



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE SOPORTE EN EL ÁREA NATURAL  
PROTEGIDA PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE ZEMPOALA. SU  
EVOLUCIÓN DESDE LAS CIENCIAS AMBIENTALES**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
AMBIENTALES**

Presenta

**SANTIAGO JUAN MEDINA SILVA**

**TUTOR ACADÉMICO**

**DR. JESÚS GASTÓN GUTIÉRREZ CEDILLO**

**TUTORES ADJUNTOS:**

**DR. MIGUEL ÁNGEL BALDERAS PLATA**

**MTRA. MARISOL DE LA CRUZ JASSO**

**TOLUCA, MÉXICO. SEPTIEMBRE, 2021.**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	12
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>Planteamiento del problema</b> .....	15
<b>Preguntas de investigación</b> .....	16
<b>Hipótesis</b> .....	16
<b>Justificación</b> .....	17
<b>Objetivos</b> .....	18
<b>CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO</b> .....	19
1.1 Las Ciencias Ambientales como vínculo entre sociedad y el ambiente .....	21
1.2 Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental .....	22
1.3 Desarrollo del concepto de los Servicios Ecosistémicos (SE) .....	25
1.4 Clasificación de los Servicios Ecosistémicos .....	28
1.5 Pago de los servicios ambientales .....	30
1.6 El medio ambiente como un sistema regulador .....	31
1.7 Ecosistemas forestales y sus componentes .....	31
1.8 Captura de carbono en los ecosistemas forestales .....	32
1.9 Principales causas de pérdida de los ecosistemas forestales .....	34
1.10 Degradación de los ecosistemas forestales .....	34
1.11 El suelo y sus propiedades .....	35
1.12 Importancia y cuidado del uso de suelo .....	35
1.13 Servicios ecosistémicos que brinda el suelo .....	36
1.14 Procesos de cambios de uso del suelo .....	38
1.15 Procesos de la erosión del suelo .....	39
1.16 Desarrollo de los Modelos de Erosión del Suelo .....	40
1.17 Aplicación del modelo RUSLE .....	41
1.18 Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG) .....	43
1.19 Aplicaciones de los sistemas de percepción remota .....	44

<b>CAPITULO II. METODOLOGÍA</b> .....	46
Materiales.....	47
2.1 Etapa metodológica 1. Caracterización geográfica ambiental del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	48
2.2 Etapa metodológica 2. Identificación de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	49
2.2.1 Fase 1: Digitalización de la carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI del año 1976.....	49
2.2.2 Fase 2: Clasificación de las imágenes de satélite de los años 2010 y 2019.....	49
2.2.3 Fase 3: Validación de la cartografía de los ecosistemas presentes para los años 2010 y 2019.....	51
2.2.4 Cambios en los ecosistemas presentes en el PNLZ mediante la Matriz de tabulación cruzada o matriz de cambios.....	57
2.3 Etapa metodológica 3. Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de soporte captura de carbono en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	59
2.3.1 Validación en campo del estado y porte de los árboles en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	60
2.4 Etapa metodológica 4. Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de Soporte retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	61
2.4.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE).....	61
2.4.2 Recopilación de datos para la aplicación de los factores de la RUSLE.....	63
2.4.3 Aplicación de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE).....	65
2.4.4 Validación de la cartografía de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE).....	68
<b>CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	70
3.1 Caracterización geográfica ambiental del Parque Nacional Lagunas de Zempoala	71
3.1.1 Localización geográfica.....	71
3.1.2 Fisiografía del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	72
3.1.3 Litología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	74
3.1.4 Clima del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	76
3.1.5 Hidrología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	78
3.1.6 Edafología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	80
3.1.7 Diversidad de fauna en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	82
3.1.8 Población Total de las localidades circundantes en el área de influencia del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala.....	86
3.1.9 Nivel de educación en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.....	86

3.1.10	<i>Marginación en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.</i>	87
3.1.11	<i>Salud de las localidades circundantes en el área de influencia del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala</i>	88
3.1.12	<i>Nivel Niveles de Pobreza en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.</i>	89
3.2	Identificación y diversidad de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	91
3.2.1	<i>Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 1976</i>	98
3.2.2	<i>Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2010</i>	100
3.2.3	<i>Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2019</i>	102
3.3	Dinámica de cambios de los ecosistemas presentes en el PNLZ para los años 1976, 2010 y 2019.	104
3.4	Validación de la cartografía de los ecosistemas presentes en el PNLZ	108
3.4.1	<i>Confiabilidad e intervalos de confianza para el mapa del año 2010.</i>	113
3.4.2	<i>Confiabilidad e intervalos de confianza para el mapa del año 2019.</i>	115
3.3.3	Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados	116
3.4.4	<i>Validación de los puntos de muestreo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala</i>	117
3.5	Servicio Ecosistémico (SE) Captura de carbono en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	120
3.5.1	<i>Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 1976</i>	120
3.5.2	<i>Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 2010</i>	122
3.5.3	<i>Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 2019</i>	124
3.6	Análisis de cambios en la captura de carbono de los ecosistemas forestales en el PNLZ	126
3.6.1	<i>Dinámica general de cambios en los ecosistemas forestales en el PNLZ entre los años 1976, 2010 y 2019</i>	130
3.6.2	<i>Validación "in situ" de las principales características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales en el PNLZ</i>	134
3.6.3	<i>Beneficios socioeconómicos y ambientales de los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala</i>	136
3.7	Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de soporte retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	138
3.7.1	<i>Factor (R) Erosividad de la lluvia para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ</i>	138



3.7.2 Factor (K) Erosionabilidad del suelo para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ.....	142
3.7.3 Factor (LS) Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ.....	143
3.7.4 Factor (C) Cobertura vegetal para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ ...	144
3.8 Retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala los años 1976, 2010 y 2019. ....	149
3.8.1 Validación de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE) en el PNLZ.....	154
3.9 Relación de los Servicios ecosistémicos de soporte Captura de carbono y retención del suelo.....	157
3.10 Discusión general.....	159
<b>CONCLUSIONES</b> .....	164
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	167
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	168

## ÍNDICE DE GRAFICAS

No.	Grafica	Pag.
1	Derechohabientes y no derechohabientes a servicios de salud por comunidad de las localidades del Municipio de Ocuilan	89
2	Derechohabientes y no derechohabientes a servicios de salud por comunidad de las localidades del Municipio de Huitzilac	90
3	Captura de carbono del bosque mixto de pino-oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	131
4	Captura de carbono del bosque de oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	132
5	Captura de carbono del bosque de pino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	133
6	Captura de carbono del bosque mixto de pino-encino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	134

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

No.	Diagrama	Pag.
1	Evolución conceptual del enfoque: servicios ecosistémicos	29
2	Proceso de la captura de carbono en un ecosistema forestal	34
3	Localización del Parque Nacional Lagunas de Zempoala	72
4	Interrelaciones de los elementos ambientales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	92

## ÍNDICE DE FOTOS

No.	Foto	Pag.
1	Mamíferos presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	83
2	Aves presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	84
3	Anfibios presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	85
4	Peces presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	86
5	Bosque de mixto de pino-oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	93
6	Bosque de oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	94
7	Bosque de pino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	95
8	Bosque de mixto de pino-encino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	95
9	Pastizales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	95
10	Vegetación secundaria en Laguna Zempoala en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	97
11	Laguna Zempoala en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	97
12	Agricultura en Santa Lucia Ocuilan Edo. Mex	98
13	Evidencia del bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ	118
14	Evidencia del bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ	119
15	Evidencia de erosión de suelo en el sur del PNLZ	156
16	Evidencia de erosión de suelo en el oeste PNLZ	156

## ÍNDICE DE MAPAS

No.	Mapa	Pag.
1	Pendientes del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	73
2	Hipsometría del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	74
3	Litología del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	76
4	Tipos de clima en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	78
5	Hidrología del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	80
6	Tipos de suelo en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala	82
7	Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 1976	100
8	Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 2010	102
9	Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 2019	104
10	Validación de los puntos de muestreo	120
11	Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 1976	122
12	Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 2010	124
13	Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 2019	126
14	Erosividad de la lluvia en mm/ha.año (Factor R) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976	140
15	Erosividad de la lluvia en mm/ha.año (Factor R) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010	141
16	Erosividad de la lluvia en mm/ha.año (Factor R) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019	142
17	Erosionabilidad del suelo (Factor K) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	144
18	Factor L.S (Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno) en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	145
19	Valores para el Factor C en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976	146

20	Valores para el Factor C en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010	147
21	Valores para el Factor C en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019	148
22	Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976	151
23	Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010	152
24	Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019	153
25	Validación de los puntos de la RUSLE en el PNLZ	157

## ÍNDICE DE TABLAS

No.	Tabla	Pag.
1	Clasificación de los Servicios Ecosistémicos por la MEA	31
2	Tamaño de la muestra por categoría	53
3	Matriz de confusión expresada o error	55
4	Ecuaciones para determinar los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza	56
5	Matriz de confusión expresada en proporción	57
6	Matriz de cambios o tabulación cruzada	58
7	Indicadores e índices de cambio	59
8	Captura de carbono por tipo de ecosistema	61
9	Precipitación media anual del PNLZ	64
10	Principales características de los suelos presentes en el PNLZ	64
11	Ecosistemas presentes en el PNLZ	65
12	Cálculo de valores para el Factor (K) Erosionabilidad del suelo por la FAO, (1980)	67
13	Valores para el Factor (C) Cobertura vegetal por Wischmeier y Smith (1978)	69
14	Población total por comunidad	87
15	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 1976	99
16	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2010	101
17	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2019	103
18	Matriz de cambios para los años 1976 y 2010 en el PNLZ	106
19	Indicadores de Braimoh para los años 1976 y 2010	107
20	Matriz de cambios para los años 2010 y 2019 en el PNLZ	108

21	Indicadores de Braimoh para los años 2010 y 2019	109
22	Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años para años 2010 y 2019	110
23	Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 expresada en proporción	112
24	Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 corregida de acuerdo con Card.	113
25	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2010	113
26	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2019	116
27	Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card de la superficie corregida para cada ecosistema	117
28	Puntos validados en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	118
29	Puntos validados mediante imágenes de satélite	119
30	Total de captura de carbono por ecosistema forestal en PNLZ para el año 1976	121
31	Total de captura de carbono por ecosistema forestal en PNLZ para el año 2010	123
32	Total de captura de carbono por ecosistema forestal en PNLZ para el año 2019	125
33	Cambios en la captura de carbono en el PNLZ para los años 1976 y 2010	127
34	Cambios en la captura de carbono en el PNLZ para los años 2010 y 2019	129
35	Cambio total de los ecosistemas forestales en el PNLZ	134
36	Características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala	136
37	Puntos validados de la RUSLE en el PNLZ	155

## RESUMEN

En la presente investigación se realizó un análisis de la evolución de los Servicios Ecosistémicos de Soporte (SES) captura de carbono y retención del suelo respectivamente en el Área Natural Protegida Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ) en los años 1976, 2010 y 2019. La importancia de estudiar el Área Natural Protegida (ANP) es porque alberga una concentración de biodiversidad de ecosistemas que permiten el desarrollo del hábitat de flora y fauna.

En la última década la problemática de la tala ilegal se ha incrementado en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, considerada dentro de las nueve zonas críticas de ingobernabilidad en México, identificadas por la Procuraduría Federal del Protección al Ambiente (PROFEPA) para la atención de la tala clandestina, a pesar de ser decretado Parque Nacional Lagunas de Zempoala desde el 27 de noviembre de 1936 (Martínez, 2010).

El estudio de la evolución de los SES captura de carbono y retención del suelo, fue abordado desde una perspectiva de las Ciencias Ambiental, analizando la problemática con principios de la Teoría General de Sistemas (TGS) con el fin de relacionar los distintos elementos naturales, sociales y económicos.

El análisis de los cambios en la obtención de captura de carbono se determinó en función de las alteraciones en la cobertura forestal, a partir de técnicas de percepción remota, mediante la clasificación supervisada de dos imágenes de satélite. Para el caso de la obtención de los cambios en la retención del suelo se obtuvo mediante la estimación de erosión del suelo a través de álgebra de mapas, la cartografía permitió analizar la distribución espacial de los cambios en la retención del suelo.

**Palabras clave:** captura de carbono, Ciencias Ambientales, Parque Nacional Lagunas de Zempoala, retención de suelos, servicios ecosistémicos.



## ABSTRACT

In this research, an analysis of the evolution of the supporting ecosystem services (SES), carbon capture and soil retention, respectively, was carried out in the Lagunas de Zempoala National Park Protected Natural Area (PNLZ) in the years 1976, 2010 and 2019. The importance of studying the Protected Natural Area (ANP) is because it houses a concentration of biodiversity of ecosystems that allow the development of the habitat of flora and fauna.

In the last decade the problem of illegal logging has increased in the Lagunas de Zempoala National Park, considered one of the nine critical areas of ungovernability in Mexico, identified by the Federal Attorney for Environmental Protection (PROFEPA) for the attention of the clandestine logging, despite being declared Lagunas de Zempoala National Park since November 27, 1936 (Martínez, 2010).

The study of the evolution of SES carbon capture and soil retention was approached from an Environmental Sciences perspective, analyzing the problem with principles of the General Systems Theory (TGS) in order to relate the different natural elements, social and economic.

The analysis of the changes in the obtaining of carbon sequestration was determined as a function of the alterations in the forest cover, from remote sensing techniques, through the supervised classification of two satellite images. For the case of obtaining the changes in soil retention, it was obtained by estimating soil erosion through map algebra, the cartography allowed to analyze the spatial distribution of the changes in soil retention.

**Keywords:** carbon sequestration, Environmental Sciences, Lagunas de Zempoala National Park, soil retention, ecosystem services.

## INTRODUCCIÓN

El Parque Nacional Lagunas de Zempoala forma parte de El Corredor Biológico Chichinautzin lo que representa que existe una gran diversidad de flora y fauna endémicas de la zona como lo son bosques de coníferas (pino y oyamel), bosques mixtos (pino-encino), pastizales y vegetación secundaria, su biodiversidad alcanza 946 especies registradas; además brinda servicios ambientales a las regiones aledañas de los municipios del Estado de México y Morelos (Bonilla, 1995).

De acuerdo con el análisis de antecedentes se identificó la disminución de los ecosistemas forestales en el ANP este decremento está relacionado con las actividades humanas como la tala ilegal, actividades turísticas, ganaderas y agrícolas lo que repercute en alteraciones en los servicios ecosistémicos que brinda el parque. Con base en la problemática citada previamente, se establecieron las bases de la presente investigación, en la cual se plantea una aproximación teórica y metodológica para realizar una contribución al estudio desde un enfoque integral a partir de las Ciencias Ambientales.

Para cumplir el objetivo general (Analizar las variaciones de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo, derivados de los cambios en la cobertura forestal y erosión del suelo, respectivamente, en los años 1976, 2010 y 2019 en la Área Natural Protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala” a través de Sistemas de Información Geográfica) se plantearon y desarrollaron tres capítulos. El primero de ellos, describe los procesos y fases metodológicas implementadas; el segundo capítulo contiene la descripción y análisis de los conceptos teórico-metodológicos implementados en el estudio bajo un enfoque interdisciplinario de los componentes ambientales presentes en el parque.

En el tercer capítulo contiene los resultados de la investigación. Todo lo anterior permitió realizar una serie de conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones orientadas hacia el estudio integral de ANP bajo impacto ambiental en el país.

## **Planteamiento del problema**

El impacto negativo a los ecosistemas a causa de la sobreexplotación de los recursos naturales es una problemática a nivel mundial, en México es alarmante el grado de pérdida de ecosistemas dentro de Áreas Naturales Protegidas a pesar de que existan instituciones encargadas de la protección de estos espacios, sin embargo, los resultados no han sido los esperados (Sahagún y Reyes, 2018).

En este contexto el PNLZ decretado desde 1936 bajo la categoría de Parque Nacional en el mandato de Lázaro Cárdenas; ha tenido impactos evidentes en los últimos años de acuerdo con Bonilla (1992), el deterioro y degradación de los ecosistemas forestales por la tala ilegal en el área es la principal problemática al provocar que se originen una serie de dificultades como disminución de infiltración y recarga de los mantos freáticos de la región.

Algunos de los factores más relevantes que intervienen en la degradación ambiental del ANP son la creación de nuevos espacios para actividades agrícolas, el desarrollo de infraestructura (carretera federal Cuernavaca-Toluca) y la deforestación; es importante mencionar que existen otros factores sociales, ejemplo de ello es la falta de empleo.

La alteración al servicio ecosistémico captura de carbono es causada por la pérdida de cobertura forestal lo cual afecta de forma directa la formación de suelos fértiles, incrementando la aparición de zonas de erosión y con ello a que exista una baja retención del suelo. En este sentido existen problemáticas asociadas una de otra, es decir las alteraciones en los servicios ecosistémicos de soporte afectan directamente la calidad de vida de las personas, al disminuir la captura de carbono se reduce proporcionalmente la generación de oxígeno generada.

## **Preguntas de investigación**

En la presente investigación se pretenden contestar las siguientes interrogantes:

- ¿Qué ecosistemas forestales se encuentran en el área de estudio?
- ¿Existe una disminución en la producción del servicio ecosistémico de soporte captura de carbono, derivado de los cambios en la cobertura forestal entre años 1976, 2010 y 2019?
- ¿Qué cambios de uso de suelo han ocurrido en el área de estudio en los años 1976, 2010 y 2019?
- ¿Existe una disminución en la producción del servicio ecosistémico de soporte retención del suelo, derivada de la erosión potencial del suelo entre los años 1976, 2010 y 2019?

## **Hipótesis**

En el periodo 1976-2019 se han presentado cambios en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala en los servicios ecosistémicos captura de carbono y retención del suelo derivados de los cambios en la cobertura forestal y la erosión del suelo.

## **Justificación**

Se determinó analizar la evolución de los servicios ecosistémicos en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala, por diversas particularidades, principalmente porque son la base de una gran biodiversidad de flora y fauna; conformada por bosques de coníferas (pinos-oyamel), bosques mixtos (pino-encino), pastizales y vegetación secundaria, su biodiversidad alcanza 946 especies registradas; entre las que sobresalen la gran diversidad de los hongos y fauna acuática (Bonilla, 1995).

La importancia de esta investigación radicó en determinar y analizar los cambios en la producción de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo, ya que son fundamentales para que exista un equilibrio ambiental. Por otro lado, los servicios ecosistémicos que ofrece el PNLZ son de gran importancia por ser sistemas reguladores y generadores de vida, la degradación de alguno de ellos puede contribuir a que existan especies de flora o fauna en peligro de extinción.

Las problemáticas ambientales existentes en el PNLZ, para la Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos son problemas que se pueden resolver por vía de normas, reglamentos, vigilancia, a pesar de esto, existen pocas publicaciones científicas que muestren, evidencien o evalúen el grado de impacto ambiental derivado por actividades antrópicas en el área de estudio.

La falta de investigaciones que muestren los impactos y alteraciones en los ecosistemas naturales dentro del PNLZ es escasa, bajo este panorama surge la necesidad de estudiar y analizar los cambios en los servicios ecosistémicos de soporte para conocer la situación actual de este problema, con la realización del presente trabajo se podrá contribuir a que existan estudios que evidencien la degradación de los recursos naturales en el área de estudio con el objetivo que sean herramientas en la toma de decisiones en el ámbito gubernamental y público, para que las autoridades encargadas y la sociedad tomen conciencia de los impactos ambientales provocados.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Analizar las variaciones de los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo, derivados de los cambios en la cobertura forestal y erosión del suelo, respectivamente, en los años 1976, 2010 y 2019 en la Área Natural Protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala” a través de Sistemas de Información Geográfica.

### ***Objetivos específicos***

1. Realizar una caracterización geográfica ambiental del Área Natural Protegida PNLZ, con el fin de identificar los ecosistemas forestales presentes en el área de estudio.
2. Analizar los cambios presentes en los ecosistemas forestales en PNLZ, durante los años 1976, 2010 y 2019, mediante herramientas de percepción remota para determinar las alteraciones en el servicio ecosistémico de soporte captura de carbono.
3. Determinar la distribución espacial de los cambios en la obtención del servicio ecosistémico de soporte retención del suelo durante los años 1976, 2010 y 2019, mediante la estimación de erosión del suelo a través de álgebra de mapas.

# **CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO**

En México la institución encargada de la administración de las Áreas Naturales Protegidas es la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) fue creada en diciembre de 1994 con el nombre de Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), para el año 2000 la SEMARNAP se reestructura dando paso a la actual SEMARNAT.

Es importante mencionar que posteriormente y ese mismo año, se crea la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) como órgano desconcentrado de la Secretaría y encargado desde entonces de la administración de todas las Áreas Naturales Protegidas federales de México. Por otro lado, existen diferentes categorías de Áreas Naturales Protegidas clasificadas en base a La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en 1988 la clasificación de las Áreas Naturales protegidas, no obstante, a través de tiempo se han realizado reformas y adiciones por lo que desde 1996 la clasificación queda en 9 categorías de Áreas Naturales Protegida

Los Parques Nacionales conforman el instrumento de política ambiental con mayor definición jurídica para la conservación de la naturaleza. Bajo este contexto, el marco jurídico-administrativo del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, tiene como objetivo, identificar el marco jurídico aplicable en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, desde el ámbito federal, estatal y municipal, de tal manera que estas leyes apoyen la regulación de las acciones sociales, económicas y administrativas que se llevan a cabo en el mismo.

El Parque forma parte de los estados de México y Morelos, fue decretada en 1936 como “Parque Nacional Lagunas de Zempoala”, bajo el mandato de Lázaro Cárdenas, con una superficie de 22,700 hectáreas, posteriormente, el 21 de febrero de 1947, por decreto del Presidente Miguel Alemán Valdez, se modificaron su superficie de 4,790 hectáreas, de las cuales 3,965 (82.78%) corresponden al Estado de México y 825 (17.22%) al Estado de Morelos (DOF, 2014).



## **1.1 Las Ciencias Ambientales como vínculo entre sociedad y el ambiente**

Las Ciencias Ambientales (CA) son un entramado de disciplinas que pueden ser entendidas como un arte en su sentido técnico que privilegia la labor manual, como los diversos saberes étnicos; un sistema ordenado de principios que privilegia la abstracción, para el caso de esta investigación las ciencias ambientales fungen como una herramienta en el análisis de las relaciones hombre-naturaleza, es decir como las actividades antrópicas afectan el entorno natural, entender los procesos en el desarrollo de impactos directos en el medio natural, para determinar o formular alternativas de solución.

Las CA no se ciñen al estudio del cambio climático o de la contaminación ambiental, sino que, desde distintas perspectivas, buscan, como objetivo de estudio, las relaciones del ser humano consigo mismo y con la naturaleza y la vida, desde un ámbito multidisciplinar y metodología conforme a la ciencia de que se trate. Así queda establecido que el objeto de estudio de las CA es la trama vital de la que el hombre forma parte (Saavedra, 2014).

La conceptualización de Ciencias Ambientales es rigurosamente operacional: son ciencias que contribuyen al desarrollo del bienestar humano sobre una base ecológicamente sustentable, es decir, las ciencias contribuyen a un fin común, son múltiples y las constituyen distintos acercamientos disciplinarios al estudio y solución de problemas relacionados con la interacción hombre-ambiente.

El objetivo de las CA está en la materialización de un enfoque interdisciplinario, estudiar el objeto de estudio desde diferentes posturas, enfoques, perspectivas y disciplinas. Jaksin (1997), las define como una rama del conocimiento científico que busca entender, de manera interdisciplinaria, el funcionamiento del ambiente, las diversas formas en que lo afectamos y las estrategias que podemos implementar para enfrentar tales efectos.

## **1.2 Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental**

Los componentes teóricos metodológicos de esta investigación se establecen a partir de la perspectiva holística e integradora de la Teoría General de Sistemas (TGS) de Ludwig Von Bertalanffy (1976), quien menciona que la teoría representa un esfuerzo de estudio interdisciplinario que trata de encontrar las propiedades comunes a entidades, los sistemas que se presentan en todos los niveles de la realidad, pero que son objeto de disciplinas académicas diferentes.

Dentro de TGS se debe constituir un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales que al mismo tiempo sean un instrumento básico para la formación y preparación de científicos. El análisis mediante sistemas permite estudiar fenómenos de distinta complejidad desde el funcionamiento de una célula hasta el planeta Tierra.

Retomado los principios de la TGS y las características de las CA como una ciencia integradora; ambas contribuciones científicas consideran que los estudios holísticos e integradoras parten del estudio sobre las relaciones que existen entre los componentes que conforman la realidad (grupos humanos y ecosistemas) y de las problemáticas que se derivan de dicha relación, dando paso a una serie de marcos integradores que ofrecen soluciones urgentes a los problemas ambientales actuales (Leff, 2011).

Se pretende analizar y describir las relaciones existentes entre el medio natural y social presentes en el PNLZ desde las perspectivas de la TGS y las CA.

Dicho lo anterior, los servicios ecosistémicos representan un sistema complejo, al tener relaciones positivas o negativas con uno o más elementos e incluso subsistemas. Un sistema complejo presenta un comportamiento global de características de conjunto que no pueden reducirse al comportamiento y propiedades de sus componentes considerados aisladamente (Rodríguez, 2017).

Los sistemas más complejos están constituidos a su vez por subsistemas, y estos, a su vez, por componentes más sencillos. Al ser aplicado a los problemas ambientales se vuelve a un más complejo y en ellos intervienen muchos factores, por lo que no pueden ser abordados desde una sola ciencia, sino con una visión multidisciplinar como la Biología, Geología, Física, Química y otras ciencias, son imprescindibles para su estudio, pero también lo son la Economía, el Derecho, la Religión, la Ética, la Política y otras ciencias sociales (Maldonado, 2014).

Al estudiar los Servicios Ecosistémicos (SE) se presentan infinidad de relaciones y problemáticas en otros sistemas e incluso en otros ciclos como el del agua en un mismo tiempo ya que comparten características y componentes entre sí. Es importante resaltar que para el caso de una problemática ambiental va a ser muy frecuente no encontrar soluciones únicas a los problemas. A veces habrá un abanico de soluciones y en otras ocasiones no habrá ninguna clara y habrá que elegir la que mejor se adapte a las circunstancias encontradas.

Las ciencias ambientales son una oportunidad de discutir, consensuar y probar diferentes soluciones y formas de enfrentarse con el problema, después de conocer bien todos los hechos que afectan al problema que estemos analizando (Corredor Fonseca y Páez, 2014).

Uno de los enfoques científicos de la TGS es el Holístico o Sintético según Rivadeneira (2015), estudia el todo o la globalidad y las relaciones entre sus partes sin detenerse en los detalles. Pone de manifiesto las propiedades emergentes, resultantes del comportamiento global y de las relaciones de los componentes, para esta investigación se determinó por el hecho de que no se estudiara el sistema completo, se analizaran dos SE de los muchos que existen, sin embargo, son de gran importancia por las interacciones entorno con otros subsistemas para lograr un fin común; que existen un equilibrio natural y social.

Por la naturaleza de la investigación, existen múltiples intercambios de materia y energía entre el sistema natural, social, económico y cultural es así que se puede identificar como un sistema abierto.

Ya que los SE brindan productos tangibles e intangibles a otros sistemas, que al mismo tiempo pueden tener impactos negativos o positivos, ejemplo de ello es la explotación de recursos naturales.

De acuerdo con Peralta (2016), menciona que los sistemas abiertos son aquellos que intercambian materia y energía con el exterior. Todos los sistemas biológicos son sistemas abiertos, para mantenerse vivo el sistema debe tomar energía y materia del exterior, también debe liberar energía (calor) que se genera en los procesos químicos como la respiración implementado en la investigación los dos servicios ecosistémicos a estudiar funcionan como elementos proveedores de un producto intangible de los cuales dependen para que exista un funcionamiento no solo en el sistema natural de igual manera en el social y económico ya que interrelacionan entre si al depender unos de otros

Es importante precisar que las relaciones entre los servicios son complejas. Rodríguez (2014), menciona que son aquellas en que una variable influye sobre otra u otras que, a su vez, influyen sobre la primera. El resultado es un conjunto de relaciones encadenadas en círculo, que recibe el nombre de bucle de retroalimentación, realimentación o feedback.

Arnold y Osorio (1998), mencionan que la retroalimentación positiva se produce cuando la variación de una variable en un sentido (aumento o disminución) produce un cambio de otra u otras variables en el mismo sentido (aumento o disminución respectivamente) y éstas a su vez influyen de la misma manera sobre la primera.

Por su parte Ceballos (2014), menciona que retroalimentación negativa: Se produce cuando la variación de una variable en un sentido (aumento o disminución) produce un cambio de otra u otras variables en el mismo sentido y éstas a su vez, influyen sobre la primera en sentido opuesto (disminución o aumento respectivamente) o viceversa.

### **1.3 Desarrollo del concepto de los Servicios Ecosistémicos (SE).**

El concepto de los SE ha ido evolucionando a lo largo del tiempo en torno al incremento de los impactos al medio natural y la preocupación global por resolverlos, actualmente en la bibliografía internacional se habla de los términos Servicios Ambientales (SA) y SE, es importante mencionar que no existe una clara aceptación entre la diferencia conceptual de ambos; de igual manera no se explica de forma clara el origen de uno y otro. Sin embargo, según Meral (2005) menciona que la evolución del tema se podría dividir en tres periodos.

El primero de 1970 a 1997, el segundo a partir de la publicación de Constanza (1997), titulada "The value of the world's ecosystem services and natural capital", y el tercero a partir de 2005, tomando como referencia la propuesta del Millennium Ecosystem Assessment (MEA).

El concepto de servicios ofrecidos por los ecosistemas hacia las poblaciones humanas surge a consecuencia del movimiento ambientalista de finales de la década de los 60 en el siglo XX; en esta época se hace patente la crisis ambiental y se inician cuestionamientos acerca de los impactos en la capacidad del planeta para mantenerse y producir los suficientes bienes para ser consumidos por las poblaciones humanas, junto con una lista de problemas más severos que surge la primera relación de servicios ecosistémicos que se provee a las sociedades en un esfuerzo por comunicar a los tomadores de decisiones y al público en general acerca del estrecho vínculo entre el bienestar humano y el mantenimiento de las funciones básicas del planeta (Balvanera y Cotler, 2007).

En este sentido Holdren y Ehrlich (1974), definieron los servicios ya mencionados en el capital natural como las funciones de los servicios de carácter público proporcionados por el ambiente global que no pueden reemplazarse por tecnología ahora o en un futuro previsible y que incluyen, entre otros, el control de plagas, la polinización, la regulación del clima.

Posteriormente Daily (1997), da un amplio rango de condiciones y procesos, a través de los cuales, los ecosistemas naturales y las especies que hacen parte de ellos ayudan a sostener la vida humana, por ejemplo, son fuente de materias primas, de alimento y de productos medicinales que dan pauta a el desarrollo y equilibrio de la sociedad.

En el contexto internacional, de manera más reciente el informe de ecosistemas del milenio (2005), plantea el concepto de los SE en un marco de referencia conceptual, metodológica y de aplicación en la toma de decisiones. En su definición de SE precisa “son los beneficios directos e indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad”.

Los SE se pueden definir como todos aquellos beneficios que la sociedad obtiene de los ecosistemas; un concepto cada vez más aplicado a la conservación del medio ambiente, el bienestar humano y la implicación de las intervenciones antropogénicas en el medio natural (MEA, 2005).

En las últimas décadas el término ha tenido un énfasis geográfico y se ha hecho análogo a los tipos de vegetación y ocupación del suelo. Se sugiere que esta simplificación ignora el hecho de que los límites de algunos tipos de vegetación son discretos, mientras que los límites de los ecosistemas no lo son. A las zonas de transición entre ecosistemas se les conoce como “ecotonos” (CONABIO, 2018).

Según la CONABIO para la preservación de un ecosistema son necesarios los procesos ecológicos: ciclo del agua, los ciclos de nutrientes, el flujo de energía y la dinámica de las comunidades, es decir, cómo cambia la composición y estructura de un ecosistema después de una perturbación (sucesión). En este sentido los ecosistemas representan una fuente de bienestar a las sociedades, abastecimiento de materias primas, suministro de agua, regulación climática son algunos de dichos beneficios.

Si bien en un principio se creía que estos eran inagotables, en la actualidad existe una visión totalmente opuesta, ya que se reconoce la necesidad de conservar los ecosistemas debido a su fragilidad y pérdida acelerada de sus extensiones,

limitando así la posibilidad de brindar bienes y servicios, y que este mensaje llegue a los actores claves a nivel mundial con la finalidad de preservarlos, es por eso que surge la necesidad de evaluar, definir y agrupar este grupo de bondades que los ecosistemas brindan (García, 2015).

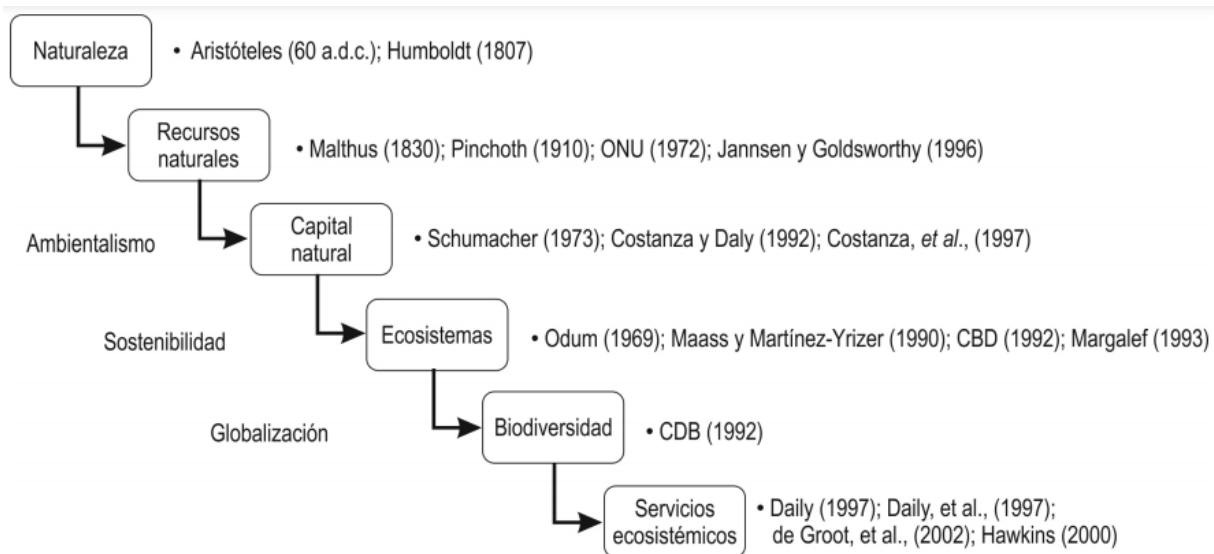
Barrera, Bachmann y Tironi (2015), mencionan que los SE engloba las interacciones socio-ecológicas de dependencia hombre naturaleza, que contribuyen al bienestar común de las personas y las economías locales y nacionales, siendo de gran utilidad para llegar a un fin común la sustentabilidad natural, los servicios ecosistémicos son esenciales para mantener y mejorar el bienestar humano.

En México Balvanera (2009), sienta las bases para desarrollar estudios a nivel nacional sobre servicios ecosistémicos, a pesar de contar con diversos estudios en la línea sobre temáticas de sustentabilidad en los ecosistemas del territorio, estos son escasos, aún más aquellos que involucran especialización cartográfica de las problemáticas o variables identificadas.

El estudio de los SE toma fuerza, al ser de vital importancia ya que es fundamental para el bienestar de las sociedades y tiene estrecha relación con el desarrollo económico lleva a este término a ser uno de los más estudiados en el área de las ciencias del desarrollo sustentable (Balvanera, 2009).

El concepto de los SE ha tenido distintas adecuaciones a finales del último siglo y sobre todo a en a principios del siglo XX, dando a la creciente importancia global de temáticas en torno a problemáticas medio ambientales como la escases de agua, sobre explotación de recursos como la madera y actividades mineras, pero es importante precisar que si bien se aborda desde distintas perspectivas como lo recalcan los autores ya mencionados, el interés se vuelve mutuo por cuidar y preservar los SE, ya que son fundamentales para que exista un equilibrio y desarrollo de la sociedad actual no dejando de lado a posteriores generaciones (diagrama 1).

**Diagrama 1.** Evolución conceptual del enfoque: servicios ecosistémicos



**Fuente:** Caro y Torres, 2015.

#### 1.4 Clasificación de los Servicios Ecosistémicos

Dentro de los principales intentos de clasificación de los SE o bienes y servicios, el de Costanza (1997), marca la pauta definiendo 17 servicios ecosistémicos (que incluyen bienes de los ecosistemas), asociados a las funciones de los ecosistemas que producen o genera el bien o servicio. Sin embargo, esta primera aproximación es solo un listado y es hasta la propuesta de De Groot (2002), que se presenta una primera clasificación enfocada en diseñar una tipología sistemática y un marco de trabajo general para el análisis de funciones y servicios de los ecosistemas.

- **Funciones de regulación:** Relacionado con la capacidad de los ecosistemas para regular procesos ecológicos esenciales y sostener sistemas vitales a través de ciclos biogeoquímicos y otros procesos biológicos. Estas funciones proporcionan muchos servicios que tienen beneficios directos e indirectos para las poblaciones humanas, como lo son el mantenimiento de aire limpio, depuración del agua, prevención de inundaciones y mantenimiento de tierra cultivable, entre otros.



- **Funciones de hábitat:** Los ecosistemas naturales proporcionan hábitat de refugio y reproducción para plantas y animales contribuyendo a la conservación biológica y diversidad genética. Estas funciones proporcionan servicios como mantenimiento de la diversidad biológica y genética, y de especies comercialmente aprovechables.
- **Funciones de producción:** Los procesos fotosintéticos y autótrofos en general, a partir de los cuales los organismos autoabastecen sus requerimientos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos y que también son sustento de consumidores de distinto orden, para generar una mayor variedad de biomasa.
- **Funciones de información:** Los ecosistemas proporcionan funciones de referencia y contribuyen al mantenimiento de la salud humana proporcionando oportunidades de enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, recreación y experiencias estéticas (paisaje).

Por otra parte, de las aportaciones más importantes realizadas fue la agrupación de los mismos en cuatro categorías: de aprovisionamiento o bienes y productos brindados por los ecosistemas tales como los alimentos, el agua, los recursos genéticos, los productos forestales.

Los de regulación que atañen a los beneficios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos e inciden en el clima, las inundaciones, la calidad del agua; culturales definidos como los bienes no materiales obtenidos de los ecosistemas: el enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, la reflexión, la recreación y las experiencias estéticas; de soporte o apoyo que se refieren a procesos ecológicos (Caro y Torres, 2015).

Para 2005 la (MEA) incluye servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales con la intención de facilitar la toma de decisiones (tabla 1).

**Tabla 1. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos por la MEA**

Servicios de aprovisionamiento	Servicios de regulación	Servicios culturales	Servicios de soporte
Productos obtenidos de los ecosistemas	Beneficios obtenidos de la regulación de los procesos de los ecosistemas	Beneficios no materiales obtenidos de los ecosistemas	Servicios necesarios para la producción de otros servicios de los ecosistemas
Alimentos	Regulación del clima	Espiritual y religiosos	Formación de suelos
Agua dulce	Regulación de enfermedades	Recreativo y turístico	Reciclaje de nutrientes
Leña	Regulación y saneamiento del agua	Estético	Producción primaria
Fibras	Polinización	Inspirativo	
Bioquímicos		Educativo	
Recursos genéticos		Identidad del sitio	
		Herencia cultural	

Fuente: MEA, 2005.

1. **Servicios de soporte:** necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos.
2. **Servicios de Aprovisionamiento:** productos obtenidos del ecosistema.
3. **Servicios de Regulación:** beneficios obtenidos de la regulación de los procesos del ecosistema.
4. **Servicios de Culturales:** beneficios no materiales que la gente obtiene de los ecosistemas.

### 1.5 Pago de los servicios ambientales

Constanza (1997), define como servicio ambiental (ecosistémico) a los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. La valoración económica se define como el intento de asignar valores cuantitativos para los bienes y servicios proporcionados por los recursos del medio ambiente. Sin embargo, esta definición sólo es parcial, ya que hay que ser más específico acerca de lo que para los economistas quiere decir el término valor económico.

## 1.6 El medio ambiente como un sistema regulador

Para Cantú (2013), el medio ambiente es un sistema constituido por un conjunto de factores físicos, químicos, biológicos, sociales y culturales que se relacionan entre sí, de modo que un cambio en un factor repercute en los otros, por lo tanto, los factores que intervienen en el medio ambiente son las variables de este sistema. La energía del sistema es la del Sol y la materia está contenida en la Tierra.

El medio ambiente se divide en sistemas menores o subsistemas que, a su vez, contienen otros sistemas menores:

- **Sistemas Naturales:** Son los cuatro subsistemas o capas de la Tierra: geosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera.
- **Sistemas Humanos:** Constituidos por los seres humanos y las relaciones sociales que se establecen entre ellos, así como las actividades que desarrolla. Los elementos de estos sistemas son por ejemplo los lugares de trabajo, los colegios, el transporte, etc.

## 1.7 Ecosistemas forestales y sus componentes

Las masas forestales también suelen conocerse como bosques, éste término en ecología es denominado como la agrupación extensa de árboles en espesura o como el conjunto de plantas que cubren el suelo y se utilizan como sinónimos; tapiz vegetal, cubierta vegetal. Para ecología vegetal es un término amplio utilizado para designar a toda la vegetación que ocupa un área (López, 2000).

La denominación cubierta forestal es el conjunto de plantas que cubren un monte, desde los árboles hasta el estrato inferior del sotobosque, empleado el término preferentemente cuando hay estrato alto, compuesto por árboles y/o arbustos. A la cubierta formada por el follaje y las ramas de las copas de todos los árboles de una masa forestal se le denomina cubierta de copas y suele usarse la palabra dosel como sinónimo (Pineda, 2009).

## **1.8 Captura de carbono en los ecosistemas forestales.**

La captura de carbono está directamente relacionada con la cobertura forestal ya que se puede definir como la incorporación dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse.

El árbol al crecer va incrementado su follaje, ramas, flores, frutos, yemas de crecimiento, así como altura y grosor del tronco.

La copa necesita espacio para recibir energía solar sobre las hojas dando lugar a una competencia entre las copas de los árboles por la energía solar, originando a su vez un dosel cerrado. Los componentes de la copa aportan materia orgánica al suelo, misma que al degradarse se incorpora paulatinamente y da origen al humus estable que, a su vez, aporta nuevamente CO<sub>2</sub> al entorno (Ordóñez, 1999).

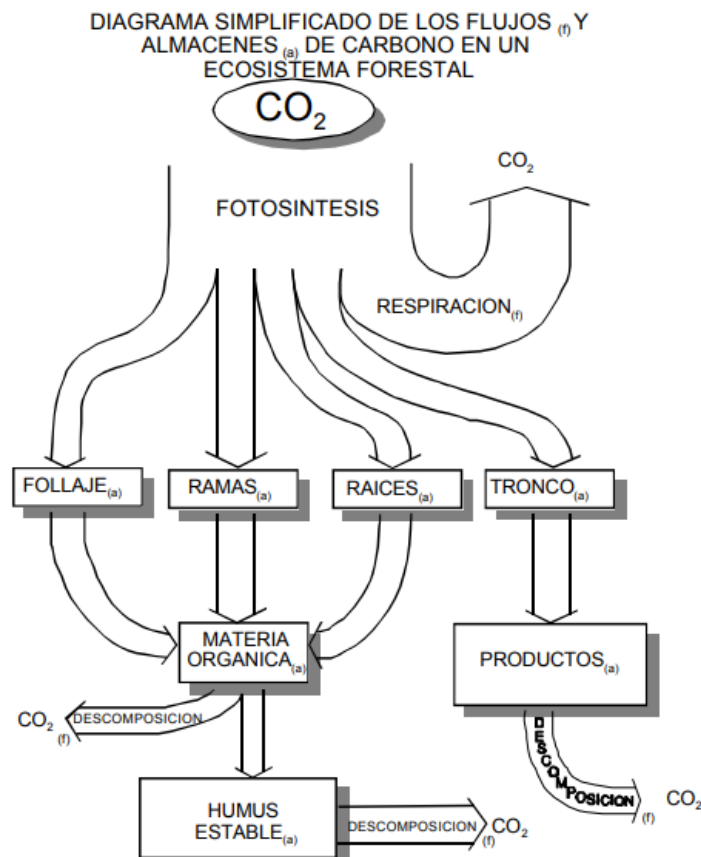
De acuerdo al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre Cambio Climático IPCC (2014), menciona que la captura de carbono es todo proceso, actividad mecanismo que sustrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, o un precursor de cualquiera de ellos, en los ecosistema forestales está compuesto por flujos y almacenes, los flujos se relacionan principalmente con la dinámica de hojarasca (productividad y descomposición), productividad de raíces, intercambio de carbono orgánico disuelto entre los árboles y el ecosistema suelo al que está asociado.

El ciclo del carbono es sumamente complejo debido a que los flujos y tiempos de residencia del carbono es diferente dependiendo el escenario, la estimación precisa de la dinámica de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (es decir, el balance emisión-captura) es uno de los problemas abiertos más importantes en la discusión sobre cambio climático (IPCC, 2014).

Los procesos de captura-emisión son parte de un sistema con cuatro tipos generales de reservorios de carbono (vegetación, aérea y subterránea, materia en descomposición, suelos, productos forestales), con tiempos de residencia y flujos asociados muy diferentes. Estos reservorios se encuentran estrechamente interrelacionados, lo que hace necesario un enfoque sistémico conocido como: método del sistema total del carbono (García y Ordóñez, 1999).

En el diagrama 2 se representa el proceso de la captura de carbono en un ecosistema forestal presenta un sistema complejo los flujos y almacenes de carbono en un árbol donde el follaje, las ramas, las raíces, el tronco, los desechos, los productos y el humus estable son almacenes de carbono, mismos que se reincorporarán al ciclo por descomposición y/o quema de la biomasa forestal (Benjamín y Masera, 2001).

**Diagrama 2.** Proceso de la captura de carbono en un ecosistema forestal



Fuente: Benjamín y Masera 2001.

De manera general la captura de carbono es un proceso que consta de diversas etapas pero que ciertamente se desarrollan en la cobertura forestal, es decir, los ecosistemas forestales son el medio para que exista dichos procesos de aquí la importancia de esta investigación en la identificación de los cambios en el servicio ecosistémico de soporte captura de carbono en el PNLZ.

### **1.9 Principales causas de pérdida de los ecosistemas forestales**

Existen diversas causas que propician la pérdida de cobertura forestal, unas de carácter natural y otras de tipo antrópicas. Entre las naturales encontramos plagas y enfermedades, otros generados por desastres naturales, como deslaves y deslizamientos, los antrópicos incluyen, la deforestación ya sea por tala clandestina, incremento de la frontera agrícola o aumento en zonas urbanas, infraestructura, complejos industriales y turísticos.

La deforestación, es una pérdida permanente de cobertura forestal para otros usos de la tierra, tales como la agricultura, pastizales, nuevos asentamientos humanos e infraestructura, entre otros (FAO, 2006).

### **1.10 Degradación de los ecosistemas forestales**

El deterioro ecológico es cualquier proceso o resultado que incide negativamente en el medio ambiente, entendido éste como el conjunto de valores naturales, sociales y culturales que afectan y condicionan la vida de las sociedades actuales y la de las generaciones futuras (INECC, 2015).

El deterioro ecológico está asociado a la deforestación provocada por cambios de uso del suelo de una superficie arbolada a otra que carece de árboles, las selvas y los bosques, por ser vegetación arbolada, son los únicos que pueden sufrir dicho proceso. En la pérdida de los ecosistemas forestales influyen diferentes factores como pueden ser por plaga, tala ilegal, quema forestal o cambio de uso de suelo entre muchas otras.

La deforestación daña la biodiversidad, al retirarse la cubierta forestal no sólo se destruyen varias especies de manera directa, sino también se modifican seriamente las condiciones ambientales locales (SEMARNAT, 2002).

### **1.11 El suelo y sus propiedades.**

De acuerdo con SSSA (1988), el suelo es un cuerpo formado por sólidos (material mineral y material orgánico), líquidos y gases que hay sobre la superficie de la Tierra, que ocupan un lugar en el espacio y que presentan una o ambas de las siguientes características: horizontes o capas que se diferencian del material parental como resultado de ganancias, pérdidas, transferencias, y transformaciones de energía y materia; o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural.

El suelo está constituido por propiedades físicas, químicas y biológicas. Las físicas constituyen la morfología, su textura, estructura y color. Sus características químicas incluyen sus componentes orgánicos e inorgánicos, su capacidad de absorción y adsorción, intercambio iónico y su pH. Las biológicas se refieren a la ecología, en referencia a la calidad y cantidad de biota existente (Porta, 2003).

Retomando las definiciones anteriores podemos definir al suelo como un cuerpo natural, formando a partir de la intemperización del material geológico original a través del tiempo, y compuesto por diversos horizontes, con una estructura definida. Además de ser elemental en el desarrollo de vida ya que actúa como un soporte para que exista un equilibrio un ecosistema de mayor escala.

### **1.12 Importancia y cuidado del uso de suelo**

Es importante definir el concepto de uso de suelo al ser un elemento principal donde se desarrollan diversas actividades visto anteriormente, los distintos usos de suelo pueden estar en constante cambio hasta llegar a contribuir en el desarrollo urbano, cada parte del territorio tiene un uso específico asignado de acuerdo a los requerimientos o necesidades de la población.

Es así que el uso de suelo se define conforme a la función que cumple y a las actividades que realizan en él, es decir los usos de suelo se establecen con base a los procesos de actividades concentradas en las localizaciones donde se pueden realizar más eficientes.

El libro Quinto del Código Administrativo del Estado de México existen tres categorías de uso de suelo (Olvera, 2015).

- a) **Urbano:** habitacional, comercial, industrial, cultural, recreativo, administrativo.
- b) **Urbanizable:** por sus características apto para ser urbanizado.
- c) **No urbanizable:** suelo protegido por su valor histórico, natural etc.

### **1.13 Servicios ecosistémicos que brinda el suelo.**

El suelo es un recurso natural finito y no renovable, en él se desarrollan importantes funciones que presta diversos SE que mantienen un equilibrio y que apoyan las actividades sociales y económicas de las sociedades.

**A.- Soporte de las actividades humanas y fuente de materias primas:** el suelo influye considerablemente sobre el medio en el que se ubica y repercute en las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se asientan en ese territorio, grupos que ejercen diferente grado de presión sobre el suelo y que generan así afectación o deterioro de éste.

También, el suelo suministra materias primas como turba, grava, arena, arcilla o rocas, utilizadas en varios procesos productivos (Gardi, 2014).



**B.- Producción de alimentos y biomasa:** El SE más conocido que provee el suelo es el de provisión, ya que es el sustrato en el que se desarrollan los cultivos que nos proporcionan alimentos, forrajes, fibras y combustibles.

El suelo es el hábitat de organismos que son fuente de genes utilizados en el desarrollo biotecnológico, en el control de los patógenos o para promover el crecimiento vegetal (ONU, 2018).

**C.- Escenario indispensable para los ciclos biogeoquímicos:** participación en los ciclos biogeoquímicos de elementos clave para la vida como carbono, nitrógeno, fósforo, etc., que continuamente y por efecto de la energía disponible, pasan de los sistemas vivos a los componentes no vivos del planeta.

No obstante, lo más conocido, es que el suelo es el asiento natural para la producción de alimentos y materias primas de los cuales depende la sociedad mundial (CONABIO, 2016).

**D.- Almacenamiento o fijación de carbono:** el suelo por sus propiedades almacena carbono contenido en las capas que conforman el suelo de los ecosistemas forestales; este suelo es originado por fragmentación de la roca madre expuesta (material parental), donde se establece un organismo vegetal, que a lo largo del tiempo va formando capas por depositación de materiales, las que al irse acumulando y compactando, almacenan una cierta cantidad de carbono misma que se incrementará por la continuidad del proceso de formación del suelo (Benjamín y Masera, 2001).

**E.- Almacenamiento y filtración de agua:** El suelo capta, infiltra y almacena el agua en el ámbito del ciclo hidrológico y permite así la recarga de los acuíferos. En estas circunstancias, el suelo influye en la calidad del agua, ya que amortigua y atrapa ciertos contaminantes e impide que lleguen a las reservas de agua.

El suelo, en estas circunstancias tiende a modular indirectamente la temperatura y la humedad, y por ello puede incidir en la mejora del aire.

El suelo almacena el agua, llamada agua verde, representa cerca del 90% del agua consumida por los cultivos alrededor del mundo. Este servicio, junto con la capacidad del suelo para absorber y posteriormente emitir calor, lo convierten también en un importante regulador climático (SEMARNAT, 2020).

***F.- Reserva de biodiversidad:*** El suelo es una de las reservas más importantes de biodiversidad, por el enorme número de organismos que viven en su superficie y al interior del mismo; la abundancia es tal, que se cree, supera la establecida por encima de este cuerpo natural. Vale subrayar, que los servicios ecosistémicos que presta el suelo, dependen de las complejas comunidades de organismos presentes en este medio.

#### **1.14 Procesos de cambios de uso del suelo**

Los cambios de uso del suelo son parte fundamental de la investigación ya que a partir de este fenómeno se genera la expansión de los asentamientos humanos es así que existen diversos impactos tanto negativos como positivos, para el caso de la investigación los cambios de uso de suelo es un proceso que se puede analizar desde un enfoque geográfico ya que se desarrolla en el territorio además de relacionarse con otros elementos como el natural y social es por ello que deben de existir estudios del cambio de uso de suelo (García, 2012).

Dentro de los impactos negativos existe una gran cantidad como la pérdida de masa forestal para Galicia (2001), la diversidad y heterogeneidad de los procesos de uso del suelo debe ser analizada detalladamente, debido a sus efectos diferenciales sobre el ambiente.

La mayor degradación ambiental se alcanza cuando la magnitud de los daños sobrepasa la capacidad de los mecanismos naturales del ambiente (resistencia y resiliencia, o capacidad de recuperarse después de sufrir daños) para regenerar las estructuras y procesos ecológicos que favorecen la permanencia del potencial natural y de los servicios ambientales asociados a los ecosistemas.

### **1.15 Procesos de la erosión del suelo**

La erosión, en principio, es un fenómeno natural que implica el desprendimiento de suelo y/o fragmentos de roca, y como tal es un fenómeno inevitable que en su tasa de progresión natural es responsable de un proceso constructivo al contribuir con la formación de suelo, pero con una tasa acelerada por acción antropogénica se constituye en un proceso de degradación que resulta destructivo al fomentar su pérdida (Jorge y Guerra, 2014).

Los procesos de erosión natural ocurren progresiva o violentamente, afectando volúmenes importantes de material geológico o por medio de un proceso de desgaste lento y casi imperceptible de los suelos, contribuyendo así a la conformación del relieve y a la evolución de los suelos (Lal y Stewart, 1990).

Se considera al suelo como un recurso no renovable, debido al largo tiempo que se requiere para su formación. Su degradación se traduce como la pérdida de productividad biológica y de potencial para sostener vida humana, inducida por las actividades antrópicas (SEMARNAT, 2014).

La erosión hídrica es el arrastre de las partículas de la superficie del suelo por el agua. Aunque sucede sin necesidad de actividades antrópicas, su efecto sí es incrementado por el deterioro de la cobertura vegetal, causada por el hombre. Diversos factores intervienen en los procesos de erosión hídricos (FAO-PNUMA, 1980):

- a) Climáticos traducido en el potencial erosivo de la lluvia.
- b) Edáficos expresado como la erodabilidad o susceptibilidad del suelo para ser erosionado.
- c) Topográficos manifestados en la longitud, forma y pendiente del terreno.
- d) Humanos representados básicamente por la degradación de la cubierta vegetal, alterando: El tipo de vegetación, porcentaje de cobertura y condiciones de la superficie del suelo entre otras.

## 1.16 Desarrollo de los Modelos de Erosión del Suelo

Los modelos para la estimación de la erosión y evaluación de las pérdidas de suelo, se desarrolló en los Estados Unidos de América E.E UU. con las investigaciones del Forest Service de USA (1915) y de Miller (1917), al analizar los efectos de distintos tipos de cobertura vegetal y la rotación de cultivos sobre escorrentías y la erosión en parcelas experimentales.

El primer modelo que consideró de manera conjunta los parámetros de la cubierta vegetal, (C), longitud de la pendiente (L), la inclinación de la pendiente (S), el valor de la precipitación (P), así como la erodabilidad del suelo (e) fue el de Musgrave desarrollado en 1947. El Forest Service y el Soil Conservation Service trabajaron durante cuarenta años aproximadamente para mejorar los métodos previos, dando como resultado el modelo del USLE (Universal Soil Loss Equation), desarrollada principalmente por Wischermeier y Smith, (1978).

El modelo USLE evolucionó conforme se desarrollaron investigaciones y prácticas de estimación de la erosión, generando así el RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation). Aunque basado en la misma fórmula, éste método varía del USLE en: una aproximación que toma en cuenta la variación temporal en el cálculo del factor K; una nueva ecuación para calcular el factor LS; una aproximación subfactorial para evaluar el manejo de la vegetación, nuevos valores a las prácticas de conservación (State of Michigan University, 2002).

Finalmente, la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), es la modificación de la USLE al introducir valores de erosividad de la lluvia adaptados a variaciones regionales de los Estados Unidos y a la reducción de la erosividad que causa el agua en suelos inundados. Se optó por usar esta metodología ya que esta ecuación a diferencia de la USLE, pretende tener los siguientes alcances:

- Nuevos valores de erosividad de lluvias-escurremientos en condiciones áridas.
- Desarrollo de un término de susceptibilidad del suelo a la erosión estacionalmente variable K y métodos alternativos de su estimación cuando el nomograma no es aplicable.
- Investigación de un nuevo método para calcular el factor cubierta-manejo (C), utilizando subfactores que incluyen uso previo de la tierra, cubierta de cultivos, cubierta vegetal del suelo (incluyendo fragmentos de roca en la superficie) y rugosidad del terreno.
- Nuevas formas de estimar los factores de largo y magnitud de la pendiente LS que consideran porcentajes de erosión en surcos e ínter-surcos.
- La capacidad de ajustar el LS para pendientes de forma variable.

### **1.17 Aplicación del modelo RUSLE**

La aplicación de la RUSLE en el ámbito internacional para el mapeo de los servicios ecosistémicos se presenta en la investigación de Uttam y Majumder (2016), quienes desarrollaron un estudio basado en el análisis de la vulnerabilidad de las cuencas analizadas desde diferentes escalas geográficas, exponen de manera detallada la forma de mapear SE en pequeñas escalas, plataformas para la obtención de insumos como cubierta vegetal, ecosistemas y demás, en el continente europeo.

En 2014 se estimó la erosión hídrica y potencial de los suelos del Parque Natural Sierras de Cardeña y Montoro en el sur de España, mediante la aplicación del RUSLE a través de un SIG. La problemática en el sitio fue la disminución en la fertilidad del suelo afectando a la vegetación, la fórmula se determinó aplicando el Factor R y la estimó el Factor K mediante el método de Wischmeier y Smith, (1978). En este estudio, se comprobó que la cubierta vegetal es el factor más determinante para el control de la erosividad de la lluvia (Lozano y Parras, 2014).

En México, Flores (2016), menciona que el suelo es la base de la actividad humana y se debe proteger como recurso. Sin embargo, son estas actividades de origen antropogénico las cuales pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión al exponer al suelo al impacto del agua o del viento, derivado de las formas de uso del suelo y su manejo.

En su investigación “Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo” analizó la erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana (cuenca del río Pichucalco, del río San Pedro y cuenca del río Sonora) la problemática es cómo influyen en mayor medida en la pérdida de suelo en las características propias de cada cuenca.

En el contexto local, Hernández (2008) realizó un análisis de pérdida de suelo en la cuenca del Curso Alto del Río Lerma ya que tiene una importancia particular en el contexto de la República Mexicana, en esta cuenca el proceso de erosión se presenta de forma natural dadas las características de la zona donde se encuentran fuertes pendientes y donde ocurren anualmente altas intensidades de precipitación, sin embargo la intervención humana ha acelerado el proceso de pérdida de suelo, como resultado se logró describir espacialmente la variación del tipo y uso de suelo.

Después de realizar un análisis y revisión de las investigaciones anteriores se obtuvo un contexto más amplio de aspectos teórico-metodológicos relacionados con el procesamiento de imágenes de satélite y en la aplicación del método universal RUSLE, que fungirán como base en el desarrollo de la metodología de los procesos para cumplir los objetivos planteados.

## 1.18 Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Chuvienco (2002), menciona que la percepción remota es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, suponiendo que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, y que no solo engloba el proceso para adquirir las imágenes, sino también el posterior procesamiento que implica la conversión de las imágenes a productos de información.

Es en la etapa posterior de procesamiento donde entran en función los SIG, en los cuales se vacía la información proveniente de los sensores para poder ser manipulada; los SIG pueden definirse en grandes rasgos como hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados. Lo anterior nos indica la estrecha relación que guardan los SIG con la percepción remota, desde la adquisición de la información proveniente de los sensores remotos hasta la obtención del insumo final.

De acuerdo con Chuvienco (2002), un sistema de percepción remota incluye los siguientes elementos:

**1.- Fuente de energía:** emite la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de una fuente externa a éste, en cuyo caso se habla de percepción remota pasiva, o de una fuente emisora de haz energético en el propio sensor, lo que se denomina percepción remota activa.

**2.- Cubierta terrestre:** formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de la fuente de energía y la emiten de acuerdo a sus características físicas.

**3.-Barredor multiespectral:** compuesto por un arreglo de sensores y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

**4.-Sistema de recepción (comercialización):** en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado y tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.

**6.-Intérprete:** convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio. El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (sistema sensor) recibe un haz energético procedente de la escena (cubierta terrestre) por reflejo de la luz solar (fuente de energía).

### **1.19 Aplicaciones de los sistemas de percepción remota**

Las aplicaciones para las imágenes satelitales son una fuente global de recursos para los gobiernos, las empresas y los ciudadanos particulares. La información que se puede extraer de la siempre cambiante faz de la tierra, tanto en sus aspectos naturales como culturales, proporciona una nueva dimensión visual de análisis que permite comprender en profundidad los fenómenos de los cambios ambientales.

Algunos ejemplos de la aplicación de los SIG se presentan a continuación, existen diferentes enfoques respecto a los temas de cambios de uso del suelo Emanuelli, Duarte y Milla (2016), realizaron un análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante un modelo de cambio de uso de suelo aplicado en la República de Costa Rica en el periodo 2010–2015.

El objetivo principal fue determinar la dinámica de cambio utilizando imágenes satelitales de alta resolución espacial del sensor RapidEye mediante la aplicación de SIG.

Por otro lado, Escandón (2018), determinó el cambio en la cobertura forestal y uso del suelo en el periodo 2000-2009 en el estado de Morelos, México, dentro de los objetivos principales fue elaborar mapas de uso y cobertura del suelo para analizar los cambios detectados durante un período de 9 años, mediante imágenes Landsat TM de los años 2000 y 2009, en Morelos, México; y analizar los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo.



A fin de identificar las zonas con mayor impacto ya que a partir de la pérdida de la cobertura forestal se presentan otras problemáticas como la pérdida y extinción de especies que pierden o se modifica su hábitat natural.

Finalmente, en el contexto local, Flores (2019), analizó la distribución espacial de los servicios ecosistémicos turismo, captación de carbono, retención del suelo, alimentación y ornamentales en la región VI Ixtapan de la Sal, Edo. México, los mapas elaborados para determinar la capacidad de almacenamiento de carbono en la región muestran que es necesario elaborar políticas y reglamentos locales que sean elaboradas desde un punto de vista multidisciplinar y a su vez colaborativo.

Es importante resaltar que para esta investigación el uso e integración de nuevas herramientas, como los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección, permitirán estimar la magnitud de los cambios asociados a procesos diferenciales del cambio en la cobertura forestal además de, precisar el crecimiento de las actividades antrópicas a costa de la vegetación natural existente durante los años a estudiar.

## **CAPITULO II. METODOLOGÍA**

Esta investigación utilizó un enfoque cuantitativo ya que sus principales características es la recopilación de datos además que utiliza métodos clasificatorios, agrupamiento de unidades espaciales para llegar a definir variables que expliquen la cuantificación de los actuales usos de suelo. Por otro lado, el enfoque cuantitativo puede relacionar variables socio espaciales para que sea posible su comparación (Monje, 2011).

La investigación se basó en el método inductivo deductivo, de acuerdo con Rodríguez (2017), adopta la aplicación de una regla general a un caso particular para establecer un resultado, mediante la deducción se pasa de un conocimiento general a otro de menor nivel de generalidad. Las generalizaciones son puntos de partida para realizar inferencias mentales y arribar a nuevas conclusiones lógicas para casos particulares, es decir parte de lo general para realizar inferencias específicas.

Por último, la investigación tiene un alcance descriptivo Jiménez (1998), menciona que establece líneas que conducen al esclarecimiento de relaciones causales se sitúan sobre una base de conocimientos más sólida que los exploratorios. La investigación descriptiva está siempre en la base de la explicativa. No puede formularse una hipótesis causal si no se ha descrito profundamente el problema.

## **Materiales**

Los materiales utilizados para la elaboración del análisis espacio temporal de los ecosistemas forestales para el año 1976 fue la Carta de Uso y Vegetación del INEGI del mismo año mientras que para los años 2010 y 2019 fueron las imágenes de satélite de los sensores Spot 5 con fecha de 16 de enero del año 2010 y Sentinel-2 con fecha del 12 de febrero del año 2019. Estas imágenes fueron descargadas del servidor digital Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (2019). Por otra parte, para la edición cartográfica se obtuvieron datos vectoriales de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

## **2.1 Etapa metodológica 1. Caracterización geográfica ambiental del Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Los componentes ambientales presentes en ANP se analizaron y describieron a partir de la información cartográfica recopilada con escala 1: 50,000 del Geo portal del INEGI, posteriormente se representaron cartográficamente los componentes ambientales de los municipios que conforman el área de estudio.

Para la identificación de los ecosistemas se retomó la carta de los Uso de Suelo y Vegetación INEGI (1976), menciona que es un banco de información que representa el sustento científico a la cartografía de uso del suelo que se produce, es una herramienta básica para los especialistas además de ser una muestra de las especies características que constituyen.

La caracterización geográfica ambiental se realizó en base a Camacho, (2019) con el fin de identificar y describir los ecosistemas presentes en la zona de estudio para tener un contexto de las características que la componen además de analizar las relaciones ambientales que existen entre sí.

## **2.2 Etapa metodológica 2. Identificación de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.**

El procesamiento de la cartografía de los ecosistemas presentes de los años 1976, 2010 y 2019 consta de las siguientes tres fases; Fase 1: Digitalización de la carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI (1976), Fase 2: Clasificación de las imágenes de satélite de los años 2010 y 2019, Fase 3: Validación de los mapas de los ecosistemas presentes de los años 2010 y 2019

### ***2.2.1 Fase 1: Digitalización de la carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI del año 1976.***

Todos los procesos se realizaron en el software ArcGis 10.2.1, como primer paso se delimitó el área de estudio acorde al límite establecido en la base de datos de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2008). Así mismo se descargaron las cartas de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI del año 1976 correspondiente a las claves *E14A48* y *E14A1449*, posteriormente se convirtieron a imágenes formato TIFF y de esta manera poder georreferenciarlas.

Para concluir esta fase se digitalizaron los diferentes usos de suelo presentes el área de estudio, se identificaron los siguientes ecosistemas: cuerpos de agua, pastizal, agricultura, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino oyamel, bosque de pino encino y vegetación secundaria. El producto final fue la cartografía de los ecosistemas presentes para este año, cabe destacar que este mapa fue un insumo para la identificación y validación de los ecosistemas presentes.

### ***2.2.2 Fase 2: Clasificación de las imágenes de satélite de los años 2010 y 2019***

Se tomaron en cuentas factores climatológicos al elegir la fecha de descarga de las imágenes, ya que Rejas (2008), considera que la atmósfera cambia de una fecha a otra, por lo que es necesario corregir los valores de las radiancias registrados por el sensor. De igual forma la atmósfera puede afectar las características de la imagen aparente del objeto, como son la longitud de onda, reflectividad de la superficie y variabilidad espacial.

Con base en lo anterior se descargaron dos imágenes de satélite de la plataforma digital de GloVis, es importante mencionar que para el año 2010 se optó por utilizar una imagen SPOT-5, ya que cuenta con una resolución de 10 metros, para este año se trabajó con el compuesto color verdadero y falso color para tener una mejor visualización en la identificación de los diferentes ecosistemas forestales presentes para este año.

Por su parte, para el año 2019 se utilizó una imagen SENTINEL-2A por distintas razones la principal es que cuenta con una resolución de 10 metros y la homologación de escalas de las dos imágenes es próxima con la escala de la carta de uso de suelo del año de 1976, además es gratuita una de sus principales características es que ya se encuentran corregidas atmosféricamente además de ofrecer datos con niveles de color más realistas, cuenta con 13 bandas de trabajo que se utilizaron para realizar filtros a color natural y falso color de esta manera se tuvo una mejor visualización para determinar los polígonos (sitios de entrenamiento) de los diferentes ecosistemas presentes en el PNLZ.

Se continuó trabajando en un recorte para cada imagen de satélite acotando la superficie en función del límite del ANP, para ello se optó por utilizar un compuesto de infrarrojo para tener una mayor visualización de los diferentes tipos de vegetación, el compuesto consta de una combinación con las bandas espectrales 8, 4, 3.

Es importante mencionar que a partir de la cartografía del año 1976 se generaron puntos estratégicos (centroides) de los ecosistemas identificados para este año, de esta manera se obtuvieron puntos de referencia de los posibles ecosistemas presentes para los siguientes años. Una vez definidos los puntos para cada ecosistema se procedió a delimitar 50 puntos por cada categoría en las imágenes de satélite de los años 2010 y 2019 respectivamente.

La delimitación de los campos de entrenamiento se realizó con base en la regla general establecida por Jensen (1996), que consiste en seleccionar como mínimo 10 veces el número de bandas utilizadas en el desarrollo de las estadísticas de entrenamiento.

Los métodos y procesamientos planteados en las fases metodológicas de preclasificación y clasificación fueron implementados en el software de análisis espacial ArcGis 10.2.1 La clasificación de las dos imágenes de satélite se realizó mediante la herramienta Image classification. Previamente se ratificó cada punto delimitado en los sitios de entrenamiento para cada ecosistema, de esta forma se estableció la representatividad de las muestras identificadas.

Una vez identificados los diferentes ecosistemas, se procedió a clasificar las imágenes aplicando el criterio de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Classification), donde el algoritmo automáticamente clasificó toda el área, de acuerdo al tipo de pixel que presenta reflectancia de un color del pixel respecto a los demás, lo cual permite ajustar con mayor robustez la disposición original de los datos, al estimar la precisión de la clasificación (Toro et al., 2015).

Después de realizar la clasificación se procedió a la validación de las diferentes coberturas de uso de suelo mediante una fotointerpretación con ayuda de imágenes de alta resolución de Google Earth y Google Maps para los años 2010 y 2019, con el propósito de asignarles el uso correspondiente.

### ***2.2.3 Fase 3: Validación de la cartografía de los ecosistemas presentes para los años 2010 y 2019***

Es importante recalcar que para el año 1976 no fue necesario la verificación ya que se retomó la carta de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI. Los resultados obtenidos en la cartografía de los ecosistemas presentes en los años 2010 y 2019 fueron sometidos a una validación con el fin de obtener el grado de fiabilidad, el proceso de evaluación de la confiabilidad temática se divide en tres etapas: a) diseño de muestreo, b) evaluación de los sitios de verificación y c) análisis de los datos (Mas et al., 2003).

### **A.- Diseño de muestreo:**

La unidad de muestreo que se utilizó fue el punto. En cuanto al método de muestreo utilizado fue aleatorio estratificado, que permite tener el control sobre la distribución de los sitios de muestreo, garantizando que no se sobre-muestren las coberturas de mayor extensión en relación a las de menor área (Mas, 2003).

De acuerdo con Mas (2003), el diseño de muestreo contempla la determinación del tipo de unidades de muestreo, el método de selección de las mismas, así como el número de unidades de muestreo necesarias (tamaño de muestra).

Por otra parte, el tamaño de la muestra fue establecido con base en dos aspectos, el primero determinado por Congalton (1988), que sugiere verificar por lo menos 50 sitios por categoría. El segundo basado en los parámetros establecidos por Mas y Couturier (2011), quienes definen que para obtener una fiabilidad global del (80%) y un medio intervalo de confianza de (5%), se deben aplicar 247 sitios de verificación.

De acuerdo a lo anterior, se evaluaron 400 puntos de muestreo para los mapas correspondientes a los años 2010 y 2019, digitalizando 50 puntos por categoría de los ecosistemas identificados para los dos años como se muestra en la tabla 2. Dónde: P= Confiabilidad estimada; \*= Medio intervalo de confianza.

**Tabla 2. Tamaño de la muestra por categoría.**

Porcentaje de fiabilidad (P*)	Categorías identificadas				
	90	80	70	60	50
%					
2.5	553	983	1291	1475	1535
5.0	138	246	323	369	384
10	35	61	81	92	96

**Fuente:** Mas y Couturier 2011.



### **B.- Evaluación de los sitios de verificación**

Para esta etapa se correlacionaron los puntos de muestreo previamente identificados de cada ecosistema presente en los dos mapas generados; la valoración de los sitios de verificación correspondientes a los ecosistemas en los años 2010 y 2019 se realizó con base en la carta de uso de suelo y vegetación del año 1976 del INEGI.

Se registraron puntos de verificación de forma estratégica, es decir se determinaron puntos en los límites cercanos a los centroides generados en la etapa anterior, con el fin de verificarlos en campo y compararlos con los pixeles clasificados en los mapas.

Por otra parte, adicional a la validación digital se determinó complementarla con un recorrido “*in situ*” para ratificar si los puntos establecidos corresponden a los ecosistemas identificados en la cartografía para ello se establecieron 40 puntos; de los cuales 20 se visitaron en campo con GPS y 20 se verificaron a través de imágenes de alta resolución espacial de Google Earth y Google Maps ya que son sitios de difícil acceso, de restricción y de inseguridad dentro del área de estudio.

Todos los puntos de verificación se correlacionaron con los pixeles clasificados en la cartografía para determinar si coincidían con los ecosistemas identificados.

### **C.- Análisis de los datos:**

Para esta última fase de la validación se elaboró una matriz de confusión o matriz de error para los años 2010 y 2019, que permite comprobar la información de los sitios de verificación en los mapas de los ecosistemas seleccionados.

La matriz está integrada por filas que representan las clases de referencia; las columnas representan las categorías del mapa y la diagonal expresa el número de sitios o puntos de verificación, a través de la relación que existe entre los datos de referencia y clases del mapa, considerando que los marginales representan errores de asignación (Mas et al., 2003; Mas y Couturier, 2011) (tabla 3).

**Tabla 3. Matriz de confusión expresada o error**

Verdad terreno (Clases de referencia= $i$ )	Verdad imagen (Categorías del mapa = $j$ )				Total
	$j_1$	$j_2$	...	$j_q$	
$i_1$	$i_1 j_1$	$i_1 j_2$	...	$i_1 j_q$	$i_{1+}$
$i_2$	$i_2 j_1$	$i_2 j_2$	...	$i_2 j_q$	$i_{2+}$
...	...	...	...	...	...
$i_q$	$i_q j_1$	$i_q j_2$	...	$i_q j_q$	$i_{q+}$
<b>Total</b>	$+ j_1$	$+ j_2$	...	$+ j_q$	$\sum i_+$ $\sum +j$

Fuente: Mas *et al.* 2003.

**Donde:**

- $ij$  = Representa el número de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría.
- $i_{1+}$  = Es la suma de los puntos (superficie) correspondientes a la clase de referencia  $i_1$ .
- $+j_1$  = Corresponde a la suma de los puntos (superficie) de la categoría del mapa  $j_1$ .
- $\sum +j$  o  $\sum i_+$  = Es el total de la suma de los puntos de las clases de referencia ( $\sum P_{i+}$ ), o bien, el total de la suma de los puntos correspondientes a las categorías del mapa ( $\sum P_{+j}$ ).

En los resultados obtenidos en la matriz de cambios, se desarrolló el cálculo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza para cada uno de los mapas 2010 y 2019, considerando como mínimo una fiabilidad estimada del 80% (Stehman y Czaplewski, 1998) (tabla 4).

**Tabla 4. Ecuaciones para determinar los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza.**

Indicador	Expresión matemática	Descripción
Confiabilidad global o exactitud general	$P_c = (\sum P_{ij} / \sum P_{+j} \text{ o } P_{i+}) * 100$	Es la proporción de puntos (superficie) correctamente clasificados en los mapas, producto de la interpretación de ortofotos y la imagen de satélite. El coeficiente derivado de su cálculo representa la probabilidad para cualquier sitio en el mapa de ser correctamente clasificado.
Medio-intervalo de confianza	$B = z_{\alpha/2} \sqrt{p(1-p)} / n$	Corresponde al error de la estimación precisa de la fiabilidad del mapa. Dónde: $z_{\alpha/2}$ es el valor que separa a un área de $\alpha/2$ en la cola del lado derecho de la distribución normal estándar (el valor de $z_{\alpha/2}$ en este estudio corresponde a 1.96); $p$ es la fiabilidad esperada; y $n$ corresponde al tamaño de la muestra.
Error de comisión	$E_c = (1 - (P_{ij} / P_{+j})) * 100$	Indica la proporción de sitios de verificación cartografiada en una cierta clase $j$ , pero que en realidad pertenecen a otra categoría.
Error de omisión	$(E_o) = (1 - (P_{ij} / P_{i+})) * 100$	Representa la proporción de sitios de verificación correspondientes a una categoría $j$ que fue cartografiada en otra.
Confiabilidad del usuario	$C_u = (P_{ij} / P_{+j}) * 100$	Se interpreta como la probabilidad que un sitio clasificado como $j$ y aleatoriamente seleccionado sea realmente $j$ en el terreno.
Confiabilidad del productor	$C_p = (P_{ij} / P_{i+}) * 100$	Es la proporción de sitios de verificación de la clase $j$ que están representados en el mapa o en la base de datos como tal.

**Fuente:** Stehman y Czaplewski, 1998.

Previamente al desarrollo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza, se realizó la corrección de las matrices de confusión, generadas por el tipo de método de muestreo que se utilizó en la investigación (aleatorio estratificado).

Debido a que el número de sitios por categoría no es proporcional a la superficie representada por cada una de estas clases, se interpreta que el resultado no debe ser explicado de esta manera (Mas et al., 2003).

Esta corrección se elaboró a través del método planteado por Card (1982), ponderando el número de sitios de verificación, en correlación con la superficie de cada una de las clases establecida en el mapa de los ecosistemas presentes para cada año. A través de este método se desarrollaron matrices de confusión expresadas en proporción, (tabla 5) y en relación con los datos que integran estas, se estimó la proporción y la superficie de cada una de las clases de análisis.

**Tabla 5. Matriz de confusión expresada en proporción**

Verdad terreno (Clases de referencia = $i$ )	Verdad imagen (Categorías del mapa = $j$ )				Total
	$j_1$	$j_2$	...	$j_q$	
$i_1$	$P_{i_1j_1}$	$P_{i_1j_2}$	...	$P_{i_1j_q}$	$P_{i_1+}$
$i_2$	$P_{i_2j_1}$	$P_{i_2j_2}$	...	$P_{i_2j_q}$	$P_{i_2+}$
...	...	...	...	...	...
$i_q$	$P_{i_qj_1}$	$P_{i_qj_2}$	...	$P_{i_qj_q}$	$P_{i_q+}$
<b>Total</b>	<b><math>P_{+j_1}</math></b>	<b><math>P_{+j_2}</math></b>	...	<b><math>P_{+j_q}</math></b>	<b><math>\Sigma P_{+j}</math></b>

Fuente: Mas *et al.*, 2003.

**Donde:**

- $P_{ij}$  = Proporción de puntos (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase.
- $P_{i1+}$  = Es la suma de las proporciones de los puntos (superficie) correspondientes a la clase de referencia  $i_1$ .
- $P_{+j1}$  = Corresponde a la suma de las proporciones de los puntos (superficie) de la categoría del mapa  $j_1$ .
- $\Sigma P_{+j}$  o  $\Sigma P_{i+}$  = Es el total de la suma de las proporciones de los puntos de las clases de referencia ( $\Sigma P_{i+}$ ), o bien, el total de la suma de las proporciones de los puntos correspondientes a las categorías del mapa ( $\Sigma P_{+j}$ ).

### 2.2.4 Cambios en los ecosistemas presentes en el PNLZ mediante la Matriz de tabulación cruzada o matriz de cambios

Se realizó un análisis de los procesos de cambio que se presentaron en los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, mediante la construcción de una matriz de cambios o tabulación cruzada propuesta por Pontius *et al.* (2004). La matriz se construyó con los resultados obtenidos de los mapas de los ecosistemas presentes en los años 1976, 2010 y 2019.

La tabla 6 representa la matriz de cambios, que es una tabla bidimensional donde las columnas representan el área de las categorías cartografiadas en el mapa correspondiente a la fecha 1 ( $f_1$ ). Por su parte, las filas contienen la superficie de las categorías de la fecha 2 ( $f_2$ ). La diagonal principal representa la persistencia, que es el área conservada de cada una de las categorías durante el periodo de análisis ( $f_1$  y  $f_2$ ), (Pontius *et al.*, 2004).

**Tabla 6. Matriz de cambios o tabulación cruzada**

		Fecha 1 ( $f_1$ )				Total ( $f_2$ )
		Categoría 1 ( $f_1$ )	Categoría 2 ( $f_1$ )	Categoría 3 ( $f_1$ )	Categoría n ( $f_1$ )	
Fecha 2 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 1 ( $f_2$ )	Total Categoría 1 ( $f_2$ )
	Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 2 ( $f_2$ )	Total Categoría 2 ( $f_2$ )
	Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría 3 ( $f_2$ )	Total Categoría 3 ( $f_2$ )
	Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 1 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 2 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Categoría 3 ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Categoría n ( $f_1$ ) Categoría n ( $f_2$ )	Total Categoría n ( $f_2$ )
Total ( $f_1$ )		Total Categoría 1 ( $f_1$ )	Total Categoría 2 ( $f_1$ )	Total Categoría 3 ( $f_1$ )	Total Categoría n ( $f_1$ )	<b>SUMA DE LOS TOTALES</b>

**Fuente:** elaboración propia con base en Camacho, 2019 y Pontius *et al.* 2004.

### Indicadores e índices de cambio:

El análisis de la dinámica espacio-temporal de los cambios ocurridos en los ecosistemas terrestres en cuatro municipios al poniente del estado de México, se efectuó a través del cálculo de los indicadores de cambio relativos a pérdidas, ganancias, cambios netos, cambio total e intercambios entre las diferentes clases (Pontius *et al.*, 2004). Por su parte, se establecieron los índices de Braimoh, que permiten analizar las características de espacios geográficos estables en relación a pérdidas, ganancias y cambios netos por categoría (Braimoh, 2006), (tabla 7).

**Tabla 7. Indicadores e índices de cambio**

Indicador	Expresión matemática	Descripción del indicador y variables
Pérdidas	$L_{ij} = P_{j+} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la columna del total del tiempo1 ( $P_{j+}$ ) y la persistencia ( $P_{jj}$ ). Dónde: $L_{ij}$ corresponde a las pérdidas, $P_{j+}$ pertenece al total de cada categoría del tiempo1 y $P_{jj}$ es la persistencia.
Ganancias	$G_{ij} = P_{+j} - P_{jj}$	Es la diferencia entre la fila del total del tiempo2 ( $P_{+j}$ ) y la persistencia ( $P_{jj}$ ). Dónde: $G_{ij}$ corresponde a las ganancias, $P_{+j}$ pertenece al total de cada categoría del tiempo2 y $P_{jj}$ es la persistencia.
Cambio neto	$D_j = L_{ij} - G_{ij}$	Es la diferencia de las pérdidas y las ganancias de cada categoría. Dónde: $D_j$ corresponde al cambio neto, $L_{ij}$ pertenece a las pérdidas y $G_{ij}$ es las ganancias.
Intercambios	$S_j = 2 \times \text{MIN}(P_{j+} - P_{jj}, P_{+j} - P_{jj})$	El concepto de intercambio implica pérdidas y ganancias simultáneas de una categoría sobre el territorio. Se calcula como dos veces el valor mínimo de las ganancias ( $G_{ij}$ ) de cada categoría.
Cambio total	$C_j = D_j + S_j$	Se establece como la suma del cambio neto ( $D_j$ ) y el intercambio ( $S_j$ ), o también como la suma de las ganancias ( $G_{ij}$ ) y las pérdidas ( $L_{ij}$ ).
Índice de ganancia a persistencia	$G_p = G_{ij} / P_{jj}$	Dónde: $G_p$ corresponde al índice de ganancia a persistencia, $G_{ij}$ pertenece a las ganancias y $P_{jj}$ es la persistencia.
Índice de pérdida a persistencia	$L_p = L_{ij} / P_{jj}$	Dónde: $L_p$ corresponde al índice de pérdidas a persistencia, $L_{ij}$ pertenece a las pérdidas y $P_{jj}$ es la persistencia.
Índice de cambio neto a persistencia	$np = G_p - L_p$	Dónde: $np$ corresponde al índice de cambio neto a persistencia, $G_p$ pertenece al índice de ganancia a persistencia y $L_p$ es el índice de pérdidas a persistencia.

Fuente: Braimoh, 2006.

### **2.3 Etapa metodológica 3. Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de soporte captura de carbono en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.**

Los mapas de los ecosistemas presentes el ANP de los años 1976, 2010 y 2019 fueron insumos para determinar los cambios en la producción del SE de soporte captura de carbono, como primer paso se determinó la superficie en hectáreas para cada ecosistema en los tres años.

Es importante mencionar que para esta etapa solo se analizaron los ecosistemas forestales que se verificaron en los mapas de los ecosistemas presentes para cada año de estudio, esto con la finalidad de tener el menor número de errores entre cada una de estas categorías.

Posteriormente se retomaron los resultados obtenidos por Avendaño (2009), Franco (2007) y Jiménez (2013), quienes obtuvieron los índices de captura de carbono por ecosistema forestal, mediante la aplicación de dos etapas; la primera es la obtención de la biomasa total: se estableció el porcentaje de carbono que almacena cada tipo de cobertura forestal a partir de la biomasa obtenida a nivel de cada uno de los árboles, es decir se estimó la biomasa aérea por componente estructural (fuste, ramas, follaje, corteza) a través de una selección aleatoria de árboles, los cuales se derribaron, se midió su altura y se obtuvieron trozas de dimensiones comerciales. Posteriormente en laboratorio se registró el peso seco de cada una de las muestras por componente.

Mediante la diferencia entre el peso fresco y el peso seco de las muestras se determinó el contenido de humedad; este valor se descontó al peso fresco de cada una de las secciones del fuste y de la copa, y de esta forma se obtuvo la biomasa por componente estructural de todo el árbol.

La segunda etapa consiste en la aplicación de las ecuaciones simultáneas de biomasa por regresión relacionando el diámetro normal, la altura total la biomasa individual, por otra parte, la estimación de la biomasa total es igual a la suma de la biomasa estimada por componente, además se tomo en cuenta estimadores como la corteza, ramas y fuste respecto a la biomasa total, es importante mencionar que

la proporción de biomasa de los diferentes componentes estructurales varió de acuerdo al tamaño del árbol. Se obtuvieron los siguientes índices para la captura de carbono en los siguientes ecosistemas forestales:

**Tabla 8. Captura de carbono por tipo de ecosistema**

Especie o tipo de vegetación	Carbono (%)
Bosque de pino	50.31
Bosque de oyamel	46.50
Bosque mixto de pino-encino	47.98
Bosque mixto de pino-oyamel	48.30

**Fuente:** elaboración propia con base en Avendaño *et al.* 2009, Díaz *et al.* 2007 y Jiménez *et al.* 2013.

Como ultimo paso se multiplicaron el total de superficie en hectáreas de cada uno de los ecosistemas forestales por el índice correspondiente al tipo de cobertura forestal para la generación de mapas, graficas y cartografía.

### **2.3.1 Validación en campo del estado y porte de los árboles en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Para esta etapa se determinó y analizo el diámetro y altura de 150 árboles en total de los cuales 50 son de pino, 50 de oyamel y 50 de encino, estos tipos de árboles son ejemplares de los ecosistemas forestales presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala

De acuerdo con Romahn y Ramírez (2010), la medición del diámetro normal o diámetro a la altura del pecho se refiere al diámetro con corteza que tiene el árbol a 1.30 m sobre el nivel del suelo. Para el caso de estudio, la medición del diámetro de los árboles se realizó a la altura del pecho a 1.30 m sobre el nivel del suelo, por otra parte, la altura del árbol se midió de manera indirecta a través de una estimación visual de manera horizontal respecto al árbol, por debajo de este mismo.



## **2.4 Etapa metodológica 4. Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de Soporte retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.**

El análisis espacio temporal de los cambios en el SE retención del suelo, se dividió en dos fases; la primera fue la recolección de datos y la segunda fue la aplicación de la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (RUSLE) con el objetivo de generar cartografía de erosión del suelo de los años 1976, 2010 y 2019.

### **2.4.1 Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE)**

Se eligió este método por ser una ecuación práctica que permite representar rangos de erosión del suelo además de ser una de las metodologías más usadas para determinar la erosión del suelo en toneladas por hectárea al año (Gvozdenovich y Barbagelata, 2015).

De acuerdo con Vargas (2015), el modelo RUSLE se representa con letras mayúsculas los factores que intervienen en el proceso de la erosión del suelo de la siguiente manera:  $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C$

Donde:

- A, es la pérdida de suelo en t/ha.año.
- R, es el factor erosividad de la lluvia en Mjmm/ha.año.
- K, es el factor erosionabilidad el suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha.h)
- L, es el factor longitud de la pendiente (adimensional).
- S, es el factor pendiente media del terreno (adimensional).
- C, es el factor cobertura vegetal (adimensional).

#### **Factor (R) Erosividad de la Lluvia**

El Factor R (Erosividad de la lluvia) es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo, se define como la suma del producto de la energía total de la precipitación por su máxima intensidad en treinta minutos para todos los eventos importantes de precipitación en un área durante un año promedio (Wischmeier y Smith, 1978).

### ***Factor (K) Erosionabilidad del suelo***

El Factor K (Erosionabilidad del suelo), es una muestra su vulnerabilidad a la acción del agua; es una característica inherente a los suelos, que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como también del manejo que de ellos se haga.

### ***Factor de (L) Longitud de la pendiente***

Se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición o bien, hasta el punto donde el escurrimiento encuentra un canal de salida bien definido.

### ***Factor (S) Pendiente media del terreno***

El ángulo de la pendiente modifica el tiempo de permanencia de la lámina de agua que circula por la superficie del terreno. En los terrenos llanos o con poca inclinación el agua tiene más posibilidad de infiltrarse que en las zonas inclinadas, en las que el escurrimiento circula más rápidamente hacia las zonas de menor cota.

### ***Factor (LS) Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno***

El Factor topográfico LS es la relación entre el suelo perdido en un terreno cualquiera con pendiente  $p$  y longitud  $\lambda$ , y la correspondiente a la parcela piloto utilizada en el desarrollo de la RUSLE. Se refiere al efecto combinado de la pendiente y la longitud de los terrenos expuestos a la erosión laminar y en surcos.

### ***Factor (C) Cobertura vegetal***

El Factor C indica el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo. Se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área o parcela con una vegetación dada y sistemas de manejo específicos, y la pérdida de suelo en una parcela en barbecho continuo, limpia y arada, en el sentido de la pendiente, a intervalos regulares. Los valores del Factor C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial.

## 2.4.2 Recopilación de datos para la aplicación de los factores de la RUSLE

### Factor (R) Erosividad de la lluvia

Se recopiló información de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, para ello se descargaron los datos de precipitación media anual correspondientes a los tres años de estudio de la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las cuales se observan en la tabla 9.

**Tabla 9. Precipitación media anual del PNLZ**

Clave	Estación	Municipio	PP 2019 (mm)	PP 2010 (mm)	PP 1976 (mm)
15256	Ocuilan E-23	Ocuilan	128.4	126.1	118.1
15298	Santa Cruz Tezontepec	Ocuilan	84.3	57.0	55.1
17037	Escuela de Biología UAEM	Morelos	123.2	117.3	115.3
17047	Huitzilac	Morelos	173.9	171.7	158.4
17093	Tres Marías	Morelos	156.3	131.5	152.3
15300	Santa Martha E-29	Ocuilan	127.2	115.2	117.1
15354	El Capulín	Ocuilan	112.0	102.2	89.4
17009	C.B.T.A. Huitzilac	Morelos	145.1	187.6	165.1

Fuente: elaboración propia con base en SMN, 2019.

### Factor (K) Erosionabilidad del suelo

Los datos de la edafología del parque se retomaron de la información analizada en la caracterización, que previamente se descargó de la base de datos del INEGI. A partir de esta información se generó cartografía con escala 1; 50,000 en la cual se identificaron dos tipos de suelo además de sus características (tabla 10).

**Tabla 10. Principales características de los suelos presentes en el PNLZ**

Suelo	Superficie	Características			
		Textura	Materia Orgánica	Permeabilidad	Estructura
Andosol	4,232.4	Media (2)	Alta (3)	Alta (3)	Alta (3)
Leptosol	301.5	Media (2)	Alta (3)	Media (2)	Media (2)

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2015.

### ***Factor (LS) Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno***

Se descargaron del geo portal de INEGI las cartas topográficas con clave E14A-48 y E14A-49 correspondientes a la zona de estudio posteriormente se utilizaron las curvas de nivel para generar un modelo digital de elevación e identificar las pendientes.

### ***Factor (C) Cobertura vegetal***

Para obtener los datos del Factor C se retomó la cartografía de los ecosistemas presentes en el área de estudio de los tres años, los cuales están basados en la carta de Uso de Suelo y Vegetación del INEGI de año 1976 y en la clasificación de las imágenes de satélite de los años 2010 y 2019, dentro de los resultados se identificaron ocho distintos tipos de usos de suelo (tabla 11).

**Tabla 11. Ecosistemas presentes en el PNLZ.**

No	Ecosistema
1	Bosque mixto de pino-oyamel
2	Bosque de oyamel
3	Bosque de pino
4	Pastizal
5	Bosque mixto de pino-encino
6	Vegetación secundaria
7	Agricultura
8	Cuerpos de agua

**Fuente:** elaboración propia, 2020.

### **2.4.3 Aplicación de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE)**

Una vez obtenidos los datos para cada factor se procedió a la aplicación metodológica de la fórmula de la RUSLE la cual consistió en los siguientes pasos:

#### **Calculo del Factor (R) Erosividad de la lluvia**

Se generó una capa vectorial con las coordenadas de cada estación meteorológica además de una base de datos con la información de la precipitación media anual la cual sirvió como insumo para generar el RASTER mediante la herramienta Spline, esto proceso se replicó para cada año respectivamente. A partir de los datos de precipitación media anual se aplicó la siguiente fórmula propuesta por Arnolds y modificada por Fornoulds mediante la herramienta Map algebra.

$$R = 0.032 (RI)^{1.9} 26$$

$$RI = \sum MR^2 / AR$$

Donde:

- MR = Media Mensual de Precipitación Pluvial
- AR = Media Anual de Precipitación Pluvial.

#### **Calculo del Factor (K) Erosionabilidad del suelo**

Para la cartografía del Factor K se retomó el método de la Food and Agriculture Organization of the United Nations, (FAO, 1980). Utiliza una metodología de cálculo a partir de la textura superficial (fina, media y gruesa) y la unidad de suelo a que pertenece según la FAO/UNESCO, (tabla 12).

**Tabla 12. Cálculo de valores para el Factor (K) Erosionabilidad del suelo por la FAO, (1980)**

Unidad	Gruesa	Media	Fina	Unidad	Gruesa	Media	Fina
A	0.026	0.040	0.013	Lo	0.026	0.040	0.013
Af	0.013	0.020	0.007	Lp	0.053	0.079	0.026
Ag	0.026	0.040	0.013	Lv	0.053	0.079	0.026
Ah	0.013	0.020	0.007	M (a, g)	0.026	0.040	0.013
Ao	0.026	0.040	0.013	N (d, e, h)	0.013	0.020	0.007
Ap	0.053	0.079	0.026	O (d, e, x)	0.013	0.020	0.007
B	0.026	0.040	0.013	P	0.053	0.079	0.026
Bc	0.026	0.040	0.013	Pf	0.053	0.079	0.026
Bd	0.026	0.040	0.013	Pg	0.053	0.079	0.026
Be	0.026	0.040	0.013	Ph	0.026	0.040	0.013
Bf	0.013	0.020	0.007	Pi	0.026	0.040	0.013
Bg	0.026	0.040	0.013	Po	0.053	0.079	0.026

Fuente: FAO, 1980.

A partir de la cartografía de edafología se asignaron los valores correspondientes a cada tipo de suelo posteriormente mediante herramienta Poligon to raster se generó una imagen con los valores correspondientes al Factor K, el resultado fue un mapa con los valores del Factor K, es importante mencionar que fue un solo producto cartográfico empleado para los tres años.

### **Calculo del Factor (L) Longitud de la pendiente**

La cartografía se realizó a partir del modelo digital de elevación (DEM) con una distancia entre pixeles de 15m (DX) generado en la caracterización, el ángulo se obtuvo con la herramienta Slope, posteriormente mediante la herramienta Map algebra se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$L=(\lambda/22.13)^m$$

Donde:

- L= Longitud de la pendiente
- $\lambda$ = Longitud de la pendiente en metros
- El exponente m se calcula como:

$$m= \beta/ \beta+1$$

El valor de  $\beta$  se calcula como:

$$\beta = \sin\Theta / 0.0896 / 3\sin\Theta + 0.56$$

La longitud de la pendiente se calcula como:

$$\lambda = DX / \cos\Theta$$

Donde:

- DX= distancia entre pixeles

### ***Calculo del Factor (S) Pendiente media del terreno***

Para poder obtener la cartografía del Factor S, se utilizó la herramienta Map algebra para realizar las siguientes operaciones:

$$S = Ha - Hb / L$$

En donde:

- S = Pendiente media del terreno;
- Ha= Altura de la Parte Alta;
- Hb= Altura de la Parte Baja del terreno;
- L = Longitud de la pendiente

Finalmente, para determinar el Factor LS se procedió a multipolar los resultados del Factor L y del Factor S para generar un raster del Factor LS mismo que se aplicó en los tres años de estudio.

### ***Calculo del Factor (C) Cobertura vegetal***

Para generar cartografía con los valores del Factor C, se retomaron los mapas de los ecosistemas presentes en el parque a los cuales se les asignaron los valores de acuerdo a las tablas propuestas por Wischmeier y Smith (1978) de los valores anuales promedio del Factor C también se realizó una base de datos para cada año y se aplicó la herramienta Polygon to raster.

**Tabla 13. Valores para el Factor (C) Cobertura vegetal por Wischmeier y Smith (1978)**

<b>Ecosistema</b>	<b>Valor</b>
Bosque de pino-encino	0.0200
Pastizal inducido	0.0270
Bosque de pino	0.0400
Palmar natural	0.1000
Bosque de mezquite	0.1800
Bosque de encino	0.1880
Bosque de coníferas	0.2000
Agricultura de temporal	0.2500
Pastizal natural	0.2725
Suelo desprotegido	1.0000
Cuerpo de agua	0.0010
Matorral xerófilo	0.0120

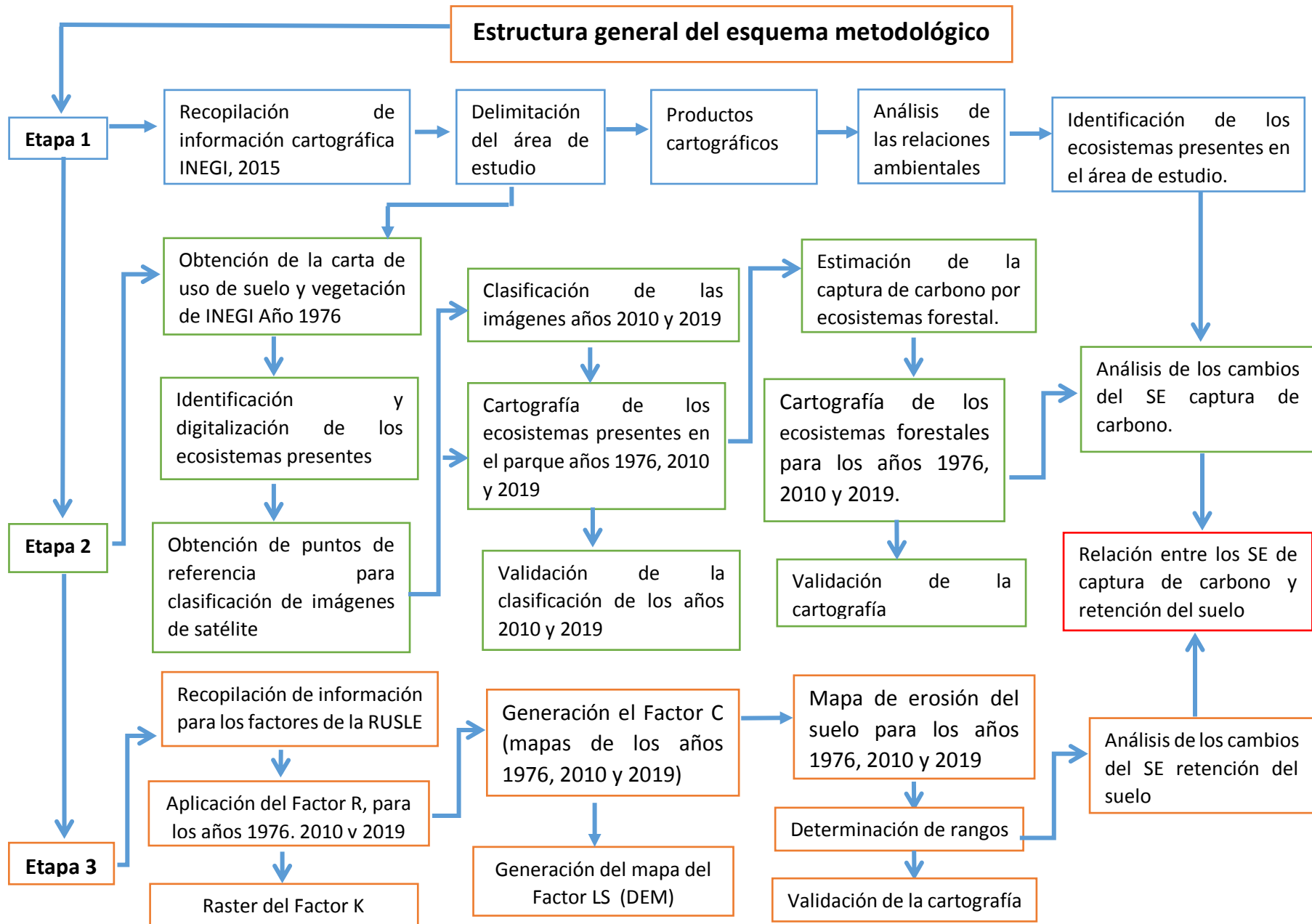
**Fuente:** Wischmeier y Smith, 1978.

Una vez obtenidas las capas en formato raster de los diferentes factores correspondientes a la RUSLE se multiplicaron mediante la herramienta Map algebra para su posterior clasificación de acuerdo a SEMARNAT (2001) ya que muestra con mayor precisión los resultados correspondientes a la escala de trabajo.

#### ***2.4.4 Validación de la cartografía de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE)***

La cartografía resultada de la aplicación de la RUSLE se validó mediante imágenes de satélite de alta resolución de Google Earth y Google Maps, para ello previamente se seleccionó un total de 40 puntos para todos los sitios se consultaron y recopilaron fotos con la finalidad de comprobar la presencia de erosión de suelo en los puntos seleccionados. Existieron diversos limitantes para validar la cartografía en campo las más significativa es el cierre de actividades no esenciales por el COVID-19 en consecuencia el ingreso al ANP se encuentra restringido de manera temporal Además de que son sitios de difícil acceso, de restricción y de inseguridad dentro del área de estudio por estas razones se determinó validar los mapas de manera digital.





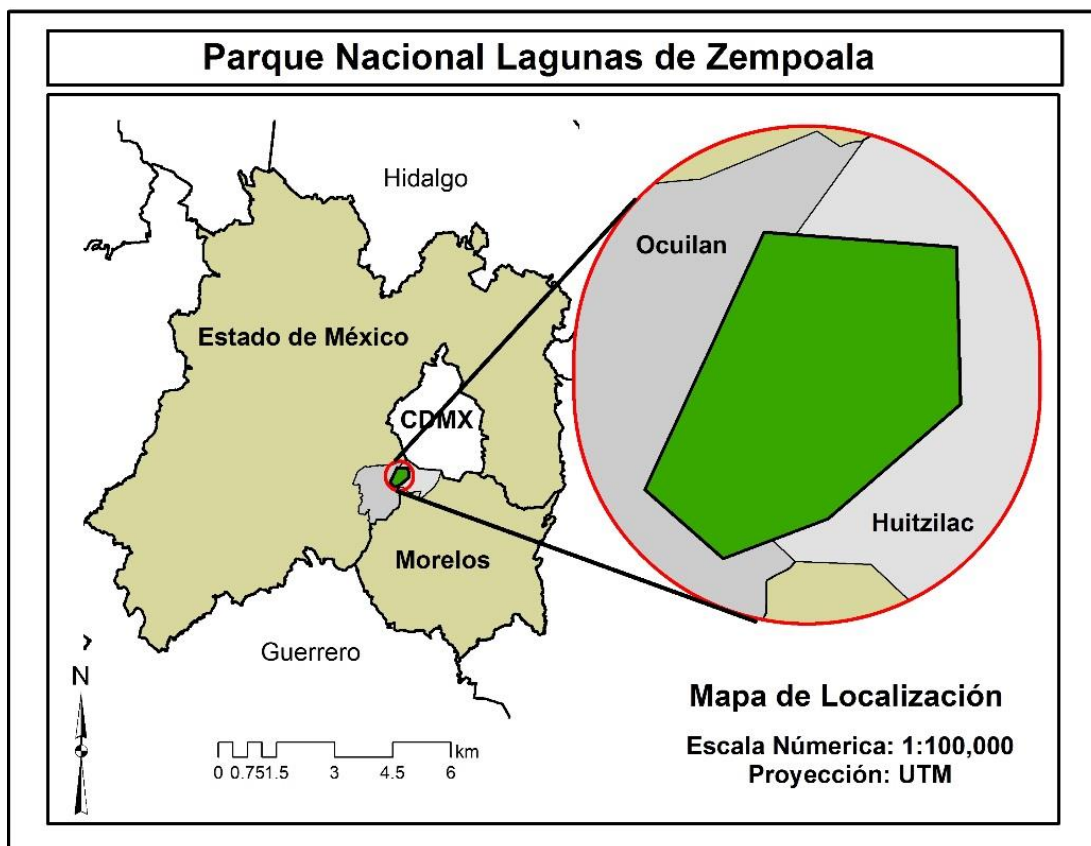
# **CAPITULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3.1 Caracterización geográfica ambiental del Parque Nacional Lagunas de Zempoala

#### 3.1.1 Localización geográfica

El Área Natural protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala” se ubica dentro de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Morelos entre los, 19°06’03”-19°01’28” latitud Norte y; los 99°16’33”-99°20’53” longitud Oeste a altitudes comprendidas entre los 2,400 a 2,800 m.s.n.m De acuerdo a la CONANP (2008), cuenta con una superficie de 4,790 hectáreas, es importante precisar que la delimitación espacial trazada por la misma CONANP del polígono de área de estudio tiene una superficie de 4,556 ha (figura 3).

**Figura. 3 Localización del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.**

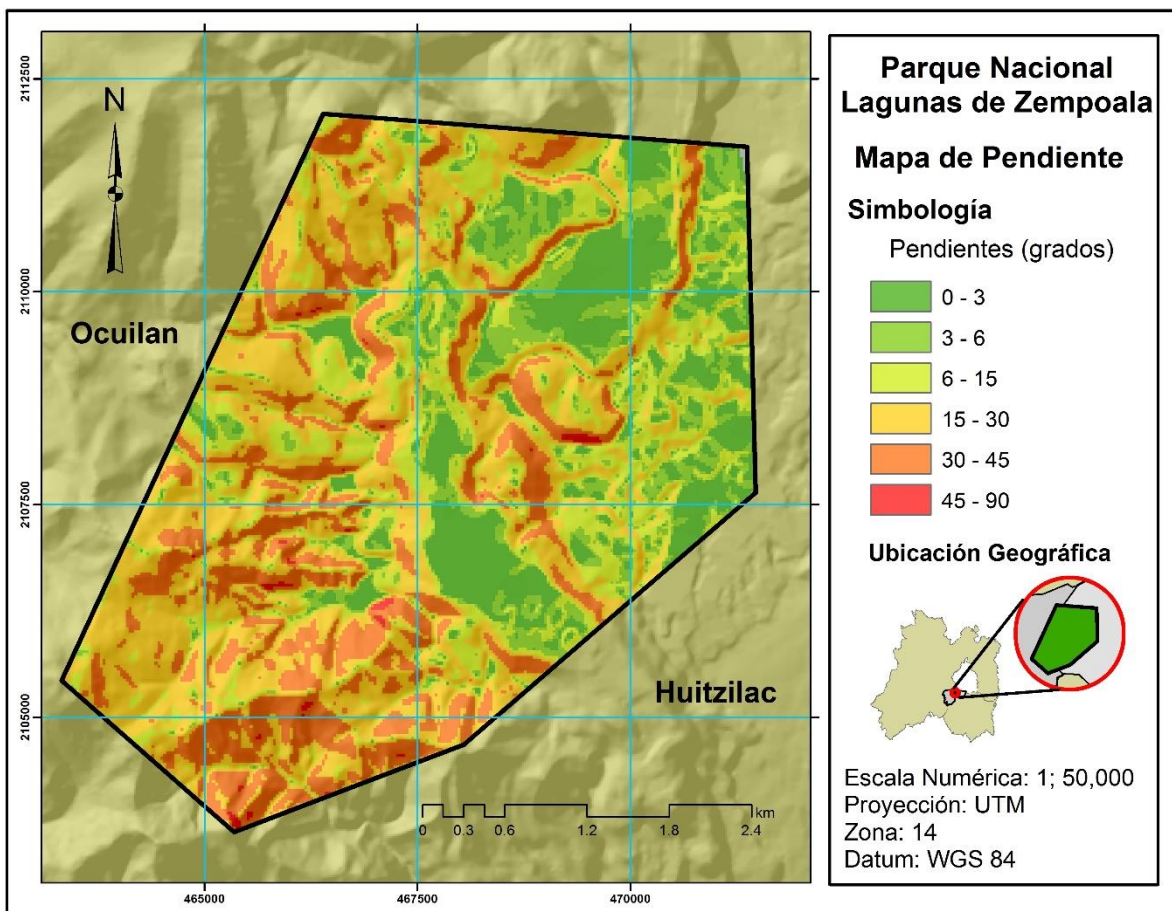


**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2015.

### 3.1.2 Fisiografía del Parque Nacional Lagunas de Zempoala

El PNLZ se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal de acuerdo con Bonilla (2000), la configuración tan particular del terreno determina la formación frecuente de cañadas y barrancas, son también abundantes las depresiones circulares, cuencas profundas o joyas típicas, limitadas por abruptos cantiles, largas y afiladas crestas o elevados picos, presentándose valles o llanuras muy pequeñas (mapa 1).

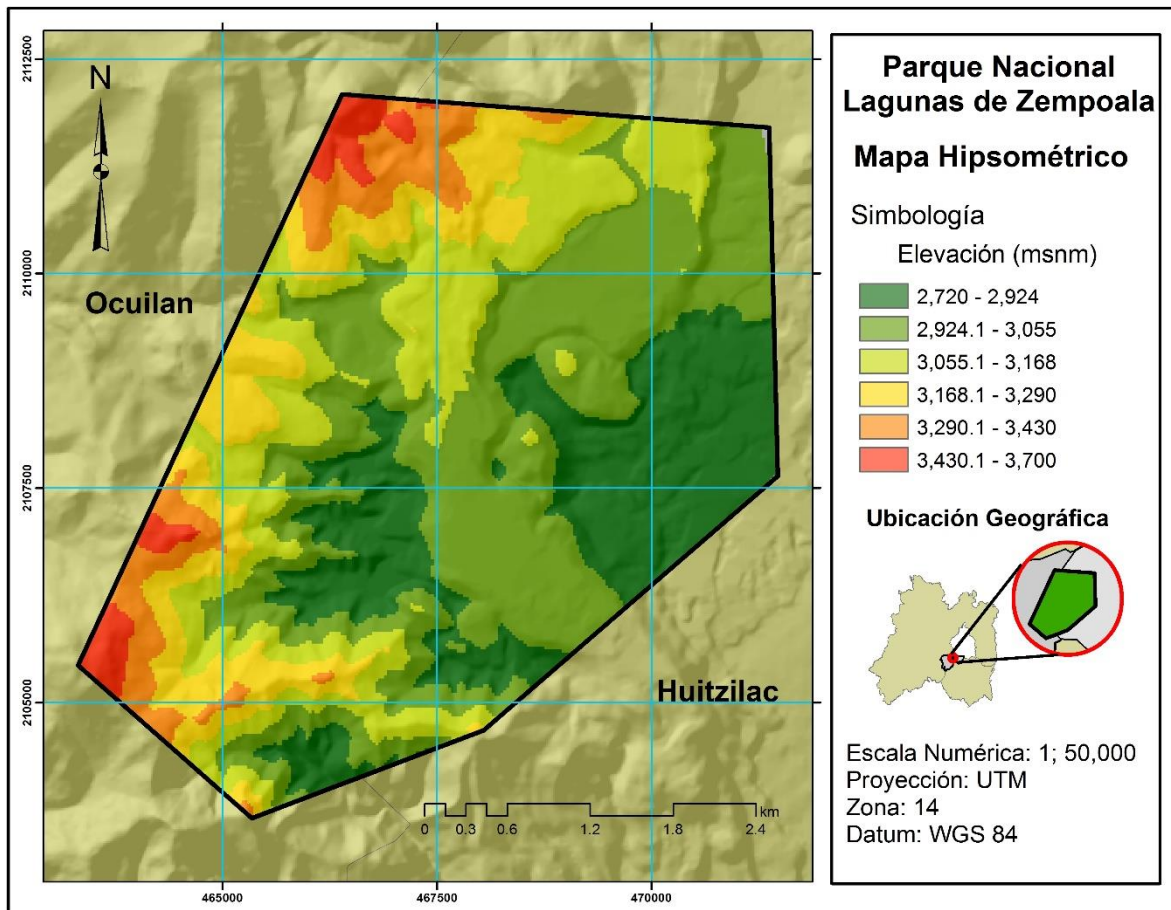
**Mapa 1. Pendientes del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2015.

Las altitudes que presenta varían de los 2720 a 3,700 msnm con pendientes que alcanzan 45° de inclinación que corresponden a laderas cóncavas y convexas, en dirección norte-sur la topografía presenta pendientes que van desde el 10° en las laderas suaves hasta los 45° en los cerros como el Zempoala (mapa 2).

**Mapa 2. Hipsometría del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2014.

### **3.1.3 Litología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

En el parque Nacional Lagunas de Zempoala prevalecen dos principales tipos de roca (mapa 3), predomina la roca andesita con distribución de la zona centro al este, es una roca de origen ígnea volcánica de composición intermedia, compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica, (labradorita - andesina) y piroxenos, que puede presentar vidrio volcánico, biotita, cristales de cuarzo, andalucita, anfíboles (hornblenda), suele tener tonos grisáceos o pardos y rojizos por alteración. Su ambiente de formación procede de magmas profundos básicos que experimentan un rápido enfriamiento y que han sufrido procesos de diferenciación magmática o que han sufrido procesos de contaminación por materiales continentales en zonas de subducción (INEGI, 2015).

El segundo tipo de roca es basalto, se encuentra distribuida en la zona este del parque, es de tipo Ígneas, volcánicas, extrusivas. Su formación procede de roca de origen volcánico, que proviene de un fenómeno geológico, existiendo importantes coladas basálticas en la superficie de la Tierra, por efusión de lava; enfriamiento del magma. Por otro lado, contiene varias mezclas de minerales silicatos, feldespato, piroxeno, plagioclasas (INEGI, 2015).

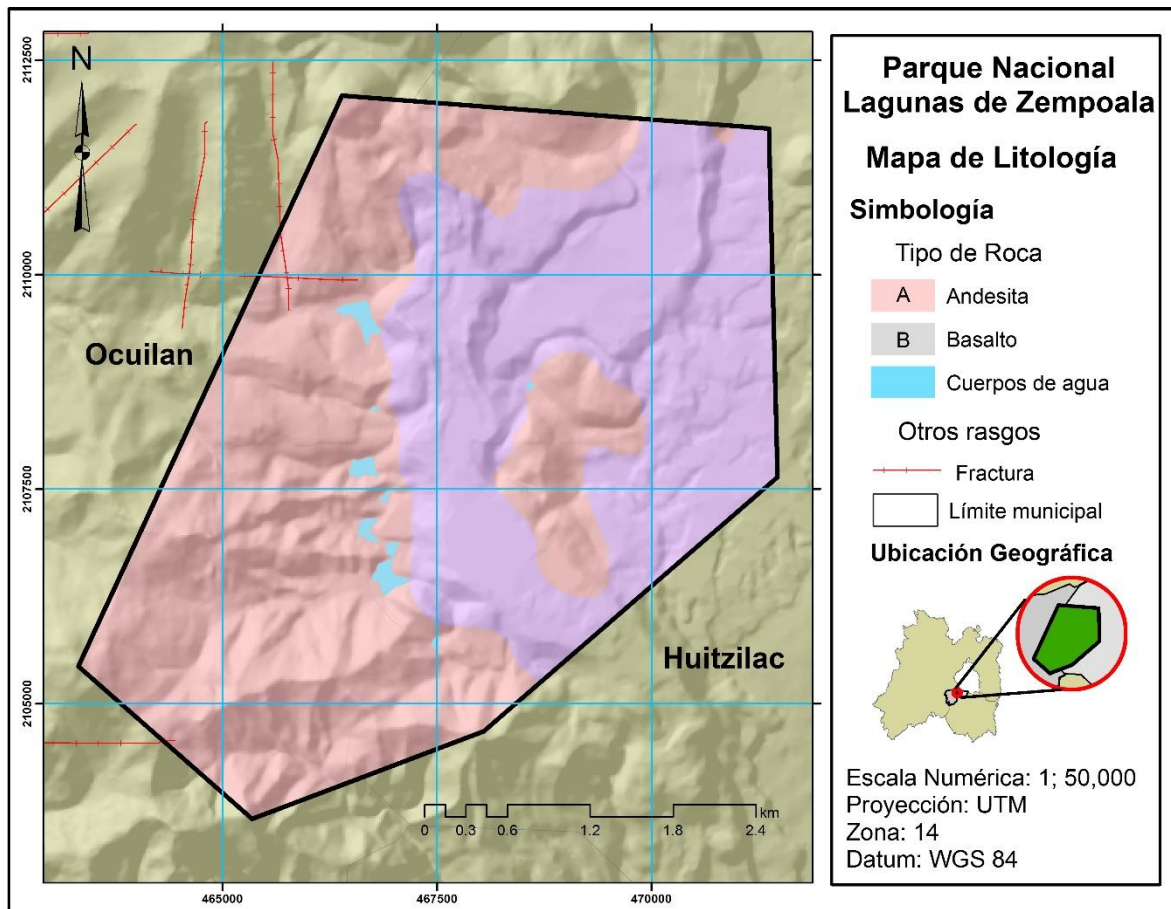
Las fracturas dentro del área de estudio forman parte del complejo montañoso en la zona norte, por su parte la CONANP (2008), menciona que la geología del lugar se caracteriza principalmente por formaciones de roca la Andesita Zempoala a la que pertenecen los volcanes y coladas lávicas que se ubican en los alrededores, que yace sobre la formación Tepoztlán desde el Plioceno y la Formación Cuernavaca localizada al suroeste del área, constituida desde el Plioceno por depósitos clásticos continentales poco consolidados, trasportados y depositas por agua en la Andesita Zempoala”.



Las relaciones existentes entre la litología y fisiografía del PNLZ es el origen de formación de la roca, de acuerdo a los diferentes eventos de formación de roca ya mencionados, los cuales son de origen volcánico eruptivos, colaboraron en la formación de complejos montañosos que existen en la zona.

Algunas de las características geográficas que se relacionan y determinan el clima son la latitud y la longitud, las zonas que se encuentran a elevadas altitudes (lejos del ecuador) tendrán menos luz solar que los lugares que se encuentran en baja latitudes (cerca del ecuador) de acuerdo a las coordenadas geográficas del área de estudio se encuentra en la zona tropical.

**Mapa 3. Litología del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2014.

### **3.1.4 Clima del Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

En el PNLZ predomina el clima templado subhúmedo C(w2)(w), el más húmedo de los subhúmedos, con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, presenta canícula, verano fresco y largo, la variación de la temperatura es menor a 5°C se encuentra distribuido en la parte oeste, norte y sur en el municipio de Ocuilan (CONANP, 2008).

El segundo tipo de clima existen en el parque es el semifrío C(w2'')(w)b(i') con temperatura media anual entre 5 y 12°C, con lluvias en verano con un promedio de 1667 mm anuales, con canícula, con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5 mm, poca oscilación térmica, verano fresco y largo. Este clima se localiza en las zonas más altas del Parque, altitudes por encima de los 3000 msnm, se encuentra distribuido en la parte sureste en los límites del municipio de Huitzilac (mapa 4).

En cuanto a temperatura se refiere, en el área se distinguen tres zonas térmicas: a) Zona templada con verano fresco largo, con temperatura media anual entre 12° y 18° C y temperatura media del mes más frío entre -3° y 18° C; b) Zona semifría con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5° y 18° C y la del mes más caliente entre 6.5° y 22° C y; c) Zona semifría con verano fresco corto, con los mismos límites de temperaturas que la zona anterior y además, menos de 4 meses con temperatura media menor de 10° C (Carrillo, 2006).

Uno de los factores que determinan la temperatura ya menciona, son las diferencias altitudinales, tienen una estrecha relación con el clima que predomina en el parque en el parque, ya que a mayor altitud la temperatura disminuye aproximadamente un grado cada 154 metros (cada 180 en la zona intertropical), debido a que mayor altura la presión es menor y un gas al perder presión pierde temperatura, el aire por lo tanto al estar a menos presión está más frío que en las zonas bajas.

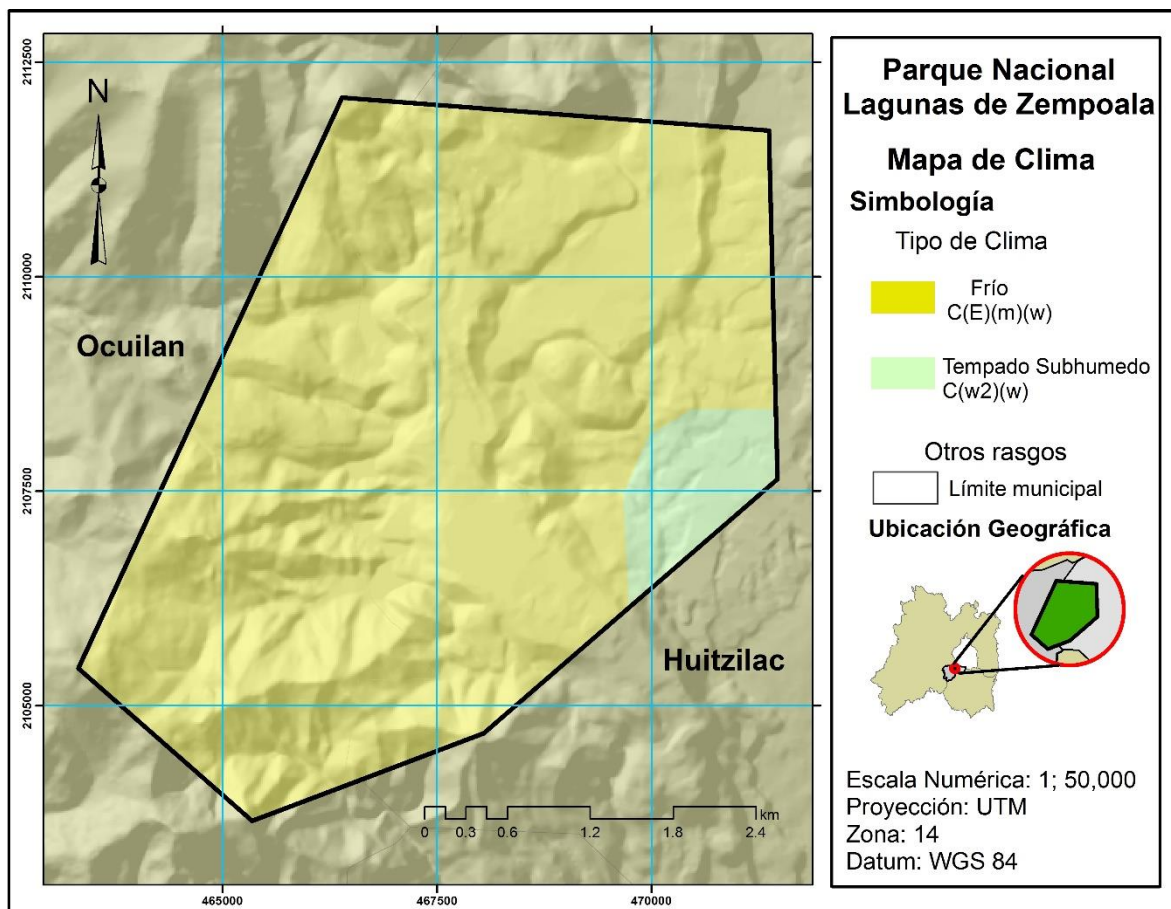
El régimen de precipitación es de lluvias en verano, con un promedio de 1,550.6 mm anuales, éstas comienzan generalmente a mediados del mes de mayo y terminan la primera quincena de octubre; durante éste periodo los vientos alisios del



hemisferio norte pasan por el Golfo de México depositando después en el Parque Nacional, toda su humedad en forma de abundante precipitación (CONANP, 2008).

Uno de los factores geográficos que está relacionado con el nivel de precipitación y el clima ya mencionados es la fisiografía, las montañas actúan como barreras orográficas; de acuerdo al relieve montañoso que predomina en la zona existe mayor nubosidad ya que las mismas montañas obstaculizan la circulación de los vientos obligándolos a ascender, por lo cual disminuyen su temperatura, condensan la humedad que transportan y forman nubes. Una vez que la columna de aire fue forzada a ascender tras encontrarse con alguna montaña la humedad condensada en nubes para pasar ha estado líquido transformándose en lluvia.

**Mapa 4. Tipos de clima en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2014.

### ***3.1.5 Hidrología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.***

El Parque se localiza en la región Hidrológica 18 denominada Balsas, dentro de la cuenca 18 F del Río Amacuzac formando parte de la subcuenca 18 Fd del Río Tembembé, que cuenta con una superficie de 16,296 hectáreas y de la que a su vez parte la subcuenca tributaria 18 Fd 01 Lagunas de Zempoala que cuenta con una superficie de 12,413 hectáreas (GEM, 1989).

De acuerdo con CONAGUA (2002), el Parque Nacional Lagunas de Zempoala está conformado de distintos cuerpos de agua que dieron origen a su nombre: Lago Zempoala, Compila, Tonatiahua, Acomantla, Acoyotongo, Quila, y Hueyapan. Las depresiones de estos lagos fueron provocadas por material volcánico emitido por los volcanes “Zempoala” y “La Leona”, dando forma a la topografía actual del sitio y permitiendo la acumulación de agua en las partes bajas.

De los siete lagos que hoy en día se reconocen, tres se encuentran completamente secos, y los otros cuatro presentan un régimen de fluctuaciones del nivel del agua, muy acusado desde fines de noviembre hasta mayo, ya que la intensa evaporación e infiltración de sus aguas hace disminuir considerablemente su nivel en las épocas de sequía.

Las corrientes perennes se encuentran distribuidas a lo largo del territorio, específicamente en la zona suroeste, destacan por su aglomeración. Los principales cuerpos de agua dentro de área de estudio son la Laguna de Zempoala que cuenta con 10.50 ha de superficie aproximadamente, los afluentes de recarga del lago son de tipo perene. Los factores de la importancia de este lago es que en él se establecen los principales asentamientos de comercios relacionados con el turismo del parque y por ende es uno de los de mayor degradación (mapa 5).

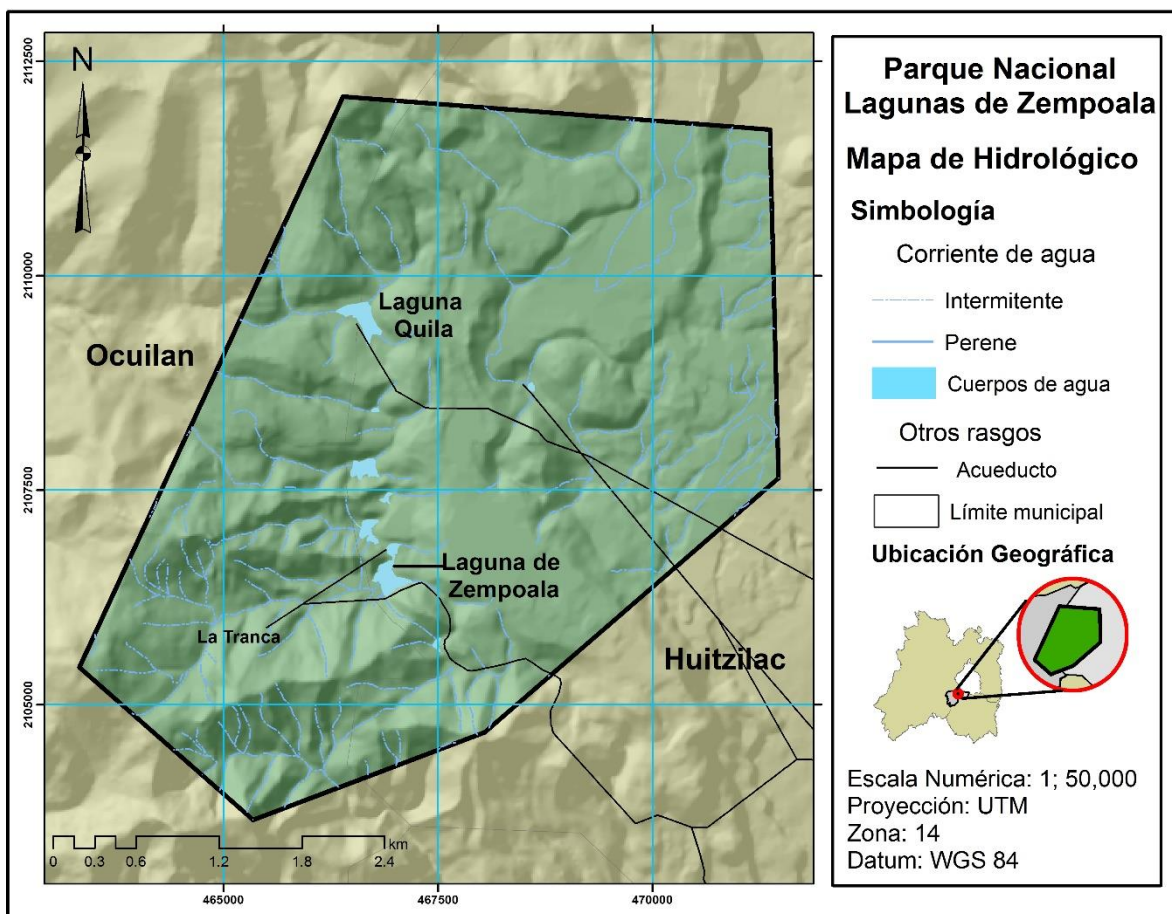
Además de la Laguna Zempoala existen otros como el segundo de mayor extensión el lago Quila con una superficie de 10.44 ha los afluentes de recarga de esta laguna son intermitentes provenientes del suroeste ya que en esta zona existen las pendientes más pronunciadas y altitudes que van de los 3,100 a los 3,500 msnm.

La tercera laguna de mayor extensión es la laguna prieta con una extensión de 5.7 ha superficie, los afluentes que recargan a este cuerpo de agua son de tipo perene.

Derivado de los escurrimientos hídricos, se conforma la red superficial que está constituida principalmente por corrientes perenes, sumando la pendiente de la zona existen las condiciones para que exista el acueducto que abastece al municipio de Huitzilac.

De las interrelaciones que existen entre los componentes geológicos, climáticos e hidrológicos como las rocas de origen volcánico y la concentración de humedad, se derivan las condiciones edafológicas en donde son peculiares los suelos de tipo Andosol y Leptosol.

**Mapa 5. Hidrología del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2014.

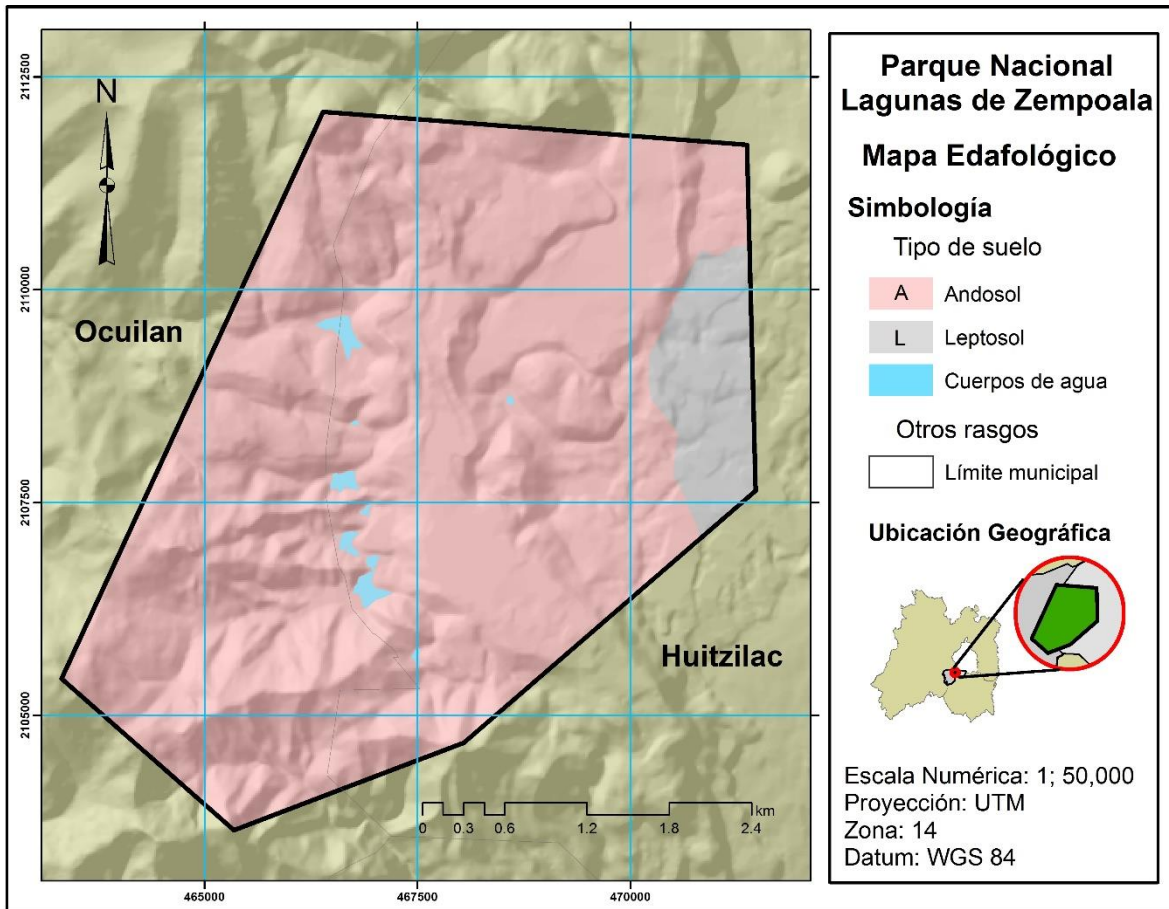
### **3.1.6 Edafología del Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Los dos principales tipos de suelo predominantes en el área de estudio, el de mayor extensión es el Andosol distribuido en la mayor parte del parque sobre todo en la zona oeste, norte y sur, las principales características de este tipo de suelo es que presentan color oscuro en el horizonte A debido al alto contenido de materia orgánica y color café en los siguientes horizontes alcanzando profundidades hasta de 1.5 m, estos suelos son utilizados para la agricultura de temporal, gozando de una consistencia y textura embarrosa, de migajón limoso a más fino (FAO, 2010).

El Andosol es el suelo más abundante en el área ocupa aproximadamente el (93%) de la superficie del Parque, son suelos que se forman a partir de materiales ricos en vidrio volcánico.

El tipo de suelo Leptosol está ubicado en la zona este del Parque, las principales características de este tipo de suelos es que son someros de 10 cm de profundidad, que se constituyen de fragmentos de roca interperizada. Se presentan generalmente en las zonas montañosas con pendientes abruptas. Es una de las unidades de suelo de la FAO que son ampliamente recomendables para agricultura de temporal. Finalmente, se identifican los cuerpos de agua de mayor extensión dentro del parque en la zona central (mapa 6).

**Mapa 6. Tipos de suelo en el ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI, 2014.



### 3.1.7 Diversidad de fauna en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala

El parque alberga una gran diversidad de especies de fauna que conforman un sistema ecológico que desarrollan un ecosistema general; los ejemplares de especies más predominantes y que destacan son los siguientes:

#### **Principales mamíferos presentes en el PNLZ**

En la composición mastofaunística del Parque se distribuyen 59 especies incluidas en 18 familias, que corresponden aproximadamente al (14%) de las reportadas para la República Mexicana. Los mamíferos más primitivos en el Parque son las musarañas del género *Sorex*, y tlacuaches (*Didelphys virginiana*), éste último distribuido en todas las asociaciones vegetales” (CONANP, 2008).

**Fotografía 1. Mamíferos presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

		
Armadillo ( <i>Dasyus novemcinctus</i> )	Tlacuache Norteño ( <i>Didelphis virginiana</i> )	Conejo de Monte ( <i>Sylvilagus cunicularius</i> )

Fuente: CONANP, 2008.

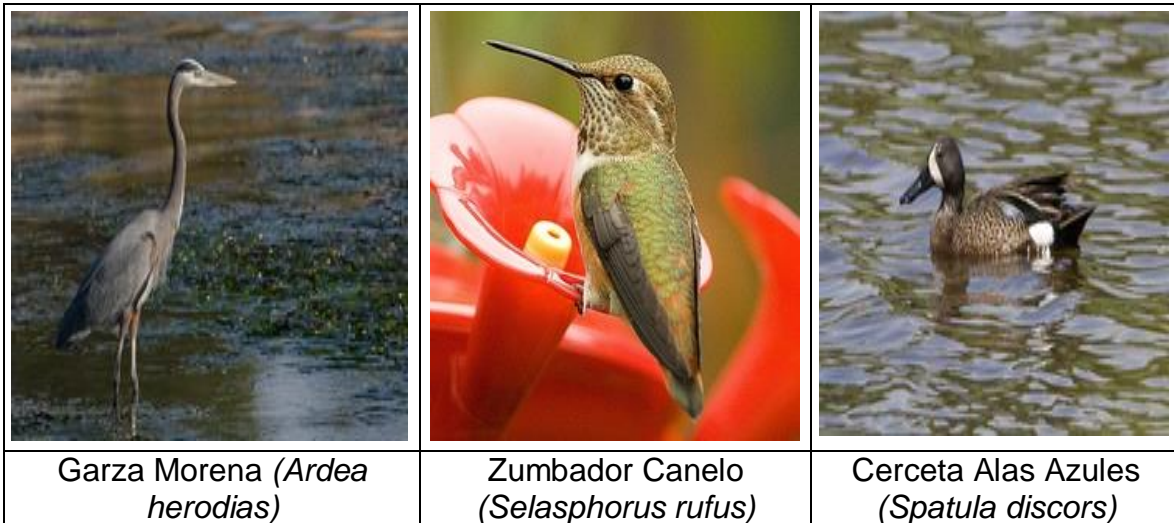
### **Principales Aves presentes en el PNLZ**

En el parque se distribuyen aproximadamente 231 especies de aves, distribuidas en 43 familias, representando aproximadamente (62%) del total del estado de Morelos.

Se encuentran hábitats acuáticos frecuentados por aproximadamente 21 especies de aves que se relacionan con este medio, entre las que destacan algunas consideradas residentes como *Rallus limicola* y *Cinclus mexicanus*.

Las especies del pastizal representan un número importante en esta región con 43 especies; son particularmente importantes los pastizales de La Cima y El Capulín, un área limítrofe entre Morelos y el Distrito Federal, pues mantienen algunas de las únicas poblaciones conocidas de *Xenospiza baileyi*, especie considerada en peligro de extinción” (CONANP, 2008).

### **Fotografía 2. Aves presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



Fuente: CONANP, 2008.

### ***Anfibios y Reptiles presentes en el PPLLZ***

El grupo de los reptiles se encuentra representado en el Parque por 34 especies agrupadas en 5 familias, cifra que equivale aproximadamente al (5%) de los reptiles mexicanos y (43%) de las morelenses, reflejando la gran riqueza del área, donde las especies que se distribuyen principalmente en el de bosque de pino-encino incluyen especies de tipo Neártico.

En cuanto a anfibios, se distribuyen en el área 8 especies, agrupadas en 6 familias, entre las que destaca el ajolote (*Ambystoma altamirani*), ya que además de ser una especie carismática y endémica para Morelos (CONANP, 2008).

### **Fotografía 3. Anfibios presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

		
Cascabel enana ( <i>Crotalus triseriatus</i> )	Ajolote Arroyero de la Sierra de Las Cruces ( <i>Ambystoma altamirani</i> )	Rana Leopardo de Forrer ( <i>Lithobates forreri</i> )

**Fuente:** CONANP, 2008.

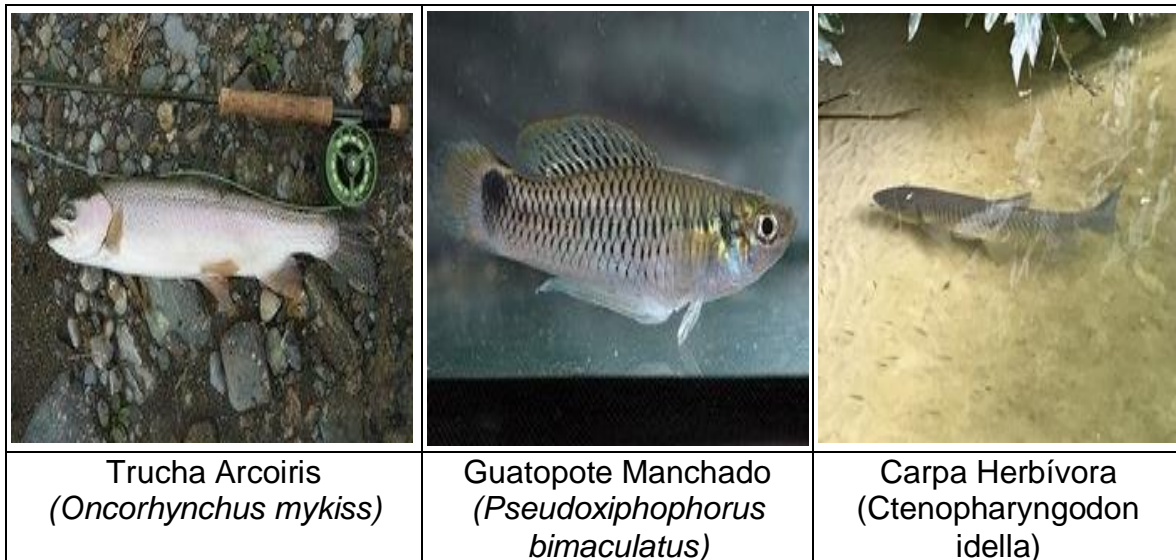


### ***Peces presentes en el PNLZ***

En los lagos del Parque Nacional habitan sólo siete especies de peces: carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idellus*), carpa común (*Cyprinus carpio*), trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), repítete o guatopote manchado (*Heterandia bimaculata*), mexcalpique cola partida o mixtul (*Ilyodon whitei*), carpa del Lerma (*Notropis sallei/ Aztecula sallaei*) y mexalpique de Zempoala (*Girardinichthys multiradiatus*).

Sólo éstas dos últimas son nativas de la zona, el resto son especies intencional, o accidentalmente introducidas. Por ejemplo, el *Ilyodon withei* aunque es una especie introducida a los lagos es endémica del Balsas y se encuentra críticamente amenazada (The IUCN Red List of Threatened Species citado en CONANP, 2008).

### **Fotografía 4. Peces presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** CONANP, 2008.

### **3.1.8 Población Total de las localidades circundantes en el área de influencia del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Las localidades del municipio de Huitzilac que se encuentran en el área de influencia son Huitzilac y Tres Marías para el Estado de México las localidades son Santa Marta, Santa Lucía y San Juan Atzingo. Cabe resaltar que debido al tamaño de algunas localidades carecen de información socioeconómica, por tal razón se omitieron en el análisis priorizando aquellas de mayor tamaño o, con una mayor incidencia en el ANP (tabla 14).

**Tabla 14. Población total por comunidad de las localidades circundantes en el área de influencia del ANP PNLZ**

Municipio / Estado	Localidad	Población
Ocuilan, Edo. México	1.-Santa Marta	1,630
	2.-Santa Lucía	1,669
	3.-San Juan Atzingo	949
Huitzilac, Morelos	4.-Tres Marías	5,426
	5.-Huitzilac	4,568
<b>Población Total</b>		<b>14,242</b>

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2010.

### **3.1.9 Nivel de educación en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.**

En el Municipio de Ocuilan de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (2010), el porcentaje de la población de 15 años o mayor alfabetizada correspondía al (86.9%). Para el año de 2010 a 2015, el número de personas alfabetizadas se incrementó en un (13%). Por otro lado, de la población de 18 años o mayor, el (2.2%) tiene estudios de nivel superior y sólo un (0.13%) cuenta con estudios de posgrado.

Para el caso del Municipio de Huitzilac en el Estado de Morelos según datos de la Secretaría de Educación y el Instituto de Educación Básica del Estado de Morelos, en Huitzilac existe un porcentaje a nivel primaria superior al (100%) sin embargo, a nivel secundaria se reduce aproximadamente el (7%) el nivel de absorción.

En los dos municipios existe educación básica específicamente primaria sobre todo en las principales localidades como en las cabeceras municipales no obstante la problemática radica en la falta de escuelas preparatorias de nivel medio superior en ambos municipios ya que el porcentaje para los dos reduce considerablemente en el nivel medio superior y superior.

### ***3.1.10 Marginación en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.***

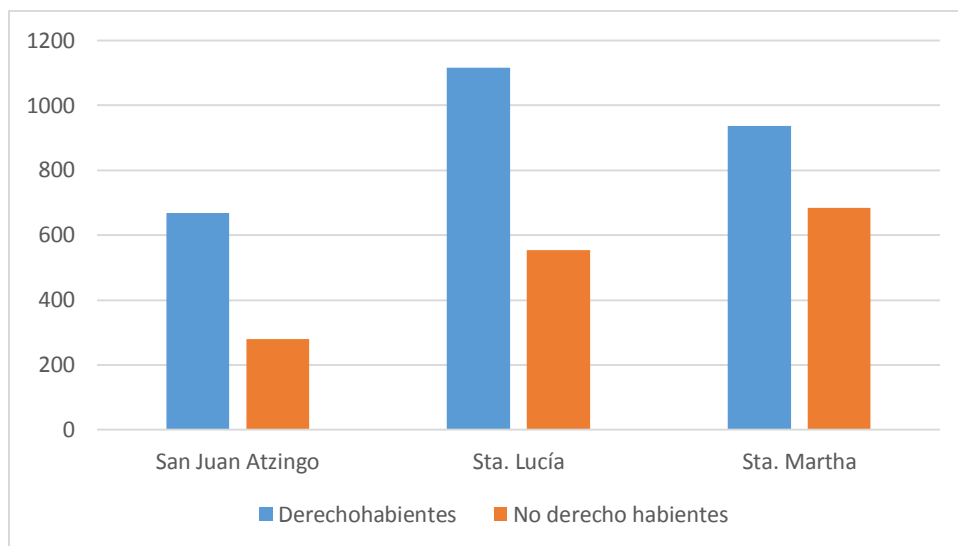
De acuerdo al Plan de Desarrollo del Municipio de Ocuilan (2015), existe falta de infraestructura en todos los aspectos: vivienda, caminos, agua potable, escuelas, hospitales, etc. Hay importantes índices de pobreza y marginación, carencia de vivienda, déficit de empleo, insuficientes espacios deportivos, etc. Pese a esto Ocuilan registra en los últimos años un descenso en el grado de marginación, pues se estima que del año 2000 al 2010 pasó de alta a media.

El municipio de Huitzilac tiene un índice de marginación de (-0.9) lo que indica que se ubica en un grado de marginación Bajo. Sin embargo, de acuerdo al Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2010), (41.8%) de la población es vulnerable por carencias sociales, es decir, presenta algún tipo de carencia en rezago educativo, acceso a los servicios de salud, acceso a la seguridad social, calidad y espacio de la vivienda, acceso a los servicios básicos en la vivienda y acceso a la alimentación. De la población del Municipio (97.2%) habita en lugares con grado Alto de Marginación y (2.6%) se ubica en zonas con grado Muy Alto de Marginación. Los dos municipios cuentan con una marginación de alta a media lo que se traduce en limitada accesibilidad de servicios básicos como luz eléctrica, drenaje y accesos a otros servicios como educación y salud.

### 3.1.11 Salud de las localidades circundantes en el área de influencia del ANP Parque Nacional Lagunas de Zempoala

En sector salud las localidades del Estado de México cuentan con niveles bajos en cuanto algún tipo seguro respecto a la población total por localidad. Santa Lucía es la localidad con el mayor nivel de derecho habientes lo cual tiene relación ya que es la localidad con mayor número de población, más de la mitad de la población de las tres localidades es derecho habiente, sin embargo, la localidad de Santa Martha es la más vulnerable en este sector (grafica 1).

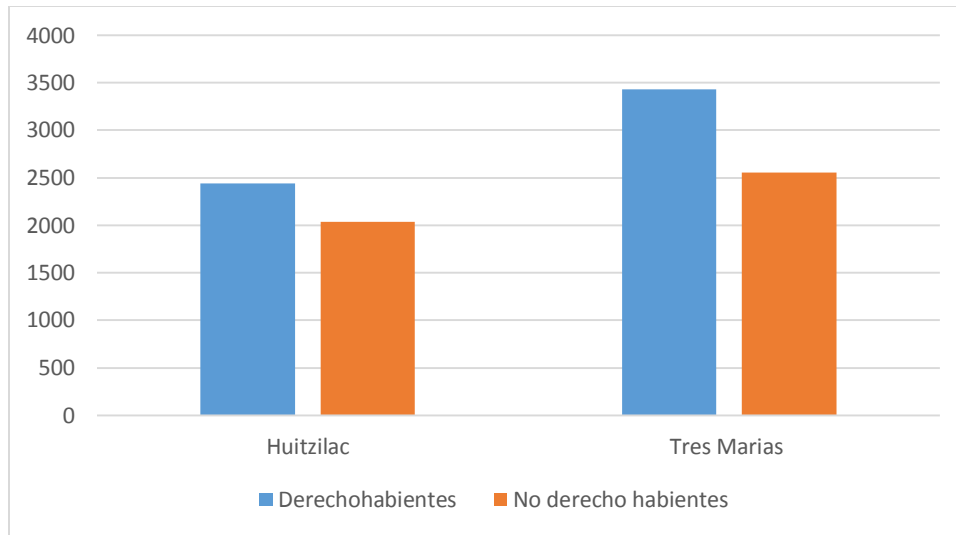
**Grafica 1. Derechohabientes y no derechohabientes a servicios de salud por comunidad de las localidades del Municipio de Ocuilan**



**Fuente:** Censo de Población y Vivienda, INEGI, 2010.

Para las localidades del municipio de Huitzilac cuentan con mayores niveles de no derecho habientes a pesar de que son consideradas localidades urbanas, sin embargo, la localidad de Tres Marías es la que cuenta con el mayor porcentaje de derecho habiente a pesar de tener mayor población que la localidad de Huitzilac.

**Grafica 2. Derechohabientes y no derechohabientes a servicios de salud por comunidad de las localidades del Municipio de Huitzilac**



**Fuente:** Censo de Población y Vivienda, INEGI, 2010.

**3.1.12 Nivel Niveles de Pobreza en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.**

En Ocuilan, existe un (41.1%) de personas en condiciones de pobreza moderada y (25.1%) de pobreza extrema. La pobreza se presenta de diversas maneras y en diferentes dimensiones: para el caso de Ocuilan, el (87.4%) de la población no tiene acceso a la seguridad social, un (34.8%) no tiene acceso a servicios de salud y en un porcentaje importante, (47.8%), no tiene acceso a alimentación.

En materia de pobreza, Ocuilan observa para 2010 un (66.2%) en pobreza, que se compone de (25.1%) en pobreza extrema y (41.1%) en pobreza moderada. Estos porcentajes sobre una población de 26,270 habitantes (Plan de desarrollo Municipio de Ocuilan, 2018).

Para el municipio de Huitzilac Según el análisis del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (2010), con base en los datos censales de 2010, en el Municipio existen 8,774 personas en pobreza, lo cual representa el (50.6%) de la población.

***Principales Actividades Económicas en el área de influencia del ANP PNLZ de los municipios de Ocuilan, Estado de México y Huitzilac, Estado de Morelos.***

**a) Agricultura:** Los cultivos tradicionales de los municipios de Huitzilac y Ocuilan son: haba, frijol, maíz, chícharo y algunos cultivos de flor, además de unas áreas reducidas de zanahoria y avena. Dadas las características orográficas del área, la agricultura no cuenta con aplicaciones de conocimientos tecnológicos para el desarrollo de esta actividad en forma rentable para mejorar la calidad de vida y economía de las localidades. Es importante mencionar que existe la utilización de fertilizantes para la producción.

**b) Ganadería:** La actividad ganadera que realiza la población de las comunidades propietarios de ejidos en el parque es poca, sin embargo, existe pastoreo no controlado. Se aprovecha en forma extensiva y semi-extensiva principalmente. El ganado que se explota en la región es el bovino que tiene la mayor producción, el segundo en orden de importancia es el porcino, ovino caprino y equino (Salazar, 2001 y C.N.D.M., 2001).

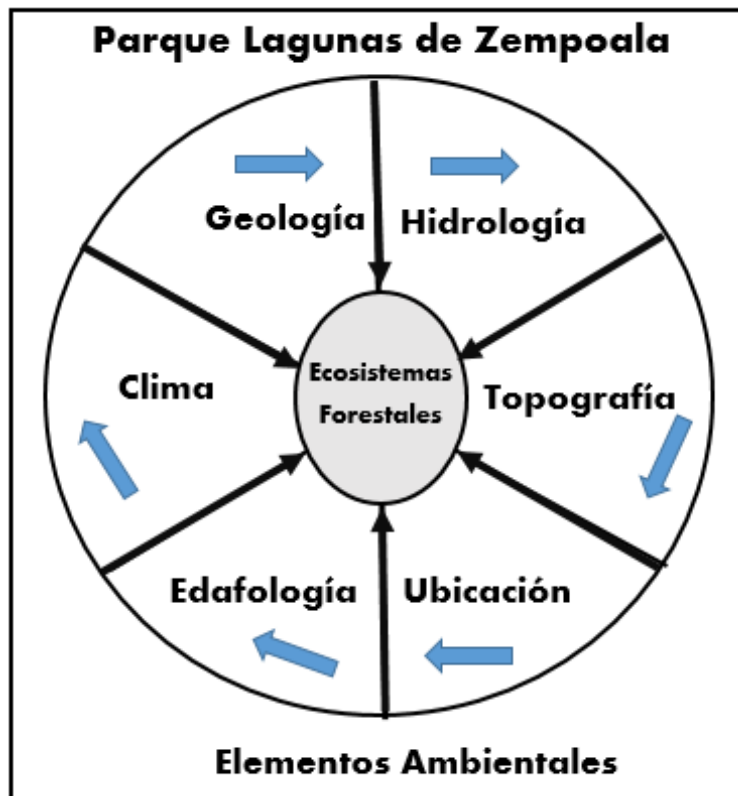
**c) Servicios Turísticos:** Para Ocuilan las Lagunas de Zempoala representan el segundo lugar de interés turístico ya que cuenta con la zona del Santuario de Chalma donde acuden muchos peregrinos (Salazar, 2001). En cambio, para Huitzilac, las Lagunas de Zempoala representan la principal atracción el Parque recibe una afluencia considerable de visitantes principalmente los fines de semana. Se registra una afluencia al Parque Nacional Lagunas de Zempoala de 1000 visitantes semanales, con 200 vehículos en promedio.

Actualmente se registra alrededor de 150,000 visitantes anualmente que desarrollan diferentes actividades como campismo, kayaquismo, rappel, caminatas, alpinismo, pesca deportiva, y otras actividades recreativas. Los visitantes provienen principalmente de la Ciudad de México, Toluca y Cuernavaca, en orden de importancia, atraídos por los bosques y las lagunas de la zona (SARH, 1993).

### 3.2 Identificación y diversidad de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala

Derivado de las interrelaciones que existen entre los componentes ambientales como el clima, hidrología, la geomorfología y el tipo de suelo, se generan las condiciones adecuadas para el desarrollo de los distintos ecosistemas presentes en el Parque (figura 4), en este caso las características ambientales que presenta el ANP son favorables para el desarrollo de diversos ecosistemas los cuales se describen a continuación.

**Figura 4.** Interrelaciones de los elementos ambientales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala



Fuente: elaboración propia, 2020.

### **1.- Bosque mixto de pino-oyamel:**

En México los bosques mixtos de pino-oyamel se distribuyen en un promedio altitudinal que va de los 2,000 a los 3,400 m.s.n.m, donde las condiciones climáticas oscilan entre los 12 °C y 23 °C. Generalmente son ecosistemas de climas subhúmedos a templado húmedos, donde la precipitación anual fluctúa entre 600 y 1,000 mm. El bosque mixto de pino-oyamel es el ecosistema forestal de mayor extensión del PNLZ, se desarrollan sobre suelos ricos en materia orgánica producto de la hojarasca, estas características ambientales están estrechamente vinculadas con las características ambientales que se presentan dentro del área del ANP (CONABIO, 2018).

#### **Fotografía 5. Bosque mixto de pino-oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. Localidad de Tres Marías, Municipio de Huitzilac, Estado de Morelos, 2 de mayo de 2020.

### **2.- Bosque de oyamel:**

Este tipo de bosque en el territorio mexicano se desarrollan entre altitudes que van de los 2,400 a los 3,600 msnm, además son representativos de climas fríos y en suelos de origen volcánico andesítico, basáltico o riolítico, generalmente suelos profundos, no obstante, también se pueden desarrollar en suelos someros con presencia de una capa delgada de cenizas volcánicas, ricas en materia orgánica (CONANP, 2008).



De acuerdo con el análisis de los componentes ambientales previamente caracterizados, favorecen para el desarrollo de este ecosistema Hernández (2000), menciona que en el PNLZ los bosques de oyamel se encuentran confinados en las partes más elevadas, en laderas protegidas de los vientos, en los cerros Zempoala, Campanario, Chalchihuites, la Estrella, la Cachucha y los Cardos (foto 6).

### **Fotografía 6. Bosque de oyamel en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. Localidad de Tres Marías, Municipio de Huitzilac, Estado de Morelos, 2 de mayo de 2020.

### **3.- Bosque de pino:**

Las características de relieve y las condiciones ecosistémicas del Parque se van transformando y los ecosistemas de pino comienzan a predominar. Los ambientes de pino en México suelen desarrollarse entre los 2,400 y 3,800 m.s.n.m, donde las condiciones climáticas presentan temperaturas entre 5 °C y 12 °C y los niveles de precipitación fluctúan de 1,000 a 1,200 mm (media anual).

El pino dentro del PNLZ está asociado a los pisos climáticos templados y se encuentra dominado por varias especies. En la porción norte se localizan masas puras de pino con dominancia de *Pinus montezumae* (Hernández, 2000) (foto 7).

### **Fotografía 7. Bosque de pino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. Localidad de Santa Marta, Municipio de Huitzilac, Estado de Morelos, 2 de mayo de 2020.

#### ***4.- Bosque mixto de pino-encino:***

Hernández (2000), menciona que el bosque de pino encino se ubica distribuido en vecindad inmediata al de pino; en segmentos se observa la dominancia de pino, este tipo de bosque puede formar masas puras, pero es frecuente encontrarlo mixto.

### **Fotografía 8. Bosque mixto de pino-encino en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. ANP Lagunas de Zempoala, Estado de México y Morelos, 2 de mayo de 2020.

### **5.- Pastizales:**

Son pastizales predominantes de zacatonal o pastizal subalpino, se desarrollan por arriba de los 2,800 msnm, y están formados principalmente por especies que crecen en extensas macollas de la familia Poaceae (CONANP, 2008). Los ecosistemas de pastizales conformados por comunidades vegetales se desarrollan a partir de la degradación ambiental provocada a la vegetación original (foto 9).

#### **Fotografía 9. Pastizales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. Localidad de Santa Marta, Municipio de Ocuilan, Estado de México, 2 de mayo de 2020.

### **6.- Vegetación secundaria:**

El ecosistema vegetación secundaria denominado así para esta investigación está conformado por dos tipos de matorral, el inerme donde destacan individuos con las características del matorral desértico micrófilo, pero carentes de espinas como la Gobernadora; y el matorral subinerme formado por especies micrófilas espinosas y no espinosas, con dominancia alternada, las especies no espinosas que definen este subtipo son las mismas del subtipo anterior, y las especies espinosas encontradas dentro de esta son: Mezquite, Vara prieta y Gatuño (foto 10).



**Fotografía 10. Vegetación secundaria en Laguna Zempoala en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. Municipio de Ocuilan, Estado de México, 2 de mayo de 2020.

**7.- Cuerpos de agua:**

Los cuerpos de agua denominados así para esta investigación se refieren a las lagunas que conforman un sistema de lago pertenecientes a una cuenca lacustre y endorreica con condiciones hidrológicas estáticas, con escasa circulación de la masa de agua (foto 11). Cuenta con 66 especies de plantas acuáticas en los Lagos del Parque agrupados en 34 familias y 49 géneros, de las 66 especies reconocidas en el Parque 40 son acuáticas y 27 subacuáticas (CEAMA, 2007).

**Fotografía 11. Laguna Zempoala en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. ANP Lagunas de Zempoala, Estado de México y Morelos, 2 de mayo de 2020.

## **8.- Agricultura:**

El ecosistema agricultura se desarrollan de manera temporal a causa de la intervención de actividades antrópicas son los agroecosistemas, ambientes conocidos localmente como milpas.

Estos espacios son utilizados principalmente para la producción y aprovechamiento agropecuario de las poblaciones que habitan en los límites del parque de manera específica los ejidatarios de San Juan Atzingo, municipio de Huitzilac en el Estado de Morelos. Las milpas son agroecosistemas muy variados en cuanto a su producción dentro de los que destacan el maíz, chícharo, aguacate y papa.

### **Fotografía 12. Agricultura en Santa Lucia Ocuilan Edo. Mex.**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. ANP Lagunas de Zempoala Sta. Lucia Municipio de Ocuilan, Estado de México, 15 de mayo de 2020.

### 3.2.1 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 1976

El Parque Nacional Laguna de Zempoala presenta para el año de 1976 una superficie de 4,556 hectáreas distribuidas en siete distintos ecosistemas (tabla, 15). El bosque mixto de pino-oyamel cuenta con una superficie de 2,144 hectáreas es el de mayor proporción para este año (47.06%) se distribuye principalmente en la zona centro, norte y este del ANP.

**Tabla 15. Superficie de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala año 1976**

N°	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	2,144	47.06
2	Bosque de oyamel	1,300	28.53
3	Bosque de pino	621	13.63
4	Pastizal	188	4.13
5	Bosque mixto de pino-encino	71	1.56
6	Vegetación secundaria	209	4.59
7	Agricultura	0	0.00
8	Cuerpos de agua	23	0.50
	Total	4,556	100.00

**Fuente:** elaboración propia, 2020.

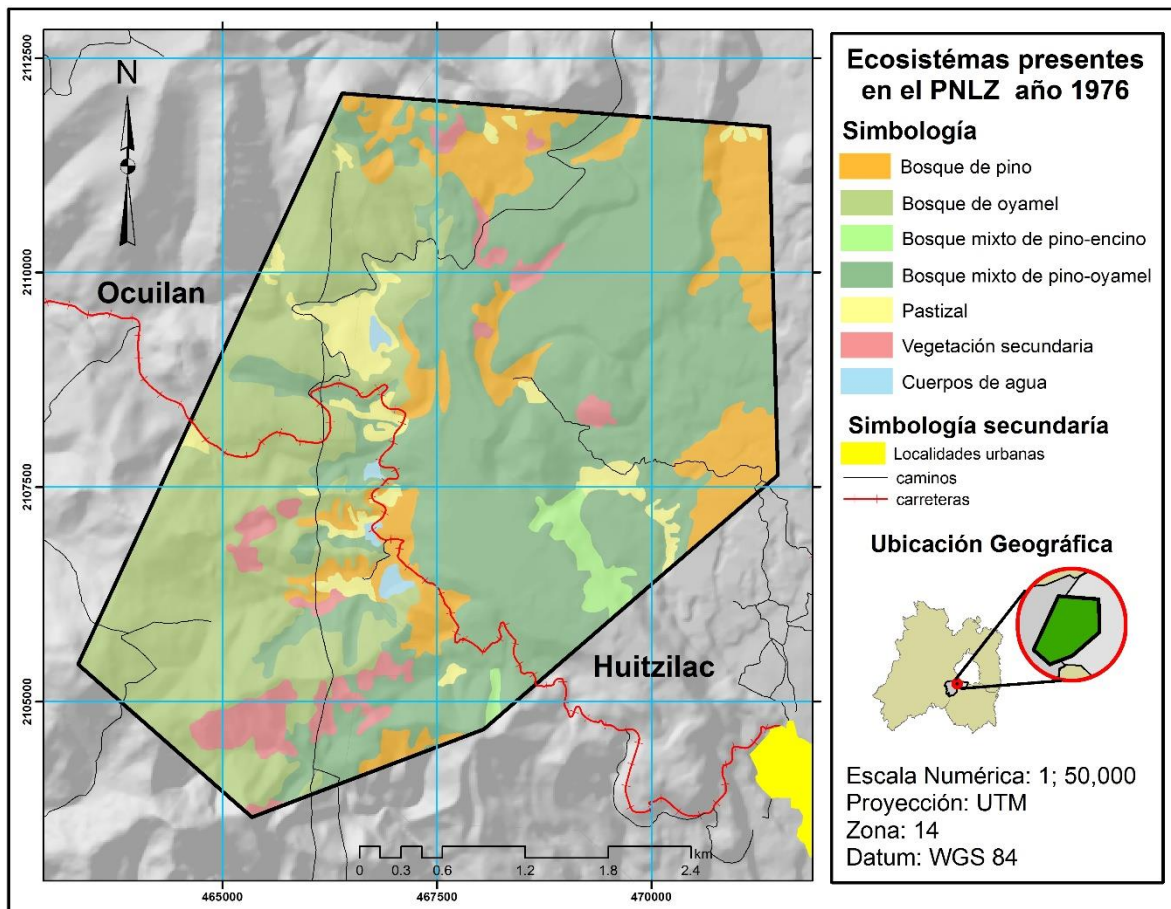
El ecosistema forestal bosque de oyamel cuenta con una superficie de 1,300 hectáreas equivalente al (28.53%) está distribuido en la zona suroeste y noroeste del área de estudio, el tercer ecosistema es el bosque de pino con 621 hectáreas (13.63%) distribuido la mayor parte en la zona norte entre las altitudes que van de los 3,000 a los 3,700 msnm.

El cuarto ecosistema es el pastizal compuesto principalmente por pastizal inducido, cuentan con una superficie de 188 hectáreas (4.13%) distribuidas en la zona oeste, el quinto ecosistema es el bosque mixto de pino-encino con 71 hectáreas (1.56%) distribuido en la zona sureste del ANP.

El sexto ecosistema es la vegetación secundaria, compuesta principalmente por matorral inerme, además cuenta con una superficie de 209 hectáreas (4.59%)

distribuido en la zona sur y centro del parque. El ecosistema denominado cuerpos de agua cuenta para este año con una superficie de 23 hectáreas (0.50%) distribuidos principalmente en la zona centro, cabe resaltar que para el año 1976 no existen áreas para actividades agrícolas dentro del parque (mapa 7).

**Mapa 7. Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 1976**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.2.2 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2010

Para el año 2010 el PNLZ presenta una superficie de 4,556 distribuidas en ocho distintos ecosistemas, (tabla 16). El bosque mixto de pino-oyamel cuenta con una superficie de 2,230 ha., correspondiente aproximadamente la mitad de la superficie total del parque (48.95%) distribuido principalmente en la zona este de norte a sur, el segundo ecosistema de mayor proporción en superficie es el bosque de oyamel con 14,07 hectáreas de superficie (30.88%) distribuida en la zona este y sur del ANP, (mapa 8).

El tercer ecosistema el bosque de pino con una superficie de 594 hectáreas (13.04%) distribuidas en la parte norte y este del parque, el cuarto ecosistema los pastizales con 157 hectáreas (3.45%) distribuidas principalmente en la zona centro, oeste y norte del parque, posteriormente el quinto ecosistema es el bosque mixto de pino-encino con 69 hectáreas (1.51%) distribuidas en la zona sureste del área de estudio.

**Tabla 16. Superficie de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala año 2010**

N°	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	2,230	48.95
2	Bosque de oyamel	1,407	30.88
3	Bosque de pino	594	13.04
4	Pastizal	157	3.45
5	Bosque mixto de pino-encino	69	1.51
6	Vegetación secundaria	67	1.47
7	Agricultura	17	0.37
8	Cuerpos de agua	15	0.33
	Total	4,556	100.00

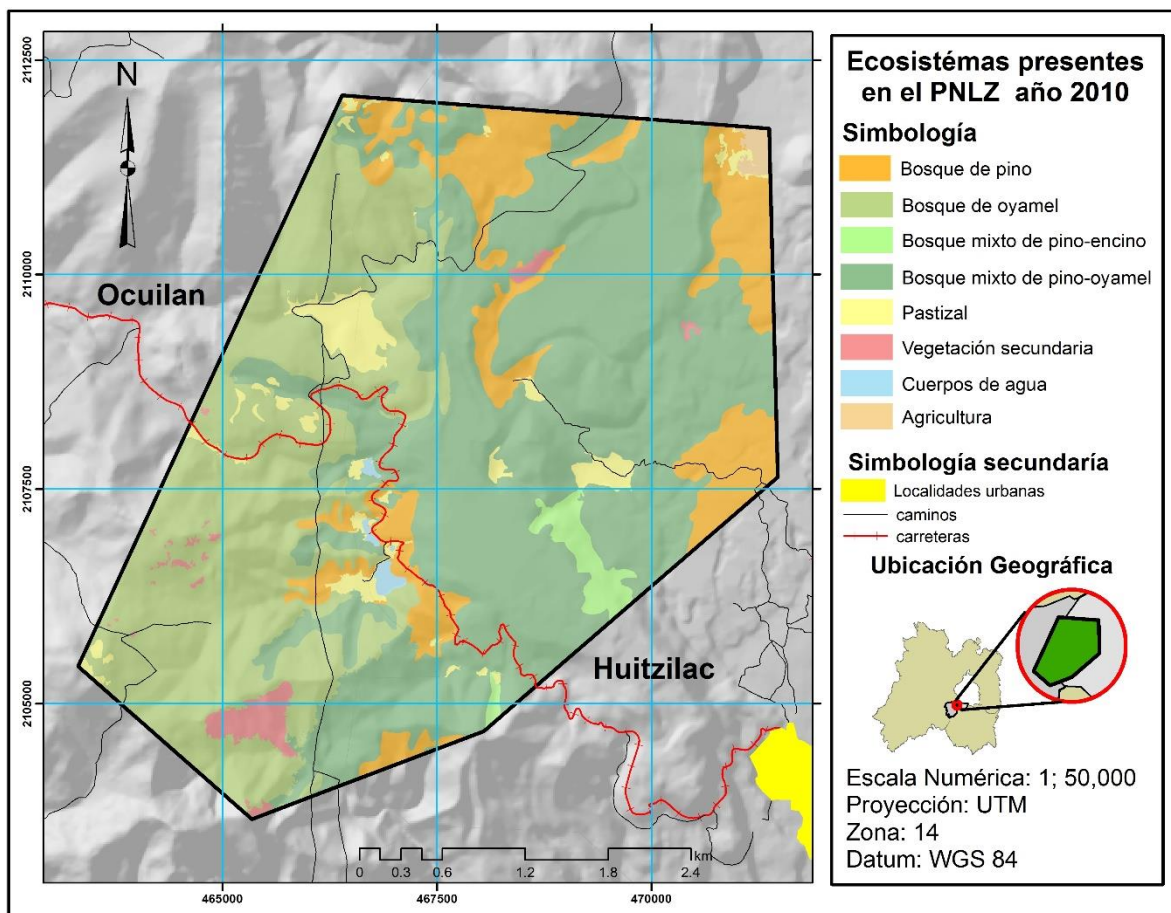
Fuente: elaboración propia, 2020.



La vegetación secundaria es el sexto ecosistema, compuesta principalmente por especies de matorral inerme, cuenta con una superficie de 67 hectáreas (1.47%) distribuidas principalmente en la zona sur del área de estudio. El sexto ecosistema presente en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala y de manera a temporal son los agroecosistemas, cuentan con una superficie total de 17 hectáreas (0.37%), son generados principalmente por la intervención de actividades antrópicas en la zona norte del área de estudio donde existen las mejores vías de acceso (caminos y senderos), los principales productos de cultivo son el maíz, papa y aguacate.

Uno de los ecosistemas de mayor impacto son los cuerpos de agua, un primer análisis es la disminución parcial de los cuerpos para el año 2010 cuenta con una superficie aproximada de 15 hectáreas (0.33%).

**Mapa 8. Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 2010.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.2.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2019

En el año 2019 el Parque Nacional Laguna de Zempoala preserva la superficie total de 4,556 ha., distribuida en ocho ecosistemas diferentes, (tabla 17) el ecosistema de mayor extensión es el bosque mixto de pino-oyamel con una superficie de 2,225 hectáreas (48.81%) distribuidas en la zona centro, norte y sur del ANP, el segundo ecosistema de mayor proporción el bosque de oyamel con 1,385 hectáreas (30.40%) distribuidas en la zona sur y norte del área de estudio.

El tercer ecosistema de mayor extensión es el bosque de pino con una superficie de 586 hectáreas (12.86%) distribuidas principalmente en la zona norte del área de estudio, el cuarto ecosistema es el pastizal con una superficie de 194 hectáreas (4.26%) distribuidas en la zona centro donde hectáreas, (mapa 9).

**Tabla 17. Superficie de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala año 2019**

N°	Ecosistemas	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	2,224	48.81
2	Bosque de oyamel	1,385	30.40
3	Bosque de pino	586	12.86
4	Pastizal	194	4.26
5	Bosque mixto de pino-encino	68	1.49
6	Vegetación secundaria	60	1.32
7	Agricultura	24	0.53
8	Cuerpos de agua	15	0.33
	Total	4,556	100.00

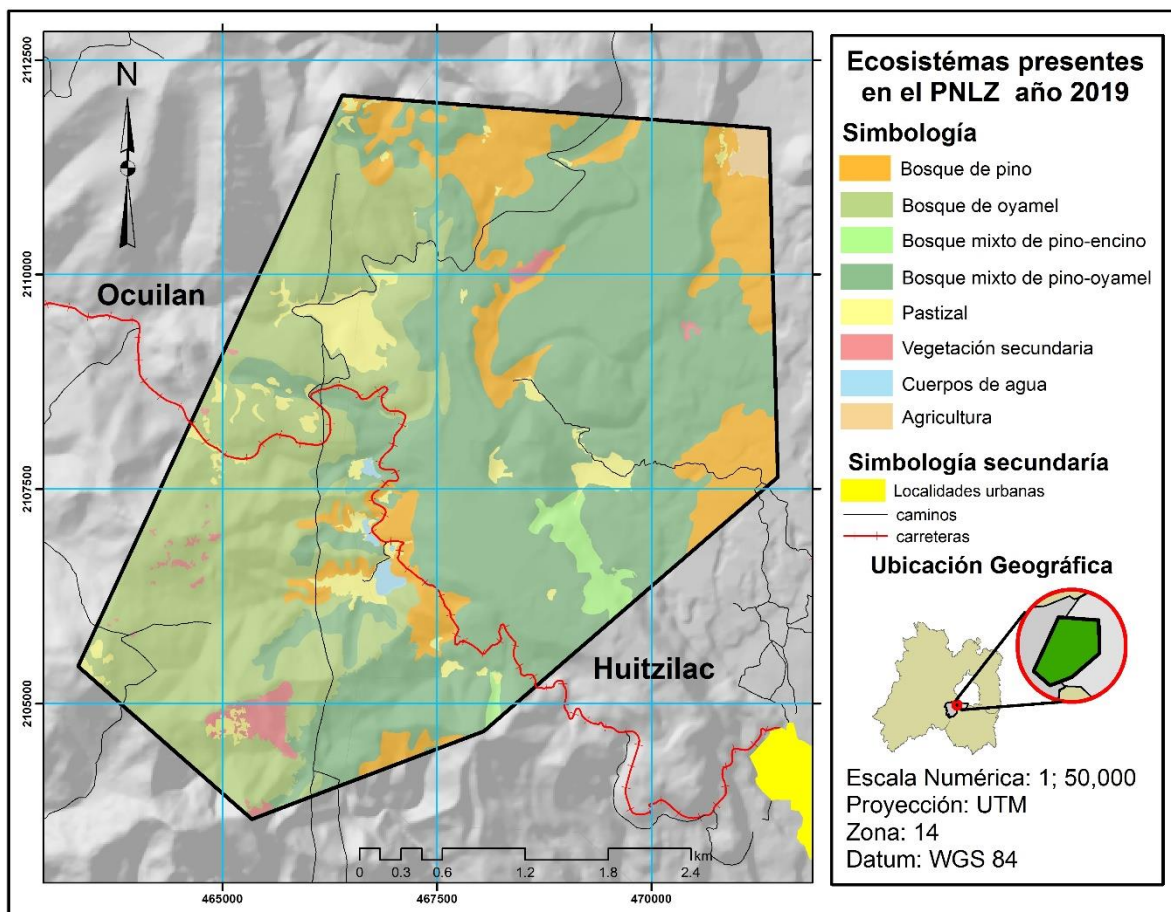
**Fuente:** elaboración propia, 2020.

El quinto ecosistema es el bosque mixto de pino-encino con una superficie de 68 hectáreas (1.49%) distribuidas principalmente en la zona este del ANP, la vegetación secundaria es el sexto ecosistema de mayor proporción en el parque con una superficie de 60 hectáreas (1.32%) distribuidas principalmente en la zona sur.

Los agroecosistemas ocupan el séptimo lugar en ocupación de superficie con 24 hectáreas (0.53%), un segundo acercamiento a partir del análisis de los cambios en los tres años estudiados, la superficie ocupada por actividades agrícolas ha aumentado 7 hectáreas aproximadamente, tomando en cuenta las restricciones de uso de suelo que tiene el parque al ser un ANP de mayor protección, las actividades agrícolas se han expandido considerablemente.

Finalmente, el último ecosistema son los cuerpos de agua con una superficie de 15 hectáreas (0.33%), cabe resaltar que es el único ecosistema que se ha mantenido en los últimos 9 años de análisis, se distribuye en la zona norte del parque.

**Mapa 9. Ecosistemas presentes en el PNLZ para el año 2019**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### **3.3 Dinámica de cambios de los ecosistemas presentes en el PNLZ para los años 1976, 2010 y 2019.**

Los resultados obtenidos para los indicadores de cambio de los años 2010 y 2019 se muestran en la tabla 18, el total de la superficie del ANP es de 4,556 ha, de las cuales 4,481 hectáreas (98.35%) no presentaron ningún cambio y se mantuvieron estables. Por otra parte, 75 ha (1.65%), mostraron cambios (pérdidas-ganancias).

El cambio total es de 75 ha (1.65% de la superficie), de las cuales 46 ha (1.01%) corresponde a los intercambios y 29 ha (0.64%) al cambio neto. Los ecosistemas que presentan los incrementos más importantes son los pastizales con 46 ha equivalentes a (1.01%) del total de la superficie y los agroecosistemas que aumentaron su superficie 8ha, lo que representa un aumento del (0.18%). Por otra parte, las coberturas que presentan las mayores pérdidas son los ecosistemas forestales de bosque de oyamel y bosque de pino.

Las categorías en presentar las mayores ganancias de superficie es el ecosistema forestal de bosque de oyamel con 147 ha equivalentes al (3.23%) del total de la superficie, otra de cobertura en presentar aumento el bosque mixto de pino-oyamel con 129 ha lo que representa (2.83%) del total de la superficie.

Por otra parte, los ecosistemas en presentar las mayores pérdidas es la vegetación secundaria (matorrales) con 158 ha, equivalentes al (3.47%) del total de la superficie y los ecosistemas de pastizales al disminuir su superficie 109 ha lo que representa (2.39%) del total de la superficie.

Los resultados obtenidos de los indicadores de Braimoh tabla 19, muestran los índices de ganancia-persistencia, pérdida-persistencia y cambio neto-persistencia entre los años 1976 y 2010, los ecosistemas que tienden a ser estables (persistencias) son las categorías de agricultura, bosque de oyamel y bosque de pino-oyamel tienden más a persistir que a ganar o perder superficie por su parte, los ecosistemas cuerpos de agua, bosque de pino, bosque de pino encino, pastizal y vegetación secundaria tienden más a perder que a ganar superficie.

**Tabla 18. Matriz de cambios para los años 1976 y 2010 en el PNLZ**

1996-2010	Agricultura	Cuerpos de agua	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Pastizal	Vegetación secundaria	Total ha %
Área 1976 (ha)	0	23	1300	621	71	2144	188	209	4556
(%)	0.00	0.50	28.53	13.63	1.56	47.06	4.13	4.59	100.00
Área 2010 (ha)	17	15	1407	594.0	69	2230	157	67	4556
(%)	0.37	0.33	30.88	13.04	1.51	48.95	3.45	1.47	100.00
Persistencia	0.00	9.00	1260	549.0	68.00	2101	79.00	51.00	4117.0
(%)	0.00	0.20	27.66	12.05	1.49	46.12	1.73	1.12	90.36
Pérdidas	0.00	14.00	40.00	72.00	3.00	43.00	109.0	158.00	439.00
(%)	0.00	0.31	0.88	1.58	0.07	0.94	2.39	3.47	9.64
Ganancias	17.00	6.00	147.0	45.00	1.00	129.0	78.00	16.00	439.00
(%)	0.37	0.13	3.23	0.99	0.02	2.83	1.71	0.35	9.64
Cambio total	17.00	20.00	187.0	117.0	4.00	172.0	187.0	174.00	439.00
(%)	0.37	0.44	4.10	2.57	0.09	3.78	4.10	3.82	9.64
Cambio neto	17.00	8.00	107.0	27.00	2.00	86.00	31.00	142.00	132.00
(%)	0.37	0.18	2.35	0.59	0.04	1.89	0.68	3.12	2.90
Intercambios	0.00	12.00	80.00	90.00	2.00	86.00	156.0	32.00	307.00
(%)	0.00	0.26	1.76	1.98	0.04	1.89	3.42	0.70	6.74

Fuente: elaboración propia, 2020.

**Tabla 19. Indicadores de Braimoh para los años 1976 y 2010**

Categoría	Ganancia Persistencia	Pérdida persistencia	Cambio neto Persistencia
Agricultura	0.000	0.000	0.000
Cuerpos de agua	0.667	1.556	-0.889
Bosque de oyamel	0.117	0.032	0.085
Bosque de pino	0.082	0.131	-0.049
Bosque mixto de pino-encino	0.015	0.044	-0.029
Bosque mixto de pino-oyamel	0.061	0.020	0.041
Pastizal	0.987	1.380	-0.392
Vegetación secundaria	0.314	3.098	-2.784

Fuente: elaboración propia, 2020.

La segunda etapa de análisis corresponde a los años 2010 y 2019 la dinámica general de los cambios presentados en los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala muestra una ligera disminución en las coberturas forestales en un periodo de 9 años.

Los resultados obtenidos de los indicadores de cambio entre los años 2010 y 2019 se muestran en la tabla 20, el total de la superficie del ANP es de 4556 ha de las cuales 4,481 hectáreas (98.35%) no presento ningún cambio (se mantuvieron estables). Por otra parte, 75 ha (1.65%), mostraron cambios (pérdidas-ganancias), el cambio total es de 75 ha (1.65), de las cuales 46 ha (1.01%) corresponde a los intercambios y 29 ha (0.64%) al cambio neto. Con respecto a la etapa analizada anteriormente existe un incremento en las hectáreas que se mantuvieron estables debido a rango de tiempo establecido entre un periodo y otro.

Por otra parte, los ecosistemas en presentar los incrementos más importantes son los pastizales con 46 ha equivalentes a (1.01%) del total de la superficie y los agroecosistemas aumentaron su superficie 8 ha lo que representa un aumento del (0.18%) del total de la superficie, por otra parte, las coberturas que presentan las mayores pérdidas son los ecosistemas forestales bosque de oyamel y bosque de pino.

Los resultados obtenidos de los indicadores de Braimoh se muestran en la tabla 21, representan los índices de ganancia-persistencia, pérdida-persistencia y cambio neto-persistencia para los años 2010 y 2019, los ecosistemas que presentaron una persistencia son los cuerpos de agua, por otro lado los ecosistemas que tienen más a ganar que a perder son las coberturas de pastizal y agricultura mientras que todos los ecosistemas forestales para este periodo tienden más a perder que a ganar, por último la vegetación secundaria tiende más a perder que a ganar superficie.

**Tabla 20. Matriz de cambios para los años 2010 y 2019 en el PNLZ**

2010-2019	Agricultura	Cuerpos de agua	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Pastizal	Vegetación secundaria	Total Ha/%
Área 2010 (ha)	17	15	1407	594	69	2230	157	67	4556.00
(%)	0.37	0.33	30.88	13.04	1.51	48.95	3.45	1.47	100.00
Área 2019 (ha)	24.00	15.00	1385.00	586.00	68.00	2224.00	194.00	60.00	4556.00
(%)	0.53	0.33	30.40	12.86	1.49	48.81	4.26	1.32	100.00
Persistencia	16.00	14.00	1380.00	580.00	67.00	2220.00	148.00	56.00	4481.00
(%)	0.35	0.31	30.29	12.73	1.47	48.73	3.25	1.23	98.35
Pérdidas	1.00	1.00	27.00	14.00	2.00	10.00	9.00	11.00	75.00
(%)	0.02	0.02	0.59	0.31	0.04	0.22	0.20	0.24	1.65
Ganancias	8.00	1.00	5.00	6.00	1.00	4.00	46.00	4.00	75.00
(%)	0.18	0.02	0.11	0.13	0.02	0.09	1.01	0.09	1.65
Cambio total	9.00	2.00	32.00	20.00	3.00	14.00	55.00	15.00	75.00
(%)	0.20	0.04	0.70	0.44	0.07	0.31	1.21	0.33	1.65
Cambio neto	7.00	0.00	22.00	8.00	1.00	6.00	37.00	7.00	29.00
(%)	0.15	0.00	0.48	0.18	0.02	0.13	0.81	0.15	0.64
Intercambios	2.00	2.00	10.00	12.00	2.00	8.00	18.00	8.00	46.00
(%)	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.18	0.40	0.18	1.01

Fuente: elaboración propia, 2020.

**Tabla 21. Indicadores de Braimoh para los años 2010 y 2019**

Categoría	Ganancia Persistencia	Pérdida Persistencia	Cambio neto Persistencia
Agricultura	0.500	0.063	0.438
Cuerpos de agua	0.071	0.071	0.000
Bosque de oyamel	0.004	0.020	-0.016
Bosque de pino	0.010	0.024	-0.014
Bosque mixto de pino-encino	0.015	0.030	-0.015
Bosque mixto de pino-oyamel	0.002	0.005	-0.003
Pastizal	0.311	0.061	0.250
Vegetación secundaria	0.071	0.196	-0.125

Fuente: elaboración propia, 2020.

### **3.4 Validación de la cartografía de los ecosistemas presentes en el PNLZ**

Se verificaron 400 puntos de muestreo para los años 2010 y 2019 correspondientes a 50 puntos de verificación (verdad terreno) para cada ecosistema identificado (categorías del mapa=verdad imagen).

En la matriz de confusión error para el año 2010, de los 400 puntos de verificación, 388 corresponden al ecosistema asignado; solo 12 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado.

En el año 2019 de los 400 puntos de verificación, 389 corresponden al ecosistema asignado y 11 puntos fueron de otro ecosistema diferente al asignado. Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías) de los mapas (tabla 22).

Los resultados obtenidos en la tabla 22 se generaron en función a la proporción de la superficie (porcentaje de las categorías clasificadas), del número total de los puntos de muestreo verificados (verdad terreno), de esta manera se consigue calcular la superficie en porcentaje de los ecosistemas de los mapas (verdad imagen).



**Tabla 22. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años para años 2010 y 2019**

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	50	0	0	0	0	0	0	0	50
	Pastizal	0	47	2	0	0	0	0	0	50
	Bosque de oyamel	0	1	48	1	0	0	0	0	50
	Bosque de pino	0	0	0	47	2	0	1	0	50
	Bosque de pino-encino	0	0	0	0	49	1	0	0	50
	Bosque de pino-oyamel	0	1	0	1	0	48	0	0	50
	Vegetación secundaria	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	Agricultura	0	0	0	0	0	0	1	49	50
Total categorías del mapa		50	49	50	49	51	49	52	49	400
Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	50	0	0	0	0	0	0	0	50
	Pastizal	0	48	1	1	0	0	0	0	50
	Bosque de oyamel	0	1	49	0	0	0	0	0	50
	Bosque de pino	0	0	0	48	1	1	0	0	50
	Bosque de pino-encino	0	0	0	0	49	1	0	0	50
	Bosque de pino-oyamel	0	0	0	1	1	48	0	0	50
	Vegetación secundaria	0	1	0	0	0	0	49	0	50
	Agricultura	0	0	0	0	0	0	2	48	50
Total categorías del mapa		50	50	50	50	51	50	51	48	400

Fuente: elaboración propia, 2020.

Los resultados alcanzados mediante las matrices de confusión expresada en proporción (tabla 23), son los siguientes:

A.- Para el año 2010, de los puntos de verificación analizados, sólo 2 ecosistemas (cuerpos de agua y vegetación secundaria) coincidían al (100%) con las categorías del mapa, por lo que se realizaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (3.4%); bosque de oyamel (30.9%); bosque de pino (13%); bosque mixto de pino-encino (1.5%); bosque mixto de pino-oyamel (48.9%); Vegetación secundaria (1.5%); agricultura (0.4% de la superficie total).

B.- Para el año 2019, de los puntos de verificación analizados sólo 1 ecosistema (cuerpos de agua) coincidía al (100%) con las categorías del mapa, de igual forma se realizaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa por cada ecosistema: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (4.3%); bosque de oyamel (30.4%); bosque de pino (12.9%); bosque mixto de pino-encino (1.5%); bosque mixto de pino-oyamel (48.8%); Vegetación secundaria (1.3%); agricultura (0.5% de la superficie total).

**Tabla 23. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 expresada en proporción**

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Pastizal	0.000	0.118	0.003	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de oyamel	0.000	0.022	0.092	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de pino	0.000	0.000	0.000	0.098	0.021	0.000	0.007	0.000	0.125
	Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.124	0.001	0.000	0.000	0.125
	Bosque de pino-oyamel	0.000	0.017	0.000	0.017	0.000	0.091	0.000	0.000	0.125
	Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.125
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.125
Total categorías		0.125	0.157	0.095	0.129	0.145	0.091	0.132	0.125	1.000
Proporción representada mapa		0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	1.000
Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Pastizal	0.000	0.121	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de oyamel	0.000	0.005	0.120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de pino	0.000	0.000	0.000	0.114	0.007	0.005	0.000	0.000	0.125
	Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.125
	Bosque de pino-oyamel	0.000	0.000	0.000	0.009	0.009	0.108	0.000	0.000	0.125
	Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.000	0.125
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.125
Total categorías		0.125	0.126	0.122	0.125	0.140	0.113	0.125	0.125	1.000
Proporción representada mapa		0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	1.000

Fuente: elaboración propia, 2020.

La tabla 24 presenta los resultados obtenidos a través del método de Card (1982), el método pondera el número de sitios de verificación (verdad terreno) en correlación a la superficie de cada uno de los ecosistemas de los mapas para ambos años (verdad imagen).

A.- Para el año 2010 las proporciones corregidas son las siguientes: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (3.5%); bosque de oyamel (32.2%); bosque de pino (10.2%); bosque mixto de pino-encino (1.5%); bosque mixto de pino-oyamel (51.8%); Vegetación secundaria (1.5%); agricultura (0.7%).

B.- Para el año 2019 las proporciones corregidas son las siguientes: cuerpos de agua (0.3% de la superficie total); pastizal (4.8%); bosque de oyamel (30%); bosque de pino (13.6%); bosque mixto de pino-encino (1.4%); bosque mixto de pino-oyamel (47.8%); Vegetación secundaria (1.3%); agricultura (0.9% de la superficie total).

**Tabla 24. Análisis de confiabilidad de la cartografía, mediante la matriz de error para los años 2010 y 2019 corregida de acuerdo con Card (1982)**

Año 2010		Categorías del mapa (verdad imagen)								Total de puntos verificados (verdad terreno)
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	Pastizal	0.000	0.026	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035
	Bosque de oyamel	0.000	0.008	0.299	0.015	0.000	0.000	0.000	0.000	0.322
	Bosque de pino	0.000	0.000	0.000	0.098	0.002	0.000	0.001	0.000	0.102
	Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.002	0.000	0.000	0.015
	Bosque de pino-oyamel	0.000	0.006	0.000	0.025	0.000	0.487	0.000	0.000	0.518
	Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.015
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.004	0.007
Total categorías		0.003	0.040	0.305	0.141	0.015	0.488	0.019	0.004	1.000
Proporción representada mapa		0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	1.000

Año 2019		Categorías del mapa (verdad imagen)								
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Total de puntos verificados (verdad terreno)
Verdad terreno (Categorías de referencia)	Cuerpos de agua	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003
	Pastizal	0.000	0.041	0.005	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.048
	Bosque de oyamel	0.000	0.002	0.298	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300
	Bosque de pino	0.000	0.000	0.000	0.117	0.001	0.018	0.000	0.000	0.136
	Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.001	0.000	0.000	0.014
	Bosque de pino-oyamel	0.000	0.000	0.000	0.010	0.001	0.467	0.000	0.000	0.478
	Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.013
	Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.005	0.009
Total categorías		0.003	0.043	0.304	0.130	0.015	0.486	0.017	0.005	1.000
Proporción representada mapa		0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	1.000

Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.4.1 Confiabilidad e intervalos de confianza para el mapa del año 2010.

Los intervalos se determinaron para los usuarios y productores; así fue posible determinar la confiabilidad de manera global. El intervalo de confianza para los usuarios muestra la probabilidad de que las categorías clasificadas correspondan verdaderamente a lo representado en el área de estudio, mientras que el intervalo para los productores representa la proporción de sitios de verificación de todas las categorías representadas en los mapas. La confiabilidad global representa las categorías correctamente clasificadas en los mapas.

La tabla 25 representa los resultados obtenidos de los intervalos de confianza de la confiabilidad del mapa para el año 2010.

1. Se identificó una proporción del (100% verdad imagen) para la confiabilidad del usuario en las categorías cuerpos de agua y la agricultura, por lo que el error de

comisión se considera del (0%), por otro lado, la menor confiabilidad corresponde al ecosistema de pastizales con el (80%), por lo que el error de comisión se calculó del (20%); de acuerdo a Mas (2003) este valor es el límite permitido en esta categoría.

2. En relación a la confiabilidad del productor los ecosistemas de cuerpos de agua y agricultura presentan una proporción del (100% verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al (0%); por otra parte, el ecosistema de pastizal presenta la mínima confiabilidad del productor con el (90%) y el mayor nivel de error de omisión con el (10%).

3. En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas para el año 2010 es del (95% verdad imagen) y (2.65%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

**Tabla 25. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2010**

Año 2010		Categorías en porcentaje (%)								Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura		
Año 2010	Confiabilidad del usuario	100	80	98	97.0	85	99	95	100	95.00	2.65
	Error de comisión	0	20	2	3	15	1	5	0		
	Intervalo de confianza del usuario	0.00	13.00	3.91	4.85	11.95	1.68	6.39	0.0		
	Confiabilidad del productor	100	90	93	97	88	94	100	98		
	Error de omisión	0	10	7	3	12	6	0	0		
	Intervalo de confianza productor	0.00	0.09	0.08	0.05	0.10	0.07	0.00	0.24		

Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.4.2 Confiabilidad e intervalos de confianza para el mapa del año 2019.

Los resultados obtenidos de los valores correspondientes a los intervalos de confianza de la confiabilidad para el mapa del año 2019 (tabla 26), muestran que:

1. Existe una proporción del (100% verdad imagen) para la confiabilidad del usuario en las categorías cuerpos de agua y la agricultura, por lo que el error comisión sea del (0%), por otro lado, la menor confiabilidad corresponde al ecosistema forestal del bosque de pino con el (92%), por lo que el error de comisión sea del (8%).
2. En relación a la confiabilidad del productor, los ecosistemas de cuerpos de agua presentan una proporción del (100% verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al 0%, por otra parte, la agricultura presenta la mínima confiabilidad del productor con el (83%) y el mayor nivel de error de omisión con el (17%).
3. De manera general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes para el año 2019 es del (95% verdad imagen) y (2.86%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

**Tabla 26. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas presentes en el área de estudio para el año 2019**

Año 2019		Categorías en porcentaje (%)								Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad
		Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura		
Año 2019	Confiabilidad del usuario	100	95	98	92	94	96	84	100	95.00	2.86
	Error de comisión	0	5	2	8	6	4	16	0		
	Intervalo de confianza del usuario	0.00	6.18	3.73	8.00	6.85	5.53	15.13	0.0		
	Confiabilidad del productor	100	94	99	99	93	98	98	83		
	Error de omisión	0	6	1	1	7	2	2	17		
	Intervalo de confianza del productor	0.00	0.07	0.02	0.02	0.07	0.04	0.03	0.22		

Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.3.3 Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La tabla 27 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. Los ecosistemas de cuerpos de agua y vegetación secundaria no requirieron una corrección resultado de la ausencia de errores de omisión y comisión.

**Tabla 27. Superficies obtenidas de la clasificación, superficies corregidas por el método de Card de la superficie corregida para cada ecosistema**

Año 2010	Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Cuerpos de agua	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15	0.000	15
Pastizal	0.000	0.947	0.024	0.029	0.000	0.000	0.000	0.000	157	0.035	167
Bosque de oyamel	0.000	0.174	0.740	0.087	0.000	0.000	0.000	0.000	1407	0.322	1425
Bosque pino	0.000	0.000	0.000	0.780	0.165	0.000	0.055	0.000	594	0.102	532
Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.996	0.004	0.000	0.000	69	0.016	80
Bosque pino-oyamel	0.000	0.138	0.000	0.138	0.000	0.725	0.000	0.000	2230	0.517	2250
Vegetación secundaria	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	67	0.001	67
Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.998	17	0.007	20
Proporción en el mapa	0.003	0.034	0.309	0.130	0.015	0.489	0.015	0.004	4556	1.0	4556
Año 2019	Cuerpos de agua	Pastizal	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque de pino-encino	Bosque de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Cuerpos de agua	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	15	0.003	15
Pastizal	0.000	0.964	0.018	0.018	0.000	0.000	0.000	0.000	194	0.048	323
Bosque de oyamel	0.000	0.043	0.957	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1385	0.300	1351
Bosque pino	0.000	0.000	0.000	0.910	0.054	0.036	0.000	0.000	586	0.136	712
Bosque de pino-encino	0.000	0.000	0.000	0.000	0.998	0.002	0.000	0.000	68	0.014	61
Bosque pino-oyamel	0.000	0.000	0.000	0.069	0.069	0.863	0.000	0.000	2224	0.478	2004
Vegetación secundaria	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.996	0.000	60	0.013	60
Agricultura	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.997	24	0.009	30
Proporción en el mapa	0.003	0.043	0.304	0.129	0.015	0.488	0.013	0.005	4556	1.0	4556

Fuente: Elaboración propia, 2020.



### 3.4.4 Validación de los puntos de muestreo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala

De los 20 puntos visitados en campo 18 puntos corresponden con los ecosistemas establecidos en la cartografía (tabla 28), por otra parte, los puntos que no correspondieron al ecosistema asignado fueron el 14 y 16 correspondientes a bosque de pino ya que en campo se visualizó mayormente un bosque mixto de pino-oyamel (foto 13).

**Fotografía 13. Evidencia del bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ**



**Fuente:** fotografía tomada por Santiago Juan Medina Silva. ANP Lagunas de Zempoala, Estado de México y Morelos, 2 de mayo de 2020.

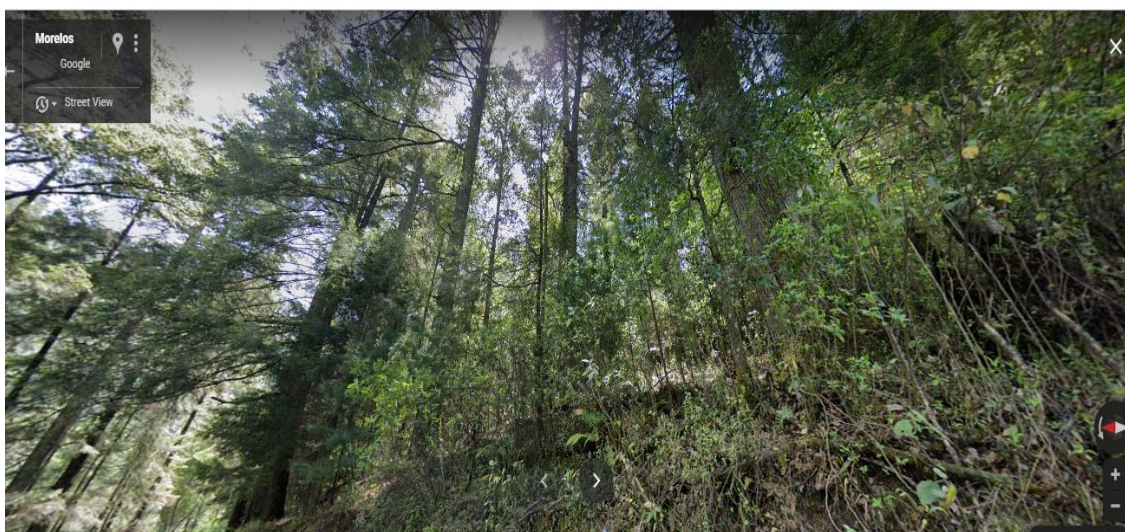
**Tabla 28. Puntos validados en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Punto	Coordenada (X)	Coordenada (Y)	Punto	Coordenada (X)	Coordenada (Y)
1	464,670	2,108,237	11	466,870	2,107,532
2	465,218	2,107,853	12	466,895	2,107,203
3	465,436	2,107,999	13	466,586	2,107,114
4	465,749	2,108,119	14	466,655	2,107,020
5	466,162	2,108,664	15	466,931	2,106,837
6	466,885	2,108,617	16	466,793	2,106,412
7	466,993	2,108,038	17	467,426	2,106,381
8	466,711	2,107,949	18	467,659	2,106,036
9	466,573	2,107,768	19	467,833	2,105,720
10	466,608	2,107,727	20	468,511	2,105,325

**Fuente:** elaboración propia, 2020.

Los puntos verificados a través de imágenes de satélite (tabla 29); los resultados mostraron un total 19 puntos que corresponden a los ecosistemas asignados mientras que el punto número 23 no correspondió a la categoría bosque de oyamel en la cartografía (fotografía 14).

**Fotografía 14. Evidencia del bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ**



Fuente: Google Maps, 2020.

**Tabla 29. Puntos validados mediante imágenes de satélite.**

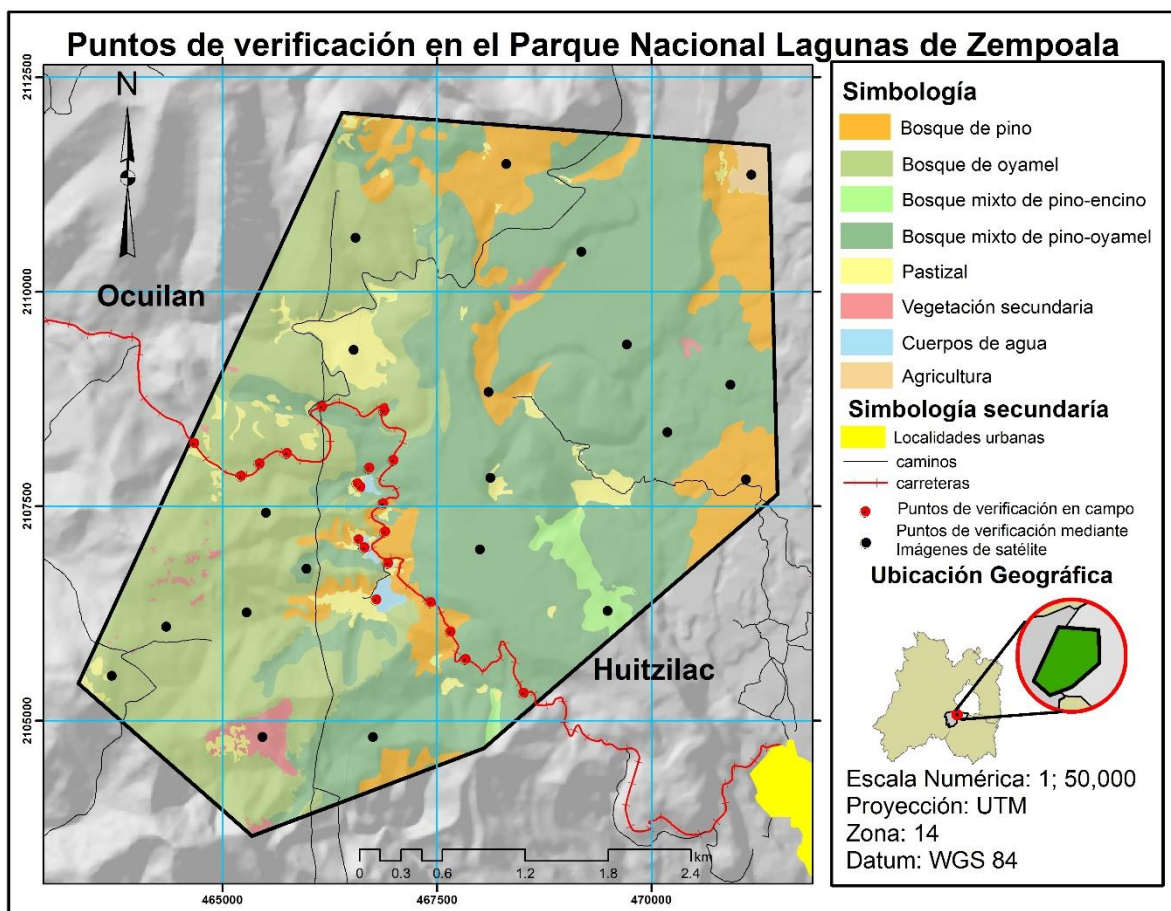
Punto	Coordenada (X)	Coordenada (Y)	Punto	Coordenada (X)	Coordenada (Y)
21	471,164	2,111,364	31	469,182	2,110,465
22	469,713	2,109,383	32	470,918	2,108,913
23	466,548	2,110,629	33	466,527	2,109,322
24	465,465	2,104,808	34	465,506	2,107,422
25	463,709	2,105,523	35	464,342	2,106,095
26	469,489	2,106,278	36	467,998	2,106,993
27	468,120	2,107,831	37	468,100	2,108,831
28	465,282	2,106,258	38	471,102	2,107,810
29	466,752	2,104,808	39	470,183	2,108,362
30	468,304	2,111,486	40	465,976	2,106,769

Fuente: elaboración propia, 2020.

El mapa 10 muestra los 40 puntos establecidos para la verificación, en color rojo se representan los puntos validados en campo, los puntos se ubicaron con GPS, registrando su ubicación (coordenadas) cabe resaltar que los puntos visitados están situados en los alrededores de la carretera federal Ocuilan-Cuernavaca por distintas limitantes, las más significativa como ya se mencionó anteriormente es que los accesos a otros sitios son de difícil acceso así mismo existe presencia de delincuencia dentro y fuera del parque.

Por su parte los puntos validados mediante imágenes de satélite se representan en color negro, son las zonas donde no existen rutas o senderos seguros para su visita por esta razón se determinó verificarlos de manera digital.

**Mapa 10. Validación de los puntos de muestreo.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.5 Servicio Ecosistémico (SE) Captura de carbono en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala

El SE de soporte captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para los años 1976, 2010 y 2019, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuesto por Avendaño *et al.* (2009), Diaz *et al.* (2007) y Jiménez *et al.* (2013) para su posterior multiplicación con la superficie de cada ecosistema forestal, los resultados alcanzados se presentan a continuación.

#### 3.5.1 Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 1976

Para el año 1976, el PNLZ presenta cuatro tipos de ecosistemas forestales con una superficie total de 4,136 ha equivalentes a 198,655 toneladas de carbono capturado para este año, existen variaciones en la captura de carbono de acuerdo a sus características físicas y ambientales. El ecosistema con la mayor captura de carbono es el bosque mixto de pino-oyamel con 103,555 toneladas de carbono almacenado (52.13%), distribuidas en la zona centro y norte del ANP (tabla 30).

**Tabla 30. Total de captura de carbono por ecosistema forestal en el Parque Lagunas de Zempoala año 1976.**

N°	Ecosistema	Índice de captura de carbono (ton)	Superficie (ha)	Captura de carbono total (ton)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	48.30	2,144	103,555	52.13
2	Bosque de oyamel	46.50	1,300	60,450	30.43
3	Bosque de pino	50.31	621	31,243	15.73
4	Bosque mixto de pino-encino	47.98	71	3,407	1.72
Total			4,136	198,655	100

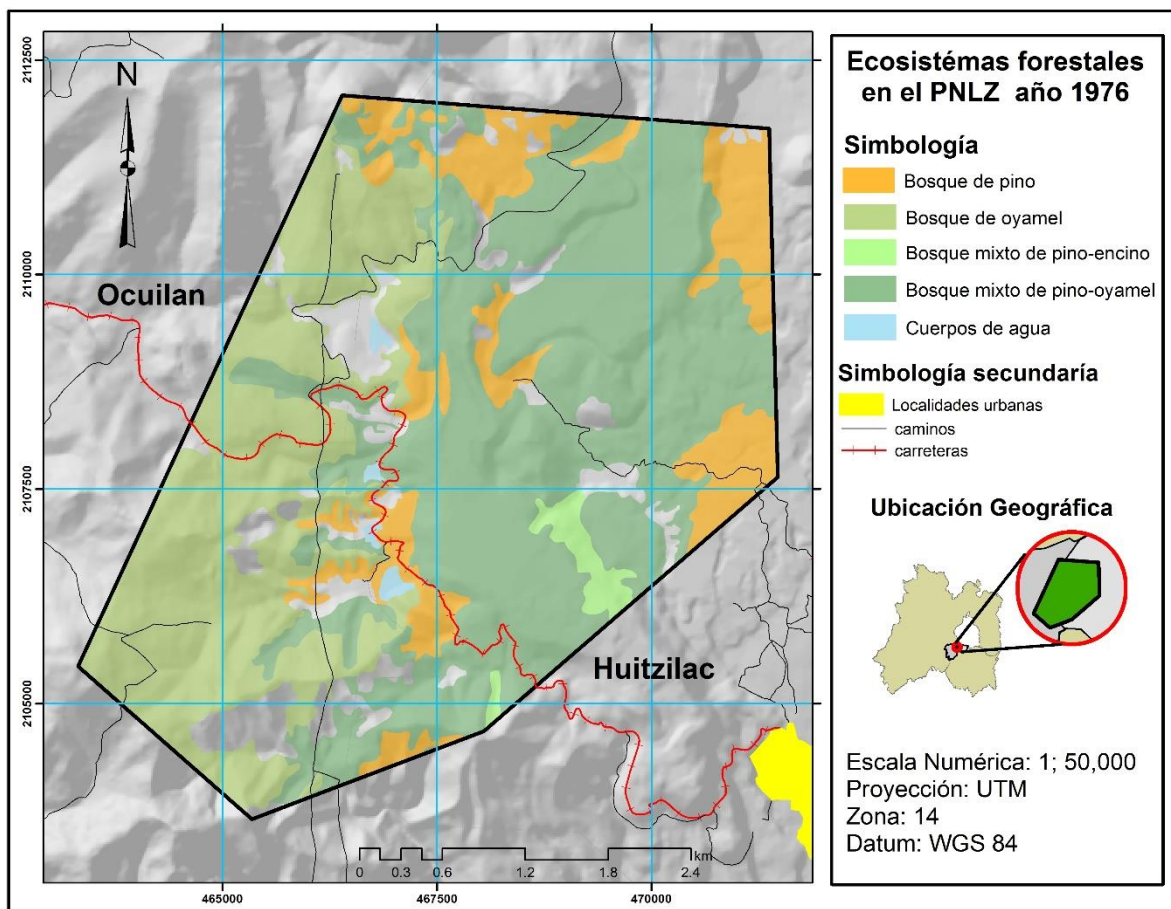
**Fuente:** elaboración propia con base en Avendaño (2009), Franco (2007), y Jiménez (2013).



El ecosistema forestal bosque de oyamel tiene una superficie de 1,300 hectáreas equivalentes a 60,450 toneladas de carbono almacenado (30.43%), distribuidas en la zona sureste del área de estudio; por su parte el bosque de pino con una superficie de 621 hectáreas captura 31,243 toneladas de carbono (15.73%) distribuidas en la zona norte.

El ecosistema forestal bosque mixto de pino-encino cuenta con una superficie de 71 hectáreas lo que equivale a 3,407 toneladas de almacenamiento de carbono (1.72%) distribuidas en la zona sureste del parque (mapa 11).

**Mapa 11. Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 1976**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.5.2 Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 2010

Para el año 2010 en el PNLZ prevalecen los cuatro tipos de ecosistemas forestales presenten en el año 2010, mostraron diversos cambios ya que la superficie total aumento a 4,300 ha equivalentes a un total de 206,330 toneladas de carbono almacenado para este año; además de la aparición de los agroecosistemas desarrollados por actividades agrícolas (tabla 31).

**Tabla 31. Total de captura de carbono por ecosistema forestal en el Parque Lagunas de Zempoala año 2010.**

N°	Ecosistema	Índice de captura de carbono (ton)	Superficie (ha)	Captura de carbono total (ton)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	48.3	2,230	107,709	52.20
2	Bosque de oyamel	46.5	1,407	65,426	31.71
3	Bosque de pino	50.31	594	29,884	14.48
4	Bosque mixto de pino-encino	47.98	69	3,311	1.60
Total			4,300	206,330	100

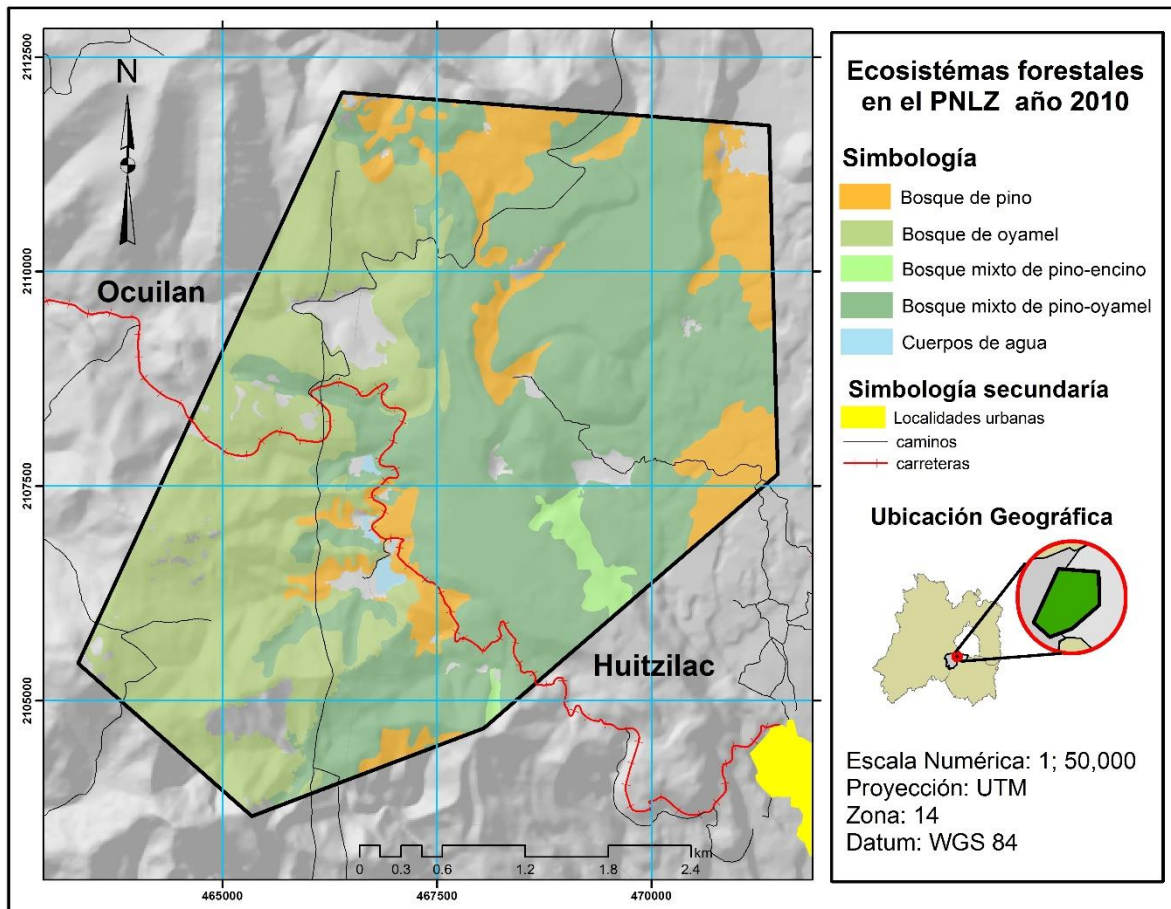
**Fuente:** elaboración propia con base en Avendaño (2009), Franco (2007), y Jiménez (2013).

El ecosistema forestal con la mayor superficie es el bosque mixto de pino-oyamel con 2,230 hectáreas lo equivalente a 107,709 toneladas de captura de carbono (52.20%) se encuentra distribuido en la zona centro y sur del ANP, el segundo ecosistema con el mayor porcentaje de carbono almacenado es el bosque de oyamel con una superficie 1,407 hectáreas se traduce en 65,426 de toneladas de carbono almacenado (31.71%) distribuidas en la zona sureste del parque.

El tercer ecosistema forestal es el bosque de pino tiene una superficie de 594 hectáreas, esto equivale a 29,884 de toneladas de carbono almacenado (14.48%), por su parte el bosque mixto de pino-encino cuenta una superficie de 69 hectáreas, esta área de bosque es capaz de capturar aproximadamente 3,311 de toneladas de carbono (1.60%).

Un primer análisis es la presencia de diversos intercambios de superficie a partir de la expansión de pastizal y el desarrollo de agroecosistemas generados por actividades antropogénicas en el norte del área de estudio (mapa 12).

**Mapa 12. Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 2010.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.5.3 Captura de carbono de los ecosistemas forestales del PNLZ año 2019

El PNLZ para el año 2019 conserva los cuatro ecosistemas forestales ocupan una superficie total de 4,263 hectáreas lo representa 204,556 de carbono capturado para este año.

Se identificaron distintos intercambios de cobertura entre los ecosistemas de pino y de oyamel, el ecosistema bosque de pino perdió superficie, de acuerdo al análisis el bosque de oyamel sigue siendo el ecosistema forestal en tener la mayor captura de carbono al contar con una superficie de 2,224 hectáreas se traduce en 107,419.2 de toneladas almacenadas (52.51%) distribuidas principalmente en la zona centro y norte del ANP (tabla 32).

**Tabla 32. Total de captura de carbono por ecosistema forestal en el Parque Lagunas de Zempoala año 2019.**

N°	Ecosistema	Índice de captura de carbono (ton)	Superficie (ha)	Captura de carbono total (ton)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	48.30	2,224	107,419.2	52.51
2	Bosque de oyamel	46.50	1,385	64,402.5	31.48
3	Bosque de pino	50.31	586	29,481.66	14.41
4	Bosque mixto de pino-encino	47.98	68	3,262.64	1.59
Total			4,263	204,556	100

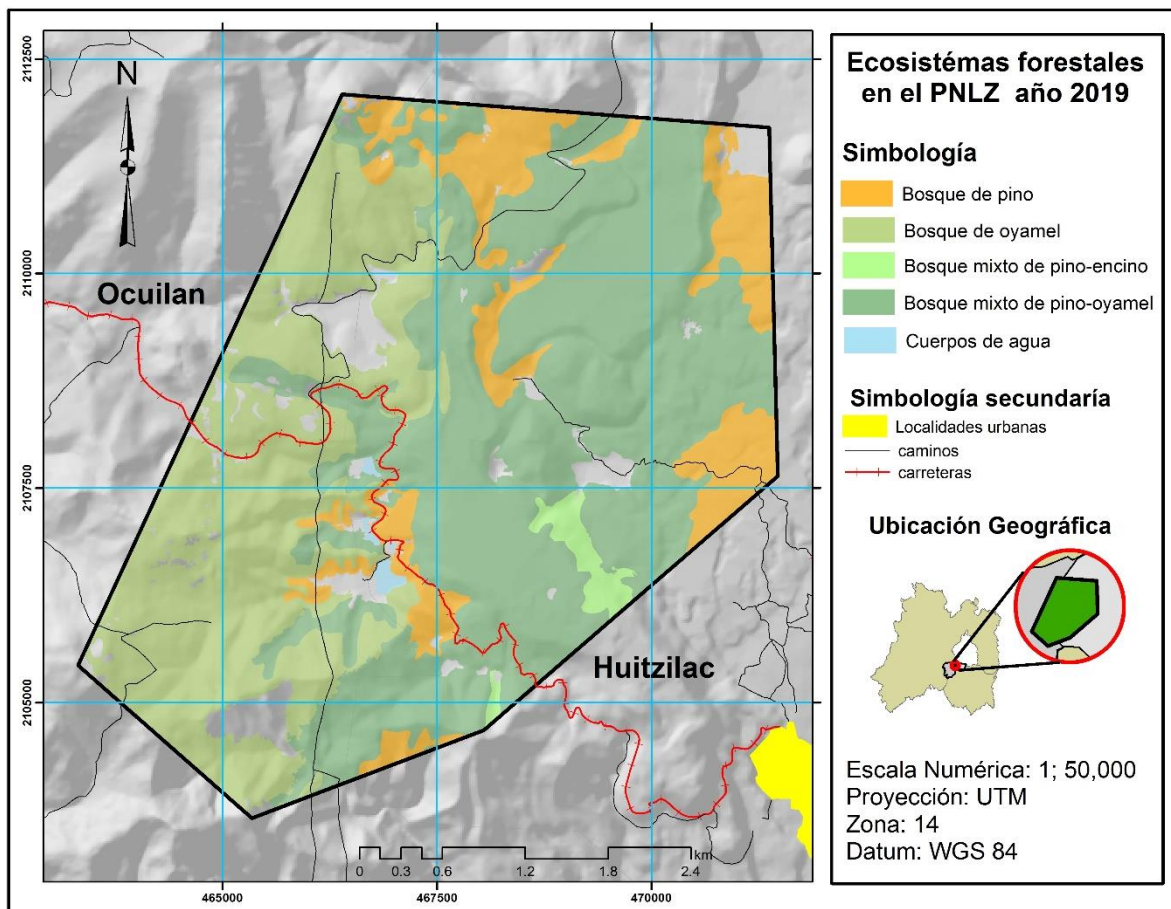
**Fuente:** elaboración propia con base en Avendaño (2009), Franco (2007), y Jiménez (2013).

El segundo ecosistema en tener el mayor porcentaje de almacenamiento de carbono es el ecosistema del bosque de oyamel ya que cuenta con una superficie de 1,385 hectáreas capaz de almacenar 64402.5 toneladas de carbono (31.48%) se encuentran distribuidas principalmente en la zona sureste del parque (mapa 13).



El tercer ecosistema forestal es el bosque de pino ya que cuenta con una superficie de 586 hectáreas, las cuales se traducen en 29481.66 de toneladas de carbono almacenado (14.41%) distribuidas principalmente en la zona norte, por su parte el ecosistema bosque mixto de pino-encino el cual cuenta con una superficie de 68 hectáreas esto se traduce en 3262.64 de toneladas de carbono (1.59%) que se encuentran distribuidas en la zona suroeste del ANP.

**Mapa 13. Ecosistemas forestales en el PNLZ para el año 2019.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

### 3.6 Análisis de cambios en la captura de carbono de los ecosistemas forestales en el PNLZ

El servicio ecosistémico de soporte captura de carbono en el ANP presentó diversos cambios en el primer periodo de análisis entre los años 1976 a 2010, es decir, una etapa de 35 años, de los cambios positivos más significativos es el aumento de la cobertura forestal de 164 hectáreas equivalentes a 7,675 toneladas de carbono almacenado (tabla 33).

**Tabla 33. Cambios en la captura de carbono en el PNLZ para los años 1976 y 2010.**

Ecosistema	Año 1976		Año 2010		Captura de carbono 1976-2010 (ton)
	Captura de carbono (ton)	(%)	Captura de carbono (ton)	(%)	
Bosque mixto de pino-oyamel	103,555	52.13	107,709	52.20	+4,154
Bosque de oyamel	60,450	30.43	65,426	31.71	+4,976
Bosque de pino	31,243	15.73	29,884	14.48	-1,359
Bosque mixto de pino-encino	3,407	1.72	3,311	1.60	-96
Total	198,655	100	206,330	100	7,675

**Fuente:** elaboración propia, (2020).

El incremento del área forestal se encuentra distribuido en 86 hectáreas de superficie en el ecosistema forestal del bosque mixto de pino-oyamel lo que representa 4,154 toneladas más de carbono almacenado en comparación del año 1976.

El segundo ecosistema en tener cambios positivos es el bosque de oyamel dado que tuvo un crecimiento de 107 hectáreas en su superficie en 35 años, lo que representa 4,976 de toneladas de carbono almacenadas, en particular este crecimiento se desarrolló en la zona norte del área de estudio, en esta región existen pendientes de 30° a 45° en consecuencia son áreas de difícil acceso para actividades forestales ilegales como la tala.

Así mismo, se presentaron cambios negativos en los ecosistemas forestales bosque de pino al perder 27 hectáreas equivalente a 1,359 toneladas y bosque de pino encino que perdió 2 hectáreas es decir disminuyó 96 toneladas de carbono entre el año 1976 y 2010.

La disminución de la superficie de estos dos ecosistemas forestales se debe a múltiples factores, por ejemplo, que ambos se desarrollan al este del ANP en ambientes morfológicos de altiplanicies favorables para accesos viales como la carretera federal Ocuilan-Morelos además de senderos y caminos de terracería que son accesibles para actividades antrópicas como la tala ilegal. También en los límites de esta zona se encuentran las localidades de San Juan Atzingo, Santa Lucía, Acahualzingo, Capulín, El, Colonia Doctor Gustavo Baz, Coyoltepec, Lomas de Teocaltzingo, Ocuilan de Arteaga, Santa Martha, Tlaltizapan que ejercen presión a los recursos naturales que se encuentran en la región.

En resumen, existen cambios negativos (pérdidas) en los ecosistemas forestales bosque de pino y bosque mixto de pino-encino en consecuencia de lo mencionado previamente sin embargo, el área forestal en general presentó un aumento en su superficie de 164 ha entre los años 1976 y 2010.

La preservación e incremento de la superficie de los ecosistemas forestales se debe a diversas acciones tales como la activación de normas y leyes en pro del resguardo de las Áreas Naturales Protegidas como el Código para la Biodiversidad del Estado de México en el año 2005 que tiene por objetivo impulsar y promover la conservación, la preservación, la rehabilitación, la remediación, el mejoramiento y el mantenimiento de los ecosistemas, la recuperación y restauración del equilibrio ecológico (SEMARNA, 2006).

De igual forma existen actividades culturales como la Fiesta de la Identidad y el XX Festival del Agua, con la participación de la Facultad de Estudios Sociales de Temixco (FEST) de la UAEM y habitantes de San Juan Atzingo y Ocuilan con el fin de generar conciencia respecto del cuidado del medio ambiente (Plan Estatal de Desarrollo, 2016-2020).

La segunda etapa de análisis corresponde a los años 2010 y 2019 un lapso de menor tiempo en la que el servicio ecosistémico captura de carbono a diferencia de la etapa anterior mostró únicamente cambios negativos ya que todos los ecosistemas forestales presentaron disminución en su superficie; en total redujo su área forestal 37 ha equivalentes a 1764 toneladas de carbono almacenadas menos que el año 2010 (tabla 34).

**Tabla 34. Cambios en la captura de carbono en el PNLZ para los años 2010 y 2019**

Ecosistema	Año 2010		Año 2019		Captura de carbono 2010-2019 (ton)
	Captura de carbono (ton)	(%)	Captura de carbono (ton)	(%)	
Bosque mixto de pino-oyamel	107,709	52.20	107,419	52.51	-290
Bosque de oyamel	65,426	31.71	64,403	31.48	-1,024
Bosque de pino	29,884	14.48	29,482	14.41	-402
Bosque mixto de pino-encino	3,311	1.60	3,263	1.60	-48
Total	206,330	100	204,567	100	-1764

**Fuente:** elaboración propia, (2020).

El ecosistema bosque de pino oyamel a pesar de ser el de mayor superficie perdió 6 hectáreas equivalente a 290 toneladas de carbono mientras que el bosque de oyamel disminuyó 22 ha lo que se traduce en 1,024 toneladas de carbono almacenadas.

El ecosistema del oyamel es la de mayor afectación por procesos originados por la actividad de la tala ilegal, el oyamel tiene una importancia ambiental fundamental en la región, al ser un tipo de bosque que retiene suelo y absorbe un volumen considerable de humedad.

La disminución en la superficie de estos ecosistemas forestales radica en el alto valor comercial de su madera, la cual es utilizada para leña, aserrío, construcciones rurales y urbanas, en algunos lugares las ramas sirven de ornato en ceremonias religiosas y los individuos jóvenes son usados como árboles de navidad.

Además de múltiples factores tales como la mala planificación de actividades turísticas ejemplo de ello es la región centro, concentra la mayor parte de actividades eco turísticas en efecto la fragmentación más notoria se identifica en esta zona otro factor determinante es el crecimiento de la superficie de pastizales espacios destinados para actividades ganaderas.

El ecosistema bosque de pino redujo 8 hectáreas superficie equivalente a 402 toneladas de carbono menos para este último año por su parte el bosque de pino encino redujo su superficie una hectárea equivalente a 48 toneladas.

Los ecosistemas forestales para esta etapa sufrieron transformaciones negativas a causa de los factores sociales y económicos ya mencionados pero la carencia de recursos humanos capacitados e insuficiencia de las instituciones ambientales es fundamental en el aumento de esta problemática.

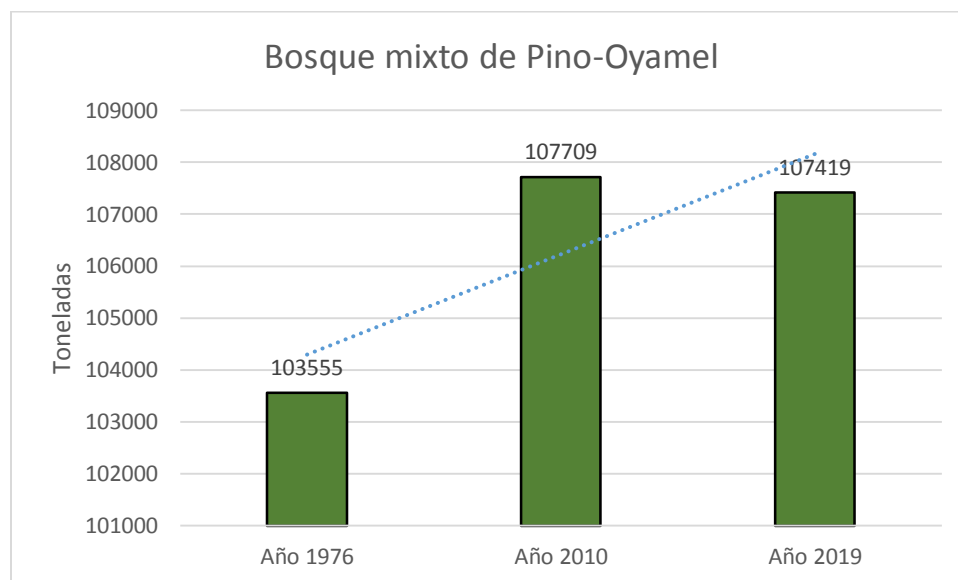
En particular la falta de coordinación entre instituciones ambientales y de seguridad pública municipal, estatal y federal ha ocasionado que la tala clandestina se incremente considerablemente al grado de rebasar la capacidad de actuación de estas instituciones. Por otra parte, la activación de diversos programas gubernamentales en pro de la recuperación y restauración del parque como el Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible implementado por la CONANP en 2013 no tuvieron los resultados esperados (Sahagún y Reyes, 2018).

### 3.6.1 Dinámica general de cambios en los ecosistemas forestales en el PNLZ entre los años 1976, 2010 y 2019

El comportamiento general del bosque mixto pino-oyamel tiene una tendencia de crecimiento, en el año 2010 fue donde presentó el mayor incremento en su superficie 86 ha, así como en el porcentaje de la captura de carbono almacenado 4,154 ton. Por otra parte, para el año 2019 decreció su superficie 6 ha equivalentes a 290 ton de carbono (Gráfica 3).

La tendencia es que, el bosque mixto de pino-oyamel tuvo un aumento de 80 hectáreas, la línea de tendencia muestra un incremento en el periodo de estudio.

**Gráfica 3. Captura de carbono del bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ**

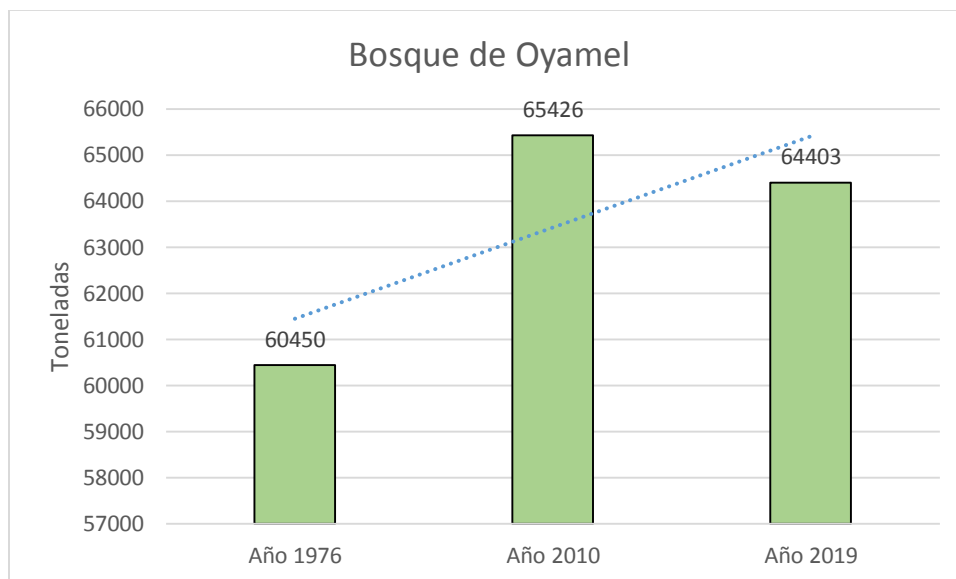


**Fuente:** elaboración propia, (2020).

Por su parte el bosque de oyamel presenta un comportamiento similar al del bosque mixto de pino-oyamel en cuanto al incremento en la primera etapa (1976-2010) mientras que para la segunda etapa (2010-2019) fue en decremento (gráfica 4).

Del año 1976 al 2010 mostro un aumento de 107 ha lo que se traduce en 4,976 toneladas más de carbono almacenado para este último año; para la segunda etapa disminuyo su superficie 22 ha es decir redujo su captura de carbono con 1,023 toneladas menos en conclusión, el bosque de oyamel aumento su superficie 85 ha la línea de tendencia muestra un aumento en el periodo de estudio.

**Grafica 4. Captura de carbono del bosque de oyamel en el PNLZ**

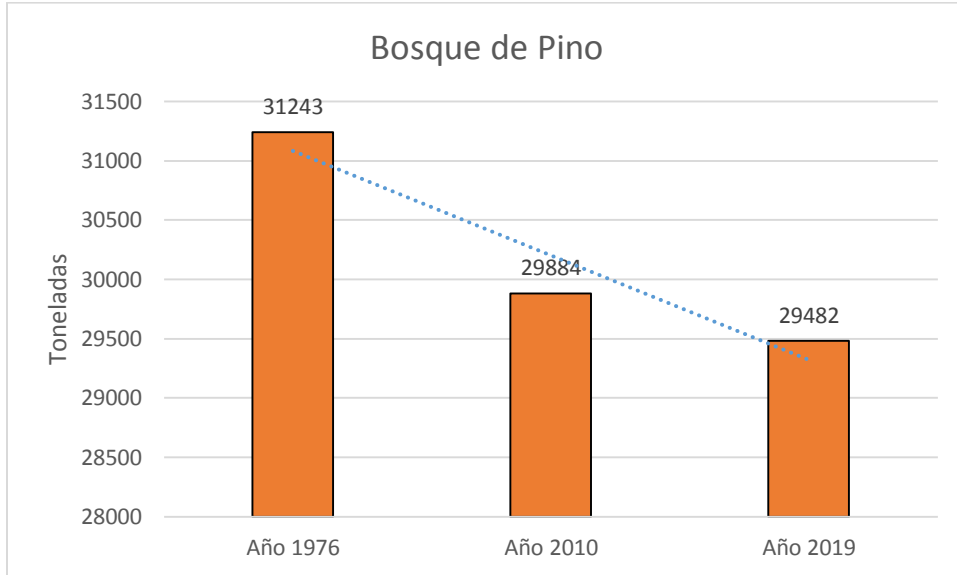


**Fuente:** elaboración propia, (2020).

El bosque de pino en general tuvo cambios negativos ya que en la primera etapa perdió 27 hectáreas lo que se traduce a 1,359 toneladas de carbono capturado menos que el año 1976, para la segunda etapa de análisis mantuvo la tendencia en decremento con 8 hectáreas menos equivalentes a 402 toneladas de carbono menos (grafica 5).

En general en los años de análisis perdió un total de 35 hectáreas equivalentes a 1,761 toneladas de carbono capturado. La línea de tendencia muestra un decremento en la etapa de estudio para este ecosistema forestal.

**Grafica 5. Captura de carbono del bosque de pino en el PNLZ**



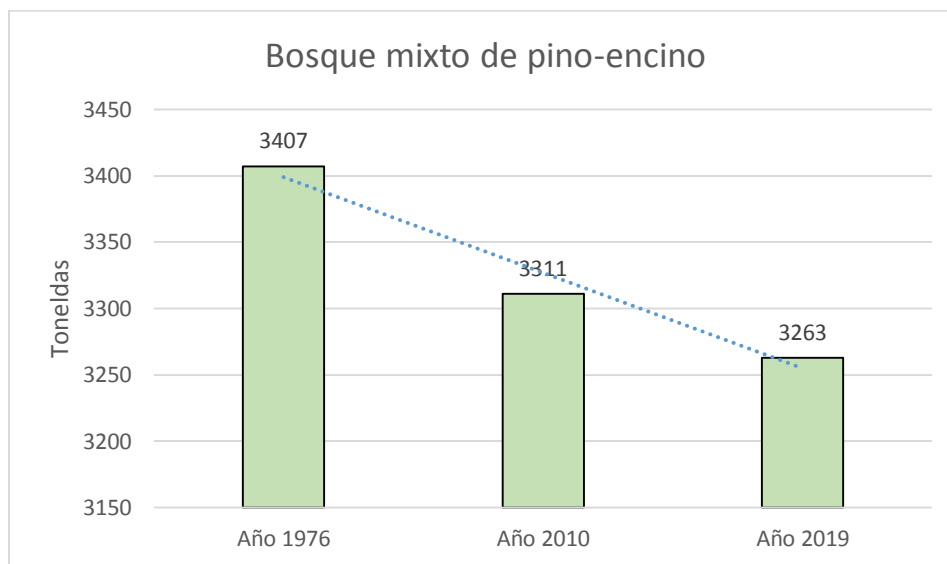
**Fuente:** elaboración propia, (2020).

Por otra parte, el bosque mixto de pino-encino tuvo cambios negativos que se reflejan en una reducción de superficie de 2 hectáreas en la primera etapa, 96 toneladas de carbono menos, mientras que para la segunda etapa redujo una hectárea equivalente a 48 toneladas de carbono capturado.

En general perdió un total de 3 hectáreas equivalentes a 144 toneladas menos que el año inicial de análisis, la línea de tendencia muestra un decremento en la captura de carbono para este ecosistema forestal.



**Grafica 6. Captura de carbono del bosque mixto de pino-encino en el PNLZ**



**Fuente:** elaboración propia, (2020).

En conclusión, el comportamiento del área forestal de forma general mostro una disminución parcial en los ecosistemas forestales entre los años 2010 y 2019 sin embargo analizando a los ecosistemas forestales como un área homogénea presentan un aumento significativo de 127 hectáreas en la cobertura forestal de manera general lo que se traduce en un incremento de 5,912 toneladas de carbono capturado más que el año inicial (tabla 35).

**Tabla 35. Cambio total de los ecosistemas forestales en el PNLZ**

Ecosistema	Año 1976		Año 2010		Año 2019		Cambio total	
	(ha)	(ton)	(ha)	(ton)	(ha)	(ton)	(ha)	(ton)
Bosque mixto de pino-oyamel	2,144	103,062	2,230	107,709	2,224	107,419	80	3,864
Bosque de oyamel	1,300	61,555	1,407	65,426	1,385	64,403	85	3,952
Bosque de pino	621	30,304	594	29,884	586	29,482	-35	-1,760
Bosque mixto de pino-encino	71	3,341	69	3,311	68	3,263	-3	-144
Total	4,136	198,262	4,300	206,330	4,263	204,567	127	5,912

**Fuente:** elaboración propia, (2020).

### **3.6.2 Validación “in situ” de las principales características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales en el PNLZ**




En campo se verificaron las principales características ambientales y morfológicas como la altura, diámetro y clima de árboles de los ecosistemas forestales presentes ANP, el objetivo fue comparar las características y condiciones existentes en el parque con las mencionadas por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013) para la generación de índices de captura de carbono.

Para calcular el índice de captura de carbono en el ecosistema forestal bosque de pino, Díaz (2007, menciona que el diámetro debe ser equitativamente, dentro del rango de 6.7 a 64.1 cm, por otra parte, Avendaño (2009) para calcular la captura de carbono para el ecosistema forestal bosque de oyamel dice que el diámetro de los árboles muestreados deben entrar en un rango de entre 5.7 a 79 cm, con alturas entre 6.8 y 45.5 m, mientras que para el bosque de encino, Jiménez (2013) señala que el diámetro para este tipo de ecosistema en los árboles muestreados debe corresponder a un rango de entre 5 a 40 cm.

En campo se analizó y registró un grupo de 12 árboles elegidos aleatoriamente, de los cuales 4 corresponden a bosque de oyamel, 4 a bosque de pino y 4 al bosque de encino. De los árboles muestreados en el bosque de oyamel se identificó que el de mayor diámetro registrado fue de 78 cm y la altura corresponde a 20 metros, por su parte el de menor diámetro registro 55 cm y la menor altura fue de 11 metros.

Para el bosque de pino el árbol de mayor diámetro registrado fue de 67 cm y la altura de 29 metros, por su parte, el árbol de menor diámetro fue de 58 cm y 12 metros de altura, finalmente los árboles analizados en el bosque de encino el de mayor diámetro que se registro fue de 68 cm y de altura se registró 15 metros en contraparte el diámetro menor fue de 36 cm y 8 metros de altura. En general las características de los árboles analizados y validados en campo cumplen con las condiciones y características mencionadas por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013) para los índices de captura de carbono (tabla 36).

**Tabla 36. Características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

Tipo de ecosistema: Bosque de pino	Características	PNLZ	Díaz et al., (2007).
	Grosor promedio de los árboles	60 a 67 cm.	6.7 a 64.1 cm
	Altura de los árboles	23 a 29 metros	-----
	Clima	Templado sub húmedo	Templado
	Precipitación	1,550.6 mm anuales	599 a 1,000 mm
	Temperatura	12 °C a 22 °C	19 °C a 24 °C
	Altitud	2,720 a 3,700 msnm	2,875 msnm
	Pendiente	20° a 45°	-----
Tipo de ecosistema: Bosque de oyamel	Características	PNLZ	Avendaño et al., (2009).
	Grosor promedio de los árboles	61 a 68 cm.	5.7 a 69 cm
	Altura de los árboles	11 a 20 metros	6.8 a 45 m
	Clima	Templado sub húmedo	Templado
	Precipitación	1,550.6 mm anuales	700 a 1,000mm
	Temperatura	12 °C a 22 °C	18 °C a 24 °C
	Altitud	2,720 a 3,700 msnm	2,820 msnm
	Pendiente	20° a 45°	-----
Tipo de ecosistema: Bosque de encino	Características	PNLZ	Jiménez et al., (2013).
	Grosor promedio de los árboles	36 a 41 cm.	5 a 40 cm.
	Altura de los árboles	8 a 15 metros	
	Clima	Templado sub húmedo	Templado subhúmedo
	Precipitación	1,550.6 mm anuales	639 mm
	Temperatura	12 °C a 22 °C	13.9 °C
	Altitud	2,720 a 3,700 msnm	1,600 msnm
	Pendiente	20° a 45°	

Fuente: elaboración propia, 2020.

### ***3.6.3 Beneficios socioeconómicos y ambientales de los ecosistemas forestales en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala***

El Pago por Servicios Ambientales es un instrumento financiero que se debe tener muy presente para la recaudación de fondos. En México, este programa es un esfuerzo de la Comisión Nacional Forestal y diversos socios importantes como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, tiene como finalidad reducir la tasa de deforestación en el país, a través del reconocimiento del valor de los servicios ambientales que proporcionan los ecosistemas forestales, agroforestales y recursos naturales. Este programa apoya a comunidades, ejidos, asociaciones regionales de silvicultores y a propietarios de terrenos forestales. Actualmente los conceptos de apoyo se agrupan en cinco categorías (CONANP, 2010).

En trabajo de campo se realizó una encuesta aplicada a los guardabosques de la CONANP se identificó que actualmente existe pago por servicio a los ejidatarios por el cuidado del bosque que asila entre 300 y 400 pesos por hectárea de bosque.

#### **Forestación**

Actualmente el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, cuenta con un presupuesto anual por parte de la federación, designado por el apoyo del Poder Legislativo y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP); a este presupuesto se le suma recursos proveniente del Fondo para Áreas Naturales Protegidas (FANP), quien a su vez recibe aportaciones del Fondo para el Medio Ambiente (Global Environment Facility GEF) y del Banco Mundial a través del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN). Tal presupuesto que recibe nuestra área de estudio, es destinado para el pago de la planilla básica del personal técnico-administrativo y al gasto social a través del Programa de Empleo Temporal (PET) y Programa para la Conservación y Desarrollo Sustentable (PROCOCODES).

## **Biodiversidad**

Los pagos por la biodiversidad los usan los productores ambientalmente amigables como vehículos de pago, en lugar de pagos directos por área conservada. En estos esquemas basados en productos, los consumidores pagan un “Premium verde”, o un valor por encima del precio del mercado, como reconocimientos a esquemas productivos que hayan sido certificados como ambientalmente amigables y respetuosos de la biodiversidad (Wunder, 2007).

## **Captura de carbono**

El Pago por Servicios Ambientales (PSA), tales como los mercados de carbono, tienen el potencial de generar nuevas fuentes de recursos para la conservación de biodiversidad y mejorar los medios de sustento de las comunidades locales. La Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD) es un tipo de Pago por Servicios Ambientales en el cual el país, estado y/o comunidad recibe recursos financieros para disminuir la deforestación, conservando los bosques y manteniendo el carbono estocado en los árboles evitando así que él sea lanzado para la atmósfera (Trends, 2010).

### **3.7 Análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de soporte retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**

El análisis espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de soporte retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala se realizó mediante la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (RUSLE) para los años 1976, 2010 y 2019 con el objetivo de identificar las zonas con los rangos más altos de erosión del suelo y los factores que intervienen en este proceso.

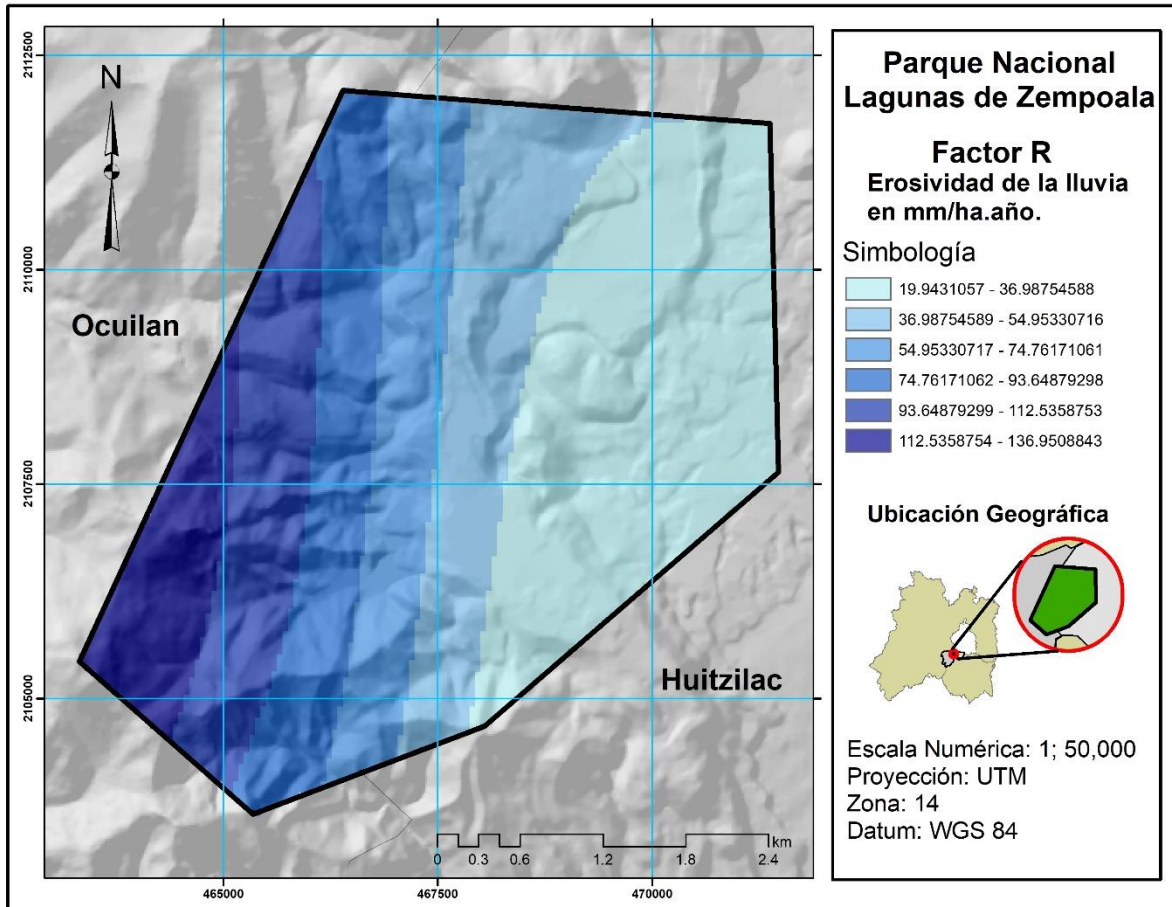
Además, se analizaron los diferentes factores que componen la RUSLE para identificar cuál de los factores tiene mayor influencia en la erosión del suelo y ubicar los sitios donde existen los rangos más altos.

#### ***3.7.1 Factor (R) Erosividad de la lluvia para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ***

Los resultados obtenidos del Factor R (Erosividad de la lluvia), para el año 1976 se muestran en el mapa 14, en la zona sur se presentaron los sitios con los niveles más altos de erosividad efecto de ser una zona donde existen pendientes que varean de 45° a 90°, grados de inclinación que forman escarpes. Además, se observa fragmentación en la cobertura forestal, condiciones que intervienen directamente en la retención del suelo.

En la zona este del parque se presentó los menores niveles de precipitación pluvial determinado por la presencia de altiplanicies con pendientes ligeras.

**Mapa 14. Factor (R) Erosividad de la lluvia en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976. (mm/ha.año)**



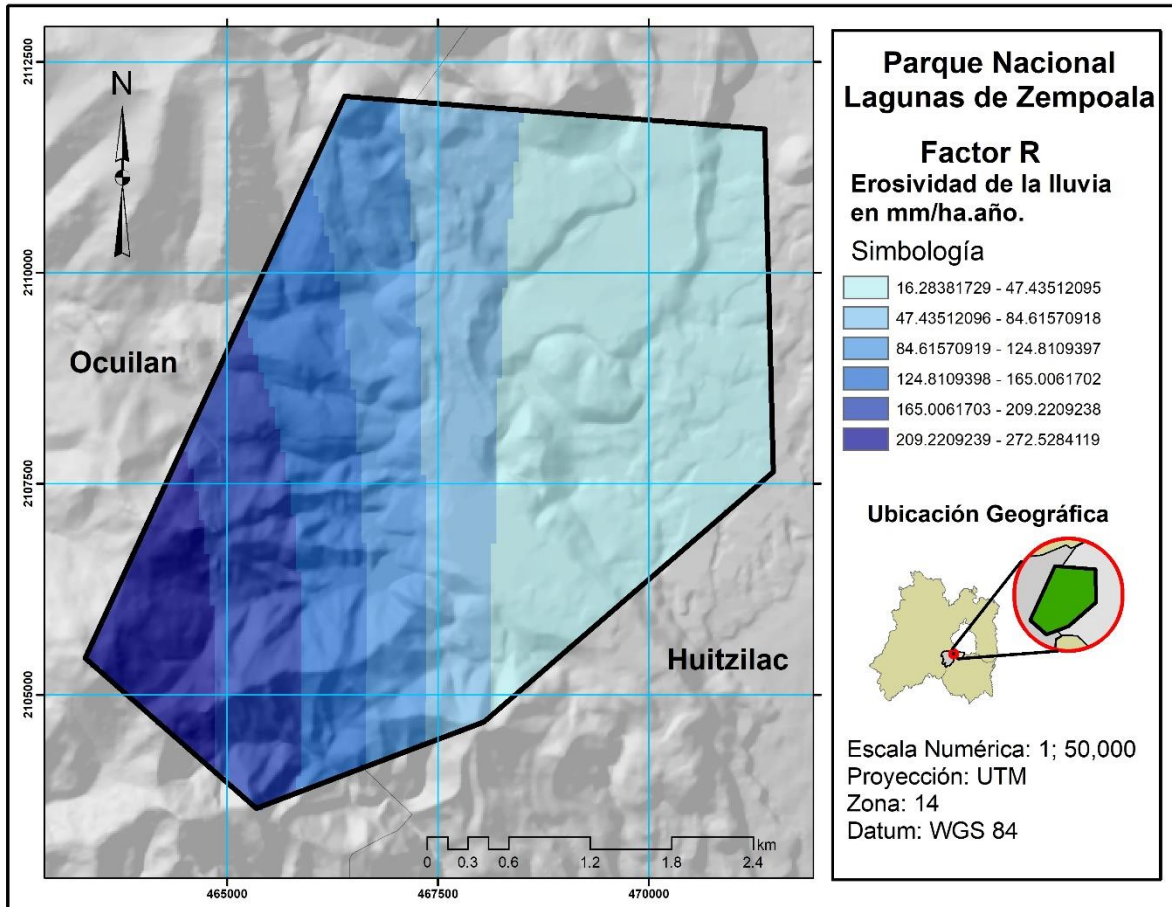
**Fuente:** elaboración propia, 2020.

Para el año 2010 los resultados del Factor R presentaron un aumento en la erosividad de la lluvia en comparación al año 1976, en la zona suroeste del parque se mantuvieron los sitios con los valores más altos, en esta región existen pendientes pronunciadas y laderas ligeramente escarpadas aspectos que influyeron en el aumento de la precipitación pluvial (mapa 15).

Por lo contrario, en la zona centro y norte del parque los valores del Factor R se presentan los valores bajos donde existen pendientes ligeras de 3° a 6°, dentro de su geomorfología se observan altiplanicies y pies de monte bajos; con una cobertura forestal densa que favorece en la retención del suelo.



**Mapa 15. Factor (R) Erosividad de la lluvia en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010. (mm/ha.año)**



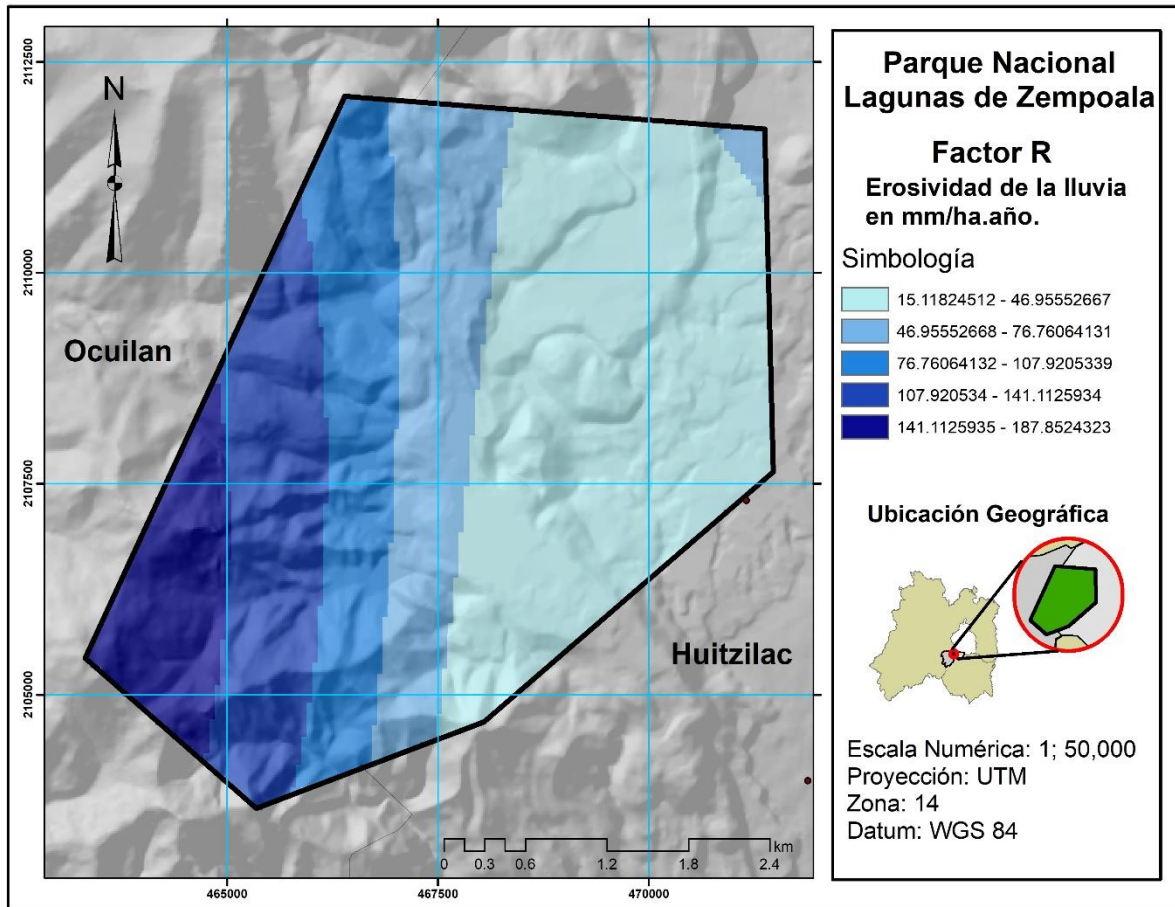
**Fuente:** elaboración propia, (2020).

Finalmente, para el año 2019 los resultados del Factor R se comportaron de manera similar a los años anteriores, en la zona sur la precipitación pluvial resultó ser más erosiva, los factores que intervienen son la fragmentación de los ecosistemas forestales y el avance de la vegetación secundaria (matorral inerme y pastizales) además de que existen rasgos geomorfológicos notorios por la presencia de pendientes pronunciadas que limitan el desarrollo de vegetación (mapa 16).

Las zonas norte y este prestaron valores bajos de erosividad de lluvia. Existen pendientes con grados de inclinación ligeras que forman altiplanicies, por otra parte, no se presentan cambios significativos en la pérdida de la cobertura forestal lo que contribuye a la protección del suelo.



**Mapa 16. Factor (R) Erosividad de la lluvia en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019. (mm/ha.año)**



**Fuente:** elaboración propia, 2020.

En conclusión los valores para el Factor R tienen un comportamiento similar en los tres años de estudio, los valores más altos se encuentran en la zona sur donde las pendientes se aprecian fácilmente debido a los rasgos geomorfológicos, por otra parte en la zona norte se encuentran los valores más bajos ya que es una zona de altiplanicie donde la erosividad de la lluvia tiende a ser menor por la estrecha capa de cobertura forestal que actúa como barrera, por último el año 1976 se encuentran los valores más bajos en este factor y por el contrario los valores más altos se presentaron en el año 2010.

### **3.7.2 Factor (K) Erosionabilidad del suelo para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ**

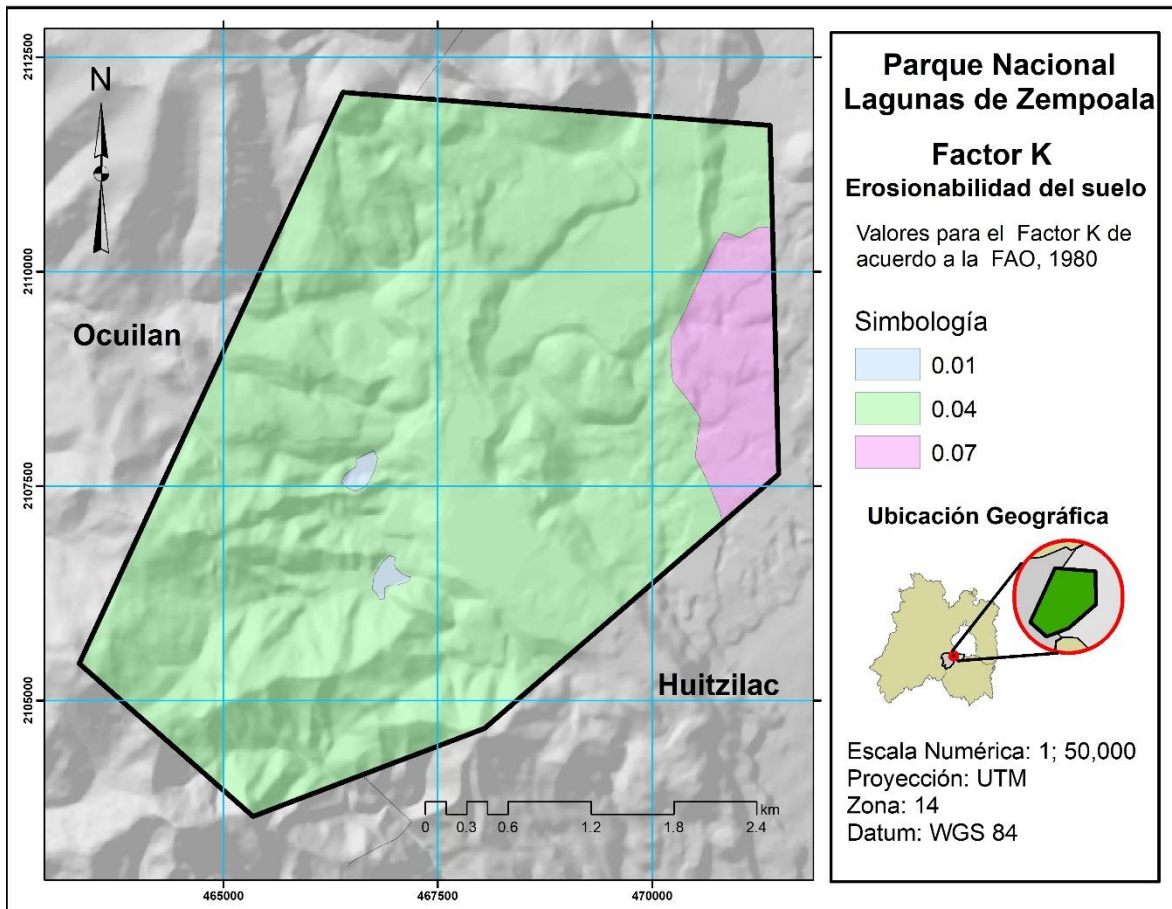
Los resultados obtenidos del Factor K (Erosionabilidad del suelo) se retomaron para los tres años porque los valores permanecieron sin cambios significativos, además que no se encuentran actualizados para años posteriores (mapa 17).

Los valores se asignaron de acuerdo a la FAO (1980), quien menciona que los valores más altos corresponden a los suelos con mayor susceptibilidad a sufrir erosión de acuerdo a sus características y los valores más bajos les conciernen a suelos densos de vegetación y materia orgánica.

En el área de estudio se presentan dos tipos de suelo, el Leptosol tiene una superficie aproximada de 4,232.49 ha, le corresponde un valor de 0.079. Este tipo de suelo se ubica en las zonas altas del parque donde las pendientes son de más de 30°, una de sus características es que tiene un grosor delgado (menor a 25 cm) por desarrollarse en sistemas montañosos.

El segundo tipo de suelo es el Andosol con una supervise aproximada de 301.59 ha, le corresponde un valor de 0.040 dentro de sus características es que se desarrolla sobre cenizas y de otros materiales piroclásticos, es rico en materia orgánica y protegido por cubierta vegetal, en el parque se encuentra en las altiplanicies en ambientes de relieves ondulados a montañosos.

**Mapa 17. Factor (K) Erosionabilidad del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala**



Fuente: elaboración propia con base en información de INEGI, 2015.

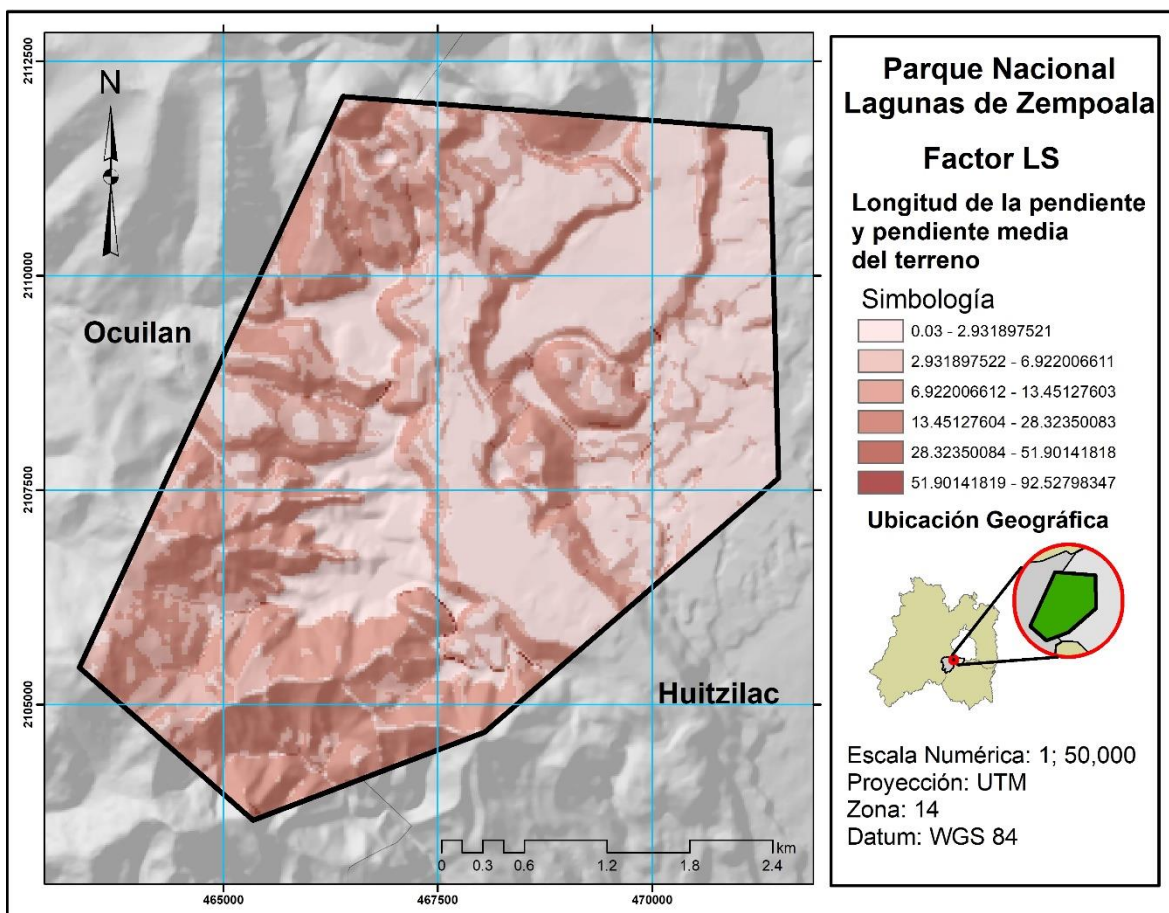
### **3.7.3 Factor (LS) Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ**

Los resultados del Factor L.S (Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno) se utilizaron para los tres años porque los valores no presentaron cambios significativos.

Los valores más bajos se presentan principalmente en los lomeríos y altiplanicies, mientras que en los valles y serranías obtuvieron los valores más altos. En la zona sur del ANP se encuentran las pendientes más pronunciadas de más de 45° el comportamiento para el factor LS, dependió en gran medida de las formas

fisiográficas del parque, es decir los valores más altos se encuentran donde existen las mayores pendientes y donde el relieve es más accidentado (mapa 18).

**Mapa 18. Factor (L.S) Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.**



**Fuente:** elaboración propia con base en información de INEGI, (2015).

### **3.7.4 Factor (C) Cobertura vegetal para los años 1976, 2010 y 2019 en el PNLZ**

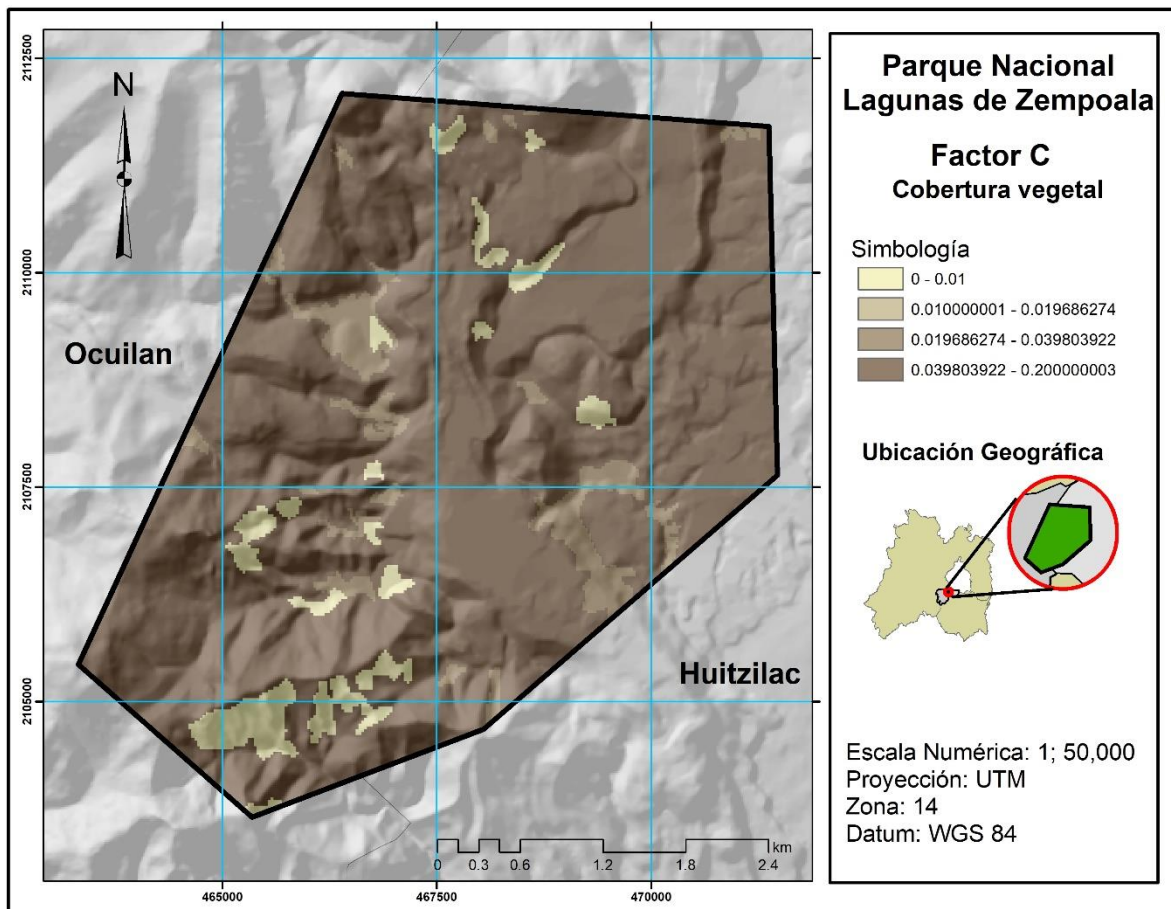
El mapa 19 muestra los resultados para el Factor C (Cobertura vegetal) para el año 1976, los valores asignados a los diferentes tipos de cobertura vegetal se determinaron de acuerdo a Wischmeier y Smith (1978).

Los valores más bajos para el año 1976 corresponden a los cuerpos de agua, pastizales y a la vegetación secundaria (matorral inerme), en el segundo rango se

encuentran los bosques de pino y de encino, los valores más altos le conciernen al bosque mixto de pino-oyamel y pino-encino ya que son las de mayor densidad.

Es importante mencionar que para este año no existían zonas agrícolas por lo que se descartaron los valores para este tipo de uso de suelo.

**Mapa 19. Factor (C) Cobertura vegetal en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976**



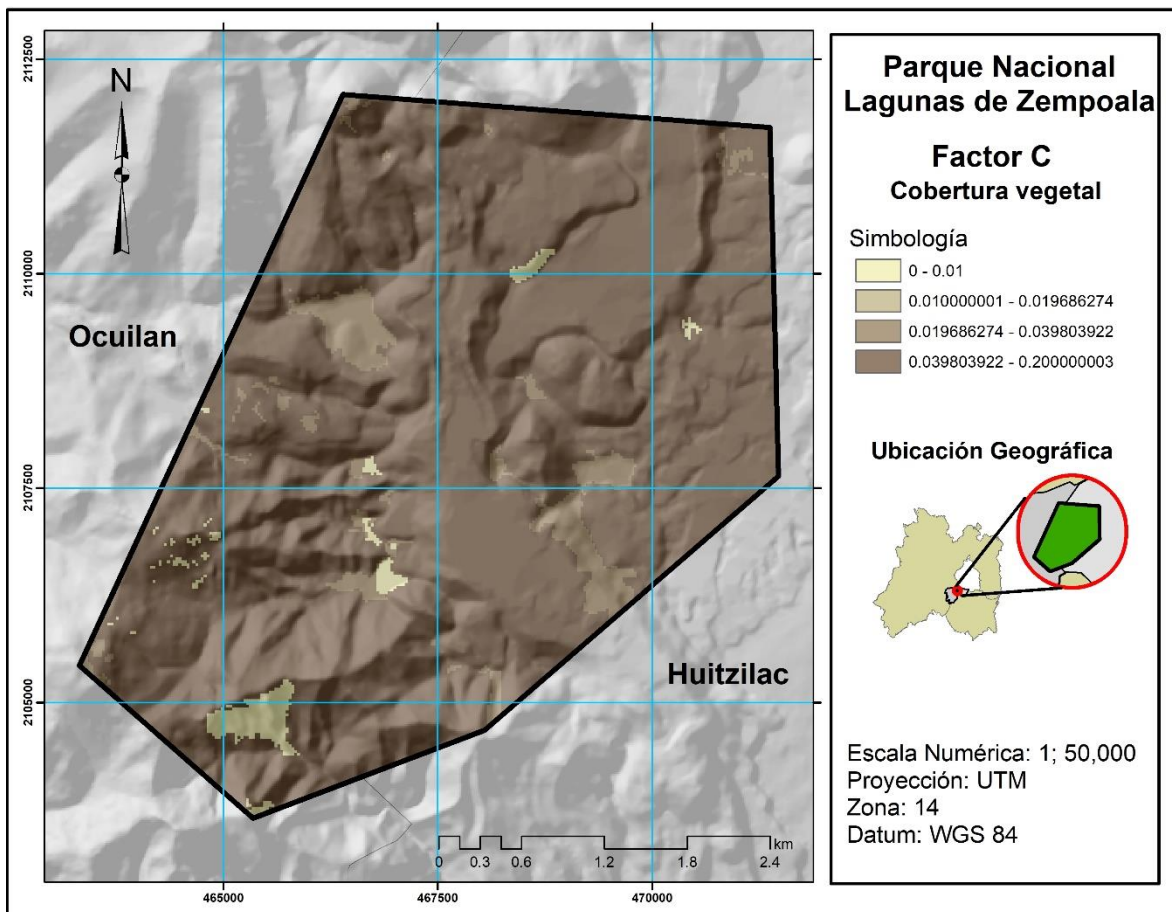
**Fuente:** elaboración propia, 2020.

Para el año 2010 el comportamiento del Factor C se comportó de forma similar los valores bajos coincidieron en los cuerpos de agua, los pastizales y en la vegetación secundaria (matorral inerme), los cambios para este año muestran ligeramente en el aumento de los pastizales y vegetación secundaria en la zona centro y sur del ANP.



Los valores más altos siguen correspondiendo a los bosques de oyamel, de pino oyamel, de pino y de pino encino ya que estos ecosistemas protegen mejor al suelo por su densidad vegetal, se distribuyen en la zona oeste, centro y norte del parque (mapa 20).

**Mapa 20. Factor (C) Cobertura vegetal en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010.**

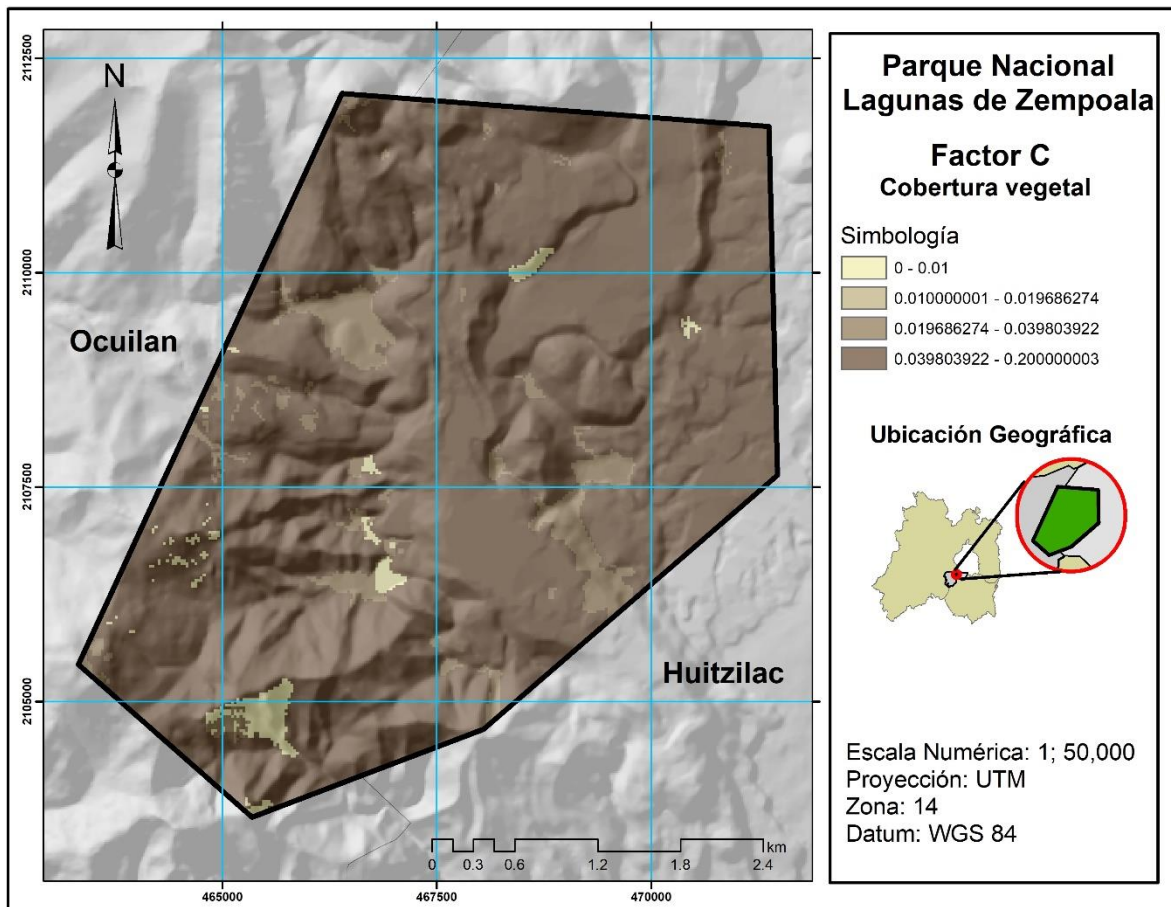


**Fuente:** elaboración propia, 2020.

En último lugar, para el año 2019 los resultados obtenidos para el Factor C muestran ligeros cambios en comparación con el año 2010, los cambios presentes en los ecosistemas se relacionan con los cambios en los valores correspondientes al valor del Factor C, sin embargo, los valores más altos siguen correspondiendo al bosque de oyamel, bosque mixto de pino-oyamel, bosque de pino y bosque mixto de pino-encino, se encuentran distribuidos en la zona oeste, centro y norte (mapa 21).

Mientras que los valores más bajos corresponden a los cuerpos de agua, los pastizales y a la vegetación secundaria (matorral inerme), y se encuentran distribuidos en la zona centro y norte del ANP.

**Mapa 21. Factor (C) Cobertura vegetal en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

En general, para los tres años los resultados del Factor C se mantuvieron estables, sin embargo, muestran ligeros cambios de un año a otro mismos que corresponden a los cambios presentados en los ecosistemas forestales, es decir si existe aumento o disminución en alguna categoría se verá reflejado en los resultados del Factor C.

Por otra parte, los valores más altos para los tres años corresponden a los ecosistemas forestales en efecto de la densidad vegetal, los valores son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial dicho lo anterior el año con los valores más positivos es el año 1976 mientras que el año con los valores más altos es el año 2019.



### **3.8 Retención del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para los años 1976, 2010 y 2019.**

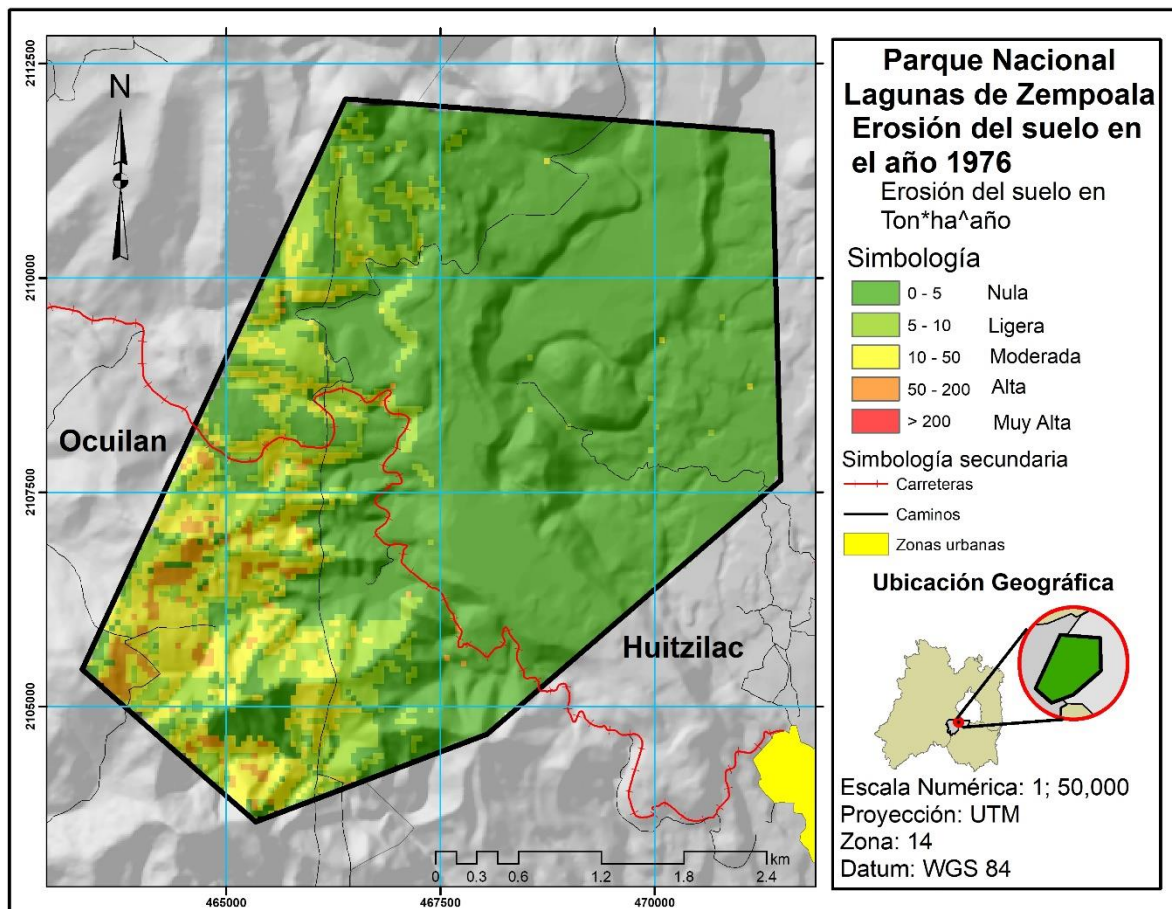
El Servicio Ecosistémico (SE) retención del suelo se calculó en función a los resultados obtenidos mediante la aplicación Universal de la Pérdida del Suelo (RUSLE), es decir las zonas donde existe menor erosión del suelo es donde se presenta la mayor retención del suelo y viceversa donde existe mayor erosión serán las zonas donde menor retención del suelo existe. Los factores que se tomaron en cuenta son erosibilidad de la lluvia, eroabilidad del suelo, la pendiente, la longitud de la pendiente y los usos de suelo (ecosistemas presentes).

El mapa 22 muestra la erosión del suelo que presentó el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976, el primer rango representa la nula existencia de erosión del suelo entre 0 a las 5 toneladas por hectárea, su distribución espacial se localiza en la zona norte y noroeste del parque, los principales factores para que exista nula erosión estas zonas es que existen pendientes ligeras además que la mayor parte del relieve corresponde a altiplanicies y mesetas por otra parte, en esta zona existen menores precipitaciones en efecto existe menos erosibilidad pluvial.

El segundo rango representa la ligera erosión del suelo de entre 5 a las 10 toneladas por hectárea erosionada al año, su distribución espacial se localiza en la zona centro y norte donde los valles fluviales terminan. El tercer rango representa una erosión moderada que va de las 10 a las 50 toneladas por hectárea de erosión al año, son zonas donde los pies de monte intermedios son visibles y las altiplanicies tienen escarpes ligeros.

El cuarto rango representa valores que van de los 50 a las 200 toneladas por hectárea al año su distribución espacial se ubica en zona sur y suroeste del ANP, es una región donde destacan sistemas montañosos con pendientes de más de 45° ambientes donde existen principalmente geoformas como laderas, cordilleras y cierras. El último rango representa valores de más de 200 toneladas de erosión para este año no se presentaron estos valores.

**Mapa 22. Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 1976**



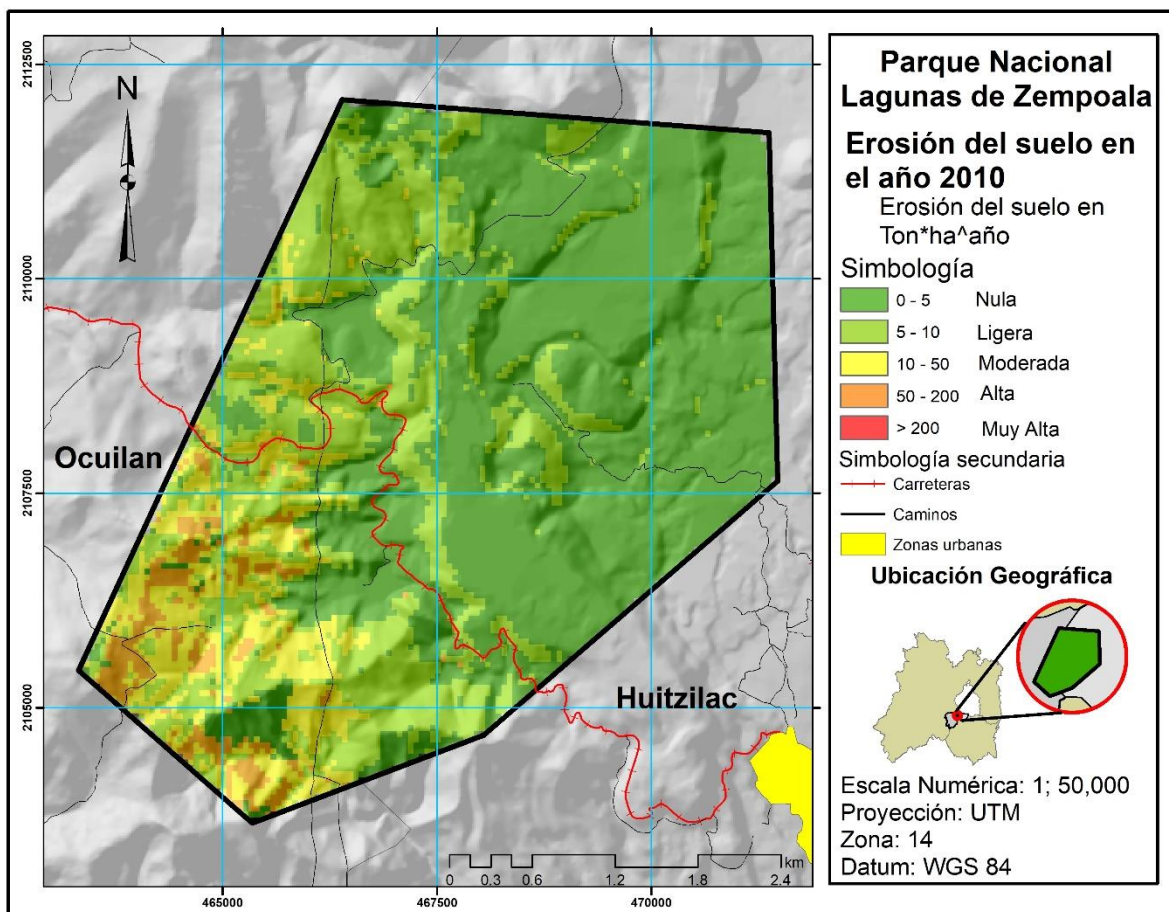
Fuente: elaboración propia, 2020.

Para el año 2010 el SE retención del suelo se comportó con una dinámica similar al año anterior, los valores bajos corresponden a zonas donde las pendientes son ligeras, la cobertura forestal es muy densa además y la precipitación pluvial tiene los valores bajos.

Existe ligera erosión del suelo en las zonas sur y oeste del parque donde los pies de montes y las laderas comienzan a ser pronunciados pendientes de menos de 6°. En el centro de parque se presenta la erosión moderada donde los valles fluviales son visibles por su parte los rangos más altos de erosión del suelo se presentaron en la zona sur del ANP (mapa 23).

En general la erosión del suelo para el año 2010 disminuyó parcialmente en contraste con el año 1976, los factores determinantes en la disminución de erosión del suelo se deben a los valores de la erosividad de la lluvia.

**Mapa 23. Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2010.**



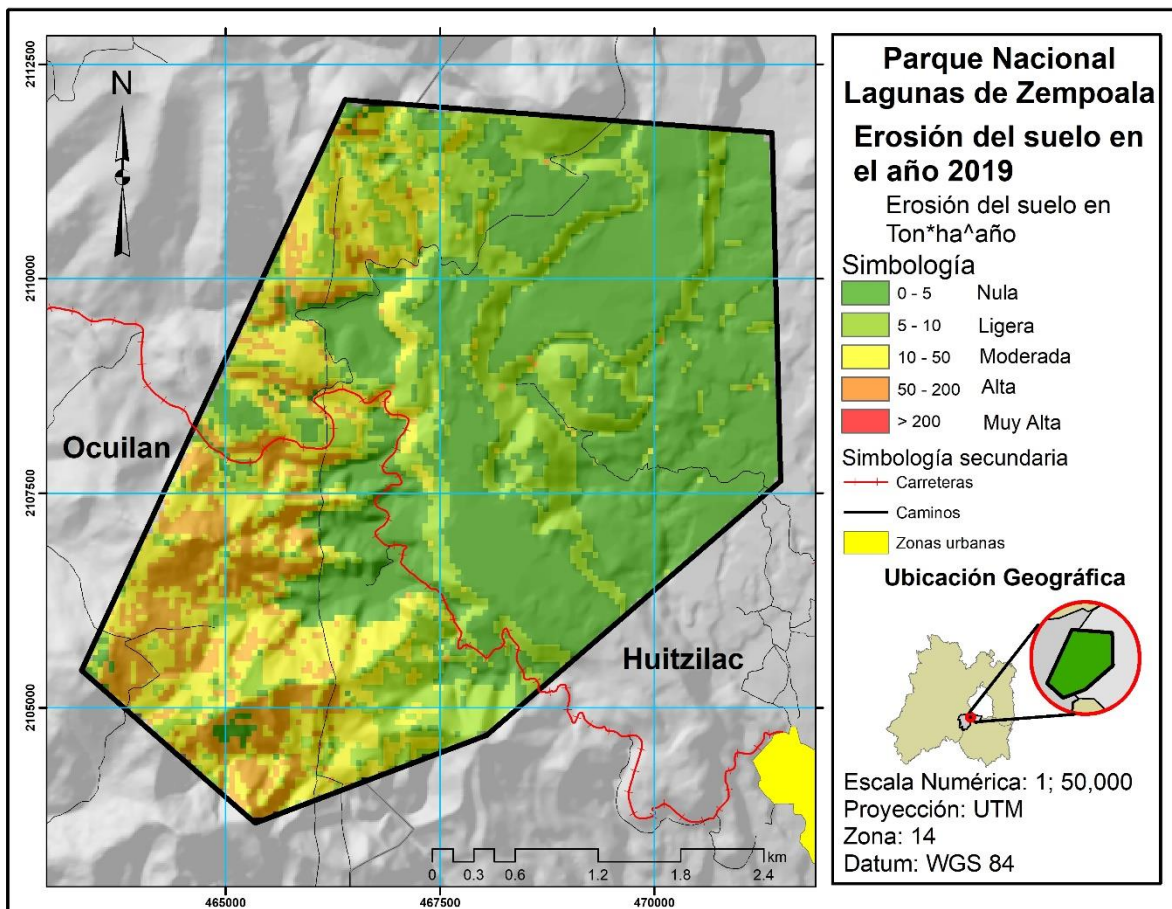
**Fuente:** elaboración propia, 2020.

Para el año 2019 los valores bajos se distribuyen espacialmente en la zona sur y oeste del ANP en laderas ligeramente escarpadas donde las pendientes comienzan a ser pronunciadas y el relieve es menos abrupto. La ligera erosión va de las 5 a las 10 toneladas por hectárea se presenta en la zona oeste del parque son sitios donde se observan colinas de menores pendientes y complejidad montañoso.

La erosión moderada va de las 10 a las 50 toneladas por hectárea se distribuye espacialmente en la zona oeste y sur del ANP, son sitios donde se comienzan a desarrollar pendientes ligeras por la presencia de altiplanicies.

Los valores más altos de erosión siguen manteniéndose en la zona sur, valores que van de las 50 a las 200 toneladas por hectárea de pérdida de suelo, es un área donde se presentan las pendientes con mayor longitud además de ser una zona que muestra fragmentación de cobertura forestal lo que contribuye a un más a que exista un transporte de materiales (mapa 24).

**Mapa 24. Erosión del suelo en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2019.**



Fuente: elaboración propia, 2020.

En general el año 2019 presentó los valores más bajos de retención del suelo puesto que la erosión del suelo mostró un incremento para este año. El Factor R (erosibilidad de la lluvia) fue la variable que tuvo mayor influencia en el resultado, de acuerdo a los datos analizados de las estaciones meteorológicas de los tres años 2019 registra los valores más altos de precipitación además entre 2010 y 2019 han existido múltiples huracanes como el huracán Patricia que tocó tierras mexicanas en 2015, fue de categoría 5, la máxima categoría en la escala de Saffir-Simpson; tan solo en ese año se registraron un total de 35 ciclones tropicales, 4 impactaron las costas del Pacífico mexicano y uno el Golfo de México (CONAGUA, 2019).

Por otra parte, en 2019 se incrementó la superficie de los pastizales y las zonas agrícolas en la zona norte, centro y sur del parque como consecuencia se desarrolló una fragmentación de los ecosistemas forestales lo cual tiene relación ya que son las zonas donde se presentan los valores más altos de erosión del suelo.

El año con los valores más altos de retención del suelo se registraron en 1976, cabe destacar que de acuerdo a SMN, (2019) es el año con los valores de precipitación más bajos y donde la fragmentación de los ecosistemas es menor que la de los años posteriores.

En general para los tres años las zonas sur y suroeste presenta pérdida de suelo superior a las 200 toneladas por hectárea al año, en diversos puntos que se distribuyen espacialmente a lo largo de los sistemas montañosos donde las pendientes son de 45° a 90°, son áreas que presentan degradación de la cobertura vegetal.



### 3.8.1 Validación de la Ecuación Universal del Suelo (RUSLE) en el PNLZ

Se verificó un total de 40 puntos mediante imágenes de satélite de alta resolución de las plataformas de Google Earth y Google Maps con el objetivo de ratificar la presencia de erosión de suelo (tabla 37).

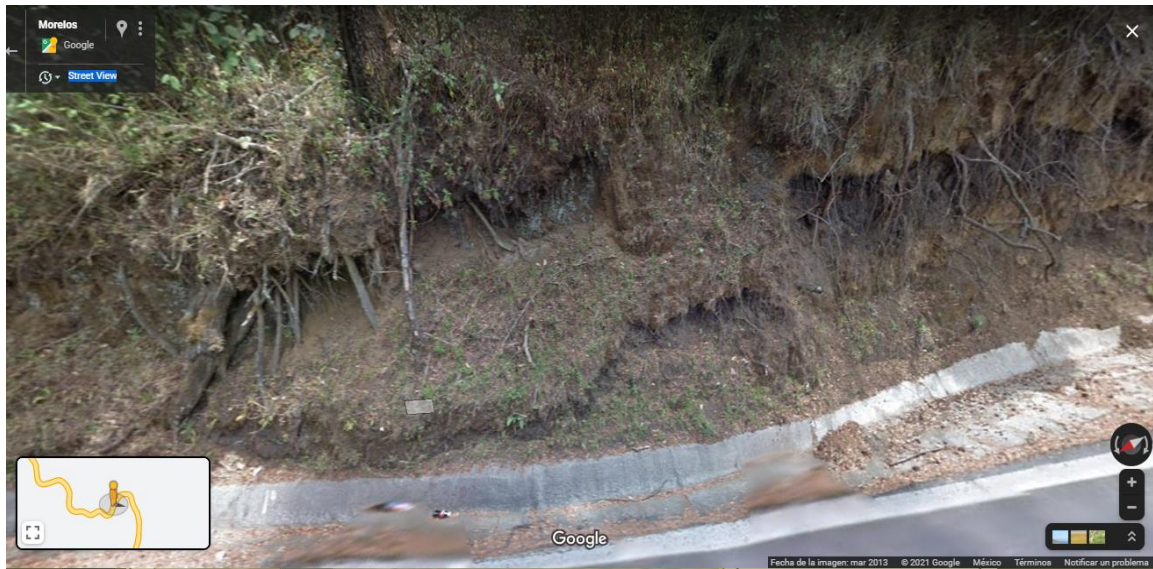
**Tabla 37. Puntos validados de la RUSLE en el PNLZ.**

N°	Coordenada (X)	Coordenada (Y)	N°	Coordenada (X)	Coordenada (Y)
1	464,751	2,108,173	21	468,028	2,110,493
2	464,962	2,107,943	22	467,511	2,110,301
3	465,498	2,107,963	23	466,265	2,110,205
4	466,131	2,108,020	24	466,093	2,107,215
5	466,073	2,108,576	25	466,131	2,106,544
6	466,898	2,108,614	26	466,188	2,105,873
7	467,032	2,107,579	27	466,284	2,105,260
8	466,859	2,106,928	28	466,188	2,104,666
9	467,434	2,106,372	29	466,112	2,104,168
10	467,741	2,105,931	30	464,751	2,105,931
11	468,067	2,105,624	31	464,406	2,105,931
12	468,584	2,105,337	32	463,888	2,105,720
13	471,248	2,107,675	33	463,869	2,105,107
14	470,654	2,107,694	34	464,157	2,105,375
15	470,175	2,107,790	35	466,208	2,105,605
16	469,543	2,107,694	36	466,073	2,107,675
17	469,274	2,108,154	37	468,718	2,110,703
18	468,814	2,108,557	38	466,265	2,110,569
19	469,351	2,111,623	39	465,901	2,109,553
20	469,063	2,111,029	40	466,706	2,109,764

**Fuente:** elaboración propia, 2020.

Los resultados mostraron un total 35 puntos donde se identifica presencia de erosión de suelo, en la zona sur del parque se ubican la mayor parte de puntos que muestran erosión, mientras que en la zona norte se encuentran los puntos que donde no se identificó algún tipo de erosión tiene relación con que es la región donde se presentaron los menores niveles de erosión en los tres años de estudio.

**Fotografía 15. Presencia de erosión de suelo en el PNLZ en el año 2013.**



**Fuente:** Google Maps, 2020.

**Fotografía 16. Presencia de erosión de suelo en el PNLZ**

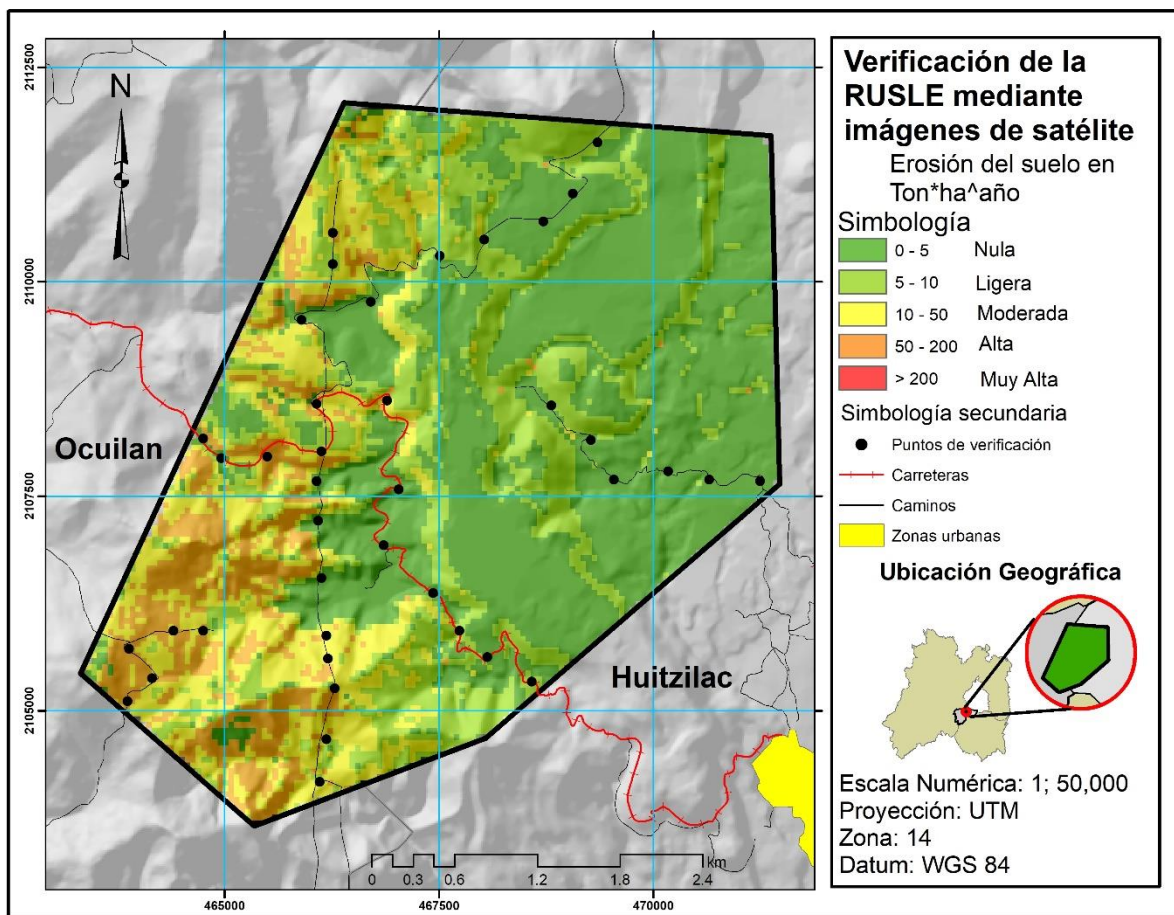


**Fuente:** Google Maps, 2020.

El mapa 25 muestra los 40 puntos establecidos para la verificación de la RUSLE, los puntos de verificación están situados en los alrededores de la carretera federal Ocuilan-Cuernavaca por distintas limitantes, las más significativa es que la herramienta de Google Maps Street View solo permite hacer visualizaciones en las principales carreteras y caminos.

Por su parte los puntos validados mediante imágenes de satélite son sitios donde no existen rutas o senderos seguros para su visita por esta razón se determinó verificarlos de manera digital.

**Mapa 25. Validación de los puntos de la RUSLE en el PNLZ.**



Fuente: elaboración propia, 2020.



### **3.9 Relación de los Servicios ecosistémicos de soporte Captura de carbono y retención del suelo.**

Existe una estrecha relación entre los Servicios Ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo, ambos se encuentran dentro de la clasificación servicios de soporte, brindan o aportan elementos para el funcionamiento de otros servicios; al formar parte de un mismo sistema comparten características y factores con otros servicios, de ser modificadas tendrán repercusiones de manera positiva o negativa en el otro,

El suelo está constituido por propiedades físicas, químicas y biológicas, es fundamental en el desarrollo de vida ya que actúa como un soporte para que exista equilibrio en un ecosistema de mayor escala, los suelos fértiles son la base o el soporte para existan los ecosistemas forestales; de esta manera los bosques dependen directamente de suelos fértiles donde desarrollarse además de otros factores como el clima y elementos físicos como los topográficos.

Los ecosistemas forestales en el proceso natural de fotosíntesis realizan la captura de carbono este proceso permite que exista un equilibrio ambiental en la región. Por otra parte, los bosques brindan materia orgánica para la composición y desarrollo del suelo, a su vez la masa forestal actúa como barrera para frenar o mitigar la erosión pluvial; la cobertura vegetal es primordial en la estructura del suelo ya que entre mayor sea existirá un suelo compacto y no permitirá el arrastre de partículas.

La deforestación es un factor determinante en la erosión de los suelos la pérdida de árboles que retienen al suelo por medio de sus raíces provoca que la erosión se extienda asimismo contribuye en desertificación y la calidad de los mismos; la fragmentación y deterioro de los ecosistemas forestales repercute directamente en las propiedades de los suelos. El suelo por sus propiedades de igual forma es capaz de almacenar carbono contenido en las capas que lo conforman a través del aporte continuo de material orgánico.

De esta manera están asociados la captura y retención del suelo; si no existe suelos fértiles no existirán ecosistemas forestales que permitan el desarrollo de suelos, es importante mencionar que a su vez los ecosistemas forestales dependen del ciclo del agua, pero también brindan elementos para el funcionamiento de otros ciclos naturales como la recarga hídrica o la regulación del clima.

Por otro lado, los resultados alcanzados mediante la aplicación de la metodología expresan que entre los años 1976 y 2019 en el PNLZ se presentó un incremento de 127 ha equivalentes a 6,305 toneladas de captura de carbono, sin embargo para el año 2019 los ecosistemas forestales bosque de pino y bosque mixto de pino-encino presentaron disminución en su superficie; por su parte, los resultados obtenidos en la retención del suelo en los tres años las zonas sur y suroeste presenta pérdida de suelo superior a la a las 200 toneladas por hectárea al año, en 2019 se presentó el mayor incremento de erosión del suelo lo cual tiene relación con la disminución de los ecosistemas forestales ya mencionados en este año.

Resumiendo, los ecosistemas forestales se relacionan directamente con la retención del suelo en el PNZ, si bien existe un incremento del área forestal en general, la disminución de la superficie de los bosques de pino y pino-encino en zonas específicas repercute de manera genere en la retención del suelo. La erosión del suelo se incrementará consecuencia de la deforestación en las zonas afectadas lo que repercutirá en el equilibrio regional del parque, el arrastre de partículas por la erosión permitirá que existan depósitos en las zonas más bajas del ANP lo que generara un desarrollo inadecuado de bosques en estos sitios (Sánchez, 2011)

Es así como el PNLZ se puede entender como un sistema no basta con disminuir o mitigar la deforestación y erosión del suelo solo en algunas zonas ya que de continuar la problemática afectara de manera directa o indirectamente otros sitios o incluso otro servicio.

### **3.10 Discusión general**

De acuerdo con los conceptos teórico-conceptuales fundamentados en la teoría general de sistemas propuesta por Ludwig Von Bertalanffy posibilita establecer y sustentar las relaciones existentes entre los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo, puesto que permite realizar un análisis multidisciplinario desde el punto de vista de múltiples ciencias con el mismo objetivo de dar solución a los problemas ambientales (Leff, 2011).

Los fundamentos teóricos y metodológicos de la TGS, son el medio que permite analizar y comprender las relaciones entre los componentes naturales del territorio y las sociedades que interactúan en el medio ambiente, además de establecer un análisis más detallado de las problemáticas generadas a partir de las relaciones.

Las Ciencias Ambientales comporten características de la TGS ya que Saavedra (2014), menciona que desde distintas perspectivas, buscan, como objetivo de estudio, las relaciones del ser humano consigo mismo y con la naturaleza y la vida, desde un ámbito multidisciplinar y metodología conforme a la ciencia de que se trate.

Las ciencias ambientales se centran en estudiar el objeto de estudio desde diferentes posturas, enfoques, perspectivas y disciplinas, fungen como una herramienta en el análisis de las relaciones hombre-naturaleza, es decir a partir de los principios de las Ciencias Ambientales es posible reconocer los cambios espaciales de los elementos del medio natural y social.

Por otra parte, para comprender la dinámica y los procesos de cambio de los servicios ecosistémicos ya mencionados en el ANP fue necesario establecer la definición y clasificación de los Servicios Ecosistémicos (SE) según la MEA (2005), los define como todos aquellos beneficios que la sociedad obtiene de los ecosistemas; un concepto cada vez más aplicado a la conservación del medio ambiente, el bienestar humano y la implicación de las intervenciones antropogénicas en el medio natural.

Para análisis de los procesos de cambio en el SE captura de carbono en el PNLZ se requirió realizar un análisis de los cambios de cobertura y uso de suelo, son procesos que se puede analizar desde un enfoque geográfico ya que se desarrollan en el territorio además de relacionarse con otros aspectos sociales (García, 2012).

La mayor degradación ambiental se alcanza cuando la magnitud de los daños sobrepasa la capacidad de los mecanismos naturales del ambiente (resistencia y resiliencia, o capacidad de recuperarse después de sufrir daños) para regenerar las estructuras y procesos ecológicos que favorecen la permanencia del potencial natural y de los servicios ambientales asociados a los ecosistemas (Galicia, 2001).

Además de las problemáticas mencionadas la FAO-PNUMA (1980), menciona que la disminución de la cobertura vegetal trae consigo la erosión del suelo pues el arrastre de las partículas de la superficie del suelo por el agua se incrementa ya que no existen las condiciones necesarias para una estructura definida. Aunque sucede sin necesidad de actividades antrópicas, su efecto sí es incrementado por el deterioro de la cobertura vegetal, causada por el hombre.

A partir de lo anterior se puede establecer que ambos servicios ecosistémicos están relacionados y comparten características en su funcionamiento y estructura ya que uno depende del otro, la retención del suelo depende directamente de la densidad de la cobertura forestal para definir una estructura compacta que no permita el arrastre de materiales por otro lado, la captura de carbono depende en gran medida del desarrollo de los ecosistemas forestales a partir de suelos fértiles lo cual permitirá que exista el correcto almacenamiento de carbono en el PNLZ.

Respecto a los procesos metodológicos aplicados para la obtención de la cartografía en la que se fundamenta el análisis de los cambios en los SE captura de carbono y retención del suelo se realizó a partir de múltiples y diversos métodos estandarizados. Para generar la cartografía de los ecosistemas forestales se realizó una clasificación supervisada que permitió establecer los ecosistemas presentes de acuerdo al algoritmo de máxima verosimilitud.

De acuerdo con Toro et al, (2015) el algoritmo automáticamente clasificó toda el área, de acuerdo al tipo de pixel que presenta reflectancia de un color del pixel respecto a los demás. Una vez generada la cartografía fue necesario validar los mapas de los ecosistemas presentes con el fin de obtener el grado de fiabilidad, la fiabilidad de un producto cartográfico permite a los usuarios del mapa valorar su ajuste con la realidad, y así asumir el riesgo de tomar decisiones con base en esta información cartográfica (Mas et al., 2003).

De acuerdo con Mas et al, (2003) el porcentaje mínimo permitido para la validación cartográfica que corresponde a 80%, la cartografía de los ecosistemas presentes de los años 2010 y 2019 en el PNLZ, tiene una fiabilidad global mayor a 95% por lo que permitió establecer un análisis a mayor detalle y lo más cercano a la realidad.

Posteriormente para el cálculo de la captura de carbono se retomaron los resultados obtenidos por Avendaño (2009), Franco (2007), y Jiménez (2013), quienes obtuvieron los índices de captura de carbono por ecosistema forestal lo cual permitió multiplicar el total de superficie en hectáreas de cada uno de los ecosistemas forestales por el índice correspondiente al tipo de cobertura forestal para la generación de mapas, gráficas y cartografía.

Cabe resaltar que para la estandarización de los índices se analizó el diámetro y altura de 150 árboles en total ejemplares de los ecosistemas forestales presentes, la validación "*in situ*" se realizó de acuerdo con Romahn y Ramírez (2010), la medición del diámetro de los árboles se realizó a la altura del pecho a 1.30 m sobre el nivel del suelo y la altura del árbol se midió de manera indirecta a través de una estimación visual de manera horizontal respecto al árbol, por debajo de este mismo.

El análisis de los cambios en el SE retención del suelo se realizó a partir de la de la Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (RUSLE) se eligió este método por ser una ecuación práctica que permite representar rangos de erosión del suelo además de ser una de las metodologías más usadas para determinar la erosión del suelo en toneladas por hectárea al año (Gvozdenovich y Barbagelata, 2015).

El Factor R (Erosividad de la lluvia) es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo (Wischmeier y Smith, 1978), para la investigación fue una de las variables trabajadas a mayor detalle ya que se procesó con base a la recopilación de los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al ANP.

Para el Factor K que representa la erosionabilidad del suelo solamente se traspasó la información de las principales características de los tipos del suelo del área de estudio obtenidas de la carta edafológica y se le asignaron los valores correspondientes de acuerdo a la (FAO, 1980).

Por su parte el Factor (LS) representa la Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno y se obtuvo a partir de las curvas de nivel para generar un modelo digital de elevación e identificar las pendientes, cabe destacar que esta variable no tuvo cambios significativos para los tres años de estudio. De igual forma para el Factor C se retomaron los mapas de los ecosistemas presentes a los cuales se les asignaron los valores de acuerdo a las tablas propuestas por Wischmeier y Smith (1978).

Posteriormente se multiplicaron los factores anteriores de acuerdo con Vargas (2015), quien menciona que el modelo se representa mediante la fórmula  $A = R * K * L * S * C$ . La validación de la cartografía se realizó mediante imágenes de satélite de alta resolución, se presentaron limitantes para validación en campo las más significativa es el cierre de actividades no esenciales por el COVID-19.

Los resultados analizados en la cartografía de los ecosistemas presentes en el PNLZ representan una superficie de 4,556 hectáreas de las cuales 4,136 ha ocupaban los ecosistemas forestales equivalentes a 198,655 toneladas de captura de carbono para el año 1976 y 4,263 ha equivalentes a 204,556 toneladas de captura de carbono para el año 2019; en contraste con los resultados presentados en el Programa de Manejo del Parque Nacional Lagunas de Zempoala (2011), las superficies correspondientes a los ecosistemas forestales difieren en cuanto a la superficie por tipo de bosque, cabe resaltar que existe variación en la temporalidad y en la superficie total de ANP.

Los resultados obtenidos expresan que entre los años 1976 y 2019 en el PNLZ se presentó un incremento de 127 ha equivalentes a 6,305 toneladas de captura de carbono, se presentaron cambios negativos en los ecosistemas forestales bosque de pino y bosque mixto de pino-encino presentaron disminución en su superficie en este periodo. El incremento en la superficie del área forestal se asocia a campañas de reforestación, pago por servicios ambientales y la aplicación de normas y leyes.

Los resultados obtenidos del SE retención del suelo muestra que en el año 2019 se presentan los valores más altos de erosión puesto que la mostró un incremento para este año. En general para los tres años las zonas sur y suroeste presenta pérdida de suelo superior a la a las 200 toneladas por hectárea al año. Los datos obtenidos varen en contraste con los presentados por la CONAFOR, (2013) dado que el método RUSLE es una estimación que indica cierto grado de degradación del suelo y no un valor absoluto de la pérdida real del suelo, y en virtud a que la escala de trabajo es significativamente distinta entre las estimaciones realizadas, se presentaron variaciones en los resultados.

A partir del análisis de los resultados se puede inferir que existe una estrecha relación entre los resultados en la captura de carbono con respecto a la retención del suelo, ambos se encuentran clasificados dentro de los servicios de soporte, es decir brindan o aportan elementos para el funcionamiento de otros. Es así que al formar parte de un mismo ente comparten características y factores que al ser modificadas repercutirán de manera positiva o negativa en el otro, ejemplo de ello es el desarrollo de los ecosistemas forestales; dependen directamente de suelos fértiles donde desarrollarse, mismos que generaran parte de la captura de carbono de la región donde se ubica el PNLZ para que exista un equilibrio ambiental.

Los resultados alcanzados en la investigación cubren solo una parte mínima de la problemática que engloba de deterioro o impacto ambiental presente en el PNLZ es así que los resultados obtenidos permitirán establecer y ser la base de futuras investigaciones para disminuir, mitigar, o mejor a un restaurar los impactos negativos.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación a través de la aplicación de procesos metodológicos mediante herramientas de percepción remota como los sistemas de información geográfica y al análisis de los elementos teóricos, conceptuales se establecen las siguientes conclusiones.

La TGS permitió establecer las bases teóricas para sustentar las relaciones y cambios existentes entre los servicios ecosistémicos de soporte captura de carbono y retención del suelo en el PNLZ, mediante un análisis multidisciplinario en cual se identificaron las principales causas de dichos cambios.

Los estudios referentes a los procesos de cambio de los servicios ecosistémicos captura de carbono y retención del suelo en la actualidad se tornan de gran importancia al ser una problemática que afecta a la sociedad mundial, pese a su relevancia existen pocas metodologías que permitan representar la información de una forma práctica. Sin embargo, la recopilación de información para el marco teórico-conceptual brindo los elementos para integrar y aplicar los procesos metodológicos mediante las condiciones necesarias para la generación de cartografía confiable en la representación de los resultados.

La metodología aplicada en esta investigación generó las circunstancias para realizar aportaciones referentes a los índices de carbono en los ecosistemas forestales, se retomaron para darle continuidad bajo las condiciones presentes en el área de estudio además se logró la representación de los resultados a pesar de la escala de trabajo debido a que no reflejaba la realidad en contraste con los resultados alcanzados.

Los resultados obtenidos expresan que entre los años 1976 y 2010 en el PNLZ se presentó un incremento de 164 ha equivalentes a 7,789 toneladas de captura de carbono fue un periodo de 34 años en el que los ecosistemas forestales presentaron un aumento en su superficie, el incremento de la superficie de los ecosistemas forestales se debe a la activación de normas y leyes en pro del resguardo del ANP como el Código para la Biodiversidad del Estado de México en el año 2005 que tuvo



por objetivo impulsar y promover la conservación, la preservación, la rehabilitación, la remediación, el mejoramiento y restauración del equilibrio ecológico. Por otra parte, se implementaron actividades culturales como la Fiesta de la Identidad y el XX Festival del Agua, con la participación de la Facultad de Estudios Sociales de Temixco (FEST) de la UAEM y habitantes de San Juan Atzingo y Ocuilan con el fin de generar conciencia respecto del cuidado del medio ambiente.

La hipótesis planteada se cumple ya que los cambios negativos (pérdidas) se presentaron entre 2010 y 2019, el comportamiento general del área forestal mostro un aumento analizando a los ecosistemas forestales como un área homogénea; mostraron un aumento de 127 hectáreas lo que se traduce en un incremento de 6,305 toneladas de carbono capturado más que el año inicial, sin embargo, los ecosistemas forestales bosque de pino y bosque mixto de pino-encino presentaron una disminución en su superficie.

Esto habla del nivel de análisis alcanzado en la investigación, los datos generales son muestra que existe la preservación del ANP, pero el problema radica en zonas específicas del PNLZ ya que el impacto ambiental se refleja solo en dos de los cuatro ecosistemas forestales.

Con base al objetivo general planteado se concluye que existen variaciones en la captura de carbono y la retención del suelo puesto que se observa un proceso de deforestación asociado principalmente al desarrollo de actividades antrópicas dentro del parque, tales como actividades turísticas, ganaderas, agrícolas y de infraestructura vial; por lo que los ecosistemas forestales han presentados cambios en su superficie, por ejemplo para el año 2010 los bosques representaban una superficie de 4300 ha mientras que para el año 2019 presentaron una superficie de 4263 ha.

Las problemáticas que se asocian a lo anterior son la pérdida de micro ecosistemas, la reducción en la producción de oxígeno, alteraciones en la captura de carbono de los ecosistemas forestales.

Respecto con el trabajo de campo realizados mediante recorridos “*in situ*” y observación directa, se identificó que existe una transición marcada en la pérdida de los ecosistemas forestales, la cual está en función del establecimiento de nuevas áreas agrícolas que se desarrollan a partir de zonas deforestadas, principalmente en las zonas norte y este del área de estudio, donde se presentan las menores pendientes y cuentan con mejores vías de acceso.

La retención del suelo muestra que el año 2019 se presentan los valores bajos de retención del suelo puesto que la erosión del suelo mostró un incremento para este año, el Factor R (Erosibilidad de la lluvia) fue la variable que tuvo mayor influencia su distribución espacial tuvo una similitud con el mapa de clima.

En general para los tres años las zonas sur y suroeste presenta pérdida de suelo superior a la a las 200 toneladas por hectárea al año, lo cual tiene relación ya que en esa área se presentó fragmentación en los ecosistemas forestales lo cual repercute a nivel región en el aumento de la erosión del suelo al no existir cobertura forestal densa.

Para mitigar o disminuir la erosión del suelo en el PNLZ, no depende solo de implementar acciones para la conservación de suelos ya que es una problemática que es consecuencia de múltiples factores si bien algunos son naturales otros dependen directamente de actividades antrópicas, desde el punto de vista de las CA depende de una reestructuración en el Plan de manejo del ANP, optimizar y aplicar de mejor manera las actividades antrópicas dentro del parque a fin de darle un uso responsable a este espacio, por otro lado, seguir con las campañas de reforestación y aplicar la normatividad sobre los usos del suelo dentro del ANP.

Finalmente, las investigaciones asociadas a los cambios de uso de suelo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten identificar relaciones entre las problemáticas ambientales y sociales, ya que son de gran utilidad para la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes, lo que permitirá tomar acciones reales para la restauración y preservación de áreas prioritarias en el PNLZ, en las que se presentan mayores niveles de deterioro ambiental.

## **RECOMENDACIONES**

De acuerdo con los resultados alcanzados y a lo concluido en esta investigación se plantean las siguientes recomendaciones.

En cuanto al marco teórico-conceptual se recomienda indagar a mayor detalle investigaciones internacionales de trabajos relacionados con los índices de captura de carbono para contrastar los resultados con las características ambientales presentes en el área de estudio ya que son variables que influyen directamente en la captura de carbono.

De acuerdo con los procesos metodológicos aplicados en esta investigación se recomienda que en futuras investigaciones dentro del territorio del PNLZ, se retome como objeto de estudio la cartografía de los ecosistemas presentes pues se alcanzaron niveles altos de confiabilidad global y se realice una validación detallada de las diferentes coberturas.

Un factor importante que no se tomó en cuenta para este estudio fue la densidad de los bosques debido a que la fragmentación de estos bosques impacta directamente en la captura de carbono, sin embargo, por cuestiones de tiempo no se pudo desarrollar este proceso, pero se recomienda tomarlo en cuenta en estudios posteriores.

Por otra parte, los resultados del Factor R (Erosividad de la lluvia) se pueden mejorar ampliando los datos de las estaciones meteorológicas retomadas.

Finalmente, se recomienda que los resultados y conclusiones obtenidas en esta investigación se retomen para la toma de decisiones en el ámbito gubernamental y público en la identificación de las zonas prioritarias de mitigación en el parque para la aplicación de programas de reforestación o restauración.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, C. y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas, *Cinta de Moebio*, 3.
- Amudson, R., A.A. Berche, J.W. Hopmans et al. Soil and human security in the 21st century. *Science* 348(6235): 1261071-1 - 1261071-6. 2015.
- Avendaño, D., Acosta, M., Carrillo, F. y Etchevers, J. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de Abies religiosa. *Revista fitotecnia mexicana*, 32(3).
- Balvanera, P. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en *Capital natural de México*, vol.II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, 185-245.
- Balvanera, P y Cotler, H. (2007). Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos, *Carta Ecológica*, 8-15.
- Barrera, F., Bachmann, P., y Tironi, A. (2015). La investigación de servicios ecosistémicos en Chile: una revisión sistemática. *Investig. Geogr.*, 50, 3-18.
- Benjamín, J. y Masera, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, vol. 7, núm. 1, 3-12.
- Bertalanffy Von, L. *Teoría General de los Sistemas*. Editorial Fondo de Cultura Económica. México. 1976.
- Bonilla, B.J.R. (1992) Flora y vegetación acuática vascular de Lagunas de Zempoala, Morelos, México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Tesis de Maestría.
- Bonilla-Barbosa, J. R. y Novelo, R. A. (1995) Manual de identificación de plantas acuáticas del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México. Cuadernos IBUNAM. Instituto de Biología. UNAM. México. 168 p.
- Bonilla, J., Viana J. & Salazar, F., 2000. Listados florísticos de México, XX. Flora acuática de Morelos. Primera ed. México.: Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cantú, P. (2013). La importancia social de los sistemas naturales para la sustentabilidad. *Ciencia UANL*. 16.
- Camacho, J. (2016). Cambios de cobertura y uso del suelo en el surponiente del estado de México. Modelos dinámicos y prospectivos. Aportación teórica – metodológica en las ciencias ambientales (tesis de posgrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca, México.
- Camacho, J., Juan, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L y Sánchez, M. (2015) Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña, *Madera y Bosques* (21), 93-112.
- Camacho, R. (2017). “Conversión en sistemas agrícolas y su efecto en la temperatura. Escenarios prospectivos en Progreso Hidalgo, Estado de México 2000-2015” (tesis de posgrado). Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca, México
- Card, H. D. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431-439.

Caro, C y Torres, M. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas, *Orinoquia* (2), 237-251.

Ceballos, A. (2014). La teoría general de sistemas: su aplicación metodológica en la enseñanza del paisaje en geografía. Universidad Autónoma de Chile, 5-13.

CEAMA, 2007. Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos. Consultado en: [www.ceamamorelos.gob.mx/secciones/ambiente/a\\_nat\\_protegidas/aprotegidas/Paginas/Zempoala.htm](http://www.ceamamorelos.gob.mx/secciones/ambiente/a_nat_protegidas/aprotegidas/Paginas/Zempoala.htm). 29 agosto de 2019.

Chuvienco, E. 2002. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ra edición. Rialp, S.A. Madrid, España

Congalton, R. G. (1988). A comparison of sampling scheme use in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(5), 593-600.

CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (2008). Programa de Conservación y Manejo. Parque Nacional Lagunas de Zempoala., México.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. (2002).

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of the Environment*, 37, 35-46.

Corrales, G., Plata, W., Hinojoza, G., y Aguilar, M. (junio de 2014), Análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo para el Estado de Sinaloa mediante Sistemas de Información Geográfica. *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica*, congreso llevado a cabo en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Universidad Autónoma de Sinaloa, México.

Corredor, E., Fonseca, J y Páez, E. (2014). Los servicios ecosistémicos de regulación: tendencias e impacto en el bienestar humano, *Tunad*, 77-83.

Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad, *Diversidad Biológica de México: Estudio de País, Antecedentes*. Disponible en [http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion\\_internacional/doctos/epcomienzo.html](http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/epcomienzo.html) Consultado el 30 de octubre, 2018.

CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2018). Bosquestemplados de México. Recuperado de <https://www.conabio.gob.mx/bosqueTemplado>.

DOF, 2014. Acuerdo por el que se emiten las Reglas de Operación del Programa Nacional Forestal, 2015. SEMARNAT, México.

FAO. Deforestación, Cambio de uso de la tierra y REDD. 2010

Díaz, R., Acosta, M., Carrillo, F., Buendía, E., Flores, E. y Etchevers, J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.

Eastman, J. (2012). Guía para SIG y procesamiento de imágenes, Córdoba, Argentina, Clark University.

Escandón, J., Benjamín, j., Nieto, M y Ordóñez, M. (2018). Cambio en la cobertura vegetal y uso del suelo del 2000 al 2009 en Morelos, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9 (46).

- Emanuelli, P., Duarte, E y Milla, F. (2016). Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial, periodo 2010 – 2015: Área de influencia del mecanismo socioambiental Diquis, República de Costa Rica, Ambiente y Recursos Naturales.
- Evaluación de Ecosistemas del Milenio, MEA. (2005). *Ecosystems and human wellbeing: synthesis*. Island Press, Washington, DC. Disponible en: [www.millenniumassessment.org/](http://www.millenniumassessment.org/).
- FAO-PNUMA. (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma: FAO.
- FAO, 2006. Global forest resources assessment 2005, Progress towards sustainable forest management, Resources Assessment Working Paper 147. Rome.
- Flores, E. (2016). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Flores, L. (2019). Servicios ecosistémicos en la Región VI Ixtapan de la Sal, Estado de México (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Jiménez, R. (1998). *Metodología de la investigación elementos básicos para la investigación*, Editorial Ciencias, La Habana, Cuba.
- Jiménez, J., Treviño, E. y Yerena, J. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 4(17).
- Jorge, M., Guerra, A. (2014). Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. 7-30.
- Lal, R., Stewart, B., (1990). Soil degradation. En: Stewart B. (Ed.), *Advances in soil science*. Vol. 11. SpringerVerlag. New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4612-3322-0
- López, E., Bocco, G y Mendoza, M (2000). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia, *Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía UNAM*. 45, 56-76.
- Lozano, B., & Parras, L. (2014). Erosión actual y potencial en suelos ácidos en el sur de España. *Terra Latinoamericana*, 29(1): 35-46.
- Leff, E. (2011). Sustentabilidad y racionalidad ambiental: hacia "otro" programa de sociología ambiental. *Revista Mexicana de Sociología*, 71 (1), 5-46.
- Galicia, L., García, A., Gómez, L., y Ramírez, M. (2001), La degradación de los recursos forestales en México, *Academia Mexicana de Ciencias*, 1-3.
- García, F. (2015). Ecosistemas Tecnológicos, *VAEP-RITA*, 3(1), 26-38
- García, J., Cedillo, J., Juan, J., y Balderas, M. (2012), Procesos de cambio en el uso del suelo de una Microcuenca en el Altiplano Mexicano. El caso del río San José en el estado de México *Papeles de Geografía*, 55, 63-73.

García O., F. y A. Ordóñez. (1999). El Papel de los suelos forestales en la captura de carbono. Enviada a Nuestros Bosques.

GEM, 1989. Clasificación de la hidrología superficial del Estado de México. Índice de sucuencias tributarias y específicas., Zinacantepec, Edo. de México: Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México.

Gvozdenovich, J y Barbagelata, P. (2015). INTA-USLE/RUSLE Versión 2.0 Manual del Usuario INTA-USLE Software de Erosión Hídrica INTA-USLE/RUSLE Versión 2.0, INTA, Argentina, Argentina.

Hernández, M., García, J., Quentin, E y Delgado, C. (2008) Identificación de áreas críticas de erosión en el Curso Alto del Río Lerma. *CI ENCIA ergo sum*, (6-2), 181-188.

Holdren JP, Ehrlich PR, (1974). Human Population and the Global Environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force. *American Scientist*. 1974;282-292.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, (INECC) México. 2015

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Información topográfica digital escala 1:250 000, serie V. México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015). Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/usosuelo/>, consultado en mayo de 2019.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Información topográfica digital escala 1:250 000, serie V. México.

Martínez, T., Angulo, C. y Olvera, G. (2010) Pérdida de la cobertura forestal en el ANP Lagunas de Zempoala, *Estudios Geográficos de Análisis Territorial y Ambiental*, 2-12.

Mas, J. F., Reyes, J., & Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (51), 53-72.

Mas, J. F. y Couturier S. (2011). Evaluación de Bases de Datos Cartográficas. In F. Bautista (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (2da. ed., pp. 675-703). México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y el Instituto de Geografía.

Maldonado, C. (2014). ¿Qué es un sistema complejo?, *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 14 (29). 71-93.

Meral, F. (2005). Les services environnementaux en économie: revue de la littérature. Proyecto SERENA. Disponible en: <http://www.serena-anr.org/>

MEA. (2005). Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación. Resumen. Recuperado de <http://www.maweb.org>

Monje, C (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa, guía didáctica*, Colombia, Colombia, U. Surcolombiana.

Mondragón Romero Emanuel. (2017). Estimación de Biomasa Aérea y Contenido de Carbono en Bosques y Selvas del Estado de México, (Tesis de Maestría). Colegio de postgraduados, Texcoco, Estado de México.

Monroy, R. y M. Taboada. Monografía de los tipos de vegetación del Área de Protección de Flora y Fauna Silvestre “Corredor Biológico Chichinautzin”. En: Programa Integral de Manejo para el Área de Protección de Flora y Fauna

Silvestre y acuática “Corredor Biológico Chichinautzin”, Edo. De Morelos. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco y Universidad Autónoma del Estado de Morelos. pp 126-141. 1990.

Olvera, C. (2015). Vialidad y sus efectos territoriales en cuatro municipios metropolitanos. Caso de estudio vialidad las torres, 1990-2010. A 20 años de su funcionamiento. Toluca (Tesis de licenciatura). UAEM, Toluca, México.

ONU. Resolución aprobada por la Asamblea General del 20 de diciembre de 2013. 68/232. Día Mundial del Suelo y Año Internacional de los Suelos. 7 de febrero de 2014.

Ordóñez, A. (1999). Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F.

Peralta, E. (2016). Teoría general de los sistemas aplicada a modelos de gestión, *AGLALA*, 7(1): 122.

Pineda, N. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía*, (69), 33-52.

Pontius, R. G. Jr., E. Shusas and M. McEachern (2004), Detecting important categorical land changes while accounting for persistence, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, (101), 251–268.

Porta, J., López, M y Roquero, C. (2003). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid: Mundi - Prensa.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD; FAO 2015 “PROTOCOLO Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México” Gobierno de Noruega Ministerios de Asuntos Internacionales, Zaponan, Jalisco, México.

Reynoso, R., Valdez, J., Escalona, M., Satos, H y Pérez, M. (2016). Cadenas de Markov y autómatas celulares para la modelación de cambio de uso de suelo. *Ingeniería hidráulica y Ambiental*, 25, 72-81.

Rivadeneira, E. (2015). Comprensión teórica y proceso metodológico de la investigación cualitativa. *In Crescendo. Institucional*, 6(2), 169-183.

Rodríguez, A., Pérez, J y Alipio, O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento, *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (82),1-26.

Rodríguez, L. (2017). Complejidad, interdisciplina y política en la teoría de los sistemas complejos, de Rolando. *Ciencias Sociales y Humanas*, 17(33), 221-242.

Rodríguez L. (2014). Epistemología y política de la metodología interdisciplinaria. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, 4(1), 1-8.

Romahn, C., y Ramirez, H. (2010). *Dendrometría*. México, México: Division de Ciencias Forestales.

Salazar D, M. Enciclopedia de los Municipios de México; Estado de México, Municipio de Ocuilan. Centro Nacional de Desarrollo Municipal Gobierno del Estado de México. México. 2001.



Sánchez Monte de Oca, Erik José, 2011. Propuesta digital de consulta de información de las Áreas Naturales Protegidas Federales del Estado de México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.

SARH; Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Plan de Manejo del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, (1993). Morelos. Pausa. México.

Sahagún, F y Reyes, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *Biología y Química*, 12, 06-2

SSSA. Glossary of Soil Science Terms. Disponible en: [www.soils.org](http://www.soils.org). Fecha de consulta: julio de 2020

Saavedra, G. (2014). Ciencias ambientales y ecología, *revista del CIECAS-IPN*, 15, 63-79.

SEMARNAT. (2014). Recuperado el 24 de Marzo 2019, de [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen\\_2009/03\\_suelos/cap3\\_2.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/resumen_2009/03_suelos/cap3_2.html).

SEMARNAT. (2001). Evaluación de la pérdida de suelo por la erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1:1,000,000 por estados. Ciudad de México: SEMARNAT

SEMARNAT. 2006. La gestión ambiental en México. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales.

Stehman, S. y Czaplewski, R. (1998). *Design and analysis for thematic map accuracy assessment fundamental principles*. Remote Sensing of Environment 64:331-334.

Toro, N., Gomariz, F., Cánovas, F y Sierra, F. (2015). Comparación de métodos de clasificación de imágenes de satélite en la cuenca del Río Argos (Región de Murcia), Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (67), 327-347

Uttam, R, y Mrinmoy, M. (2016). Vulnerability of Watersheds to Climate Change Assessed by Neural Network and Analytical Hierarchy Process. India: Springer

Vargas, J.(2015). Estimación de la Erosión Hídrica Actual y Potencial de la Subcuenca de Sayula, Jalisco, México, (Tesis de licenciatura), Universidad de Guadalajara.

Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC.