



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Planeación Urbana y Regional
Licenciatura en Ciencias Ambientales



Determinación del estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya. Capulhuac, Estado de México

Tesis

**Para obtener el grado de Licenciada en Ciencias
Ambientales.**

Presenta:

C. Diana Karina Maldonado Patiño

Director:

Dr. en C. del A. Jorge Paredes Tavares

AGRADECIMIENTOS

A la *Universidad Autónoma del Estado de México*, quien me ha acompañado en mi formación académica desde la escuela preparatoria hasta licenciatura.

Al *Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México* (ICAMEX) por abrirme las puertas y brindarme las herramientas necesarias. En especial a *T.I. Dalia Benítez López* por el apoyo y calidez.

A Dr. en C. del A. *Jorge Paredes Tavares* por el tiempo, disposición y por ser un pilar importante en mi formación académica.

A *mis amigos* quienes siempre tuvieron la disposición de apoyarme y brindarme sus mejores consejos. Por motivarme y ser mi apoyo sin importar la situación.

DEDICATORIAS

A *Dios* quien me ha dado la fortaleza para cumplir una meta más en mi vida.

A ti *mamá*, la señora de las cuatro décadas. Gracias por ser una mujer ejemplar, llena de fortaleza y amor. Gracias por el apoyo que me has brindado, esto es por ti y para ustedes... mi familia. Las amo.

TITULO: Determinación del estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya, Capulhuac, Estado de México.

PALABRAS CLAVES: ecosistema acuáticos, estado trófico, eutrofización.

RESUMEN: En este trabajo se desarrolló el tema de eutrofización, la cual es una de las problemáticas más importantes que aquejan a los cuerpos de agua. La Laguna de San Miguel Almaya ha abatido su calidad en los últimos años ya que existen diversas actividades que impactan negativamente en el recurso. El objetivo principal de la investigación es conocer la condición actual de la laguna para poder clasificar su estado trófico, mediante la implementación de metodologías que permitan el análisis de variables en campo y laboratorio. Para ello se realizaron dos muestreos, uno durante la época de estiaje y otra en la época de lluvias del 2018. En los resultados se pudo demostrar que la laguna se encuentra en un estado de eutrofización, ya que se encuentra entre el Eutrófico e Hipereutrófico. Finalmente la investigación es la base para el comienzo de un plan de manejo de microcuenca que permita minimizar los posibles impactos que puedan generar procesos de eutrofización.

KEY WORDS: aquatic ecosystems, trophic state, eutrophication.

ABSTRACT: The objective of this work was the development of the eutrophication as a central topic, which is one of the most important problems that afflicts water bodies. The Laguna de San Miguel Almaya has lowered its quality in recent years as there are several activities that negatively impact the resource. The main objective of this research is to know the current condition of the lagoon in order to classify its trophic state, by implementing methodologies that allow the analysis of variables in the field and laboratory. For this, two samplings were carried out, one during the dry season and the other during the rainy season of 2018. The results showed that the lagoon is in a state of eutrophication, since it is between Eutrophic and Hyper-Eutrophic. Finally, the research is the basis for the beginning of a microbasin management plan that minimizes the possible impacts that eutrophication processes can generate.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	13
1.1 Justificación.....	16
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo general.....	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
CAPÍTULO I.....	18
2. Marco Conceptual.....	18
2.1 Los ecosistemas acuáticos.....	18
2.1.1 Ecosistemas lénticos.....	19
2.1.2 Ecosistemas lóticos.....	20
2.1.3 Importancia y valor de los ecosistemas acuáticos	21
2.1.4 Principales problemáticas asociadas a los ecosistemas acuáticos.....	25
2.2 El estado trófico	28
2.3 Productividad del agua y factores de eutrofización	33
2.3.1 Factores Abióticos	34
2.3.2 Química de los macronutrientes Nitrógeno y Fósforo asociados a la eutrofización:.....	37
2.3.3 Factores Bióticos.....	41
CAPÍTULO II.....	45
3. Caracterización del área de estudio	45
3.1 La importancia de los sistemas montañosos	45
3.1.1 Los sistemas montañosos y los recursos hídricos en México	47
3.2 Ubicación del área de estudio.....	48
3.3 Descripción general de la cuenca.....	49
3.3.1 Parteaguas.....	49
3.3.2 Características de la microcuenca.....	50
3.3.3. Cálculos para la Cuenca.....	52
3.3.4 Pendiente del Cauce Principal.....	53
3.3.5 Densidad de Corrientes (Drenaje).....	54
3.4 Uso de suelo	55

3.5	Clima.....	60
3.6	Componente demográfico	62
3.7	Componente socioeconómico	63
3.7.1	Población económicamente activa	63
3.7.2	Población económicamente inactiva	65
3.7.3	Población ocupada	66
3.7.4	Población desocupada.....	67
3.8	Vivienda y Servicios	68
CAPÍTULO III.....		70
4.	Metodología.....	70
4.1	Mediciones in situ	73
4.2	Mediciones en laboratorio.....	76
4.2.1	Medición de Fósforo mediante el Método de Cloruro Estañoso.....	77
4.2.2	Medición de Nitrógeno total Kjeldahl	80
4.2.3	Medición de Clorofila mediante el método Tricomático	83
CAPÍTULO IV.....		88
5.	Resultados y discusión	88
5.1	Resultados in situ	88
5.2	Resultado de laboratorio	90
5.2.1	Resultados de las mediciones de fosforo total	90
5.2.2	Resultados de las mediciones de nitrógeno total	91
5.2.3	Resultados de la medición de clorofila.....	92
5.3	Discusión de resultados.....	95
CAPÍTULO V.....		107
6.	Conclusiones y recomendaciones	107
6.1	Conclusiones.....	107
6.2	Recomendaciones	110
Bibliografía.....		112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de ecosistemas acuáticos.....	19
Tabla 2. Valor Económico Total.....	24
Tabla 3. Valores de los manglares de acuerdo con la Conabio.....	20
Tabla 4. Valores límites de la OCDE para la clasificación trófica.....	29
Tabla 5. Características de los cuerpos de agua de acuerdo a su estado trófico.....	33
Tabla 6. Aportes de Fósforo y Nitrógeno total de animales utilizados en la explotación ganadera y por persona.....	43
Tabla 7. Valores interpretativos de la forma de Horton.....	50
Tabla 8. Mediciones básicas para la microcuenca El Muerto.....	53
Tabla 9. Tipo de uso de suelo en la microcuenca El Muerto.....	56
Tabla 10. Distribución de la población de la microcuenca El Muerto.....	62
Tabla 11. Viviendas con servicio de agua potable en la microcuenca El Muerto.....	68
Tabla 12. Viviendas con servicio de drenaje en la microcuenca El Muerto.....	68
Tabla 13. Parámetros medidos en las muestras de agua.....	72
Tabla 14. Hoja con las variables a medir in situ.....	76
Tabla 15. Longitud de onda para los diferentes tipos de clorofila.....	85
Tabla 16. Hoja con los valores esperados a obtener de clorofila a, b, c y a 750nm en las muestras.....	86
Tabla 17. Valores obtenidos in situ.....	89

Tabla 18. Fósforo total de la laguna de San Miguel Almaya.....	90
Tabla 19. Mililitros de H ₂ SO ₄ gastados en las muestras.....	92
Tabla 20. Nitrógeno total Kjeldahl de la Laguna de San Miguel Almaya.....	92
Tabla 21. Valores de absorbancia para clorofila a, b y c de la Laguna de San Miguel Almaya.....	93
Tabla 23. Clorofila a, b, y total de la Laguna de San Miguel Almaya en la época de estiaje.....	95
Tabla 22. Concentración de clorofila a, b, y c de la Laguna de San Miguel Almaya.....	91
Tabla 23. Concentración de datos para la determinación del estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya.....	92
Tabla 24. Clasificación del estado trófico por punto de muestreo.....	101
Tabla 25. Componentes principales.....	102
Tabla 26. Análisis de componentes principales.....	103
Tabla 27. Valores para la ecuación de componentes principales.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las funciones, valores y atributos de los ecosistemas acuáticos.....	23
Figura 2. Tipos de pérdida de hábitat.....	25
Figura 3. Sedimentación en cuerpos de agua.....	26
Figura 4. Contaminantes de los ecosistemas acuáticos.....	27
Figura 5. Consecuencia de la carga de nutrientes en cuerpos de agua.....	28
Figura 6. Ejemplo de un cuerpo de agua Ultraolitrófico.....	30
Figura 7. Ejemplo de un cuerpo de agua Oligotrófico.....	30
Figura 8. Ejemplo de un cuerpo de agua Mesotrófico.....	31
Figura 9. Ejemplo de un cuerpo de agua Eutrófico.....	31
Figura 10. Ejemplo de un cuerpo de agua Hipereutrófico.....	32
Figura 11. Relación entre altitud y eutrofización.....	36
Figura 12. Ciclo del Nitrógeno en ecosistemas acuáticos.....	39
Figura 13. Ciclo del Fósforo en ecosistemas acuáticos.....	40
Figura 14. Distribución espacial de distintos tipos de plantas hidrófitas en función a la profundidad del ecosistema.....	42
Figura 15. El agua de las montañas y su curso.....	46
Figura 16. Provincias fisiográficas de México.....	48

Figura 17. Zona Forestal de la ladera Este de la Laguna de San Miguel Almaya.....	56
Figura 18. Agricultura de maíz en la ladera Este de la Laguna de San Miguel Almaya..	57
Figura 19. Pastizales en la ladera Noroeste de la laguna de San Miguel Almaya.....	58
Figura 20. Comunidad de San Miguel Almaya colindante con la Laguna.....	58
Figura 21. Laguna de San Miguel Almaya.....	59
Figura 22. Ojo de agua de la Laguna de San Miguel Almaya.....	59
Figura 23. Población Económicamente Activa de la microcuenca El Muerto.....	64
Figura 24. Letrero de actividades a realizar en la Laguna de San Miguel Almaya.....	65
Figura 25. Población No Económicamente Activa de la microcuenca el Muerto.....	65
Figura 26. Población Ocupada de la microcuenca el Muerto.....	66
Figura 27. Población Desocupada de la microcuenca el Muerto.....	67
Figura 28. Metodología para la determinación del estado trófico.....	71
Figura 29. Toma de muestra a profundidad con la Botella Van Dorn.....	73
Figura 30. Ejemplo de Disco Secchi.....	74
Figura 31. Introducción del Disco Secchi en la columna de agua.....	75
Figura 32. Disco Secchi en la columna de agua.....	75
Figura 33. Solución Merlich en muestras de agua.....	78
Figura 34. Desarrollo de color azul en las muestras.....	78
Figura 35. Espectrofotómetro a 660 nm.....	79
Figura 36. Digestión de las muestras.....	80

Figura 37. Destilación de muestras.....	81
Figura 38. Titulación de las muestras.....	82
Figura 39. Filtración y obtención del material particulado de la muestra.....	84
Figura 40. Papel filtro con material particulado.....	84
Figura 41. Extracción de pigmento de la muestra.....	85
Figura 42. Variación de Fósforo en la Laguna de San Miguel Almaya.....	91
Figura 43. Concentración media anual de Fósforo en la laguna de San Miguel Almaya.....	96
Figura 44. Concentración media anual de Clorofila-a en la laguna de San Miguel Almaya.....	97
Figura 45. Profundidad media anual del Disco Secchi en la laguna de San Miguel Almaya.....	98
Figura 46. Turbiedad en el agua de la Laguna de San Miguel Almaya.....	99
Figura 47. Grafica de dispersión.....	105

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1. Localización Geográfica.....	49
Esquema 2. Forma de la microcuenca El Muerto.....	51
Esquema 3. Red de drenaje de la microcuenca El Muerto.....	52
Esquema 4. Uso de suelos y vegetación de la microcuenca El Muerto.....	55
Esquema 5. Climatología de la microcuenca El Muerto.....	61
Esquema 6. Distribución de la población de la microcuenca El Muerto.....	63
Esquema 7. Distribución de los puntos de muestreo.....	100

INTRODUCCIÓN

La eutrofización de ecosistemas acuáticos es una de las problemáticas más serias que aquejan a los humedales en general. A pesar de que el fenómeno se ha vuelto cada vez más recurrente, los estudios sobre el tema son limitados. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), ha realizado el estudio más completo sobre la eutrofización en la década de 1970, en el que se estableció una secuencia de categorías tróficas cimentadas en las concentraciones de Fósforo total, Nitrógeno total, Clorofila-a y transparencia medida con el Disco Secchi (Vázquez *et al.*, 2012)

Los estudios a nivel internacional de modelos de evaluación de estado trófico tienen mayor desarrollo principalmente en países de latitudes templadas como Alemania, Canadá, Estados Unidos de América y España (López y Soto, 1993).

Los trabajos en México son escasos debido a la dificultad de implementar metodologías a nuestra latitud, a pesar de los esfuerzos se ha observado que no son totalmente adaptables. Pese a las consecuencias de esta problemática en la pérdida potencial de la calidad del agua, en el abatimiento de su color, olor y sabor, así como en la disminución de la biodiversidad, la reducción de la penetración de la luz y la mortandad de peces, muchos estudios están enfocados a la calidad del agua, sin embargo el estado trófico debería estudiarse más a fondo ya que es un índice del estado de salud de los cuerpos de agua e influyen de manera directa en las comunidades aledañas.

A nivel estatal la investigación más importante encontrada es la del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), en 1992 en la presa de Valle de Bravo, perteneciente al sistema Cutzamala, la cual abastece de agua a la ciudad de México. El IMTA concluye que la eutrofización abate la calidad de agua limitando su uso, por lo cual es necesario aplicar estudios para instrumentar medidas de conservación, manejo y en su caso, de restauración (Olvera, V. 1992).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cuerpos de agua continentales cerrados (lénticos), son ecosistemas importantes para el ambiente, ya que funcionan como depósitos de aguas dulces, tienen mayor desarrollo de especies de flora y fauna en comparación con los ríos debido a la tranquilidad de sus aguas y además brindan bienes y servicios a las poblaciones aledañas a ellos.

En las últimas décadas, la intensa actividad humana producto del aumento del número y tamaño de centros urbanos, el desarrollo industrial, diversas prácticas agrícolas y pecuarias han generado y acelerado los procesos de eutrofización, convirtiéndose en la problemática más seria y extensa de los sistemas acuáticos continentales.

En términos generales la concentración de nutrientes, como Nitrógeno y Fósforo se manifiestan en una intensa proliferación de microalgas y plantas superiores, provoca una competencia biológica, la disminución de Oxígeno disuelto y en casos extremos la colmatación del cuerpo de agua.

La Laguna de San Miguel Almaya se encuentra en el municipio de Capulhuac, Estado de México. Es un cuerpo de agua de alta montaña que cumple con un papel de gran importancia para la comunidad, ya que funciona como medio de abastecimiento para el sistema de agua potable, provee especies comestibles y de materias primas como el tule, además de proporcionar un hábitat a una variedad de especies residentes y migratorias.

Desde el punto de vista económico, la laguna tiene usos recreativos, funciona como un atractivo turístico, para la práctica de esquí acuático y competencias deportivas, beneficiando directamente a la población. Sin embargo, de acuerdo con testimonios de los pobladores de la comunidad, la calidad de agua en los últimos años ha disminuido, las condiciones físicas que presenta la laguna son turbidez, disminución de especies ícticas como acociles, rana toro, culebras de agua, ajolote y charales así como presencia de lirio en algunas zonas de la laguna.

En el presente estudio se determinó el estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya mediante el análisis en laboratorio de muestras tomadas en 9 puntos a dos diferentes profundidades durante la época de estiaje y la época de lluvias del año 2018, esto de acuerdo con lo establecido por los valores límites de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos para la clasificación trófica de cuerpos de agua.

JUSTIFICACIÓN

Con base en lo anterior se considera prioritario incrementar el número estudios relacionados con el estado trófico de los cuerpos de agua en el Estado de México. Debido a esto, la presente investigación tomó como zona de estudio la Laguna de San Miguel Almaya. Dicho cuerpo de agua adquiere gran importancia a nivel local, ya que está siendo usado de manera intensiva como fuente abastecimiento para el sistema de agua potable, para la pesca de especies comestibles, materias primas como el tule, tiene usos recreativos, funciona como un atractivo turístico y para prácticas deportivas.

Este documento se centra en el análisis de la concentración de nutrientes en el agua de la Laguna de San Miguel Almaya en el Estado de México. Se propuso estudiar el comportamiento de diversas variables relacionadas con la eutrofización de cuerpos de agua durante dos periodos anuales el de estiaje y el de lluvias. El estudio se centra en la microcuenca El Muerto de los municipios de Cuajimalpa, Ocoyoacac, Santiago Tianguistenco y Capulhuác correspondiendo a este último el cuerpo de agua.

La estructura de esta investigación está conformada por cuatro apartados, en el capítulo I, se da a conocer la importancia de los cuerpos de agua continentales, así como cuáles son las variables involucradas en el proceso de eutrofización. En el capítulo II, se muestran las características particulares de la microcuenca, así como de la zona de estudio, considerando aspectos físicos y sociales.

En el capítulo III, se desarrollan las metodologías a aplicar para el análisis de variables, respondiendo a preguntas cómo, cuándo, cuánto. Posteriormente en el apartado IV, se da a conocer los resultados derivados del análisis de agua así como una discusión de los mismos y finalmente en el capítulo V, se dan a conocer las conclusiones del trabajo de investigación, así como algunas breves recomendaciones para mejorar la situación actual del cuerpo de agua.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Conocer la condición actual de la laguna para poder clasificar su estado trófico, mediante la implementación de metodologías que permitan el análisis de variables en campo y laboratorio.

1.2.2 Objetivos específicos

El objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- Destacar la importancia de los cuerpos de agua de alta montaña.
- Caracterizar las condiciones sociales y físicas de la zona de estudio.
- Identificar los factores que potencian la eutrofización del cuerpo de agua.
- Determinar la influencia de la morfometría de la microcuenca en la eutrofización la Laguna de San Miguel Almaya.
- Analizar los datos y generar conclusiones.

CAPÍTULO I

2. MARCO CONCEPTUAL

En este primer capítulo se presentan los conceptos básicos del estado trófico. Para lograr dicho objetivo el capítulo se divide en cuatro apartados, en el primer segmento se revisará a grandes rasgos los humedales principalmente continentales y de montaña, se retomará la importancia ambiental, social y económica de su conservación, así como los principales problemas que amenazan su estabilidad.

La segunda parte presenta una breve reseña de los primeros estudios sobre eutrofización así como el concepto mayormente adoptado sobre el estado trófico y las características de cada estado. La tercera sección expone los factores naturales y antrópicos involucrados en la eutrofización de los cuerpos de agua. Y la última parte contiene el epílogo en donde se reúnen los criterios que serán discutidos a lo largo de la tesis.

2.1 Los ecosistemas acuáticos

El agua es el mayor componente del planeta tierra el cual es esencial para la vida. Los océanos y mares son los ecosistemas acuáticos más importantes y mayormente conocidos debido a su gran extensión, por su influencia en el clima y corrientes y por su papel en la economía humana en relación con las actividades pesqueras de gran escala y otras (Sánchez *et al.*, 2007).

Existen ecosistemas acuáticos continentales, con características y especies únicas, que interactúan directamente con los ecosistemas y los asentamientos humanos aledaños a ellos y que son de particular interés para la presente investigación. La tabla 1 muestra los tipos de ecosistemas acuáticos y su clasificación de acuerdo con su ubicación y su dinámica particular (Sánchez *et al.*, 2007).

Tabla 1. Tipos de ecosistemas acuáticos

<i>Tipos de ecosistemas acuáticos</i>		<i>Ejemplo</i>	
Humedales	Interiores	Lóticos	Ríos y Arroyos
		Lénticos	Humedales y sistemas de aguas profundas (lagos, ríos, bordo, embalse, cenote, ciénega)
	Costeros		Humedales y sistemas de aguas profundas (marisma, estero, estuario)
	Marinos		Arrecifes, lagunas costeras y bahías.

Fuente: elaboración propia con base en (Sánchez *et al.*, 2007).

A continuación, se hace una descripción de las características de los ecosistemas acuáticos lénticos y lóticos los cuales corresponden a las dos grandes divisiones que se hacen a los ecosistemas acuáticos continentales de acuerdo a condiciones generales de desplazamiento del agua.

2.1.1 Ecosistemas lénticos

Corresponden a los cuerpos de agua cuyo contenido líquido se mueve básicamente dentro de la depresión del terreno donde se hallan, lo hace principalmente con movimientos lentos, principalmente convectivos y con un recambio de aguas más o menos limitado. Un ejemplo de estos ecosistemas es (Sánchez *et al.*, 2007):

- a) **Lagos:** son cuerpos de agua rodeados de tierra y separados del mar u océano, una gran parte de los lagos son de agua dulce y se forman al llenar una cuenca o depresión en un terreno. Son drenados o alimentados por otros cuerpos de agua, generalmente ríos y arroyos.
- b) **Cuerpos de agua en cuencas endorreicas:** las cuencas endorreicas son aquéllas cuyas laderas convergen en un punto central, sin verter a otras ni llegar al mar (Tricart, 1985). Así, en un lago de cuenca endorreica se reúnen las aguas captadas por todas las vertientes, las cuales terminan su flujo superficial justamente en ese cuerpo de agua. Las únicas salidas para el agua captada pueden ser la infiltración en el subsuelo o la evaporación.

- c) **Lagunas:** son cuerpos de agua que se encuentran en contacto con el océano y presentan agua salobre, la cual se refiere a una mezcla de agua salada y dulce, debido a que tienen un aporte de agua dulce por ríos generalmente, por lo que se les denomina: lagunas costeras y están consideradas dentro de la zona costera, como sistemas acuáticos en una zona de transición entre el mar y los continentes (Quiroz, H. y Reza, M. 2014).

2.1.2 Ecosistemas lóticos

Los ecosistemas lóticos tienen un visible movimiento horizontal y rápido, tienen una dirección más o menos definida, además, un recambio de líquido. Como ejemplo de acuerdo con (Sánchez *et al.*, 2007) se tienen los:

- a) **Arroyos y ríos de montaña:** son tramos con flujo cuesta abajo turbulento y con gran velocidad la cual le propician una alta oxigenación al agua, que favorece a formas de vida vegetal, animal, fúngica y microorganísmica. Estos ecosistemas arrastran materiales que erosionan las paredes y el fondo a medida que son lanzados por la corriente central hacia estos, dicha erosión será diferenciada debido a la cubierta vegetal (Winward, 2000).
- b) **Ríos de pie de monte y planicie:** tienen trechos más largos con flujos laminares y lentos debido a que la pendiente es más ligera. La claridad de sus aguas depende de la velocidad del agua proveniente de zonas más altas, en época de sequía las aguas que arriban al río de planicie son relativamente claras, pero al llegar la época lluviosa, la turbiedad de los afluentes es mucho mayor debido al arrastre de materiales que se inicia desde las distintas cabeceras de cuenca.

Por otro lado, a distintas altitudes pueden presentarse diferentes tipos de vegetación sumergida, emergente y flotante, además existe mayor presencia de animales acuáticos (Sánchez *et al.*, 2007).

2.1.3 Importancia y valor de los ecosistemas acuáticos

A nivel internacional los ecosistemas acuáticos han sido reconocidos por la Secretaría de la Convención de Ramsar debido a su gran importancia ambiental, social y económica. Las extensiones donde el principal factor de control es el agua como medida de vida vegetal y animal son reconocidos como humedales (SCR, 2013).

La Convención de Ramsar aplica un criterio amplio a la hora de determinar qué humedales quedan sujetos a sus disposiciones. Con arreglo al texto de la Convención (Artículo 1.1), se entiende por humedales:

“Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (SCR, 2013).

Debido a la amplia distribución geográfica que tiene los humedales, desde las altas montañas, hasta las partes más bajas de los continentes y litorales, es importantes conocer cuáles son algunas de las importancias de los ecosistemas acuáticos o humedales de acuerdo con (Ramsar, 2014):

- a) Importancia Ambiental:** los humedales son reconocidos como fuente de diversidad biológica, ya que dan sustento a las concentraciones de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados. Además, son una fuente de agua y productividad primaria.

- b) Importancia social:** son esenciales para la salud, el bienestar y la seguridad de la población que vive en su entorno. Por lo cual la importancia social radica en brindar protección antes las crecidas en las tormentas, el control de la erosión, recarga y descarga de los acuíferos, la depuración de aguas y la retención de nutrientes así como estabilizadores de condiciones climáticas a nivel local.

- c) Importancia económica:** los beneficios económicos de un humedal son reconocidos en el abastecimiento de agua ante su cantidad y calidad, son

fuentes de pesca y agricultura. Algunos humedales son utilizados como medio de transporte, así como proveedores de recursos incluidos las hierbas medicinales y medios de recreación y turismo.

Los humedales tienen diferentes funciones, las cuales se describen en los procesos ecológicos, la conservación del balance biogeoquímico, etc. Así como valores, los cuales se refieren a todos aquellos servicios que son útiles para el hombre, estos van desde el punto de vista religioso hasta económico. La figura 1 se desarrolla las funciones y valores de los humedales, de acuerdo a su importancia ambiental, social y en el desarrollo económico.

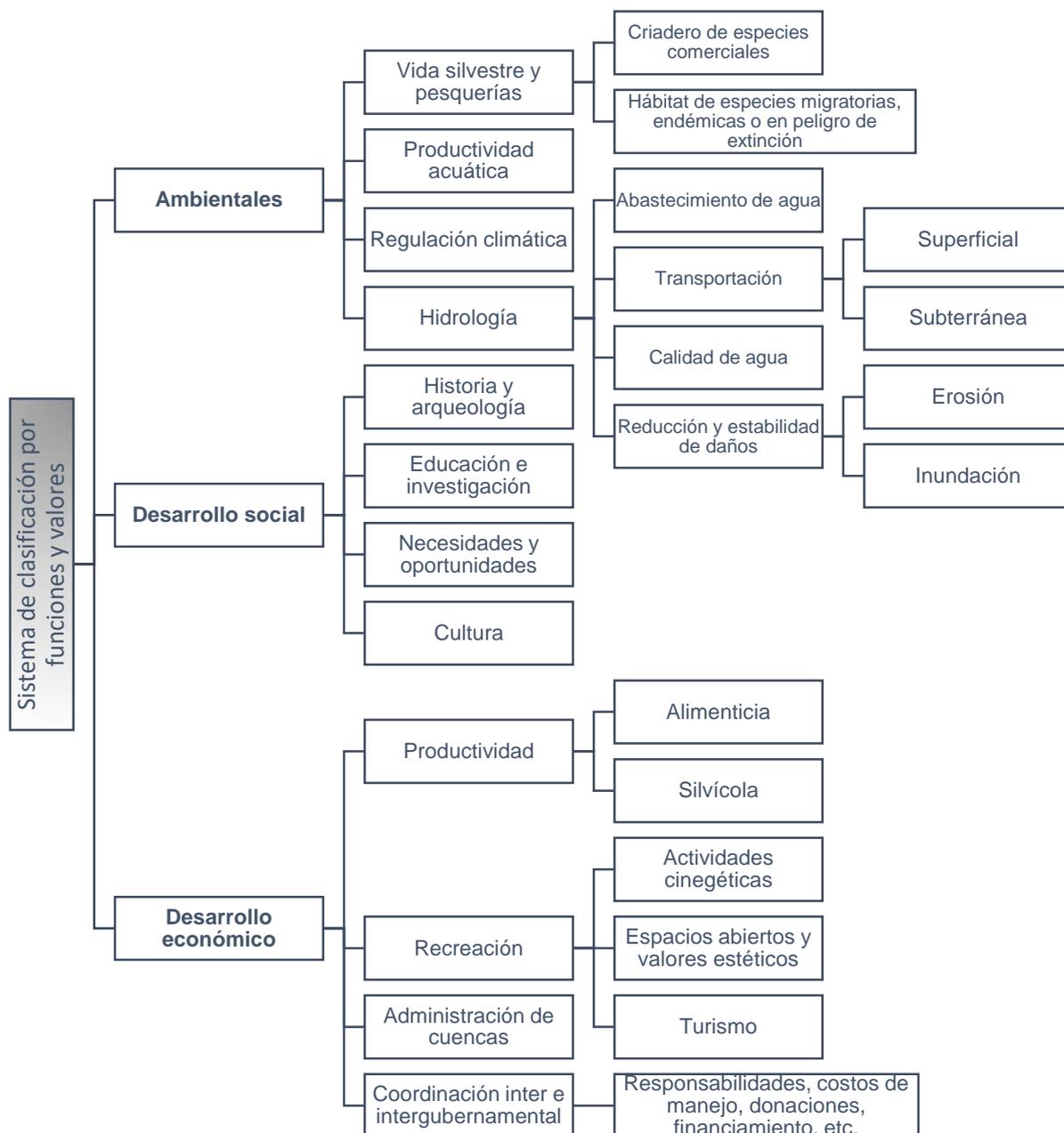


Figura 1. Clasificación de las funciones, valores y atributos de los ecosistemas acuáticos.

Fuente: Elaboración propia con base en (Sánchez et al.,2007).

Las anteriores funciones, valores y atributos reconocidos de los humedales solo pueden mantenerse si se permite que los procesos ecológicos sigan funcionando (SCR, 2006). Sin embargo su importancia ha sido subvalorada debido a lo difícil que es asignar un valor monetario a las funciones y beneficios al medio ambiente y las sociedades humanas que los ecosistemas acuáticos aportan.

De acuerdo con la teoría del valor económico total, Valor Económico Total (Pearce y Turner, 1995), existen dos tipos de valores tanto pasivos como activos. Los pasivos refieren a aquel valor que un individuo otorga a un bien sin que haga uso activo de él, los activos refieren a los valores de uso futuros y presentes (Sajurjo, E. 2001).

Tabla 2. Valor Económico Total

<i>Usos Activos</i>		<i>Usos pasivos</i>	
<i>Valor de Uso directo</i>	<i>Valor de uso Indirecto</i>	<i>Usos Futuros</i>	<i>Valor de Existencia</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Cuerpos de agua • Pesca 	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclo de nutrientes • Micro-clima 	<ul style="list-style-type: none"> • Opción recreativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Patrimonio histórico • Biodiversidad

Fuente: Elaboración propia con base en (Sajurjo, E. 2001)

Los valores de uso directo de los ecosistemas acuáticos se reconocen de manera inmediata a través del consumo o el goce directo, sin embargo los valores de uso indirecto son difíciles de percibir por los usuarios aunque estos garantizan la calidad de los ecosistemas (Sajurjo, E. 2001).

Tabla 3. Valores de los manglares de acuerdo con la Conabio

<i>Valores de uso Activo</i>		<i>Valores de uso pasivo</i>		
<i>Directo</i>	<i>Indirecto</i>	<i>De opción</i>	<i>De herencia</i>	<i>De existencia</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Usos extractivos: Materia prima, alimentos, energéticos, etc. • Usos no extractivos: recreación, acuicultura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ecosistémicos: autopreservación, ciclaje de nutrientes, fijación de nitrógeno y fósforo. • Ambientales: purificación de agua, protección contra inundaciones y tormentas. 	Obtención de nueva materia prima, nuevos conocimientos.	Protección del hábitat.	Evitar cambios irreversibles, valores culturales, estéticos y religiosos.

Fuente: Elaboración propia con base en Conabio 1998

La teoría del Valor Económico Total no es suficiente para la valoración económica de los ecosistemas acuáticos, ya que la medición no es siempre directa, en ocasiones se requiere de técnicas específicas y costosas (Sajurjo, E. 2001), por lo cual otros autores han trabajado por encontrar una valoración lo más acercada a la realidad del mercado.

2.1.4 Principales problemáticas asociadas a los ecosistemas acuáticos

Los ecosistemas acuáticos sufren un impacto derivado de las actividades humanas, las cuales han incrementado el cambio de estas unidades fundamentales especialmente en sus comunidades vegetales, animales, microorganismos y elementos como el agua, suelo y minerales. Los deterioros de los ecosistemas están asociados de acuerdo con la convención Ramsar (2010) principalmente a:

- a) **Perdida de hábitat:** los ecosistemas acuáticos son convertidos en áreas de cultivo y para el desarrollo urbano e industrial principalmente. Las principales causas de pérdida están asociadas a la fragmentación, degradación y destrucción. La pérdida de los hábitats amenaza la supervivencia de la flora y fauna, además cuando el cambio del ecosistema es drástico este pierde la capacidad de proporcionar alimentos, agua y refugio de especies (Carpio y Rodríguez, 2017). La Figura 2 muestra algunos eventos que derivan la pérdida de hábitat:

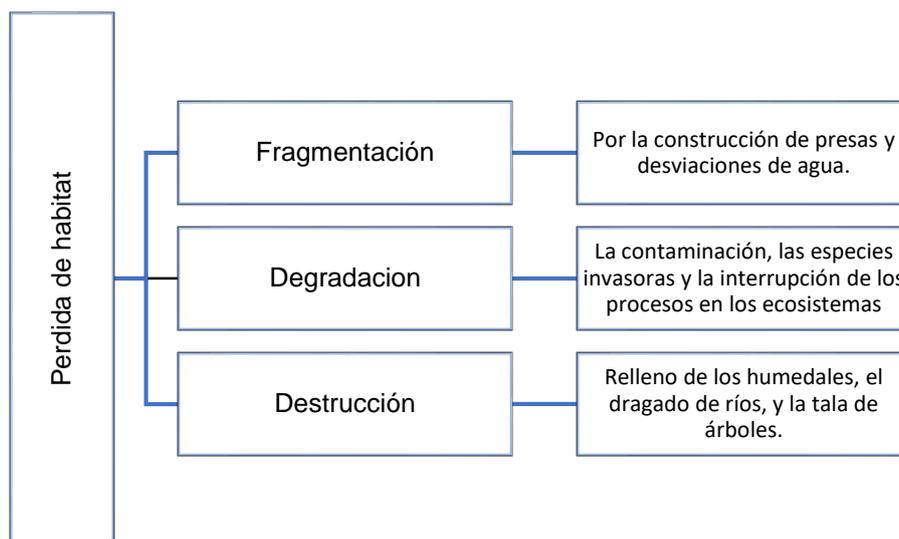


Figura 2. Tipos de pérdida de hábitat.

Fuente: elaboración propia con base en (Carpio y Rodríguez, 2017)

- b) **Extracción masiva de agua dulce:** ocasiona que haya menos disponibilidad de agua dulce en zonas continentales tanto en cuerpos de agua como en ríos.
- c) **Sedimentación:** entendida como el proceso en que se acumulan partículas de suelo en el fondo de los cuerpos de agua haciendo que se disminuya el espacio disponible de almacenamiento (Figura 3).

Las principales causas son la agricultura y la deforestación, de acuerdo con (UNESCO, 2010) se estima que en las próximas décadas más del 50% de la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua del mundo, puede verse reducida como producto de los procesos de sedimentación.

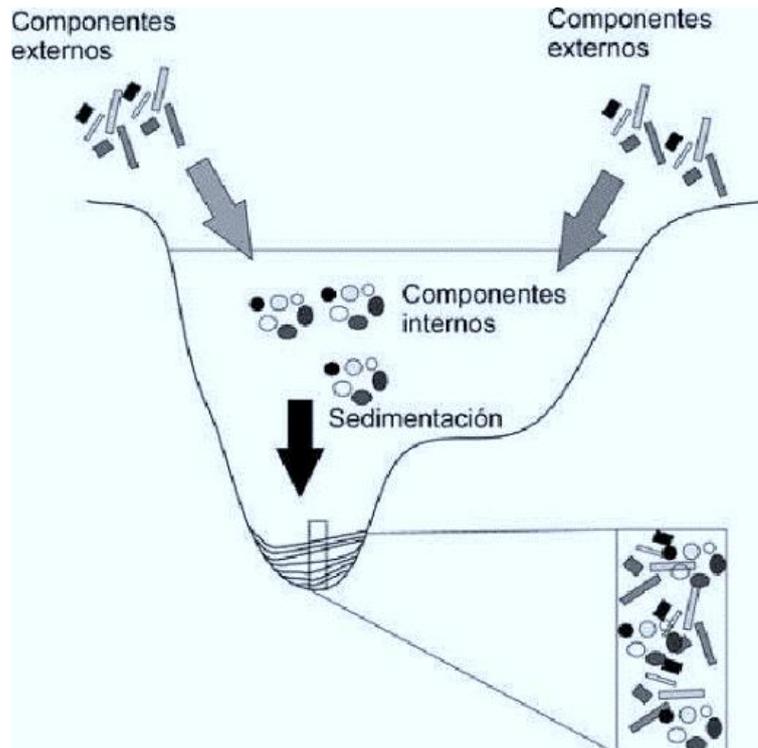


Figura 3. Sedimentación en cuerpos de agua.

Fuente: García et al., (2011).

- d) **Especies invasoras:** estas especies depredan a las especies nativas, compiten con ellas, transmiten enfermedades, modifican los hábitats causando problemas ambientales, económicos y sociales (CONABIO, 2009). Además se prevé que este tipo de especies vaya en aumento.

- e) **Contaminación:** las actividades industriales, agrícolas, ganaderas y urbanas contribuyen substancialmente a la contaminación; la introducción de pesticidas, fertilizantes a través de los desechos industriales, desechos humanos que están tratados o parcialmente tratados y que son vertidos en los cuerpos de agua. La Figura 4 muestra algunos ejemplos de contaminación:

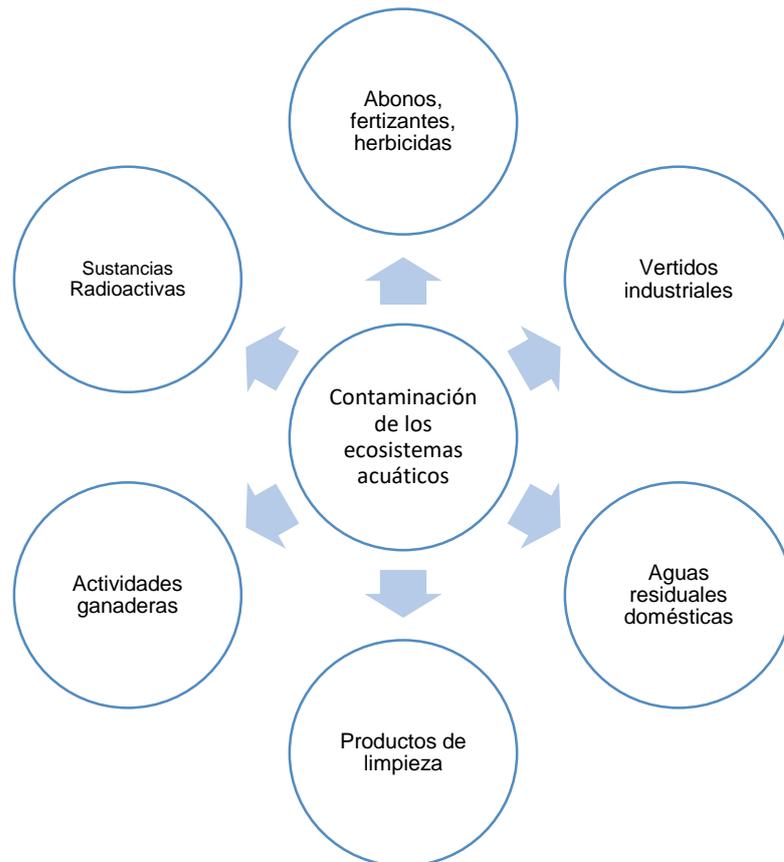


Figura 4. Contaminantes de los ecosistemas acuáticos.

Fuente: Elaboración propia

- f) **Sobreexplotación de especies:** reduce la capacidad de los ecosistemas a adaptarse a los cambios, así como en su diversidad biológica y los bienes y servicios que pudieran ofrecer los ecosistemas acuáticos.
- g) **Carga de nutrientes:** de Nitrógeno, Fósforo y otros provenientes principalmente de la agricultura, de los residuos domésticos deficientemente tratados que afectan directamente a los ecosistemas acuáticos provocando un crecimiento excesivo de las algas y la disminución de otras especies.

La Figura 5, representa que a mayor presencia en los cuerpos de agua de Nitrógeno (N) y Fósforo (P) la producción primaria aumenta lo que deriva la disminución de penetración de luz en la columna de agua, abate el Oxígeno disuelto el cual ya no estará disponible para especies como

peces y otros organismos que se ven vulnerables y finalmente el ecosistema acuático se ve degradado.



Figura 5. Consecuencia de la carga de nutrientes en cuerpos de agua.

Fuente: Elaboración propia.

Algunas de las anteriores problemáticas pueden ocurrir de manera natural dentro de los ecosistemas, sin embargo las actividades antrópicas han potenciado dichos eventos, acelerando la degradación de los humedales y la pérdida de biodiversidad.

2.2 El estado trófico

Una de las formas en las que se puede observar la degradación de un ecosistema acuático es la eutrofización, las características y momento de este serán determinadas por su estado trófico.

Se entiende por estado trófico la relación entre el estado de nutrientes en un cuerpo de agua y el crecimiento de la materia orgánica en el mismo. La eutrofización es el proceso de cambio de un estado trófico a otro de nivel superior por adición de nutrientes (FAO, 1997).

Según Guerra *et al.* (2015) el término eutrofia se originó a partir del adjetivo alemán *eutrophe*, el cual refería a la riqueza de nutrientes de una región. Naumann en 1919 introdujo el concepto general de oligotrofia y eutrofia, tomando como referencia la poca o gran existencia de algas planctónicas en una zona de estudio, donde el primer término refería a los lagos que contenían pocas algas planctónicas en una región dominada por rocas primaria y en el segundo, un lago eutrófico, contenía una gran riqueza en fitoplancton, en regiones bajas y fértiles, donde existía una gran actividad humana que, a su vez, proporcionaba e incrementaba la cantidad de nutrientes. Consecutivamente Thienemann en 1925, adoptó el concepto de Naumann y estudió a las especies desde el punto de vista biológico de ambos tipos de lagos.

Posteriormente la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), a través del programa de Cooperación sobre la eutrofización ha realizado el estudio más completo a nivel mundial sobre el tema, durante el decenio de 1970 en 18 países (FAO, 1997). La OCDE (1981) definió el concepto de eutrofización como:

“El enriquecimiento de las aguas en sustancia nutritivas que conduce, generalmente, a modificaciones sintomáticas tales como aumento de la producción de algas y otras plantas acuáticas, degradación de la pesca y deterioro de la calidad del agua, así como de todos sus usos en general”

Para definir el estado trófico de un cuerpo de agua se utilizan índices calculados en base a diferentes parámetros (Tabla 4). La evaluación del estado trófico se basa en comparar los datos obtenidos experimentalmente con los valores fijos propuestos para cada rango. La OCDE utiliza la media anual de Fósforo Total (PT Medio), la media anual de Clorofila-a (Cl-a Media), el valor máximo anual de Clorofila-a (Cl-a Max) y la profundidad media y mínima anual de visión del Disco de Secchi (DS).

Tabla 4. Valores límites de la OCDE para la clasificación trófica.

Estado Trófico	PT Medio (µg/L)	Cl-a Media (µg/L)	Cl-a Max (µg/L)	DS Medio (m)	DS Mín. (m)
Ultraolitrófico	< 4	<1	<2.5	>12	>6
Oligotrófico	<10	<2.5	<8	>6	>3
Mesotrófico	10-35	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7
Hipereutrófico	>100	>25	>75	>1.5	<0.7

*Profundidad de Secchi = sistema que permite medir la turbidez de la columna de agua en un lago.

Fuente: Elaboración propia con base en OCDE (1981).

La secuencia de estados tróficos va desde ultraolitrófico que corresponde al primer nivel trófico hasta hipertrófico el cual representa el nivel trófico más alto. Las características de cada nivel trófico son:

- a) **Ultraolitrófico:** es el nivel trófico más bajo, está limitado a los lagos de montaña, tienen baja mineralización y concentraciones insignificantes de nutrientes (Cuna *et al.*, 2015).



Figura 6. Ejemplo de un cuerpo de agua Ultraoligotrófico

Fuente: Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES (2016).

- b) **Oligotrófico:** es un estado pobre de nutrientes, caracterizado por aguas claras, transparentes, con buen índice de penetración de luz, el crecimiento de algas es pequeño y mantiene a pocos animales; se puede aseverar que la biota acuática que se encuentra es característica de aguas bien oxigenadas durante todo el año, por ejemplo: la presencia de macroinvertebrados como la *Ephemeroptera* y *Trichoptera*, así como también especies de peces de los Salmónidos como la trucha (Vásquez, *et al.*, 2012).

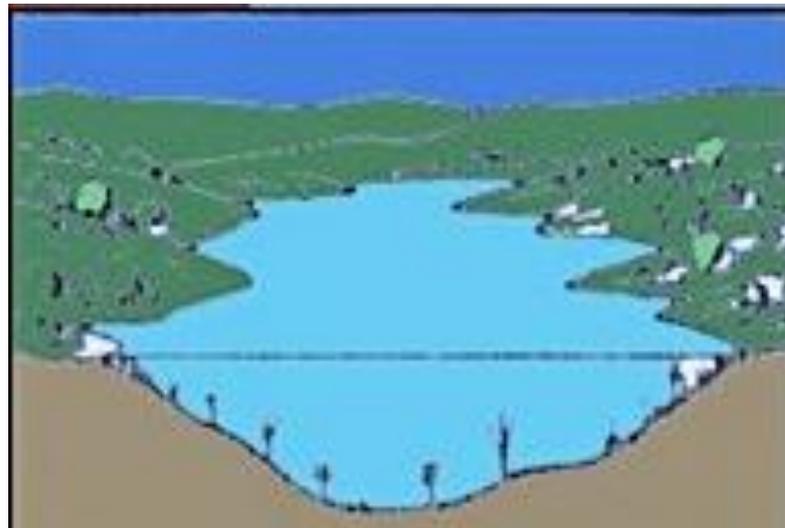


Figura 7. Ejemplo de un cuerpo de agua Oligotrófico

Fuente: Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES (2016).

- c) **Mesotrófico:** es caracterizado por aguas moderadamente claras con mayor probabilidad de anoxia es decir con disminución de oxígeno,

moderada turbidez y problemas de olores (Sierra, R., Barajas, C., y Garcia, H., 2010). Es el punto intermedio entre la Oligotrofia y la Eutrofia.



Figura 8. Ejemplo de un cuerpo de agua Mesotrófico

Fuente: Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES (2016).

- d) **Eutrófico:** tiene abundancia de nutrientes que favorecen el crecimiento de grandes cantidades de las algas y otros organismos, incrementando la turbiedad. Cuando los organismos mueren y son descompuestos por la actividad de las bacterias, se demanda altas cantidades de Oxígeno disuelto, se incrementa la tasa de sedimentación y disminuye la columna de agua (Vásquez *et al.*, 2012).



Figura 9. Ejemplo de un cuerpo de agua Eutrófico.

Fuente: Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES (2016).

La biota acuática, es principalmente de especies euritópicas es decir que se adaptan fácilmente a condiciones de aguas poco saturadas en oxígeno disuelto (Vásquez *et al.*, 2012). En algunos casos, se producirán entonces

condiciones anaeróbicas con proliferación de macrofitas, dominio de cianoferas y espumas de algas (Sierra *et al.*, 2010). El resultado es la generación de malos olores, así como la degradación de la calidad del agua.

- e) **Hipereutrófico:** es el nivel trófico más alto, tiene un enriquecimiento máximo de nutrientes por lo cual la densidad de las algas es mayor, el espejo de agua se ve reducido, así como la penetración de luz. Un cuerpo de agua hipereutrófico impide la navegación, así como el aprovechamiento de sus aguas (Vásquez *et al.*, 2012).

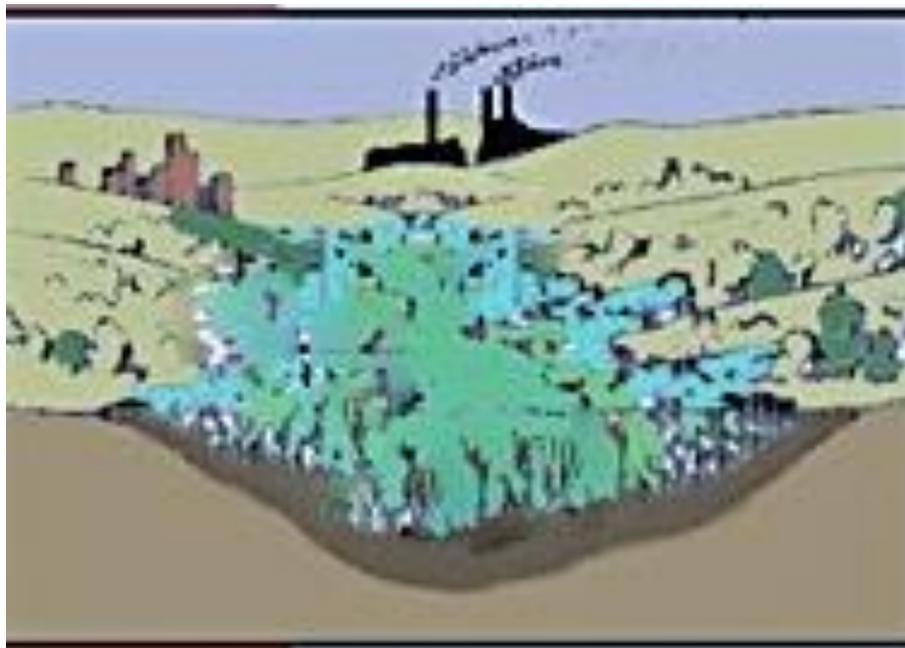


Figura 10. Ejemplo de un cuerpo de agua Hipereutrófico.

Fuente: Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES (2016).

Las anteriores características de los estados tróficos permiten mostrar que conforme un cuerpo de agua va adquiriendo mayor cantidad de nutrientes sus características físicas y químicas se van deteriorando, haciendo que el ecosistema se degrade.

A continuación en la Tabla 5, se muestran algunas otras características que presentan los cuerpos de agua de acuerdo a su estado trófico.

Tabla 5. Características de los cuerpos de agua de acuerdo a su estado trófico.

Factor	Estado trófico	Ultraoligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Concentración de Nutrientes		Insignificantes concentraciones	Poca, la dinámica es lenta	Media concentración	Altas concentraciones	Altas concentraciones, dinámica rápida
Oxígeno disuelto		Alta disponibilidad tanto en la superficie como en el fondo	Alto todo el año. Tiene pocas fluctuaciones durante el día y noche	Gran fluctuación durante el día y noche	Puede ser bajo o estar ausente durante el periodo de estratificación térmica	Disponibilidad mínima, condiciones de anoxia
Apariencia		Aguas claras y limpias	No se observan grandes masas de microalgas o vegetación acuática	Presencia de vegetación, el agua tiene coloración	Aguas con tonos de color verde o amarillo	Densa vegetación acuática flotante o sumergida.
Producción de plantas y animales		Poca	Numerosa	Media	Alta	Reducidas sustancialmente
Tipos característicos de peces			Peces que viven en las profundidades y agua fría (salmón, trucha, cisco)		Peces que viven en la superficie y agua caliente (lucio, perca, róbalo etc.)	
Calidad del agua para usos domésticos e industriales		Alta	Buena	Regular	Frecuentemente pobre	Pobre

Fuente: Elaboración propia con base en Sierra, R., et al., (2010) y Vásquez, et. al., (2012).

Como se muestra en el cuadro, en los ecosistemas acuáticos existe un número variado de hábitats a los cuales viven asociados los distintos grupos de organismos, que en el último término forman las cadenas y tramas alimenticias, cuya abundancia y complejidad están determinadas por el estado trófico (Pérez y Restrepo, 2008). Por lo cual en la eutrofización influyen diferentes factores como la productividad primaria, aspectos fisicoquímicos y antrópicos.

2.3 Productividad del agua y factores de eutrofización

La productividad y la estabilidad de un cuerpo de agua están determinadas por una red compleja de factores que van desde la penetración de luz, su origen geológico, su morfología y su posición altitudinal, hasta el efecto que el hombre ejerce sobre él, a causa de sus prácticas culturales, sociales y económicas (Pérez y Restrepo, 2008).

Se entiende por productividad a la cantidad de materia orgánica o biomasa que es acumulada en un determinado tiempo y espacio geográfico. Y por estabilidad

a las condiciones de equilibrio en las que se encuentran distintos factores como productores, consumidores, descomponedores, factores químicos y antrópicos.

A su vez la productividad y estabilidad están asociados a la eutrofización en las cuales inciden diferentes factores como bióticos, abióticos y actividades antrópicas de los cuales se hará una breve descripción a continuación:

2.3.1 Factores Abióticos

Se designan a todos aquellos factores ambientales que influyen en la estabilidad y productividad de los ecosistemas acuáticos:

a) Turbiedad: consiste en la reducción de la claridad del agua y de la cantidad de luz que penetra por la presencia de material tanto orgánico como inorgánico que se encuentra en suspensión en la columna de agua, con tamaños que van desde el coloidal hasta partículas macroscópicas.

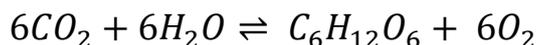
El grado de turbiedad dependerá fundamentalmente de la naturaleza, tamaño y cantidad del material en suspensión, así como también, de las tasas de sedimentación tratándose específicamente de un sistema léntico. Además la turbiedad se ve influenciada directamente por la geología, edafología y cubierta vegetal; ya que el material en suspensión es originado además por el material que es arrastrados por las corrientes hacia los cuerpos de agua (Vásquez *et al.*, 2012).

b) Gases disueltos: en los cuerpos de agua existen gases disueltos, entre los más importantes se encuentran el Oxígeno (O₂) y el Dióxido de Carbono (CO₂). De acuerdo Pérez y Restrepo (2008), el primero es producto de la fotosíntesis y el segundo de la respiración de los organismos.

El O₂ se encuentra disuelto en el agua entre 7 y 9 mgL⁻¹, su punto de saturación es cercano a los 10 gmL⁻¹, sin embargo, la concentración varía de acuerdo con la temperatura y la salinidad. El agua alcanza una saturación de 14 gmL⁻¹ cuando su temperatura disminuye, dicha saturación provoca que el pH aumente.

Por otra parte el CO₂ proviene de la respiración y la oxidación de la materia orgánica. Durante la noche ocurre normalmente un incremento de CO₂ y repercute en un pH bajo.

Fotosíntesis



Respiración

Otros gases disueltos en el agua son el Nitrógeno, el Metano y el Ácido Sulfhídrico, cuyo efecto se refleja en la acidez del agua. Un cambio drástico de O_2 , CO_2 y de otros gases cambia la química del agua y esta actividad es propia de ecosistemas que han perdido su estabilidad.

c) Conductividad Eléctrica: existe una relación directa entre los sólidos totales disueltos y la conductividad ya que la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica está en función de la concentración de iones en ella. Por lo tanto, aguas muy oligotróficas o pobre de iones presentaran baja conductividad (Pérez y Restrepo, 2008)

Los valores normales están entre 30 y 60 $\mu S cm^{-1}$. Resultados por debajo de estos parámetros indica un estado de oligotrofia que es igual a baja productividad, y valores por encima indican eutrofia, alta productividad (Vásquez, *et. al.*, 2012).

Por medio de la conductividad se puede conocer:

1. La magnitud de la concentración iónica; los iones más responsables con los macronutrientes.
2. La variación diaria de conductividad proporciona información de la productividad primaria y de la descomposición de la materia orgánica
3. Nos habla de la naturaleza geoquímica del terreno.

Aclarando que esta variable debe emplearse únicamente para la evaluación de eutrofización en los ecosistemas acuáticos continentales y no es aplicable a los sistemas estuarinos, por la incidencia propia de las aguas marinas, ya que por su naturaleza, éstas últimas presentan altos niveles de conductividad y de SDT (Vásquez, *et. al.*, 2012).

d) Piso altitudinal: según Holdridge (1947) citado en Vásquez *et al.* (2012), en la zona tropical se forman pisos térmicos que varían en $f(x)$ de la altura sobre el nivel del mar y el promedio de temperatura ambiental de cada piso, para lo cual, se establecen los siguientes:

1. Basal o cálido o tropical: localizado entre 0 msnm a 1000 msnm, con temperaturas superiores a 24.0 °C.
2. Pre-montano o templado: ubicado entre 1001 msnm a 2000 msnm, con temperaturas que oscilan entre 15.5 °C y 24.0 °C.
3. Montano bajo o frío: localizado entre 2001 msnm a 3000 msnm, con temperaturas que fluctúan entre 12.0 °C y 15.5 °C.
4. Montano o páramo: ubicado entre 3001 msnm a 4000 msnm, con temperaturas que oscilan entre 6.0 °C y 12.0 °C.
5. Alpino: localizado entre 4001 msnm a 5000 msnm, temperaturas permanentes e inferiores a 6.0 °C.
6. Nival: con alturas superiores a los 5001 msnm, y temperaturas inferiores a 3.0 °C.

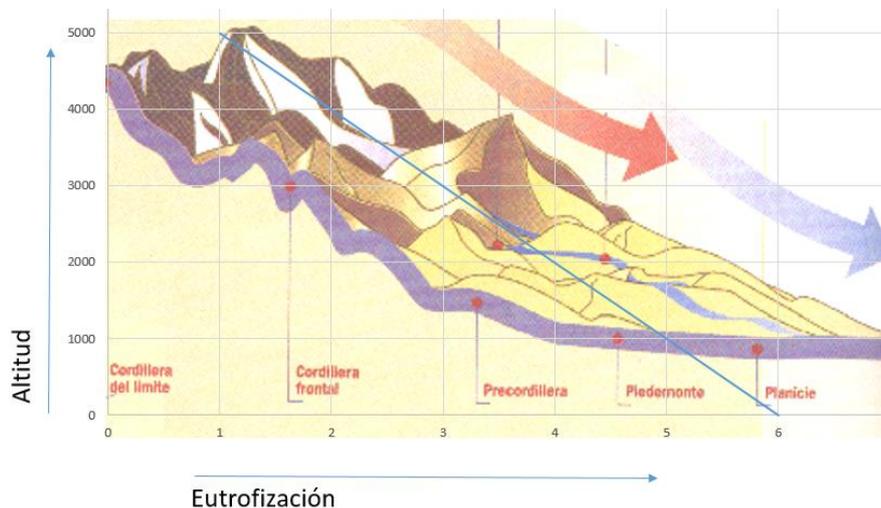


Figura 11. Relación entre altitud y eutrofización.

Fuente: Elaboración propia.

Los procesos de eutrofización se acentúan a medida que se desciende en el piso altitudinal (Figura 11). En los pisos superiores, la tendencia a eutrofización por condiciones naturales y por incidencia antrópica es mínima debido a que el arrastre de materiales en las cuencas hidrográficas es menor.

e) Temperatura: la temperatura es uno de los parámetros más importantes, ya que ésta puede acelerar o reducir la velocidad de las reacciones químicas, incluyendo los ciclos de degradación de la materia que se presentan en la columna de agua. Según Vásquez *et al.* (2012), la eutrofización se manifiesta mayormente en ecosistemas acuáticos que se encuentran a nivel del mar con

temperaturas ambientales e hídricas superiores a los 24°C, y con menor probabilidad en temperaturas menores.

La posición de la tierra con respecto al sol influye directamente en el ángulo de incidencia de radiación y por consiguiente en la temperatura del cuerpo de agua, así como la topografía local y la vegetación.

f) Sólidos disueltos: de acuerdo con Pérez y Restrepo (2008), entre los iones más representativos que se encuentran en el agua están los Cloruros (Cl⁻), Sulfatos (SO₄), Bicarbonatos (HCO₃⁻), Sílice (SiO₂), Magnesio (Mg⁻), Nitratos (NO₃⁻) y Fosfatos (PO₄); de los cuales son de interés para esta investigación los últimos dos, la concentración de cada uno de ellos es muy variable dependiendo de la influencia ejercida por la naturaleza o la acción humana.

Los nutrientes NO₃⁻ y PO₄ derivados respectivamente del Nitrógeno (N) y del Fósforo (P) son responsables de la producción primaria, ya que la adición de nutrientes es la causa más importante de la eutrofización. Su fuente es principalmente la descomposición de la materia orgánica, la contaminación por desechos domésticos, agrícolas y pecuarios.

Por otro lado el Magnesio (Mg) es importante para la formación de la molécula de clorofila, la cual es el pigmento verde de las plantas y desempeña un papel esencial en el proceso de fotosíntesis, la clorofila además es un indicador del contenido de biomasa (Allinger, 1978). Aunado a esto el Mg en conjunto con el Calcio (Ca) determinan la dureza del agua.

2.3.2 Química de los macronutrientes Nitrógeno y Fósforo asociados a la eutrofización:

Los nutrientes que inciden mayormente en el proceso de eutrofización son el N y el P; estos son denominados macronutrientes por su fuerte influencia en el desarrollo de los organismos. En algunos ecosistemas el factor limitante es el ion fosfato, como sucede en la mayoría de los sistemas lénticos continentales, en cambio en los ecosistemas marinos, el factor limitante es el nitrógeno (Moreta, 2011). El principio del factor limitante se basa en que la tasa de crecimiento de algas será restringida por el elemento que se encuentre presente en el medio acuático en menor concentración respecto a la proporción requerida.

En los siguientes puntos se describen las características de los macronutrientes, sus ciclos en los ecosistemas acuáticos y el impacto que tienen en estos.

a) **Nitrógeno:** el N es un elemento biogénico que se encuentra incorporado en moléculas orgánicas que desempeñan funciones vitales para toda célula. Este elemento es un constituyente básico de aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares aminadas y los polímeros que estas moléculas forman (Giraldo, Agudelo y Palacio, 2010).

El N existe en la naturaleza en varias formas químicas, sin embargo, dentro de la calidad de agua los compuestos nitrogenados más importantes son Nitrógeno Orgánico, Amonio, Nitrito, Nitrato y Nitrógeno gas, por lo cual el ciclo del nitrógeno se basará principalmente en estos compuestos.

El ciclo del Nitrógeno (Figura 12) es el proceso biológico de la transformación de ciertos elementos. En los ecosistemas acuáticos la fijación del Nitrógeno gaseoso (N_2) es realizado por las cianofíceas en un 78%, el Nitrógeno que ha sido fijado forma parte de los organismos los cuales emite Amonio (NH_4^+) de la respiración, y de la descomposición de productos superfluos derivados de la descomposición del alimento que no es consumido, las plantas y animales muertos, etc.

Posteriormente las bacterias nitrosomonas y nitrobacter forman colonias y comienzan a oxidar biológicamente el NH_4^+ en Nitritos (NO_2^-). Después en una segunda etapa se comienza a colonizar una bacteria llamada nitrospira o nitrobacter, esta bacteria oxida los NO_2^- en Nitratos (NO_3^-).

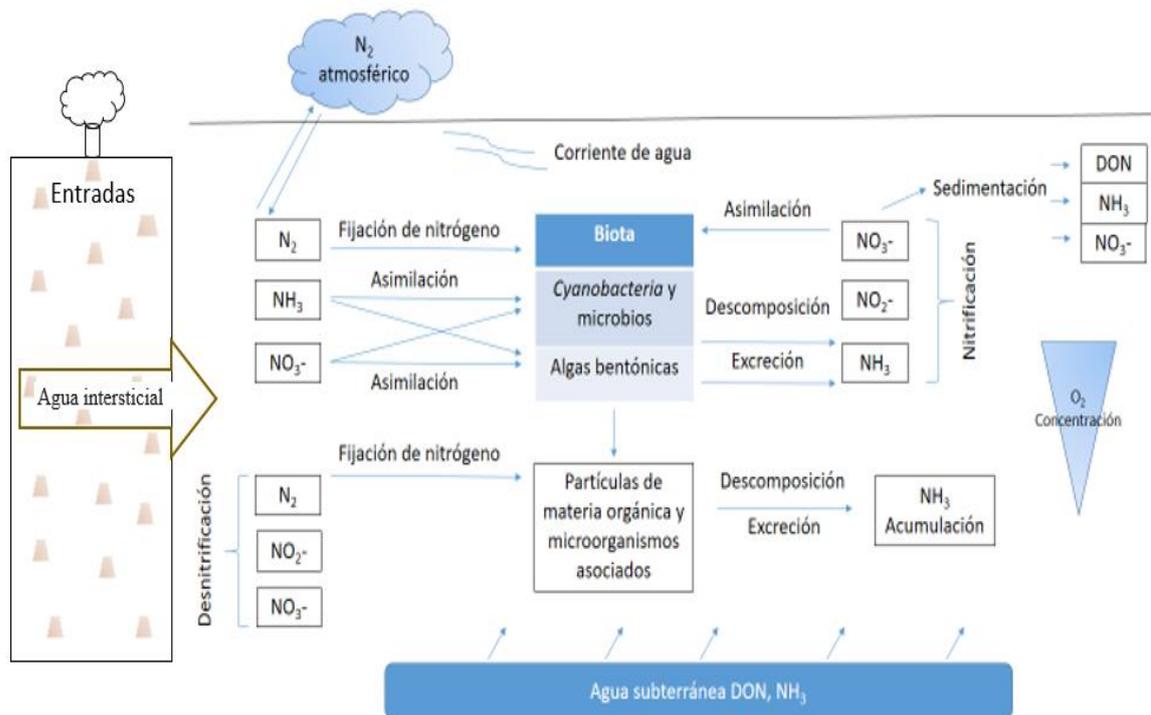


Figura 12. Ciclo del Nitrógeno en ecosistemas acuáticos.

Fuente: Elaboración propia con base en Allan (1995).

La formación de NO_3^- o nitrificación se lleva a cabo bajo condiciones de aerobiosis es decir con presencia de O_2 y de materias orgánicas, para posteriormente llevar a cabo un proceso de desnitrificación, es decir, la formación de Nitrógeno en gas. Ambas condiciones influyen en la cantidad y disponibilidad del nitrógeno inorgánico disuelto.

Los NO_3^- son consumidos por las plantas al ser su principal nutriente, por lo cual al existir un exceso de Nitrógeno en el agua la producción de plantas se ve en aumento abatiendo el Oxígeno disuelto en el agua.

- a) **Fósforo:** el P forma la base de gran número de compuestos, de los cuales los más importantes son los fosfatos (PO_4^{4-}). En todas las formas de vida, los PO_4^{4-} desempeñan un papel esencial en los procesos de transferencia de energía, como el metabolismo y la fotosíntesis.

El P entra a los ecosistemas acuáticos por la meteorización tanto física como química de las rocas del suelo, ya que éste se encuentra principalmente en rocas y sedimentos; es incorporado en forma de PO_4^{4-} por microorganismos o plantas del ecosistema.

El ciclo del P (Figura 13) comienza cuando el P es erosionado y transportado a los ecosistemas acuáticos en forma particulada y disuelta. El fitoplancton absorbe el PO_4^{4-} , el zooplancton consume fitoplancton y bacterias, con las excreciones o con su muerte se liberan PO_4^{4-} . La materia orgánica muerta está en suspensión y puede llegar a sedimentar o degradarse abióticamente y producir PO_4^{4-} nuevamente (Jiménez y Monerri 2008).

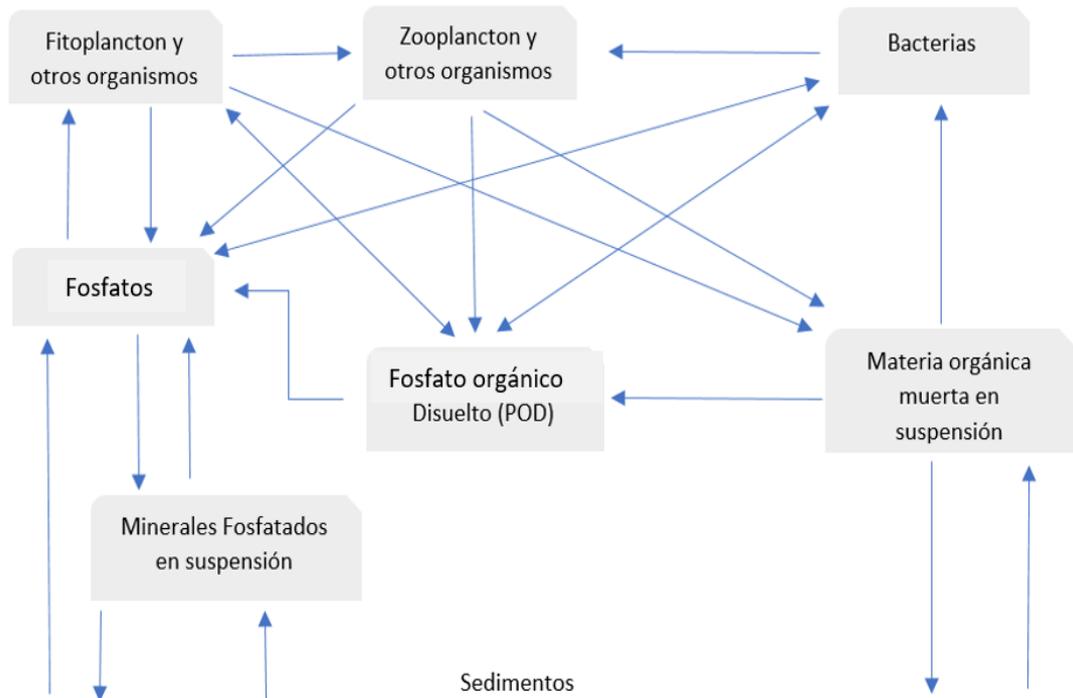


Figura 13. Ciclo del Fósforo en ecosistemas acuáticos

Fuente: Elaboración propia con base en (Jiménez y Monerri, 2008).

El incremento de la concentración de Fósforo en las aguas superficiales aumenta el crecimiento de organismos dependientes del Fósforo, como son las algas. Estos organismos usan grandes cantidades de Oxígeno e impiden que los rayos de sol entren en la columna de agua, esto hace que el agua sea poco adecuada para la vida de otros organismos.

En términos generales la concentración de los macronutrientes N y P se manifiestan en una intensa proliferación de microalgas y plantas superiores, provoca una competencia biológica, la disminución de Oxígeno disuelto y en casos extremos la colmatación del cuerpo de agua (Mazzeo *et al.*, 2002).

2.3.3 Factores Bióticos

Es la parte viva del ecosistema, la constituyen todos los organismos que en él viven. Estos se dividen en tres grandes grupos, los productores, consumidores y descomponedores; la acción conjunta de estos grupos determina la productividad y el balance ecológico del ecosistema acuático (Pérez y Restrepo, 2008).

a) **Productores primarios:** son aquellos organismos autótrofos como las bacterias, las algas y las plantas acuáticas. La producción primaria consiste en la intensidad que se tiene para capturar y almacenar una cantidad de energía para posteriormente ser consumida por otros seres vivos.

1. **Plancton:** son organismos microscópicos, animales y vegetales que flotan en el agua, el plancton de origen vegetal es responsable de la mayor parte de la producción primaria. El zooplancton constituido por animales microscópicos, por lo regular se alimentan de plantas, iniciando así la cadena alimenticia.

2. **Fitoplancton:** está formado por microalgas fotosintéticas, incluye especies de diferentes tiempos evolutivos, por lo cual se presenta generalmente un alto número de especies coexistiendo (Hutchinson, 1961). Sus principales requerimientos son la luz y los nutrientes, además la intensa actividad fotosintética produce un aumento del pH en el agua.

3. **Plantas acuáticas:** las hidrófitas cumplen su ciclo vital en suelos temporal o permanentemente cubiertos de agua; pueden agruparse en dos categorías; las que estas adheridas al sustrato y las que flotan libremente (Sculthorpe, 1968).

Se reconocen tres tipos de plantas adheridas al sustrato: plantas emergentes, son aquellas que están enraizadas y sus hojas emergen a la superficie; un ejemplo sería la totora o el junco. Otro tipo son las plantas sumergidas como el nenúfar o el nelumbo. Como tercer ejemplo se tiene las completamente emergidas como la cabomba. Y finalmente, las flotantes libres como la lenteja y el jacinto de agua.

Las hidrófitas se distribuyen espacialmente en función a la profundidad (Figura 14), en la zona litoral se encuentra principalmente la vegetación emergente, la enraizada con hoja flotante y en una zona más profunda la vegetación sumergida. La vegetación libre no se ve limitada, está en condición de la presencia del viento. Las zonas no siempre tienen límites claros (Mazzeo *et al.*, 2002).

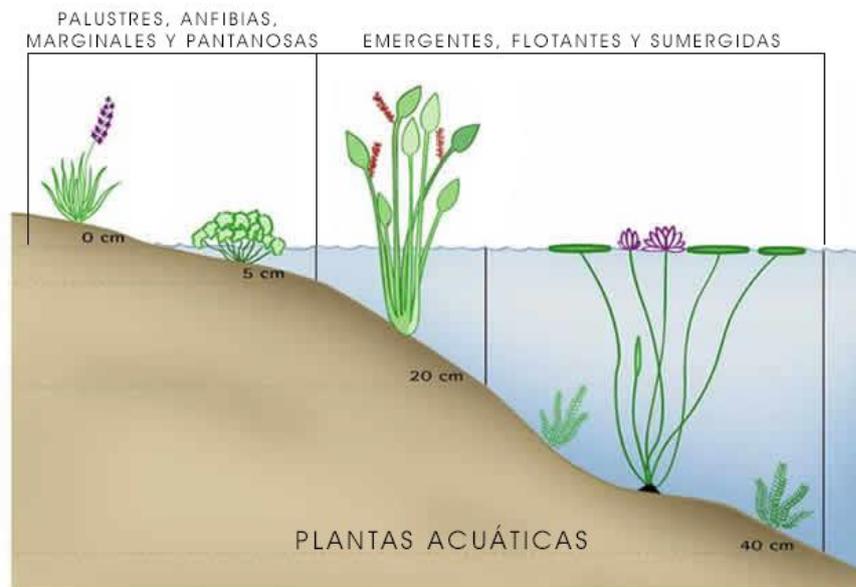


Figura 14. Distribución espacial de distintos tipos de plantas hidrófitas en función a la profundidad del ecosistema.

Fuente: Mazzeo *et. al.* (2002).

La producción primaria se ve favorecida cuando aumenta la concentración de nutrientes, sin embargo, se establece una competencia entre las comunidades de algas, fitoplancton y plantas, y disminuye la penetración de luz en el agua. Las plantas de libre flotación no se ven afectadas por la disminución de luz, por lo tanto, tienen un mayor desarrollo, pudiendo convertirse en masas densas que impidan el desarrollo natural del ecosistema.

- b) **Consumidores:** son representados por los herbívoros, carnívoros y omnívoros, especialmente se hablará de las especies acuáticas. Las especies ícticas son los principales representantes, estos son afectados directamente cuando existe un cambio en los niveles inferiores y superiores del ecosistema.

De acuerdo con Mazzeo *et. al* (2002) la estructura y abundancia de las poblaciones varían de acuerdo a la cantidad y tipo de material que ingresa al

sistema, la presencia moderada de nutrientes provoca el aumento de la comunidad de peces, sin embargo, las condiciones exageradas conllevan a la pérdida de la zona litoral y la disminución de fauna. La biomasa de productores primarios promueve variaciones de Oxígeno durante la noche y el día, variaciones a las cuales los peces no están acostumbrados provocando muertes masivas por la ausencia de Oxígeno.

1. Descomponedores: conocidos también como mineralizadores de materia orgánica, a este rubro pertenecen los hongos, bacterias acuáticas y otros microorganismos, estos organismos se alimentan del cuerpo muerto de otros organismos o de sus productos de desecho, descomponiendo la materia orgánica en materia inorgánica (Saenz, 2007).

2. Actividades antrópicas: las actividades antropogénicas inciden radicalmente en el proceso de producción y eutrofización, estas actividades incorporan materiales del exterior al interior del ecosistema, varias son las causas generadoras, sin embargo, las más importantes son:
 - *Actividades agropecuarias*: la adición de fertilizantes en la agricultura y residuos orgánicos agregan una cantidad importante de Nitrógeno y Fósforo nutrientes que son lavados por la escorrentía y lixiviados a los cuerpos de agua. El estiércol de los animales también proporciona Nitrógeno principalmente (FAO, 1997).

Tabla 6. Aportes de Fósforo y Nitrógeno total de animales utilizados en la explotación ganadera y por persona.

	<i>Aporte de Fósforo total anual.</i>	<i>Aporte de Nitrógeno total anual.</i>
Vacuno	7,000 g animal/año	54,750 g animal/año
Caballos	4,500 g animal/año	18,250 g animal/año
Porcinos/Ovino	3,000 g animal/año	14,600 g animal/año
Personas	1,000 g hab/ año	-
Patos y similares	300 g animal/año	474.5 g animal/año

Fuente: Salas y Martino (2001).

- *El uso de detergentes de uso doméstico:* estos alcanzan los ecosistemas acuáticos mediante las aguas residuales. Contienen principalmente Fósforo.
- *Deforestación de las cuencas:* incrementa las tasas de erosión del suelo y aumentan el lavado del Fósforo por el agua de lixiviación y escorrentía hacia los ecosistemas acuáticos.

En este capítulo se ha definido la importancia de los ecosistemas acuáticos, principalmente los lénticos. De acuerdo a la investigación el cuerpo de agua de San Miguel Almaya es identificado como lago debido a su ubicación geográfica a pesar de que popularmente es conocido como laguna.

Además se reconoce la importancia ambiental de este tipo de cuerpos de agua entre las principales se encuentra la ambiental por su diversidad biológicas así como una fuente de agua, en la importancia social la protección ante crecidas sin embargo las económicas son las que mayor importancia tienen dentro de la comunidad de San Miguel Almaya, ya que son una fuente de abastecimiento de agua potable así como una fuente de agricultura y pesca y una fuente de ingreso económico mediante la recreación y el turismo.

Es importante recordar que dentro de la pérdida de hábitat natural la degradación es una de las más importantes, manifestándose a través de la eutrofización. En el capítulo se ha defendido el concepto de estado trófico así como de eutrofización; dicho concepto engloba los procesos naturales y antrópicos involucrados y como éste asume diferentes categorías definidas como ultraolitrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipereutrófico.

El estudio de las variables físicas, químicas y biológicas relacionadas con la eutrofización son el centro de atención de la presente investigación, dichas variables confieren al agua sus cualidades y a la vez permiten hacer una evaluación de la calidad del agua, así como una clasificación en el estado trófico.

CAPÍTULO II

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente capítulo se hará la descripción del área de estudio en la que se destacaran datos del medio físico, social y económicos de la microcuenca con el fin de tener un antecedente de como es el uso del entorno. Se presenta un análisis cualitativo y cuantitativo de las características físicas, sociales y económicas de la microcuenca El Muerto. Con el fin de dar una visión de la composición del medio físico de la microcuenca que aporta sus aguas a la Laguna de Almaya.

Este apartado está integrado de cuatro partes. En primer lugar, se habla de los ecosistemas acuáticos de montaña, ya que a nivel mundial se hace un reconocimiento de la importancia ambiental y social de su cuidado. México es un país lleno de elevación por lo cual se retomará el caso. En la segunda parte se dará a conocer rasgos de la zona de estudio, tal como su ubicación, nombre y características hidrológicas y físicas.

Posteriormente en la tercera parte se hará un análisis de los componentes socioeconómicos de servicios y vivienda de las poblaciones que pertenecen a la microcuenca.

Y por último el epílogo del capítulo. A lo largo del capítulo se emplearan diferentes tipos de fuentes de información, de tipo cuantitativo principalmente generadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), desagregados por Área Geoestadística Básica (AGEB) e Inventario Nacional de Viviendas.

3.1 La importancia de los sistemas montañosos

Los ecosistemas montañosos se encuentran en todo el mundo, desde el ecuador hasta los polos y ocupan aproximadamente la quinta parte de la superficie de los continentes y las islas (Price, 1998). De acuerdo con Chaverri (1998), las montañas se definen como promontorios o abultamientos de la corteza terrestre

que, debido a diversos factores tectónicos y volcánicos, se elevan a altitudes superiores a los 2 000 msnm.

A nivel mundial las zonas montañosas son valoradas por desempeñar un papel esencial en el ciclo del agua, sus principales funciones consisten en captar la humedad de las masas de aire para condensarla y posteriormente el agua precipite en forma de lluvia o nieve y así dar origen a cuerpos de agua de alta montaña o de ríos que den nacimiento a redes fluviales (Figura 15).

Las montañas además son almacenadoras de agua por lo cual en periodos de poca pluviosidad suministran de agua a poblaciones, cultivos e industrias que se encuentran tierras abajo (Price, 1998).

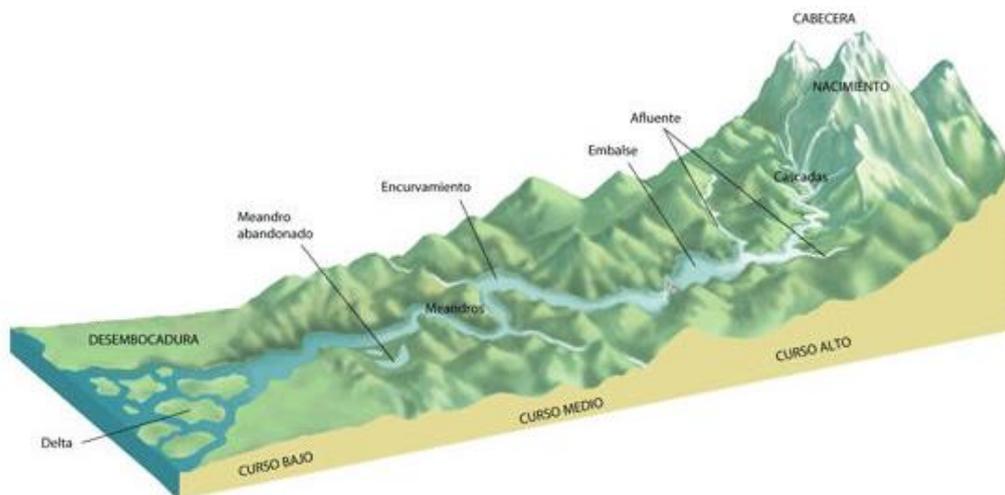


Figura 15. El agua de las montañas y su curso

Fuente: Ciencia geográfica (2014)

Otras de las funciones de las montañas de acuerdo con Liniger y Weingartner (1998), son:

- a) **Depósitos de agua:** todos los grandes ríos del mundo tienen sus cabeceras en tierras montañosas y más de la mitad de la humanidad depende del agua dulce que se acumula en las zonas montañosas. Estos depósitos de agua son esenciales para el sustento de la humanidad.

- b) **Diversidad de especies:** en las montañas existe gran número de alimentos silvestres como las setas, poseen más aves y muchos otros productos forestales no leñosos. Las montañas son también importantes como centros de diversidad de cultivos (Prince, 1998).

- c) **Abundancia de precipitaciones:** las montañas forman barreras para la circulación de las masas de aire. Al tener que elevarse, el aire se enfría, lo que da lugar a las precipitaciones. En las regiones semiáridas y áridas, sólo las tierras altas tienen pluviosidad suficiente para producir escorrentía y recargar las capas de agua subterránea.

- d) **Almacenamiento y distribución del agua en las tierras bajas:** las aguas captadas a altitudes elevadas fluyen por gravedad por la red fluvial o las faldas acuíferas subterráneas hacia las tierras bajas.

- e) **El agua como sustentadora de vida:** la relación entre el agua de las montañas y la producción mundial de alimentos es importante particularmente en climas áridos y semiáridos de las zonas tropicales y subtropicales donde se encuentran la mayoría de los países en desarrollo y más de la mitad de la población mundial. Además, el agua almacenada en los lagos y embalses de las montañas tiene un valor económico adicional como fuente potencial de energía hidroeléctrica.

De acuerdo con lo anterior, las montañas albergan gran diversidad ya que tienen ecosistemas que son privilegiados. Además, las montañas tienen una importancia determinante en el ciclo del agua, y favorecen la precipitación, la recarga de acuíferos y el almacenamiento de agua en lagos y ríos.

3.1.1 Los sistemas montañosos y los recursos hídricos en México

México es un país que tiene diversos sistemas montañosos y serranos, la orografía del país es muy accidentada, lo que influye directamente en las redes fluviales, y existencia de cuerpos de agua. De acuerdo con la Dirección General de Geografía de INEGI el país se dividió en 15 regiones o provincias fisiográficas (Figura 16), de las cuales las principales zonas montañosas y serranas son:

- a) Sierra madre occidental
- b) Sierra madre oriental
- c) Eje Neovolcánico

- d) Sierra madre del sur
- e) Cordillera centroamericana.

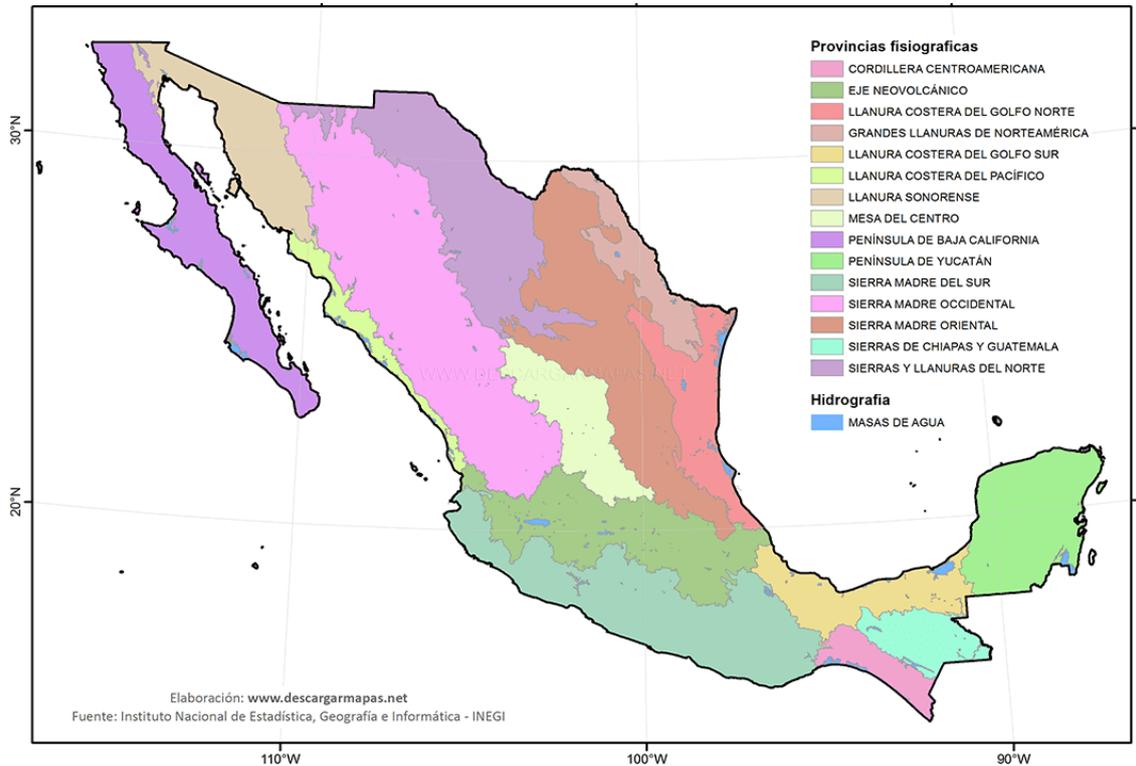


Figura 16. Provincias fisiográficas de México

Fuente: INEGI, 2001

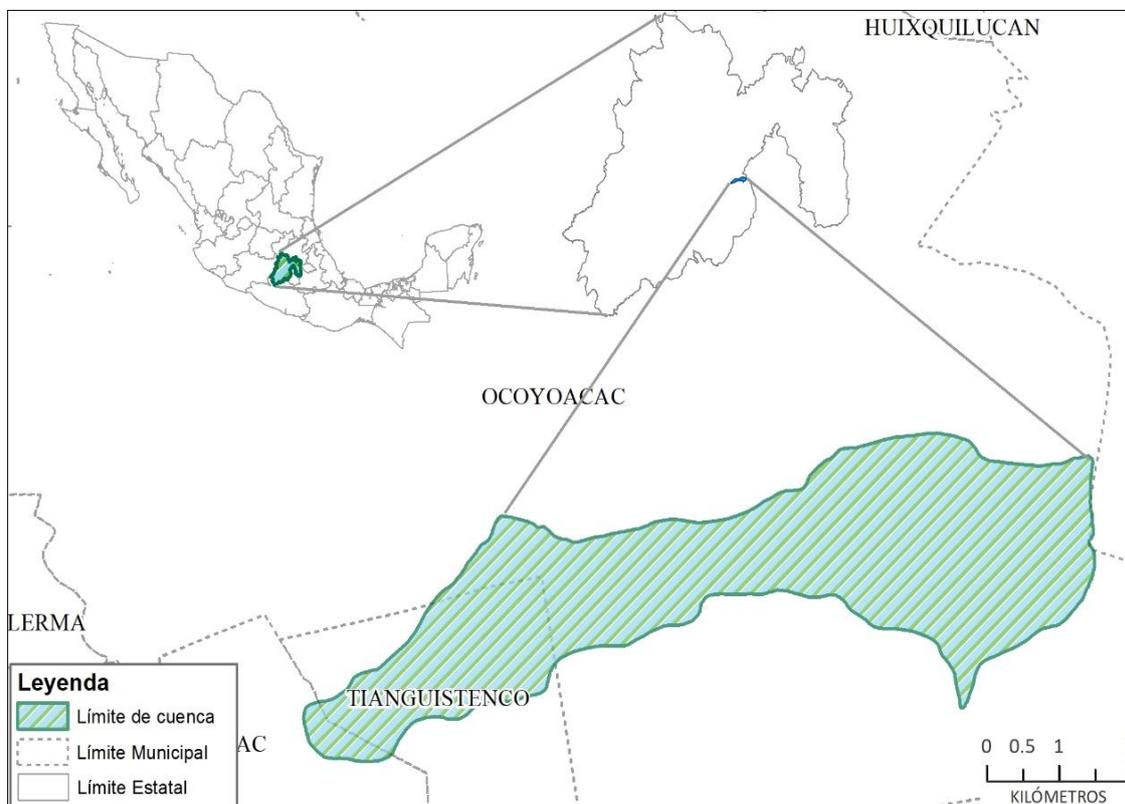
Esta diversidad de relieve la formación de diversas cuencas hidrográficas que se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH) y estas a su vez en se agrupan en 13 regiones hidrológico - administrativas (RHA). La zona de estudio pertenece a la RHA VIII Lerma-Santiago. Por sus dimensiones (menor a 3,000 hectáreas) se considera una microcuenca (Guerra, 2008). Lleva el nombre de El Muerto debido al nombre de su cauce principal.

3.2 Ubicación del área de estudio

La microcuenca nace dentro de las elevaciones de la Sierra de las Cruces, se encuentra a una altitud entre 2, 960 y 3,870 metros sobre el nivel del mar. Se ubica en el Estado de México y en una mínima porción la Ciudad de México, dentro de los municipios de Cuajimalpa, Capulhuac, Tianguistenco y Ocoyoacac, limita al oeste con la Zona Metropolitana del Valle de México.

El curso de sus ríos es hacia el sureste, pasando por la localidad de San Pedro Atlapulco, siguiendo su dirección para culminar su recorrido en la Laguna de San Miguel Almaya, la cual es nuestro principal objeto de estudio.

Esquema 1. Localización Geográfica



Fuente: Elaboración propia con base en el Marco Geoestadístico Estatal y CONAGUA (2016)

Las coordenadas máximas y mínimas de la microcuenca 19.25 y -99.44 (en grados decimales). Tiene un perímetro de 28.30 km. y una superficie de 1,946 ha (19.46 km²).

3.3 Descripción general de la cuenca

Esta descripción ayudara a entender el comportamiento del drenaje, su densidad y la morfodinámica de la cuenca.

3.3.1 Parteaguas.

Se define como las líneas divisorias naturales en el terreno, que parte de los puntos de elevación más altos de una montaña y que separan una cuenca de otra (Guerra y González, 2002).

Las diferencias de elevación dentro de la microcuenca se estima como media 3,260 msnm, esta medida se encuentra como punto divisorio dentro de la microcuenca donde el punto más alto corresponde a 3,870 msnm y el punto de vertiente del cauce principal es de 2,690 msnm.

3.3.2 Características de la microcuenca.

a) Forma de la microcuenca: la forma de la microcuenca es la configuración geométrica proyectada en el plano horizontal, existen diversos métodos para hacer su cálculo, sin embargo, el mayormente utilizado es “El factor de forma de Horton” el cual expresa la relación existente entre el área de la microcuenca y el cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la misma (Porqueras, 1985) el cual es expresado por:

$$R_f = \frac{A}{La^2}$$

Donde:

A: Área de la microcuenca en km²

La: Longitud axial expresada en km. La longitud axial se mide siguiendo el desarrollo longitudinal del cauce principal, hasta llegar a la divisoria de la cuenca en el punto más alejado.

Los rangos de valores se ajustan a lo propuesto por la Tabla 7 para definir una forma de la microcuenca.

Tabla 7. Valores interpretativos de la forma de Horton

Valores aproximados	Forma de la microcuenca
< 0.22	Muy alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

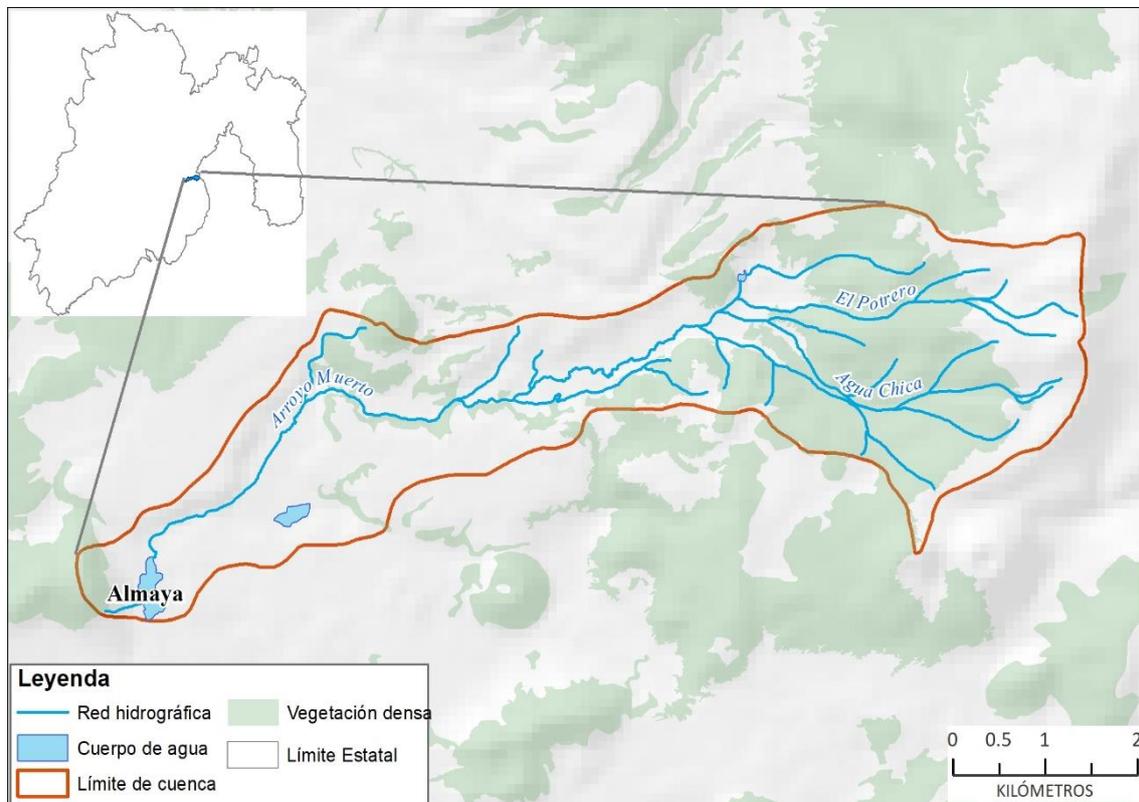
Fuente: Delgadillo y Moreno (2008).

Para el caso de la microcuenca El Muerto el cálculo es el siguiente:

$$R_f = \frac{19.46}{12.77^2} = 0.11$$

De acuerdo con la Tabla 7 la forma de la microcuenca es muy alargada ya que el resultado fue de 0.11 y entra entre los valores aproximados de <0.22 .

Esquema 2. Forma de la microcuenca El Muerto



Fuente: Elaboración Propia con base en cartas topográficas del Nevado de Toluca (E14A48) y Tenango de Arista (E14A47), shape corrientes, 2014

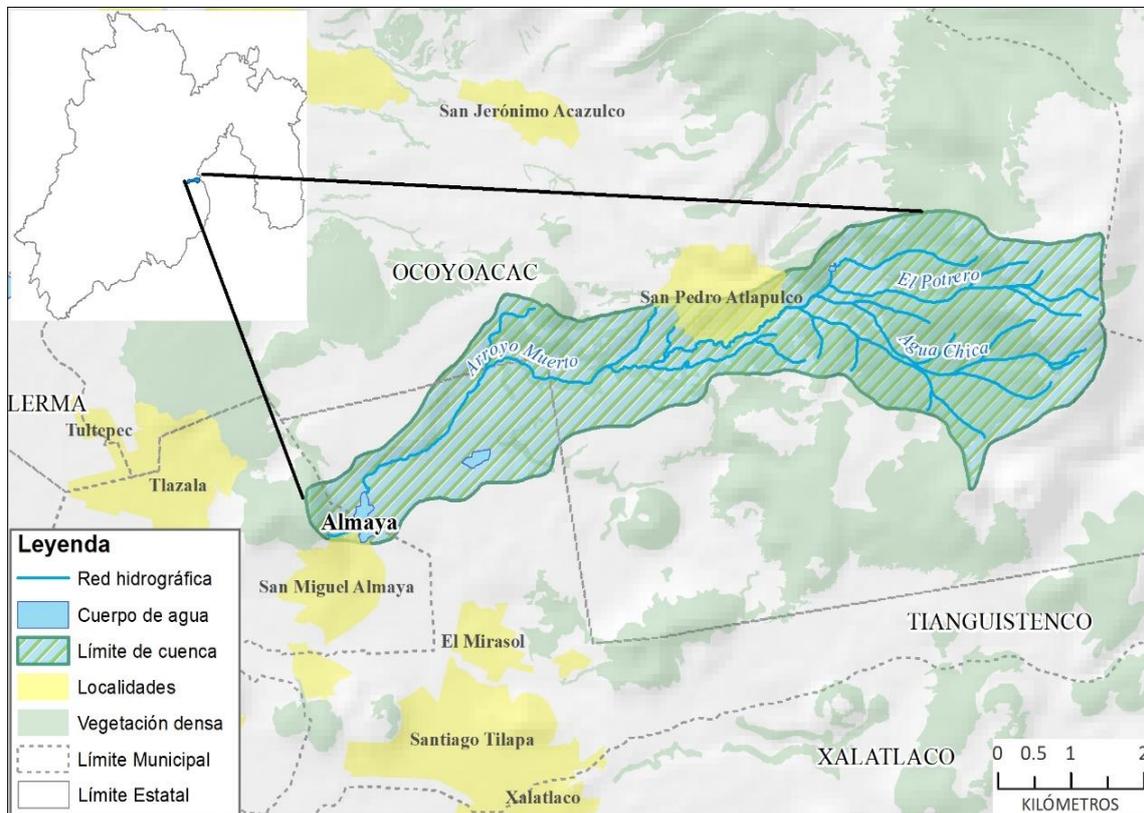
El escurrimiento resultante de una lluvia sobre una cuenca de forma alargada, no se concentra tan rápidamente, como en una cuenca de forma redonda; además, una cuenca con un factor de forma bajo (forma alargada) es menos propensa a tener una lluvia intensa simultáneamente sobre toda su superficie, que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor (Garay y Agüero, 2018).

Según Arango (2001), la red de drenaje se define como el arreglo que presentan las vías de drenajes perennes e intermitentes, que contribuyen a evacuar las aguas superficiales de la microcuenca. Para su análisis es necesario tomar en cuenta la distribución de la vegetación, el relieve, la geomorfología, etc.

Sin embargo, se han establecido patrones de drenaje y entre los más importantes se encuentran: dendrítico, paralelo, radial, rectangular y angular. Se puede identificar a la microcuenca El Muerto con un patrón de drenaje o forma de

ramificación de tipo dendrítico (Esquema 3). Este patrón es el que se presenta con más frecuencia, y se caracteriza por formar ramificaciones arborescentes con sus tributarios, los cuales se unen a la corriente principal formando ángulos agudos (Arango, 2001).

Esquema 3. Red de drenaje de la microcuenca El Muerto



Fuente: Elaboración Propia con base en cartas topográficas del Nevado de Toluca (E14A48) y Tenango de Arista (E14A47), shape corrientes, 2014

3.3.3. Cálculos para la Cuenca.

Las mediciones básicas para la microcuenca cuentan con distintos parámetros en relación con la forma y la longitud, tales como área, perímetro, longitud total, elevación, longitud del cauce principal, número de causas de orden 1, 2, 3...n. Los cuales para el caso de la microcuenca El Muerto están representados en la Tabla 8.

Tabla 8. Mediciones básicas para la microcuenca El Muerto

<i>Medición</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Área	A	19.46	km ²
Perímetro	P	28.30	km
Longitud total de cauces	Ct	41.88	km
Elevación de la cuenca	Hb	3,870	M
Longitud del cauce principal	Cm	12.77	Km
Número de cauces de 1 orden	N1	29	-
Número de cauces de 2 orden	N2	6	-
Número de cauces de 3 orden	N3	12	-
Número de cauces de 4 orden	N4	3	-

Fuente: Elaboración propia con base en Guerra y González (2002)

Para Guerra y González (2002) el índice de bifurcación o el orden de los cauces determina la mayor o menor rapidez de las ondas de crecida, lo que define, de alguna manera, el grado de peligrosidad de la cuenca. Los índices bajos entre 3 y 5 suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, lo que repercute directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas. Para el caso de la microcuenca El Muerto su índice es bajo ya que pertenece a un orden 4.

3.3.4 Pendiente del Cauce Principal.

Es la diferencia total de elevación del cauce principal dividida por su longitud total. Se expresa mediante la siguiente fórmula (Ingeniería civil, 2010):

$$S_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_c}$$

Dónde:

S_m = Pendiente del cauce principal
 H_{max} = Altura máxima
 H_{min} = Altura mínima
 L_c = Longitud total en metros

Para este caso el cálculo queda de la siguiente manera:

$$Sm = \frac{3,870 - 2,960}{12,770} = 0.071 \text{ m/m}$$

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua en la microcuenca depende de la pendiente de los canales fluviales. En cuanto mayor valor tome la pendiente, mayor será la velocidad del flujo y, por lo tanto, se convierte en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación (Ingeniería civil, 2010). Para el caso de la microcuenca el valor calculado para la pendiente del cauce es de 0.077 m/m indicando que el recorrido del cauce principal es muy suave.

3.3.5 Densidad de Corrientes (Drenaje).

De acuerdo con Allen (2007), la densidad de corrientes (1) es el número de corrientes perennes e intermitentes por unidad de área. Este parámetro proporciona información relacionada al grado de bifurcación de las corrientes, y está relacionado con la densidad de drenaje (2), la cual se define como la longitud de corrientes por unidad de área y está determinado por la siguiente formula:

$$1. \quad Ds = Ns/A$$

$$2. \quad Dd = Ls/A$$

Dónde:

Ns = Número de corrientes perennes e intermitentes.

Ls = Longitud total de las corrientes

A = Área de la cuenca.

Para el caso de la microcuenca El Muerto los cálculos quedan de la siguiente manera:

$$1. \quad Ds = \frac{50}{19.46} = 2.56 \text{ km/km}^2$$

$$2. \quad Dd = \frac{41.8}{19.46} = 2.14 \text{ km/km}^2$$

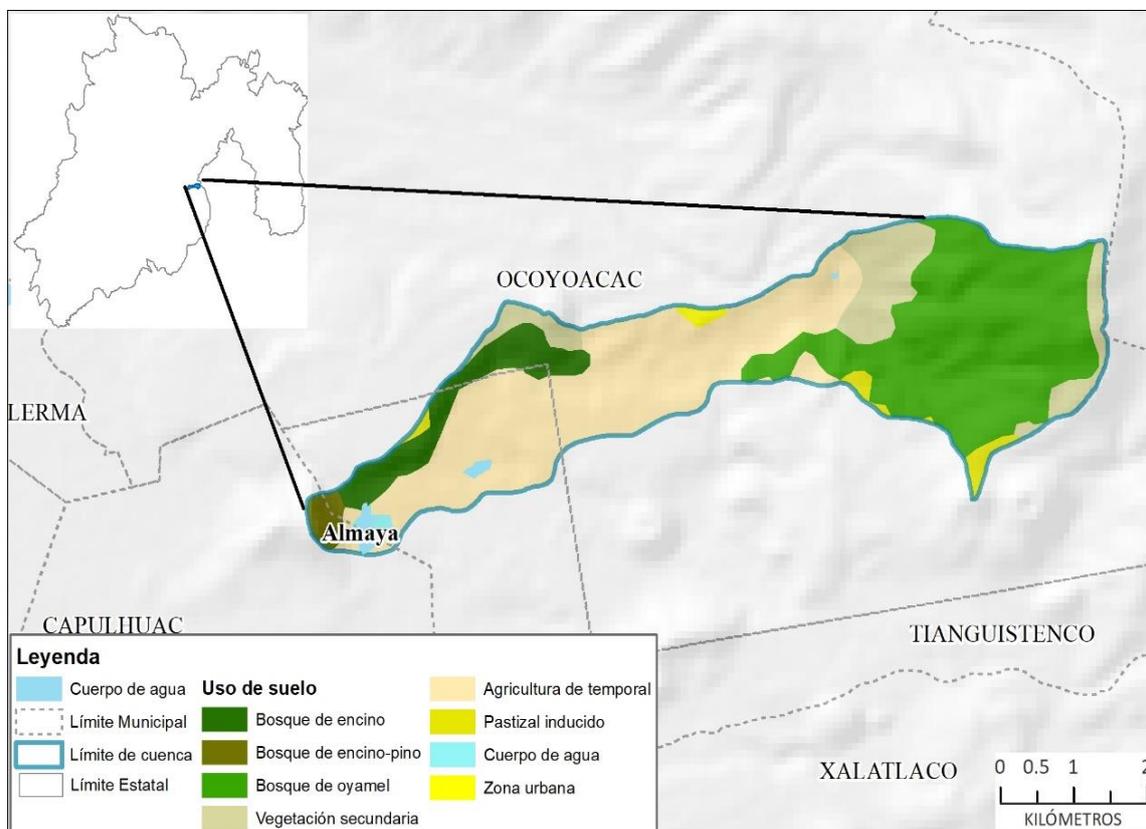
La densidad de drenaje es un parámetro que revela el régimen y la morfología de la cuenca ya que relaciona la longitud de los cursos de agua con el área total (Guerra y González, 2002), en el caso de la microcuenca El Muerto refleja un valor de densidad de drenaje bajo, este valor pudiera explicarse por existencia de cobertura boscosa en la parte alta, lo que refleja un bajo escurrimiento, como consecuencia de esto se presenta una alta infiltración, estabilidad del suelo y desarrollo de la cobertura vegetal.

3.4 Uso de suelo

El territorio junto con sus estructura naturales y artificiales es clasificado de acuerdo a la localización de actividades y procesos económicos (Alcaldía de Medellín, 2006), donde se identifican de acuerdo con INEGI principalmente el uso de suelo de tipo Forestal, Agrícola, Pecuario, Pastizal, Acuícola y Urbano.

El Esquema 4 se desarrolló a partir del mapa uso de suelo y vegetación serie VI, 2016 de INEGI, en donde se identificó el uso de suelo de tipo pastizal-pecuario, forestal, agrícola, cuerpos de agua y de tipo urbano dentro de la microcuenca El Muerto.

Esquema 4. Uso de suelo y Vegetación de la microcuenca El Muerto



Fuente: Elaboración Propia con base en INEGI serie VI, 2016.

El esquema muestra la distribución y localización de los diferentes tipos de uso de suelo presentes en la microcuenca lo cuales están resumidos en la Tabla 9.

Tabla 9. Tipo de uso de suelo en la microcuenca el Muerto.

<i>Tipo de uso de suelo</i>	<i>Área km²</i>	<i>Porcentaje de ocupación</i>
Pastizal/ Pecuario	2.3	11.6
Urbano	1.5	7.5
Forestal	11.5	57.8
Cuerpo de Agua	0.1	0.5
Agrícola	4.5	22.6
Área total	19.9	100

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar se encuentra el uso de suelo de tipo forestal, el cual ocupa más del 50% del área total de la microcuenca, se distribuye principalmente en la parte alta de microcuenca en donde se tiene las zonas de mayor pendiente. De acuerdo con la FAO (2015), las raíces de los bosques estabilizan las pendientes de las montañas, y proporcionan al suelo apoyo para impedir movimientos de masas, lo cual contribuye al suministro de agua limpia y garantiza el equilibrio en el ciclo hidrológico. En la Figura 17 se muestra parte de la zona forestal aledaña a la laguna de San Miguel Almaya.



Figura 17. Zona Forestal de la ladera Este de la Laguna de San Miguel Almaya.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 17 de Enero de 2018.

El uso de suelo de tipo agrícola ocupa el 22.6% del área total de la microcuenca, lo cual representa un área de 4.5 km², se distribuye de manera dispersa en la parte central, principalmente rodeando a las comunidades de San Miguel Almaya, San Pedro Atlapulco y Guadalupe Victoria. De acuerdo a fuentes orales los principales cultivos dentro de las microcuenca corresponden a maíz y haba, de manera ocasional o en mínimas extensiones se cultiva frijol y papa. En la Figura 18 se muestran parcelas dedicadas a la agricultura de maíz que colindan con el cuerpo de agua de estudio.



Figura 18. Agricultura de maíz en la ladera Este de la Laguna de San Miguel Almaya.
Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 17 de Enero de 2018.

El tercer lugar lo ocupa uso de suelo de tipo pastizal/pecuario con un 11.6% de ocupación, esta principalmente asociado a las zonas forestales por lo cual se considera que es de tipo inducido, este se distribuye de manera dispersa por toda la microcuenca, de igual manera ocupa gran parte del perímetro de la laguna de San Miguel Almaya. La figura 24 muestra la ladera noroeste de la laguna la cual tiene pastizales, en los cuales se observa con frecuencia el pastoreo de ganado.



Figura 19. Pastizales en la ladera Noroeste de la laguna de San Miguel Almaya

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 17 de Enero de 2018.

El tipo de suelo urbano ocupa el cuarto lugar con un 7.5% del área total. Dentro de la microcuenca se encuentra la comunidad de San Pedro Atlapulco y Guadalupe Victoria las cuales son atravesadas por el río principal. Y por último la comunidad de San Miguel Almaya la cual se ubica al borde de la laguna.

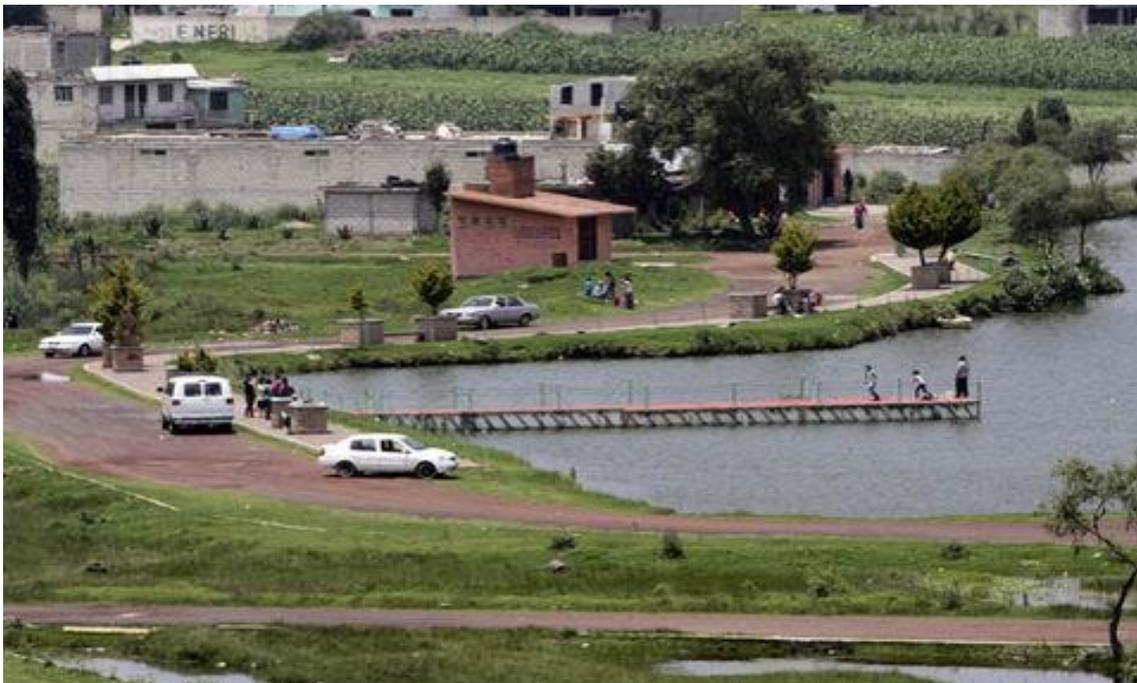


Figura 20. Comunidad de San Miguel Almaya colindante con la Laguna.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 17 de Enero de 2018.

Por último, en la microcuenca se encuentran tres cuerpos de agua; dos de menor área ubicados en la parte superior y central de la microcuenca y por último el cuerpo de agua de estudio, la laguna de San Miguel Almaya (Figura 21), ubicada en el exutorio de la microcuenca.



Figura 21. Laguna de San Miguel Almaya

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 17 de Enero de 2018.

La Laguna de San Miguel Almaya es el exutorio de la microcuenca, pero además es alimentada por un ojo de agua (Figura 22), el cual se encuentra confinado, con el fin de evitar la contaminación por desechos sólidos y su mal uso.



Figura 22. Ojo de agua de la Laguna de San Miguel Almaya.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 31 de Agosto de 2016.

3.5 Clima

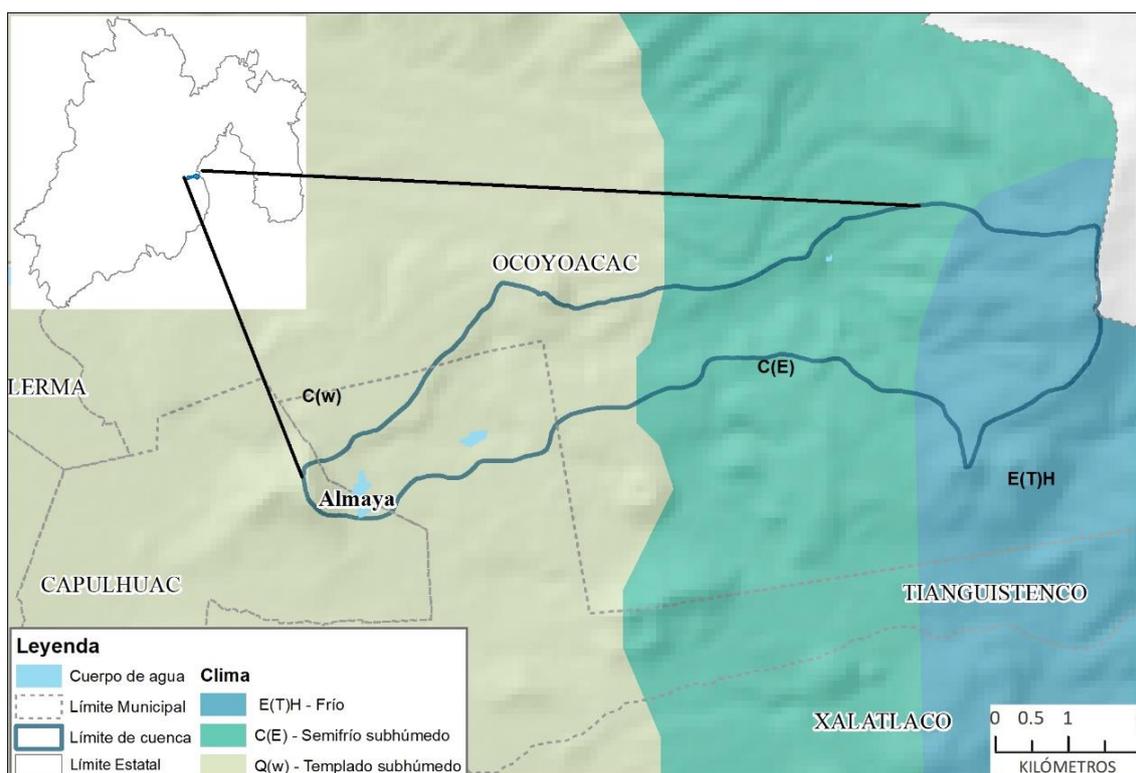
Según el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2014) el clima se refiere al conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto de la superficie de la tierra. El clima de una región está controlado por una serie de elementos como: temperatura, humedad, presión, vientos y precipitaciones, principalmente.

Estos valores se obtienen a partir de la recopilación en forma sistemática y homogénea de la información meteorológica, durante períodos que se consideran suficientemente representativos, de 30 años o más. Factores como la latitud, longitud, continentalidad, relieve, dirección de los vientos, también determinan el clima de una región.

En base a la carta climatológica 1: 500 000 de CONABIO (2008) en la microcuenca El Muerto se encuentran tres tipos de clima: Semifrío, Templado y Frío.

El Esquema 5, muestra la distribución de cada clima. El clima templado subhúmedo se encuentra en un 37.7% del territorio, es el tipo de clima con mayor extensión. Posteriormente con un 33.5% de área total se tiene el clima Semifrío Subhúmedo el cual se distribuye en la parte central de la microcuenca y por último con un 28.8% el clima Frío, que se ubica en la parte más alta y boscosa de la microcuenca El Muerto.

Esquema 5. Climatología de la microcuenca El muerto.



Fuente: Elaboración propia con base en Carta climatológica 1: 500 000 Conabio (2008)

De acuerdo a la Clasificación climática de Köppen modificada por García, (2004), las características de cada tipo de clima se resumen en:

- a) **Frío:** se identifica como “E(T) H” que indica que la temperatura del mes más cálido es inferior a 10°C y superior a los 0°C y la del mes más frío es inferior a -3°C.
- b) **Semifrío subhúmedo:** se identifica como “C(E)” se interpreta que el mes más cálido es superior a los 10°C y el mes más frío oscila entre 18°C y -3°C, tiene un invierno muy frío con una temperatura máxima menor a 10°C e inferior a los -3°C. Durante el mes más lluvioso, las lluvias de verano son 10 veces o más, que el mes más seco. La temperatura de 4 meses o más es mayor a 10°C y la temperatura del mes más cálido, es inferior a 22°C. Es isoterma ósea que la diferencia del mes más cálido y más frío es menos de 5°C y la temperatura del mes más caliente antes del solsticio de verano.
- c) **Templado subhúmedo:** se identifica como “C(W)” indica que la temperatura del mes más cálido es superior a los 10°C y el más frío menor

a 18°C y superior a -3°C. Llueve en verano y es seco en invierno, la temperatura de 4 meses o más es superior a 10°C y la temperatura del mes más cálido es inferior a 22°C. Es isoterma, la diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el más frío es de 5°C y la temperatura del mes más caliente es antes del solsticio de verano.

3.6 Componente demográfico

De acuerdo con el Inventario Nacional de Viviendas (2016), del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), la población de la microcuenca El Muerto corresponde a 4,206 habitantes. La población se encuentra distribuida (Tabla 10) en tres comunidades principalmente San Pedro Atlapulco, Guadalupe Victoria y San Miguel Almaya, así como en dos localidades Rancho Juan Dieguito y El Potrero.

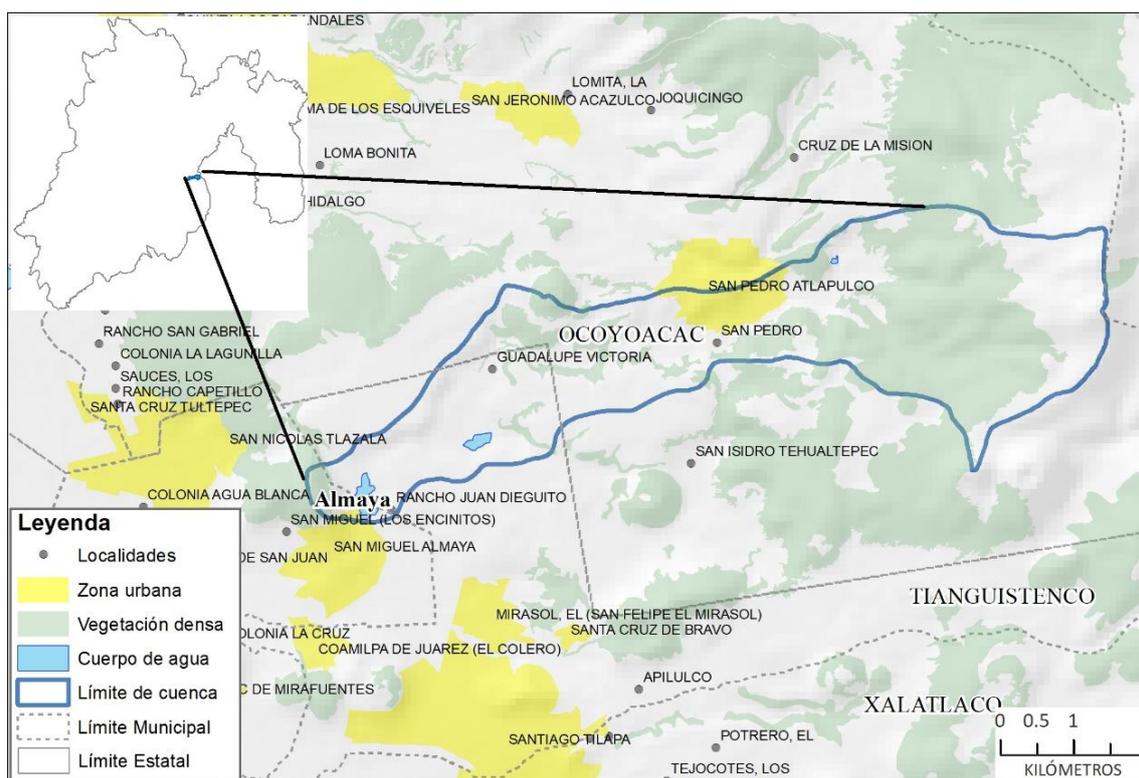
Tabla 10. Distribución de la población de la microcuenca el Muerto.

<i>Comunidad</i>	<i>Número de habitantes</i>	<i>Municipio</i>
San Miguel Almaya	461	Capulhuác
San Pedro Atlapulco	2,797	Ocoyoacac
Guadalupe Victoria	863	Santiago Tianguistenco
Rancho Juan Dieguito	81	Capulhuác
San Pedro	0	Ocoyoacac
El Potrero	4	Ocoyoacac
Total	4,206	

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2010) XIII Censo de Población y Vivienda

De acuerdo con lo anterior se puede observar que el 66.5% de la población de la microcuenca se concentra en la comunidad de San Pedro Atlapulco, la cual se ubica al centro de la microcuenca y pertenece al municipio de Ocoyoacac. Posteriormente el 20.5 % de la población se concentra en Guadalupe Victoria municipio perteneciente a Santiago Tianguistenco y el 11.9% se concentra en San Miguel Almaya ubicada en el exutorio de la microcuenca; el resto de la población se encuentra concentrada en las localidades.

Esquema 6. Distribución de la población de la microcuenca El muerto



Fuente: Elaboración Propia con base en cartas topográficas del Nevado de Toluca (E14A48) y Tenango de Arista (E14A47), shape corrientes, 2014

3.7 Componente socioeconómico

Las siguientes cifras fueron obtenidas del Censo de Población y Vivienda 2010 principales resultados por AGEB urbana del INEGI, en donde únicamente se obtuvieron los datos de las manzanas pertenecientes a la microcuenca de San Miguel Almaya y San Pedro Atlapulco, de la localidad de Guadalupe Victoria aún no existe registro.

3.7.1 Población económicamente activa

De acuerdo con (DANE, 2011) la población económica activa (PEI) corresponde a la fuerza laboral efectiva de un país, está constituida por individuos en edad de trabajar, que están laborando o buscan trabajo. Para el caso de la microcuenca la PEA total es de 1,428 habitantes, de los cuales 941 son hombres y 484 son Mujeres como se aprecia en la Figura 23:

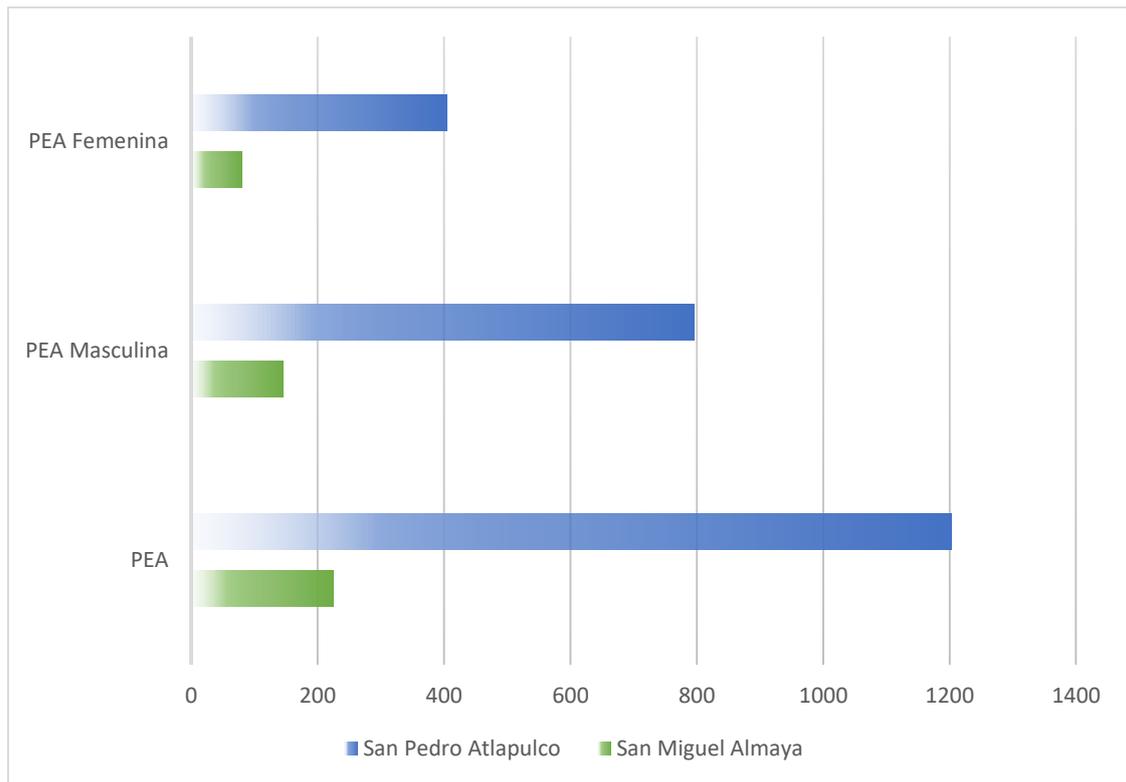


Figura 23. Población Económicamente Activa de la microcuenca El Muerto.

Fuente: Elaboración propia con base en Censo de Población y Vivienda 2010 principales resultados por AGEB urbana.

De manera generan en la Laguna de San Miguel Almaya se llevan a cabo prácticas de caza, pesca y captura, así como de recreación particularmente la realización de eventos acuáticos deportivos (Figura 24), sin embargo no existen registros por parte del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2010). Es importante resaltar que las actividades antes mencionadas benefician económicamente a la población y parte de la PEA se encuentra en estos sectores.

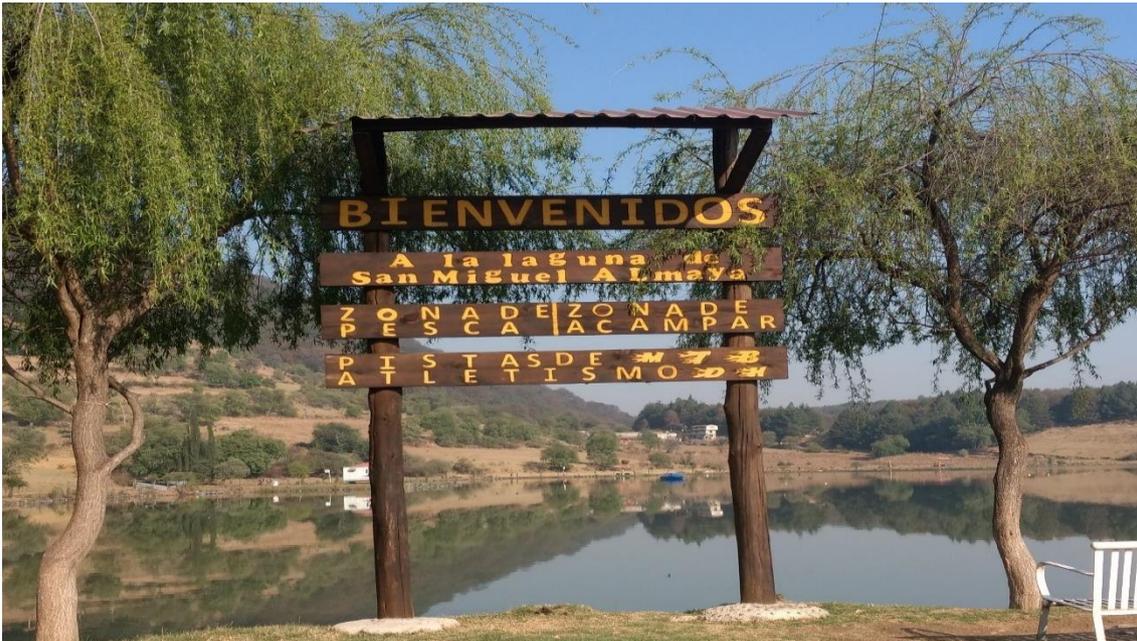


Figura 24. Letrero de actividades a realizar en la Laguna de San Miguel Almaya.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 7 Marzo de 2018.

3.7.2 Población económicamente inactiva

Corresponde a las personas que durante el periodo de referencia no realizaron ni tuvieron una actividad económica, ni buscaron desempeñar una. La población no económicamente activa (PNEA) es de 1,112 habitantes, de los cuales 966 pertenecen a la comunidad de San Pedro Atlapulco y 146 habitantes son de San Miguel Almaya (Figura 25).

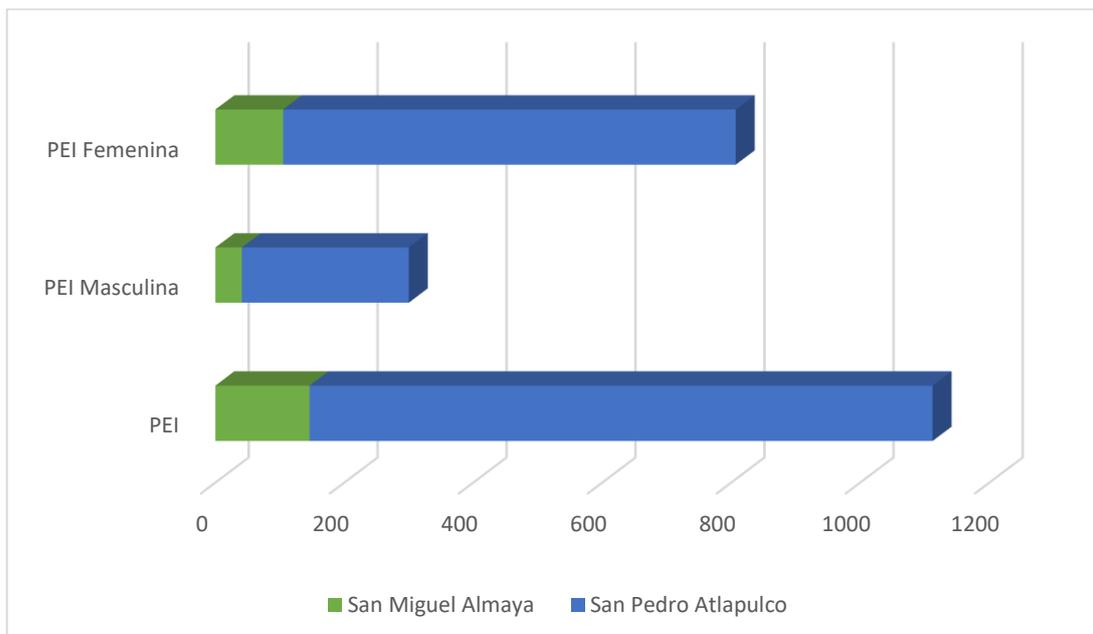


Figura 25. Población No Económicamente Activa de la microcuenca El Muerto

Fuente: Elaboración propia con base en Censo de Población y Vivienda 2010 principales resultados por AGEB urbana.

La PNEA representa el 26.4 % de la población total de la microcuenca sin contemplar a la población de Guadalupe Victoria, por lo cual más de una cuarta parte de la población en edad de trabajar no hace aporte económico alguno. A este grupo pertenecen estudiantes, amas de casa, pensionados, jubilados, discapacitados o incapacitados permanentemente para trabajar (DANE, 2011).

3.7.3 Población ocupada

De acuerdo con INEGI la población ocupada (PO) comprende a los trabajadores, empleados y obreros, eventuales o de planta, que en el mes de referencia trabajaron bajo control o dirección de la empresa en la entidad federativa o fuera de ésta (es decir en el estado donde se ubica la empresa o en cualquier estado de la República Mexicana) con una remuneración fija o determinada, cubriendo como mínimo una tercera parte de la jornada laboral. Incluye al personal con licencia por enfermedad, vacaciones, huelgas y licencias temporales con o sin goce de sueldo.

Según DANE (2011), la población ocupada es además aquellos habitantes que trabajan por lo menos una hora remunerada en dinero o en especie y los trabajadores familiares sin remuneración que trabajaron en la semana de referencia por lo menos 1 hora. La Figura 26, muestra la PO de la microcuenca:

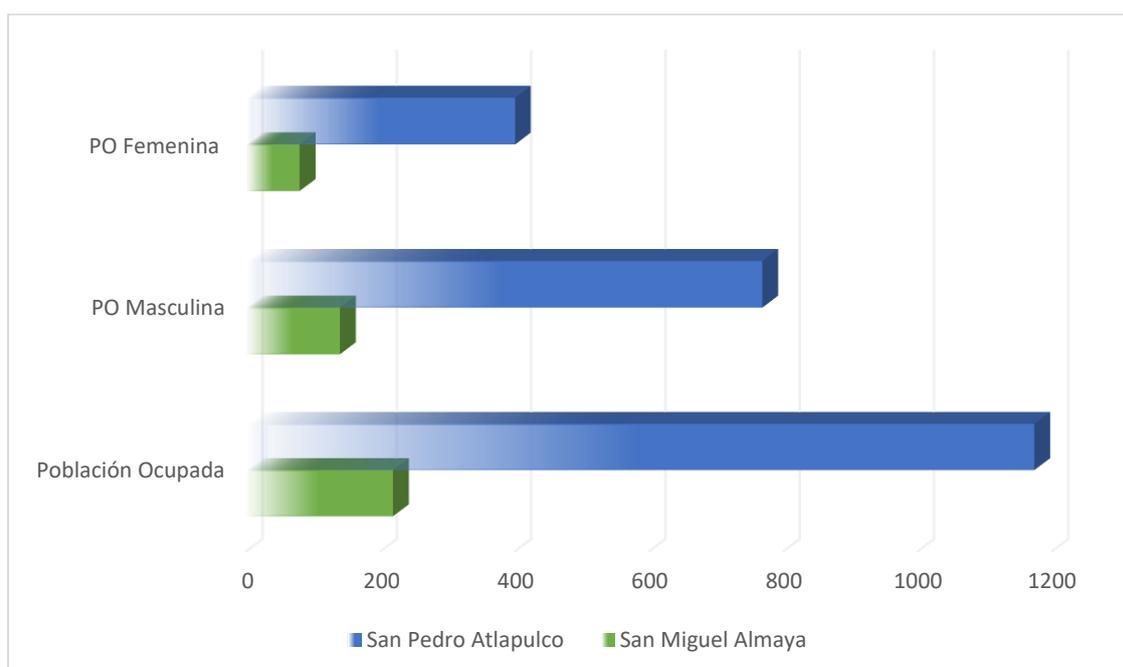


Figura 26. Población Ocupada de la microcuenca El Muerto

Fuente: Elaboración propia con base en Censo de Población y Vivienda 2010 principales resultados por AGEB urbana.

La PO de distribuye en 907 hombres y 479 mujeres sumando un total de 1,391 habitantes, de los cuales 1,173 habitantes son de San Pedro Atlapulco y únicamente 218 son de San Miguel Almaya.

3.7.4 Población desocupada.

Son aquellas personas que han trabajado antes por lo menos dos semanas consecutivas y que no están ocupadas en la semana de referencia, están en busca activa para incorporarse a alguna actividad económica. Además también incluye a todas aquellas personas que buscan empleo por primera vez (DENUE, 2011). En la Figura 27, se aprecia la población desocupada PD de la microcuenca:

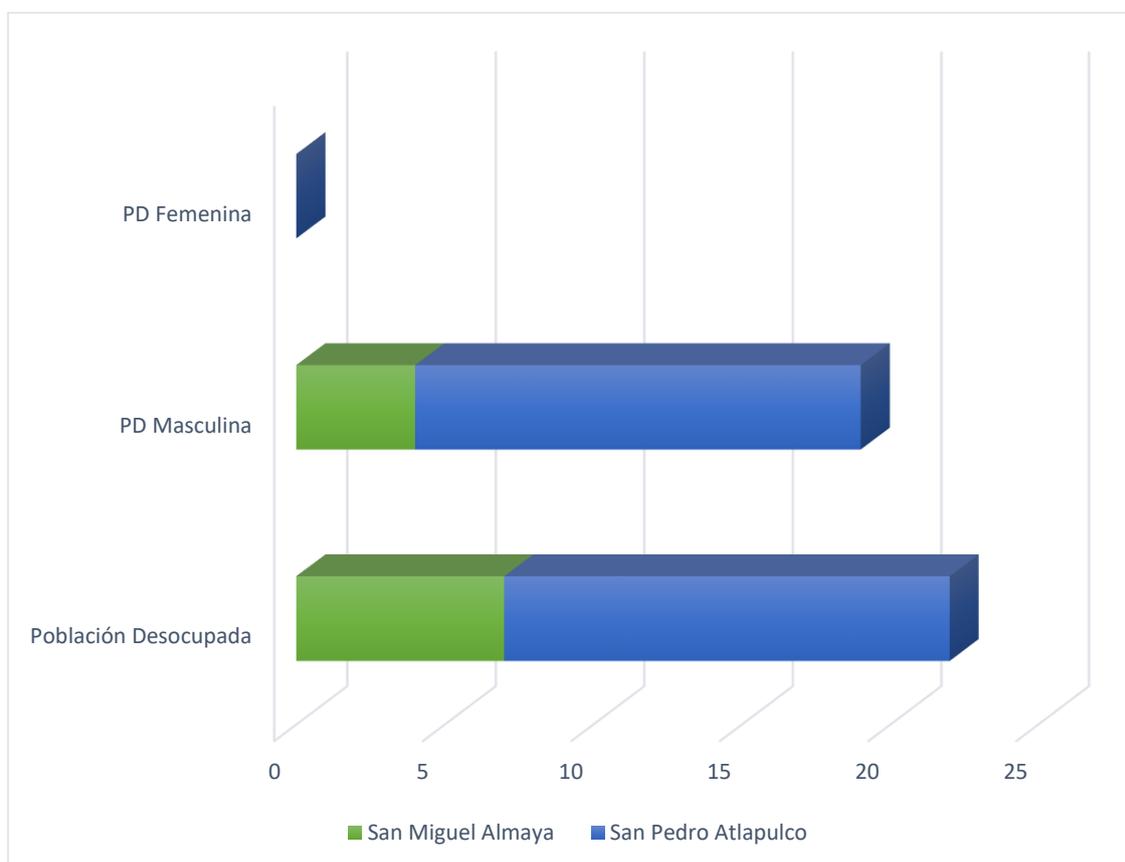


Figura 27. Población Desocupada de la microcuenca El Muerto

Fuente: Elaboración propia con base en Censo de Población y Vivienda 2010 principales resultados por AGEB urbana.

La PD es igual a 22 personas, de las cuales 19 son hombres y cero son mujeres. Con 15 habitantes San Pedro Atlapulco y con 7 habitantes San Miguel Almaya. La población desocupada representa un 0.5% de la población total de la microcuenca, sin considerar la PD de la localidad de Guadalupe Victoria.

3.8 Vivienda y Servicios

De los servicios contemplados en el Inventario Nacional de Viviendas (2016), del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) únicamente se documentará agua potable y drenaje.

La microcuenca El Muerto tiene un total de 1,137 viviendas las cuales se distribuyen en las principales comunidades de San Pedro Atlapulco, Guadalupe Victoria y San Miguel Almaya. En la Tabla 11 se muestra las viviendas particulares que tienen disponibilidad de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno.

Tabla 11. Viviendas con servicio de agua potable en la microcuenca El Muerto.

<i>Localidad</i>	<i>Número de viviendas con agua potable</i>	<i>Porcentaje de viviendas con agua potable</i>
San Miguel Almaya	106	97.8
San Pedro Atlapulco	627	92.6
Guadalupe Victoria	163	78.7
Total	896	89.7

Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Viviendas (2016)

La Tabla 12 muestra el total de viviendas dentro de la microcuenca que tienen drenaje conectado a la red pública, fosa séptica, barranca, grieta, río, lago o laguna.

Tabla 12. Viviendas con servicio de drenaje en la microcuenca El Muerto.

<i>Localidad</i>	<i>Número de viviendas con drenaje</i>	<i>Porcentaje de viviendas con Drenaje</i>
San Miguel Almaya	132	95%
San Pedro Atlapulco	764	92.5%
Guadalupe Victoria	241	83%
Total	1137	90.1%

Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Viviendas (2016)

Este segundo capítulo se ha dedicado principalmente a la caracterización de la zona de estudio, primeramente se hace mención a la importancias de las grandes elevaciones para el ciclo hidrológico, se resume que la mayor importancia de las montañas es el almacenamiento y distribución de agua tierras abajo. Para el caso de estudio de la investigación se identificó que el nacimiento

de la microcuenca El Muerto es en la Sierra de las Tres Cruces, siendo esta una de las elevaciones más importantes de la zona.

Posteriormente se identificó la forma de la microcuenca la cual resulta alargada y con un índice mínimo de escurrimiento, además, tiene un drenaje de tipo detrítico.

Otro factor a resaltar es el uso de suelo, el cual es mayormente de tipo forestal ubicándose principalmente en las partes altas y de mayor pendiente de la microcuenca, por lo cual la erosión se ve disminuida, sin embargo el segundo uso es la agricultura la cual podría tener un aporte importante de nutrientes favoreciendo la eutrofización de la laguna.

Teniendo como base las características de la zona de estudio el siguiente capítulo pretende establecer la metodología en la cual se basaran los análisis de agua, considerando las herramientas y recursos disponibles.

CAPÍTULO III

4. METODOLOGÍA

El presente capítulo tiene como objetivos establecer la metodología a utilizar para este trabajo de investigación. El diseño de investigación a trabajar es cuasi-experimental, transversal. Este método es particularmente útil para estudiar problemas en los cuales no se puede tener control absoluto de las situaciones, pero se pretende tener el mayor control posible (Bono, 2016), como lo son las variables de P y N ya que su concentración total depende de diversos factores. En cuanto al diseño de investigación transversal se refiere a la recolección de datos en un solo momento, en un tiempo único, para el caso del estudio a realizar en la laguna de San Miguel Almaya las muestras fueron colectadas en dos épocas del año, en época de estiaje y lluvias, durante la mañana con el fin de evitar que el aumento de temperatura interfiera en las mediciones.

El capítulo se divide en cuatro apartados, inicialmente se muestra un esquema en él se explica la metodología general del proyecto, en el segundo apartado se describen las mediciones de campo, el número de variables a medir, equipo a utilizar y técnicas de muestreo. En seguida se presentan los métodos empleados para el análisis en laboratorio, para la obtención de la concentración de nutrientes en la columna de agua y la clorofila-a. Y por último se tiene el epílogo del capítulo.

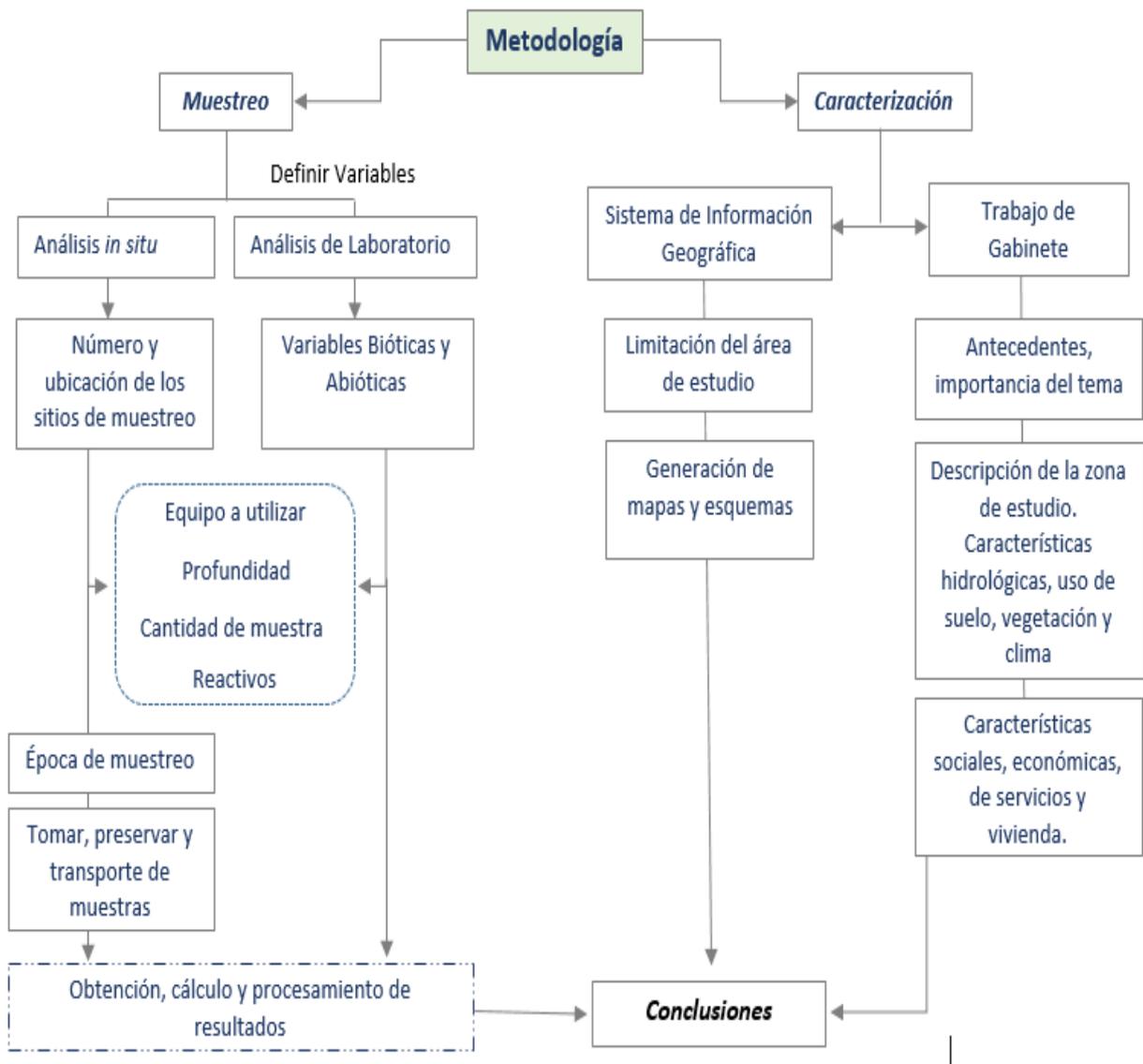


Figura 28. Metodología para la determinación del estado trófico

Fuente: Elaboración propia

La Figura 28, muestra de manera concreta la manera en la que se organizó este estudio, como se mostró anteriormente para la generación del marco conceptual como para la caracterización de la zona de estudio se realizó un trabajo de gabinete, el cual nos permitió dar a conocer datos importantes del tema así como de la microcuenca a la que pertenece la Laguna de San Miguel Almaya. La generación de esquemas donde se muestra la zona de estudio ha permitido hacer más visual la realidad de la microcuenca.

La parte de la caracterización será más adelante relacionada con los resultados obtenidos a partir de los muestreos.

A continuación se muestran las metodologías a utilizar para el análisis de muestras de la Laguna de San Miguel Almaya. Primeramente se establecen los parámetros a medir en campo así como el número de muestras a tomar, esto con base a recorridos previos en la zona de estudio, así como de la disposición de dispositivos para mediciones *in situ*.

Posteriormente de manera general la norma NMX-AA-026-SCFI-2010 y NMX-AA-029-SCFI-2001 propone un aproximado de tres diferentes métodos para obtener los resultados requeridos, sin embargo se eligieron las metodologías que mejor se adaptan a los materiales y los recursos que se tienen para esta investigación. Para el caso del análisis de clorofila se realizó una extensa investigación y pruebas previas que permitieran asegurar la viabilidad de los resultados.

Se tomaron muestras en dos épocas de año: en época de estiaje y en época de lluvias. Se ubicaron 9 puntos en el cuerpo del agua, recogiendo agua superficial y a profundidad de acuerdo a visor de Disco Secchi. La Tabla 13, muestra los parámetros medidos en campo a partir de las muestras de agua colectadas.

Tabla 13. Parámetros medidos en las muestras de agua.

<i>Parámetro</i>	<i>Técnica</i>
pH	CONDUCTRONIC PH 15
Temperatura del agua (°C)	Disolve Oxigen /°C Meter DO 100 Series
Oxígeno Disuelto (mg/L)	Disolve Oxigen /°C Meter DO 100 Series
Conductividad μ	CONDUCTRONIC CL8
Transparencia (cm)	Disco Secchi
Nitrógeno Total Kendal (mg/L)	Colorimetría
Fósforo Total (mg/L)	Colorimetría
Clorofila a	Colorimetría
Clorofila b	Colorimetría
Clorofila c	Colorimetría

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros se obtuvieron de dos formas, una de ellas fue el método *in situ* el cual consiste en tomar las mediciones en el lugar con la intención de conservar las concentraciones lo más cercanas a las existentes en el cuerpo de agua. El segundo método se llevó a cabo en laboratorio a través del uso de reactivos.

4.1 Mediciones in situ

Las muestras fueron colectadas el 7 de marzo y el 23 de julio del año 2018 las cuales corresponden a la época de estiaje y lluvias respectivamente. Los sitios de muestreo fueron seleccionados con el fin de abarcar los puntos de mayor interés, tales como el exutorio de la laguna, la cercanía a un ojo de agua, la parte central del cuerpo de agua así como zonas cercanas al pastoreo y de casas habitación.

De los 9 puntos de interés se obtuvieron dos muestras, una de manera superficial y otra a la profundidad en centímetros correspondientes al visor del Disco Secchi, cada una de aproximadamente 500 ml (Figura 29), las cuales fueron almacenadas en envases de 1 litro a bajas temperaturas, previamente lavados con jabón libre de fosfatos.



Figura 29. Toma de muestra a profundidad con la Botella Van Dorn.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 23 de julio.

Las determinaciones de variables llevadas a cabo en el cuerpo de agua fueron mediante sensores de campo (CONDUCTRONIC PH15, DO 100 Series y CONDUCTRONIC CL8), también se midió la transparencia del agua a partir de la profundidad del visor del Disco Secchi (Figura 30) la cual se explica a continuación.

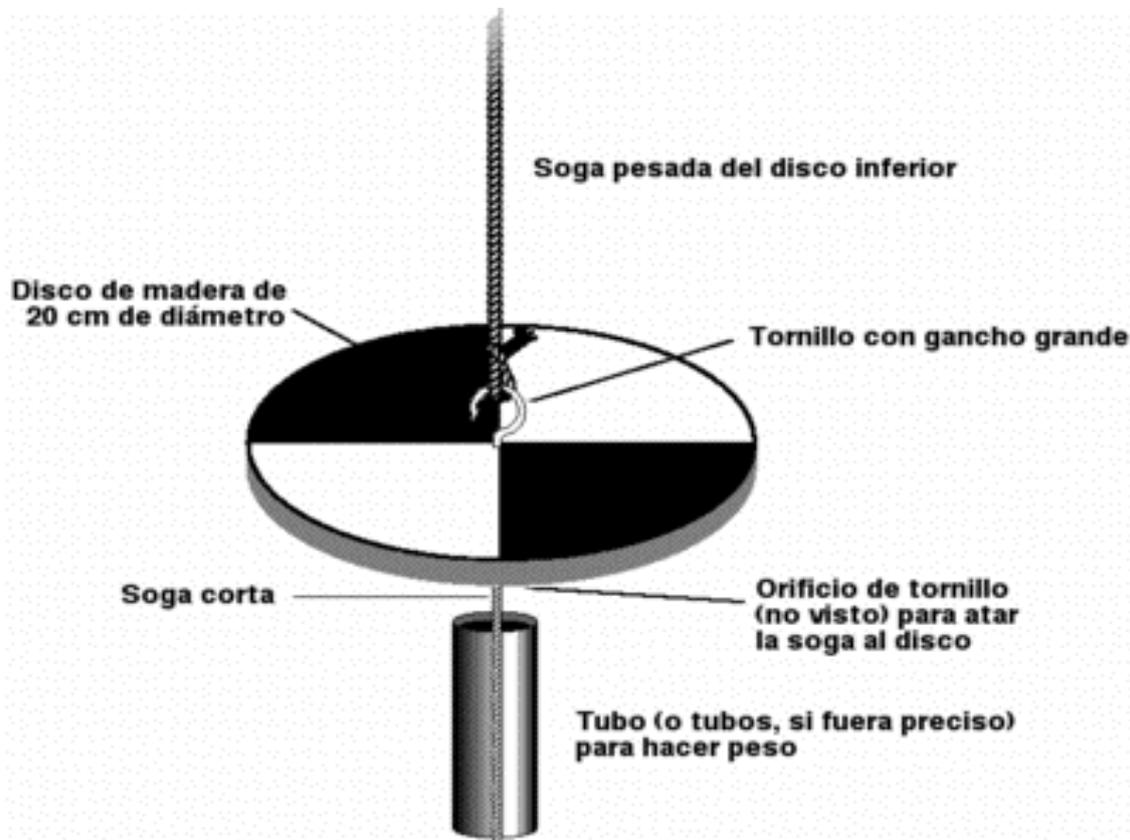


Figura 30. Ejemplo de Disco Secchi

Fuente: Wordpress (2013).

Una vez elegido el punto de muestreo se deja deslizar el Disco Secchi de manera vertical en la columna de agua (Figura 31). El disco tiene dos caras; una totalmente blanca utilizada de manera frecuente en zonas marítimas y una cara que tiene la combinación de negro y blanco utilizado en lagos y lagunas. El color negro nos permitirá tener mayor visión.



Figura 31. Introducción del Disco Secchi en la columna de agua.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 23 de julio.

En el momento en el que el Disco Secchi se pierde de vista (Figura 32), se marca el punto en la cuerda y se mide, posteriormente se toma la muestra de agua a dicha profundidad.



Figura 32. Disco Secchi en la columna de agua.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 23 de julio

Con el propósito de facilitar el manejo de la información obtenida *in situ* se generó la Tabla 11, en la que se tienen las variables que se calcularán de manera directa en las muestras de agua.

Tabla 14. Hoja con las variables a medir *in situ*.

<i>Muestra</i>	<i>pH</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Oxígeno Disuelto (mg/L)</i>	<i>Conductividad μ</i>	<i>Transparencia con el visor de Disco Secchi (cm)</i>	<i>Coordenadas y ubicación</i>
1 ^a						
1b						
2 ^a						
2b						
N a...						
N b...						
Promedio						

Fuente: Elaboración propia

4.2 Mediciones en laboratorio.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de aguas del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal (ICAMEX). De las cuales se obtuvo Fósforo total, Clorofila a, b y c. y de manera adicional se seleccionaron algunas muestras para la medición de Nitrógeno total Khendal con el fin de demostrar lo dicho por Ibarra (2006):

“En algunos ecosistemas el factor limitante para la producción primaria es el fosfato, como sucede en la mayoría de los lagos de agua dulce, pero en muchos mares el factor limitante es el nitrógeno”

Remembrando el principio del factor limitante el cual se basa en que la tasa de crecimiento algal será restringida por el elemento que se encuentre presente en el medio acuático en menor concentración respecto a la proporción requerida (Guzmán, 1997).

4.2.1 Medición de Fósforo mediante el Método de Cloruro Estañoso

De manera general el Fósforo se encuentra en las agua de manera soluble, particulada de detritos o en los organismos acuáticos y en los sedimentos de los cuerpos de agua. El método se basa en la reacción del Fósforo contenido en la muestra como Ortofosfato con el Ácido Molíbdico para formar el Ácido 12-Molibdofosfórico.

El método es retomado de la norma mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001 análisis de agua, medición de Fosforo total en aguas naturales. (CONAGUA, 2001), esta metodología es aplicable cuando el contenido de fósforo en las muestras se encuentra entre las concentraciones de 0,01 mg P/L a 6,0 mg P/L.

Reactivos:

- Agua destilada
- Ácido nítrico concentrado(HNO_3)
- Solución extractiva (Merlich)
- Cloruro estañoso (SnCl_2)
- Molibdato de amonio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$)
- Espectrofotómetro equipado con celda de 1 cm de paso óptico de luz

*Solución de cloruro estañoso: agregar a un vaso de precipitado 25 mL de agua destilada, 5 mL de ácido nítrico concentrado y 0.04 g de cloruro estañoso.

Procedimiento:

Desarrollo de color de la muestra: tomar una alícuota de 21 mL de la muestra y depositar en un vaso de precipitado de 50 mL. Para el estándar y el blanco tomar un alícuota de 21 mL de agua destilada. Aparte tomar 50 microlitros de solución patrón para Fósforo y adicionar a la muestra estándar.

Posteriormente agregar a todas las muestras 1 mL de solución extractiva, 1mL de molibdato de amonio y 1mL de solución de cloruro estañoso.



Figura 33. Solución Merlich en muestras de agua.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 25 de julio.

La intensidad del color depende de la temperatura ambiente de la disolución final, incrementándose ésta alrededor de 1 % por cada grado centígrado más de temperatura ambiente. Por lo que es importante realizar las mediciones a la misma temperatura.



Figura 34. Desarrollo de color azul en las muestras.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 8 de Marzo.

Medición del color: la medición debe de efectuarse después de 10 min de haber desarrollado el color, pero antes de 12 min, se debe utilizar el mismo intervalo de tiempo para todas las mediciones y medir la intensidad de color espectrofotométricamente a 660 nm.



Figura 35. Espectrofotómetro a 660 nm.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 8 de marzo.

4.2.2 Medición de Nitrógeno total Kjeldahl

Los compuestos nitrogenados se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. Las fuentes de nitrógeno incluyen además de la degradación natural de la materia orgánica, fertilizantes, productos de limpieza y tratamiento de aguas potables (CONAGUA, 2010). La metodología es en base a la norma mexicana NMX-AA-026-SCFI-2010 análisis de agua, medición de Nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales.

Reactivos:

- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Mezcla de selenio
- Zinc (Zn)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Ácido bórico al 4% (H_3BO_3)
- Indicador Mixto

Procedimiento

Digestión: en un matraz de bola de 800 mL agregar perlas de ebullición, 50 mL de muestra y 50 mL de agua destilada, posteriormente agregar lentamente 10 mL de Ácido sulfúrico concentrado y 0.4 gr de mezcla de selenio. Llevar a ebullición en el sistema de digestión tipo Kjeldahl por 60 a 90 min.



Figura 36. Digestión de las muestras

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 12 de marzo.

Destilación: dejar enfriar la muestra y agregar 300 ml de agua potable. Agregar 50 ml de Hidróxido de sodio y 0.4 gr de Zinc. Para la recolección agregar 50 mL de Ácido bórico en un matraz Erlenmeyer. Conectar el matraz Kjeldahl al condensador y llevar a ebullición hasta recopilar 200 -250 mL de muestra.



Figura 37. Destilación de muestras.

Fuente: tomada por Diana Maldonado el 26 de julio.

Titulación: Agregar 3 gotas de indicador mixto, la muestra virara a color verde. Posteriormente agregar Ácido sulfúrico hasta que la disolución vire de color gris rosa. Registrar el volumen gastado de ácido.



Figura 38. Titulación de las muestras

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 13 de marzo.

Cálculos: Para obtener el Nitrógeno total presente en las muestras es necesario desarrollar la siguiente formula:

$$NT = \frac{ml H_2SO_4 (f \times N) \times 1\,000\,000}{ml Muestra}$$

Donde:

- NT: Nitrógeno total Kjeldahl
- ml H₂SO₄: mililitros gastados de H₂SO₄
- f: factor 0.014
- N: normalidad del ácido 0.103
- ml de muestra: Mililitros de muestra 50 mL

4.2.3 Medición de Clorofila mediante el método Tricomático

La molécula de Clorofila está formada por un núcleo porfirínico de cuatro anillos pirrol, en el centro se sitúa un átomo de Mg, además posee un grupo fitol rico en grupos metilo que forman las cadenas laterales. Los diferentes tipos de Clorofila se diferencian porque la clorofila A posee un grupo metilo y la clorofila B un grupo aldehído, la clorofila C tiene una estructura semejante pero carece de un grupo fitol.

Las Clorofilas son pigmentos fotosintéticos ubicados en los tilacoides de los cloroplastos de organismos autótrofos como cianobacterias, algas y plantas superiores. Su función es transformar la energía lumínica en energía química lo que se conoce como proceso de fotosíntesis.

Para el caso de la determinación de Clorofila a, b y c se basó en la metodología sugerida por Paches, (2016), la cual es una modificación de la metodología APHA, (2012).

Materiales o reactivos:

- Membranas filtrantes de nitrocelulosa de 47 ml de diámetro y 0.45 micras de tamaño de poro
- Bomba de vacío
- Papel aluminio
- Tubos de polietileno
- Cetona al 90%
- Centrifugadora
- Espectrofotómetro y cubetas de cuarzo de 1 cm de longitud de paso

Procedimiento:

Filtración de la muestra: se toman 200 ml de la muestra, se coloca el papel filtro en un crisol de Gooch y se comienza a filtrar con ayuda de la bomba de vacío.



Figura 39. Filtración y obtención del material particulado de la muestra.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 13 de marzo.

Una vez que se termina de filtrar la totalidad del agua, se retira el filtro y se dobla con el material particulado al interior, se introduce en los tubos de polietileno, posteriormente envolver el tubo en papel aluminio para evitar la fotodegradación y refrigerar mínimo dos horas para romper las células y facilitar el proceso de extracción.

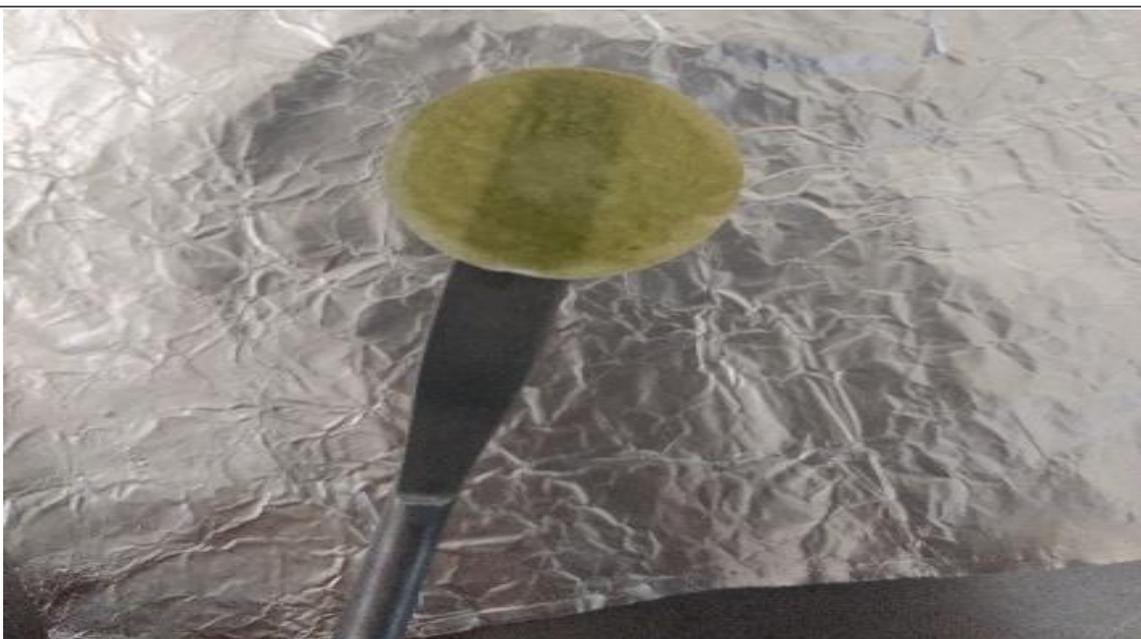


Figura 40. Papel filtro con material particulado.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 13 de marzo.

Extracción del pigmento: se adiciona 6mL de cetona al 90%. Para separar el material particulado y extracto líquido se centrifuga a 2,500 revoluciones por minuto durante cinco minutos.



Figura 41. Extracción de pigmento de la muestra.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado el 14 de marzo

Determinación espectrofotométrica: medición de blanco a la misma absorbancia de las demás muestras. Los diferentes tipos de Clorofilas absorben a diferentes ondas del espectro visible.

Tabla 15. Porcentaje de absorbancia para los diferentes tipos de clorofila

Clorofila	Absorbancia (nm)
A	630
B	647
C	664
Observancia no medida de los pigmentos	750

Fuente: Elaboración propia

A continuación en la tabla 16 muestra el orden en que deberán registrarse los resultados del análisis de las muestras, con el fin de que los posteriores cálculos sean ordenados y sencillos. Donde (a) corresponder a las muestras superficiales y (b) a las mediciones de profundidad.

Tabla 16. Hoja con los valores esperados a obtener de clorofila a, b, c y a 750 nm en las muestras

Muestra		Clorofila A 630nm	Clorofila B 647nm	Clorofila C 664nm	Clorofila 750nm	Clorofila
B						
St	6					
1 ^a	6					
1b	6					
2 ^a	6					
2b	6					
3 ^a	6					
3b	6					
N a...	6					
N b...	6					

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en el espectrofotómetro de deben hacer los siguientes cálculos con el fin de obtener la clorofila a, b y c total de las muestras.

Cálculos:

- $$Cl a \left(\frac{mg}{m^3}\right) = Ve \times \frac{[(11.85((A_{664} - A_{750})) - (1.54((A_{647} - A_{750}))) - (0.08((A_{630} - A_{750})))]}{(V_f \times L)}$$
- $$Cl b \left(\frac{mg}{m^3}\right) = Ve \times \frac{[(21.03((A_{647} - A_{750}))) - (5.43((A_{664} - A_{750}))) - (2.66((A_{630} - A_{750})))]}{(V_f \times L)}$$
- $$Cl c \left(\frac{mg}{m^3}\right) = Ve \times \frac{[(24.52((A_{630} - A_{750}))) - (1.67((A_{664} - A_{750}))) - (7.60((A_{647} - A_{750})))]}{(V_f \times L)}$$

Donde:

A₇₅₀= Densidad óptica del extracto a 750 nm

A₆₆₄= Densidad óptica del extracto a 664 nm

A₆₄₇= Densidad óptica del extracto a 647 nm

A₆₃₀= Densidad óptica del extracto a 630 nm

Ve= Volumen del extracto de acetona (mL)

V_f= Volumen de agua filtrada (L)

L= Longitud de paso de la cubeta (1 cm)

Las anteriores metodologías fueron las más adecuadas para la implementación en el estudio, debido al conocimiento que ya se tiene en su aplicación en el laboratorio de aguas de ICAMEX. Ninguna metodología fue modificada, estas fueron aplicadas tal y como dicen las normas mexicanas, como se dijo anteriormente para el caso de la Clorofila se hicieron pruebas antes.

Teniendo las metodologías a aplicar y las hojas de registro de datos, el siguiente capítulo muestra los resultados obtenidos de aplicar las metodologías durante la época de estiaje y posteriormente en la época de lluvias. Así como una discusión de los datos obtenidos.

CAPÍTULO IV

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como parte del cumplimiento de los objetivos establecido al inicio de la investigación, el presente capítulo tiene como fin exponer los valores obtenidos a partir de la implementación de las metodologías correspondientes para las mediciones *in situ* y en laboratorio. En donde (a) corresponde a resultados de las muestras superficiales y (b) a las muestras de profundidad.

El capítulo se divide básicamente en tres apartados, el primero hace referencia a los resultados obtenidos en las mediciones en campo para ambas épocas, posteriormente en la segunda parte se exponen los resultados obtenidos en laboratorio para Fósforo total, Nitrógeno total y Clorofila.

La tercera parte es dedicada a la discusión de resultados así como la creación de una matriz de correlación en la que se explica el significado de los resultados obtenidos.

5.1 Resultados *in situ*

A partir de la utilización de los sensores de campo y de la hoja previamente elaborada se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 17) para las mediciones de estiaje.

Tabla 17. Valores obtenidos *in situ*.

Muestra	pH		Temperatura (°C)		Oxígeno Disuelto (mg/L)		Conductividad μ		Transparencia con el visor de Disco Secchi (cm)	
	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
1a	10.44	9.77	19.3	26.1	12.7	16.99	181	142.7		
1b	10.11	-	18.8	-	21.4	-	191	-	33	-
2a	10.61	9.95	16.9	23.7	11.08	18.19	170	151		
2b	10.61	10.1	17.1	23.4	11.4	18.11	102	149.7	47	46
3a	10.46	10.13	17.7	25	12.34	15.25	159	147		
3b	10.85	10.22	17.2	24.1	14.63	14	158	149.5	51	53
4a	10.68	10.27	17.9	21.3	12.58	15.17	153	154.7		
4b	11.21	10.36	17.3	21	10.31	15.4	132	153.9	63	46
5a	10.45	9.94	18	21	13.03	16.7	164	153.6		
5b	10.6	9.95	17.3	21.4	11.83	17.39	158	151.7	54	59
6a	10.41	10.8	18.4	24.2	14.32	16.89	128	149.8		
6b	10.36	10.12	17.9	23.2	10.92	16.97	171	150.3	53	62
7a	10.51	10.1	18.9	25.3	12.04	16.2	129	153.6		
7b	10.41	10.05	18.4	24.3	12.16	18.55	186	151.2	62	53
8a	10.61	10.15	18.7	23.9	13.01	16.68	161	152.4		
8b	10.59	10.06	17.6	23.1	12.55	19.94	160	153.9	54	55
9a	10.47	10.15	18.8	22.7	12.87	23.36	164	148.6		
9b	10.21	10.09	17.2	22.2	13.36	22.39	154	157.6	49	49
Promedio	10.533	9.6	17.97	22	12.91	16.56	156.72	142.8	51.8	52.8
Media Anual	10.1		19.9		14.7		149.8		52.3	

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 17 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones realizadas en ambas épocas, sin embargo la muestra 1b no fue tomada debido a que el nivel del punto era muy bajo, por lo cual no se pudo tomar la profundidad con el Disco Secchi y así mismo coleccionar la muestra.

5.2 Resultado de laboratorio

A partir de la implementación de la metodología para los análisis de laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados, es importante destacar que ninguna metodología ni reactivo cambio durante los análisis de ambas épocas.

5.2.1 Resultados de las mediciones de fosforo total

Las muestras analizadas en el laboratorio de aguas de ICAMEX arrojaron los siguientes resultados (Tabla 18) para la prueba de contenido total de fosforo tanto en estiaje como en época de lluvias.

Tabla 18. Fósforo total de la laguna de San Miguel Almaya en época de estiaje y lluvia.

<i>Muestra</i>	<i>Fósforo Total (mg/L) época de estiaje</i>	<i>Fósforo Total (mg/L) época de lluvias</i>
St	0.5	0.5
1a	0.176	0.47
1b	0.113	-
2a	0.141	0.44
2b	0.152	0.46
3a	0.103	0.51
3b	0.113	0.52
4a	0.118	0.48
4b	0.119	0.46
5a	0.132	0.43
5b	0.083	0.29
6a	0.115	0.32
6b	0.131	0.42
7a	0.143	0.41
7b	0.121	0.34
8a	0.145	0.19
8b	0.127	0.41
9a	0.19	0.32
9b	0.131	0.37
Promedio	0.13	0.41

*Valor de la muestra Estándar St= 0.5

Fuente: Elaboración propia.

Los valores anteriores muestran que el fósforo se encuentra en bajas concentraciones por lo cual sí representa al factor limitante, además de acuerdo con Arredondo y Ponce (citado en Gómez et. al, 2014) generalmente la concentración de fósforo total en aguas naturales no es mayor a 1 mg/l.

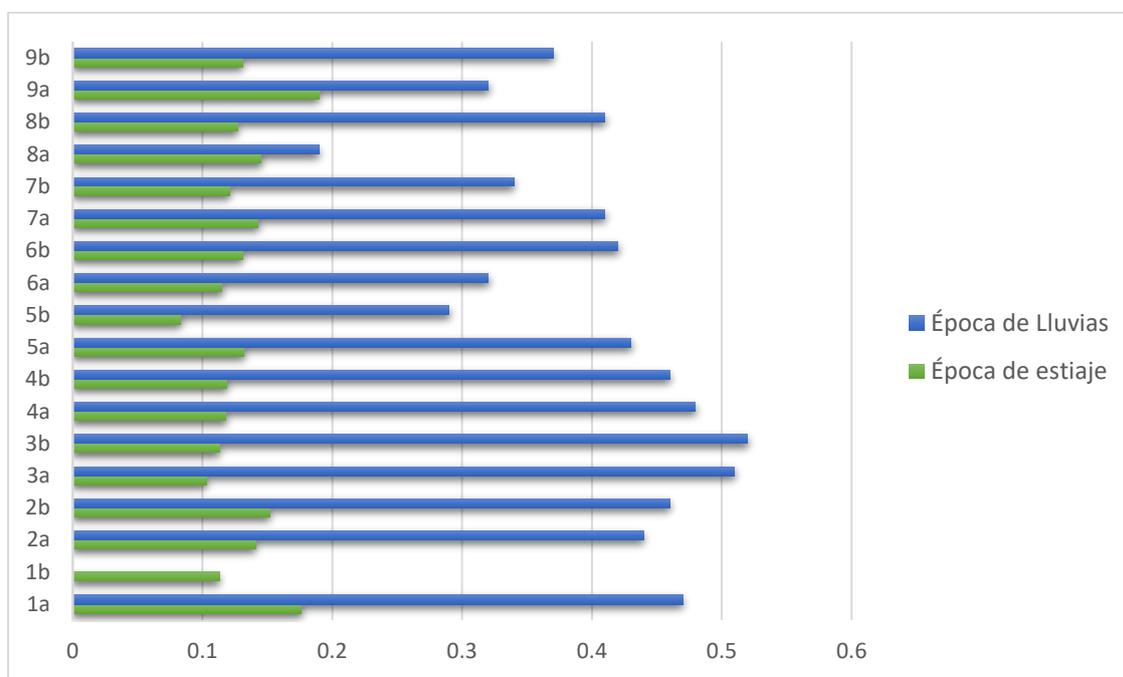


Figura 42. Variación de Fósforo en la Laguna de San Miguel Almaya

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 42 muestra la variación que existe en la concentración total de fosforo entre la época de estiaje y la época de Lluvias; a pesar de que se esperaba que en la época de lluvia la concentración de fosforo fuera menor debido a la disolución, esta se duplico en su mayoría.

5.2.2 Resultados de las mediciones de nitrógeno total

Como se menciona en la metodología, para el caso de las pruebas de nitrógeno se seleccionaron únicamente algunas muestras con el fin de demostrar cuál de los nutrientes Nitrógeno o Fósforo es el elemento limitante.

Los valores obtenidos de mililitros gastados de H₂SO₄ como lo solicita la fórmula para obtener el valor total de nitrógeno, así como sus respectivos resultados se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Mililitros de H₂SO₄ gastados en las muestras.

<i>Muestra</i>	<i>mL de H₂SO₄ en época de estiaje</i>	<i>ml de H₂SO₄ en época de lluvias</i>
1a	0.38	0.17
2b	0.21	0.11
3a	0.12	0.23
5a	0.18	0.24
6b	0.22	0.16
8b	0.21	0.21

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos después de aplicar la fórmula para la obtención del Nitrógeno total.

Tabla 20. Nitrógeno total Kjeldahl de la Laguna de San Miguel Almaya

<i>Muestra</i>	<i>Nitrógeno total (mg/L) en época de estiaje</i>	<i>Nitrógeno total (mg/L) en época de lluvias</i>
1a	10.95	4.9
2b	6.05	3.17
3a	3.46	6.63
5a	5.19	6.92
6b	6.34	4.61
8b	6.05	6.05

Fuente: Elaboración propia.

Los anteriores valores muestran que el nitrógeno es el compuesto que se encuentra en mayor concentración en el cuerpo de agua, por lo cual no representa al elemento limitante.

5.2.3 Resultados de la medición de clorofila

A continuación en la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos del espectrofotómetro a diferentes nm. Posteriormente en la tabla 22 se muestran los valores obtenidos de clorofila a, b, c y total.

Tabla 21. Valores de absorbancia para clorofila a, b y c de la Laguna de San Miguel Almaya

Muestra		Clorofila A 630nm		Clorofila B 647nm		Clorofila C 664nm		Clorofila 750nm	
		Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias	Estiaje	Lluvias
1a	6	0.025	0.012	0.036	0.03	0.112	0.121	0.009	0.004
1b	6	0.02	-	0.03	-	0.124	-	-0.034	-
2a	6	0.031	0.049	0.043	0.66	0.121	0.139	-0.02	0.021
2b	6	0.016	0.008	0.022	0.026	0.059	0.077	0.005	0.032
3a	6	0.013	0.019	0.024	0.049	0.107	0.101	-0.037	0.034
3b	6	0.061	0.078	0.048	0.023	0.081	0.099	0.022	0.009
4a	6	0.008	0.03	0.012	0.016	0.057	0.043	-0.034	0.001
4b	6	0.051	0.065	0.059	0.073	0.119	0.134	0.004	0.029
5a	6	0.035	0.033	0.045	0.046	0.106	0.1	-0.022	0.017
5b	6	0.074	0.066	0.089	0.081	0.148	0.179	0.028	0.045
6a	6	0.032	0.22	0.039	0.29	0.092	0.104	-0.021	0.019
6b	6	0.063	0.045	0.066	0.049	0.123	0.177	0.025	0.011
7a	6	0.018	0.009	0.025	0.022	0.082	0.123	0.026	0.017
7b	6	0.013	0.004	0.032	0.056	0.12	0.149	-0.037	0.031
8a	6	0.032	0.015	0.04	0.037	0.091	0.051	0.001	0.024
8b	6	0.014	0.018	0.021	0.029	0.069	0.076	-0.032	0.005
9a	6	0.029	0.045	0.036	0.091	0.091	0.122	-0.018	0.029
9b	6	0.019	0.026	0.021	0.031	0.073	0.11	-0.034	0.026

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Concentración de clorofila a, b, y c de la Laguna de San Miguel Almaya.

<i>Muestra</i>	<i>Clorofila A</i>		<i>Clorofila B</i>		<i>Clorofila C</i>	
	<i>Estiaje</i>	<i>Lluvias</i>	<i>Estiaje</i>	<i>Lluvias</i>	<i>Estiaje</i>	<i>Lluvias</i>
1a	35.33	40.41	-1.01	-3.29	0.0181	-5.9
1b	53.08	-	10.33	-	15.74	-
2a	48.51	12.49	30.44	381.68	16.08	-131.01
2b	18.39	16.21	7.35	-9.2	1.51	-18.54
3a	48.25	23.08	11.68	-0.25	15.66	-17.81
3b	21.1	31.51	3.68	-11.33	20.5	43.05
4a	49.3	14.3	10.84	0.31	15.84	15.81
4b	38.22	35.38	12.21	7.78	16.27	11.19
5a	42.27	28.2	16.87	3.5	20.24	1
5b	40.33	46.02	15.26	-0.79	13.91	0.53
6a	37.27	18.17	15.22	141.09	19.64	81.8
6b	32.85	57.33	6.87	-5.78	13.69	8.03
7a	19.97	37.43	-9.11	-13.47	-8.46	-12.33
7b	50.7	40.72	13.96	-1.3	13.18	-31.47
8a	30.12	8.97	2.47	4.52	9.4	-10.93
8b	33.34	24.16	13.31	2.54	15.59	0.53
9a	36.14	30.23	12.56	22.68	16.8	-7.03
9b	35.37	29.63	13.04	-10.53	21.08	-5.35
Promedio	37.25	30.21	10.33	28.15	13.14	-4.26
Media anual	33.7		19.24		4.4	

Fuente: Elaboración propia.

Las anteriores tablas muestran los resultados para clorofila obtenidos en ambas épocas del año. Al aplicar las formulas existen valores negativos en algunos puntos de muestreo, sin embargo estos se concederán sumamente bajos por lo cual la concentración es cero.

5.3 Discusión de resultados

Con los resultados obtenidos del análisis de muestras y retomando la caracterización de la zona de estudio, se determinara el estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya, además se identificarán aquellos factores que potencian la eutrofización del cuerpo de agua y como la morfometría de la microcuenca El Muerto amortigua dichos factores.

De acuerdo a los valores límites de la OCDE para la clasificación trófica, se determinaran los valores medio anuales de Fósforo total y Cl-a. Así como el valor máximo de Cl-a. Y para el caso Disco Secchi se identificara el valor medio y mínimo.

Tabla 23. Concentración de datos para la determinación del estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya

<i>Muestras</i>	<i>PT (mg/L)</i>	<i>Concentración de Cl-a</i>	<i>DS (m)</i>
1	8.3	8.97	0.33
2	10.3	12.49	0.46
3	11.3	14.3	0.46
4	11.3	16.21	0.47
5	11.5	18.17	0.49
6	11.8	18.39	0.49
7	11.9	19.97	0.51
8	12.1	21.1	0.53
9	12.7	23.08	0.53
10	13.1	24.16	0.53
11	13.1	28.2	0.54
12	13.2	29.63	0.54
13	14.1	30.12	0.55
14	14.3	30.23	0.59
15	14.5	31.51	0.62
16	15.2	32.85	0.62
17	17.6	33.34	0.63
18	19	35.33	
19	19	35.37	

20	29	35.38	
21	32	36.14	
22	32	37.27	
23	34	37.43	
24	37	38.22	
25	41	40.33	
26	41	40.41	
27	42	40.72	
28	43	42.27	
29	44	46.02	
30	46	48.25	
31	46	48.51	
32	47	49.3	
33	48	50.7	
34	51	53.08	
35	52	57.33	
Media anual	26.27	33.28	0.52

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 23 se muestran los datos que son necesarios para conocer el estado trófico de la Laguna de San Miguel Almaya, los cuales serán analizados de manera individual.

De acuerdo con la clasificación trófica de la OCDE la concentración media anual de Fósforo en la Laguna de San Miguel Almaya se ubica en estado Mesotrófico con 26.27 mg/L. Dicha clasificación indica que la laguna tiene una concentración media de nutrientes, lo cual provoca el crecimiento de organismos dependientes del Fósforo, como son las algas.

Además el oxígeno disuelto fluctúa durante el día y la noche. La turbidez es moderada y el agua tiene a tener coloración y problemas de olor. De manera general el agua es considerada de calidad regular par el uso doméstico e industrial.

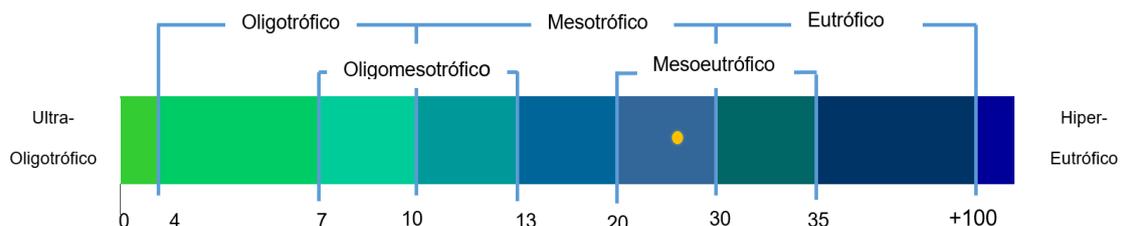


Figura 43. Concentración media anual de Fósforo en la laguna de San Miguel Almaya
Fuente: Elaboración propia con base en Gouvernement du Québec, (2018).

En relación con las concentraciones de Fósforo se tiene la temperatura la cual está relacionada directamente con la productividad primaria de los cuerpos de agua. Entre más elevada sea esta mayor será la productividad. Sin embargo retomando la caracterización de la zona de estudio, en donde la temperatura nos es mayor a 22 °C esto de acuerdo a los tipos de clima, la temperatura es un factor que regula la productividad primaria, se destaca que la temperatura media anual registrada en el agua fue de 19.9 °C.

Posteriormente la concentración media anual de Clorofila-a es de 33.28 µg/L, la cual de acuerdo con los valores límites de la OCDE corresponde a Hipereutrófico. Las características principales de este estado son la disponibilidad mínima de oxígeno disuelto presentando condiciones de anoxia. La vegetación acuática es tupida por lo cual la existencia de fauna se ve reducida. El agua de baja calidad para el uso doméstico e industrial.

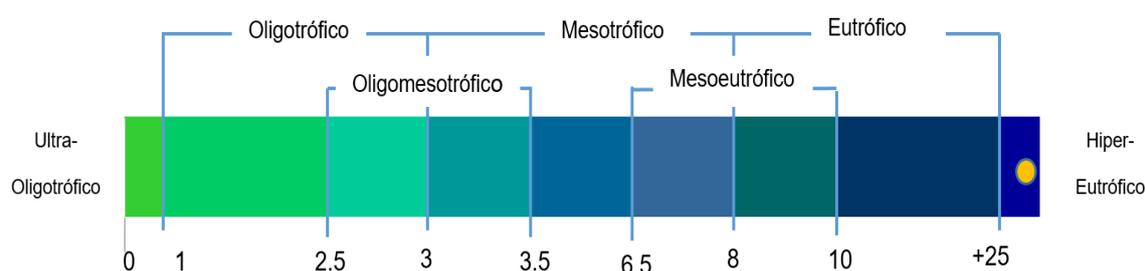


Figura 44. Concentración media anual de Clorofila-a en la laguna de San Miguel Almaya

Fuente: Elaboración propia con base en Gouvernement du Québec, (2018).

La concentración de clorofila-a máxima anual registrada en el cuerpo de agua, es de 57.33 mg/L, dicha medición se registró en el mes de Julio del año 2018. El estado eutrófico es caracterizado por altas concentraciones de nutrientes, así como por el abatimiento de oxígeno disuelto durante la estratificación térmica del cuerpo de agua.

Sin embargo, el oxígeno disuelto medio anual registrado fue de 12.9 mg/L que de acuerdo con (Goyenola, 2007) esta concentración es adecuada para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos. En la Laguna de San Miguel Almaya el crecimiento de vegetación se ve incrementado, la coloración del agua es de tonos verdosos y amarillos, con generación de mal

olor en consecuencia la calidad de agua es pobre para el uso doméstico e industrial.

Además de acuerdo con Pérez y Restrepo (2008) el pH se ve aumentado cuando las algas remueven el CO₂ para su actividad fotosintética. En el caso del cuerpo de agua la media anual de pH es de 10.5 lo cual indica que el agua es básica, de acuerdo con Monte (2016) las aguas con valores de pH superiores a 8,0 generalmente favorecen las incrustaciones calcáreas.

Consecutivamente de acuerdo con los valores establecidos por la OCDE la profundidad media anual del Disco Secchi indica que la laguna se encuentra en el estado trófico Hipereutrófico con 0.52 m, como se mencionó el crecimiento de flora es incrementado en este estado por lo cual el agua es más turbia.

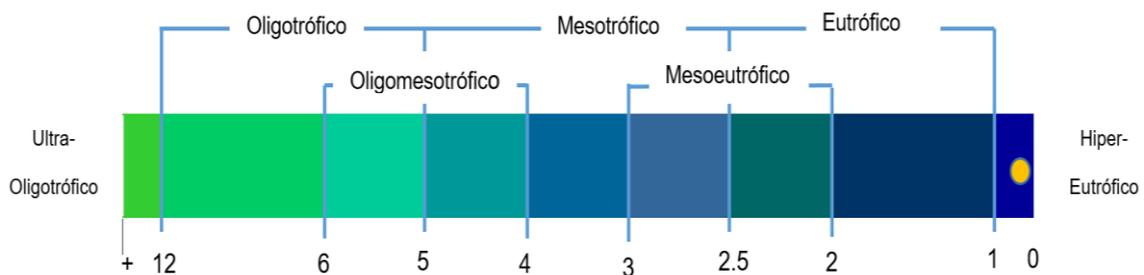


Figura 45. Profundidad media anual del Disco Secchi en la laguna de San Miguel Almaya
Fuente: Elaboración propia con base en Gouvernement du Québec, (2018).

Por último se tiene la profundidad mínima del Disco Secchi la cual es de 0.33 m ubicándose en Hipereutrófico de acuerdo a la clasificación de la OCDE, la transparencia con el visor de Disco Secchi, se vio interferida por la presencia de material tanto orgánico como inorgánico que se encuentra en suspensión en la columna de agua



Figura 46. Turbiedad en el agua de la Laguna de San Miguel Almaya.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado

Un parámetro importante es la conductividad en el agua, la cual es una medida de la cantidad de sólidos disueltos. Los valores normales están entre 30 y 60 μScm^{-1} . Resultados por encima indican eutrofia, es decir alta productividad como es el caso de la laguna de San Miguel Almaya ya que el promedio fue de 156.7 μScm^{-1} .

De acuerdo con la tabla 4 no se tiene un estado trófico exacto para la laguna, a pesar del monitoreo continuo los valores han variado entre épocas por lo cual se presume que la laguna de San Miguel Almaya se encuentra en un proceso de transición entre el estado Eutrófico e Hipereutrófico, sin embargo es necesario continuar con el monitoreo hasta tener resultados más estables, alcance que se encuentran fuera de lo establecido en esta tesis.

Tabla (4). Valores límites de la OCDE para la clasificación trófica.

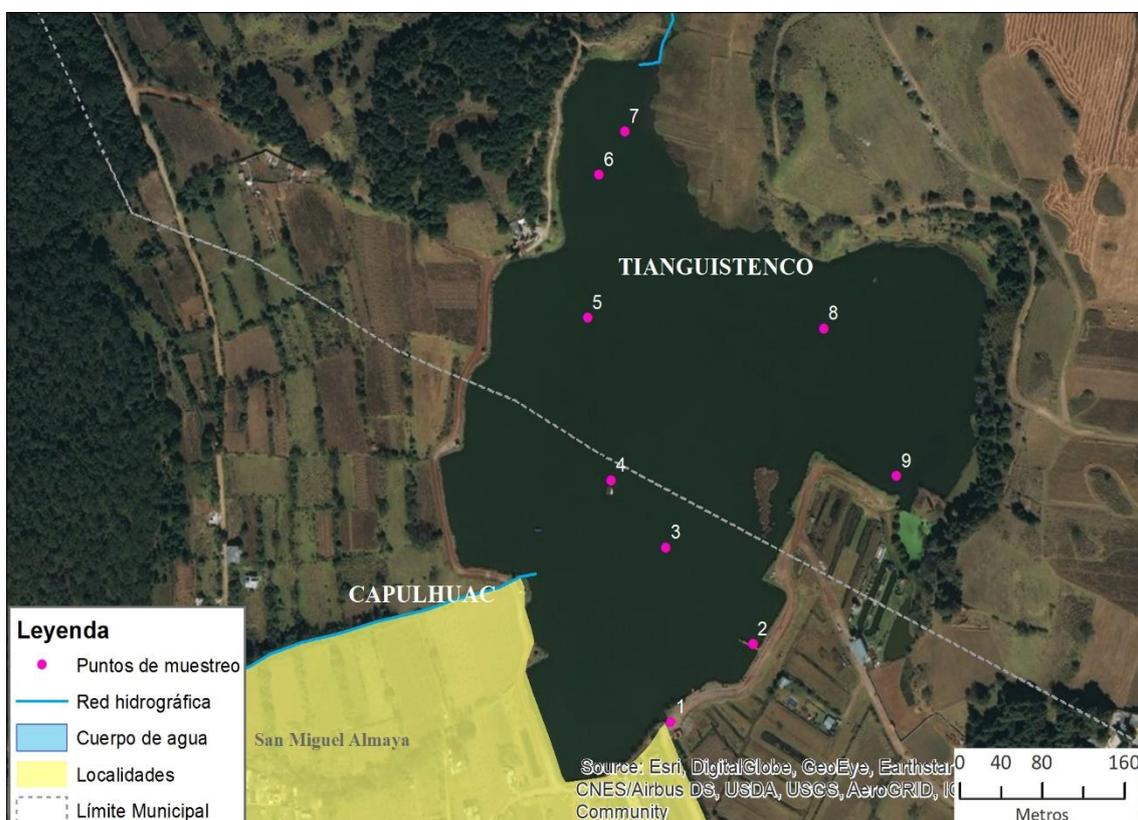
Estado Trófico	PT Medio (mg/L)	Cl-a Media (mg/L)	Cl-a Max (mg/L)	DS Medio (m)	DS Mín. (m)
Ultraolitrófico	< 4	<1	<2.5	>12	>6
Oligotrófico	<10	<2.5	<8	>6	>3
Mesotrófico	10-35	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7
Hipereutrófico	>100	>25	>75	>1.5	<0.7

*Profundidad de Secchi = sistema que permite medir la turbidez de la columna de agua en un lago.

Fuente: Elaboración propia con base en OCDE (1981).

Considerando que el proceso de eutrofización es un fenómeno afectado por un número variable de factores físicos, químicos, biológicos y sociales (ROCHA et al., 2010; SILVA et al., 2006) se realizó un análisis del estado trófico por punto de muestreo, el cual se muestra a continuación.

Esquema 7. Distribución de los puntos de muestreo.



Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de muestreo fueron elegidos de acuerdo a la cercanía de ciertos factores:

- Punto 1: compuertas de la laguna
- Punto 2: muelle
- Punto 3: vegetación densa (Tule)
- Punto 4: pista de ski acuático
- Punto 5: cercanía a casa habitación
- Punto 6: zona arboleada
- Punto 7: cercanía a la zona de pastoreo
- Punto 8: parte media del cuerpo de agua
- Punto 9: cercanía al ojo de agua

La tabla 24 muestra los datos necesarios para la clasificación del estado trófico por zona de muestreo, para cada punto se consideraron resultados de análisis superficiales y a profundidad.

Tabla 24. Clasificación del estado trófico por punto de muestreo.

Punto	PT Medio anual (mg/L)	Clorofila-a Media anual (mg/L)	Clorofila-a Max (mg/L)	SD Medio (m)	DS Min (m)	Estado Trófico
1	25	43	53.08	33	33	Hipereutrófico
2	30	24	48.51	46.5	46	Hipereutrófico
3	31	31	48.25	52	51	Hipereutrófico
4	29	34	49.3	54.5	46	Hipereutrófico
5	23	39	46.02	56.5	54	Hipereutrófico
6	25	36	57.33	57.5	53	Hipereutrófico
7	25	37	50.07	57.5	53	Hipereutrófico
8	25	33	36.14	49	49	Hipereutrófico
9	22	24	33.34	54.5	54	Eutrófico-Hipereutrófico

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que en el punto 9 el cual se encuentra cercano al ojo de agua, la concentración de Fósforo total es menor, así como la cantidad de Clorofila-a, colocando a este punto en un estado entre el Eutrófico y el Hipereutrófico. Los demás puntos nos mostraron variación alguna, en su mayoría de los factores las concentraciones fueron ubicadas en Hipereutrófico.

A partir del conjunto de datos producto del muestreo en campo y en análisis en laboratorio, se generó un análisis de componentes principales con el fin de identificar el conjunto de variables que tienen mayor influencia en el comportamiento de los valores. Los resultados de componentes para cada uno de los 35 registros se muestran en las anteriores tablas.

Tabla 25. Componentes principales

	Componente	Componente
<i>Fila</i>	1	2
1	0.721475	1.76183
2	-0.366361	3.69805
3	2.16924	1.34508
4	1.41795	-2.87373
5	1.81155	0.922658
6	1.75237	-0.601687
7	2.30009	0.127968
8	3.29384	-1.75337
9	1.54369	0.744869
10	2.16874	0.300083
11	1.10831	-0.850829
12	1.56178	0.614136
13	1.31495	-2.14792
14	1.91621	1.761
15	1.44804	-0.11016
16	1.77833	0.0481437
17	1.06643	0.527592
18	1.03399	0.411139
19	-3.53571	1.46345
20	-2.54411	-0.750762
21	-2.26335	-0.747678
22	-2.03482	-1.0258
23	-1.47321	-0.610155
24	-1.32666	-0.835916
25	-0.790958	0.0780814
26	-1.34624	-0.297505
27	-0.781279	0.581695
28	-0.34921	-1.71933
29	-0.969562	0.605512
30	-1.70386	0.0720941
31	-1.65314	0.331741
32	-1.12713	-1.20212
33	-2.03524	-0.358971
34	-2.04254	0.0832823
35	-2.06362	0.407521

Fuente: Elaboración propia.

Las variables que se consideraron para el análisis de componentes principales fueron:

- Disco Secchi (cm)
- pH
- Temperatura (°C)
- OD (mg/L)
- Conductividad (μS/cm)
- Fósforo
- Clorofila-a

El propósito del análisis fue obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 7 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 2 componentes se han extraído puesto que 2 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0. En conjunto ellos explican 67.78% de la variabilidad en los datos originales, como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Análisis de componentes principales

Componente Número	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	3.21296	45.899	45.899
2	1.53174	21.882	67.781
3	0.833081	11.901	79.683
4	0.588937	8.413	88.096
5	0.432886	6.184	94.280
6	0.2708	3.869	98.149
7	0.129595	1.851	100.000

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 27 se muestran los valores para la ecuación de los componentes principales. Por ejemplo, el primer componente principal tiene la ecuación:

$$CP = (0.211874 * DS) + (0.468609 * pH) - (0.509861 * T) - (0.444182 * OD) + (0.0457249 * C) - (0.492387 * P) + (0.183636 * Cl-a)$$

Donde:

- DS: Profundidad en cm del Disco Secchi
- pH: valor de pH
- T: temperatura en grados centígrados
- OD: oxígeno disuelto mg/L
- C: conductividad
- P: Fósforo total en mg/L
- Cl-a: clorofila-a en mg/L

En donde los valores de las variables en la ecuación se han estandarizado restándoles su media y dividiéndolos entre sus desviaciones estándar.

Tabla 27. Valores para la ecuación de componentes principales

	Componente	Componente
	1	2
Disco Secchi	0.211874	-0.349248
pH	0.468609	-0.241804
Temperatura	-0.509861	-0.0952243
OD	-0.444182	0.138451
Conductividad	0.0457249	0.663478
Fósforo	-0.492387	-0.129432
Clorofila-a	0.183636	0.578243

Fuente: Elaboración propia.

Con base en este análisis, se generó un gráfico de dispersión (Figuro 48), en el que se observa la agrupación de datos por el periodo de muestreo.

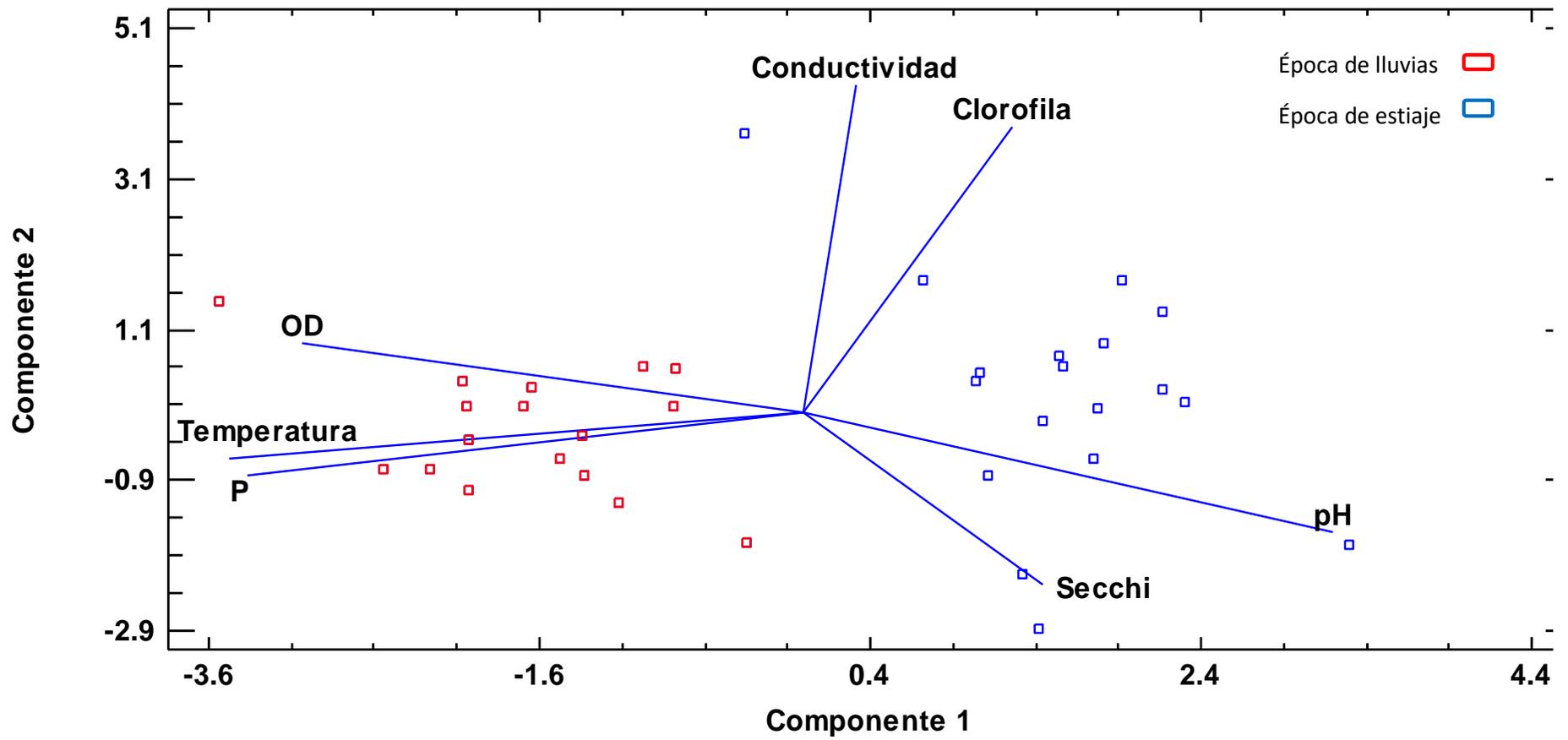


Figura 47. Gráfica de Dispersión.

Fuente: Tomada por Diana Maldonado

Para el periodo de lluvias las variables OD, Temperatura y P son las que influyen en mayor medida en la variabilidad de los valores registrados, mientras que para el periodo de estiaje, la conductividad, la clorofila y la profundidad en la que se pierde la visibilidad del Disco Secchi tienen mayor peso en el comportamiento de los datos.

En este capítulo se mostraron los resultados obtenidos en las variables medidas por punto en el cuerpo de agua de San Miguel Almaya, en base a ellos se obtuvo el estado trófico de la Laguna, el cual se ubica entre Eutrófico e Hipereutrófico. Además se hizo la clasificación del estado trófico por punto de muestreo, los cuales no mostraron mayor variabilidad. Posteriormente se analizaron los componentes principales con el fin de entender cuáles variables influían más en el estado trófico de la Laguna dependiendo la época de muestreo.

El siguiente capítulo mostrarán las conclusiones a las que se ha llegado con esta investigación, retomando la caracterización de la zona de estudio, posteriormente se darán unas breves recomendaciones.

CAPÍTULO V

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente para concluir esta investigación se tienen las conclusiones finales del trabajo así como unas breves recomendaciones. Este capítulo se divide en dos apartados, en la primera parte se realizan conclusiones de acuerdo a los resultados obtenidos de las variables estudiadas así como en base al cumplimiento de objetivos de esta investigación. En la segunda parte se presentan algunas sugerencias para mejorar el manejo de microcuenca y comenzar con la recuperación de la Laguna de San Miguel Almaya.

6.1 conclusiones

Los ecosistemas acuáticos de montaña son de suma importancia para las poblaciones que habitan y dependen de ella; la Laguna de San Migue Almaya tiene su nacimiento en la Sierra de las Cruces, por lo cual la investigación de acuerdo a la tabla de valores límites de la ODCE (1998) y las metodologías implementadas para obtener la cantidad de Fósforo total, Nitrógeno total, Clorofila-a, además de otras variables, pudo conocer las condiciones actuales de cuerpo de agua perteneciente a la microcuenca El Muerto.

Dentro de la caracterización de la zona de estudio, sobresale la división municipal que tiene la microcuenca El Muerto, la cual abarca los municipios de Capulhuac, Tianguistenco y Ocoyoacac; a pesar de que el estudio se hizo en la comunidad y laguna de San Miguel Almaya perteneciente al municipio de Capulhuac, el impacto de comunidades cuenca arriba se ve reflejado en las condiciones de la laguna.

Se reconoce que existen factores que potencían la eutrofización del cuerpo de agua; primeramente el número de población va en aumento siendo la comunidad de San Pedro Atlapulco perteneciente al municipio de Ocoyoacac la que más impacto podría generar en la microcuenca debido al número de habitantes. El asentamiento de comunidades significa la utilización de recursos, pero también la generación de desechos, los cuales aportan nutrientes a las aguas de los

afluentes, principalmente derivado de las aguas residuales. En la caracterización se identificó que existe una deficiencia en los servicios básicos de suministro de agua potable y drenaje. Únicamente el 89.7% tiene acceso al agua potable por lo que la calidad de vida del resto de la población se ve disminuida, además existe una deficiencia del 9.9% en el servicio de drenaje de la cual se desconoce el lugar de vertimiento final de los desechos. Se deduce que las aguas hervidas son depositadas en ríos o fosas sépticas y que por ende no recibe un tratamiento previo al desecho en los ríos haciendo afectaciones directamente en la laguna de San Miguel Almaya al ser esta la parte ultima de la microcuenca.

Otro aspecto importante es el uso de suelo, en el que se encontró que el 22% refiere a uso agrícola. Las prácticas agrícolas dentro de la microcuenca repercuten en el cuerpo de agua, ya que de acuerdo con el documento de FAO/CEPE (como se citó en FAO, 2015), el agua se contamina fundamentalmente por nitratos debido a la presencia de fertilizantes minerales así como por la aplicación intensiva y extensiva de fertilizantes orgánicos como el estiércol el cual está asociado a la escorrentía directa a los cuerpos de agua. En segundo lugar se tiene el uso de tipo pastizal es cual representa un área de oportunidad para a la agricultura, dichas áreas se ubican en pendientes de ente 5° y 18°, en su mayoría en la parte alta de la microcuenca en donde las pendientes son más elevadas, por lo cual facilita la escorrentía y la posible erosión del suelo.

Por ultimo las actividades económicas que se realizan a partir de la existencia de la laguna como lo es la pesca en su mayoría deportiva, es un zona para el turismo recreativo y para actividades deportivas como ski acuático y competencias de natación entre otras, las cuales impactan directamente en la sedimentación del cuerpo de agua. No se tiene límite de carga para el número de visitantes en la Laguna ni la infraestructura adecuada para el turismo lo que significa que existe una utilización de recursos, pero también generación de residuos.

Por otro lado la morfometría de la microcuenca amortigua la eutrofización del cuerpo de agua, primeramente se tiene que la forma de la microcuenca es alargada entonces el área es menos propensa a tener una lluvia intensa

simultáneamente y su ramificación impide las crecidas rápidas, por lo tanto ayuda a la disminución de erosión y depósito de materiales en el cuerpo de agua de San Miguel Almaya. Además, el valor calculado para la pendiente del cauce es de 0.077 m/m indicando que el recorrido del cauce principal es muy suave. Las pendientes de mayor grado se encuentran en las zonas altas de la microcuenca en donde el tipo de uso de suelo es forestal; el bosque ayuda a la conservación de los suelos de alta montaña, se mejora la fertilidad del suelo, se mejora la filtración de agua, se disminuye la vulnerabilidad a la erosión, entre otros (FAO, 2015).

Por último el clima de la microcuenca influye de manera directa en la concentración de Nitrógeno y Fósforo en la laguna, primeramente la temperatura regula la productividad del cuerpo de agua y por otro lado la precipitación principalmente en época de altas temperaturas ayuda a aumentar el nivel de agua en la laguna y por lo tanto a la disolución de nutrientes y de clorofila en la columna de agua.

Finalmente con base a las metodologías elegidas se analizaron variables físicas, químicas y biológicas de la Laguna de San Miguel Almaya. Durante el periodo analizado la laguna sufrió cambios en la composición del agua, por ello, se considera que la laguna se encuentra en un proceso de transición de un estado trófico a otro, ya que la variabilidad de resultados en los puntos estudiados muestran que están fuera de un rango estable, considerando que el proceso de eutrofización es un fenómeno en el cual intervienen diversos factores la clasificación exacta no fue identificada, esto con base en los valores límites establecidos por la OCDE. Sin embargo se pudo conocer que el cuerpo de agua se encuentra entre el eutrófico e hipereutrófico.

La inestabilidad de las variables llevo a la investigación a un análisis por variable, la cual nos mostró las condiciones actuales de la laguna, en las que resalta un pH básico, lo cual favorece las incrustaciones calcáreas. A pesar que la media de oxígeno disuelto indica que sus concentraciones son adecuadas para la vida mayoría de especies, este no presento correlación positiva con la Clorofila-a.

Más adelante se identificó el estado trófico de cada punto de muestreo en las que se observó que las muestras cercanas al ojo de agua presentan variabilidad

en la concentración de Fósforo total principalmente por lo cual el punto de muestreo fue identificado como Eutrófico en comparación del resto lo cuales se encuentran en Hipereutrófico. Posteriormente al realizar la gráfica de dispersión de logra apreciar como existe una variables predominantes en estiaje y en lluvias; para el caso de la época de lluvias las variables que mejor explican el comportamiento del cuerpo de agua son la temperatura, el oxígeno disuelto y el Fósforo, en comparación con la época de estiaje las variables son conductividad, clorofila-a, pH y la profundidad con el Disco Secchi.

Es importante reconocer que todas las variables tiene cierto grado de influencia en las variables, sin embargo el análisis estadístico logro comprobar que dependiendo la época de muestreo existen variables que influyen en mayor medida en el comportamiento del cuerpo de agua de San Miguel Almaya.

6.2 Recomendaciones

Con base en los resultados anteriores y en el interés de las autoridades de la comunidad de San Miguel Almaya se propone ejecutar medidas preventivas que impliquen costos inmediatos y que reflejen los beneficios a largo plazo con el fin de ampliar la vida útil de la laguna y evitar la aplicación de medidas correctivas aún más costosas.

Por ellos dentro de las propuestas se deben:

- Tener un programa para el turismo, en el que se especifiquen las actividades que pueden realizarse y su duración.
- Mejorar la infraestructura para el turismo, dotar la zona de letreros que informen de las actividades que están y no permitidas, introducir contenedores para los residuos así como designar un responsable de su manejo.
- Implementar la fertilización de suelos para la agricultura con formas más orgánicas, así como el uso de terrazas en las zonas de mayor pendiente para evitar la erosión.
- Regular el servicio de drenaje, principalmente en las comunidades
- Continuar con las campañas de reforestación de la microcuenca.

- Implementar la socialización y apropiación de información relacionada con la eutrofización, las consecuencias y las acciones de corrección que son necesarias, en toda la Microcuenca.
- Fomentar la participación activa de todos los municipios involucrados. Tomando en cuenta los posibles daños sociales y ambientales que puede traer consigo la eutrofización de la laguna y en los ecosistemas de toda la microcuenca.

Finalmente este trabajo de investigación es considerado como la base para el inicio de un monitoreo permanente en los parámetros del agua con el fin de que la comunidad y las autoridades tengan conocimiento de las condiciones en las que se encuentra el cuerpo de agua. La interrogante planteada al inicio de esta investigación tiene la oportunidad de seguir siendo estudiada a medida que los estudios de formación académica van avanzando, por lo cual no se descarta el hecho de seguir monitoreando el cuerpo de agua, con el fin de aportar nuevos resultados que profundicen en el tema

6. Bibliografía

- Alcaldía de Medellín. (2006). *Sistema estructurado, usos del suelo urbano*. Recuperado de <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpccontent/Sites/Subportal%20del%20Ciudadano/Plan%20de%20Desarrollo/Secciones/Informaci%C3%B3n%20General/Documentos/POT/UsosSueloUrbano.pdf>
- Allen, B. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Recuperado de: <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Allinger, N. L. (1978). *Química orgánica*. Reverte.
- APHA (2012). *Estándar methods for the examination of water and wastewater, 22 th*. Washington: American Public Health Association, American water Works association, wáter enviromental federation.
- Arango, C. (2001). *Cuencas hidrográficas*. Universidad Del Tolima.
- Bono, R. (2016). *Diseños cuasi-experimentales*. Recuperado de: Ub.edu; http://www.ub.edu/deia/archivos/111006211920_Disenos_cuasi_1_WOP_P.ppt
- Carpio y Rodriguez (2017). *Ensayo "Destrucción de hábitats"*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/343370290/Ensayo-Destruccion-de-habitats>
- Chaverri, A. (1998). Es necesario mover montañas; *Las montañas, la diversidad biológica y su conservación*. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. 49 (4).
- Ciencia geográfica (2014). *Carpetap pedagógica*, plataforma educativa de recursos digitales. Recuperado: <http://cienciageografica.carpetapedagogica.com/2008/03/los-rios.html>
- Comisión Nacional del Agua (2016). *Clico Hidrológico. Atlas del agua en México*, 2016. México. Pp 14-20.
- CONABIO (1998). *La diversidad biológica de México: Estudio de País*. Capítulo 7: 222. Adaptado de Loa, L.E, 1994 y de Gutiérrez, N.C., et al, 1996.
- CONABIO (2008) Carta climas, 1:500000, koppen. *Climas del estado de México*. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima500kgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- CONABIO (2009). Biodiversidad. *¿Por qué se pierde la biodiversidad?* Recuperado de <http://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/porque.html>
- CONAGUA, (2001). *Análisis de aguas - Determinación de Fósforo Total en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método De Prueba'*, NMX-AA-029-SCFI-2001, México.

- CONAGUA, (2010). *Análisis de agua - Medición de Nitrógeno Total KJELDAHL en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas - Método De Prueba*, NMX-AA-026-SCFI-2010, México
- Cuna et al. (2015). *Historia ambiental de un lago alpino en el Centro de México* (1230-2010). *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 18(2):97-106
- DANE. (2011). *Población económicamente Activa (PEI)*. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Recuperado de www.dane.gov.co
- Delgadillo, A. y Moreno, A. (2008). *Morfometría de cuencas*. Recuperado a partir de <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/MORFOMETR%CD A%20DE%20CUENCAS.pdf>
- FAO (1997). *Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua*. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55) Canada Centre for Inland Waters Burlington, Canadá. ISBN 92-5-303875-6
- FAO. (1997). *Capítulo 3. Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua*. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. (Estudio FAO Riego y Drenaje - 55) Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s05.htm#cap%C3%ADtulo%203%20%20los%20fertilizantes,%20en%20cuanto%20contaminantes%20del%20a gua>
- FAO. (2015). *Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial*. Recuperado de <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
- Garay y Agüero (2018). *Delimitación hidrográfica y caracterización morfométrica de la Cuenca del Río Anzulón*. Ediciones INTA.
- García, F., del Puerto, L., Bracco, R., Panario, D., Castiñeira Latorre, C., Mourelle, D., Adams, J. (2011). *Paleolimnología de las lagunas costeras del Sudeste de Uruguay, y comparación paleogeográfica entre América y África del Sur*. pp. 173–196.
- Gerra, G. (2008). *Plan Municipal de Desarrollo de San Nicolás Hidalgo*, Silacayoapam.
- Giraldo, L., Agudelo, R., y Palacio, C., (2010). *Capitulo 3. Nutrientes y gases nitrógeno*. En *Spatial and temporal variation of nitrogen in the medellin river*. 124-131pp Colombia. Editorial Board.
- Gómez. J., Blancas, G., Constanzo, E. y Cervantes A. (2014). *Ortofosfatos (fósforo reactivo soluble). Análisis de calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. UNAM, Fes Zaragoza.
- Gouvernement du Québec (2018). *Quebec Volunteer Lake-Monitoring Program*. Recuperado de: <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/eau/rsvl/methodes-en.htm>
- Goyenola, G. (2007). *Oxígeno Disuelto*. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. Recuperado de http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/OD.pdf
- Guerra, D., Zea, M. y Aguilar, F. (2015). *Identificación de presencia de Algas generadas en los efluentes del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento*

- de la Universidad de Guatemala y de la Planta de Tratamiento Ing. Arturo Pazos Sosa, para uso potencial en la remoción de Nitrógeno y Fósforo presente en el agua residual. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS) Recuperado a partir de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0505_MT.pdf
- Guerra, F. y González, J. (2002). *Caracterización morfométrica de la cuenca de la Quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela*. *Geoenseñanza*, 7(1–2). pp 88-108.
- Hutchinson, G. E. (1961). *The paradox of the plankton*. *The American Naturalist*, 95(882), 137–145.
- INEGI (2010). *Población Ocupada*. Glosario INEGI. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cem07/texcom/glosario/glosario.htm>
- INEGI (2014). *Climatología*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/>
- Ingeniería civil. (2010). *Cálculos de la pendiente media del cauce principal de una cuenca hidrográfica*. Recuperado de <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/calculo-de-la-pendiente-media-del-cauce-principal-de-una-cuenca-hidrografica/>
- Olvera, V. (1992). *Estudio de eutrofización de la presa Valle de Bravo, México*: Ingeniería Hidráulica, pp.148-161.
- Jiménez, M. y Monerris, M. (2008). *Transferencia de nutrientes entre la columna de agua y el sedimento bajos condiciones anaerobias en el embalse de Beniarrés (Alicante)*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Recuperado https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13044/Tesina_Master.pdf?sequence=1
- Laboratorio de limnología e planeamiento Ambiental, UFES. (2016). *Eutrofização*. Recuperado de <https://mybrainsociety.blogspot.mx/2016/06/eutrofizacao.html>
- Liniger H. y Weingartner R. (1998). *Es necesario mover montañas; Montañas y recurso hídrico*. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales*. 49 (4).
- López, E. and Soto, E (1993). *Diagnóstico de Eutrofización del Embalse Ignacio Allende, Guanajuato, México*. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología - UNAM*, [en línea] 20(1), p.4. <http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1993-1/articulo426.html> [Consultado 13 Sep. 2016].
- Mazzeo, N., Clemente, J., García, F., Gorga, J., Kruk, C., Larrea, D. y Scasso, F. (2002). *Eutrofización: Causas, consecuencias y manejo*. (pp. 39–55). Montevideo. Domínguez, A. & R.G. Prieto. Recuperado <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/pasantias/eutrofizacion.pdf>
- Moreno, H. (1953). *Estudio sobre la definición de algunos términos geográficos: Lago y Laguna*. Sociedad geográfica de Colombia, Academia de Ciencias Geográficas. XI (2-3), 2-14pp

- Moreta, J. (2011). *La eutrofización de los lagos y sus consecuencias*. Ibarra 2008. Universidad Técnica del Norte, Ecuador. Recuperado de http://www.academia.edu/1439928/La_eutrofizaci%C3%B3n_de_los_lagos_y_sus_consecuencias._Ibarra_2008
- OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), (1982). *'Eutrophication of Waters'. Monitoring, Assessment and Control*. Cooperative Programmers on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Paris: Environment Directorate, OECD Paris.
- Paches, M. (2016). *Determinación espectrofotométrica de clorofila: Método tricromático*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Pearce, D. y Turner R. (1995). *Economía de los Recursos Naturales y del medio ambiente*. Celeste Ediciones. Madrid
- Pérez, G., y Restrepo, J. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Colombia. Editorial Universidad de Antioquia.
- Porqueras, M. (1985). *Forma de una cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen*. Revista de Geografía, 19(1), 41–68.
- Price, M. (1998). *Es necesario mover montañas; Las montañas: ecosistemas de importancia mundial*. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. 49 (4) pp.195.
- Quiroz, H. y Reza, M. (2014). *Situación actual de los lagos del Parque Nacional Lagunas de Zempoala*. HYPATIA, Revista de divulgación Científico-Tecnológica del Estado de Morelos. Recuperado de: https://www.revistahypatia.org/~revistah/index.php?option=com_content&view=article&id=197&Itemid=316
- RAMSAR. (2014). *La Importancia De Los Humedales*. The Ramsar Convention Secretariat. Switzerland. Recuperado de <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>
- RAMSAR. (2010). *El cuidado de los humedales una respuesta al cambio climático*. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/wwd/10/wwd2010_aa_1eaflet_s.pdf
- Saenz, P. (2007). *Funcionamiento de un ecosistema* [Escolar]. Recuperado <http://www.biologia.edu.ar/ecologia/FUNCIONAM%20DE%20UN%20ECOSISTEMA.htm>
- Sajuro, E. (2001) *Valoración económica de los servicios ambientales prestados por ecosistemas: Humedales en México*. D.F, México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Salas, H., y Martino, P. (2001). *Desarrollo de Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutrofización en Lagos Cálidos Tropicales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/020057.pdf>
- Sánchez, Ó., Herzig, M., Peters, E., Márquez-Huitzil, R., & Zambrano, L. (2007). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. D.F, México. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

- Sculthorpe, S. (1968). *The Biology of Aquatic Vascular Plants*. Science, 160(3824), 179–179. <https://doi.org/10.1126/science.160.3824.179-a>
- Secretaría de la Convención de Ramsar (2013). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.
- Secretaría de la Convención de Ramsar, (2006). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.
- Sierra, R. (2010). *Eutrofización de embalses: descripción, prevención y manejo*. (Monografía de especialidad). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Ambiental, Bucaramanga.
- TRICART, J. (1985) *Principes et Methodes de la Geomorphologie*. Paris: Masson et Cie editeurs.
- Turégano, J. Carlos (2014) *Océanos y mares. Ciencias de la tierra y el medio ambiente*. Recuperado de: <http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/03AtmHidr/132Oceano.htm>
- UNESCO. (2010). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas*. Programa Hidráulico Internacional. 1(22). ISBN 978-92-9089-152-9
- Vásquez, G., Herrera, L., Cantera, J., Castaño, A., Cardona, D. and Hurtado, I. (2012). 'Metodología para Determinar Niveles de Eutrofización en Ecosistemas Acuáticos'. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas, 24, pp.112-128.
- Winward, A. (2000). *Monitoring the vegetation resources in riparian areas*. RMRS-GTR-47. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 49 pp.
- Wordexpress (2013). *Disco Secchi*. Recuperado de: <https://muestreodeaguas.wordpress.com/2013/02/21/122/disco-de-secchi-2/>