



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización Cualitativa y
Determinación de Sitios de Muestreo
en el Sistema Lagunar de
Montebello, Chiapas**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Miguel Ángel González Villarroel

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Índice

Introducción	3
Objetivo General.....	5
Calidad del Agua	6
Parámetros físicos	8
Parámetros químicos	12
Parámetros microbiológicos.....	16
Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	18
Normas y Técnicas Actuales de Muestreo	26
Caracterización del Sitio	29
Parque Nacional de las Lagunas de Montebello.....	29
Localización	30
Marco Biótico	32
Flora	32
Flora amenazada	32
Fauna	33
Fauna amenazada	34
Marco Abiótico	34
Edafología	34
Geología.....	35
Geohidrología.....	36
Hidrología	37
Climatología	39
Fisiografía.....	40
Marco Social	40
Población.....	40
Actividades económicas.....	42
Metodología.....	48
Resultados y Análisis	58
Conclusiones.....	65
Glosario de Términos y Abreviaciones	67

Anexos69
Bibliografía.....75

Introducción

En la actualidad la evaluación de la calidad del agua es fundamental para poder resolver y gestionar los problemas presentados en cuerpos de agua alrededor del mundo. Los avances tecnológicos han impulsado esta área de estudio, de tal manera que es posible rastrear hasta su origen las causas de las afectaciones en la calidad del agua y aún más las consecuencias a la salud del ser humano, así como las repercusiones en el medio ambiente en el corto, mediano y largo plazo.

No obstante, la realización de estos estudios puede ser costosa y sujeta a diversos factores limitantes como lo son asuntos políticos, sociales, económicos y geográficos. Por ello, es necesario maximizar y optimizar las tecnologías de información actuales para obtener la mayor cantidad de información posible con la menor cantidad de recursos. La percepción remota ha destacado por cumplir con estas características, especialmente en el análisis de cuerpos de agua superficiales.

Para evaluar la calidad del agua es indispensable hacerlo bajo una metodología estandarizada para tener los mismos parámetros a nivel investigación. Por ello es necesario analizar de manera conjunta los parámetros físicos, químicos y biológicos en una muestra de agua. Dentro de los más destacados o relevantes se encuentran: la turbidez, el pH, la temperatura y los coliformes fecales, por mencionar algunos. Los resultados de éstos siempre serán distintos y la determinación de si la calidad del agua es buena o mala dependerá completamente del uso al que está destinada.

Sin embargo, si se desean obtener resultados veraces, se requiere de una muestra de agua representativa. El objetivo del presente trabajo sugiere el uso de técnicas de percepción remota y análisis digital de imágenes para poder determinar sitios de muestreo en un cuerpo de agua superficial, de manera que las muestras obtenidas sean representativas y reflejen el estado real del cuerpo de

agua. Existen investigaciones anteriores que han incursionado en este aspecto, (Hernández C. , 2017) (Arias, 2014) (Sepúlveda, 2011), sin embargo, a diferencia de estos trabajos en donde se estudia un solo cuerpo de agua, se buscará aplicarlo para una serie de cuerpos de agua con algunas características en común y otras disímiles. Actualmente no existe una metodología o norma detallada por lo que la determinación de los sitios de muestreo es subjetiva y variable de investigación a investigación.

Para poner en marcha la metodología propuesta mediante la percepción remota se decidió utilizar el Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas, ubicado en el Parque Nacional del mismo nombre. Las lagunas han presentado cambios en coloración en los últimos años debido a una disminución en la calidad del agua, motivando a varios investigadores a realizar estudios para determinar la causa. Dentro de estas investigaciones es necesario tomar muestras en las lagunas para estudios de calidad de agua; en este trabajo se propone la utilización de la Percepción Remota para determinar los sitios de muestreo.

En el Capítulo I se menciona la definición de calidad del agua y sus usos así como una descripción general de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos. En el Capítulo II, se describe la percepción remota y los Sistemas de Información Geográfica, así como su relevancia para el presente trabajo. En el Capítulo III se resumen las técnicas y normas actuales de muestreo con el fin de resaltar la necesidad de una metodología más eficaz. La caracterización del Parque Nacional de las Lagunas de Montebello se hace en el Capítulo IV incluyendo un marco biótico, abiótico y social. En el siguiente capítulo se establece la metodología sugerida para la determinación de sitios de muestreo dentro del sistema lagunar en estudio. En los dos últimos capítulos se encuentran los resultados obtenidos, así como las conclusiones de este trabajo.

Objetivo General

- Determinar los sitios de muestreo dentro del Sistema Lagunar del Parque Nacional de las Lagunas de Montebello en Chiapas mediante técnicas de percepción remota (PR) para su posterior uso en un estudio de evaluación de calidad del agua.

Calidad del Agua

El agua tiene distintos usos para las actividades diarias del ser humano y dependiendo de los mismos, se requiere de una calidad específica. El uso del agua de acuerdo a la definición del artículo 30 de la Ley de Aguas Nacionales se define como: “Aplicación del agua a una actividad que implique el consumo, parcial o total de ese recurso”. (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 1992) Dichas actividades son variadas y en un esfuerzo por englobar a las más comunes, el 13 de diciembre de 1989 se publicó en el DOF (Diario Oficial de la Federación , 2008) las diferentes calidades que se reconocen para el agua en México y son las siguientes:

Calidad para la protección de la vida de agua dulce: Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo con el equilibrio natural de los ecosistemas de agua dulce continental.

Calidad para la protección de la vida de agua marina: Grado de calidad del agua, requerido para mantener las interacciones e interrelaciones de los organismos vivos, de acuerdo con el equilibrio natural de los ecosistemas de agua marina.

Calidad para uso en la acuicultura: Grado de calidad del agua, requerido para las prácticas acuiculturales, que garantiza el óptimo crecimiento y desarrollo de las especies cultivadas, así como para proteger su calidad para el consumo humano.

Calidad para riego agrícola: Grado de calidad del agua, requerido para llevar a cabo prácticas de riego sin restricción de tipos de cultivo, tipos de suelo y métodos de riego.

Calidad para uso como fuente de abastecimiento de agua potable: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo humano, debiendo ser sometida a tratamiento, cuando no se ajuste a las disposiciones sanitarias sobre agua potable.

Calidad para uso pecuario: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada como abastecimiento de agua para consumo por los animales domésticos, que garantiza la protección de su salud y la calidad de los productos para consumo humano.

Calidad para uso recreativo con contacto primario: Grado de calidad del agua, requerido para ser utilizada en actividades de esparcimiento, que garantiza la protección de la salud humana por contacto directo.

Cuerpo de agua: Los lagos; lagunas; acuíferos; ríos y sus afluentes directos o indirectos, permanentes o intermitentes; presas; embalses; cenotes; manantiales; litorales; estuarios; esteros; marismas y en general las zonas marinas mexicanas.

Fuente de abastecimiento de agua potable: Todo cuerpo de agua que es o puede ser utilizado para proveer agua para consumo humano.

La calidad del agua es afectada gradualmente dependiendo de los contaminantes presentes dentro de ésta, pero el origen de los mismos es distinto. Existen dos formas en las que los contaminantes son descargados a los cuerpos de agua, las fuentes puntuales y las no puntuales. Las puntuales pueden ser rastreadas a una sola fuente u origen, como un punto de descarga de una fábrica o una tubería de drenaje. Por otra parte, las fuentes no puntuales son difusas (también se les conoce con este término), es decir, los contaminantes provienen de diversas partes del entorno y están relacionados con el movimiento o comportamiento del cuerpo de agua, así como con las actividades antropogénicas y naturales en los alrededores.

Las actividades antropogénicas son las principales fuentes de contaminación tanto puntuales como no puntuales (Zimba, 2003), éstas corresponden a todo tipo de actividad humana que esté cerca o afecte al cuerpo de agua directa o indirectamente. La principal actividad antropogénica que actualmente afecta a la calidad del agua es la agricultura, siendo también la actividad que más demanda agua en México según datos de CONAGUA, el uso del agua para riego agrícola representa cerca del 75% de su uso total de la misma (CONAGUA, 2014).

Con el propósito de obtener estudios estandarizados de calidad de agua y con los mismos parámetros de medición, no importando el lugar, se ha determinado que es necesario analizar las condiciones físicas, químicas y biológicas del agua.

Parámetros físicos

Estos parámetros se distinguen porque pueden ser detectados sensorialmente, sin embargo el uso de equipo especializado es requerido para obtener resultados fiables. Los parámetros físicos que se deberían obtener en cualquier estudio de calidad del agua son:

- *Turbiedad:* De acuerdo al Servicio Geológico de los Estados Unidos la turbiedad es una medida relativa de la claridad del agua y es una característica óptica de la misma (USGS, 2016). Se puede definir como la expresión de la cantidad de luz que es dispersada por los materiales presentes en el agua cuando la luz a traviesa una muestra de agua determinada. Entre más luz sea dispersada mayor turbiedad presenta la muestra.

Entre los materiales más comunes causantes de la turbiedad se encuentran las arcillas, limos, materia orgánica e inorgánica y algas entre otros; su tamaño puede ser desde partículas coloidales hasta macroscópicas. La turbiedad se puede percibir visualmente, ya que provoca que el agua se torne opaca o nubosa.

Índices altos de turbiedad pueden reducir significativamente la calidad estética del agua, principalmente en ríos y lagos, afectando diversas actividades económicas como el turismo. Sin embargo el impacto más significativo se da sobre la vida acuática, de acuerdo a un reporte de la Comisión Consejera de Pesca Continental Europea, existen 5 formas en las que las partículas finas (causantes de turbiedad) afectan la vida acuática o la posibilidad del desarrollo de la misma (Agencia de Control de Contaminación de Minnessota, 2008):

1. Actuando directamente en los peces al matarlos o reduciendo su índice de crecimiento.
2. Impidiendo el correcto desarrollo de sus huevecillos y larvas.
3. Modificando movimientos naturales y migraciones.
4. Reduciendo la cantidad de alimento disponible.
5. Afectando la eficiencia para la pesca.

Las unidades para la medición de la turbiedad son conocidas como UTN que significa Unidad de Turbidez Nefelométrica, actualmente representa una parte por millón de formazina estándar. Anteriormente se definían las unidades de turbiedad como la obstrucción de la luz, causada por una parte por millón de sílice destilada, en equivalencia a las UTN son 7.5 ppm de SiO₂.

A través del tiempo se han utilizado diferentes métodos para medir la turbiedad, como la bujía de Jackson y el turbidímetro de Hellige, sin embargo el más utilizado actualmente es el Nefelómetro Fotoeléctrico. Consiste en medir la intensidad de la luz dispersada por la muestra y posteriormente compararla con otra muestra de referencia, siguiendo las bases teóricas, entre más luz sea dispersada tendrá mayores niveles de turbiedad.

- *Color Verdadero*: Es el color de la muestra una vez que se removió la turbiedad. Está ligado directamente al pH, ya que si el color aumenta el pH también. Las unidades de color se conocen como unidades de color Platino-Cobalto y tiene su origen en el color producido por un mg/l de Platino en forma de ion cloroplatinato. Para poder conocer el color de la muestra primero se debe centrifugar la misma, luego se compara visualmente con muestras discos calibrados para determinar el color verdadero, todo de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (Secretaría de Salud, 2000).

- **Color Aparente:** Incluye no solamente el color verdadero sino también el color debido al material suspendido presente en la muestra. En otras palabras, incluye la turbidez. La gama de colores que se puede presentar en el agua es muy variada y en ocasiones es difícil determinar su origen, sin embargo algunos de los colores más comunes pueden ser:
 - 1) Verde o azul: Se puede presentar debido a la corrosión de las tuberías de cobre, la reacción química produce este color, en general el material del que estén elaboradas las tuberías interviene directamente en esta característica por ello es muy importante conocer las propiedades del mismo, así como su impacto en el medio ambiente. Los metales como plomo y cobre pueden ocasionar severos daños a la salud y a la vida acuática.
 - 2) Negro o marrón oscuro: Producido por el manganeso de los sedimentos presentes en las tuberías, no representa daños a la salud.
 - 3) Rojo, naranja y amarillo: Producido por el óxido del hierro, acero, etc., no representa daños a la salud y aparentemente tampoco es un peligro para el medio ambiente. Sin embargo, se busca evitar su aparición por cuestiones estéticas.

- **Sabor y Olor:** Estos dos parámetros pueden ser detectados al 100% por los sentidos humanos y al igual que los otros pueden ser variados, no obstante entre los olores y sabores más comunes se pueden encontrar:
 1. Petróleo, gasolina, combustibles: Son altamente peligrosos y dañinos para el medio ambiente y se deben a fugas en los ductos o derrames de las empresas dedicadas a este sector. El tratamiento para remover estas sustancias es costoso y el daño que ocasionan es irreversible.
 2. Huevo Podrido: El olor está asociado con altos niveles de sulfuro en el agua, especialmente el ácido sulfhídrico, el cual es altamente venenoso aparte de ser incoloro. Este olor también es indicador de la

descomposición de materia orgánica. Generalmente este olor se produce en cuerpos de agua con niveles de temperatura altos.

3. Salado: Altos niveles de sodio, común en cuerpos de agua cerca del mar.
4. Metálico: Se debe principalmente a tres metales como el hierro, en niveles mayores a 0.004 [mg/l], manganeso cuando es mayor a 0.1 [mg/l], cobre entre 2 y 5 [mg/l] y finalmente el zinc entre 4 y 9 [mg/l].

A pesar de que el olor se puede determinar simplemente como bueno o malo, se sugiere utilizar el TON, por sus siglas en inglés *Threshold Odor Number* (Número de Umbral o Límite de Olor). Para determinarlo se utiliza la siguiente fórmula:

$$TON = \frac{(A + B)}{A}$$

Donde:

A es el volumen de la muestra con olor

B es el volumen de la muestra de agua pura sin olor.

- **Temperatura:** De este parámetro dependen muchas de las propiedades del agua y es un indicador importante de la calidad del agua. La temperatura afecta la actividad biológica presente en un cuerpo de agua, es decir, determina qué tipos de organismos pueden vivir en éste, ya que cada organismo tiene un rango de temperatura en el que puede vivir. Esto debido a que en ciertos rangos existe diferente cantidad de oxígeno disuelto, el cual es indispensable para la vida acuática.

Otra de las características de la temperatura es su gran influencia en la composición química del agua. La cantidad de reacciones químicas incrementa en temperaturas altas y viceversa.

Las causas principales de los incrementos de temperatura en un cuerpo de agua son las descargas con temperaturas altas, comúnmente provenientes de la industria, especialmente de las plantas termonucleares. Sin embargo, las ciudades también contribuyen al incremento de la temperatura en el agua. La falta de vegetación reduce la sombra que puede producir y por lo tanto los cuerpos de agua no tienen protección ante la radiación solar; por otra parte la deforestación también acelera la erosión del medio ambiente produciendo una mayor cantidad de sedimentos en los cuerpos de agua. Los sedimentos absorben calor de la radiación solar en lugar de reflejarla. Retomando lo mencionado en el apartado de *Turbiedad*, si un cuerpo de agua se encuentra expuesto directo a la radiación solar y presenta altos niveles de turbiedad, su temperatura podría ser mayor a la de su estado ideal.

Si la temperatura es alta habrá menor cantidad de oxígeno disuelto y en consecuencia el metabolismo de las plantas acuáticas aumenta, y si éste aumenta, la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) también. Y como ya se mencionó, los organismos son severamente afectados por estas variaciones.

Parámetros químicos

Dentro de los parámetros químicos se encuentran principalmente:

- *pH*: Este parámetro se debe incluir en todo estudio de calidad del agua ya que es un indicador de varios aspectos importantes, puede ser indicador del nivel de contaminación de un cuerpo de agua y también del estado de los seres vivos dentro de éste.

El pH es una medida de qué tan ácida o básica se encuentra el agua, la escala de medición está entre el 0 y 14, siendo 7 un valor neutral (USGS, 2016). El pH mide la cantidad libre relativa de iones de hidrógeno y de

hidroxilo, si existen más iones de hidrógeno el agua será ácida y si por el contrario existen más iones de hidroxilo el agua será básica.

Sin embargo, al ser un parámetro químico el pH depende de las reacciones presentes en el agua, por lo tanto si el agua tiene cambios químicos el primer parámetro en manifestarlo será el pH. Un cambio de unidad del pH podría parecer insignificante pero la escala en la cual se mide, es logarítmica, de esta manera un cambio de unidad implicaría que el agua es 10 veces más básica o ácida según sea el caso.

Al ser un parámetro tan fácil y barato de obtener, es importante conseguir la mayor cantidad de información útil a partir de éste. Por ejemplo, a partir del nivel de pH se puede conocer la solubilidad en el agua, así como la biodisponibilidad de nutrientes básicos para la vida acuática e inclusive de los metales pesados. Y si se conoce la solubilidad de los metales pesados en el agua se puede determinar su nivel de toxicidad; tienden a ser menos tóxicos en niveles bajos de pH porque son más solubles.

Para medirlo existen varios métodos, entre los más comunes está el papel tornasol, el cual simplemente con poner una gota de agua cambia de color dando un nivel estimado del pH. Sin embargo, para mediciones más precisas es recomendable utilizar un medidor digital de pH, existen varios modelos pero en general el mecanismo es el mismo, basta con limpiar el electrodo con agua destilada antes (y después) de utilizarlo y colocarlo en la muestra de estudio, en unos instantes se desplegará en la pantalla el valor del pH. Las mediciones se pueden hacer *in situ* o bien en el laboratorio.

En términos generales siempre es deseable tener un agua neutra para evitar dañar al medio ambiente. Desafortunadamente este estado no se presenta de manera común. Cuando se presentan niveles altos (básicos) de pH se puede complicar el proceso de tratamiento de la misma, especialmente si se usa cloro para su desinfección, se requerirá una mayor

cantidad para lograrlo. Y si se usa una mayor cantidad de cloro se produce una mayor cantidad de trihalometanos los cuales, según estudios recientes, pueden ser causa de cáncer. Por otra parte, si el agua presenta niveles bajos (ácidos) provoca corrosión y afecta de manera importante la vida acuática; niveles ácidos se presentan cerca de zonas mineras principalmente.

- *Alcalinidad*: Se puede definir como la capacidad del agua para neutralizar el ácido. En cuerpos de agua la alcalinidad es determinada por el tipo de suelo presente en toda la cuenca. Las mayores fuentes de alcalinidad son rocas que contienen carbonatos y compuestos de hidroxilos; la roca caliza tiene un contenido alto de carbonatos de calcio y en México comúnmente se le llama calcita. En contraste, zonas donde abunden rocas areniscas, conglomerados y granito presentan una alcalinidad baja. Una de las ventajas actuales de que un cuerpo de agua presente altos niveles de alcalinidad es su capacidad para neutralizar el ácido proveniente de la lluvia ácida y de descargas con niveles altos de pH.
- *Dureza*: La dureza es la cantidad de calcio y magnesio disuelto en el agua, por lo que está directamente relacionada con la alcalinidad. Si la alcalinidad en una muestra en su mayoría proviene de CaCO_3 , la dureza prácticamente un equivalente de la alcalinidad. No obstante, hay casos en los que los carbonatos están asociados con el sodio y con el potasio por lo que no contribuirían a la dureza.
- *Gases Disueltos*: Dentro del agua se pueden encontrar gases como el oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y amoníaco (NH_3) principalmente. La interacción entre el cuerpo de agua con la atmósfera es la fuente principal del nitrógeno y el oxígeno, ya que son los más abundantes en la atmósfera, a continuación en una gráfica de la composición química del aire para mostrar un porcentaje aproximado de los elementos mencionados:

Composición química del aire

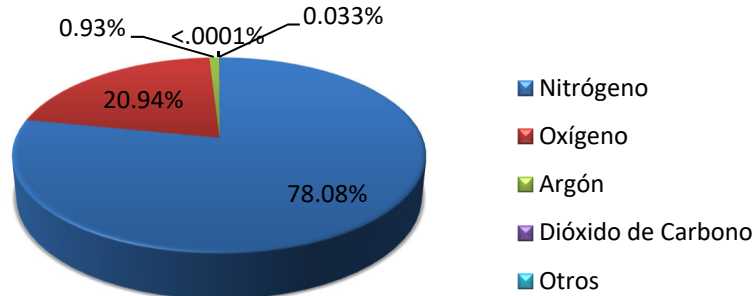


Figura 1. Elaboración propia con información de: (U.S. Department of Commerce, s.f.)

Sin embargo, el oxígeno es el gas más importante en los sistemas acuáticos, porque es indispensable para la vida y un buen nivel de éste es indicador de un cuerpo de agua con una buena calidad. La cantidad de este componente depende de múltiples factores, algunos ya mencionados) como el intercambio gaseoso con la atmósfera, la fotosíntesis producida al interior del cuerpo de agua en estudio, el consumo del mismo por actividad biológica y en menor importancia procesos como la difusión y variaciones de presión atmosférica.

Profundizando en lo ya mencionado, dentro de los parámetros físicos la temperatura está relacionada con la cantidad de OD presente en un cuerpo de agua. Actualmente existen tablas con los valores de OD de acuerdo a variaciones en la temperatura y a la presión atmosférica. A continuación se muestra una representación gráfica de cómo varía la cantidad de OD de acuerdo a la temperatura del agua en condiciones ideales (agua pura a una atmósfera de presión):

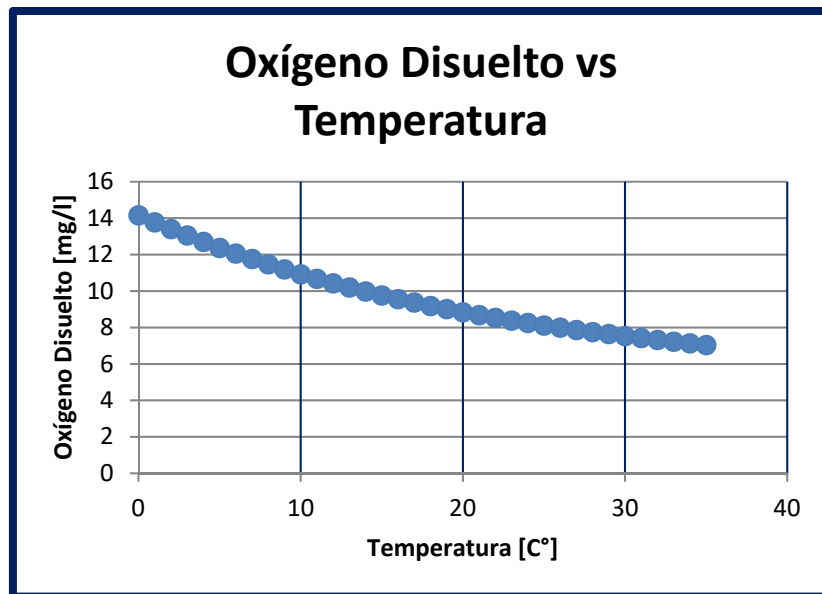


Figura 2. (Elaboración propia)

Este tipo de tablas sirven como modelos para la estimación del OD ideal en un cuerpo de agua según la temperatura del mismo. De estas tablas se puede deducir que la temperatura, siendo un parámetro físico, está estrechamente relacionado con la cantidad de gases disueltos que son un parámetro químico; por lo que al saber la temperatura se puede estimar la cantidad de OD.

Parámetros microbiológicos

La actividad microbiológica es de igual importancia que los parámetros anteriores y por ello se busca determinar la cantidad de bacterias presentes en el agua ya que pueden representar un riesgo mortal para la salud. No obstante, su objetivo está más orientado a la calidad del agua para consumo humano porque varios de éstos pueden permanecer dentro del agua sin causar ningún riesgo ambiental a los cuerpos de agua. Dentro de los principales indicadores se encuentran (USGS, 2016):

- *Coliformes*: Son bacterias parte de la microbiología intestinal de los mamíferos. Se puede encontrar en la tierra, otros animales e insectos mayormente. Debido a la facilidad de su cultivo en los laboratorios y a su

resistencia, se le ha establecido como un indicador primario para la detección de organismos patógenos.

- *Helminetos*: Son agentes potencialmente infecciosos que desarrollan en organismos pluricelulares, pero cuando son huevos son microscópicos. Suelen encontrarse en las descargas de agua residual y deben estar bajo ciertas condiciones para poder ser dañinos para la salud, usualmente esas condiciones se presentan en zonas agrícolas. Se les ha seleccionado como bioindicadores por su alta resistencia a cambios en el medio exterior tales como temperatura y pH.
- *Virus*: Son la primera causa de mortalidad dentro de las enfermedades de transmisión hídrica. Hay al menos 140 virus registrados patógenos que pueden ser transmitidos por el agua.
- *Protozoarios*: Causantes de enfermedades comunes como la diarrea pero pueden llegar a ser mortales dependiendo el tipo. Pueden encontrarse en forma parasitaria, quistes y trofozoitos, por lo general al tratar el agua mueren en la filtración o cloración.

Percepción Remota y Sistemas de Información

Geográfica (SIG)

En la actualidad existen varias alternativas para determinar la calidad del agua, entre ellas se incluye una herramienta de gran ayuda: la Percepción Remota (PR). Algunos autores la definen como el proceso para obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo, en este caso, sensores en un satélite, que no está en contacto con dicho objeto. En una compilación de CONAGUA (Muñoz, 2005), el autor proporciona la siguiente definición: “Los objetos terrestres, iluminados por la radiación solar, reflejan ésta luego de introducir en ella modificaciones inducidas por la misma estructura y composición de dichos objetos. La radiación reflejada es capturada por los sensores del satélite, siendo parcialmente procesada a bordo de éste y retransmitida a estaciones receptoras terrestres para su posterior procesamiento y análisis”. En otras palabras, es el proceso de obtener información espacial y temporal de una zona de estudio en la Tierra, a través de sensores ubicados en plataformas como satélites o aviones. Al procesarlas con el software adecuado se obtiene información relevante para esta área tal como temperatura, índices de vegetación, topografía, etc.

Para poder comprender cómo funcionan los sistemas de PR es necesario conocer relación física entre los materiales y la luz, específicamente el fenómeno de la reflectancia o radiación. Su fundamento teórico es que todo material en la superficie de la Tierra tiene la capacidad de reflejar o radiar la energía electromagnética incidente, sin embargo no toda esta energía está dentro del rango visible del espectro electromagnético. La luz del Sol está compuesta por todas las longitudes de onda visibles y gracias al fenómeno de la difracción el ojo humano puede apreciar los diversos colores; se puede decir que la luz solar es la fuente natural de energía luminosa principal sobre la Tierra. A continuación se muestra el espectro de electromagnético:

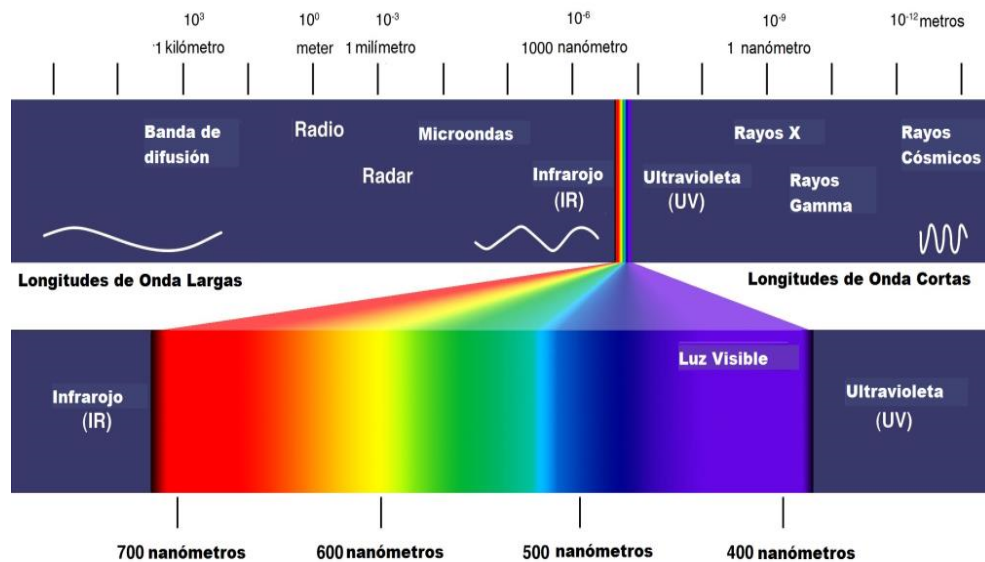


Figura 3. Espectro electromagnético (Chomalí, 2017)

Se puede apreciar que el espectro visible es muy reducido, está entre 380nm-700nm aproximadamente, el ojo humano sólo es capaz de recibir ese rango de longitudes de onda y traducirlo en una imagen visible. Pero los materiales también pueden absorber diferentes longitudes de onda aparte de las presentes en el espectro visible como la infrarroja y la ultravioleta, por mencionar algunas.

Al igual que las longitudes de onda del espectro visible, el porcentaje de absorción de la energía incidente en estos no es del 100% por lo que el resto se refleja. Al no ser visible, es necesario el uso de equipo especializado para poder detectar la frecuencia de la onda; aquí es donde comienza el proceso de la PR. Existen sensores especiales ubicados en plataformas que reciben esta información y emiten imágenes codificadas tanto con longitudes de onda del espectro visible como el del invisible y con ayuda de software especializado es posible decodificar toda la información.

La NASA en conjunto con el USGS inició en 1972 un proyecto para la observación terrestre mediante el uso de satélites para obtener imágenes digitales en alta resolución (U.S. Department of the Interior, s.f.), cada uno de estos está equipado con instrumentos de teledetección multispectral o sensores. El último de esta serie de satélites en lanzarse fue el Landsat 8, el 8 de febrero del 2013, tiene una vida útil aproximadamente de 5 años y una órbita de 705 kilómetros por encima de la Tierra (Ariza, 2013). Dentro de los sensores integrados se encuentra el OLI (Operador de Imágenes Terrestres) y TIRS (Sensor Térmico Infrarrojo) de forma conjunta son capaces de recabar datos sobre regiones costeras, islas, zonas continentales y los polos.

Para poder comprender la función de cada sensor es necesario saber qué es una banda espectral. Una banda espectral es la capacidad del sensor para recibir información sobre las longitudes de onda dentro de un rango definido del espectro electromagnético. Así como el ojo humano sólo es capaz de ver el rango visible, las bandas también tienen limitantes. La información proporcionada por cada banda forma una capa que a su vez se añade a otras para formar una imagen digital, por ello entre más bandas maneje un sensor podrá obtener imágenes con mayor información sobre un área de estudio.

A través del tiempo las mejoras de las plataformas de PR se enfocan en incorporar más bandas a los sensores, en este caso, LANDSAT 8, incorporó el OLI que respecto a las misiones anteriores integra dos bandas espectrales para la mejor detección del azul profundo y el infrarrojo, siendo de gran utilidad para el monitoreo de cuerpos de agua.

Aunque los rangos dentro del espectro electromagnético no tienen un valor definido para cambiar de uno a otro y poder definir el rango de una banda espectral, se cuenta con información suficiente para tener valores aproximados. A continuación se presentan algunos usos por las bandas en la PR (CONAGUA, 2005):

Azul [0.45-0.52 μm]	Se utiliza para obtener imágenes de la atmósfera y el agua profunda, y puede alcanzar hasta 150 metros de profundidad en el agua clara.
Verde [0.51-0.59 μm]	Se utiliza para obtener imágenes de la vegetación y las estructuras de aguas profundas, hasta 27 metros en el agua clara.
Rojo [0.6-0.7 μm]	Se utiliza para obtener imágenes de los objetos hechos por el hombre, así como del suelo y la vegetación; en el agua hasta 30 metros de profundidad.
Infrarrojo cercano [0.7-1.3 μm]	Se utiliza sobre todo para la imagen de la vegetación.
Infrarrojo medio [1.3-8.0 μm]	Se utiliza para la vegetación, específicamente el contenido de humedad del suelo, y algunos incendios forestales. También para las características geológicas, silicatos, arcillas, y los incendios.
Infrarrojo térmico [8.0-14.0 μm]	Se utiliza para obtener imágenes de las estructuras geológicas, las diferencias térmicas en las corrientes de agua, incendios y para los estudios nocturnos.

Tabla 1. Rangos de Longitud de Onda para Bandas Espectrales (CONAGUA, 2015)

De esta forma, los usuarios de la PR saben que bandas deben usar en el software especializado de acuerdo a la información que requieren. Las mostradas en la tabla son sólo un ejemplo general, pero actualmente existen diversos rangos y cada uno provee información más específica según la plataforma seleccionada. Inclusive a través de la combinación de bandas es posible lograr mejores resultados, dependiendo de la experiencia del usuario y de la calidad de la imagen.

El problema de la resolución de las imágenes en la PR no tiene que ver solamente con la calidad de las bandas o los sensores, también está limitada por el medio en el cual viajan las ondas, la atmósfera. La radiación es atenuada y distorsionada por los gases presentes en la atmósfera, partículas y cualquier fuente que pueda absorber la radiación electromagnética, inclusive la atmósfera misma pueda añadir ruido a la radiación del objeto original por la radiación emitida por otro objeto (Philpot, 2012). Es por esta razón que sólo a través de los años, software especializado y con la experiencia obtenida se ha logrado mejorar este sistema para ajustar las imágenes considerando las afectaciones atmosféricas.

El agua en diversas ocasiones es considerada una sustancia incolora (transparente) y teóricamente debería no absorber ninguna onda pero en la realidad absorbe parte y refleja otra parte de la onda como las demás sustancias. Dentro del espectro visible se puede ubicar en las ondas azules; a simple vista con una imagen satelital no sería posible determinar la calidad del agua de cualquier cuerpo de agua, por ello es fundamental la información proporcionada por las frecuencias de los espectros invisibles como se mencionó en apartados previos. Por lo que sí es posible obtener información relacionada con la calidad del agua a través de la PR.

La técnica de PR comenzó a usarse con estos fines en 1970; el problema principal de esta técnica fue lograr relacionar la información de las características espectrales obtenidas a través de los sensores con los parámetros de calidad del agua (Zimba, 2003). Las técnicas pioneras eran empíricas, y mediante los datos obtenidos de las diferencias espectrales y termales emitidas de los cuerpos de agua, se establecieron ecuaciones para poder relacionarlos con datos estadísticos medidos in situ de los parámetros del agua. Estas técnicas permitieron el ajuste de las longitudes de onda para poder detectar contaminantes tales como la clorofila, los sólidos suspendidos, temperatura, etc.

Por ejemplo, los sólidos suspendidos son el contaminante más común en la superficie de los cuerpos de agua. Estos aumentan la radiación/reflectancia

emergente de la superficie cerca del rango infrarrojo del espectro electromagnético. Como resultado se encontraron relaciones importantes entre la concentración de los sólidos suspendidos con el porcentaje de radiación presente en las bandas o combinaciones de bandas en los sensores satelitales como a continuación se muestra en la gráfica:

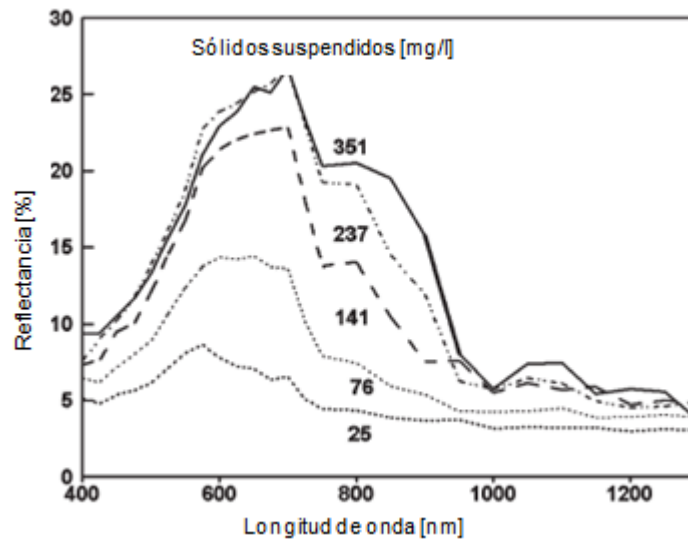


Figura 4. % Reflectancia vs Longitud de Onda (Facultad de Ingeniería, UNAM, 2016)

El procedimiento para comenzar a identificar otros parámetros como la presencia de clorofila, temperatura, etc. fue muy similar, por lo que ahora se han ajustado los satélites para poder percibir e interpretar de mejor manera la información recabada.

Gracias a la PR es posible cubrir grandes áreas geográficas de manera permanente y el acceso a bases de datos para comparaciones futuras o con otros fines de investigación. Con este tipo de información se pueden administrar zonas protegidas o monitorear los cambios en el medio ambiente para evaluar riesgos potenciales. Además permite realizar mediciones sin asistir a la zona de estudio, ahorrando tiempo e inclusive brindando información más detallada. Por otra parte si existe un obstáculo entre la zona en estudio y los sensores, ya sea por

condiciones climatológicas o de alguna otra naturaleza, la medición es imposible o bien la información obtenida no es de mucha utilidad.

Otra fuente de información importante es un Sistema de Información Geográfica (SIG) el cual es un sistema computacional capaz de capturar, almacenar, analizar y proyectar información geográficamente referenciada, esto quiere decir, información ubicada espacialmente (USGS, 2016). Esta herramienta es de gran utilidad debido a los diversos campos de información maneja, ya sea desde divisiones políticas o hasta actividades económicas, y su capacidad para relacionarla con el contexto donde se encuentra y así establecer una conexión y en un paso posterior la toma de decisiones. La base de estos sistemas es poder ubicar en longitud, latitud y elevación toda la información recolectada de otra manera sería de poco uso la información obtenida.

Actualmente existen muchas instituciones tanto privadas como gubernamentales dedicadas a proveer bases de datos a los SIG, de esta manera es más fácil comparar diferentes datos que pueden estar relacionados entre sí, como la precipitación anual en una ciudad y las cuencas hidrológicas que la afectan, por mencionar alguno. Así, se puede notar que datos recopilados por la PR, como grandes superficies, pueden ser útiles para un SIG y posteriormente relacionarlos con datos recabados en la superficie terrestre; por lo que los seres humanos son parte de un SIG.

Cada tipo de información es reconocido por un SIG como una capa y dependiendo del estudio u objetivo se pueden usar distintas capas y ver la relación existente. Cabe mencionar que un SIG no podría establecer información para cada metro cuadrado de la superficie terrestre por ello, la colección de muestras debe ser en puntos discretos porque el SIG sólo tomará dos o tres puntos dimensionales para ubicar la muestra en un mapa.

Existen diversos SIG, dependiendo del tipo de proyecto se puede encontrar el adecuado. Sin embargo, QGIS es una plataforma libre y gratuita que permite realizar prácticamente todas las funciones para el análisis de información

geográficamente referenciada. Para este proyecto se seleccionó esta plataforma y se obtuvo la información requerida de páginas del gobierno de México.

Normas y Técnicas Actuales de Muestreo

Existen diversas técnicas de muestreo y cada una tiene lineamientos específicos dependiendo del tipo de agua y el objetivo del muestreo, de manera general existe muestreo para descargas de agua residual, aguas subterráneas, ríos, lagos, etc. En México existe la NMX-AA-14-1980, la cual es una norma donde se hacen recomendaciones sobre el muestro de agua en cuerpos receptores de aguas superficiales. El objetivo como en todo programa de muestreo es preservar las características físicas, químicas y microbiológicas del agua y está orientado a aquellos cuerpos superficiales que son susceptibles de recibir descargas de aguas residuales.

Sin embargo, la NMX tiene no tiene por objetivo determinar en qué sitios muestrear y sólo menciona el establecimiento de una red de muestreo representativa:

4.1.2 Para el muestreo en cuerpos receptores, se debe establecer una red de muestreo que represente las condiciones particulares del cuerpo receptor, debiéndose tomar las muestras en la parte superior, media o inferior

Además, solamente hace sugerencias generales al método de muestreo como la preservación de muestras y ciclos de muestreo. En el apartado 4.3 se desarrolla el muestreo en lagos, lagunas, presas y embalses, donde sobre la determinación de los sitios de muestreo se menciona que debe ser:

4.3.1 En los afluentes, antes de desembocar al cuerpo receptor.

4.3.2 Dentro del cuerpo receptor, donde se aprecie una mezcla uniforme con los afluentes.

4.3.3 En las salidas del cuerpo receptor.

Como se puede apreciar, no se establecen parámetros más específicos sobre dónde muestrear, por lo que queda a criterio de la persona encargada del estudio la determinación de estos sitios. Al no ser más específica la NMX es posible que

se obtengan muestras no representativas del cuerpo de agua resultando en un mal estudio de la calidad del agua.

La CONAGUA tampoco cuenta con manuales para el muestreo en cuerpos de agua superficiales a pesar de contar con algunos para el muestreo de aguas subterráneas y residuales (Universidad de Tel Aviv, 2015). Dentro de uno de los proyectos de la de la CONAGUA está la NMX-AA-003/ 1-SCFI-2008 y dentro del apartado 7.1 se sugiere lo siguiente para el muestreo de las aguas naturales:

“La ISO 5667-4 proporciona una guía para el muestreo de lagos naturales y artificiales”

La ISO 5667-4 es una referencia global, la cual algunos países han adaptado a sus necesidades y se ha establecido como el referente para el muestreo de cuerpos de agua superficiales. Dentro de la misma hay un apartado específico para la determinación del sitio de muestreo, que traducido dice lo siguiente:

“Han surgido dificultades al seleccionar sitios adecuados de muestreo siempre que los determinantes no se distribuyen homogéneamente dentro del cuerpo de agua de interés. En general, esos sitios son evitados, excepto cuando los sitios mismos son de interés directo, ya que no afectan las muestras representativas de la mayor parte del cuerpo de agua. Si hay alguna posibilidad de una distribución no homogénea, la distribución de los determinantes de interés serán elegidos en el sitio, pruebas experimentales en la naturaleza y la magnitud de cualquier heterogeneidad, en tres dimensiones, debe ser hecho. Si dichas pruebas muestran que todos los determinantes están distribuidos homogéneamente, cualquier sitio de muestreo será suficiente. De otra manera otro sitio deberá ser buscado donde los determinantes estén distribuidos homogéneamente. Si es imposible encontrar dicho sitio de muestreo, las muestras deberán ser tomadas de suficientes puntos en el sitio elegido para garantizar resultados representativos.

Estas muestras simples son frecuentemente combinadas para formar una sola muestra compuesta y representar la calidad en el sitio de muestreo, para que no

sea necesario analizar muestras simples. Sin embargo, esto no brinda la información en la variación de la calidad entre los puntos de muestreo. Además, la combinación de muestras simples en esta manera no puede ser utilizada cuando se buscan gases disueltos o cualquier otro constituyente volátil” (Department of Standards Malaysia, 2006).

En resumen, se estimula la búsqueda de puntos de muestreo distribuidos adecuadamente en todo el cuerpo de agua para obtener una muestra representativa, es decir no determinar puntos en solo una parte del cuerpo de agua. Además de la creación de muestras compuestas a partir de las simples distribuidas homogéneamente. Cabe destacar que no se menciona la búsqueda de un punto homogéneamente mezclado como en la NOM-AA-14-1980. Es decir, cada manual y norma sólo hace sugerencias generales para la determinación de un punto de muestreo por lo que la persona encargada del estudio debe tener la experiencia necesaria, herramientas y conocimiento adecuado de la zona de estudio para obtener los puntos adecuados y lograr buenos resultados en un estudio de calidad del agua. Otra solución podría ser la planteada en la ISO al recolectar muestras de diversos puntos, sin embargo el costo del estudio incrementa de acuerdo a la cantidad de muestras obtenidas.

Caracterización del Sitio

Parque Nacional de las Lagunas de Montebello

En el estado de Chiapas, al sureste de México, y en la parte noreste de Guatemala se puede encontrar un paisaje natural lleno de color y maravillas naturales, las Lagunas de Montebello, cada una de las lagunas que lo conforman tienen características únicas, y debido a esto se convirtió en un gran atractivo tanto para el turismo nacional como el internacional. Con el objetivo de preservarlo y apoyar a la economía nacional, fue declarado Parque Nacional el 26 de noviembre de 1959 por el presidente Adolfo López Mateos. Dentro de otros títulos importantes se encuentran la declaración como Sitio Ramsar 1325 (The Ramsar Convention Secretariat, 2014), el 27 de noviembre de 2003 y desde mayo del 2009 pertenece la Red Mundial de Reservas de la Biosfera y también es un Área Natural Protegida (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007). Por lo que este sitio es un referente ecológico para todo el planeta debido a la riqueza natural que posee.

A pesar de los esfuerzos del gobierno por resguardar tan grande biodiversidad, el PNLN ha sido sufrido un gran impacto ambiental debido a diversos factores como: el turismo, incendios forestales, deforestación y principalmente la agricultura (Cordero). Cada uno de éstos deteriora el equilibrio ecológico de la zona, sin embargo, el cambio más notable ha sido la calidad del agua de las lagunas. Un estudio anterior realizado por la Comisión Federal de Electricidad indica variaciones en los parámetros físicos y químicos del agua que se ven reflejados en las tonalidades de las lagunas. (Hernández & Cervantes, 2016). Por ello es indispensable conocer cómo se inicia y desarrolla la contaminación de ésta, para poder presentar un plan integral para lograr su restauración y garantizar el futuro del parque.

Localización

El Parque Nacional de las Lagunas de Montebello se localiza al sureste del estado de Chiapas, México.



Figura 5. Croquis de Macrolocalización. (Google Maps)

Específicamente dentro de las coordenadas límite: $16^{\circ} 04' 40''$ y $16^{\circ} 10' 20''$ Latitud Norte, $91^{\circ} 37' 40''$ y $91^{\circ} 47' 40''$ Longitud Oeste y a una altitud de 1,500 msnm. (Secretaría de Gobernación, 2016) La extensión del parque es de aproximadamente 63.95 km^2 (UNESCO, 2012) y dentro de éste se ubican los municipios de La Independencia y La Trinitaria, éste último abarca cerca del 95% del PNLM. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007). El siguiente mapa delimita la zona del PNLM mediante la línea verde.

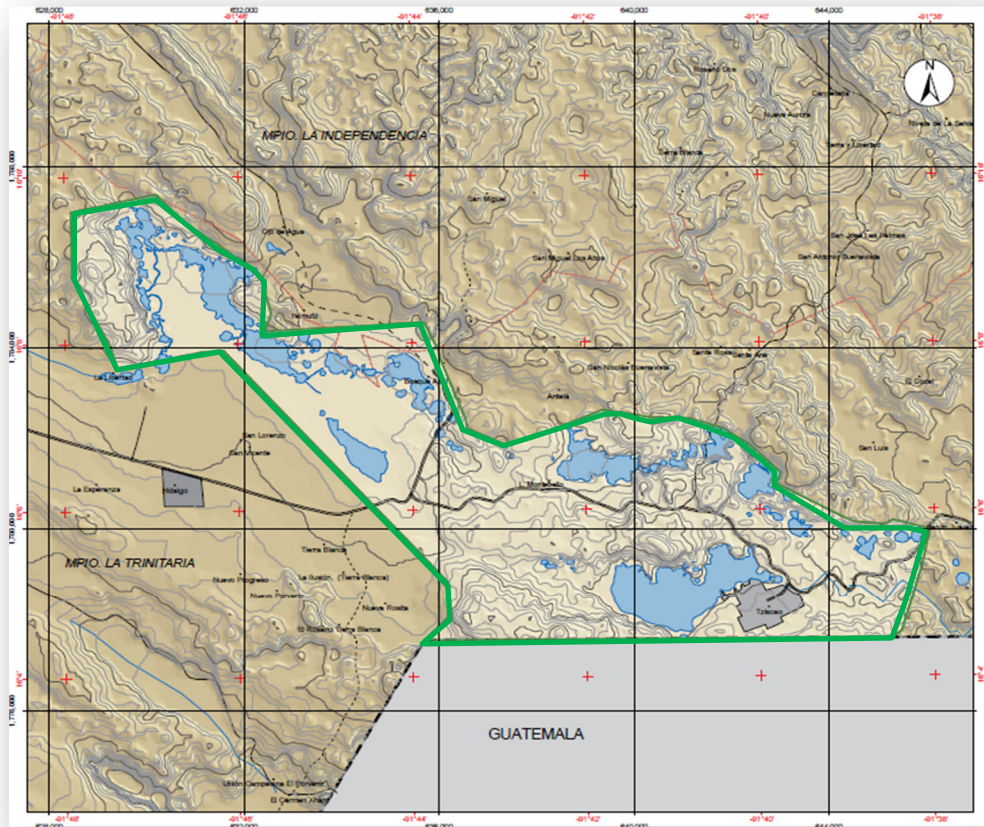


Figura 5. Localización del PNLM. (Comisión Nacional de Áreas Protegidas INEGI)

Si se considera toda el área que comprende la subcuenca donde se encuentra el PNLM, ya que todos los escurrimientos dentro de ésta pueden o no afectar directamente a la calidad del agua dentro de las lagunas, se debe mencionar la Región Hidrológica no. 30 Grijalva-Usumacinta. En ésta se encuentra la cuenca del Río Lacantún y a su vez la subcuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello que aparte de los municipios mencionados abarca al de Las Margaritas, Comitán y una porción de una localidad guatemalteca y tiene una extensión aproximada entre 762 km² y 810 km².

Marco Biótico

Flora

En una aproximación por parte de la UNESCO se menciona que existen 208 especies de árboles, 50 especies de orquídeas y un importante número de especies de helechos y epifitas; cabe destacar que 27 de éstas son endémicas (UNESCO, 2012). De acuerdo con el Inventario Forestal Nacional del INEGI, el bosque de clima templado es el preponderante en la zona del PNLM, específicamente las asociaciones vegetales existentes son: bosque de coníferas, bosque de latifoliadas, bosque de pino-encino-liquidámbar, vegetación riparia, vegetación secundaria y zonas de cultivo. La más destacada de éstas es el bosque de pino-encino-liquidámbar ya que es la más extensa dentro del PNLM y donde se encuentran especies como *Liquidambar Styraciflua*. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007).

Flora amenazada

Al ser un sitio con características únicas y al aumento del uso de suelo para fines agrícolas, varias especies dentro del PNLM se encuentran en categorías de riesgo o amenazadas desde el 13 de febrero del 2002, de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2001 y al DOF entre las cuales están el Helecho Arborescente (*Cyathea fulva*), *Geonoma membranacea* (A), *G. Oxycarpa* (A), *Magnolia Sharpii*, *Hampea Montebellensis*, *Ostrya Virginiana*, *Podocarpus Matudai*, *Zinowiewia Rubra*. Aunque según datos de la UNESCO, 106 especies de epifitas y helechos se encuentran en categoría de especies amenazadas.

Sin embargo, las especies más reconocidas son las orquídeas, la UNESCO menciona que existen 50 especies de orquídeas, pero la SEMARNAT menciona lo siguiente: “35 variedades se han registrado para el Parque y corresponden a más de 10% de la flora de orquídeas del estado de Chiapas. Algunas de las de mayor interés son *Lycaste skinneri* por ser especie en Peligro de Extinción, así como *Stanhopea oculata*, especie amenazada (NOM-059-SEMARNAT-2001 Protección

ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo), y *Maxillaria meleagris*, *Encyclia rhynchophora*, *Encyclia ceratistes*, *Stenorrhynchos speciosum* y *Sobralia xantholeuca* son especies vulnerables, escasas o con poblaciones reducidas” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007)

Por otra parte, una gran variedad de hongos macromicetos se desarrollan dentro del PNLM debido a las condiciones del mismo. Existen 56 especies de hongos, de las cuales destacan las siguientes debido a que son comestibles: Entre las especies comestibles se encuentran: *Auricularia auricula* (oreja), *Boletus luridus* (canchaitas), *Calvatia cyanthiformis* (pegajoso) y *Hebloma fastibile* (jolete). El esfuerzo de los programas de conservación está dirigido principalmente a lograr mantener la fauna del PNLM lo más alejada de cualquier impacto ambiental, ya que cualquier cambio mínimo en la flora debido al uso de tierras para cultivo puede afectar de manera significativa a todas las especies.

Fauna

A pesar de los esfuerzos por cuantificar la riqueza del sitio aún no se conoce por completo la cantidad de especies que lo habitan. Las mejores estimaciones indican que existen 102 especies de invertebrados y 518 especies de vertebrados o bien 277 especies de pájaros, 65 especies de mamíferos y 35 de reptiles. En cuanto a especies endémicas existen dos, dentro de la clasificación de los mamíferos: los ratones chiapanecos (*Peromyscus zarhynchus*) y *Peromyscus melanophry*. “Además el 27% de las especies (mamíferos) son endémicas de Mesoamérica (un marsupial, un carnívoro, dos murciélagos y 10 roedores), 20 especies muestran distribución compartida únicamente con Sudamérica (38%), 15 especies con Norte y Sudamérica (28%) y solo una se comparte con Norteamérica (2%)” (Anna Horvath, 2001). En cuanto a los reptiles endémicos existe la lagartija arborícola llamada el dragoncito (*Abronia lythrochilla*) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007).

Fauna amenazada

Por otra parte, las especies amenazadas dentro de la zona son: “el ratón chiapaneco (*Peromyscus zarhynchus*) especie endémica y amenazada; el leoncillo (*Herpailurus yagouaroundi*) y el tigrillo (*Leopardus wiedii*) especies amenazadas y en peligro de extinción local. En cuanto a las aves se cree que una especie de pájaro carpintero (*Colaptes auratus*) ya está extinta y dos (*Campephilus guatemalensis* y *Melanerpes formicivorus*) se encuentran bajo protección especial (Secretaría de Medio Ambiente, 2010).

Marco Abiótico

Edafología

Dentro del PNLM se pueden encontrar diversos tipos de suelo con características distintas, abundan los litosoles y el vertisol pélico así como las rendizinas y en menor cantidad se pueden encontrar acrisoles. Los litosoles son suelos someros y su característica principal es su baja capacidad de retención de agua por lo que no suelen desarrollar una importante actividad biológica, generalmente se encuentran en lomeríos y en las laderas. Este suelo se forma debido a la erosión a través de los años; la deforestación favorece su aparición. Por otra parte, las rendiznas tienen propiedades adecuadas para la actividad biológica en el suelo, permite el desarrollo de fauna y es rico en nutrientes. No obstante, dentro del PNLM se encuentran en pendientes pronunciadas y en la zona de las montañas por lo que se pueden erosionar fácilmente y perder sus propiedades.

El vertisol pélico es un tipo de suelo donde se pueden hallar arcillas como las esmecitas y vermiculitas que tienen una gran capacidad para retener el agua y al aumentar su volumen impiden el crecimiento de la flora dentro del PNLM, debido a que limitan el flujo de aire y el correcto drenaje de la zona. Éste, se encuentra en las partes bajas del relieve y en depresiones al pie de los lomeríos cársticos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007).

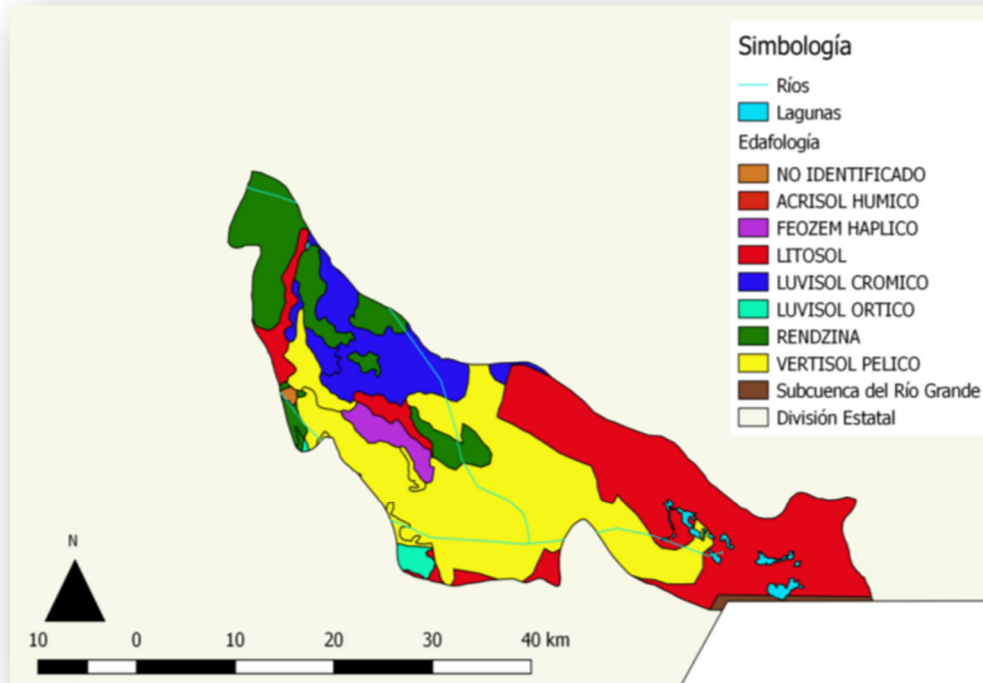


Figura 6. Tipos de Suelo en el PNLM (Elaboración propia con información de INEGI)

Geología

El área de estudio se encuentra dentro del cinturón Chiapaneco de Pliegues y Cabalgaduras (Ortega, 1992). Y se caracteriza por la abundante presencia de calizas, esto debido a que la región tenía mares someros y en consecuencia los sedimentos y depósitos formaron este tipo de roca. Los estratos y capas “alcanzan 80 m y poseen coloración grisácea y rojiza. Su textura es masiva y presentan intercalaciones de núcleos fosilíferos delgados compuestos de dolomitas. Los depósitos fluviales se localizan a lo largo de cauces y arroyos y presentan composición variable, formando mantos arcillosos, arcilloso-arenoso, arenas, guijarros y cantos rodados” (INEGI, 1985; Vásquez y Méndez, 1994).

No obstante, en la zona del PNLM la característica esencial es el paisaje *karst*. Esto significa que el agua, principalmente, al actuar en la disolución de las rocas

genera rocas con altos índices de porosidad y permeabilidad va “favoreciendo la transferencia de agua y materia orgánica desde la superficie a las cavidades subsuperficiales o viceversa” (Mora & etal, 2016). Este proceso ha generado a través de miles de años sistemas subterráneos como cuevas y canales que se conectan unos con otros. Por lo tanto, cuantificar el impacto ambiental y las alteraciones en la calidad del agua en toda la zona es más complejo que lo presentado por las estimaciones actuales.

El proceso mencionado de carstificación genera materiales residuales que se van acumulando a través del tiempo, generalmente son arcillas y arenas, aunque éstas últimas en menor proporción. Por lo tanto, en el PNLM también existen depósitos lacustres cerca de la zona de los lagos o bien en zonas donde en alguna era geológica existió un depósito o una corriente de agua. No obstante, el proceso de carstificación sucede mayormente en la superficie generando zonas calcáreas, las cuales tienden a colapsar formando depresiones. Si se sigue esta relación y se añaden los parámetros del agua existentes, como la alta alcalinidad, es posible establecer que el origen y desarrollo de las lagunas se dio gracias a la interacción entre el agua y los carbonatos presentes en las calizas.

Geohidrología

El Sistema Lagunar está conformado por cerca de 59 lagos de origen kárstico. “La cuenca tiene como afluente principal el Río Grande alimentado por el lago Juznajab, ubicado en la parte alta de la cuenca”. (Mora & etal, 2016) Éste recorre toda la zona urbana y agrícola de la zona y desemboca en el PNLM, por lo que saber cómo se comunica todo el sistema es indispensable para conocer el origen de contaminantes y diversos componentes presentes en el agua.

En el PNLM “la alimentación de las aguas lacustres es principalmente subterránea” (Vázquez & Méndez, 1994). Siguiendo esta idea, el génesis de los lagos proviene de la interacción roca-agua del paisaje karst, que a través del tiempo influyó para la creación de las formaciones morfológicas con las

condiciones ideales para la formación de un lago. Una de las interacciones roca-agua más interesantes, y por las que surgieron los lagos en esta zona del país, se origina debido al derrumbe de los techos calcáreos mencionados en el capítulo anterior. El agua se deposita en las dolinas cársticas y depresiones generadas; gran parte de los lagos del PNLM podrían haberse formado de esta forma.

El agua fluye a través de los sistemas de cuevas y muy probablemente de esta forma se conecta todo el sistema lagunar del PNLM ya que las depresiones mencionadas anteriormente, donde se depositó el agua, se encuentran a nivel del manto freático. Esta conexión es muy importante debido a que los lagos, ubicados en la montaña y en la planicie, pierden la conexión superficial existente con el río durante la temporada de secas y sólo se mantienen conectados por el agua subterránea. (Hernández & et, 2015). Para fines de estudios de calidad del agua estas características son muy importantes debido al transporte de contaminantes.

Hidrología

El estado de Chiapas por si solo posee el 30% de los recursos hídricos superficiales del país, por lo que es de vital importancia priorizar el cuidado y el uso del agua en este estado. Como ya fue mencionado, la subcuenca donde se encuentra el PNLM es la del Río Grande de Comitán- Lagos de Montebello y es parte de la Región hidrológica No. 30, cabe destacar que es una región hidrológica prioritaria (CONABIO). Actualmente existe un Plan de Gestión específico de esta cuenca que se puede encontrar en el portal del Instituto Estatal del Agua de Chiapas.

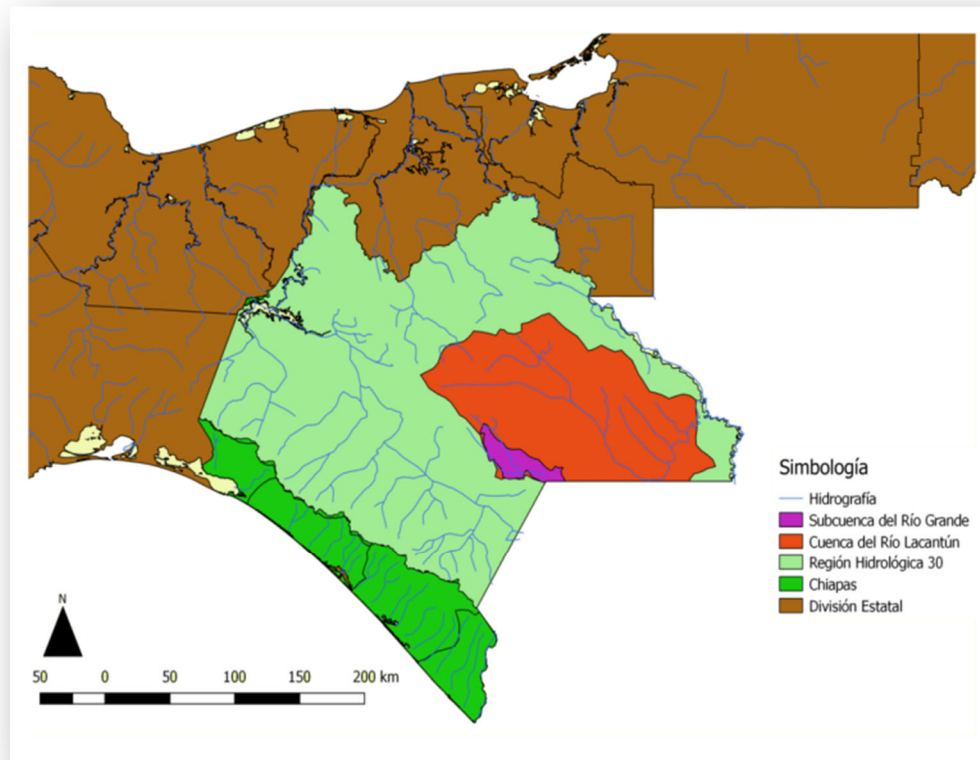


Figura 7. Región Hidrológica No. 30 (Elaboración propia con información de INEGI)

Como ya fue mencionado en el capítulo anterior, el Lago de Juznajib es el afluente principal del Río Grande, sin embargo, en todo su recorrido “recibe aportaciones principalmente de corrientes intermitentes que llevan agua sólo en temporada de lluvias” (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2008). Otras fuentes que aportan gasto al río son manantiales, arroyos efímeros y aguas negras del municipio de Comitán. Ésta última descarga es de vital importancia ya que descarga cerca del PNLM. Sobre si todas las lagunas y humedales presentes en esta cuenca están de alguna forma o conectadas no se tiene la información necesaria para aseverar esta hipótesis.

El sistema lagunar principal del PNLM es conocido como Tepancoapan, tiene una extensión de 13 km y está compuesto por diversas lagunas tales como San Lorenzo, Yalguech, Esmeralda, Montebello y Tziscoa, por mencionar las más

importantes. Durante la temporada de estiaje se puede interrumpir la conexión superficial entre las denominadas Lagunas de la Planicie y la zona del Río Grande. Esta interrupción puede afectar la concentración de contaminantes en las lagunas tal y como se manifestó en un estudio realizado en el 2015 donde se presentaron ciertas variaciones en la cantidad de sólidos disueltos totales entre los lagos del PNLM (Hernández & et, 2015).

Según estimaciones de la CONAGUA, la cuenca del Río Grande tiene un volumen promedio anual de 290, 049, 000 m³ de agua superficial. Esto la convierte en una gran fuente de recursos hídricos para el Estado de Chiapas. Aún más, esto implica que el terreno dentro de la cuenca tiene un gran potencial para la agricultura. El 51% de los territorios de Chiapas son potencialmente cultivables.

Climatología

El clima predominante en la zona del PNLM es el templado húmedo con lluvias durante el verano y hacia la parte Noroeste predomina el clima cálido húmedo con lluvias en verano (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007). Las temperaturas más bajas que se han registrado en la zona están entre los 9°C y los 12°C, esto ocurre en las zonas montañosas mientras que en promedio las temperaturas predominantes se encuentran entre los 18°C y los 26°C. En general, la temperatura es homogénea dentro de la cuenca, estas condiciones son las que permiten al PNLM ser un paraíso de biodiversidad, pero al mismo tiempo lo convierten en un atractivo para la agricultura.

La precipitación anual total en los últimos años tiene registros desde los 1,700 mm hasta los 1,862 mm dentro de la Cuenca del Río Grande, pero en la zona del PNLM se tienen datos que en rango de precipitación está entre los 800mm y los 3,500 mm. El registro de la cuenca si se compara con el promedio de precipitación anual a nivel nacional es 53% más alto (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2008) .Dentro de los datos encontrados, el Programa de Conservación del PNLM ubica la temporada de lluvias entre los meses de mayo a octubre

mientras que el Plan de Gestión de la Cuenca de Río Grande ubica la temporada de mayo a diciembre. En ambos casos coinciden en que durante ésta llueve el 90% de la precipitación anual total y es en la zona del PNLM donde se tiene mayor cantidad de lluvia durante el año.

Fisiografía

De acuerdo con el prontuario de información geográfica municipal del municipio de la Trinitaria, la zona de PNLM se encuentra ubicada dentro de las Sierras de Chiapas y Guatemala, específicamente se divide en:

- Los Altos de Chiapas 52.50%
- Depresión Central de Chiapas 39.85%
- Sierra Lacandona 7.65%

La topografía dominante en el sitio es la Meseta con Cañadas y el Lomerío con Cañadas en un porcentaje menor existe Sierra Alta de Laderas Tendidas y también se puede encontrar Sierra Alta Plegada con Cañadas.

Esto hablando sobre el municipio de La Trinitaria, sin embargo, el municipio de La Independencia también tiene cierta presencia en la zona, en éste predomina el Lomerío con Llanuras en cuanto a la topografía; los demás aspectos son compartidos entre los municipios.

Marco Social

Población

Gran parte de la población tiene su origen en una etnia llamada Chuj y a partir de ésta se formaron las demás que actualmente residen en los municipios que posteriormente se describen. La mayoría de los indígenas “chujes” provienen de Guatemala y se asentaron de manera más importante a principios de los años 80 en la zona del PNLM.

El municipio de La Trinitaria cuenta con una población total de 72, 769 habitantes ocupando alrededor de 16, 723 viviendas. A pesar de encontrarse cerca del PNLN y contar con distintos apoyos gubernamentales para la protección del mismo, el municipio tiene un grado de marginación alto. El 36% de la población total se encuentra en situación de pobreza extrema y un 20% es analfabeta.

El porcentaje restante de la extensión del PNLN corresponde al municipio de La Independencia, en el cual habitan 3,041 personas en 772 viviendas. Las cifras de desarrollo son muy similares al municipio colindante, se encuentra en un grado de marginación alto y alrededor del 7.68% de la población es analfabeta. Entre las estadísticas a destacar es que el 57.38% de la población no tiene un refrigerador en casa. Cabe mencionar que todas las cifras presentadas son estimaciones del CONEVAL y de la CONABIO.

Sin embargo, gran parte de la población de estos municipios se encuentra alejada del área protegida del PNLN, específicamente dentro del área de influencia del Parque habitan 10 comunidades de acuerdo a cifras del año 2006, las cuales son: ejido Ojo de Agua, ejido Yalmutz anexo Ojo de Agua, ejido San Miguel anexo Ojo de Agua, ranchería San Miguel, Los Altos, ejido Antelá, ejido San Nicolás, ranchería Santiago El Vértice, ejido Nueva Rosita, ranchería San Lorenzo y ejido Miguel Hidalgo y dentro de éstas, la población con mayor presencia es Tzisco. De acuerdo a cifras del año 2005 solamente en Tzisco vivían 1,262 habitantes siendo 621 hombres y 641 mujeres, se podría considerar que el crecimiento ha sido escaso ya que en 1987 se registraron 900 habitantes. Aunque las otras poblaciones sí han tenido un crecimiento demográfico mayor (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2005).

Actividades económicas

Dentro de las actividades desarrolladas dentro del PNLM están el turismo y el comercio. El comercio de artesanías para turistas es común pero con el paso de los años ha ido decreciendo debido a que no existe una artesanía típica de la zona y es más fácil traer productos guatemaltecos para su reventa. Cerca del ejido de Tzisco también se desarrolla el turismo de forma importante, los pobladores se dedican a la renta de kayaks y balsas para recorrer las lagunas. La falta de programas de desarrollo integrales para la zona impide que la población disminuya la actividad agrícola y pudiera enfocarse más en actividades comerciales y turísticas; esto podría disminuir el impacto ambiental dentro del PNLM.

Sin embargo, la actividad económica más importante dentro de la zona de influencia del PNLM es la agricultura. Debido al rezago tecnológico y el acceso a nuevas técnicas de cultivo aún se utiliza la quema de hectáreas para poder trabajar la tierra, en un principio esta actividad no representaba un problema mayor porque tenía fines de autoconsumo por lo que su impacto ambiental no era significativo. Principalmente se cosecha el maíz, frijol, chilacayote y chile pero como es bien sabido el cultivo principal en esta zona del país es el café. Éste tiene fines comerciales y no de autoconsumo, en consecuencia representa un peligro para la conservación de áreas verdes.

De acuerdo a cifras del INEGI, el 28.78% del municipio de La Trinitaria tiene un uso de suelo para la agricultura y otro 13.99% es para pastizal cultivado, es decir cerca del 43.00% del uso del suelo tiene un fin agrícola. En general, este tipo de actividad es la más común dentro de la cuenca, en el siguiente mapa se pueden apreciar los diversos usos de suelo dentro de la cuenca y es notorio que gran parte de ésta tiene como principal actividad la agricultura afectando considerablemente el área que ocupaban las áreas verdes.

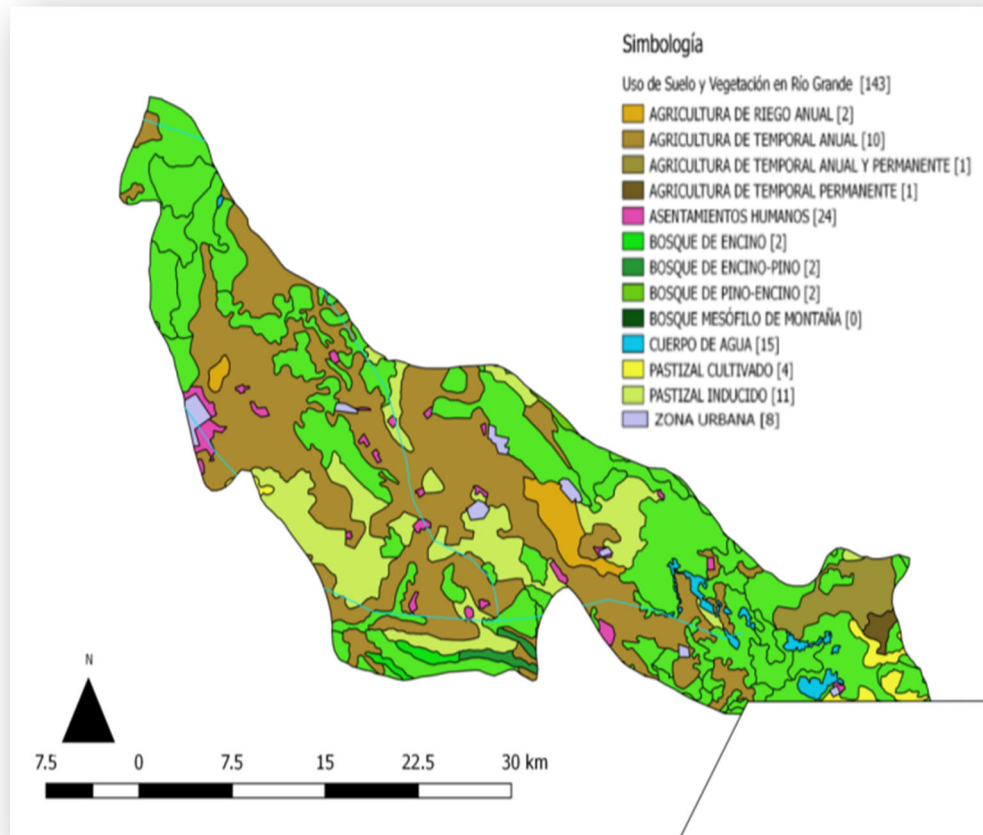


Figura 8. Uso de Suelo y Vegetación en Río Grande (Elaboración propia con información de INEGI)

Dentro del PNLM se han destinado 915 hectáreas como zonas de cultivo, las cuales son trabajadas por las poblaciones ya mencionadas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007). El problema principal de la existencia de estas zonas es el uso de agroquímicos para acelerar los cultivos o mejorar la calidad de los mismos, tal es el caso de la atrazina, ya que logran infiltrarse en el subsuelo afectando la calidad del agua de las lagunas y la calidad del suelo del PNLM.

La calidad requerida para las zonas de cultivo es menor y se debe utilizar agua tratada, sin embargo la realidad es distinta. El costo del agua tratada es superior al del agua potable y debido a la riqueza en recursos hídricos dentro de la cuenca, se utilizan los cuerpos de agua más cercanos a los campos de cultivo. De acuerdo

con el ciclo de agua, después de caer en tierra el agua se infiltra y en este caso, todos los contaminantes productos de la agricultura junto con ésta, es por ello que el impacto ambiental sobre la misma es mayor por el uso de pesticidas.

Por ello, es muy importante determinar correctamente la calidad del agua actual dentro de las lagunas del PNLM. Todas las decisiones y acciones para poder ayudar a mejorar el manejo del agua dentro de la cuenca y dentro del PNLM se determinan con base en la calidad del agua actual de las lagunas. La precisión de los resultados del estudio, dependen totalmente de una buena muestra, por ello es fundamental saber cómo y dónde tomar una muestra. Dentro de este capítulo se hablará sobre los parámetros para obtener un estudio de calidad del agua así como las normas actuales para obtener muestras de agua.

Otro problema producto de la agricultura es el uso de plaguicidas o pesticidas y se definen como: un conjunto de químicos destinados para matar o controlar las plagas dentro de los cultivos; dentro de esta clasificación se incluyen los herbicidas, insecticidas, funguicidas, etc., es decir todo tipo de compuesto químico con el fin de controlar agentes biológicos que puedan afectar a un cultivo.

Su origen se remonta al siglo XV cuando se aplicaban directamente químicos como el arsénico, para evitar que las plagas se comieran los cultivos. Con el avance de la tecnología y el desarrollo de la industria química se fueron perfeccionando los plaguicidas para aumentar su efectividad, sin embargo se desconocía o bien se le restaba importancia al efecto sobre el medio ambiente de los mismos.

En la tabla 2 se muestra una línea del tiempo con los tipos de plaguicidas usados en el mundo con sus características principales (Stephenson & Solomon, 1993):

Período	Ejemplo (Pesticida)	Fuente	Características
1800-1920's	Compuestos orgánicos primitivos. Nitrofenoles, clorofenoles, naftalina, aceites de petróleo.	Química orgánica, subproductos de la producción de gas de carbón.	Ausencia de especificaciones. Tóxicos para el usuario y a organismos ajenos a la plaga.
1945-1955	Compuestos orgánicos clorados. DDT, HCCH, ciclodienes clorados.	Síntesis orgánica.	Persistentes, buena selectividad, buenas propiedades agrícolas, buen desempeño en la salud pública, daños ecológicos severos.
1945-1970	Inhibidores de la colinesterasa, compuestos organofosforados, carbamatos.	Síntesis orgánica, buen uso de las relaciones estructura-actividad.	Menor persistencia, toxicidad para el usuario, algunos problemas ambientales
1970-1985	Piretroides sintéticos, avermectinas, imitadores de hormonas juveniles, pesticidas biológicos	Refinamiento de relaciones de actividad de estructura, nuevos sistemas de destino	Falta de selectividad, resistencia, costos y persistencia variables.
1985-	Organismos genéticamente modificados	Transferencia de genes de plaguicidas biológicos a otros organismos y a plantas y animales benéficos. Alteración genética de las plantas para resistir los efectos de los pesticidas	Posibles problemas con mutaciones y escapes, alteración de la ecología microbiológica, monopolio de los productos.

Tabla 2. Línea del Tiempo del Uso de Plaguicidas a Nivel Mundial.

Como se puede apreciar en la tabla desde su concepción hasta el día de hoy los plaguicidas representan un daño al medio ambiente, del cual muchas veces se desconoce el alcance último o a largo plazo. En la mayoría de los casos los plaguicidas requieren un vehículo (carrier) y debido al costo que puede representar se utiliza el más barato que frecuentemente es el agua (Rodríguez, 2018); esto aunado al proceso de infiltración tiene consecuencias severas en la calidad de la misma. Este impacto se puede asociar a los siguientes factores:

- El ingrediente activo en la formulación del pesticida

- Contaminantes existentes como impurezas en el ingrediente activo.
- Aditivos mezclados con el ingrediente activo. (agentes húmedos, solventes, adhesivos, etc.)
- Subproductos que se forman durante la degradación química, microbiana o fotoquímica del ingrediente activo.

A pesar del esfuerzo por agencias internacionales para retirar del mercado plaguicida dañinos, en México el contrabando de plaguicidas prohibidos para el uso agrícola es una práctica común (Milenio, 2014) exponiendo a las personas y al medio ambiente a daños irreversibles, especialmente en zonas marginadas como la zona del PNLM.

No obstante, no todos los plaguicidas dañinos son legalmente prohibidos en México, tal es el caso de la atrazina. La atrazina es un herbicida selectivo aplicado al suelo para ser absorbido por las raíces y se puede aplicar antes o después de la aparición de la maleza que afecta al cultivo. El uso en México comenzó en el año 1975 pero un aumento considerable se dio a principios de este siglo. Pertenece al grupo de los herbicidas triazínicos organoclorados y sus principales características son la alta solubilidad en el agua y baja absorción en el suelo. Debido a la alta solubilidad es común encontrarla en cuerpos de agua superficiales cercanos a los lugares de su aplicación.

La exposición directa al herbicida causa severos daños al ser humano tales como problemas reproductivos, hormonales y afecta el funcionamiento de algunos órganos; inclusive para los animales es cancerígeno. En Estados Unidos y Europa está prohibido su uso debido a los posibles daños a la salud y al medio ambiente aunque éstos aún están por definirse en su totalidad. En América Latina su aplicación no tiene restricción alguna.

En la zona de estudio este plaguicida es utilizado para el desarrollo de la agricultura. Estudios previos han comprobado que el deterioro de la calidad se debe principalmente al uso de agroquímicos, entre otros (Caña, 2017). Por lo que

la determinación de sitios de muestreo mediante la PR ayudaría a su probable detección dentro del Sistema Lagunar.

Metodología

Como ya fue mencionado, no existe una metodología o norma específica oficial para el muestreo en cuerpos de agua superficiales, por lo que en este trabajo se sugiere el uso de la PR para la determinación de sitios de muestreo. Dentro de las ventajas más notables para usar esta metodología es que se logra cubrir un área mayor de estudio en menor tiempo y el ahorro de recursos económicos. Sin embargo, el mayor beneficio es la calidad y la importancia de la información recabada.

Se utilizaron imágenes satelitales de la zona de estudio, obtenidas de la plataforma LANDSAT 8, descrita anteriormente. A través del portal del USGS es posible obtener imágenes óptimas para este tipo de estudios de manera gratuita. En el capítulo de *Percepción Remota* se mencionaron algunos rangos aproximados usados en las bandas espectrales de las longitudes de onda, para esta plataforma específica se manejan los siguientes:

LANDSAT 8	Banda	Longitud de Onda [μm]	Resolución [m]	
OLI y TIRS	1	Ultra azul	0.435-0.451	30
	2	Azul	0.452-0.512	30
	3	Verde	0.533-0.590	30
	4	Roja	0.636-0.673	30
	5	Infrarrojo Cercano	0.851-0.879	30
	6	Infrarrojo de Onda Corta 1	1.566-1.651	30
	7	Infrarrojo de Onda Corta 2	2.107-2.294	30
	8	Pancromático	0.503-0.676	15
	9	Cirrus	1.363-1.384	30
	10	Infrarrojo Térmico 1	10.60-11.19	10*30
	11	Infrarrojo Térmico 2	11.50-12.51	10*30

Tabla 3. Rangos de Longitud de Onda para Bandas Espectrales (USGS, 2015)

Nota: Las bandas del TIRS son obtenidas con una resolución a 100 m. pero son remuestreadas a 30 m. para la entrega de datos

Uno de los principales obstáculos para el uso de la PR son las condiciones climatológicas de la zona de estudio, específicamente la nubosidad. Por ello, es importante seleccionar una imagen libre de ésta o de algún otro tipo de obstáculo visual; la imagen debe ser clara para poder obtener resultados óptimos.

Para este estudio se seleccionó una imagen del 6 de febrero del 2016 ya que en meses posteriores no fue posible obtener una libre de nubosidad. El procesamiento de la misma se hizo en el programa especializado IDRISI SELVA 17.0, a través de éste es posible discriminar la información proporcionada por cada banda, hacer combinaciones, procesos de rasterización, etc., todo lo necesario para obtener la mayor cantidad de información según el propósito de cada estudio.

A continuación se muestra una imagen, con fines ilustrativos, obtenida de la Banda 5:

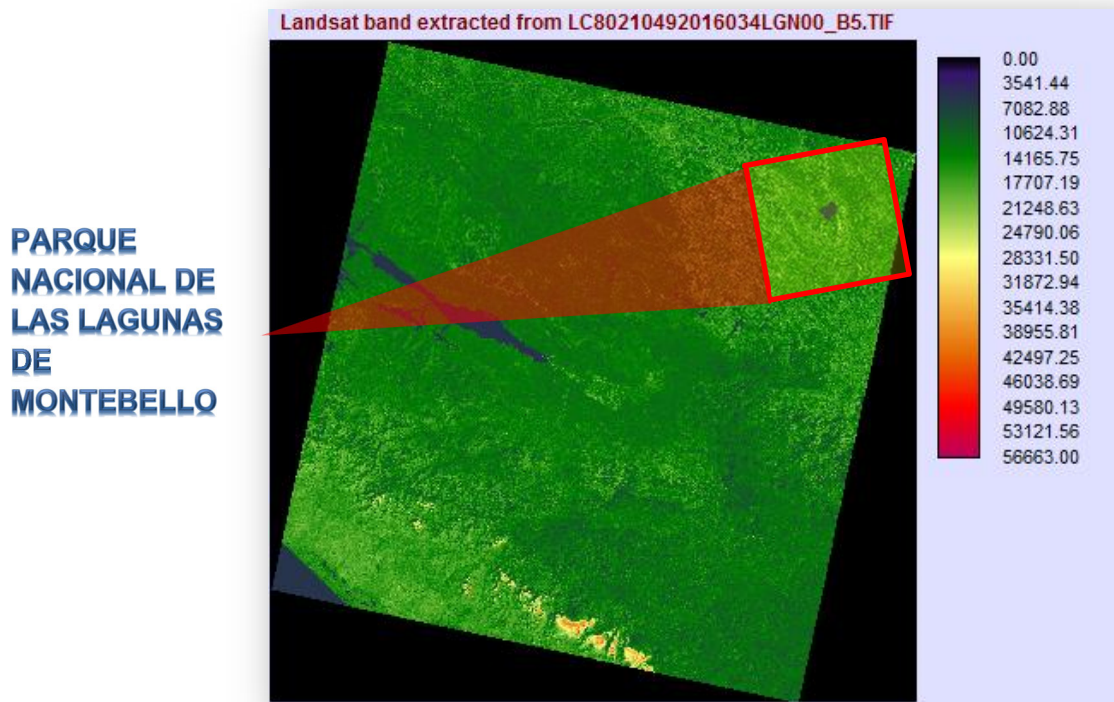


Figura 9 (Elaboración propia con información de LANDSAT)

Las imágenes obtenidas de manera gratuita tienen un límite de acercamiento, lo mostrado en la imagen anterior cubre un área considerablemente mayor al área de estudio. Por ello es necesario recortarla para obtener la vista deseada, en este caso del Sistema Lagunar del PNLM, los rangos utilizados en columnas (C) y en filas (R) para llegar al área del Sistema Lagunar fueron:

C:4612	R:2827
C:5408	R:3327

Una vez especificado el rango del área de estudio, se facilita la obtención de información más precisa. Además el programa nos permite combinar bandas para obtener imágenes de Color Real y Falso Color, (Color Real refiriéndose a bandas dentro del espectro visible y Color Falso a las que están fuera) según lo deseado. Al combinar, el programa logra procesar la información por los canales RGB de los monitores computacionales y da como resultado una imagen visible incluyendo la información del espectro invisible para profundizar en el análisis de la información de las bandas seleccionadas; a continuación se presentan algunas combinaciones posibles:



Figura 10 Composición RGB 321

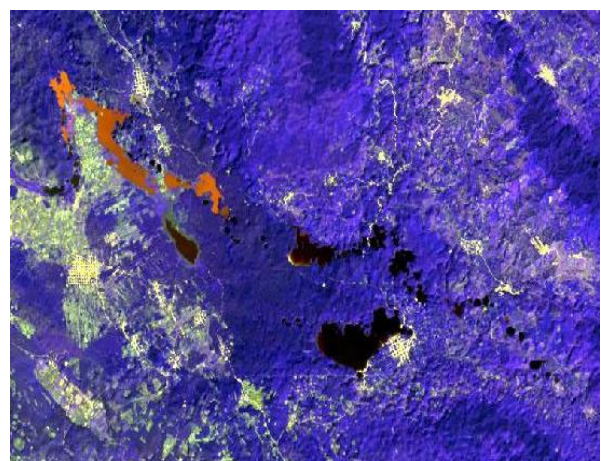


Figura 11 Composición RGB 345

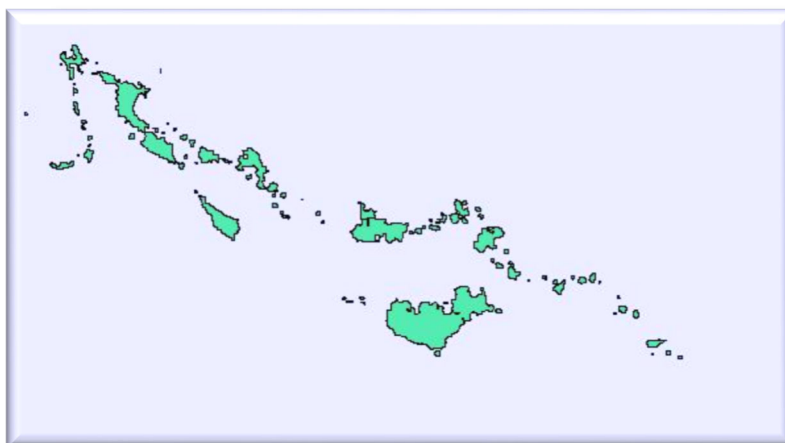


Figura 12 Composición RGB 432



Figura 13 Composición RGB 543

Las imágenes mostradas sólo tienen el propósito de ejemplificar algunos de los resultados posibles; al poder procesar más información en un campo visible se puede comenzar a correlacionar de manera menos abstracta los datos obtenidos por la PR. Como cada banda aporta información distinta es necesario extraer sólo los datos necesarios para la evaluación de la calidad del agua en las lagunas para este caso específico. Por esta razón se puede hacer a un lado la información fuera de los cuerpos de agua superficiales, como la vegetación en este caso. Así, se seleccionó sólo el Sistema Lagunar de Montebello para continuar con el debido análisis.



**SISTEMA LAGUNAR
DE MONTEBELLO,
CHIAPAS.**

Figura 14 (Elaboración propia con información de LANDSAT)

Previo a la selección de los sitios de muestreo se recolectó información sobre estudios similares dentro de la zona de estudio para enriquecer la investigación y utilizarlos como puntos de partida. Debido a la importancia del PNLM, desde que el cambio de coloración y afectaciones visibles a las lagunas fue detectada, se emprendieron acciones para determinar el origen del deterioro en la calidad del agua de la zona (Martín, 2017). Los estudios relacionados a este tema fueron realizados por el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, específicamente el enfoque es sobre la calidad del agua dentro de la cuenca del Río Grande.

El objetivo de los investigadores fue rastrear las fuentes potenciales de contaminación dentro de la cuenca que posiblemente pudieran explicar los cambios de coloración. Las fuentes de contaminación puntuales son muy fáciles de rastrear por lo que el objetivo del estudio está orientado a las fuentes de contaminación difusas, muy probablemente relacionadas con la agricultura. Para comenzar dividieron la cuenca en subcuencas para poder obtener datos puntuales según la geografía de cada una de éstas y relacionarlas con las fuentes potenciales de contaminación; considerando datos hidrológicos y complementando con datos de altitud y redes de drenaje, obtuvieron la siguiente división:

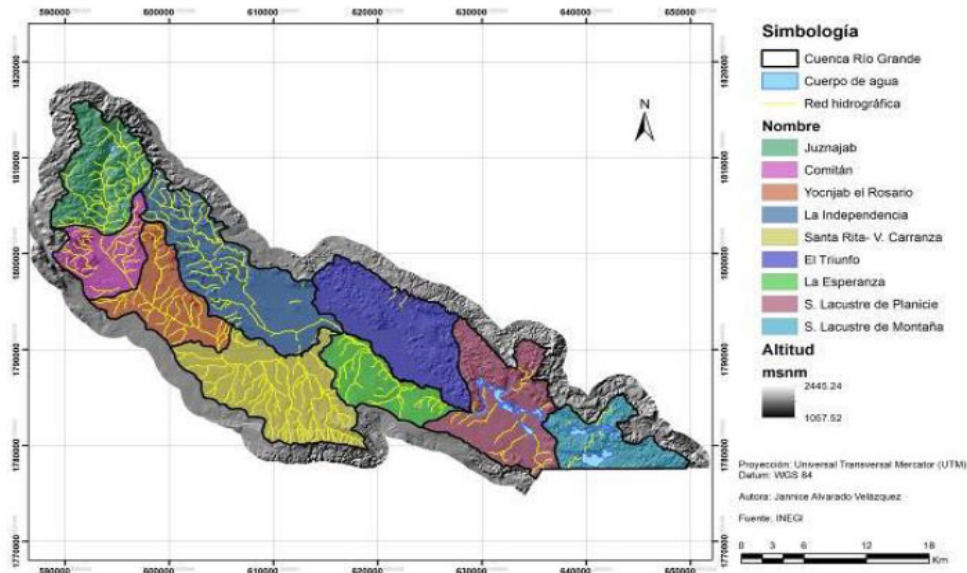


Figura 15. Subcuencas del Río Grande (Hernández & et, 2015)

La zona del PNLM se encuentra dentro de las zonas a las cuales llamaron en el estudio: Sistema Lacustre de Planicie y Sistema Lagunar de Montaña (figura 17), estos presentan pendientes muy pronunciadas lo que resulta vital, además de los datos de precipitación anual, para el rastreo de las fuentes de contaminación difusas. Dentro de los resultados finales obtenidos destacan la agricultura de riego y de temporal como las fuentes potenciales difusas con mayor susceptibilidad de aporte de contaminación a la cuenca, en este caso específico a la zona del PNLM.

El rastreo de las fuentes potenciales colocó al municipio de la Independencia como uno de los principales contribuyentes, el cual está presente dentro del polígono del PNLM. La Independencia es la subcuenca con la mayor actividad agrícola de temporal y la segunda de agrícola de riego, lo cual podría explicar el origen de los elevados niveles de contaminación. Dentro de los procesos de la agricultura en general que contribuyen al deterioro de la cuenca, se encuentra la remoción de vegetación natural y un elevado uso de agroquímicos, de acuerdo a lo planteado por los investigadores.

Como complemento al estudio mencionado, los mismos investigadores realizaron un estudio de calidad del agua de la misma zona. Se establecieron tres temporadas de colecta de muestras: durante la temporada de lluvias, la temporada de transición y la temporada de secas. Cabe destacar que el método para la determinación de los sitios de muestreo solamente se seleccionaron los sitios de acuerdo al criterio de los investigadores, en los lugares que ellos consideraron podrían ser sitios donde la calidad podía ser variable. Siendo este punto fundamental ya que el presente trabajo se enfoca en la determinación de sitios de muestreo con una metodología alterna con un respaldo mayor a la simple selección mediante tanteos o experiencia de los investigadores. La figura 16 muestra el mapa con los sitios de muestreo seleccionados.

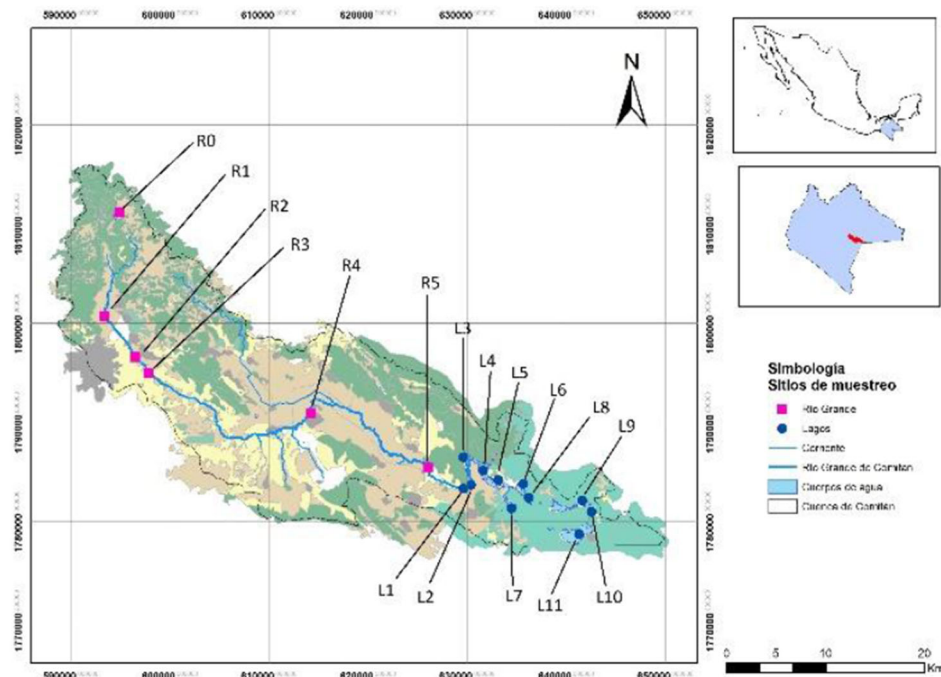


Figura 16. Sitios de Muestreo en Estudios Previos (Alejandra, Erick, Gustavo, & Marisa, 2015)

Dentro del PNLM solamente se ubican los sitios de muestreo con la leyenda “L”, los cuales son diez en total. Los resultados (Hernández & et, 2015) muestran los niveles de SDT y de CF en todos los sitios muestreados, siendo los sitios del Río (“R”) los que presentan mayores niveles y variaciones en estos parámetros de

calidad. Estos contaminantes tienen su origen en las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el estudio previamente mencionado. Sin embargo, cabe destacar que entre la zona de los Lagos de la Planicie, que es el inicio del PNLM, y la zona del Río existe una corriente efímera, es decir, sólo durante la temporada de lluvias están conectadas, “por lo que durante esa temporada se puede observar que la influencia de las descargas de aguas residuales también llega a esa región” (Alejandra, Erick, Gustavo, & Marisa, 2015).

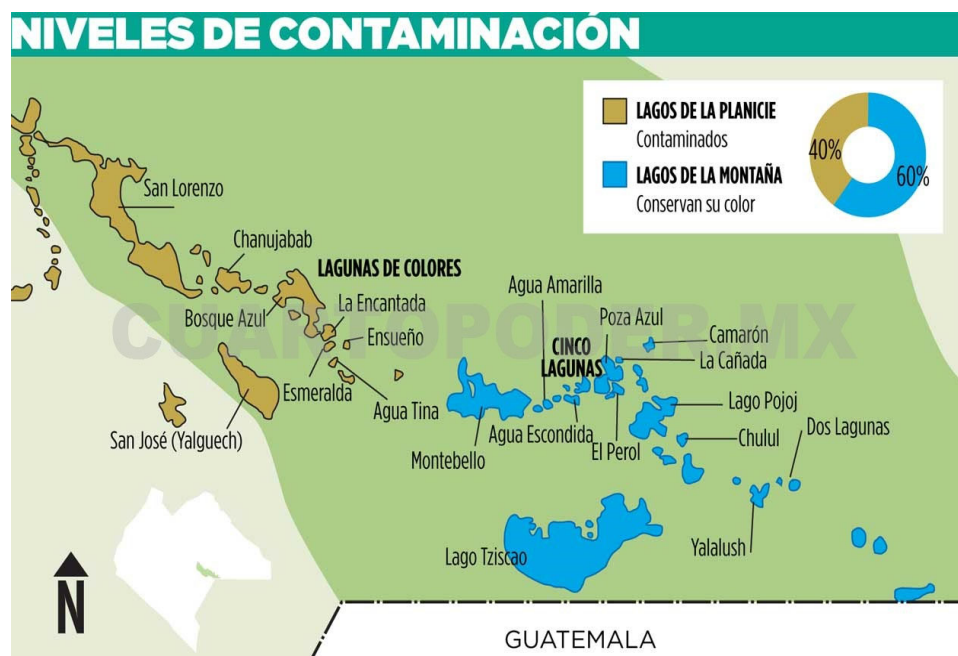


Figura 17. División: Lagos de la Planicie y Lagos de la Montaña en el PNLM. (Cuartopoder, 2015)

De acuerdo a estas investigaciones se puede extraer información de relevancia para la metodología del presente estudio. En primer lugar, es altamente probable que las fuentes potenciales de contaminación encontradas, tanto las difusas como las puntuales, sean las responsables por los cambios de coloración y en general la afectación en la calidad del agua de la zona del PNLM. En consecuencia, las imágenes obtenidas mediante PR para el presente estudio deben mostrar variaciones que se pueden traducir en cambios o afectaciones en los indicadores de calidad del agua dentro del Sistema Lagunar del PNLM ya que las fuentes de contaminación existen y tienen una influencia directa comprobada.

En segundo lugar, de acuerdo al estudio de calidad de agua realizado por los investigadores, los indicadores de la calidad del agua varían de acuerdo al sitio de muestreo, como es de esperarse, pero en algunos sitios la variación presentada fue mínima o nula, como en los Lagos de la Montaña. Dentro de las ventajas principales de la presente metodología está reducir los costos y el trabajo para la determinación de sitios muestreo así como obtener información relevante. Las imágenes de PR tienen el beneficio de mostrar las variaciones de calidad dentro del cuerpo de agua por lo que se evitaría la repetición de información reduciendo la cantidad de muestras y por lo tanto el costo del estudio.

Estas variaciones se pueden notar en la PR a través de la clasificación no supervisada realizada en el programa seleccionado. Esta clasificación logra agrupar los pixeles similares por los cuales está compuesta la imagen procesada. Hay que recordar que los pixeles son información aportada por cada banda o bandas, según el proceso elegido, de los cuerpos de agua; en otras palabras, el programa agrupa la información, representada por pixeles, según su similitud. El programa no indica qué tipo de información está aportando cada grupo simplemente hace una discriminación, pero para estudios de calidad del agua se sabe que estas agrupaciones indican variaciones en los indicadores de calidad del agua. Por lo que, según los resultados de las investigaciones mencionadas se espera la existencia de distintos grupos en los cuerpos de agua.

Considerando esto, se continuó con el procesamiento de las imágenes; una vez obtenido el enmascaramiento del embalse, es decir hacer a un lado la información fuera de los cuerpos de agua, se deben hacer distintas combinaciones de las bandas disponibles para poder obtener la clasificación no supervisada orientada al análisis de la calidad del agua.

Generalmente el agua tiene una alta reflectancia en el espectro visible, cuando presenta un índice de turbidez alto presenta de mejor forma esta característica, por ello es indispensable incluir dentro de estas combinaciones las bandas dentro

del espectro visible. Por otra parte, el agua también absorbe la luz de manera significativa en las bandas del infrarrojo cercano, esto depende de la profundidad del agua en gran medida pero también de la materia inorgánica disuelta dentro del cuerpo de agua ya que cambia la reflectancia hacia el espectro invisible. Por lo tanto, la obtención de las imágenes resultantes parte dentro del rango 1 a 5 de las bandas espectrales.

Una vez hechas las combinaciones, se obtiene la clasificación no supervisada. La clasificación permitirá la determinación de los sitios de muestreo, ésta se presenta en una imagen de los cuerpos de agua con diversos clústeres o clases, representadas por diversos colores. Posteriormente se proceden a seleccionar los sitios de muestreo; para que las muestras sean representativas se debe seleccionar un sitio en cada clase y si se cuenta con los recursos suficientes, en sitios donde se presenta una transición entre clases. Entre más clases se presenten mayor heterogeneidad presenta el cuerpo de agua por lo tanto el estudio de calidad del agua presentará mayores variaciones en los indicadores. En el software seleccionado se obtienen las coordenadas de cada punto seleccionado de manera automática para facilitar su identificación en estudios de campo.

Resultados y Análisis

Considerando la metodología anterior se obtuvieron tres combinaciones de las bandas espectrales contenidas dentro del Landsat 8 que se muestran a continuación:

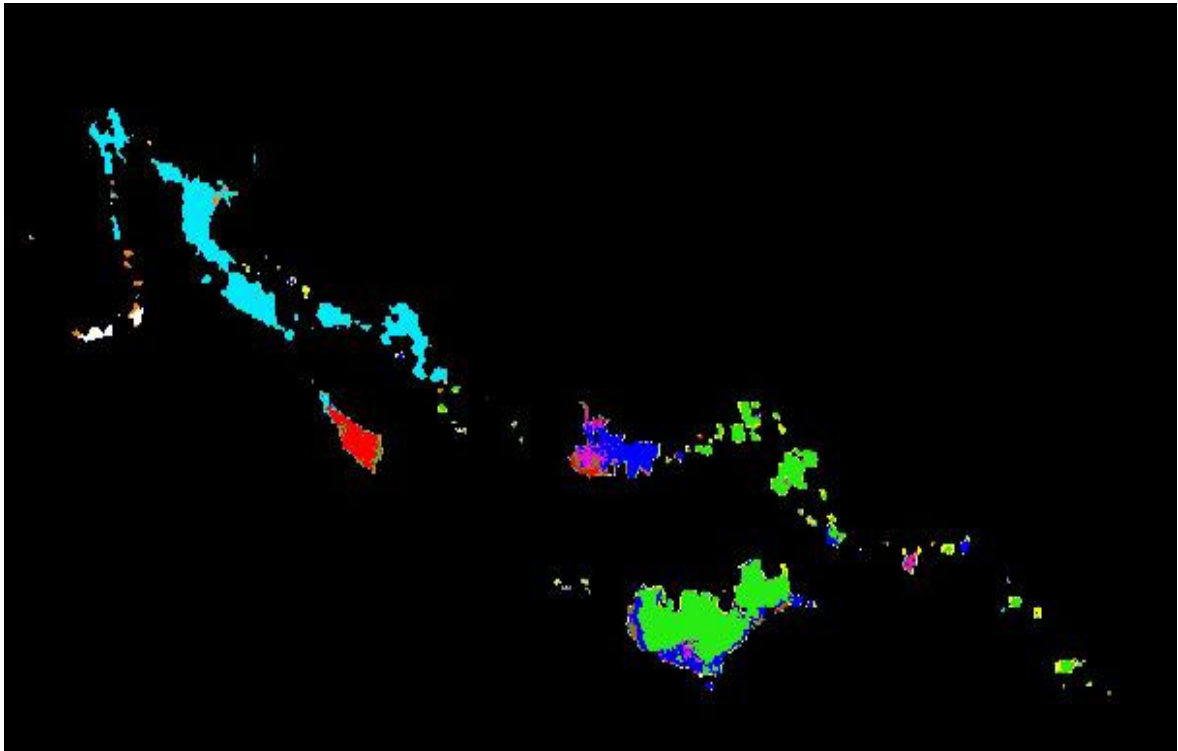


Figura 17. Combinación 12345.

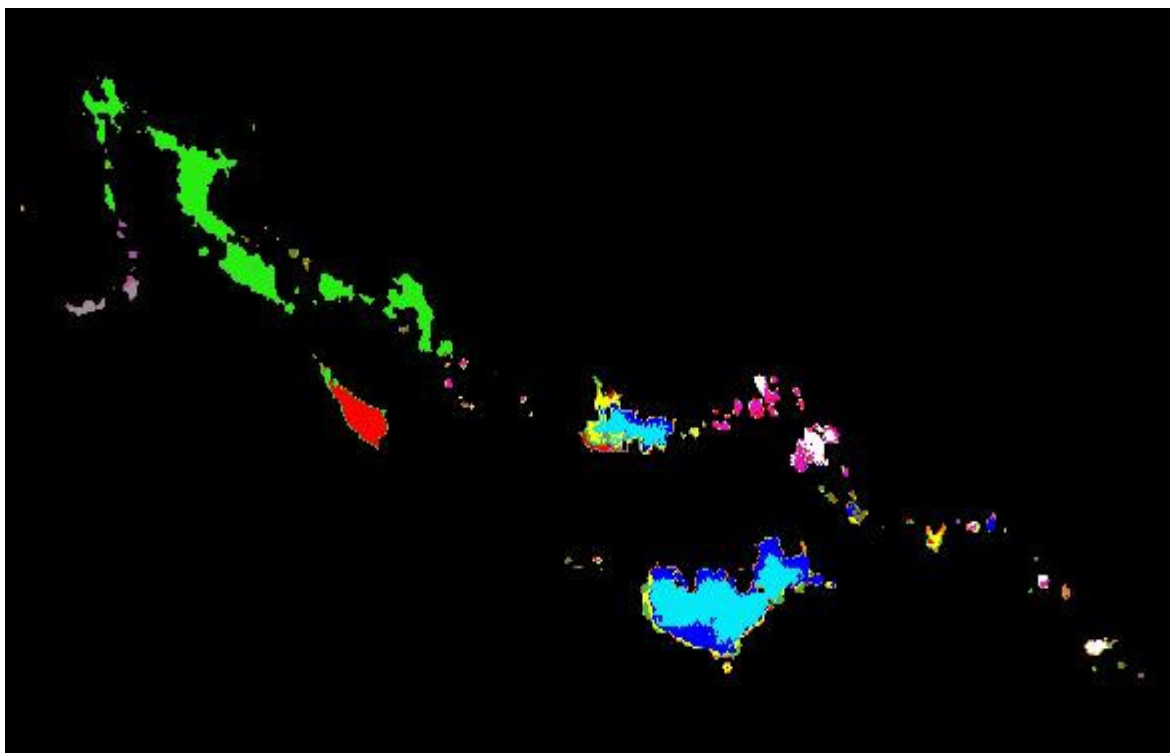


Figura 18. Combinación 2345.

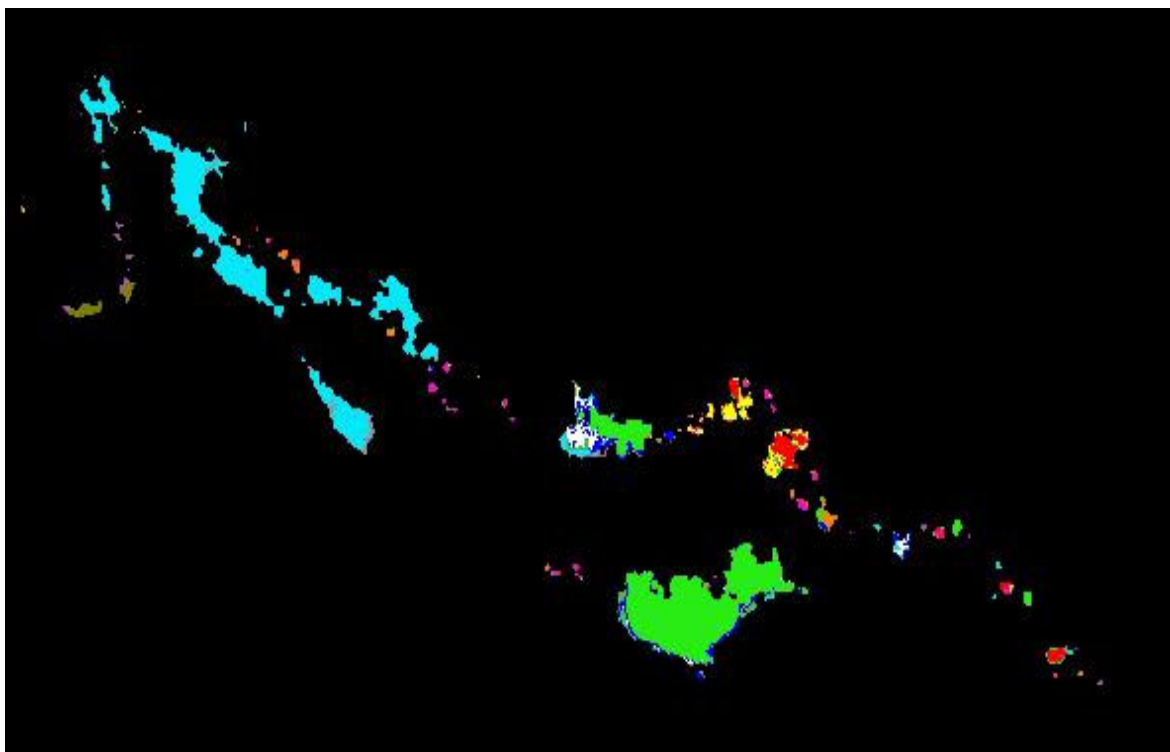


Figura 19. Combinación 1234

Las imágenes obtenidas son el resultado de la clasificación no supervisada a través de la prueba de diferentes combinaciones de las bandas espectrales. Se determinó que la imagen con la mejor clasificación fue la “2345” debido a que muestra una cantidad adecuada de clústeres y logra tener una mejor diferenciación entre los mismos a comparación de los otros resultados. Las figuras X.X muestran acercamientos a los cuerpos de agua para resaltar la clasificación obtenida:

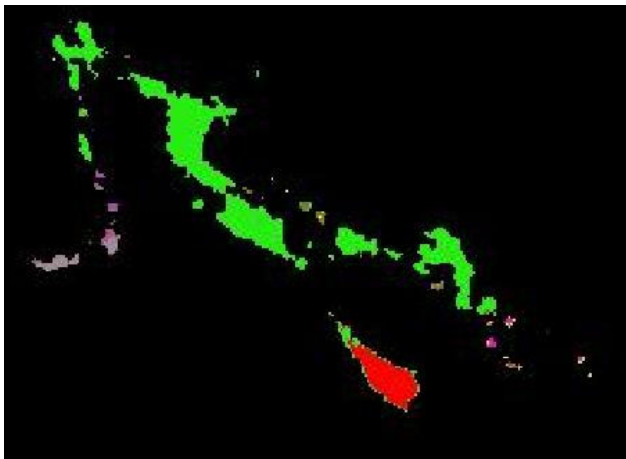


Figura 20. Acercamiento Combinación 2345

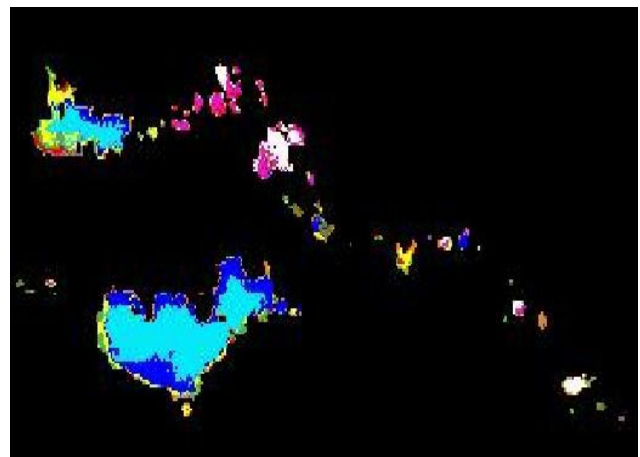


Figura 21. Acercamiento Combinación 2345

Estos clústeres se identifican en la imagen con diferentes colores, también se les puede llamar clases. La diferencia entre clases indica un cambio en la calidad del agua por lo que es necesario determinar sitios de muestreo en cada uno de ellos. De acuerdo a esto, se determinaron 3 sitios de muestreo por clase.

Con la imagen seleccionada se proponen los siguientes sitios de muestreo:

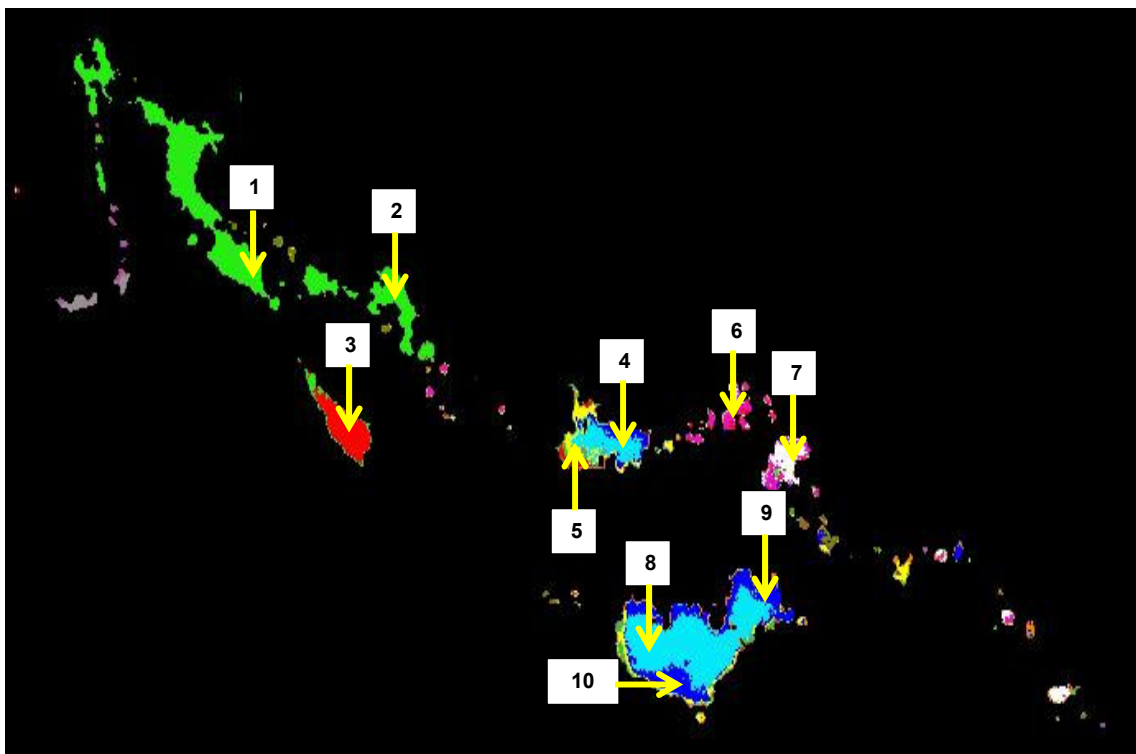


Figura 22. Sitios de Muestreo

Las coordenadas se presentan a continuación:

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
1	632266.223540	1783776.051260
2	634851.910563	1783502.225349
3	634182.673922	1781585.443973
4	639110.689189	1781342.043163
5	638228.513616	1781402.893365
6	641300.918196	1781920.120086
7	642061.414380	1781159.492556
8	639445.307509	1778603.784054
9	641635.536517	1779151.435875
10	640175.383845	1778116.982434

Tabla 4. Sitios de Muestreo Propuestos (Elaboración propia)

Cabe destacar que a través de los diferentes resultados obtenidos, existían diferentes clases según los criterios asignados al programa. Las otras dos imágenes procesadas de las cuales se pudieron haber determinado sitios de muestreo fueron descartadas debido a que no presentaban la claridad o definición en la definición de clases como la imagen seleccionada. A pesar de ser muy parecidas, en la introducción de parámetros y ajustes se hicieron variaciones hasta obtener el resultado adecuado. Este paso es fundamental debido a que según la similitud entre los píxeles, el programa crea las clases, es decir si la información del cuerpo de agua representada por el píxel, en ese punto específico es similar a otro píxel, el programa lo agrupa.

Esta clasificación determina cuántos sitios de muestreo habrá y su localización, en este caso se optó por establecer 10 sitios de muestreo. Las coordenadas son proporcionadas directamente por el programa después de seleccionar un punto, lo cual es muy útil para la toma de muestras en campo. No obstante, no se sabe si existe alguna limitación geográfica o de cualquier otra índole para la toma de la muestra, ya que la metodología es remota. Si existiese alguna de estas

limitaciones basta con determinar otro punto de muestreo que esté dentro de la clase donde existiera la limitante.

Las investigaciones previas de la zona sugerían una alteración en la calidad del agua debido al cambio de coloración presentado en las lagunas. Aunque mediante la PR no es posible determinar la calidad del agua, la existencia de diversas clases, producto de la clasificación no supervisada, sugieren que dentro de las lagunas sí hay una variación en las características del agua. Si la calidad del agua es buena o mala o ha sido alterada respecto a su estado ideal o previo, corresponde a un estudio de calidad del agua determinarlo.

También se puede apreciar que en algunos lagos no existe más que una clase. Esto significa que las características del agua en ese lago son homogéneas por lo que la calidad del agua es la misma o altamente similar en todo el lago. Sin considerar los estudios previos mencionados, no se sabría si la condición de calidad del agua, lo que sí se podría establecer es si existiese alguna fuente de contaminación, ésta afecta a todo el lago o por el contrario si la calidad del agua es óptima se podría tomar como referencia para un estándar en la zona. Sin embargo, dentro de las investigaciones previas, los Lagos de la Planicie son los más afectados por la contaminación, los cuales son los que presentan de una a dos clases por laguna según los resultados. Si se considera esta información se puede deducir que la calidad del agua está alterada en todo el cuerpo.

En otros cuerpos de agua se aprecia una variedad de clases más amplia por lo que existen diferentes calidades en éste, específicamente en los denominados Lagos de la Montaña. Un aspecto para resaltar es cómo las clases se manifiestan, se puede notar que las clases parten del centro del lago y van modificándose mientras se acercan al límite del lago con la tierra. Al tratarse de lagunas, los cuerpos de agua no presentan una corriente constante o un movimiento caudaloso como un río o el mar, favoreciendo un comportamiento hasta cierto punto estático del agua. El cambio de clases podría estar relacionado con la presencia de

turbidez originada por los sedimentos de las orillas, el cual tendría sentido debido al tipo de suelo presente en la zona; o bien sobre una fuente de contaminación que afecte al lago desde la orilla. No obstante, esto sólo podría comprobarse con datos y evidencia obtenida mediante la evaluación de calidad del agua y una valoración más profunda sobre el comportamiento y efecto de las fuentes potenciales de contaminación en el Sistema Lagunar. Sin embargo, todas estas hipótesis parten de los resultados obtenidos mediante la PR, los cuales difícilmente se podrían obtener a simple vista o con trabajo en campo.

Profundizando en el análisis, la PR brinda la ventaja de poder analizar el cuerpo de agua en conjunto por la posición satelital, lo cual en campo humanamente no es viable. Por ello, los sitios de muestreo determinados pueden brindar una muestra de agua representativa. Tomando como ejemplo la atrazina, en trabajos previos de calidad del agua no se ha logrado encontrar rastro de la atrazina pero los investigadores dudan de los resultados obtenidos debido a que se sabe del uso en la zona así como el impacto potencial del mismo. Específicamente en uno de los trabajos el investigador menciona: “El análisis de las muestras de agua obtenidas en las Lagunas de Montebello, Chiapas mediante la metodología desarrollada no mostró señales del herbicida atrazina y sus metabolitos. Lo anterior, no descarta la posibilidad de que en este cuerpo de agua existan zonas con presencia de estos compuestos, por lo que se recomienda ampliar el número de muestras de agua” (Hernández V. C., 2016). Probablemente las muestras de agua no fueron representativas, ya que sí se usa este plaguicida en la cuenca; además que estudios en suelos similares comprueban la presencia de rastros de atrazina en este tipo de suelos (Salazar Ledesma, y otros, 2018).

Conclusiones

De acuerdo a los resultados presentados fue posible determinar los sitios de muestreo mediante el uso de la Percepción Remota en el Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas.

Las condiciones climatológicas en la zona de estudio fueron favorables en la fecha da la imagen seleccionada por lo que la limitación de la nubosidad no estuvo presente. Por otra parte, el uso de la plataforma Landsat cumplió con las expectativas ya que el procesamiento de la imagen fue según lo esperado en el software especializado IDRISI. Cabe destacar que no fue necesario hacer estudios en campo para este trabajo, por lo cual se comprueba el ahorro en recursos económicos al utilizar tecnologías como la PR.

La determinación de sitios de muestreo mediante las técnicas y normas actuales limita la obtención de información relevante, por ello la necesidad de utilizar más herramientas como la PR. El presente trabajo puede mejorar las técnicas y normas actuales, ya que se comprueba que sin la metodología usada hubiera sido prácticamente imposible saber qué tantas variaciones presentan los cuerpos de agua dentro del Sistema Lagunas de Montebello y en consecuencia se podrían obtener muestras no representativas.

La metodología presentada puede mejorarse en varios aspectos. Principalmente se debe establecer un monitoreo constante de la zona para establecer fechas de muestreo debido a las variaciones, ya comprobadas, presentes en las diferentes etapas del año como lo son la época de lluvias, de secas y la de transición. Así, se sugiere que para un estudio más completo el Sistema Lagunar tenga varias campañas de muestreo, lo que implica determinación de sitios de muestreo según se aprecien las variaciones en el monitoreo. La ventaja del monitoreo es la posibilidad de hacerlo remotamente sin la necesidad de trabajos en campo.

Por otra parte, la metodología no es excluyente. En otras palabras, se considera como un complemento a los trabajos ya realizados y a las técnicas actuales. De esta manera, las limitantes de cada enfoque o acercamiento al problema se reducen y por el contrario los resultados se potencializan y se complementan. En conclusión, el presente trabajo cumplió con el objetivo planteado de manera satisfactoria de acuerdo al análisis y a las conclusiones presentadas.

Glosario de Términos y Abreviaciones

Actividad Antropogénica: Actividades realizadas por el ser humano con un efecto en el medio ambiente.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: Cantidad de oxígeno disuelto requerida por los organismos aeróbicos para la descomposición de la materia orgánica presente en el agua.

Trihalometanos: Subproductos del proceso de cloración en el agua.

Radiación: Emisión de energía producida por algunos cuerpos que se propaga a través del espacio.

Clorofila: Pigmento de color verde presente en vegetales, algas y bacterias el cual forma parte del proceso de la fotosíntesis.

Cuenca hidrológica: Superficie natural del terreno definida por la existencia de una división o parteaguas debida a la conformación del relieve, donde se encuentran diversas corrientes de agua.

Agroquímicos: Sustancias orgánicas y químicas destinadas para optimizar la actividad agrícola.

Agua Tratada: Cualquier tipo de agua que pasa por un proceso para servir un uso específico.

Teledetección: Detección a distancia de información producida en la superficie terrestre mediante satélites y onda artificiales.

Microbiología: Ciencia encargada del estudio y análisis de los microorganismos o seres vivos no visibles al ojo humano por su reducido tamaño.

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio).

OD: Oxígeno Disuelto.

PNLM: Parque Nacional de las Lagunas de Montebello.

PR: Percepción Remota.

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization,
Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura).

USGS: United States Geological Service (Servicio Geológico de los Estados Unidos).

Anexos

Tablas de cobertura de tipos de vegetación del PNLM en 1998.

Clase	Área m ²	Hectáreas- áreas-centiáreas	ha	%
Selva alta y media subperennifolia	28630000.03	2,863-00-00.02	2,863	44.56
Selva alta y media subcaducifolia	3774375.00	377-43-75.00	377	5.87
Selva baja	1159374.99	115-93-74.99	115	1.79
Selva inundable	1696249.98	169-62-49.98	169	2.63
Bosque de pino-encino	4093749.99	409-37-49.99	409	6.37
Matorral encino-pino (zonas templadas)	456250.00	45-62-50.00	45	0.70
Matorral (zonas inundables)	1251875.00	125-18-75.00	125	1.95
Vegetación secundaria herbácea-agricultura en descanso	1422500.00	142-25-00.00	142	2.21
Vegetación secundaria arbustiva	6139375.00	613-93-75.00	613	9.54
Agricultura de temporal	4798750.01	479-87-50.01	479	7.46
Potrero (zonas tropicales)	4171249.99	417-12-49.99	417	6.49
Cuerpos de agua	7198125.00	719-81-25.00	719	11.19
Superficie	64791875.00	6,479-18-75.00	6,473	100.75

Fuente: 1998. INE-SEMARNAT a través de PRONATURA.

Tablas de cobertura de tipos de vegetación del PNLM en 2005.

Cobertura de vegetación PNLM 2005				
Clase	Área m ²	Hectáreas- áreas-centiáreas	ha	%
Agricultura	2986686.46	298-66-86.46	299	4.65
Asentamiento humano	513923.29	51-39-23.29	51	0.79
Bosque de pino-encino	21579071.1	2,157-90-71.09	2,158	33.59
Bosque mesófilo de montaña	4584245.67	458-42-45.67	458	7.13
Bosque de pino-encino/ vegetación secundaria/arbórea	8392129.13	839-21-29.13	839	13.06
Bosque mesófilo de montaña/ vegetación secundaria/arbórea	12521708.4	1,252-17-08.37	1,252	19.49
Cuerpos de agua	10304853.5	1,030-48-53.45	1,030	16.03
Pastizal inducido	2797624.52	279-76-24.52	280	4.36
Popal-tular	574685.26	57-46-85.26	58	0.90
Superficie	64254927.2	6,425-49-27.24	6,425	100

Fuente: 2005. CONANP SPOT 2004/2005.

Tabla de datos demográficos del municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

Municipio de La Trinitaria	2005			2010		
Datos demográficos	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total
Población total	29,110	31,307	60,417	35,593	37,176	72,769
Viviendas particulares habitadas	13,440			16,723		
Población hablante de lengua indígena de 5 años y más	2,336	2,452	4,788			6,491
Índices sintéticos e indicadores						
Grado de marginación municipal <i>(Ver indicadores)</i>	Alto			Alto		
Lugar que ocupa en el contexto estatal	82			77		
Lugar que ocupa en el contexto nacional	726			714		
Grado de rezago social municipal <i>(Ver indicadores)</i>	Alto			Medio		
Indicadores de carencia en vivienda <i>(Ver indicadores)</i>						
Porcentaje de población en pobreza extrema				37.36		
Población en pobreza extrema				29,895		
Lugar que ocupa en el contexto nacional				481		
Cobertura						
ZAP rural				Sí		
PDZP				Sí		
Municipio de la Cruzada Nacional contra el Hambre 2013				Sí		
Municipio de la Cruzada Nacional contra el Hambre 2014				Sí		

Tabla de grados de marginación por localidad dentro del PNLM

Localidades por grado de marginación	Número	%	Población	Número	%	Población
Grado de marginación muy alto	37	8.73	2,112	37	8.92	2,193
Grado de marginación alto	159	37.50	40,756	201	48.43	56,989
Grado de marginación medio	23	5.42	16,243	14	3.37	12,549
Grado de marginación bajo	8	1.89	199	8	1.93	165
Grado de marginación muy bajo	1	0.24	13	2	0.48	31
Grado de marginación n.d.	196	46.23	1,094	153	36.87	842
Total de localidades (Iter, 2005 y 2010)	424	100	60,417	415	100	72,769
Número total de claves inactivas y bajas al mes de Octubre 2015	168					
ANP (Áreas Naturales Protegidas)						
Nombre				Referencia		
Lagunas de Montebello				Municipio decretado		

Índices de marginación en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Trinitaria	2005	2010
Población total	60,417	72,769
% Población de 15 años o más analfabeta	19.83	18.20
% Población de 15 años o más sin primaria completa	47.87	42.94
% Ocupantes en viviendas particulares habitadas sin drenaje ni excusado	3.39	1.46
% Ocupantes en viviendas particulares habitadas sin energía eléctrica	2.44	2.05
% Ocupantes en viviendas particulares habitadas sin agua entubada	23.49	18.33
% Viviendas particulares habitadas con algún nivel de hacinamiento	60.06	50.39
% Ocupantes en viviendas particulares habitadas con piso de tierra	25.91	16.34
% Población en localidades con menos de 5 000 habitantes	87.66	87.57
% Población ocupada con ingresos de hasta 2 salarios mínimos	92.49	86.38
Índice de marginación	0.50525	0.56010
Grado de marginación	Alto	Alto
Lugar que ocupa en el contexto nacional	726	714

Fuente: Estimaciones del CONAPO, Índices de marginación 2005; y CONAPO (2011)

Índices de marginación en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Trinitaria	2005	2010
Población total	60,417	72,769
% de población de 15 años o más analfabeta	19.8	18.17
% de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela	13.76	10.88
% de población de 15 años y más con educación básica incompleta	83.81	79.15
% de población sin derecho-habiciencia a servicios de salud	89.27	43.92
% de viviendas particulares habitadas con piso de tierra	25.55	15.85
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de excusado o sanitario	5.02	2.27
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada de la red pública	31.01	24.33
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje	48.2	30.19
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica	3.18	2.12
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de lavadora	84.64	68.44
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador	59.56	45.02
Índice de rezago social	0.71534	0.60006
Grado de rezago social	Alto	Medio
Lugar que ocupa en el contexto nacional	564	642

Fuente: Estimaciones del CONEVAL, con base en INEGI, II Censo de Población y Vivienda 2005 y la ENIGH 2005.
Estimaciones de CONEVAL con base en el Censo de Población y Vivienda 2010

Indicadores de calidad en la vivienda en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Trinitaria	2005		2010	
	Valor	%	Valor	%
Viviendas particulares habitadas ^[1]	13,432		16,723	
Carencia de calidad y espacios de la vivienda				
Viviendas con piso de tierra ^[1]	3,434	25.66	2,650	15.89
Viviendas con muros endeables ^[2]	ND	ND	6,273	36.39
Viviendas con techos endeables ^[2]	ND	ND	194	1.13
Viviendas con algún nivel de hacinamiento ^[3]	8,031	60.06	8,416	50.39
Carencia de acceso a los servicios básicos en las viviendas particulares habitadas				
Viviendas sin drenaje ^[1]	6,478	48.81	5,048	30.52
Viviendas sin luz eléctrica ^[1]	331	2.48	354	2.12
Viviendas sin agua entubada ^[1]	4,168	31.24	4,068	24.36
Viviendas que usan leña y carbón para cocinar ^[2]	ND	ND	14,319	83.06
Viviendas sin sanitario ^[4]	609	4.55	380	2.27

Nota: Para el cálculo se excluyen las viviendas no especificadas.

Fuente: [1] Elaboración propia a partir de INEGI. II Censo de Población y Vivienda 2005 e INEGI. Tabulados del Cuestionario Básico: Viviendas, varios cuadros. Consultado el día 7 de marzo de 2011, disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/TabuladosBasicos/Default.aspx?c=27303&s=est>

[2] Elaboración propia a partir de INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010: Microdatos de la muestra censal.

[3] Elaboración propia a partir de CONAPO (2006). Índices de marginación 2005; y CONAPO (2011). Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010.

[4] Elaboración propia a partir de INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010: Principales Resultados por Localidad.

Datos demográficos de municipio La Independencia

Año	2005			2010		
	Hombres	Mujeres	Total	Hombres	Mujeres	Total
Datos demográficos						
Total de población en la localidad	1,337	1,467	2,804	1,467	1,574	3,041
Viviendas particulares habitadas	666			772		
Grado de marginación de la localidad <i>(Ver indicadores)</i>	Alto			Alto		
Grado de rezago social localidad <i>(Ver indicadores)</i>	2 bajo			Bajo		
Indicadores de carencia en vivienda <i>(Ver indicadores)</i>						

Índices de marginación en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Independencia	2005	2010
Población total	2,804	3,041
% Población de 15 años o más analfabeta	10.66	7.68
% Población de 15 años o más sin primaria completa	32.49	26.02
% Viviendas particulares habitadas sin excusado	4.82	2.20
% Viviendas particulares habitadas sin energía eléctrica	1.96	0.52
% Viviendas particulares habitadas sin agua entubada	2.73	5.46
% Ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas	42.02	1.19
% Viviendas particulares habitadas con piso de tierra	29.05	11.02
% Viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador	67.92	57.38
Índice de marginación	-0.68615	-0.75397
Grado de marginación	Alto	Alto
Lugar que ocupa en el contexto nacional		81,561

Fuente: Estimaciones del CONAPO, Índices de marginación 2005; y CONAPO (2011)

Índices de marginación en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Independencia	2005	2010
Población total	2,804	3,041
% de población de 15 años o más analfabeta	10.66	7.68
% de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela	7.16	6.57
% de población de 15 años y más con educación básica incompleta	66.82	60.43
% de población sin derecho-habienencia a servicios de salud	54.53	85.53
% de viviendas particulares habitadas con piso de tierra	28.83	11.01
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de excusado o sanitario	6.01	2.2
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada de la red pública	2.7	5.44
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje	60.51	4.53
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica	2.25	0.52
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de lavadora	82.88	62.69
% de viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador	68.02	57.38
Índice de rezago social	-0.47134	-0.53046
Grado de rezago social	2 bajo	Bajo
Lugar que ocupa en el contexto nacional	0	0

Fuente: Estimaciones del CONEVAL, con base en INEGI, II Censo de Población y Vivienda 2005 y la ENIGH 2005. Estimaciones de CONEVAL con base en el Censo de Población y Vivienda 2010

Indicadores de calidad en la vivienda en el municipio La Trinitaria del 2005 al 2010.

La Independencia	2005 [1]		2010 [2]	
	Valor	%	Valor	%
Viviendas particulares habitadas	666		772	
Carencia de calidad y espacios de la vivienda				
Viviendas con piso de tierra	192	29.05	85	11.02
Carencia de acceso a los servicios básicos en las viviendas particulares habitadas				
Viviendas sin drenaje	403	61.25	35	4.55
Viviendas sin luz eléctrica	15	2.25	4	0.52
Viviendas sin agua entubada	18	2.73	42	5.46
Viviendas sin sanitario	40	6.01	17	2.20

Nota: Para el cálculo se excluyen las viviendas no especificadas.

Fuente: [1] Elaboración propia a partir de INEGI. II Censo de Población y Vivienda 2005.

[2] Elaboración propia a partir de INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010: Principales Resultados por Localidad.

Bibliografía

- Agencia de Control de Contaminación de Minnessota. (2008). *Turbiedad: Descripción, Impacto en Calidad del Agua*. 2.
- Alejandra, H., Erick, H., Gustavo, P., & Marisa, M. (2015). El Proceso de Degradación en la Cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. *Congreso Iberoamericano sobre sedimentos y ecología*, 5.
- Anna Horvath, R. V.-L. (2001). *Mamíferos del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas, México*. México: Research Gate.
- Arias, L. (2014). *Estimación de la Turbiedad en Embalses del Estado de Aguascalientes mediante Percepción Remota*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería UNAM .
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos LANDSAT 8*. Bogotá : Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (1 de Diciembre de 1992). *Ley de Aguas Nacionales*. México.
- Caña, P. V. (12 de Abril de 2017). Lagunas de Montebello, en peligro por residuos tóxicos. *El Universal*, pág. 1.
- Chomalí, V. (03 de marzo de 2017). *Un Mundo Intelectual*. Recuperado el 21 de Octubre de 2017, de <https://unmundointelectualblog.wordpress.com/2017/03/08/espectro-electromagnetico/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2008). *Programa de Monitoreo*. Chiapas.
- Comisión Nacional de Áreas Protegidas INEGI. (s.f.). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/mapa568.pdf
- CONAGUA. (2005). *Percepción Remota: Fundamentos de la Teledetección Espacial*. México: Jefatura de Control Cartográfico.

- CONAGUA. (2014). *Estadísticas del Agua en México*. México: Comisión Nacional del Agua .
- Cordero, F. (s.f.). Investigan Contaminación en Lagos de Montebello. *Cuarto Poder*, pág. 1.
- Department of Standards Malaysia. (2006). *Water Quality Sampling ISO 5667*. Malaysia: Department of Standards Malaysia.
- Diario Oficial de la Federación . (Febrero de 2008). *SEGOB Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989
- Hernández, A., & et, a. (2015). Indicadores del Proceso de Degradación en la Cuenca del Río Grande de Comítan, Chiapas. *Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología*, 5.
- Hernández, C. (2017). *Estimación de la Presencia de Algas en Cuerpos de Agua mediante Índices de Vegetación*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería UNAM.
- Hernández, E., & Cervantes, E. (17 de Enero de 2016). Pierden Tonalidad lagos en Montebello. *Reforma*, pág. 1.
- Hernández, V. C. (2016). *Determinación simultánea de hidroxiatrazina, desetilatrazina y atrazina por medio de CLAR-UV-DAD en muestras de agua de las Lagunas de Montebello*. Ciudad de México: UNAM.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2005). *Prontuario de Información Geográfica Municipal*. La Independencia, Chiapas. : INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2005). *Prontuario de Información Geográfica Municipal* . La Trinitaria, Chiapas : INEGI.
- Martín, F. (30 de Marzo de 2017). Lagos de Montebello, contaminados en un 40%. *Cuarto Poder*, pág. 1.
- Milenio. (14 de Septiembre de 2014). En México se usan plaguicidas prohibidos a escala mundial. *Milenio*, pág. 1.

- Mora, L., & etal. (2016). Unidades Geomorfológicas de la Cuenca del Río Grande de Comítan, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 18.
- Muñoz, J. M. (2005). *Percepción Remota "Fundamentos de la Teledetección Espacial"*. México: CONAGUA.
- Ortega, e. a. (1992). *Carta Geológica de la República Mexicana 1: 2000000, Mapa con Texto Explicativo*. México: Instituto de Geología, UNAM.
- Philpot. (2012). *Remote Sensing Fundamentals*. Cornell: Cornell University.
- Plan de Gestión de la Cuenca del Río Grande-Lagunas de Montebello*. (2009). Chiapas: CONAGUA.
- Rodríguez, N. (2018). *Calidad de Agua y Agroquímicos: Agua y Herbicidas*. Recuperado el 13 de junio de 2018, de Agroconsultas: [https://www.agroconsultasonline.com.ar/documento.html/Calidad%20de%20agua%20y%20agroqu%C3%83%C2%ADmicos%3A%20Agua%20y%20herbicidas%20\(2000\).pdf?op=d&documento_id=16](https://www.agroconsultasonline.com.ar/documento.html/Calidad%20de%20agua%20y%20agroqu%C3%83%C2%ADmicos%3A%20Agua%20y%20herbicidas%20(2000).pdf?op=d&documento_id=16)
- Salazar Ledesma, M., Mora, L., Chávez, B., Gómez, D., Zamora, O., & Prado, B. (2018). *Susceptibilidad del Suelo al impacto humano: caso del herbicida atrazina*. Ciudad de México: Sociedad Geológica Mexicana.
- Secretaría de Gobernación. (2016). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 8 de Enero de 2017, de Diario Oficial de la Federación: dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5125405
- Secretaría de Medio Ambiente. (5 de Noviembre de 2010). NOM-059-SEMARNAT-2010. *Protección Ambiental Especies Nativas de México*. Di, México: SEMARNAT.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2007). *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional de Lagunas de Montebello*. Distrito Federal: Editorial EDM.
- Secretaría de Salud. (22 de Noviembre de 2000). NOM-127-SSA1-1994. *Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano*. México .
- Sepúlveda, R. T. (2011). *Diseño de Modelos de Calidad del Agua media el uso de la Percepción Remota*. Ciudad de México, Mexico: Facultad de Ingeniería UNAM.

Stephenson, G., & Solomon, J. (1993). *Pesticides and the Environment*. Ontario: University of Guelph.

The Ramsar Convention Secretariat. (2014). *Ramsar*. Recuperado el 3 de Enero de 2017, de www.ramsar.org: <http://www.ramsar.org/fr/zone-humide/mexique?site=32422#map-leaflet>

U.S. Department of Commerce. (s.f.). *Earth System Research Laboratory*. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo>

U.S. Department of the Interior. (s.f.). *USGS Science for a Changing World*. Recuperado el 14 de Agosto de 2017, de <https://landsat.usgs.gov/landsat-missions-timeline>

UNESCO. (2012). *UNESCO*. Recuperado el 9 de Enero de 2017, de Ecological Sciences for Sustainable Development: www.unesco.org/new/natural=sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/latin-america-and-the-caribbean/mexico/lagunas-de-montebello/

Universidad de Tel Aviv. (2015). *Manual de Muestreo*. Tel Aviv: CONAGUA .

USGS. (12 de Diciembre de 2016). *The USGS Water Science School*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2016, de <https://water.usgs.gov/edu/turbidity.html>

Vázquez, M., & Méndez, E. (1994). *Aspectos Generales de la Región: Lagos de Montebello*. Chiapas: ECOSUR.

Velázquez, J., & et, a. (2015). Evaluación de las Fuentes Potenciales de Contaminación en la Cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. *Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología*, 7.

Zimba, P. (2003). Técnicas de Percepción Remota para Evaluar la Calidad del Agua. *Research Gate* , 11.