0.82 y 0.90) pero para los productos de las bandas 2, 3 y 4, así como los productos de bandas espectrales (1, 2 y 3), (2, 3 y 4) y (3, 4 y 5), respectivamente. Estas diferencias pueden haberse atribuido a la composición del cuerpo de agua, a la fecha del satélite y a la temporada del muestreo.

VIII. Conclusiones

La Laguna de Tres Palos mostró elevadas concentraciones en varios parámetros destacando los que sobrepasan los límites máximos establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996: DQO, DBO₅, nitritos, nitratos y amonio (octubre-marzo).

El cálculo del índice de calidad del agua (ICA-NSF) sitúa a la Laguna de Tres Palos, en una escala de clasificación de mala calidad, con un valor de 43.7 % lo que limita diversos usos como, consumo, agricultura, pesca y vida acuática.

Con respecto a la relación entre los parámetros y la reflectancia, en revisiones bibliográficas, destacan que la mayoría de parámetros se obtuvieron de un índice de clorofila (Warrington, 2004), en el caso de este trabajo, los parámetros se realizaron de manera individual y posteriormente, se determinó el índice de calidad del agua (ICA) que no tuvo valores de regresiones y correlaciones altas.

Se ha reportado que la banda 2 y 4 refleja adecuadamente la transparencia, pero en este trabajo no se corroboró pues fue la banda 1, la que mostró mejores resultados.

Los parámetros con mejor regresión y correlación fueron profundidad, transparencia, amonio, DQO y DBO₅ con las bandas 1, 3 y 4. Estos son los principales elementos de síntesis que ayudan a la interpretación de los principales procesos que controlan la dinámica espacio-temporal de las imágenes satelitales y los parámetros físicos, químicos y biológicos.

En el caso de los índices espectrales, el NDVI, obtuvo mejores regresiones y correlaciones con los parámetros de DQO, DBO₅, nitritos y amonio, asimismo los productos de bandas (1, 2 y 3) y (2, 3 y 4) con los parámetros temperatura, OD y DQO.

IX. Bibliografía

- Abarca, F. J. (2007). Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos. Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México, 113.
- Agencia Espacial Europea. Eduspace. (2010). www.esa.int/esaMI/Eduspace en (Agosto 2011).
- Aguirre, R. (2001). Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez. Investigaciones geográficas, (46), 78-97.
- Antón, A., y Lizaso, J. (2001). Nitritos, nitratos y nitrosaminas. Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria. Madrid, España.
- Ariza, A., Roa, O. J., Serrato, P. K., y León Rincón, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. Perspectiva Geográfica, 23(1), 105-122.
- Avalos, K. (2012). Percepción remota y sus aplicaciones a la evaluación de la calidad del agua. (Tesis Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Bedón Pérez, F. P., Aldáz, P., y Andrés, S. (2012). Evaluación de técnicas de detección de cambios del uso de la tierra a través del análisis Multitemporal de imágenes satelitales en el cantón Daule.
- Bird. (2010). Biodiversidad Mexicana. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, 1, 12-17
- Bonansea, M., Rodriguez, M. C., y Pinotti, L., & Ferrero, S. (2015). Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Río Tercero reservoir (Argentina). Remote Sensing of Environment, 158, 28-41.
- Brown, R. (1970). A water quality index- do we dare. Water and sewage works.11:339-346.
- Camacho, A., Giles, M., Ortegón, A., Palao, M., Serrano, B., y Velázquez, O. (2009). Técnicas para el análisis microbiológico de alimentos. Segunda edición. Facultad de Química. UNAM. México.
- Canada Center for Remote Sensing. (2011). Fundamentals of Remote Sensing. http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca.earthsciences/files/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf.

- Cartró, J. (2003). Tratamiento de aguas industriales. Depuración biológica de las aguas residuales, Ed. Fundación Universitaria Iberoamericana–Universidad de Catalunya, Barcelona.
- Chávez. (2015). Evaluación espacial y temporal del índice de calidad del agua del río Cazones en Coatzintla, Ver. (Tesis Maestría). Universidad Veracruzano-Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Tuxpan Veracruz.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, España: RIALP.
- Constantino, M y Vázquez, T. (2006). Origen de los nitratos y nitritos y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*, 22, 3-8.
- Contreras, E. F. (1993). Ecosistemas costeros mexicanos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F. 415.
- Contreras, F. (2000). Las lagunas costeras mexicanas y su importancia para la biodiversidad. *México* 2 (1) 20- 128.
- Contreras, F. (2005). Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente (La Marcha, Ver.) del Golfo de México. *Microbiológica*, 5, 106-134.
- Contreras, E. (1993). Ecosistemas costeros mexicanos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F. 415.
- Coronel, C., Rosales, E., Mora, F., López-Caloca, A. A., Tapia-Silva, F. O., & Hernández, G. (2008, October). Monitoring evapotranspiration at landscape scale in Mexico: applying the energy balance model using remotely sensed data. In *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology X* (Vol. 7104, p. 71040H). International Society for Optics and Photonics.
- Coutiño, L. (2012). Análisis multitemporal de imágenes satelitales para conocer la calidad del agua en la presa: Valle de Bravo. (Tesina Posgrado). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Cruz, M.A. (2009). La Barra de Coyuca. Consultado el 16 de mayo de 2019: <http://labarradecoyuca.blogspot.mx/2009/09/apertura-de-la-barra.html>
- De la Lanza- Espino, G y Arenas, G. (1986). Disponibilidad de nutrientes a partir de materia orgánica en un sistema lagunar. *Ciencia* 37 (4). 247-256.

- De La Lanza Espino, G. (1984). Calidad Ambiental de la Laguna de Mezcaltitán, Nayarit, México, durante el estiaje - Nota Científica. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología, Laboratorio de Química y Productividad Acuáticas, México, D. F.
- De La Lanza Espino, G. Alcocer-Durand, J. Moreno-Ruiz, J. L. y Hernández-Pulido, S. P. (2008). Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos Guerrero, México. Hidrobiológica .1. 21-30.
- De la Lanza Espino, G. N. Sánchez, S. y Herrera, E. (1998). Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. Hidrobiológica 8 (2): 89-96.
- De la Lanza Espino, G. Ruiz, M. y Hernández Pulido. (2008). Análisis químico-biológico para determinar el estatus trófico de la Laguna de Tres Palos, Guerrero, México. Hidrobiología, 18(1). 21-30.
- Endrosa, R. (2011). Aplicación de la teledetección para el monitoreo de eventos hidricos superficiales mediante imágenes cosmo sky med. (Tesis Licenciatura). Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich. Argentina.
- Espinal, T. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la Laguna de Yutitla, Guanajuato, México mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005-2010. Contaminación Ambiental, 3, 147-163.
- Fernández, N. y Solano F. (2003). Índices de Calidad de Agua e Índices de Contaminación. Aportes A su conocimiento y Análisis. Vicerrectoría de Investigaciones. Universidad de Pamplona. Colombia. 120.
- Fernández, S. (1999). Aplicaciones de la teledetección y SIG al control y cuantificación de las extracciones de agua subterránea. Medida y Evaluación de las Extracciones de Agua Subterránea. Sevilha, Espanha, 125-141.
- Flores, I. y Trejo, A. R. (2009). Importancia de la temperatura y oxígeno en los ecosistemas acuáticos. 2010, de Universidad Autónoma del Estado de Morelos Sitio web: <http://galeria.uaem.mx/sites/default/files/obras/texto/Cartel%20B1%20Flores%20Karina.pdf>
- Fonseca, T. y Farías, M. (1987). Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. Investigaciones Pesqueras, 34, 33-46.
- Fuentes, F. y Massol, D. A. (2002). Manual de Laboratorios. Ecología de Microorganismos. Universidad de Puerto Rico.

- Genesis, T, Yengoh, D. (2015). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Asses Land Degradation at Multiple Scales. New York, Springer.
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM* y ASTER para la caracterización de la conbertura vegetal en la zona centro de la providencia de loja, Ecuador. (Tesis de maestría).Universidad Nacional de la Planta. Ecuador.
- González, B. F. (1981). Ecología y paisaje, Blume, Madrid.
- González, I. (2006). Establecimiento y Determinación de Índices de Calidad del Agua. Enfoque Basado en Lógica difusa. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería de Sistemas. Departamento de Investigación de Operaciones. 123-134.
- Guzmán, M y Rojas G. (1976). Ecología de las lagunas costeras (Coyuca de Benítez). Curso de Biología de Campo, Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Hach. (1997). Digital Titrator, Model 16900. Hach Company, 24 ed., U.S. 196.
- Hach. (2009). DR/890, Colorimeter, Procedures Manual. Hach Company, 9 ed., U.S.A. 614 pp.
- Hakanson. (2005a). International Review of Hydrobiology. Estados Unidos: Aquatic ecosystems: freshwater and marine environments and their management.
- Hakanson. (2005b). The importance of lake morphometry for the structure and function of lakes. Hydrobiology, 1, 8.
- Hernández, G. Daniela, L. Patiño, M. y Nicolas, J. Formulación de plan de mejoramiento de tratamiento químico integral del sistema de clarificación de agua adhesivo en la empresa Filmtex SAS.
- Jiménez, A. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Revista interdisciplinar de gestión ambiental, 2(23), 12-19.
- Jiménez, B. Torregrosa, L. y Aboites, L. (2010). El agua en México: cauces y encauces. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Jiménez, C. B. (2010). El agua en México: cauces y encauces. Casa Tlalpan: Academia Mexicana de Ciencias.
- Kjerfve, B. (1994). Coastal Lagoons. In: Kjerfve, B., Ed., Coastal Lagoon Processes, Elsevier Oceanographic Series, Amsterdam, 1-8

- Knoppers, B, y Kjerfve, B. (1991). Trophic state and water turn-over time in six chooked coastal lagoons in Brazil. *Biogeochemistry* 14: 149-166.
- Lankford, R. (1977). Coastal lagoon of Mexico. Their origin and classification. En: M. Wiley, (Ed.). *Estuarine Processes*. Academic Press Ine., 182-215 pp.
- Lanza E. y Cáceres C. (1994). *Lagunas costeras y el litoral mexicano*. Universidad Nacional Autónoma de México: UNAM-UABCS.
- Lara-Lara, R. (2008). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *Conocimiento actual de la biodiversidad*, 1, 109-134.
- Ledesma, C. Bonansea, M. Rodríguez, C. y Delgado, Á. (2013). Calidad del agua en el embalse Rio Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. *Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 8(2), 67-76.
- Markogianni, V. Dimitriou, E. & Karaouzas, I. (2014). Water quality monitoring and assessment of an urban Mediterranean lake facilitated by remote sensing applications. *Environmental monitoring and assessment*. 186(8). 5009-5026.
- Markogianni, V., Kalivas, D., Petropoulos, G., & Dimitriou, E. (2018). An appraisal of the potential of Landsat 8 in estimating chlorophyll-a, ammonium concentrations and other water quality indicators. *Remote Sensing*, 10(7), 1018.
- Martínez, I. (2017). *Monitorización de la calidad del agua en embalses mediante técnicas de observación remota*. (Tesis Maestría). Facultad de Ciencias. Ciudad de México.
- Masek, J. G. Honzak, M. Goward, S. N. Liu, P. & Pak, E. (2001). Landsat-7 ETM+ as an observatory for land cover: Initial radiometric and geometric comparisons with Landsat-5 Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 78(1-2), 118-130.
- McFeeters. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation. Open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17, 7.
- Meliá, J. Gandia, S. y Caselles, V. (1986). Teledetección y firmas espectrales. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 80, 177-185.
- Moges, M. Schmitter, P. Tilahun, S. A. Ayana, E. K. Ketema, A. A. Nigussie, T. E., & Steenhuis, T. S. (2017). Water quality assessment by measuring and using Landsat 7 ETM+ images for the current and previous trend perspective: Lake Tana Ethiopia. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(12), 1564.

- Mondragón, A. (2018). Las imágenes NDWI y cómo pueden ayudarnos en la agricultura. Consultado el 16 de Marzo del 2018, Sitio web: <https://sinergia4.tech/las-Figura-es-ndwi-pueden-ayudarnos-la-agricultura/>
- Mondragón, E. (2007). Variación horizontal y vertical de la temperatura, oxígeno disuelto y bióxido de carbono en dos lagos del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, Morelos, México. (Tesis de licenciatura). Universidad autónoma del Estado de Morelos.
- Moreira, M. Adami, M. y Rudorff, B. (2004). Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 39(3), 223-231.
- NSF-National Sanitation Foundation. (2006), Consumer Information: Water Quality Index (WQI), 2006. Consultada el 3 de noviembre de 2010: www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp.
- NSF-National Sanitation Foundation. (2006). Consumer Information: Water Quality Index (WQI), 2006. Consultada el 3 de noviembre de 2010: www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp.
- OMS. Organización Mundial de la Salud. (2006). Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice. Vol. 1, Tercera edición, 398.
- OMS. Organización Mundial de la Salud. 2006. Guías para la calidad del agua potable. Primer apéndice. Vol. 1, Tercera edición, 398 pp.
- Politi, E., & Prairie, Y. T. (2018). The potential of Earth Observation in modelling nutrient loading and water quality in lakes of southern Québec, Canada. Aquatic sciences, 80(1), 8.
- Quiroz, H. Mondragón, O. Molina, I. García, J. y Díaz, M. (2008). Dinámica espacio-temporal de oxígeno-temperatura en los lagos Zempoala y Tonatiahua. Acta Universitaria, 18. 57-65.
- Quiroz, L., Kulich, E. y Menéndez, C. (2017). Aplicación del índice de calidad de agua en el río Portoviejo, Ecuador. Ingeniería hidráulica y ambiental, 1, 11.
- Ramos-Ortega, L. Vidal, L. (2008). Análisis de la contaminación microbiológica (coliformes totales y fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. Acta Biológica Colombiana, 13(3), 87-98.
- Rivera, A. Villalobos, J. y Azuz, I. (2014). El manejo costero en México. Universidad Autónoma de Campeche: CETYS.

- Rosas, L. (2011). La calidad del agua de la Laguna de Tres Palos, municipio de Acapulco, Guerrero y sus bioindicadores. Instituto Tecnológico de Acapulco, 1, 110-123.
- Semarnat, Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, 1a edición, CNA, México, 2007.
- Sobrino, J. A, Jiménez-Muñoz, JC y Paolini, L. (2000). Recuperación de la temperatura de la superficie terrestre de LANDSAT TM 5. Teledetección del medio ambiente, 90 (4), 434-440.
- Suárez, C. (2016). Universidad Pedagógica Experimental Libertador, 1, 33.
- Tashi, R. (2011). Diseño de modelos de calidad del agua mediante el uso de la percepción remota. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2015). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. Springer.

X. Recomendaciones

- Desarrollar combinaciones de bandas más comunes como los reportados por Markogianni (2018) que usa cocientes con bandas individuales y bandas sumadas.
- Extrapolar las correlaciones y regresiones para hacer sus intervalos para el caso de Landsat 8.
- Realización de un nuevo índice de calidad del agua basado en parámetros físicos.
- Determinar las descargas de aguas residuales puntuales y difusas alrededor de la Laguna
- Elaborar un sistema de monitoreo del agua con una definición previa de indicadores, parámetros y puntos de muestreo.
- Regular las descargas que van directo al embalse sin un previo tratamiento ya que estas son parte de los principales contaminantes.
- Para completar el estudio de la calidad del agua de un determinado cuerpo acuático, se pueden obtener imágenes de años anteriores y hacer una estimación de la calidad del agua para evaluar su evolución a través del tiempo.
- Mientras más sitios de muestreo se consideren en el análisis, será más fácil correlacionar los datos estadísticamente y se tendrá un margen de error relativamente bajo.
- Realizar un monitoreo con más puntos de muestreo, para la realización de un mapa batimétrico.
- Elaborar un análisis multivariado de los parámetros físicos, químicos y biológicos con las bandas espectrales.
- Realizar una regresión lineal múltiple