



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS

**CAPTURA DE CARBONO EN LOS PARQUES NACIONALES DEL ESTADO DE
MÉXICO. UNA PROPUESTA TEÓRICA-METODOLÓGICA**

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias Ambientales

Presenta

SANTIAGO JUAN MEDINA SILVA

TUTOR ACADÉMICO:

DR. JESÚS GASTÓN GUTIÉRREZ CEDILLO

TUTORES ADJUNTOS:

DR. J. ISABEL JUAN PÉREZ

DR. MIGUEL ÁNGEL BALDERAS PLATA

TOLUCA, MÉXICO JULIO DE 2025.

CONTENIDO

RESUMEN	14
INTRODUCCIÓN.....	15
Antecedentes.....	19
Planteamiento del Problema	25
Preguntas de Investigación	26
Hipótesis.....	26
Justificación.....	27
Objetivos.....	28
CAPÍTULO I. MARCO LEGAL	29
1.1 Contexto Jurídico de los Parques Nacionales en México	30
1.2 <i>Leyes y reglamentos relacionados con la conservación de los Parques Nacionales en México</i>	31
1.2.1 - <i>Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEEPEPA)</i>	31
<i>Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de áreas naturales protegidas</i>	32
1.2.2 <i>Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable</i>	32
<i>Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable</i>	32
CAPÍTULO II.....	33
MARCO TEÓRICO.....	33
2.1 Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental	34
2.2 Teoría de Sistemas Complejos.....	37
2.3 <i>Teoría General de Sistemas y Teoría de Sistemas Complejos en la comprensión de los Parques Nacionales</i>	38
2.4 Integración teórica	40
2.5 Disciplinas que sustentaron la investigación	42
2.5.1 <i>Las Ciencias Ambientales como vínculo entre sociedad y el ambiente</i>	42
2.5.2 <i>La Geografía como ciencia multidisciplinaria</i>	42
2.6 Desarrollo del concepto de los Servicios Ecosistémicos (SE).	46
2.7 Clasificación de los Servicios Ecosistémicos	48
2.7.1 <i>Servicios ecosistémicos de provisión:</i>	49
2.7.2 <i>Servicios ecosistémicos de regulación:</i>	49
2.7.3 <i>Servicios ecosistémicos de soporte</i>	49
2.7.4 <i>Servicios ecosistémicos culturales</i>	50

2.8 Captura de carbono en los ecosistemas forestales	50
2.9 Principales causas de pérdida de los ecosistemas forestales	53
2.10 Fragmentación en los ecosistemas forestales	53
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	55
Fundamentos para generar una propuesta teórica-metodológica.	57
3.1 Caracterización geográfica ambiental en los Parques Nacionales del Estado de México	61
3.2 Identificación de los ecosistemas forestales presentes en los Parques Nacionales del Estado de México.....	62
3.2.1 Fase 1: Digitalización de la carta de los Usos del Suelo y Vegetación del INEGI.	62
3.2.2 Fase 2: Clasificación de las imágenes de satélite	62
3.2.3 Fase 3: Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales	63
3.3. Análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México	67
3.4 Análisis del Servicio Ecosistémico de soporte carbono.....	68
3.5 Análisis de la Problemática Integral Ambiental, Económica y Social de cada Parque Nacional del Estado de México.	70
3.6 Validación de la Propuesta Teórica-Metodológica.....	71
3.7 Discusión General Teórica–Empírica	71
CAPITULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
Área de estudio	73
4.1 Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo (PNDCN).....	74
4.1.1 Caracterización Geográfica del PNDCN	74
Localización geográfica.....	74
Fisiografía	75
Litología.....	76
Clima.....	76
Hidrología.....	77
Diversidad de fauna	80
4.1.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNDCN	80
4.1.3 Ecosistemas presentes en el PNDCN	83
4.1.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNDCN.....	84
4.1.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNDCN.....	88
4.1.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNDCN	90
4.1.7 Diagnóstico integral del PNDCN	92

4.1.8	<i>Consideración final del PNDCN</i>	95
4.2	Parque Nacional El Tepeyac (PNET)	96
4.2.1	<i>Caracterización Geográfica del PNET</i>	96
	<i>Localización geográfica</i>	96
	<i>Fisiografía</i>	97
	<i>Litología</i>	98
	<i>Clima</i>	98
	<i>Hidrología</i>	98
	<i>Edafología</i>	99
	<i>Diversidad de fauna</i>	100
4.2.2	<i>Identificación de los ecosistemas presentes en el PNET</i>	100
4.2.3	<i>Análisis de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional El Tepeyac</i>	103
4.2.4	<i>Validación cartográfica de los ecosistemas PNET</i>	104
4.2.5	<i>Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNET</i>	109
4.2.6	<i>Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNET</i>	111
4.2.7	<i>Diagnóstico integral del Parque Nacional El Tepeyac</i>	112
4.2.8	<i>Consideración final sobre el Parque Nacional el Tepeyac</i>	114
4.3	Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla (PNIMHC)	115
4.3.1	<i>Caracterización geográfica del PNIMHC</i>	115
	<i>Localización geográfica</i>	115
	<i>Fisiografía</i>	116
	<i>Litología</i>	117
	<i>Clima</i>	117
	<i>Hidrología</i>	117
	<i>Edafología</i>	118
	<i>Diversidad de fauna</i>	119
4.3.2	<i>Identificación de los ecosistemas presentes en el PNIMHC</i>	120
4.3.3	<i>Análisis de los ecosistemas presentes en el PNIMHC</i>	124
4.3.4	<i>Validación cartográfica de los ecosistemas PNIMHC del año 2022</i>	126
4.3.5	<i>Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNIMHC</i>	130
4.3.6	<i>Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC</i>	132
4.3.7	<i>Diagnóstico integral del el PNIMHC</i>	134
4.3.8	<i>Consideración final sobre el PNIMHC</i>	137
4.4	Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP)	138

4.4.1 Caracterización geográfica del PNIP	138
<i>Localización geográfica</i>	138
<i>Fisiografía</i>	139
<i>Litología</i>	140
<i>Clima</i>	142
<i>Hidrología</i>	143
<i>Edafología</i>	144
<i>Diversidad de fauna</i>	146
4.4.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNIP	146
4.4.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNIP	150
4.4.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNIP del año 2022	152
4.4.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNIP	156
4.4.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIP	160
4.4.7 Diagnóstico integral del PNIP	162
4.4.8 Consideración final sobre el PNIP	166
4.5 Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ)	167
4.5.1 Caracterización geográfica del PNLZ	167
<i>Localización geográfica</i>	167
<i>Fisiografía</i>	168
<i>Litología</i>	169
<i>Clima</i>	171
<i>Hidrología</i>	172
<i>Edafología</i>	174
<i>Diversidad de fauna en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala</i>	175
4.5.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNLZ	177
4.5.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ	180
4.5.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNLZ	182
4.5.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNLZ	185
4.5.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLZ	188
4.5.7 Diagnóstico integral del PNLZ	189
4.5.8 Consideración final sobre el PNLZ	192
4.6 Parque Nacional Los Remedios (PNLR)	193
4.6.1 Caracterización geográfica del PNLR	193
<i>Localización geográfica</i>	193

Fisiografía	193
Litología.....	194
Clima	195
Hidrología.....	195
Edafología	196
<i>Diversidad de fauna en el Parque Nacional Los Remedios</i>	196
4.6.2 Ecosistemas presentes en el PNLR	197
4.6.3 Análisis de los ecosistemas del PNLR	199
4.6.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNLR del año 2022	200
4.6.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNLR	203
4.6.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLR	205
4.6.7 Diagnóstico integral del PNLR.	206
4.6.8 Consideración final sobre el PNLR	209
4.7 Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl (PNMFN)	210
4.7.1 Caracterización geográfica del PNMFN	210
<i>Localización geográfica</i>	210
<i>Fisiografía</i>	210
<i>Litología</i>	211
<i>Clima</i>	212
<i>Hidrología</i>	212
<i>Diversidad de fauna en el Parque Nacional Molino de flores Netzahualcóyotl</i>	213
4.7.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNMFN	213
4.7.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNMFN	216
4.7.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNMFN del año 2022. 217	
4.7.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNMFN	221
4.7.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNMFN	223
4.7.7 Diagnóstico integral del PNMFN.	224
4.7.8 Consideración final sobre el PNMFN	226
4.8 Parque Nacional Sacromonte (PNS)	227
4.8.1 caracterización geográfica del PNS	227
<i>Localización geográfica</i>	227
<i>Fisiografía</i>	228
<i>Litología</i>	229
<i>Hidrología</i>	230

<i>Clima</i>	231
<i>Edafología</i>	231
<i>Diversidad de fauna en el Parque Nacional Sacromonte</i>	231
4.8.2 Ecosistemas presentes en el PNS	232
4.8.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNS	234
4.8.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNS del año 2022.	235
4.8.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNS	238
4.8.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNS	240
4.8.7 Diagnóstico integral del PNS.	242
4.8.8 Consideración final sobre El Parque Nacional Sacromonte	244
4.9 Parque Nacional Bosencheve (PNB)	245
4.9.1 Caracterización geográfica del PNB	245
<i>Localización geográfica</i>	245
<i>Fisiografía</i>	246
<i>Litología</i>	247
<i>Hidrología</i>	248
<i>Clima</i>	249
<i>Edafología</i>	250
<i>Diversidad de fauna en el Parque Nacional Bosencheve</i>	251
4.9.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNB	252
4.9.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNB	256
4.9.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNB del año 2022.	257
4.9.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNB	263
4.9.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNB	266
4.9.7 Diagnóstico integral del el PNB.	267
4.9.8 Consideración final sobre el Parque Nacional Bosencheve	269
Propuesta teórico-metodológica para la estimación de la captura de carbono	270
1. Fundamentos Teóricos-conceptuales de la Propuesta Teórica-metodológica	270
2. Fundamentos metodológicos de la propuesta teórica-metodológica. ...	280
3. Propuesta Teórica Metodológica (Relaciones entre los Fundamentos Teóricos y los Fundamentos Metodológicos)	283
VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA TEÓRICO- METODOLÓGICA	291
DISCUSIÓN GENERAL	292

CONCLUSIONES	308
BIBLIOGRAFÍA	317
ANEXO 1	322
PRODUCTOS ACADÉMICOS Y CIENTÍFICOS OBTENIDOS EN EL DESARROLLO DE TESIS DOCTORAL	322
ANEXO 2	329
ACTIVIDADES DE RETRIBUCIÓN SOCIAL	329

ÍNDICE DE TABLAS

No	NOMBRE	Pag.
1	Clasificación de los Servicios Ecosistémicos por la MEA	49
2	Tamaño de la muestra por categoría.	64
3	Matriz de confusión expresada o error	65
4	Matriz de confusión expresada en proporción	66
5	Parques Nacionales del Estado de México.	73
6	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNDCN	83
7	Matriz de error para los ecosistemas del PNDCN del año 2022	85
8	Confiabilidad de la cartografía para los ecosistemas del PNDCN del año 2022	86
9	Matriz de error corregida para los ecosistemas del PNDCN del año 2022	86
10	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas del PNDCN	87
11	Superficies corregidas por el método de Card	88
12	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNDCN	91
13	Análisis de los problemas identificados en el PNDCN	92
14	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNET	103
15	Matriz de error para los ecosistemas del PNET del año 2022	105
16	Confiabilidad de la cartografía para los ecosistemas del PNET del año 2022	106
17	Matriz de error corregida para los ecosistemas del PNET del año 2022	106
18	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza	107
19	Superficies corregidas para cada ecosistema	108
20	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC	111
21	Identificación de los problemas identificados en el PNET	112
22	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNIMHC	124
23	Matriz de error año 2022 de los ecosistemas PNIMHC del año 2022	126
24	Matriz de error expresada en proporción	127
25	Matriz de error corregida de acuerdo con Card (1982)	128
26	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza	129
27	Superficies corregidas por cada ecosistema	130
28	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC	133
29	Identificación de los problemas identificados en el PNIMHC	134
30	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNIP	150
31	Matriz de error año 2022 de los ecosistemas PNIP del año 2022	152
32	Matriz de error expresada en proporción	153
33	Matriz de error corregida de los ecosistemas PNIP del año 2022	154
34	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas del PNIP	155
35	Superficies corregidas por el método de Card	156
36	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIP	161
37	Análisis de los problemas identificados en el PNIP	162
38	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLZ	180
39	Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022.	182

40	Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022	183
41	Matriz de error corregida de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022	183
42	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022	184
43	Superficies corregidas por el método de Card	185
44	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLZ	189
45	Análisis de los problemas identificados en el PNLZ.	190
46	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLR	199
47	Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNLR del año 2022	201
48	Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNLR del año 2022	201
49	Matriz de error corregida de los ecosistemas PNLR del año 2022	202
50	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNLR	202
51	Superficies corregidas por el método de Card de los ecosistemas PNLR	203
52	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLR	206
53	Análisis de los problemas identificados en el PNLR.	207
54	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNMFN	216
55	Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNMFN del año 2022	218
56	Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNMFN del año 2022.	218
57	Matriz de error corregida de los ecosistemas PNMFN del año 2022	219
58	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNMFN	220
59	Superficies corregidas de los ecosistemas PNMFN del año 2022	220
60	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNMF	223
61	Análisis de los problemas identificados en el PNMFN.	224
62	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNS	234
63	Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNS del año 2022	236
64	Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNS del año 2022	236
65	Matriz de error corregida de los ecosistemas PNS del año 2022	237
66	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNS	237
67	Superficies corregidas por el método de Card	238
68	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNS	241
69	Análisis de los problemas identificados en el PNS.	242
70	Superficie de los ecosistemas presentes en el PNB	256
71	Confiabilidad de la cartografía, de los ecosistemas PNB del año 2022.	258
72	Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNB del año 2022	259
73	Matriz de error corregida de los ecosistemas PNB del año 2022.	260
74	Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNB	261
75	Superficies corregidas de los ecosistemas PNB del año 2022	262
76	Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNB	266
77	Análisis de los problemas identificados en el PNB.	267
78	Productos académicos y científicos obtenidos en el desarrollo de tesis doctoral	323

ÍNDICE DE MAPAS

No	NOMBRE	Pag.
1	Ubicación	74
2	Fisiografía	75
3	Clima	77
4	Hidrología	78
5	Grupos de suelo del PNDCN	79
6	Ecosistemas presentes en el PNDCN	84
7	Fragmentación en el ecosistema forestal de encino del PNDCN	89
8	Fragmentación en el ecosistema forestal de pino-encino del PNDCN	90
9	Ubicación Geográfica	96
10	Pendientes	97
11	Hidrología	99
12	Ecosistemas presentes en el Parque El Tepeyac	104
13	Fragmentación en el bosque mixto de cedro-eucalipto en el PNET	109
14	Fragmentación en el bosque mixto de piñonero-pirul del PNET	110
15	Ubicación	115
16	Pendientes	116
17	Hidrología	118
18	Ecosistemas presentes en el PNIMHC	125
19	Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNIMHC	131
20	Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNIMHC	132
21	Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl	138
22	Fisiografía	140
23	Litología	141
24	Clima	142
25	Hidrología	144
26	Edafología	145
27	Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl	151
28	Fragmentación en el bosque de oyamel en el PNIP	157
29	Fragmentación en el bosque de encino del PNIP	158
30	Fragmentación en el bosque de pino del PNIP	160
31	Ubicación	167
32	Pendientes	168
33	Litología	170
34	Tipos de clima	172
35	Hidrología	173
36	Tipos de suelo	175
37	Ecosistemas presentes en el PNLZ	181
38	Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNLZ	185
39	Fragmentación en el ecosistema forestal de pino del PNLZ	187
40	Fragmentación en el ecosistema forestal bosque mixto de pino-oyamel del PNLZ	188

41	Ubicación	193
42	Pendientes	194
43	Litología	195
44	Hidrología	196
45	Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Los Remedios	200
46	Fragmentación en el bosque mixto de eucalipto-pino del PNLR	204
47	Fragmentación en el bosque mixto de fresno-pirul del PNLR	205
48	Ubicación	210
49	Pendientes	211
50	Litología	212
51	Ecosistemas presentes en el PNMFN	217
52	Fragmentación en el bosque de encino del PNMFN	221
53	Fragmentación en el bosque de pino del PNMFN	222
54	Localización del Parque Nacional Sacromonte	227
55	Pendientes	228
56	Litología	229
57	Hidrología	230
58	Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Sacromonte	235
59	Fragmentación en el bosque de encino del PNS	239
60	Fragmentación en el bosque mixto de encino fresno del PNS	240
61	Localización	245
62	Fisiografía	246
63	Litología	247
64	Hidrología	248
65	Clima	249
66	Edafología	251
67	Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Bosencheve	257
68	Fragmentación en el bosque de oyamel del PNB	263
69	Fragmentación en el bosque mixto de pino del PNB	264
70	Fragmentación en el bosque mixto de pino-encino del PNB	265

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

No	NOMBRE	Pag.
1	Bosque de encino en el PNDCN	81
2	Bosque mixto de pino- encino en el PNDCN	81
3	Vegetación secundaria en el PNDCN	82
4	Agro ecosistemas en el PNDCN	82
5	Localidades en el PNDCN	83
6	Bosque mixto de piñonero-pirul en el PNET	101
7	Bosque mixto de cedro-eucalipto en el PNET	101
8	Vegetación secundaria en el PNET	102
9	Localidades urbanas en el PNET.	103

10	Bosque mixto de oyamel en el PNIMHC	120
11	Bosque de pinol en el PNIMHC	121
12	Vegetación secundaria en el PNIMHC	122
13	Agro ecosistemas en el PNIMHC	122
14	Localidades urbanas en el PNIMHC	123
15	Cuerpos de agua en el PNIMHC	123
16	Bosque de oyamel en el PNIP	147
17	Bosque de oyamel en el PNIP	147
18	Bosque de pino en el PNIP	148
19	Vegetación secundaria en el PNIP	148
20	Área sin vegetación en el PNIP	149
21	Agricultura en el PNIP	149
22	Bosque de oyamel en el PNLZ	177
23	Bosque de pino en el PNLZ	178
24	Bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ	178
25	Pastizales en el PNLZ	179
26	Agricultura en Santa Lucia Ocuilan Edo. Mex.	179
27	Laguna Zempoala	180
28	Bosque mixto de eucalipto-pino en el PNLR	197
29	Bosque mixto de fresno-pirul en el PNLR	198
30	Vegetación secundaria en el PNLR	198
31	Zona urbana en el PNLR	199
32	Bosque de encino en el PNMFN	214
33	Bosque de pino en el PNMFN	214
34	Vegetación secundaria PNMFN	215
35	Agricultura en el PNMFN	215
36	Bosque de encino PNS	232
37	Bosque mixto de encino-fresno en el PNS	233
38	Vegetación secundaria en el PNS	233
39	Agricultura en el PNS	234
40	Bosque de pino en el PNB.	252
41	Bosque de pino en el PNB	253
42	Bosque de pino en el PNB	253
43	Vegetación secundaria en el PNB	254
44	Agricultura en el PNB	254
45	Cuerpos de agua en el PNB	255

RESUMEN

El objetivo de la investigación es desarrollar una propuesta teórica-metodológica basada en los fundamentos teóricos de la Teoría General de Sistemas, mediante metodologías establecidas y validadas que se complementaron con procedimientos metodológicos propios, posteriormente fue validada mediante la discusión teórica empírica, destacando la pertinencia de los componentes teóricos, así como los alcances de las etapas metodológicas.

En los Parques Nacionales del Estado de México los estudios relacionados con los ecosistemas forestales son fundamentales debido a los bienes y servicios que proporcionan a la sociedad. En este sentido el presente documento aborda un estudio en relación con la estimación del carbono capturado en los diferentes tipos de bosque presentes en los Parques Nacionales del Estado de México. Estos son Áreas Naturales Protegidas (ANP) que cuentan con prohibiciones de los usos del suelo sin embargo presentan degradación ambiental por lo que es pertinente identificar las zonas con mayor impacto.

La investigación constituye una contribución significativa al mantenimiento y uso sustentable de los ecosistemas forestales en ANP, con énfasis en la captura de carbono. Además, integra la fragmentación forestal como un factor clave para estimar los índices de carbono capturado en el área de estudio.

Los procesos metodológicos aplicados se desarrollaron en las siguientes cuatro etapas: 1) identificación de los ecosistemas ambientales presentes en el área de estudio; 2) cuantificación y análisis de la superficie de cada tipo de ecosistema; 3) estimación de los niveles de fragmentación de los ecosistemas forestales; y 4) cálculo del carbono capturado en cada ecosistema.

Los resultados incluyen representaciones cartográficas de los niveles de fragmentación forestal por tipo de ecosistema, la identificación de áreas con baja densidad forestal y un análisis detallado de la captura de carbono considerando la fragmentación forestal. El análisis de fragmentación forestal permite calcular con mayor precisión la cantidad de carbono capturado. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para orientar estrategias de conservación y manejo sustentable en los Parques Nacionales del Estado de México.

Palabras clave: captura de carbono, parques nacionales, servicios ecosistémicos.

INTRODUCCIÓN

Actualmente el estudio de los ecosistemas forestales en las Áreas Naturales Protegidas (ANP) en el Estado de México se ha incrementado, sin embargo son limitadas las investigaciones que han estudiado los Parques Nacionales desde una perspectiva socio-ambiental, bajo este sentido la presente investigación plantea una serie de objetivos con los que se logró realizar el análisis cuantitativo del carbono capturado en cada ecosistema forestal por los nueve parques nacionales que conforman el área de estudio, bajo una estricta validación metodológica.

De los nueve parques estudiados en esta tesis, algunos se encuentran y comparten límites administrativos con municipios pertenecientes a otros estados, es importante resaltar que estos parques se tomaron en cuenta en el análisis, debido al área que se encuentra dentro del Estado de México. La mayoría de los Parques Nacionales carece de instrumentos de política ambiental, como son los planes de manejo, lo que genera, en su mayoría, problemas sociales y ambientales. Estas problemáticas afectan directa e indirectamente otros servicios ecosistémicos fundamentales, como la captura de carbono, la recarga de acuíferos y la retención del suelo.

En este sentido, es de gran importancia ubicar mediante cartografía detallada las zonas que presentan los niveles de fragmentación más altos en la zona de estudio, lo que contribuirá a que existan herramientas para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales del parque y para la recuperación de estos espacios naturales (CONABIO, 2016).

Con base a lo descrito previamente, fue necesario analizar mediante SIG los niveles de fragmentación forestal presentes en el área de estudio, identificando con mayor precisión las zonas prioritarias de atención, y tomando como referencia lo establecido por Mas *et al.* (2003), sin dejar de lado la confiabilidad de los datos.

Por otra parte, en la presente investigación se desarrolló una propuesta teórica-metodológica que permitió establecer las bases para describir y explicar las relaciones entre los elementos que conforman los ecosistemas forestales.

Esta investigación contribuyó a establecer bases sólidas para estudios relacionados con la estimación de la captura de carbono, integrando el análisis de la fragmentación forestal. Este enfoque no solo complementa y fundamenta los resultados obtenidos, también aporta mayor validez y precisión a la representación

de la información. Esto permite que en el futuro la cartografía generada pueda ser utilizada con mayor certeza en sectores públicos o privados para la toma de decisiones en temas ambientales.

El presente trabajo ofrece un gran potencial para continuar desarrollándolo bajo condiciones y variables más específicas y detalladas. El análisis implementado en las etapas metodológicas puede replicarse a nivel de ecosistemas forestales, ampliando su alcance. Aunque esta investigación abarcó un número significativo de parques nacionales, los resultados se representaron a una escala que refleja, de manera fiel, una parte de la realidad en contraste con los datos obtenidos, destacando la relevancia de los hallazgos alcanzados.

Por otra parte, la finalidad del desarrollo de la presente investigación es contribuir a mitigar y resolver los problemas socio-ambientales ya mencionados, cumpliendo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Dentro de los 17 objetivos globales planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la investigación responde al ODS número 15 que menciona “Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar los bosques de forma sostenible, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica”, Con la realización de la presente investigación se obtuvieron diferentes productos cartográficos que evidencian el nivel de deforestación forestal en cada Parque Nacional del Estado de México, mismos que son herramientas en la toma de decisiones para Instituciones Gubernamentales Ambientales.

Dentro de los objetivos específicos en el punto 15.4 menciona que para “2030, velar por la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica, a fin de mejorar su capacidad de proporcionar beneficios esenciales para el desarrollo sostenible”, en este sentido la presente investigación representa un esfuerzo por identificar las zonas que presentan el menor nivel de densidad forestal dentro los parques nacionales que conforman el área de estudio, con el objetivo de contribuir a mitigar esta problemática.

Por otra parte, el ODS 15.5 menciona: “Adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de la diversidad biológica y, para 2020, proteger las especies amenazadas y evitar su extinción”. Los ecosistemas forestales son el habitat para una gran diversidad de flora y fauna, el análisis planteado en esta tesis refleja los alcances obtenidos en cada parque y la importancia de estos espacios para la sociedad en general, el cuidado de los ecosistemas forestales es fundamental para que exista una buena calidad de vida de las personas que interactúan con estos espacios.

En relación con los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) propuestos por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), la tesis está enfocada al PRONACE Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad (SSyS) que promueve la producción transdisciplinaria de conocimiento científico, institucional y comunicativo para implementar acciones de conservación, restauración y uso sustentable de los sistemas socioecológicos y su riqueza biocultural. Asimismo, propone aplicar sus esfuerzos en la reconstrucción del tejido social y comunitario, el reforzamiento de la economía local y solidaria, así como en el bienestar sostenido de las personas y el medio ambiente. Para lograrlo, incluye la participación y el acompañamiento activo de los pueblos y comunidades del país. Bajo este enfoque, en el desarrollo de la investigación se presentaron diversas ponencias en congresos a nivel nacional e internacional, con la finalidad de dar a conocer los objetivos alcanzados en la tesis y promover la importancia de los parques nacionales pertenecientes al Estado de México. Con fines de retribución social se organizaron talleres en comunidades limitantes al área de estudio para exponer los problemas generados a partir de la deforestación dentro de los Parques Nacionales, y así dar a conocer a la sociedad el conocimiento científico que es parte fundamental para resolver la problemática ambiental.

Finalmente, en el Marco General del Sistema de Evaluación y Acreditación de la Educación Superior (SEAS) la tesis está enfocada en el criterio 4.2.1. Compromiso con la responsabilidad social, el cual menciona que la institución asume su responsabilidad y liderazgo social ante su propio contexto y las problemáticas más sensibles de las comunidades cercanas, con el propósito de contribuir a la

conformación de una sociedad más justa, libre, incluyente y pacífica, así como al desarrollo sostenible y al cuidado del medio ambiente, en el ámbito local, regional y nacional; y a la preservación, enriquecimiento y difusión de los bienes y valores de las diversas culturas y con la internacionalización solidaria.

La vinculación como capacidad de responder a la sociedad en el marco de dicho compromiso, se aplica a través de estrategias y acciones concretas en el ámbito de la docencia, la investigación y la extensión. Bajo este contexto, los productos obtenidos a partir de la investigación como lo son artículos científicos, capítulos de libro y cartografía, contribuyen a la divulgación de la problemática ambiental que enfrentan los parques nacionales del Estado de México actualmente, con el objetivo de crear conciencia en la sociedad en general sobre el cuidado y la importancia de los recursos naturales.

Antecedentes

En México, investigadoras como Patricia Balvanera han sido pioneras en el desarrollo de estudios sobre servicios ecosistémicos a escala nacional, sentando las bases teóricas y metodológicas para abordar la sustentabilidad de los ecosistemas desde una perspectiva integral. No obstante, a pesar del avance en esta línea de investigación, aún persiste una limitada cobertura de estudios aplicados, especialmente aquellos que incorporen enfoques especializados mediante herramientas cartográficas para representar y analizar las problemáticas socio-ambientales. Esta carencia evidencia la necesidad de profundizar en investigaciones que integren la dimensión territorial y permitan identificar con mayor precisión la distribución, transformación y vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos en diferentes regiones del país.

El estudio de los servicios ecosistémicos 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).

Para entender el mapeo de los servicios ecosistémicos, Uttam y Majumder (2016) 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 servicios ecosistémicos en pequeñas escalas, plataformas para la obtención de insumos como cubierta vegetal, ecosistemas y demás, en el continente europeo.

Por otra parte, 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. La problemática en el sitio es la creciente tendencia de conversión de usos de suelos ocupados por ecosistemas naturales hacia zonas urbanas agrícolas y ganaderas, finalmente concluyo que 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, ya que las problemáticas y necesidades de las comunidades no son similares entre sí.

Para entender el procedimiento de obtención y clasificación de imágenes de satélite se analizaron distintas investigaciones como la de Reza *et al.* (2021) en su investigación Cambios en el proceso de erosión. El parque Otomí –Mexico, Estado de México (2014 y 2018) realizaron la clasificación, cuantificación y representación cartográfica de las coberturas vegetales para los años 2014 y 2018 a partir de la carta de uso del suelo del INEGI. Los resultados muestran que, en las áreas con menor longitud de pendiente, menor precipitación, tipo de suelo menos erosionable y mayor cobertura vegetal, la erosión es menor; por el contrario, en las zonas con mayor longitud de pendiente, mayor precipitación, tipo de suelo más erosionable y menor cobertura vegetal, se presenta mayor nivel de erosión.

Camacho *et al.* (2021) efectuaron un análisis de la transformación de los ecosistemas entre los años 2000 y 2018, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), clasificación de imágenes satelitales, validación cartográfica y métodos de análisis espacial como la matriz de cambio o tabulación cruzada. El estudio se centró en cuatro municipios ubicados en la región poniente del Estado de México: Donato Guerra, San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria. Los resultados revelan un aumento en la cobertura de ecosistemas forestales, particularmente en bosques de oyamel, pino-encino y pino. En contraste, se identificó una reducción en la superficie destinada a agricultura de temporal y pastizales, lo cual refleja una dinámica de cambio en el uso del suelo con implicaciones ecológicas relevantes.

Escandón *et al.* (2018) llevaron a cabo un estudio para analizar los cambios en la cobertura forestal y el uso del suelo en el estado de Morelos, México, durante el periodo comprendido entre 2000 y 2009. Uno de los objetivos centrales del trabajo fue la elaboración de mapas de uso y cobertura del suelo, utilizando imágenes satelitales Landsat TM correspondientes a ambos años, con el fin de identificar las transformaciones ocurridas en un lapso de nueve años. El análisis permitió detectar las áreas con mayor grado de alteración, evidenciando una significativa pérdida de cobertura forestal. Esta degradación se relaciona directamente con otras problemáticas ambientales, como la modificación o desaparición del hábitat natural,

lo cual pone en riesgo la biodiversidad local, favoreciendo procesos de pérdida o extinción de especies.

Es importante señalar que la mayoría de las investigaciones mencionadas anteriormente no incorporan la fragmentación forestal como un factor clave en la determinación y cuantificación de la captura de carbono. En este sentido, este estudio aborda dicha variable como un elemento fundamental para obtener resultados más precisos y representativos.

Para tener un contexto de las variables para la estimación de la fragmentación forestal Antonio *et al.* (2008), en su investigación Fragmentación forestal en la subcuenca del río Pílon: diagnosticaron y evaluaron la fragmentación forestal usando indicadores de tamaño y forma, así como la distancia al vecino más próximo y el índice de intersección como indicadores de conectividad. La cartografía que realizaron fue mediante interpretación de imágenes de satélite Landsat de 1974 y 2000 (clasificación supervisada y estratificada). Los resultados muestran que las comunidades más afectadas por la fragmentación en su forma y tamaño son el bosque de oyamel y de encino, así como el huizachal, el matorral submontano y el bosque de pino.

Por otra parte, Calvo y Ortiz (2011) estudiaron el grado de fragmentación de la cobertura forestal de Costa Rica en las Unidades Fitogeográficas (UF) durante los años: 1997, 2000 y 2005. Las métricas de fragmentación calculadas fueron área remanente, número de parches (NP), distancia media al vecino más cercano (MNN) y densidad de parches (PD). Concluyeron que en el período 1997-2000 se deforestaron 9139 hectáreas, mientras que durante el período 2000-2005 se deforestaron 23699 hectáreas.

En este contexto, si bien se ha desarrollado una amplia variedad de estudios con enfoques y metodologías diversas para analizar estos espacios, aún persiste un vacío en el conocimiento respecto a la interrelación y correlación entre los distintos elementos que los conforman, particularmente en lo que se refiere a los servicios ecosistémicos que proveen. Esta falta de articulación limita una comprensión integral de su funcionamiento ecológico y de su valor socioambiental, dificultando el diseño de estrategias de manejo más efectivas y sustentables.

Por su parte Tellería y Díaz 2011, estudiaron a largo plazo los efectos de la fragmentación del hábitat en un mismo territorio mencionan que facilita la comprensión de procesos no siempre evidentes en aproximaciones puntuales y permite incorporar con rapidez nuevas ideas y metodologías en un laboratorio natural bien conocido. Concluyen que el estudio de los patrones (distribución de especies, condición corporal o éxito reproductivo) y el estudio de los procesos (efectos de la abundancia, estructura del hábitat, dispersión, depredación, gregarismo y comportamiento), utilizando diferentes modelos (árboles, aves, reptiles y mamíferos) y metodologías (observaciones, manipulación del hábitat, reintroducciones o marcadores moleculares).

Estos estudios se seleccionaron como referencia para definir las variables utilizadas en la estimación de la fragmentación forestal. Además de analizar los procedimientos aplicados, se consideraron aspectos teóricos que respaldan el análisis de la cartografía generada en cada etapa metodológica.

Con el objetivo de contextualizar el análisis de la captura de carbono a nivel internacional y nacional, se revisaron diversas investigaciones relacionadas con la estimación de este servicio ecosistémico. Estas investigaciones detallan los procesos metodológicos empleados para calcular los índices de captura de carbono, los cuales fueron retomados y adaptados para replicar y complementar las etapas metodológicas de este estudio. A continuación, se presentan las principales investigaciones consideradas.

En el ámbito internacional Carvajal y Andrade, (2020) abordan los servicios ecosistémicos desde una perspectiva de interacción con la sociedad donde los impactos a los servicios naturales han sido notables en las últimas décadas, estimaron la biomasa y el carbono total almacenado en siete sistemas ecosistemas forestales. Utilizaron un diseño experimental para elegir al azar parcelas temporales de muestreo, tomando datos en 832 árboles de 66 especies botánicas.

Los resultados que obtuvieron muestran una ganancia de carbono, mientras que los cambios contrarios, es decir deforestación, representan emisiones de CO₂.

De igual manera, Constante et al (2020) mencionan que la mitigación de los efectos negativos del cambio climático requiere disminuir las emisiones de gases de efecto

invernadero ejecutando acciones para la captura de carbono, de acuerdo con diversos acuerdos internacionales, bajo este panorama analizaron los contenidos de carbono almacenado en árboles de nogal, dentro de una de las zonas productoras del norte de México en el estado de Coahuila.

Realizaron un muestreo aleatorio en donde se tomaron variables, tales como el diámetro a 1.30 m del suelo y la altura total del arbolado, la biomasa por árbol fue estimada a través de un modelo volumétrico tomando en cuenta la densidad de la madera de nogal. Los resultados demostraron que el arbolado con una altura media de 9 m y un diámetro de 18 cm, presentó un almacenamiento de carbono promedio de 76.3 kg por árbol.

Ramírez y Chagna (2019) mencionan que el cambio de uso de suelo y la quema de combustibles fósiles incrementan las concentraciones de dióxido de carbono en el ambiente, este gas es considerado como el de mayor impacto sobre el calentamiento global por sus niveles de concentración en la atmósfera. Bajo este contexto calcularon la captura de carbono por la plantación de (*Eucalyptus grandis*), se cuantificó la biomasa de una muestra de 32 árboles mediante la ecuación alométrica derivada a partir de la combinación de las variables diámetro a 1,30 m y altura total ($D_{1.30}^2 h$). Los resultados que obtuvieron muestran un alto potencial de las plantaciones de (*Eucalyptus grandis*) como sumideros de carbono y como una alternativa de mitigación y adaptación al cambio climático.

Por otra parte, fue fundamental tener un contexto de los procesos metodológicos utilizados para calcular los índices de captura de carbono en los diferentes tipos de ecosistemas forestales por lo que se analizaron las siguientes investigaciones., García *et al.* (2021) mencionan que es importante conocer la estructura y la cantidad de carbono almacenado en los ecosistemas forestales. Este estudio se llevó a cabo en el ejido Chinatú, municipio Guadalupe y Calvo, Chihuahua, donde se realizó un muestreo aleatorio de ocho sitios distribuidos en 80.46 ha de superficie. Se analizó la estructura horizontal y clases diamétricas; el carbono almacenado en la biomasa aérea se estimó mediante ecuaciones alométricas, por medio del volumen para cada una de las especies. Concluyen que el bosque es homogéneo, sin dominancia amplia de alguna especie en particular y está en buen estado de conservación, ya

que en las categorías diamétricas menores hay abundante presencia de individuos pequeños que, posteriormente, sustituirán a la masa madura.

Ordoñez y De Jong (2021) aplicaron el modelo dinámico CO₂ Fix para Windows (versión 1.2) con el objetivo de estimar la captura potencial de carbono en la comunidad de Nuevo San Juan (NSJ). Los resultados indicaron una acumulación total de carbono de 74 toneladas por hectárea (tC/ha) en biomasa aérea y subterránea, 49 tC/ha en productos derivados de la biomasa y 94 tC/ha en el suelo. Además, el estudio incluyó el análisis de tres parámetros clave tiempo de vida útil de los productos, tasas de humificación y de descomposición para evaluar las variaciones potenciales en la captura y almacenamiento de carbono a lo largo del tiempo, lo que permitió comprender con mayor precisión la dinámica del carbono en sistemas forestales manejados de manera sostenible.

En el ámbito local Razo *et al.* (2013) en su investigación “Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México” determinaron el escenario para el almacenamiento y captura de carbono en bosques de (*Abies religiosa*) dentro del Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Para el proceso calcularon el contenido de carbono se hizo un inventario forestal en el 2011 en una superficie de 212.95 ha que comprende los escenarios 1) bosque conservado, 2) bosque medianamente alterado y 3) bosque alterado. Concluyeron que el bosque conservado en la mayoría de los árboles maduros y no muestran incrementos considerables en el almacenamiento de carbono.

El análisis comparativo de estudios previos permitió identificar las variables y métodos utilizados para estimar la captura de carbono, lo cual sirvió de base para definir el enfoque metodológico de esta investigación. La integración de herramientas como los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección facilitaron la estimación de la cobertura forestal y el impacto de las actividades antrópicas sobre la vegetación natural en el periodo analizado.

Planteamiento del Problema

Los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México están sufriendo una creciente degradación ambiental, principalmente debido a la presión ejercida por la expansión urbana en sus límites y al interior de ellas. Esta pérdida de cobertura forestal se manifiesta en la transformación del territorio a nivel local, lo que conlleva una significativa reducción de los servicios ambientales, afectando de manera directa e indirecta la calidad de vida de las comunidades (Martínez *et al.* 2020).

Actualmente, los Parques Nacionales del Estado de México enfrentan una regulación deficiente por parte de las autoridades gubernamentales, debido a diversos factores. Entre estos destaca la falta de coordinación entre los municipios que conforman estas Áreas Naturales Protegidas, especialmente en aquellos parques que comparten territorio con dos o más estados (Lagunas de Zempoala, Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla y Tepeyac). Esta falta de gobernanza ha propiciado problemas como la tala ilegal y los cambios de uso del suelo, por usos destinados a actividades agrícolas, ganaderas y comerciales, lo que agrava la degradación ambiental en estos espacios.

La implementación efectiva del marco legal ambiental es un factor crucial para la conservación y recuperación de los Parques Nacionales. La transformación de los ecosistemas forestales en estas áreas ha provocado un notable desequilibrio ambiental, afectando su capacidad para brindar servicios ecosistémicos esenciales para las comunidades locales y regionales.

Los estudios realizados en el contexto geográfico de los Parques Nacionales del Estado de México reportados por autores como Cortina (2018), Luque *et al.* (2019), y Gutiérrez, (2013) entre otros, no han incorporado dentro de sus objetivos de estudio fundamentos metodológicos que permitan determinar la fragmentación de la masa forestal, lo que limita el análisis de la transformación de los bosques.

El diseño e instrumentación metodológica de las investigaciones presentadas en los antecedentes limitan el análisis de la densidad forestal para la cuantificación de la captura de carbono, lo que minimiza el problema real que enfrentan las áreas naturales protegidas actualmente.

Preguntas de Investigación

En la presente investigación se dieron respuestas a las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles son los componentes biofísicos y socio-económicos que conforman los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México?
- ¿Cuáles son los principales problemas ambientales, sociales y económicos que enfrentan los PNEM?
- ¿Qué grado de fragmentación presentan los ecosistemas de los Parques Nacionales del Estado de México?
- ¿Cuáles son los niveles de carbono capturado que presentan los Parques Nacionales del estado de México?
- ¿Cómo el análisis de la fragmentación forestal permite la estimación del carbono capturado en los ecosistemas forestales con mayor precisión?

Hipótesis

El análisis y cálculo de la fragmentación de los ecosistemas forestales, permite diseñar una propuesta teórica-metodológica viable para estimar con mayor precisión la cantidad de carbono capturado en los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México.

Justificación

Los Parques Nacionales del Estado de México tienen una gran relevancia ambiental, ya que proporcionan diversos servicios ecosistémicos esenciales para las poblaciones de los municipios que los rodean. Además, estos espacios albergan una rica biodiversidad de flora y fauna, lo que contribuye al mantenimiento del equilibrio ambiental en el territorio (Vargas, 1984).

Desde una perspectiva económica, los Parques Nacionales proporcionan materias primas esenciales para el desarrollo de las comunidades locales y ofrecen condiciones favorables para actividades agrícolas y ganaderas. La relevancia de esta investigación radica en el cálculo y ubicación de la fragmentación forestal en los bosques de los parques nacionales, y así calcular con mayor precisión el carbono capturado en los ecosistemas forestales.

La justificación de esta investigación se centra en la necesidad de identificar zonas prioritarias de atención mediante el análisis de la fragmentación forestal y la estimación de la captura de carbono. Para ello, se diseñó una propuesta teórica-metodológica que permitió determinar el grado de fragmentación y calcular el carbono capturado con mayor precisión. La incorporación de la fragmentación forestal en la estimación de la captura de carbono permitió obtener resultados a mayor detalle representados cartográficamente.

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de estudios que evidencien la degradación de los recursos naturales en los Parques Nacionales del Estado de México. Su propósito es proporcionar herramientas útiles para la toma de decisiones en los ámbitos gubernamental y público.

La validación en campo permitió validar la propuesta metodológica para la identificación de áreas forestales fragmentadas debido a actividades antrópicas dentro de Parques Nacionales, esto permitió establecer zonas prioritarias de atención vinculadas con el desarrollo sustentable (Mas *et al.* 2003).

Finalmente, con este trabajo de investigación se aportaron fundamentos metodológicos desde el campo de estudio de las Ciencias Ambientales para el desarrollo del análisis de la fragmentación forestal y la captura de carbono por medio de sistemas de información geográfica.

Objetivos

Objetivo general

Generar una propuesta teórica-metodológica para calcular la captura de carbono de los Parques Nacionales del Estado de México, mediante la evaluación del grado de fragmentación de los ecosistemas forestales, a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Objetivos específicos

1. Realizar un diagnóstico integral de los componentes biofísicos que conforman los Parques Nacionales del Estado de México, con base en una caracterización geográfica ambiental, mediante SIG, foto interpretación cartográfica y análisis estadístico.
2. Representar cartográfica, tabular y textualmente la diversidad ecosistémica de los Parques Nacionales del Estado de México, mediante SIG, foto interpretación cartográfica y análisis estadístico.
3. Determinar el grado de fragmentación de los ecosistemas forestales y calcular la captura de carbono de los Parques Nacionales del Estado de México, mediante SIG, foto interpretación cartográfica y análisis estadístico
4. Realizar un análisis de la Problemática Integral Ambiental, Económica y Social de cada Parque para identificar las principales causas que limitan la conservación de los Parques Nacionales en el Estado de México, mediante la observación directa en campo y entrevistas no estructuradas.
5. Validar la propuesta teórica-metodológica mediante el análisis de los fundamentos teóricos, de las etapas metodológicas y de las relaciones entre ellos.

CAPÍTULO I.
MARCO LEGAL

1.1 Contexto Jurídico de los Parques Nacionales 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 (CONANP, 2018).

En el año 2000 se estableció la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) como un órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), con la responsabilidad de gestionar y conservar las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de carácter federal en México. Según lo establecido en el Artículo 44 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), las ANP comprenden territorios nacionales —o aquellos bajo soberanía o jurisdicción de la Nación— en los que los ecosistemas se mantienen en condiciones cercanas a su estado original, o bien, cuyas funciones ecológicas requieren ser preservadas o restauradas. Estas zonas están sujetas a un régimen legal especial que garantiza su protección, conforme a dicha ley y otras disposiciones ambientales aplicables (SEMARNAT, 2019).

Actualmente, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) tiene a su cargo la administración de 203 Áreas Naturales Protegidas (ANP) de carácter federal, que en conjunto abarcan una superficie de 91,608,327 hectáreas. Además, brinda apoyo a 395 Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), las cuales suman 701,760 hectáreas, fortaleciendo así los esfuerzos de conservación impulsados por comunidades, propietarios privados y organizaciones civiles en todo el país.

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 7 categorías de Áreas Naturales Protegida (Parques Nacionales, Reservas de la Biosfera, Áreas de Protección de Flora y Fauna, Áreas de Protección de Recursos Naturales, Monumentos Naturales, Santuarios, Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación) (CONANP, 2023).

Según la CONANP (2023), los Parques Nacionales representan uno de los instrumentos de política ambiental con mayor respaldo jurídico para la conservación de la naturaleza. En este sentido, el marco jurídico-administrativo que regula los Parques Nacionales en el Estado de México tiene como propósito identificar y articular la normatividad vigente a nivel federal, estatal y municipal. Esto con el fin de que las disposiciones legales orienten y regulen de manera efectiva las acciones sociales, económicas y de gestión que se desarrollan dentro de estos espacios naturales protegidos.

El Estado de México cuenta con diversas Áreas Naturales Protegidas (ANP), es importante mencionar que nueve cuentan con la categoría de Parque Nacional así mismo comparten superficie con los estados de Puebla, Morelos, Michoacán y Ciudad de México, sin embargo de los nueve parques solo tres cuentan con su Plan de Manejo que son instrumentos que determinan las estrategias de conservación y uso de las Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2023).

1.2 Leyes y reglamentos relacionados con la conservación de los Parques Nacionales en México

Los Parques Nacionales del Estado de México por reglamento deben de contar con su Plan de Manejo, sin embargo en la mayoría de los casos no es así, es importante recalcar que estas zonas naturales se respaldan legalmente en las siguientes leyes y reglamentos descritos a detalle en la Agenda Ecológica Federal 2024.

1.2.1 - Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LEEGEPA)

La presente ley es reglamentaria de las disposiciones de la constitución política de los Estados Unidos Mexicanos que se refiere a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto proporcionar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

Garantizar el derecho a de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar.

Definir los principios de política ambiental y los instrumentos para su aplicación.

La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente.

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de áreas naturales protegidas

El presente ordenamiento es de observancia general en todo el territorio nacional, la los efectos de este reglamento se estará a las definiciones que se contienen en la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente:

Administración: Ejecución de actividades y acciones orientadas al cumplimiento de los objetivos de conservación y preservación de las áreas naturales protegidas, a través del manejo gestión, uso racional de los recursos humanos, materiales, y financieros. Aprovechamiento: utilización de los recursos naturales de manera extractiva y no extractiva. Autoconsumo: aprovechamiento de ejemplares, partes y derivados extraídos del medio natural sin propósito comerciales. Capacidad de carga: estimación de la tolerancia de un ecosistema al uso de sus componentes, tal que no rebase su capacidad de recuperarse en el corto plazo son la aplicación de medidas de restauración o recuperación para reestablecer el equilibrio ecológico.

1.2.2 Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

La presente ley reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, sus disposiciones son de orden e interés público y de observancia general en todo territorio nacional y tiene por objeto regular y fomentar el manejo integral y sustentable de los territorios forestales, la conservación, protección, restauración, producción, ordenación el cultivo, así como distribuir las competencias que en materia forestal corresponden a la federación, las entidades federativas, municipios, y demarcaciones territoriales de la ciudad de México. Cuando se trate de recursos forestales cuya propiedad o legítima posesión corresponda a los pueblos y comunidades indígenas se observa lo dispuesto por el

Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

El presente ordenamiento tiene por objeto reglamentar la ley general de desarrollo forestal sustentable en el ámbito de competencia federal en materia de instrumentos de política forestal, manejo y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas forestales del país y de sus recursos así como su conservación protección y restauración.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental

El presente trabajo, titulado “Captura de carbono en los Parques Nacionales del Estado de México”, se sustenta en la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy (1976), cuyo enfoque holístico e integrador permite analizar los sistemas naturales y sociales como un todo interconectado. Esta perspectiva teórica resulta especialmente valiosa para estudiar las relaciones entre la sociedad y los parques nacionales del Estado de México, donde las interacciones humanas y ambientales desempeñan un papel crucial en el proceso de captura de carbono. A partir de este enfoque, se busca comprender cómo estas dinámicas contribuyen al equilibrio ecológico.

La Teoría General de Sistemas (TGS) es fundamental en este análisis, ya que representa un enfoque interdisciplinario que busca identificar las propiedades comunes de los sistemas presentes en todos los niveles de la realidad. Según Bertalanffy (1976), la TGS permite unificar conceptos y principios aplicables a diversas disciplinas académicas, facilitando así el estudio de fenómenos complejos mediante una perspectiva integradora y holística.

Las investigaciones holísticas 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).

En esta investigación se examinaron las interacciones entre los componentes naturales y sociales presentes en los Parques Nacionales del Estado de México. En particular, el servicio ecosistémico de captura de carbono fue abordado como un sistema complejo, dado que su funcionamiento depende de múltiples factores interrelacionados, cuyas interacciones pueden ser tanto positivas como negativas entre sí o con otros subsistemas. Como señala Rodríguez (2017), un sistema complejo exhibe un comportamiento emergente que no puede explicarse únicamente a partir de las propiedades individuales de sus componentes, sino que surge de la dinámica conjunta de sus partes.

Uno de los enfoques científicos propuestos por la Teoría General de Sistemas (TGS) es el enfoque holístico o sintético, el cual, según Rivadeneira (2015) se centra en el estudio del sistema como un todo, enfatizando las relaciones entre sus componentes y las propiedades emergentes que surgen de dicha interacción. En el marco de esta investigación, dicha perspectiva resulta pertinente, ya que el objeto de estudio se caracteriza por intercambios constantes de materia y energía entre los sistemas natural, social, económico y cultural, lo que permite identificarlo como un sistema abierto, dinámico y en permanente interacción con su entorno.

Un sistema abierto es aquel que intercambia materia, energía e información con su entorno. En el caso de un ecosistema forestal, este se considera un sistema abierto porque mantiene un flujo constante de elementos esenciales para su desarrollo y funcionamiento.

Según Peralta (2016), los sistemas abiertos se caracterizan por intercambiar materia y energía con su entorno, condición esencial para la supervivencia de los sistemas biológicos. Estos requieren incorporar recursos del exterior y, al mismo tiempo, liberar energía generada a través de procesos como la respiración celular. En el contexto de esta investigación, los servicios ecosistémicos analizados actúan como elementos clave que proveen productos intangibles, fundamentales para el funcionamiento integral no solo del sistema natural, sino también de los sistemas social y económico, los cuales mantienen relaciones de interdependencia.

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.

La Teoría General de Sistemas (TGS) se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad y, al mismo tiempo, como una orientación hacia una práctica estimulante para formas de trabajo transdisciplinarias.

En tanto paradigma científico, la TGS se caracteriza por su perspectiva holística e integradora, en donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir

de ellas emergen. En tanto práctica, la TGS ofrece un ambiente adecuado para la interrelación y comunicación fecunda entre especialistas y especialidades (Arnold y Osorio 1998).

De acuerdo con Rodríguez (2014) menciona que la TGS puede ser desagregada, dando lugar a dos grandes grupos de estrategias para la investigación en sistemas generales:

- a. Las perspectivas de sistemas en donde las distinciones conceptuales se concentran en una relación entre el todo (sistema) y sus partes (elementos).
- b. Las perspectivas de sistemas en donde las distinciones conceptuales se concentran en los procesos de frontera

La TGS busca formular principios válidos para sistemas generales (antes llamados objetos), sea cual sea la naturaleza de sus componentes y las fuerzas interactivas o de organización presentes en ellas. No solo se parecen aspectos y puntos de vista generales en diferentes ciencias, con frecuencia hallamos leyes formalmente idénticas o isomorfas en diferentes campos.

En muchos casos, sin importar la naturaleza de las entidades envueltas. Parece que existen leyes generales de sistemas aplicables a cualquier sistema de determinado tipo, sin importar las propiedades particulares del sistema ni de los elementos participantes (Bertalanfy, 1976).

Los sistemas se definen en función de su auto-organización y la organización radica en el hecho de que ocurren interacciones entre los elementos y entre éstos con el sistema mismo y con su entorno. Así, la interacción se entiende como la acción de interdependencia.

La TGS implica una revolución en las formas de pensamiento que debe ir más allá de la descripción simple y generar principios y acciones definidas. Tal vez, una de las razones por las que la TGS no es una práctica corriente en el manejo de los fenómenos naturales o socio-económicos se deba a la dificultad en el manejo cuantitativo o cualitativo de las interacciones y en el poder concebir al sistema como la globalidad que es, a diferencia de los elementos que podemos observar y medir separadamente (Morin, 1977).

2.2 Teoría de Sistemas Complejos.

El estudio de la complejidad y los sistemas complejos constituye un campo multidisciplinario amplio, aunque aún carece de una integración completa. Dentro de este marco, se destaca el enfoque sistémico-cibernético, que aborda fenómenos de diversos dominios desde la perspectiva de los sistemas. Este enfoque, desarrollado por destacados exponentes como Ludwig von Bertalanffy, Ross Ashby, Norbert Wiener, Gregory Bateson y Heinz von Foerster, ha sido fundamental para comprender las dinámicas complejas (Becerra, 2020).

En particular, esta teoría ha permitido analizar las interacciones entre el medio natural y social, identificando los factores que influyen en dichas relaciones y ofreciendo una visión integral de los procesos que las sustentan.

Los sistemas complejos, al carecer de límites definidos tanto en lo geográfico como en lo problemático, se consideran sistemas abiertos y difusos. Por ello, es necesario establecer delimitaciones operativas que, aunque puedan ser arbitrarias, permitan estructurar el objeto de estudio de manera coherente. Esto implica definir con claridad los límites del sistema y los criterios de inclusión o exclusión de elementos e interacciones relevantes (Martínez, 2021).

El punto medular en la teoría de sistemas complejos es la relación entre el objeto de estudio y las disciplinas a partir de las cuales se realiza el estudio. En esta relación está asociada la incapacidad de tomar en cuenta solo aspectos específicos de un fenómeno, proceso o situación a partir de una disciplina particular (Maldonado, 2014).

En el mundo real las situaciones y los procesos no pueden ser relacionados exclusivamente con alguna disciplina, dado que son una realidad compleja. En este contexto un sistema complejo es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizada como una totalidad organizada, en la cual los elementos no son separables y por lo tanto no pueden ser estudiados aisladamente (Martínez, 2021). La complejidad de un sistema radica en el futuro o futuros posibles que tiene o puede tener y es, genéricamente, este futuro el que complejiza a los fenómenos en un momento determinado. Es el futuro o futuros lo que, por lo demás, permite comprender capacidades de los sistemas complejos tales como el aprendizaje y la adaptación.

2.3 Teoría General de Sistemas y Teoría de Sistemas Complejos en la comprensión de los Parques Nacionales

Abordar las problemáticas ambientales contemporáneas dentro de un parque nacional exige una articulación efectiva entre múltiples factores y disciplinas. Solo mediante un enfoque integral es posible comprender la complejidad inherente de los problemas asociados a las Áreas Naturales Protegidas (ANP). En este contexto, los parques nacionales pueden ser analizados desde la Teoría General de Sistemas (TGS) y la Teoría de Sistemas Complejos (TSC), ya que se configuran como sistemas socioecológicos que integran naturaleza, sociedad, cultura y gobernanza.

Teoría General de Sistemas (TGS)

Desde la perspectiva de la TGS, un parque nacional se concibe como un sistema abierto e interrelacionado, compuesto por múltiples elementos que interactúan entre sí y con su entorno. Este sistema intercambia materia (como agua y nutrientes), energía (solar, térmica), seres vivos (migración de especies) y personas (visitantes, comunidades locales), manteniendo un flujo constante con su contexto regional y global.

El parque está conformado por diversos subsistemas interconectados, como los microecosistemas, la flora y fauna, las cuencas hidrográficas, los suelos, y los usos del suelo, los cuales interactúan y se influyen mutuamente. Además, al ser un territorio definido institucionalmente, cuenta con políticas públicas, normativas y mecanismos de financiamiento que estructuran su gestión.

Desde la TGS, los parques nacionales se abordan como sistemas abiertos, jerárquicamente organizados, donde los subsistemas (naturales, sociales, culturales y administrativos) interactúan de manera estructurada a través de flujos de energía, materia e información. Este enfoque proporciona herramientas útiles para identificar componentes clave, delimitar funciones, establecer mecanismos de regulación y definir metas de conservación a largo plazo.

Desde esta teoría, la finalidad de un ANP es mantener equilibrios ecológicos, lo cual se logra mediante estrategias de manejo, control de visitantes, vigilancia y monitoreo ambiental, con el objetivo de conservar la biodiversidad y promover el uso sostenible de los recursos naturales.

Teoría de Sistemas Complejos (TSC)

Por su parte, la Teoría de Sistemas Complejos permite analizar los parques nacionales como sistemas dinámicos, adaptativos y no lineales, donde múltiples elementos interactúan generando propiedades emergentes y respuestas impredecibles.

Por ejemplo, cambios aparentemente menores como modificaciones en el uso del suelo dentro o en el entorno del parque pueden desencadenar alteraciones significativas, tales como pérdida de hábitat, migración de especies o conflictos sociales. La biodiversidad del parque no se explica únicamente por la suma de sus componentes, sino por la interacción entre ellos.

Asimismo, los parques responden y se adaptan a presiones externas como el cambio climático, el turismo masivo o las nuevas políticas de conservación. En algunos casos, estos sistemas pueden autorregularse a través de procesos internos de autoorganización, sin requerir una intervención externa directa.

Un aspecto clave en la TSC es la retroalimentación. Esta puede ser positiva o negativa: por ejemplo, un aumento en el turismo puede generar mayores ingresos para la conservación, pero si no se gestiona adecuadamente, puede producir degradación ambiental, pérdida de biodiversidad y, en consecuencia, una reducción del atractivo turístico del parque.

Los límites geográficos de los parques nacionales no siempre coinciden con los límites ecológicos reales, ya que muchos forman parte de corredores biológicos más amplios, como es el caso del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, que pertenece al Corredor Biológico Chichinautzin.

2.4 Integración teórica

La integración de la Teoría General de Sistemas (TGS) y la Teoría de Sistemas Complejos (TSC) constituye una base teórico-metodológica sólida para comprender y gestionar la complejidad de los parques nacionales en el contexto actual. Esta integración no solo permite entender la estructura y funcionamiento de los sistemas socioecológicos, sino también anticipar, interpretar y responder a las transformaciones ambientales, sociales y políticas que los afectan.

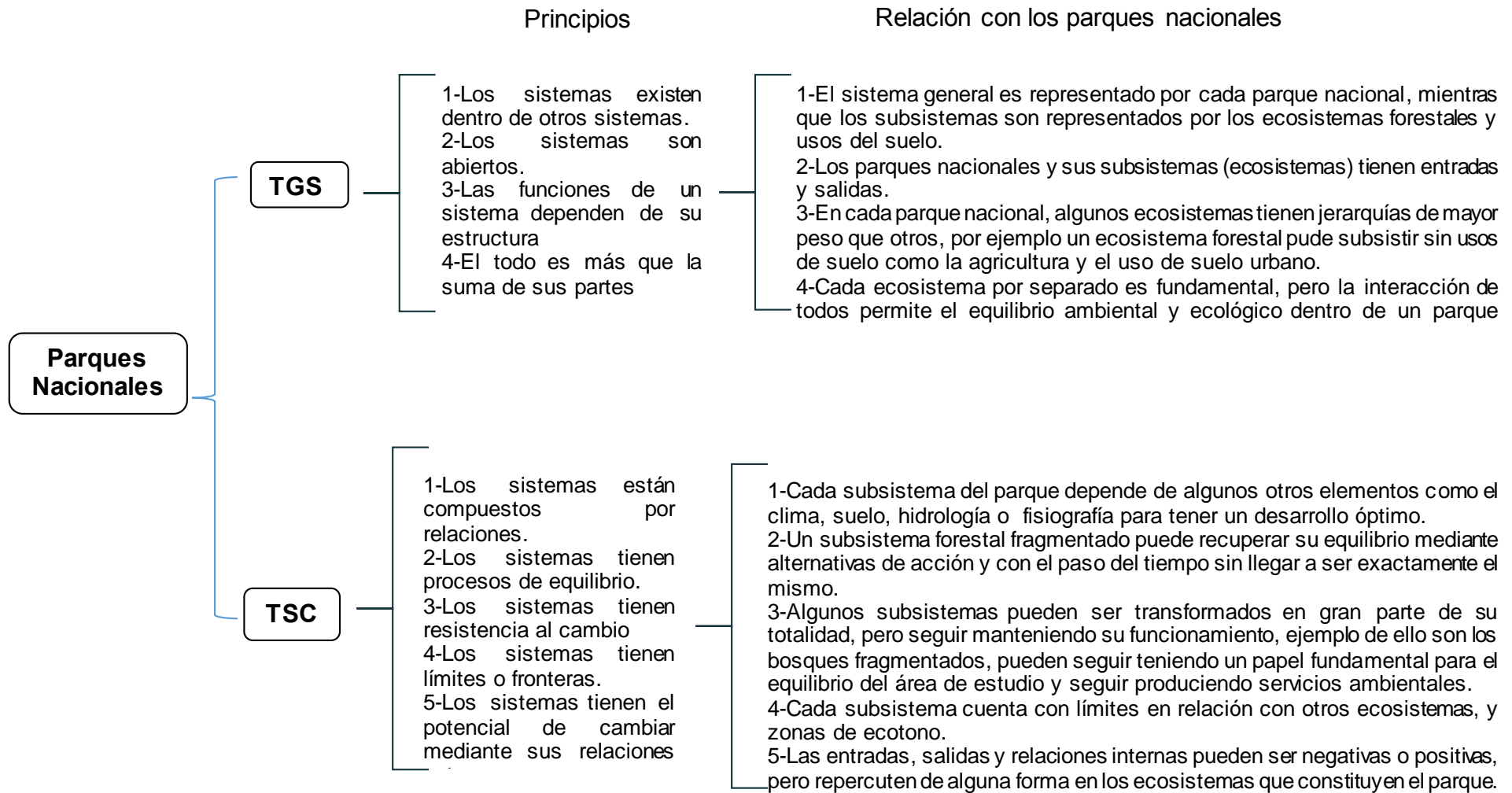
Por otro lado, la TSC ofrece una perspectiva más dinámica y realista frente a la naturaleza incierta y cambiante de los sistemas ecológicos y humanos. Permite analizar los procesos no lineales, la retroalimentación, la emergencia de patrones, la autoorganización y la resiliencia del sistema frente a perturbaciones. Esta mirada es especialmente valiosa en escenarios de alta incertidumbre como los que enfrentan hoy las áreas protegidas ante la tala clandestina, la presión antrópica, el turismo descontrolado y la fragmentación ecológica.

La articulación de ambas teorías hace posible una visión sistémica e integrada del parque nacional: una que reconoce tanto su diseño institucional y funcional (TGS), como su comportamiento adaptativo y evolutivo (TSC). Esto se traduce en estrategias de manejo analíticas, que combinan planificación estructurada con capacidad de adaptación y monitoreo participativo.

Finalmente, este enfoque integrador promueve una gobernanza ambiental más inclusiva y efectiva, que reconoce la diversidad de actores, saberes y escalas involucradas en la gestión de las ANP. De este modo, se favorece no solo la conservación de la biodiversidad, sino también el fortalecimiento de los vínculos entre sociedad y naturaleza, fundamentales para avanzar hacia una sostenibilidad real y contextualizada.

El Diagrama 1 ilustra las conexiones entre la TGS y la TSC en relación con el análisis de parques nacionales, describiendo los fundamentos teóricos que sustentan la caracterización ambiental del área de estudio. Cada principio de ambas teorías ha sido fundamental para describir los elementos, dinámicas y relaciones que conforman los subsistemas ecológicos, sociales y de gestión del parque.

Diagrama 1. Principios de las TGS y TSC en relación con los parques nacionales



Fuente: elaboración propia con base en Bertalanfiy, (1976) y García (2006).

2.5 Disciplinas que sustentaron la investigación

2.5.1 Las Ciencias Ambientales como vínculo entre sociedad y el ambiente

Las Ciencias Ambientales (CA) constituyen un entramado interdisciplinario que puede ser entendido tanto como un arte técnico, que valora los saberes manuales y étnicos, como un sistema ordenado de principios que privilegia la abstracción.

En el contexto de esta investigación, las CA se utilizan como una herramienta clave para analizar las relaciones entre el ser humano y la naturaleza, estudiando cómo las actividades antrópicas impactan el entorno natural (Morales, 2022).

Bajo este contexto, las características de las CA permitieron analizar, desde un enfoque multidisciplinario y metodológico, las relaciones del ser humano con la naturaleza. Este enfoque permitió estudiar como las actividades humanas han impactado de manera negativa sobre los ecosistemas forestales. Se estudiaron los parques nacionales mediante un enfoque interdisciplinario que retoma elementos de ciencias como la ecología, la geografía, la climatología, la biología, la geología, la sociología y otras disciplinas.

2.5.2 La Geografía como ciencia multidisciplinaria

Según Álvarez (2012), la geografía como disciplina científica surgió con el propósito de comprender la distribución, localización e interrelación de objetos, fenómenos y procesos en la superficie terrestre. A lo largo de su evolución, esta búsqueda se ha nutrido de una diversidad de enfoques tanto científicos como no científicos, los cuales han enriquecido su estructura teórica y metodológica, pero también han generado tensiones epistemológicas recurrentes. Estas tensiones han dado lugar a múltiples debates en torno a su objeto de estudio, sus funciones y su delimitación disciplinar.

La Geografía al ser una ciencia tiene ramas que se emplean en distintas disciplinas para obtener una investigación holística. El análisis del servicio ecosistémico captura de carbono permite sustentar la investigación bajo las características de la geografía ambiental con el fin de comprender la relación de las actividades antropogénicas en el ambiente (Aguilar y Contreras, 2009).

La geografía permitió analizar los parques nacionales y las relaciones entre sus elementos a través de un enfoque espacial, físico y humano, permitiendo comprender su distribución, dinámica y las interacciones con el entorno.

Principales enfoques geográficos en el análisis de los ecosistemas forestales:

- Geografía física: Estudia los factores climáticos, edafológicos (suelo), hidrológicos y geomorfológicos que influyen en la distribución y desarrollo de los ecosistemas forestales. A través de este enfoque se analizaron elementos como la altitud, temperatura, precipitaciones y tipo de suelo.
- Geografía biogeográfica: Examina la distribución de la flora y fauna dentro de los ecosistemas forestales. Este enfoque permitió estudiar la biodiversidad, los patrones de dispersión de especies y los efectos de factores ambientales en su conservación.
- Geografía del paisaje: Estudia los ecosistemas forestales como paisajes dinámicos, analizando los cambios en la cobertura forestal a lo largo del tiempo mediante imágenes satelitales y SIG (Sistemas de Información Geográfica). Permite identificar patrones de fragmentación, degradación y restauración de los bosques.
- Geografía ambiental: Evalúa los impactos de las actividades humanas en los ecosistemas forestales y sus consecuencias en el clima, el ciclo del agua y la biodiversidad. Mediante este enfoque se propusieron estrategias para la conservación y el manejo sostenible de los bosques, integrando aspectos ecológicos y socioeconómicos.

En resumen, la geografía permite un análisis integral de los ecosistemas forestales al estudiar sus elementos físicos, biológicos y humanos, ayudando a comprender su estructura, funcionamiento y las estrategias necesarias para su conservación y uso sostenible.

2.5.3 Ecología

La Ecología se define como el estudio de la estructura y función de la naturaleza (Odum 1972). La Ecología es el estudio científico de las interacciones que determinan la distribución y abundancia de los organismos (Krebs 2008).

La Ecología es una rama de la biología que estudia la distribución, abundancia y productividad de los organismos vivos y su interacción con otros organismos y con su ambiente físico (Kimmins 1987).

Dentro de esta ciencia existe la ecología forestal que es el estudio de los ecosistemas de bosques tanto a escala de rodal como de paisaje, ecosistemas en los que procesos ecológicos están dominados por árboles. Los bosques son mucho más que árboles.

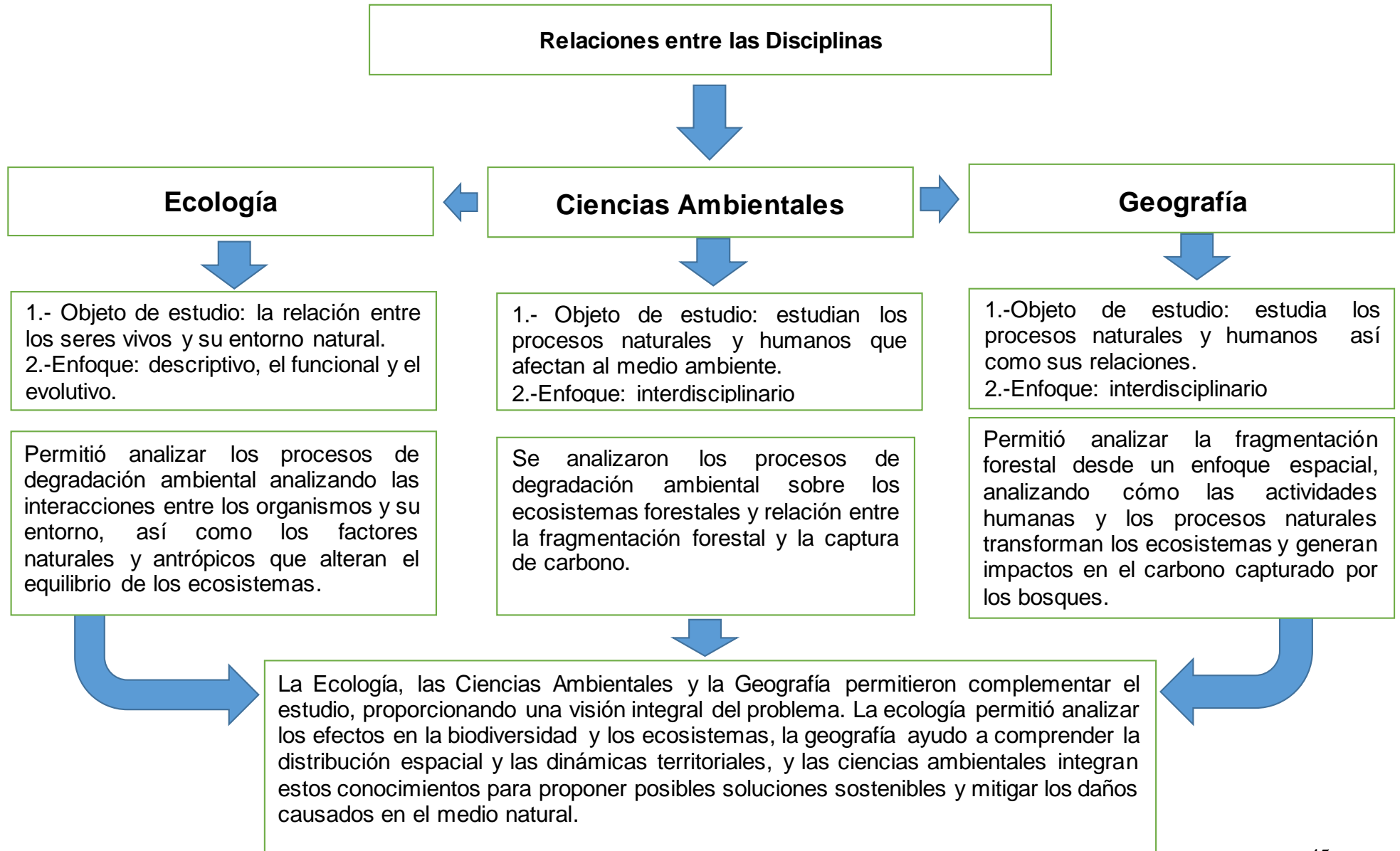
Los paisajes dominados por árboles incluyen ecosistemas acuáticos y terrestres, los cuales son sistemas complejos con componentes y procesos físicos y biológicos vinculados que interactúan entre sí (Kimmins 2005).

La ecología permitió estudiar las relaciones existentes entre los elementos que conforman los parques nacionales, ya que están estrechamente relacionados los organismos y su entorno, mientras que los ecosistemas forestales representan complejas redes de relaciones biológicas, físicas y químicas.

Dentro de las principales relaciones entre la ecología y los ecosistemas forestales destacan la estructura y dinámica del ecosistema es decir la ecología analiza la composición y organización de los ecosistemas forestales, incluyendo sus niveles tróficos (productores, consumidores y descomponedores). La ecología evalúa cómo actividades humanas como la deforestación y la contaminación afectan la biodiversidad y el funcionamiento de los bosques.

En el diagrama 2 se presentan los fundamentos de las ciencias que se retomaron para explicar las relaciones entre los elementos que conforman el área de estudio.

Diagrama 2. Disciplinas que sustentaron la investigación



2.6 Desarrollo del concepto de los Servicios Ecosistémicos (SE).

El concepto de Servicios Ecosistémicos (SE) ha evolucionado con el tiempo en respuesta al aumento de los impactos en el medio natural y la creciente preocupación global por su mitigación. En la bibliografía internacional, se utilizan los términos Servicios Ambientales (SA) y Servicios Ecosistémicos (SE) de manera frecuente; sin embargo, no existe un consenso claro sobre sus diferencias conceptuales ni sobre el origen específico de cada uno. Esta falta de uniformidad en la definición y distinción de ambos términos ha generado debates en la comunidad científica y académica. 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 para 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).

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).

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) (CONABIO, 2018).

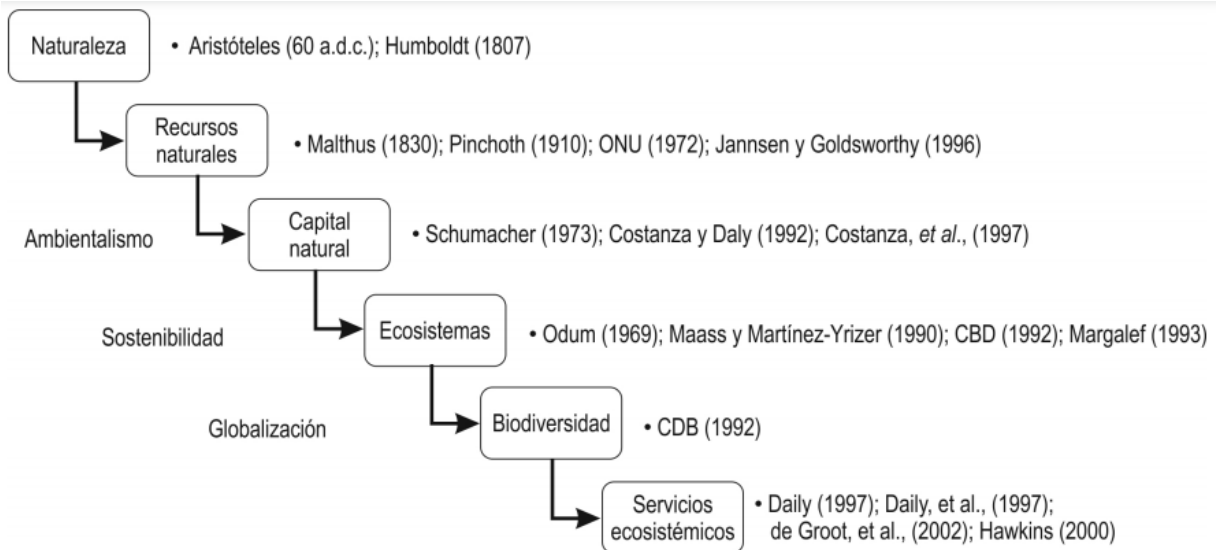
Si bien en un principio se creía que estos eran inagotables, en la actualidad existe una visión totalmente opuesta, ya que se reconoce la necesidad de conservar los ecosistemas debido a su fragilidad y pérdida acelerada de sus extensiones, limitando así la posibilidad de brindar bienes y servicios, y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

En México, Balvanera (2009) estableció un referente fundamental para el desarrollo de investigaciones a nivel nacional sobre servicios ecosistémicos. Aunque existe una creciente producción académica en torno a temas de sustentabilidad ecológica, aún persiste una limitada disponibilidad de estudios especializados que integren herramientas cartográficas para representar espacialmente las problemáticas ambientales o variables clave, lo cual representa una brecha metodológica importante en el análisis territorial de los ecosistemas.

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).

Como se muestra en el diagrama 3, 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.

Diagrama 3. Evolución conceptual del enfoque: servicios ecosistémicos



Fuente: Caro y Torres, (2015).

En el diagrama anterior se observa que los servicios ecosistémicos en un inicio se abordaban a partir de la idea de la naturaleza sin embargo, es importante precisar que si bien se analizó desde distintas perspectivas como lo recalcan los autores ya mencionados, el interés se vuelve mutuo por cuidar y preservar los SE.

2.7 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, 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.

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	

Fuente: MEA, (2005).

En la tabla 1 se pueden observar los cuatro tipos de servicios ecosistémicos que brindan los parques nacionales del Estado de México; de acuerdo con la MEA (2005) se clasifican en:

2.7.1 Servicios ecosistémicos de provisión:

Son recursos tangibles y finitos que se contabilizan y consumen, las personas los obtienen directamente de los ecosistemas, además pueden ser o no renovables, entre ellos se encuentra la provisión de agua para consumo humano, materiales genéticos, productos bioquímicos, recursos medicinales, la producción de biomasa y de alimentos (Braat y de Groot, 2012).

2.7.2 Servicios ecosistémicos de regulación:

Mantienen las funciones naturales de los ecosistemas, a través de las cuales se regula el ambiente, pone énfasis en las condiciones biofísicas cambiantes dentro de los ecosistemas así como en las interacciones (procesos) entre éstas y sus componentes bióticos (especies) Algunos de ellos son la regulación climática, de gases efecto invernadero, de las inundaciones, de la calidad del aire, el control de la erosión, regulación hídrica, mitigación de riesgos, amortiguamiento de la frecuencia de enfermedades, control biológico y polinización (Fisher y Turner, 2008).

2.7.3 Servicios ecosistémicos de soporte

Son aquellos que se relacionan con el subconjunto de funciones del ecosistema, estrechamente relacionadas con la capacidad de los procesos y permiten la generación de los otros SE, estos pueden o no tener implicaciones directas sobre

el bienestar humano; además, pueden ser o no renovables, como la fotosíntesis, el mantenimiento de la biodiversidad, la formación de suelo, la producción primaria, la generación de oxígeno y de nutrientes (Braat y de Groot, 2012).

2.7.4 Servicios ecosistémicos culturales

Se trata de beneficios no materiales, tanto tangibles como intangibles, que están estrechamente vinculados con los valores culturales y las formas de comportamiento a nivel individual o colectivo. Estos servicios ecosistémicos están profundamente influenciados por el contexto sociocultural, lo que implica que su percepción y valoración varían entre personas y comunidades. Los individuos los experimentan a través del enriquecimiento espiritual, la contemplación estética de paisajes naturales o transformados, el aprendizaje y desarrollo cognitivo, así como mediante actividades de recreación, ecoturismo e inspiración en la naturaleza (Fisher *et al.*, 2009).

2.8 Captura de carbono en los ecosistemas forestales

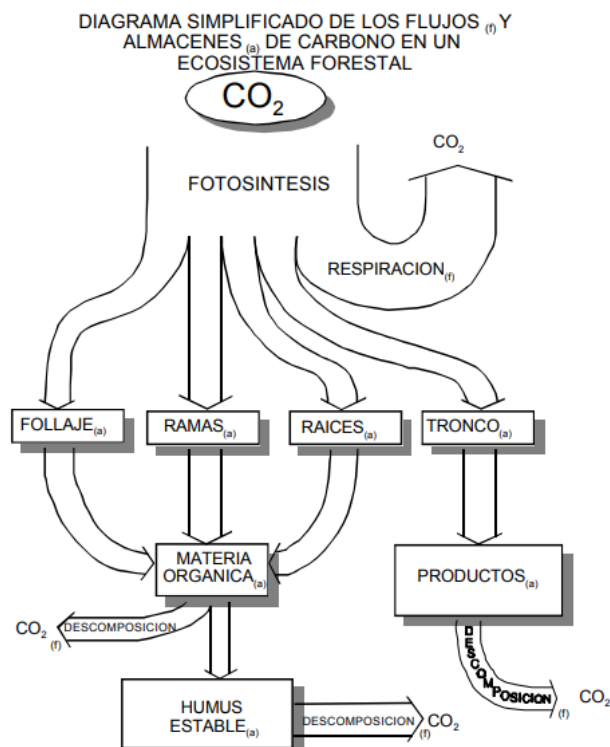
La captura de carbono está directamente relacionada con la cobertura forestal ya que se puede definir como la incorporación dióxido de carbono (CO₂) a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, éste participa en la composición de materias primas como la glucosa, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (García *et al.* 2021)

El árbol al crecer va incrementado su follaje, ramas, 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 CO₂ 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 (IPCC, 2014).

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 (García y Ordóñez, 1999).

En el diagrama 4 se representa el proceso de la captura de carbono en un ecosistema forestal, 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 4. Proceso de la captura de carbono en un ecosistema forestal



Fuente: Benjamín y Masera (2001).

El cambio climático global asociado al aumento potencial de la temperatura superficial del planeta, es uno de los problemas ambientales más severos que se enfrentan en el presente siglo. Este problema se acentúa por el rápido incremento actual en las emisiones de gases de efecto invernadero y por las dificultades de reducir en forma sustantiva el incremento de GEI en el futuro próximo (IPCC, 1995).

El dióxido de carbono y otros gases con efecto invernadero afectan directamente a los procesos biológicos en los árboles y, en general, a la ecología de los ecosistemas forestales. El dióxido de carbono (CO₂) es uno de los GEI más importantes y que su emisión a la atmósfera por el cambio en el uso del suelo ocupa el segundo lugar a nivel mundial con una fuerte contribución de las zonas tropicales (Dixon *et al.* 1994).

Los bosques de México pueden ser extremadamente vulnerables al cambio climático y la capacidad de almacenamiento de carbono (C) en estos bosques se está perdiendo rápidamente por los procesos de deforestación y degradación de los ecosistemas forestales (Benjamín y Masera, 2001).

De acuerdo con Jenkins y Schaap (2018), los bosques juegan un papel clave dentro del ciclo global del carbono, eliminando el dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera y convertirlo en madera a medida que crecen y liberar dióxido de carbono a la atmósfera cuando los árboles se queman o se pudren, el sector forestal actúa como fuente o un sumidero de carbono, con el potencial de secuestrar carbono y así reducir el CO₂, los bosques y la madera que producen secuestran y almacenan más carbono que otros ecosistemas terrestres.

La importancia de los servicios de los ecosistemas forestales ha sido cada vez más reconocida, están surgiendo iniciativas dirigidas a conservar la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas, aún existen lagunas de conocimiento sobre sus relaciones y posibles compensaciones en los bosques, las funciones y los servicios del ecosistema desempeñarán papeles importantes en el desarrollo del manejo forestal sostenible (Mori *et al.* 2017).

Los programas de captura de carbono en bosques son instrumentos con enorme potencial para contribuir a la transición hacia el desarrollo sustentable y para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo (Benjamín y Masera, 2001).

2.9 Principales causas de pérdida de los ecosistemas forestales

La pérdida de cobertura forestal es causada por diversos factores, tanto naturales como antrópicos. Entre las causas naturales se encuentran las plagas, enfermedades y los desastres naturales, como deslaves y deslizamientos de tierra. Por otro lado, las causas antrópicas incluyen la deforestación provocada por la tala clandestina, la expansión de la frontera agrícola y el crecimiento urbano. Además, la construcción de infraestructura, complejos industriales y turísticos también contribuye significativamente a la degradación de los ecosistemas forestales (FAO, 2006).

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).

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, 2014).

2.10 Fragmentación en los ecosistemas forestales

La fragmentación es un proceso que permite analizar el deterioro de la cobertura forestal, conocer el grado de segmentación y la dinámica que se está presentando para su pérdida y así poder relatar las modificaciones en el patrón del hábitat a lo largo del tiempo. Andrén, (1994) y Bustamante & Grez, (1995), mencionan, que la fragmentación es la transformación de un bosque continuo en unidades más pequeñas y aisladas entre sí, cuya área resultante es menor a la del bosque original.

La fragmentación consiste en tres fenómenos que se producen paralelamente: I) división de hábitat en porciones menores y discontinuas, II) disminución del tamaño de los hábitats remanentes y III) aislamiento progresivo de los parches dentro de una matriz generalmente hostil (Forman & Godron, (1986); Fahrig, (1997, 2003); Pauchard *et al.* (2006).

Este indicador contempla verificadores de área de hábitat y su dinámica, así como de grado de fragmentación del hábitat y su dinámica, que se calculan por medio de mapas de cobertura de la tierra generados a partir de imágenes de sensores remotos (Calvo & Ortiz, 2012) mencionan, que el estado de transformación de un

paisaje boscoso se caracteriza por el grado de destrucción y modificación del hábitat, la tasa de deforestación, los patrones de fragmentación de bosques naturales y los cambios en la matriz.

McGarigal & Cushman, (2002) y Lord & Norton, (1990), mencionan, que la “Fragmentación” es generalmente usado para describir modificaciones en el patrón del hábitat a lo largo del tiempo, y detalla básicamente la interrupción de la continuidad espacial de un tipo de cobertura en general; estas modificaciones se producen en la estructura (biodiversidad) y en la función o funcionamiento (ciclos biogeoquímicos) del paisaje.

La conversión de los hábitats naturales es la causa más grande de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y alteraciones del ciclo hidrológico, el balance entre hábitat y paisaje humano podría determinar el futuro éxito de la conservación de la diversidad biológica en grandes áreas del planeta (MAE, 2015). Los indicadores que se requieren para determinar la fragmentación de la cubierta forestal son:

1. **Número de parches (NUMP):** Número de parches totales. Es un indicador de varios procesos ecológicos. Adicionalmente se emplea como índice de heterogeneidad del paisaje y como base para el cálculo de otras métricas (Correa *et al.* 2012).
2. **Tamaño medio de parches (MPS):** Es empleado como indicador de fragmentación si se evalúa el tamaño del tipo de parche de interés (Correa *et al.* 2012).
3. **Índice de forma media (MSI):** Calcula la complejidad de la forma media de los parches en comparación con una forma estándar, como sería la circunferencia en el entorno vectorial o el píxel en el entorno raster. La forma del parche ejerce influencia en numerosos procesos inter-parches tales como migraciones de fauna. La forma de un parche está caracterizada por la longitud de sus bordes (Correa *et al.* 2012).

CAPITULO III.

METODOLOGÍA

Esta investigación empleó un enfoque metodológico diagnóstico, al centrarse en el análisis del estado actual del objeto de estudio y en la identificación de las problemáticas socio-ambientales asociadas. En cuanto a la caracterización de las variables, se optó por un enfoque mixto., por un lado, se utilizó una estrategia cuantitativa para la estimación de la superficie de los ecosistemas identificados, así como para calcular el grado de fragmentación de cada tipo de bosque. Por otro lado, se incorporó una aproximación cualitativa orientada a la descripción y análisis de las características ambientales particulares de cada parque nacional, lo que permitió una comprensión integral de los factores ecológicos, sociales y territoriales que inciden en su conservación.

La propuesta teórica-metodológica se desarrolló a partir de procesos ya establecidos interrelacionados con variables complementarias y adaptando métodos propios en las etapas metodológicas, lo que implicó definir con precisión el objeto de estudio y sus objetivos. Asimismo, debe considerarse el contexto en el que se desarrolló la investigación incluyendo el diagnóstico, actividades, instrumentos y métodos utilizados.

Materiales

Los materiales que se utilizaron para la elaboración del análisis espacio temporal de los ecosistemas forestales fueron Cartas de Uso y Vegetación del INEGI de año 2015 además imágenes de satélite de los sensores Spot 5 y Sentinel-2 de los meses de febrero y marzo del año 2022. Estas imágenes fueron descargadas del servidor digital Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS. Para la edición cartográfica se descargaron datos vectoriales de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía del año 2015.

Fundamentos para generar una propuesta teórica-metodológica.

La investigación científica, concebida como una propuesta teórica-metodológica, puede entenderse como un proceso sistémico que permite analizar una realidad específica, sus características y condiciones dentro de un determinado entorno. Este análisis puede abordarse desde una perspectiva teórica, práctica o una combinación de ambas, dependiendo de las necesidades del investigador. A través de la aplicación del conocimiento científico, es posible estudiar y comprender problemáticas sociales que deben ser tratadas como cuestiones científicas, con el fin de proponer soluciones pertinentes y acordes con la realidad en la que el investigador se encuentra inmerso (Davis *et al.* 2014).

El proceso de investigación se fundamenta en el método científico, concebido por diversos autores como un enfoque sistemático para el estudio de la naturaleza. Este método integra técnicas de observación, reglas de razonamiento y predicción, así como principios para la experimentación planificada. Además, abarca distintos mecanismos para la comunicación y divulgación de los resultados, tanto en el ámbito experimental como en el teórico. A través de este enfoque, la ciencia establece una metodología estructurada para formular preguntas y encontrar respuestas, lo que permite a los investigadores desarrollar su trabajo con lógica, orden y rigor (Snyder, 2019).

En este sentido, los procesos metodológicos planteados en los siguientes apartados fueron adaptados a las condiciones necesarias para la generación de productos cartográficos, validados mediante la metodología establecida por autores como Mas (2003) y Camacho (2019). Es importante destacar que la aplicación de estos procesos puede optimizarse mediante un análisis más detallado de variables y una mayor especificidad en la selección de las zonas de estudio, lo que permitiría obtener resultados más precisos y contextualizados.

García y Sánchez (2020) señalan que una propuesta metodológica debe sustentarse en elementos teóricos que, a modo de categorías didácticas y pedagógicas, se asumen desde una concepción crítica basada en los aportes semánticos y metodológicos de la Teoría General de Sistemas, así como en los elementos estructurales del proceso de investigación científica. En este sentido, los

fundamentos metodológicos y su aplicación en este estudio se establecen a partir de la relación entre el análisis con enfoque sistémico y el tratamiento dinámico de situaciones del espacio geográfico.

En este sentido, la presente investigación retomó diversos estudios sobre la captura de carbono a través de la estimación de la fragmentación forestal. Se analizaron en detalle los procesos metodológicos empleados en estas investigaciones, los cuales fueron adaptados mediante la modificación de variables y escalas de trabajo. Estos ajustes permitieron desarrollar un enfoque propio para establecer rangos de fragmentación forestal y analizar la captura de carbono con base en los resultados obtenidos.

En términos del enfoque holístico de investigación, este implica la integración de todos los espectros y paradigmas de investigación cuantitativos y cualitativos, lo cual cobra una importante relevancia científica, como resultado de los problemas ambientales y las interacciones con la sociedad (Hurtado, 2014).

Asimismo, para obtener resultados claros y precisos, es fundamental aplicar al menos un tipo de investigación, ya que esta proporciona una estructura metodológica con procesos y elementos esenciales para alcanzar los objetivos planteados. Además, el análisis de necesidades ambientales desde una perspectiva social permite identificar los factores clave que guían la obtención de información relevante para el estudio (Davis *et al.* 2014).

Al analizar, identificar y caracterizar los elementos que configuran el conocimiento se dispone de una base sólida para desarrollar un modelo que facilite la sistematización de dicho conocimiento. Esto permite la construcción de líneas de investigación orientadas a la sustentabilidad ambiental, integrando esta función sustantiva de la universidad en la búsqueda de soluciones a problemáticas ecológicas.

En este sentido, se propone un modelo como una herramienta válida para el análisis cualitativo y cuantitativo del conocimiento ambiental, permitiendo la toma de decisiones informadas y la generación de nuevas estrategias de investigación basadas en una práctica reflexiva y aplicada a la conservación del entorno (Chacín, 2008).

La propuesta se presenta como un espacio conceptual que facilita la comprensión de una realidad compleja, al seleccionar los elementos más representativos y analizar sus interrelaciones. Además, permitió analizar la contribución de la práctica a la investigación y la generación de nuevo conocimiento. Su estructura incluye una introducción, fundamentación conceptual, justificación, objetivos y los componentes esenciales del modelo base, el cual incorpora un enfoque metodológico que favorece una comprensión más amplia.

Lo anterior contempla una visión integral sobre la organización del conocimiento mediante la sistematización, revelando nuevas formas de abordar la investigación y generar saberes a partir de la interacción entre extensión, docencia e investigación. Para construir un modelo teórico-metodológico de sistematización del conocimiento es fundamental estructurar y organizar sus elementos constitutivos, con el propósito de orientar las acciones investigativas.

El diagrama 5 presenta las fases para la elaboración de una propuesta teórico-metodológica, lo que requiere de un proceso estructurado que combine una base conceptual sólida con un diseño metodológico adecuado (Kerlinger & Lee, 2002).

Diagrama 5. Fases para la elaboración de una propuesta teórica metodológica



Las etapas de la metodología aplicada son las siguientes:

3.1 Caracterización geográfica ambiental en los Parques Nacionales del Estado de México

Los componentes ambientales presentes en los Parques se analizaron y describieron a partir de la información cartográfica recopilada con escala 1: 50,000 del Geo portal del INEGI del año 2015, posteriormente se representó cartográficamente los componentes ambientales como el clima, edafología, edafología entre otros de los municipios que los conforman (Camacho 2019).

Para la identificación de los ecosistemas se retomó la carta de los Usos del Suelo y Vegetación INEGI del año 2015, el cual 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 lo constituyen (INEGI 2024).

La caracterización geográfica ambiental se llevó a cabo con base en la metodología de Bocco (2001), con el objetivo de identificar y describir los ecosistemas forestales presentes en los Parques Nacionales dentro del área de estudio. Este análisis permitió no solo comprender las características del territorio, sino también analizar las interacciones ambientales que existen entre los distintos ecosistemas, proporcionando un contexto integral para su estudio.

3.2 Identificación de los ecosistemas forestales presentes en los Parques Nacionales del Estado de México.

3.2.1 Fase 1: Digitalización de la carta de los Usos del Suelo y Vegetación del INEGI.

Todos los procesos se realizaron en el software ArcGis 10.2.1, como primer paso se delimitó el área de todos los Parques acorde al límite establecido con base en datos de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2008).

Posteriormente, se digitalizaron los diferentes usos de suelo presentes en cada parque, cada tipo de usos del suelo para esta investigación corresponde a un ecosistema. Los procesos se realizaron con base en lo mencionado por Mas (2003), los productos para esta etapa fueron los mapas de los ecosistemas presentes de los Parques Nacionales del Estado de México, cabe destacar que estos mapas fueron insumos para la validación en campo de los ecosistemas presentes.

3.2.2 Fase 2: Clasificación de las imágenes de satélite

En la selección de las fechas para la descarga de imágenes satelitales, se consideraron condiciones climatológicas, con el fin de minimizar interferencias atmosféricas. Tal como señala Camacho (2017), las variaciones en la atmósfera entre distintas fechas pueden alterar los valores de radiancia captados por el sensor, lo que hace necesario aplicar correcciones atmosféricas. Además, la atmósfera influye en las propiedades aparentes de los objetos en la imagen, afectando aspectos como la longitud de onda registrada, la reflectancia superficial y la variabilidad espacial observada.

Con base en lo anterior, se obtuvieron las imágenes de satélite de la plataforma digital de GloVis, es importante mencionar que se optó por utilizar imágenes SPOT-5, ya que cuentan con una resolución de 10 metros, para este año se trabajó con el compuesto color verdadero y falso color con el fin de tener una mejor visualización en la identificación de los diferentes ecosistemas forestales presentes para este año (Mas y Couturier, 2011).

Se emplearon imágenes satelitales del sensor Sentinel-2A debido a diversas ventajas técnicas. La razón principal fue su alta resolución espacial de 10 metros, lo que permitió una mejor compatibilidad con las escalas utilizadas en las cartas de uso de suelo. Una de sus características destacadas es que estas imágenes ya cuentan con correcciones atmosféricas preprocesadas, lo cual facilita un análisis

más preciso al ofrecer representaciones espectrales más realistas. Además, Sentinel-2A dispone de 13 bandas espectrales, las cuales se utilizaron para generar composiciones en color natural y falso color, mejorando así la visualización e identificación de polígonos de referencia (sitios de entrenamiento) para clasificar los distintos ecosistemas forestales presentes en el área de estudio.

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 (Jensen, 1996).

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 (Stehman y Czaplewski, 1998).

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).

3.2.3 Fase 3: Validación de la cartografía de los ecosistemas forestales

Los resultados obtenidos en la cartografía de los ecosistemas forestales 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 es el punto. En cuanto al método de muestreo 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).

Por otra parte, el tamaño de la muestra fue establecida con base en dos aspectos, el primero parámetro determinado por Congalton (1988), que sugiere verificar por lo menos 50 sitios por categoría. El segundo parámetro 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 (Tabla 2).

De acuerdo a lo anterior, se evaluaron los puntos de muestreo erróneos para los mapas correspondientes, digitalizando 100 puntos por categoría de los ecosistemas identificados teniendo en cuenta que se utilizó una escala de 1; 50,000.

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

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 píxeles clasificados en los mapas (Mas y Couturier 2011).

Además de la validación digital, se incorporó una fase de verificación in situ con el propósito de confirmar la correspondencia entre los puntos de muestreo y los ecosistemas representados en la cartografía. Siguiendo la metodología propuesta por Mas *et al.* (2003), se seleccionaron 100 puntos por ecosistema identificado dentro de cada Parque Nacional. De estos, 50 puntos fueron verificados en campo mediante el uso de receptores GPS, mientras que los 50 restantes se validaron mediante imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth y Google Maps, debido a que se encontraban en zonas de difícil acceso, con restricciones territoriales o condiciones de inseguridad. Finalmente, todos los puntos de verificación fueron comparados con los píxeles clasificados en los mapas temáticos, a fin de corroborar la precisión en la identificación de los ecosistemas.

C.- Análisis de los datos:

Se realizó una matriz de confusión o matriz de error la cual, permitió comprobar la información de los sitios de verificación en los mapas de los ecosistemas seleccionados (Mas y Couturier, 2011).

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>i</i>)	Verdad imagen (Categorías del mapa = <i>j</i>)				Total
	<i>j</i> ₁	<i>j</i> ₂	...	<i>j</i> _q	
<i>i</i> ₁	<i>i</i> ₁ <i>j</i> ₁	<i>i</i> ₁ <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> ₁ <i>j</i> _q	<i>i</i> ₁₊
<i>i</i> ₂	<i>i</i> ₂ <i>j</i> ₁	<i>i</i> ₂ <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> ₂ <i>j</i> _q	<i>i</i> ₂₊
...
<i>i</i> _q	<i>i</i> _q <i>j</i> ₁	<i>i</i> _q <i>j</i> ₂	...	<i>i</i> _q <i>j</i> _q	<i>i</i> _{q+}
Total	+ <i>j</i> ₁	+ <i>j</i> ₂	...	+ <i>j</i> _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 ($\sum P_{+j}$).

Se desarrolló el cálculo de los índices de fiabilidad y el medio-intervalo de confianza para cada uno de los mapas, considerando como mínimo una fiabilidad estimada del 80% (Stehman y Czaplewski, 1998).

Previamente se desarrollaron 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).

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 4) 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 4. 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	$P_{i_1 j_1}$	$P_{i_1 j_2}$...	$P_{i_1 j_q}$	P_{i_1+}
i_2	$P_{i_2 j_1}$	$P_{i_2 j_2}$...	$P_{i_2 j_q}$	P_{i_2+}
...
i_q	$P_{i_q j_1}$	$P_{i_q j_2}$...	$P_{i_q j_q}$	P_{i_q+}
Total	P_{+j_1}	P_{+j_2}	...	P_{+j_q}	ΣP_{+j}

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 .
- ΣP_{+j} o ΣP_{i+} = Es el total de la suma de las proporciones de los puntos de las clases de referencia (ΣP_{i+}), o bien, el total de la suma de las proporciones de los puntos correspondientes a las categorías del mapa (ΣP_{+j}).

3.3. Análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México

Una vez identificados los distintos ecosistemas forestales presentes en el área de estudio, se procedió al cálculo de su nivel de fragmentación, con el propósito de aumentar la precisión en la estimación de la captura de carbono. El análisis de fragmentación tuvo como objetivo evaluar el grado de transformación de masas forestales continuas en porciones más pequeñas, aisladas entre sí, cuya superficie total resulta significativamente menor en comparación con la del ecosistema original (Andrén, 1994; Bustamante & Grez, 1995).

Para el desarrollo del análisis de fragmentación es importante instalar la extensión patch analyst, en nuestro software Arc Map 10.2.2, la cual se descargó del link: http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/Patch5_2_Install.htm.

Posteriormente se tomaron en cuenta los siguientes indicadores:

I. Número de parches (NUMP): Es un indicador de varios procesos ecológicos. Adicionalmente se emplea como índice de heterogeneidad del paisaje y como base para el cálculo de otras métricas (Correa *et al.* 2012).

II. Tamaño medio de parche (MPS): Es empleado como indicador de fragmentación si se evalúa el tamaño del tipo de parche de interés (Correa *et al.* 2012).

III. Índice de forma media (MSI): La forma del parche ejerce influencia en numerosos procesos inter-parches tales como migraciones de fauna. La forma de un parche está caracterizada por la longitud de sus bordes (Correa *et al.* 2012).

Una vez definidos los indicadores necesarios, se realizaron los siguientes procesos:

a) Generar una malla hexagonal que cubrió la zona de estudio, a partir de la herramienta PATCH/MAKE HEXAGON REGIONS, tomando como base la capa con bosque (1) y no bosque (0), en donde se incluirán otras coberturas.

b) Generar una intersección de la malla hexagonal con la capa de bosque y no bosque: mediante la opción Analysis Tools/Overlay/ Intersect, donde se interseccionaron ambas capas de información.

c) Con la opción de la extensión PATCH/ analysis by regions, se obtuvieron los indicadores que ya fueron definidos por regiones, a través de una tabla de atributos la cual de forma interna el software ha procesado y vinculando las dos capas de información.

d) Vincular la tabla de análisis espacial por regiones a la capa de bosque y no bosque con el identificador respectivo, dejando únicamente los parches que registran bosque. Una vez que se realizaron estos procesos, se ejecutó una modulación de los valores de los indicadores a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Valor-valor mínimo}}{\text{Valor máximo-valor mínimo}}$$

Finalmente se promediaron estos valores, y se aplicó una normalización a los datos obtenidos en rangos, para obtener los parches con mayor y menor fragmentación. Los valores de fragmentación refieren el grado de conservación de la cobertura forestal, siendo los valores muy bajo y bajo los que tienden más a conservarse, mientras que los valores altos y muy altos son las zonas que tienden a cambiar de cobertura o deforestarse.

3.4 Análisis del Servicio Ecosistémico de soporte carbono

Los mapas de los ecosistemas forestales presentes fueron insumos para determinar la producción del SE de soporte captura de carbono, como primer paso se determinó la superficie en hectáreas para cada ecosistema.

Posteriormente se retomaron los resultados obtenidos por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013), quienes obtuvieron los índices de captura de carbono por ecosistema forestal, mediante la aplicación de dos etapas; la primera fue la obtención de la biomasa total: ellos establecieron 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 estimaron la biomasa aérea por componente estructural (fuste, ramas, follaje, corteza) a través de una selección aleatoria de árboles, los cuales derribaron, midieron su altura y obtuvieron trozas de dimensiones comerciales. Posteriormente en laboratorio se registraron el peso seco de cada una de las muestras por componente.

La segunda etapa que desarrollaron estos autores consistió en la aplicación de las ecuaciones simultáneas de biomasa por regresión, relacionando el diámetro normal, la altura total, y la biomasa individual. Por otra parte, la estimación de la biomasa total la definieron como la suma de la biomasa estimada por componente, además ellos tomaron 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 en su estudio varió de acuerdo al tamaño del árbol.

Es importante destacar que se retomaron las investigaciones de Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013), debido a que las condiciones de sus áreas de estudio, como el clima, la superficie y el tipo de suelo, presentan similitudes con las analizadas en esta investigación. Además, las especies arbóreas identificadas en nuestra caracterización coinciden con las evaluadas en dichas investigaciones, lo que permite establecer comparaciones y fortalecer el análisis.

El grado de confiabilidad del cálculo estimado para los índices de captura de carbono se estableció con base en Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2022). Como último paso se multiplicó el total de superficie en hectáreas de cada uno de los ecosistemas forestales, por el índice correspondiente al tipo de cobertura forestal. Con esto se generaron mapas, gráficas y cartografía de acuerdo a los índices propuestos por Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2022).

Validación en campo del estado y porte de los árboles en el área de estudio

A manera de muestra la validación en campo se realizó solo para el Parque Nacional Lagunas de Zempoala. En esta etapa se llevó a cabo la validación en campo del estado físico y el porte de los árboles, con el objetivo de identificar las principales características estructurales de los individuos que conforman los ecosistemas forestales. Para ello, se midieron el diámetro y la altura total de los árboles, siguiendo la metodología propuesta por Romahn y Ramírez (2010). El diámetro a la altura del pecho (DAP), que corresponde al diámetro con corteza medido a 1.30 metros sobre el nivel del suelo, fue registrado utilizando instrumentos de medición forestal. La altura total de los árboles se estimó de manera indirecta mediante observación visual, posicionándose en un punto con visibilidad adecuada por debajo del dosel arbóreo.

3.5 Análisis de la Problemática Integral Ambiental, Económica y Social de cada Parque Nacional del Estado de México.

Para dar un contexto socio-ambiental de las dificultades que repercuten directamente con la conservación ambiental de los Parque Nacionales del Estado de México, se analizaron en campo y gabinete los principales problemas económicos, sociales y ambientales. Los Parques Nacionales se encuentran regulados por la CONANP, sin embargo en la mayoría de los parques los ejidatarios y las autoridades gubernamentales locales ejercen la capacidad de decidir las actividades dentro de estos espacios. Bajo este contexto, se planteó realizar un análisis social, económico y ambiental de las actividades que repercuten sobre la conservación ambiental en las ANP.

Como primer paso, se realizó una revisión de literatura, así como en plataformas digitales de instituciones gubernamentales sobre los registros de propiedad para establecer quienes toman decisiones en cada parque.

Posteriormente, se enlistaron los parques que cuentan con Planes de manejo, además de otra herramienta de legislación que regule las actividades y los usos de suelo, con el objetivo de obtener herramientas para la identificación de zonas con los niveles altos de fragmentación de cada parque.

La metodología utilizada para el análisis de la problemática ambiental, económica y social en los Parques Nacionales del Estado de México se basó en la metodología de diagnóstico ambiental comunitario con fines investigativos propuesto por Linares *et al.*, (2021), adaptada para el contexto del presente estudio de posgrado. No obstante, es importante destacar que solo se retomaron ciertos aspectos clave de esta metodología, con el objetivo de identificar los principales problemas. Esta adaptación permitió un enfoque más flexible y acorde con los objetivos específicos de la investigación.

Todo lo anterior se realizó con la finalidad de identificar cuáles son las zonas con la menor densidad forestal en cada parque bajo los lineamientos establecidos en términos de normativa jurídica y legal establecida desde los decretos de cada parque (Linares *et al.* 2021).

3.6 Validación de la Propuesta Teórica-Metodológica

La Propuesta Teórica-Metodológica se validó a partir de la pertinencia de los Fundamentos Teóricos para el desarrollo de las etapas metodológicas, se establecieron las teorías que permitieron explicar los procesos e interacciones encada parque, posteriormente se analizaron y describieron los principios de cada teoría que determinaron los alcances y objetivos de la investigación.

De igual forma se realizó un análisis de los fundamentos metodológicos de cada etapa y proceso, correlacionado con los aspectos teóricos reportados anteriormente, con el objetivo de relacionar cada teoría con la etapa metodológica a desarrollar.

Bajo este contexto, se identificaron relaciones entre los fundamentos teóricos y los fundamentos metodológicos de la propuesta teórica metodológica con el fin de destacar la pertinencia de cada elemento teórico utilizado.

Es importante mencionar que los fundamentos metodológicos de la propuesta se retomaron de la recopilación de procesos metodológicos replicados en otras investigaciones, sin embargo se complementaron con un mayor número de variables y una escala a mayor nivel de detalle, con el objetivo de tener mayores alcances y cumplir con los objetivos planteados en la investigación

3.7 Discusión General Teórica–Empírica

La discusión general Teórica–Empírica se realizó mediante la búsqueda de artículos científicos nacionales e internacionales con el fin de realizar un análisis en detalle y contrastar los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados reportados por los diferentes autores, los cuales fueron incluidos en el marco teórico. También se realizó un análisis de las semejanzas y diferencias entre los resultados obtenidos en esta tesis y los resultados obtenidos por otros autores, es importante mencionar que la discusión teórico empírica fue compleja debido a los diversos factores y condiciones en los que fueron realizados los estudios consultados; entre los diversos factores destacan la ubicación geográfica, escalas de trabajo, variables utilizadas y alcances de cada investigación, la discusión concluye argumentado sobre el cumplimiento de los objetivos y de la hipótesis; y resaltando la relevancia y aportaciones de esta investigación doctoral.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Área de estudio

El área de estudio se conforma por nueve Parques Nacionales ubicados en el Estado de México, cabe destacar que algunos comparten límites con la Ciudad de México y los Estados de Morelos, Puebla y Michoacán. La superficie total de las ANP es de 63,617 hectáreas. El Parque Nacional de mayor extensión territorial es el Iztaccíhuatl-Popocatepetl con una superficie de 39,819 ha, mientras que el de menor superficie es el Sacromonte con 43 ha (Tabla 5).

Tabla 5. Parques Nacionales del Estado de México.

No	Parque Nacional	Fecha de decreto	Ubicación geográfica		Superficie terrestre (ha)
			Estado	Municipio	
1	Desierto del Carmen o de Nixcongo	10/09/1942	México	Tenancingo Zumpahuacán Malinalco	529
2	El Tepeyac	18/02/1937	México	Tlalnepantla.	1,500
			CDMX	Gustavo A. Madero	
3	Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla	18/09/1936	México	Huixquilucan y Ocoyoacac	1,889
			CDMX.	Cuajimalpa.	
4	Iztaccíhuatl-Popocatepetl	08/11/1935	México	Amecameca, Atlautla, Chalco, Ecatzingo, Ixtapaluca, Tlalmanalco y Texcoco	39,819
			Morelos	Tetela del Volcán	
			Puebla	San Salvador el Verde, Chiautzingo, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos, Tochimilco y Santa Rita Tlahuapan.	
5	Lagunas de Zempoala	27/11/1936	México	Ocuilan	4,790
			Morelos	Huitzilac.	
6	Los Remedios	15/04/1938	México	Naucalpan de Juárez	400
7	Molino de flores Netzahualcóyotl	05/11/1937	México	Texcoco	45
8	Sacromonte	29/08/1939	México	Amecameca y Ayapango	43
9	Bosencheve	01/08/1940	México	San José del Rincón, Villa de Allende y Villa Victoria	4,599
			Michoacán	Zitácuaro	

Fuente: elaboración propia con base en CONANP, (2018).

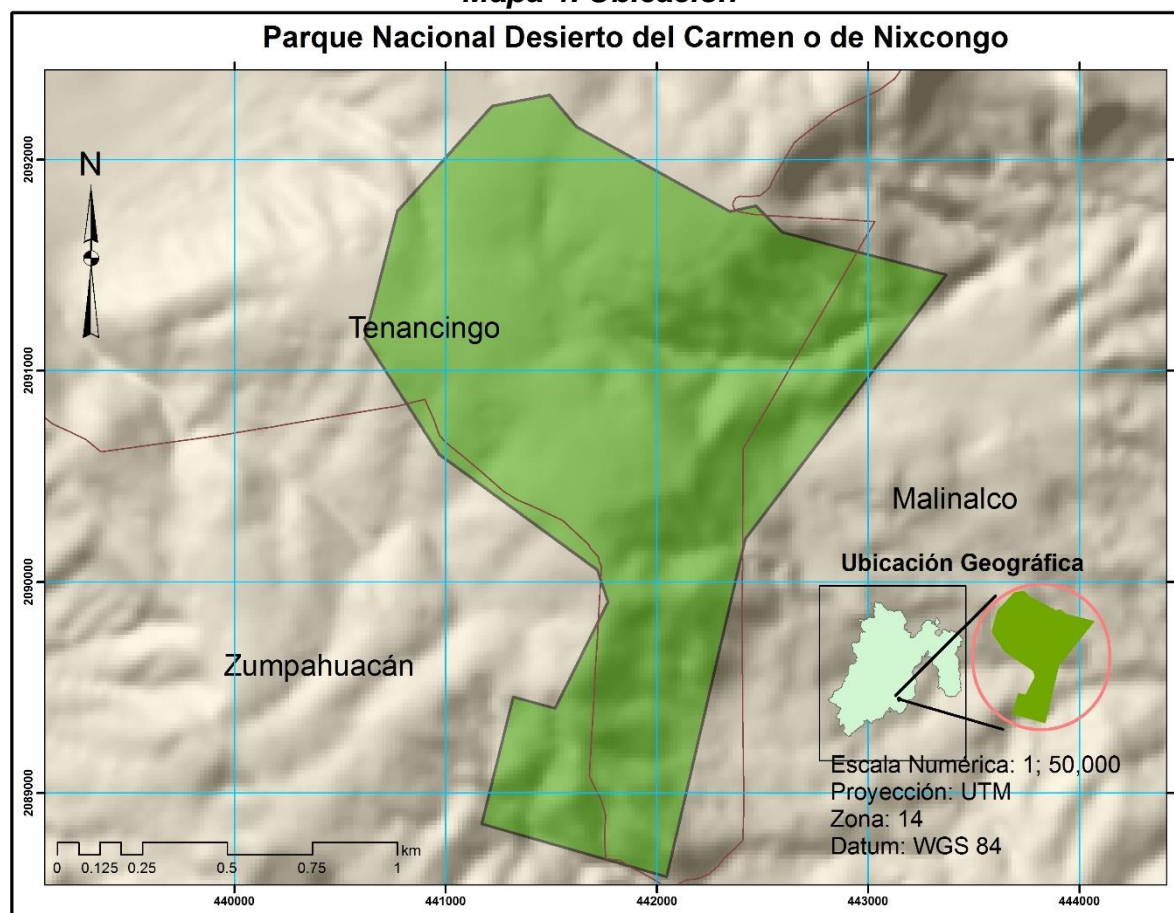
4.1 Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo (PNDCN)

4.1.1 Caracterización Geográfica del PNDCN

Localización geográfica

Se localiza geográficamente en las coordenadas 99° 35' 37" de longitud Oeste 18° 57' 41" de latitud Norte, el parque se sitúa en la carta topográfica a escala 1:50,000; denominada Tenancingo E14-A58, editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2015). El mapa 1 representa la ubicación geográfica del Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo (PNDCN) se conforma por porciones de los municipios de Tenancingo, Zumpahuacán y Malinalco, la fecha de decreto fue el 18 de febrero 1937 y su extensión territorial es de 1,500 ha.

Mapa 1. Ubicación



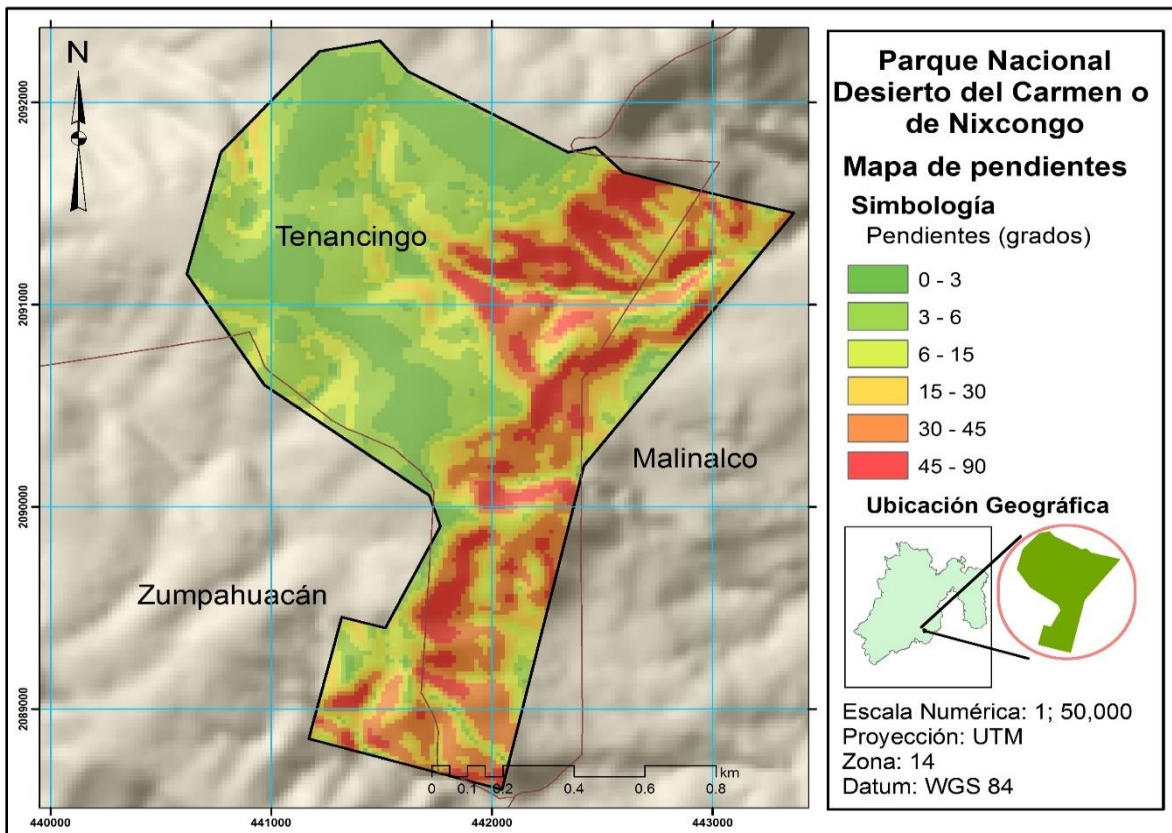
Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2020).

Fisiografía

El municipio de Tenancingo se ubica en una región donde confluyen dos importantes sistemas fisiográficos. La zona norte está conformada por la provincia del Sistema Volcánico Transversal, específicamente en las ramificaciones del volcán Xinantécatl, perteneciente a la subprovincia de Lagos y Volcanes del Anáhuac, la cual forma parte de la cuenca del río Lerma. Las características del relieve son sierras de cumbres extendidas, laderas escarpadas, lomeríos con llanos aislados, valles de laderas tendidas con mesetas y mesetas con cañadas (Cortina, 2018).

El mapa 2 representa las pendientes del Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo donde se observan 9 elevaciones importantes las cuales se denominan: Tres Marías, Santa Cruz, La Malinche, Peña Colorada, Tepetzingo, Nixcongo y La Conchita, esta última perteneciente a la cuenca del Río Balsas (CONANP, 2007).

Mapa 2. Fisiografía



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2020).

Litología

La geología representativa del municipio de Tenancingo, se traduce en el predominio de rocas ígneas extrusivas como los basaltos y de rocas sedimentarias, como las brechas (CONANP, 2018).

Las rocas que predominan en el Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo, son de basalto de origen ígnea, su formación proviene de un fenómeno geológico, existiendo importantes coladas basálticas en la superficie de la tierra, por efusión de lava y enfriamiento del magma (Diario Oficial de la Federación DOF, 2018).

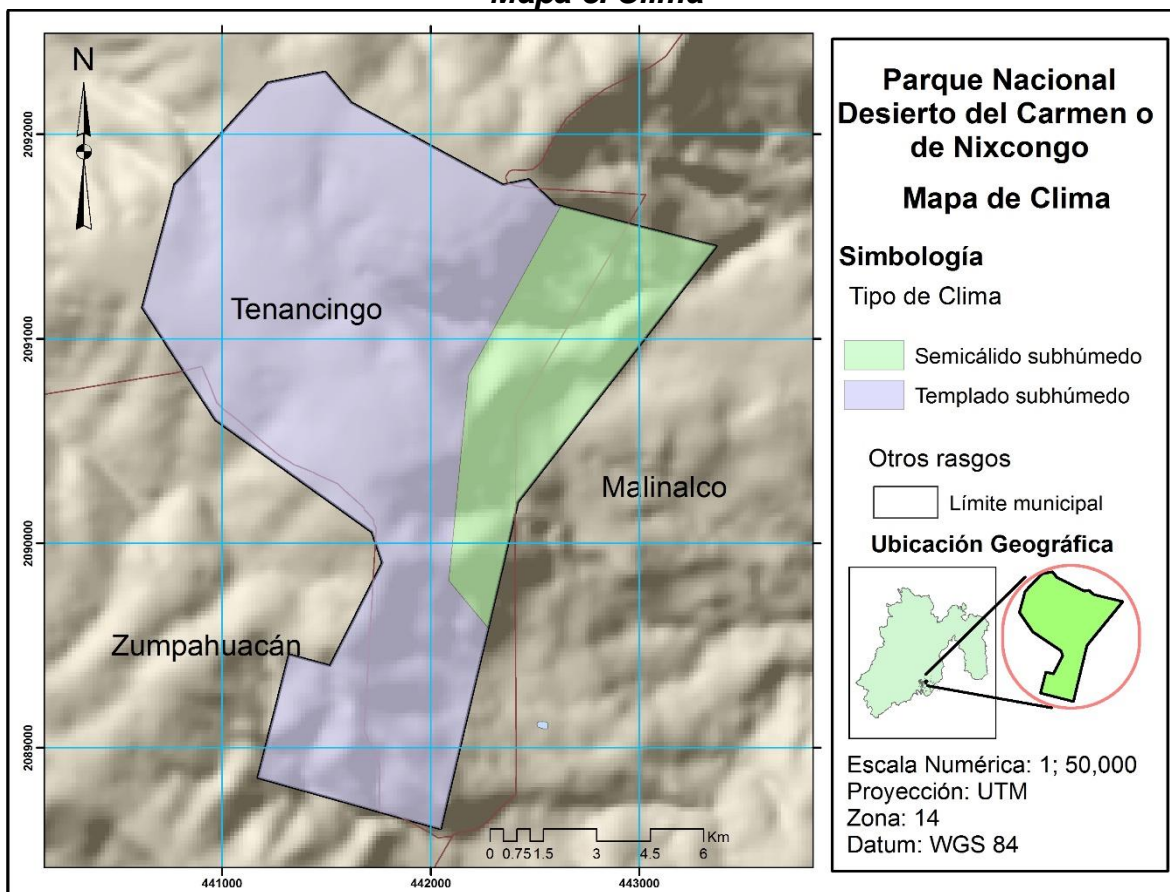
El segundo tipo de roca es la brecha sedimentaria que tiene su origen generalmente en el ambiente terrestre. Los clastos angulosos de gran tamaño muestran un transporte corto. Normalmente se forman en aluviones o conos aluviales transportada gravitacionalmente o glaciares (morrenas) transportada por el hielo (INEGI, 2015).

Clima

La localización de Tenancingo en la porción sur del valle de Toluca lo hacen susceptible a mantener un clima estable, que en este caso es de tipo templado húmedo con lluvias en verano; según datos de la estación meteorológica de Coatepequito; se ha registrado una temperatura promedio de 19.6°C, en un período de 11 años (1979- 1998). La precipitación pluvial registrada en el periodo 1979-1998 fue de 889.5 mm, siendo 1983 el año más seco, con una precipitación promedio de 639.3 mm, mientras que el año de 1991 como el más lluvioso con un promedio de 1,132.6 mm. (Vargas, 1997).

El mapa 3 muestra los dos tipos de clima representativos del Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo, son el semicálido subhúmedo al este del parque, en el municipio de Malinalco donde se encuentran las elevaciones menos pronunciadas. Por otra parte, el clima templado subhúmedo en los municipios de Tenancingo y Zumpahuacan (SEMARNAT, 2010).

Mapa 3. Clima



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2020).

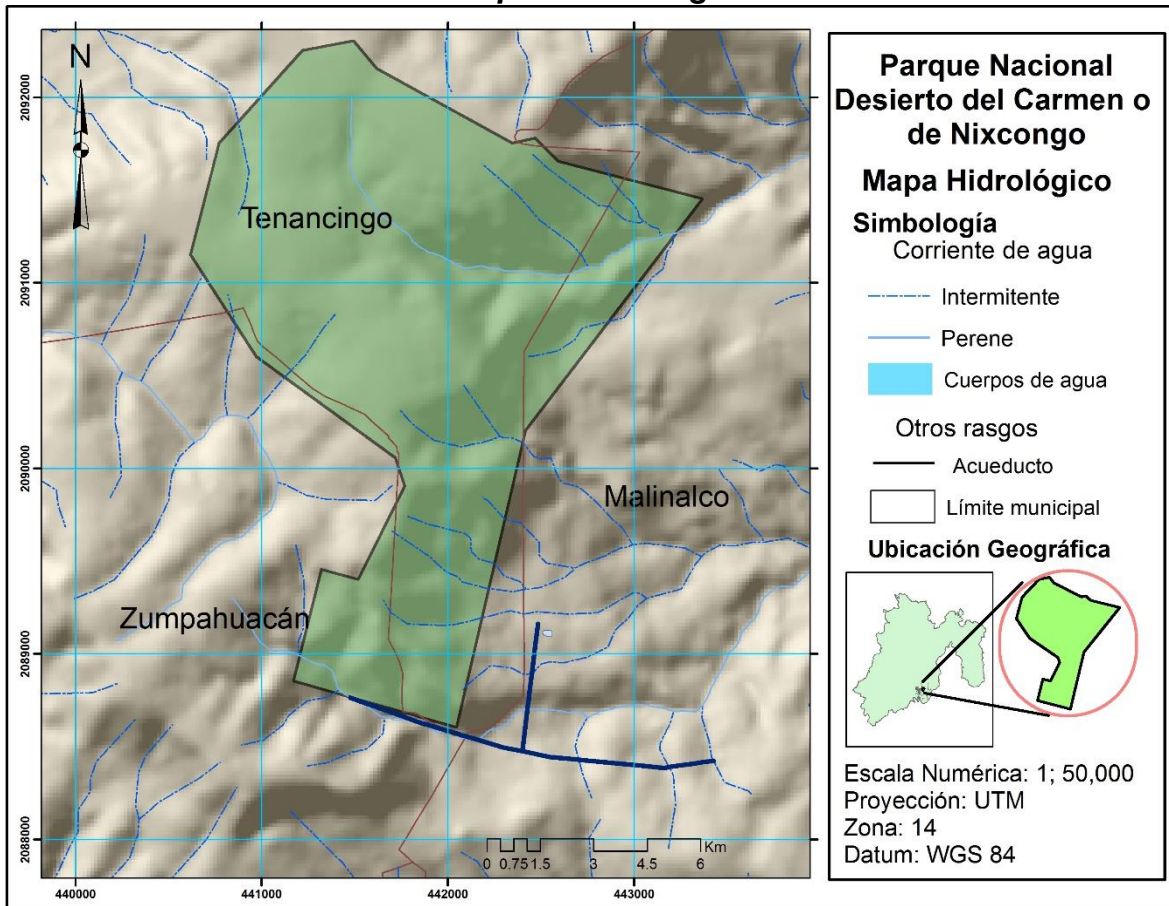
Hidrología

La hidrología en Tenancingo pertenece a la Región Hidrológica “Río Balsas”, que corresponde a su vez a la Cuenca del Río Grande de Amacuzac, donde se ha conformado una especie de “Sistema” hidrológico, compuesto por el Río Tenancingo, que es el escurrimiento más importante del municipio y puede decirse que de la región, debido al itinerario que recorre, cuyo origen está en los manantiales de San Pedro Zictepec (municipio de Tenango del Valle) y que llega al Estado de Guerrero, hasta ser uno de los afluentes del Río Balsas (Mapa 4) (CONANP, 2015).

Existen 37 cuerpos de agua, que se concentran en una superficie de 37 hectáreas; además 22 manantiales, 7 acueductos y 21 arroyos de corriente intermitente. Es de destacar que el arroyo de San Simoncito fluye en dirección poniente, y cuenta con

una caída de agua llamado “El Salto”, que tiene una altura de 25 metros, dicho escurrimiento es un ramal del río Salado (CONABIO, 2018).

Mapa 4. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2020).

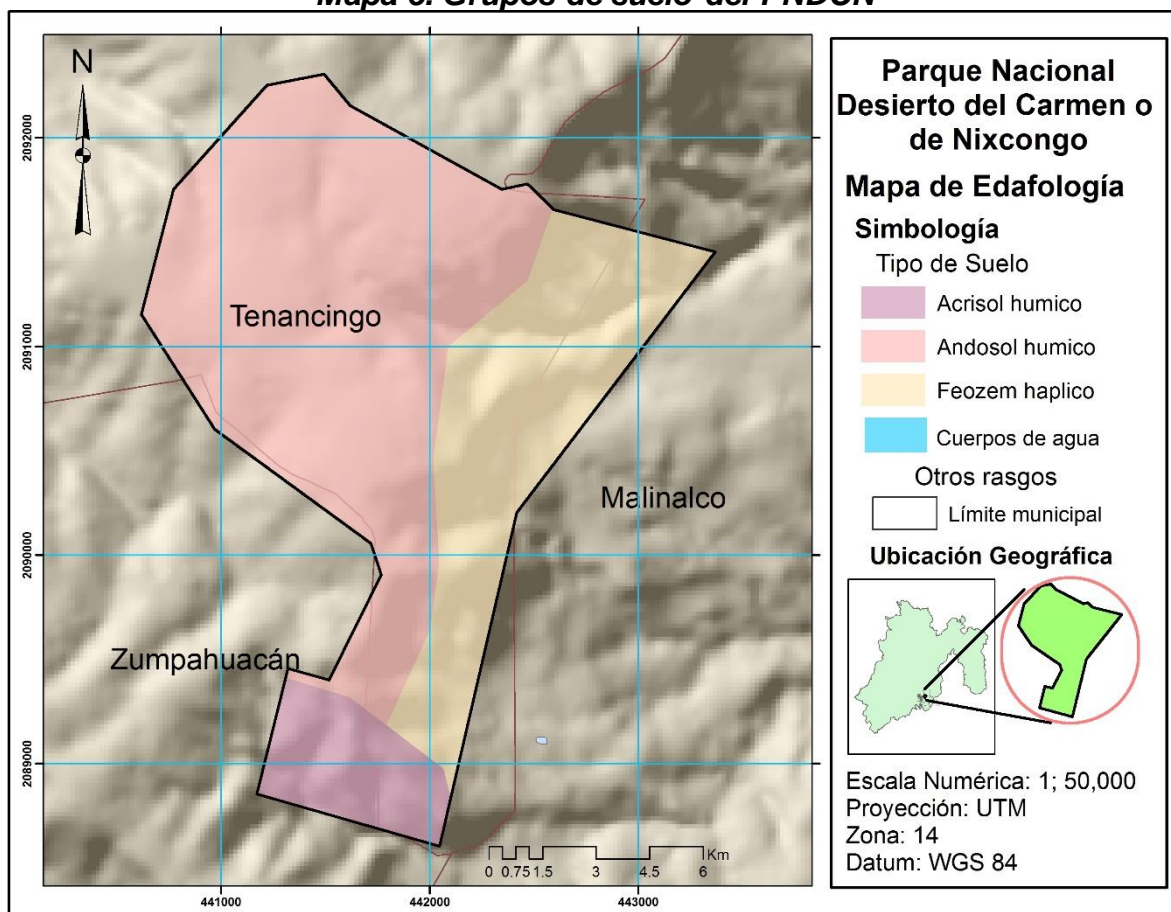
Edafología

En el Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo predominan los suelos Feozem háplico, caracterizados por su riqueza en materia orgánica y nutrientes. Estos suelos presentan una amplia distribución, ya que se encuentran en regiones que van desde zonas semiáridas hasta áreas templadas o tropicales. Bajo condiciones normales, permiten el desarrollo de casi cualquier tipo de vegetación y pueden ubicarse tanto en terrenos planos como en regiones montañosas. Su vulnerabilidad a la erosión depende principalmente de la topografía del lugar. Cuando estos suelos son particularmente profundos, resultan aptos para actividades agrícolas, tanto de riego como de temporal; en cambio, aquellos situados en laderas o pendientes se utilizan en prácticas pecuarias con resultados aceptables (Mapa 5) (CONABIO, 2018).

El segundo es el Acrisol húmico que se caracteriza por la adsorción de fosfatos y la alta susceptibilidad a la erosión, lo que genera restricciones a su uso. No es apto para cultivos debido a sus características y composición, salvo para especies de baja demanda y tolerantes a la acidez como la piña, caucho o palma de aceite (CONANP, 2009).

El tercer tipo de suelo predominante es el Andosol húmico, el cual se forma principalmente a partir de cenizas volcánicas, aunque también puede desarrollarse sobre tobas, pumitas, lapilli y otros materiales expulsados durante eventos volcánicos. La rápida alteración de los materiales volcánicos, altamente porosos, favorece la acumulación de complejos órgano-metálicos estables, caracterizados por una elevada relación catión/anión. Los minerales predominantes en estos suelos incluyen alófana, imogolita y ferrihidrita (FAO, 1995).

Mapa 5. Grupos de suelo del PNDCN



Fuente: elaboración propia con base en CONANP, (2023).

Diversidad de fauna

El parque alberga una notable diversidad de especies faunísticas que, en conjunto, forman un sistema ecológico complejo y contribuyen al desarrollo de un ecosistema específico. El municipio de Tenancingo se localiza en una región caracterizada por sierras montañosas, lomeríos y la depresión del Balsas, en la zona sur del estado. La conjunción de estas regiones propicia la diversidad de especies. Sin embargo, la fauna presente en el municipio al igual que la flora ha descendido notablemente, destacando las siguientes especies: Cacomiztle (*Bassariscus astutus*), ratón venado (*Peromyscus maniculatus*), ardilla gris (*Sciurus aureogaster*) liebre torda (IUCN, 2014).

4.1.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNDCN

De acuerdo con las características ambientales analizadas previamente, se identificaron cinco diferentes tipos de usos de suelo, los cuales se describen a continuación, es importante mencionar que solo los ecosistemas forestales se consideraron para el desarrollo del análisis de fragmentación forestal.

1.- Bosque de encino

Los bosques de encino (*Quercus*) son comunidades vegetales características de las zonas montañosas de México. De hecho, junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo, sin embargo, penetran regiones de clima cálido, no faltan en las francamente húmedas y aún existen en las semiáridas, pero en estas últimas asumen con frecuencia la forma de matorrales (Rzedowski, 1981).

Los encinares guardan relaciones complejas con los pinares, con los cuales comparten afinidades ecológicas generales y los bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus* son muy frecuentes en el país. También se relacionan los bosques de *Quercus* con los *Abies* y con el bosque mesófilo de montaña, así como con diversos tipos de bosques tropicales y aún con las sabanas y otros pastizales, lo cual es explicable en función de su extensa amplitud ecológica. (Rzedowski, 1981) (Foto1).

Fotografía 1. Bosque de encino en el PNDCN



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

2.- Bosque mixto de pino-encino

La SEMARNAP (1995), 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 como es el caso de PNDCN (Foto 2).

Fotografía 2. Bosque mixto de pino- encino en el PNDCN



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

3.- Vegetación secundaria

La vegetación secundaria denominada así para esta investigación, está conformada por dos tipos de matorral, manchas de árboles de madroño (*Arbutus glandulosa*) y el fresno (*Fraxinus sp.*), ocasionalmente se encuentra el cedro blanco (*Cupressus benthamii*) y cipreses (*Cupressus lindleyi*), (Villa y Hernández, 1993).

Fotografía 3. Vegetación secundaria en el PNDCN



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.- Agro-ecosistemas

Los ecosistemas con agricultura se desarrollan de manera temporal, a causa de la intervención de actividades antrópicas son los agroecosistemas o ambientes conocidos localmente como milpas (Foto 4). Estos espacios son utilizados principalmente para la producción y aprovechamiento agropecuario de las poblaciones que habitan en los límites del parque. Las milpas son agroecosistemas muy variados en cuanto a su producción, dentro de los que destacan el maíz, avena, avena forrajera, frijol, hortalizas y flores (SEMARNAT, 2018).

Fotografía 4. Agro-ecosistemas en el PNDCN



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

5.- Localidades urbanas

En este uso de suelo se engloba la infraestructura vial, localidades urbanas y rurales. Dentro del Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo se encuentra la localidad denominada El Carmen, que es el conglomerado con mayor superficie, por otra parte, existen diversos asentamientos de menor extensión al norte del Parque (Foto 5).

Fotografía 5. Localidades en el PNDCN



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.1.3 Ecosistemas presentes en el PNDCN

El Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo para el año de 2022 presenta una superficie de 475 hectáreas distribuidas en cinco distintos ecosistemas (Tabla 6). El bosque mixto de pino-encino cuenta con una superficie de 189 hectáreas que es el de mayor proporción (40.2%) y se distribuye principalmente en la zona centro, norte y este del ANP.

Tabla 6. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNDCN

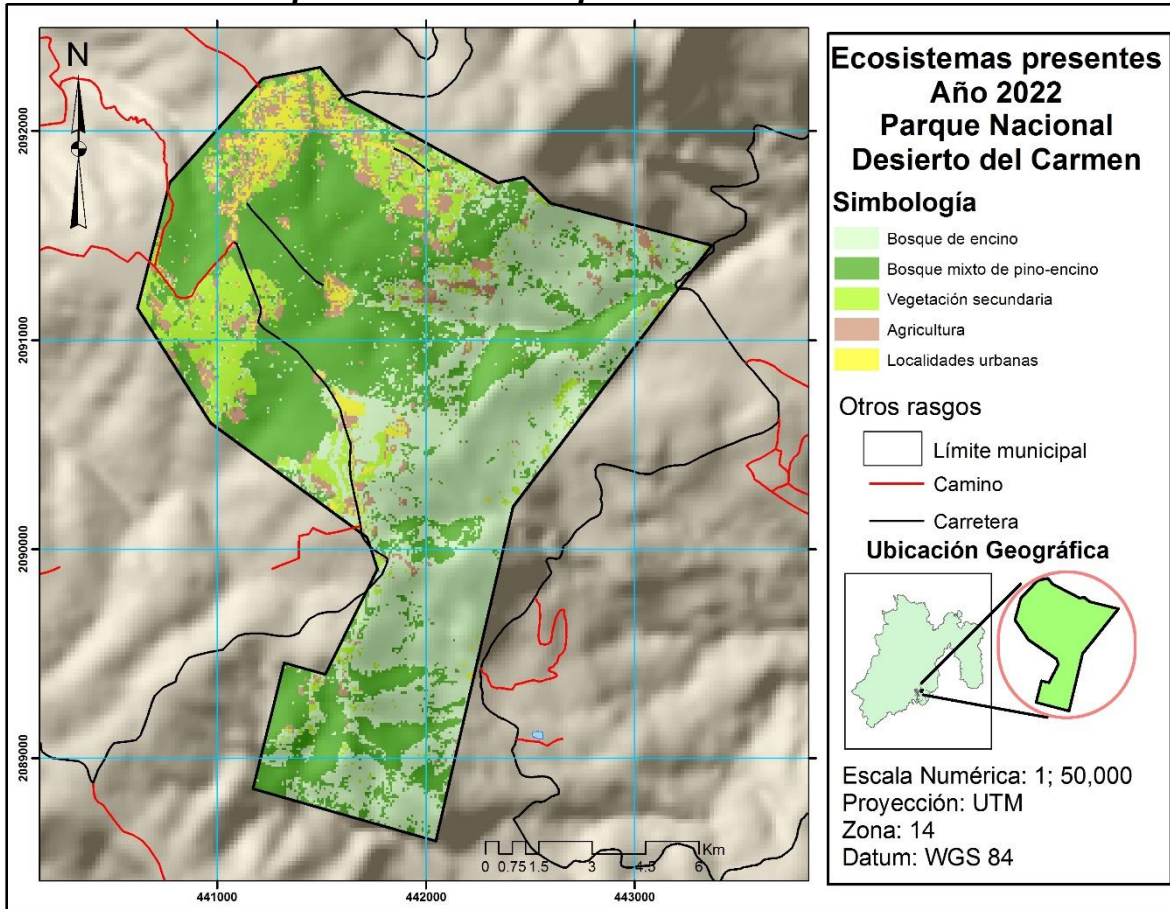
No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de pino-encino	191	40.2
2	Bosque de encino	189	39.8
3	Vegetación secundaria	47	9.9
4	Agricultura	33	6.9
5	localidades urbanas	15	3.2
	Total	475	100

Fuente: elaboración propia, con base en INEGI (2023).

El ecosistema forestal bosque encino cuenta con una superficie de 191 hectáreas equivalente al (39.8%) distribuidas en la zona suroeste y noroeste del área de estudio, entre las altitudes que van de los 3,000 a los 3,700 m.s.n.m., el tercer ecosistema es la vegetación secundaria con 47 hectáreas (9.9%) distribuidas la mayor parte en la zona norte (Mapa 6).

El cuarto ecosistema es la agricultura que cuenta con una superficie de 33 hectáreas (6.9%) distribuidas en la zona oeste, el quinto ecosistema son las localidades urbanas con 15 hectáreas (3.2%) distribuidas en la zona centro y norte del ANP.

Mapa 6. Ecosistemas presentes en el PNDCN



Fuente: elaboración propia, con base en INEGI (2023).

4.1.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNDCN

Durante el año 2022, se verificaron un total de 500 puntos de muestreo en el mapa final, distribuidos en 100 puntos de verificación (validación en gabinete) por cada ecosistema identificado, donde las categorías del mapa fueron contrastadas con la realidad observada en imagen. Según la matriz de confusión de error para dicho año, de los 500 puntos evaluados, 488 coincidieron con el ecosistema asignado, mientras que solo 12 puntos fueron clasificados en un ecosistema diferente al previsto. Estos resultados reflejan el nivel de precisión en la clasificación de cada ecosistema dentro de los mapas generados.

La tabla 7 se generó en función a la proporción de la superficie (por ecosistema identificado) 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 7. Matriz de error para los ecosistemas del PNDCN del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque de encino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Localidades urbanas	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de encino	97	0	2	0	0	100
	Bosque mixto de pino-encino	0	98	0	0	0	100
	Vegetación secundaria	2	1	97	2	0	100
	Agricultura	1	1	1	98	2	100
	Localidades urbanas	0	0	0	0	98	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	100	500

Fuente: elaboración propia, con base en Card (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 8), son los siguientes, se identificaron 12 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, como resultado del ajuste se presentan los siguientes porcentajes para cada ecosistema: bosque de encino (13.6% de la superficie total); bosque mixto de pino-encino (3.06%); vegetación secundaria (31.03%); agricultura (29.08%) y localidades urbanas (23.12%).

Tabla 8. Confiabilidad de la cartografía para los ecosistemas del PNDCN del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque de encino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Localidades urbanas	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de encino	0.07	0	0.08	0.04	0	0.2
	Bosque mixto de pino-encino	0	0.03	0.08	0.08	0	0.2
	Vegetación secundaria	0.06	0	0.11	0.02	0	0.2
	Agricultura	0	0	0.02	0.12	0.05	0.2
	Localidades urbanas	0	0	0.03	0.01	0.18	0.2
Total verdad imagen		0.13	0.03	0.31	0.29	0.23	1.0
Proporción mapa		0.39	0.40	0.09	0.06	0.03	1.0

Fuente: elaboración propia, (2023).

El método de Card (1982) pondera el número de sitios de verificación (verdad terreno) en correlación a la superficie de cada uno de los ecosistemas forestales (verdad imagen). Para el bosque de encino (29.6% de la superficie total); bosque mixto de pino-encino (4.1%); vegetación secundaria (37.95%); agricultura (25.28%) y localidades urbanas (3.02%) (Tabla 9).

Tabla 9. Matriz de error corregida para los ecosistemas del PNDCN del año 2022

b) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)					
		Bosque de encino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Localidades urbanas	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de encino	0.21	0	0.06	0.02	0	0.29
	Bosque mixto de pino-encino	0	0.04	0.27	0.19	0	0.50
	Vegetación secundaria	0.08	0	0.03	0.04	0	0.12
	Agricultura	0	0	0.07	0.03	0.05	0.04
	Localidades urbanas	0	0	0.01	0.04	0.02	0.03
Total verdad imagen		0.29	0.04	0.38	0.25	0.03	1.0
Proporción mapa		0.39	0.40	0.09	0.06	0.03	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza para la cartografía de los ecosistemas del PNDCN del año 2022

En relación con la confiabilidad del productor de la cartografía, las localidades urbanas representan los valores más altos con una proporción del (99% verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al (1%); por otra parte, el ecosistema vegetación secundaria presenta la mínima confiabilidad del productor con el (97%) y el mayor nivel de error de omisión con el (3%). En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo es del (98.7% verdad imagen) y (1.31%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global (Tabla 10).

Tabla 10. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza para los ecosistemas del PNDCN del año 2022

Año 2022	Bosque de encino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Localidades urbanas	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	96.00	100	98	97	99	98.75	1.31
Error de comisión	4	0	2	3	1		
Confiabilidad del usuario	4.24	0	3.83	2.56	3.12		
Confiabilidad del productor	98	98	97	98	99		
Error de omisión	2	2	3	2	1		
Confiabilidad del productor	0.121	0.658	0.375	0.670	0.211		

Fuente: elaboración propia, con base en Card (1982)

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La tabla 11 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación con el resultado del ajuste de los errores de clasificación.

Tabla 11. Superficies corregidas por el método de Card

Año 2022		Bosque de encino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	localidades urbanas	Superficie (Ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de encino	0.44	0	0.50	0.25	0	189	0.39	167
	Bosque mixto de pino-encino	0	0.18	0.50	0.50	0	191	0.40	186
	Vegetación secundaria	0.37	0	0.70	0.12	0	47	0.09	67
	Agricultura	0	0	0.133	0.76	0.30	33	0.06	38
	Localidades urbanas	0	0	0.01	0.09	1.08	15	0.03	17
Proporción representada en el mapa		0.39	0.40	0.09	0.06	0.03	475	1	475.0

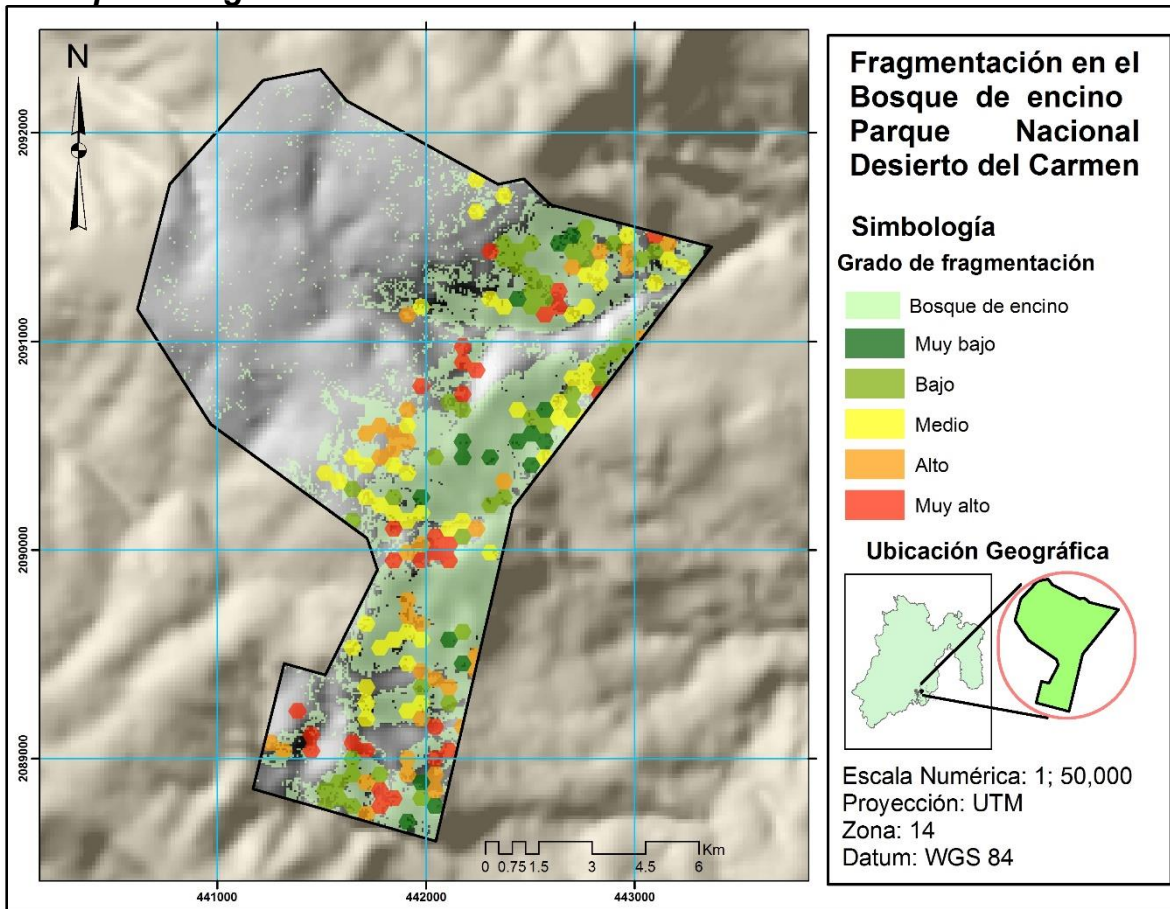
Fuente: elaboración propia, con base en Card (1982).

4.1.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNDCN

La cartografía referente al grado de fragmentación forestal del bosque de encino y bosque mixto de pino-encino en el Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo para el año 2022 se presenta a continuación.

Para el bosque de encino la leyenda corresponde a cinco categorías de acuerdo con Correa *et al.* (2012), que en la suma de todas estas encontramos un total de 179 polígonos, los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (17), bajo (46), medio (51), alto (36) y muy alto (29)

Mapa 7. Fragmentación en el ecosistema forestal de encino del PNDCN



Fuente: elaboración propia con base a CONAFOR (2023).

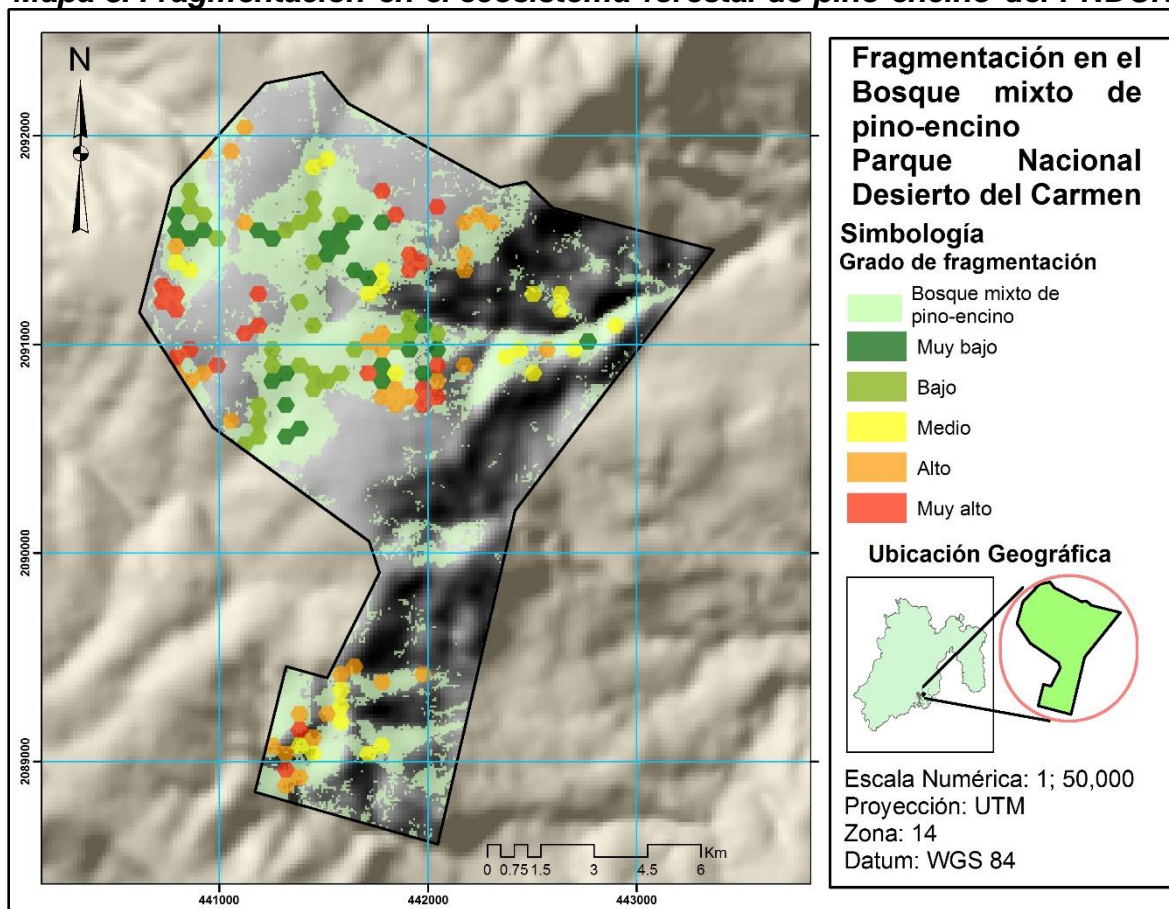
Los valores más altos de fragmentación forestal se concentran en la zona sur, centro y noreste del parque, lo que coincide con las áreas donde las pendientes son menores y donde se desarrollan múltiples actividades recreativas, de comercio y turísticas, las que provocan deforestación en la zona debido a diversos factores, como la construcción de infraestructura como caminos, hoteles o desarrollos turísticos.

El turismo sin regulación contribuye a que exista erosión del suelo y acumulación de basura, la zona no cuenta con la vigilancia necesaria ni programas efectivos para el desarrollo sustentable de estas actividades.

En el ecosistema forestal bosque mixto de pino-encino se determinaron cinco categorías, con un total de 136 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (26), bajo (28), medio (23), alto (36) y muy alto (23).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona centro del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan pendientes de 1° a 25°, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas para el cultivo de aguacate, gracias a los beneficios climáticos que brinda el parque como la temperatura de 20° a 30° dependiendo de la época (Mapa 8).

Mapa 8. Fragmentación en el ecosistema forestal de pino-encino del PNDCN



Fuente: elaboración propia con base a CONAFOR (2023).

4.1.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNDCN

La captura de carbono se calculó para cada ecosistema forestal en el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuestos por Jiménez, (2013) y Morfín *et al.* (2015). Es importante resaltar que el análisis de captura de carbono se realizó con los datos de fragmentación forestal y sin estos, con el objetivo de comparar y resaltar mediante la diferencia el nivel de detalle alcanzado.

El PNDCN presenta dos tipos de ecosistemas forestales: en el bosque de encino sin el análisis de fragmentación forestal este bosque ocupaba 191 ha distribuidas en la zona centro y norte del ANP. El carbono capturado para el año 2022 fue de 90.26 ton. El análisis de fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a detalle, con este análisis la superficie para el bosque de encino disminuyó en 87 ha equivalentes a 41.11 toneladas menos de carbono capturado.

Tabla 12. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNDCN

Nº	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de encino	191	104	0.4726	90.26	49.15
2	Bosque de pino-encino	189	123	0.4706	88.94	57.88

Fuente: elaboración propia, con base en Correa, (2012).

El ecosistema forestal bosque mixto de pino-encino sin análisis de fragmentación forestal, tenía una superficie de 189 hectáreas distribuidas en la zona sureste del área de estudio, en las que se capturaron 88.94 toneladas de carbono en el año 2022. Para el bosque mixto de pino-encino con el análisis de fragmentación forestal, la superficie fue reducida en 66 ha, por lo que disminuyó el carbono capturado en 31.05 toneladas para ese mismo año (Tabla 12).

4.1.7 Diagnóstico integral del PNDCN

Con base en la caracterización geográfica y ambiental, se identificó que la importancia del Parque Nacional radica en la provisión de servicios ecosistémicos fundamentales para las comunidades aledañas. Estos servicios incluyen la regulación del clima, la recarga hídrica, la conservación de la biodiversidad y el valor cultural y recreativo del paisaje. No obstante, es importante destacar que este espacio natural mantiene una interacción constante con diversas actividades humanas, lo que ha generado presiones significativas sobre su integridad ecológica (Tabla 13).

Tabla 13. Análisis de los problemas identificados en el PNDCN

Problemas identificados	Fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Cambios de uso de suelo	Observación directa en campo
2.- Erosión de suelo	Observación directa en campo
3.- Residuos sólidos	Plan municipal de desarrollo urbano de Tenancingo (2024)
4.- Tala clandestina	Plan municipal de desarrollo urbano de Tenancingo (2024)
Problemas sociales	
1.- Delincuencia	Plan operativo para agentes perturbadores, (2023)
Problemas económicos	
1.- Turismo no regulado	Secretaría de Economía, (2023).
2.- Comercio informal	Secretaría de Economía, (2023).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Los procesos realizados para el análisis de la problemática ambiental, económica y social en el PNDCN se basó en la metodología de diagnóstico ambiental comunitario con fines investigativos propuesta por Linares *et al.* (2021), adaptada para el contexto del presente estudio. No obstante, es importante destacar que solo se retomaron ciertos aspectos clave de esta metodología, con el objetivo de identificar los principales problemas.

Esta adaptación permitió un enfoque más flexible y acorde con los objetivos específicos de la investigación. En este contexto, la intensa dinámica social en la zona de influencia del parque ha generado cambios significativos en los ecosistemas forestales, reduciendo los servicios ecosistémicos que estos proporcionan (Orozco y Flores, 2024).

Problemas ambientales

Uno de los problemas más críticos que enfrenta el parque es el cambio de uso del suelo, impulsado por conflictos de intereses económicos entre diversos actores locales. Esta situación se ve agravada por las disputas entre los propietarios de predios ubicados dentro del área protegida, muchos de los cuales no respetan la zonificación establecida para uso forestal, especialmente en las zonas norte, oeste y centro del parque. En estas áreas, se ha documentado el uso del terreno para actividades agrícolas y de pastoreo, en contravención con los objetivos de conservación establecidos para el área (Vargas, 1997).

Por otro lado, la falta de regulación efectiva de las actividades turísticas y comerciales dentro del Parque Nacional se debe, en gran medida, a la ausencia de instrumentos específicos de política ambiental. Según Orozco y Flores (2024), las acciones de conservación en la zona se concentran principalmente en la implementación del programa de pago por servicios hidrológicos, sin una estrategia integral que aborde de manera articulada los distintos usos y presiones sobre el territorio. Actualmente, el área carece de un Plan de Manejo, lo cual representa un obstáculo significativo para la mitigación de las problemáticas ambientales existentes. Esta carencia limita la efectividad de las estrategias de conservación y gestión sostenible, al no contar con un marco normativo y operativo que oriente la toma de decisiones (Sistema de Información, Monitoreo y Evaluación para la Conservación, 2015).

El PNDCN se encuentra dentro de un parque de mayor superficie como es el Parque Ecológico Recreativo de Tenancingo, Malinalco y Zumpahuacán (PERTMZ), el cual cuenta con un programa de conservación y manejo del año 2010, sin embargo las propuestas de mitigación planteadas están enfocadas a una escala regional, y después de más de una década se encuentra desactualizado (Gaceta de Gobierno, 2010).

En este sentido, de acuerdo con lo observado en campo, los visitantes ingresan con herramientas e instrumentos para hacer parrilladas y fogatas lo, que genera incendios forestales. La erosión del suelo es visible en las áreas donde los campesinos removieron pastizales y arbustos adaptando el terreno para actividades agrícolas.

Los problemas mencionados previamente se identificaron en campo y se referenciaron con base en investigaciones y planes gubernamentales, con el objetivo de dar confiabilidad a la investigación. En este contexto, resulta fundamental su regulación bajo una normatividad ambiental sustentable acorde con su categoría de protección. La contribución de esta investigación radica en la identificación y análisis de zonas específicas con menor densidad forestal, las cuales deben ser consideradas prioritarias para su conservación y rehabilitación, garantizando así la sostenibilidad ecológica del área.

Problemas sociales

Los problemas sociales que enfrentan las localidades de Tenancingo cercanas al parque son: la marginación ya que las viviendas ubicadas en los límites del parque no cuentan con una planificación territorial y se encuentran en una zona de riesgo ya que las pendientes son una limitante para proveer de los servicios de drenaje agua y luz eléctrica (Plan operativo para agentes perturbadores, 2023).

Por otra parte, la delincuencia se ha visto incrementada debido a la falta de alumbrado público en los límites de la cabecera municipal, los problemas mencionados pueden disminuir en el futuro con políticas públicas que se apliquen correctamente (Plan de desarrollo municipal de Tenancingo, 2024).

Problemas económicos

La población de las localidades ubicadas en los límites del parque se dedican principalmente al comercio informal, la agricultura y ganadería, si bien estas actividades no están permitidas dentro del ANP, los comuneros optan por diversificar el uso de suelo forestal con el fin de obtener mayores ingresos (Secretaría de Economía, 2023).

Es evidente la transformación del territorio dentro del parque, los esfuerzos de las autoridades municipales para mitigar este deterioro a través de campañas de reforestación y recolección de residuos han tenido escaso impacto, en gran parte debido a la baja participación social.

Ante este escenario, una posible solución sería replantear dichas campañas, integrándolas y fortaleciéndolas con programas estatales y federales, con el fin de ofrecer incentivos económicos a la población local. Este enfoque no solo podría mejorar la efectividad de las acciones, sino también fortalecer el sentido de pertenencia e identidad comunitaria hacia la conservación del parque (CONAFOR, 2015)

4.1.8 Consideración final del PNDCN

El cálculo de la captura de carbono, basado en el análisis de la fragmentación forestal, permitió identificar con mayor precisión las áreas de bosque y las zonas con menor densidad forestal. La cartografía generada reveló los polígonos con los niveles más altos de fragmentación, los cuales se localizan en las zonas centro y sur del parque, específicamente en el municipio de Tenancingo, Estado de México. En estas áreas se desarrollan diversas actividades turísticas y religiosas, las cuales tienen un impacto directo en el estado de los bosques. Esto se debe, en gran parte, al inadecuado manejo de los residuos sólidos, lo que limita el desarrollo óptimo de los ecosistemas forestales (Atlas de Riesgos Municipal de Tenancingo, 2023).

Un ejemplo claro de estas limitaciones es la limitación de acciones efectivas por parte de las autoridades gubernamentales y actores privados en cuanto a la gestión sostenible del espacio natural. A esto se suma la ausencia de un plan de manejo que regule de manera adecuada la interacción entre los ecosistemas naturales y las actividades humanas en la zona.

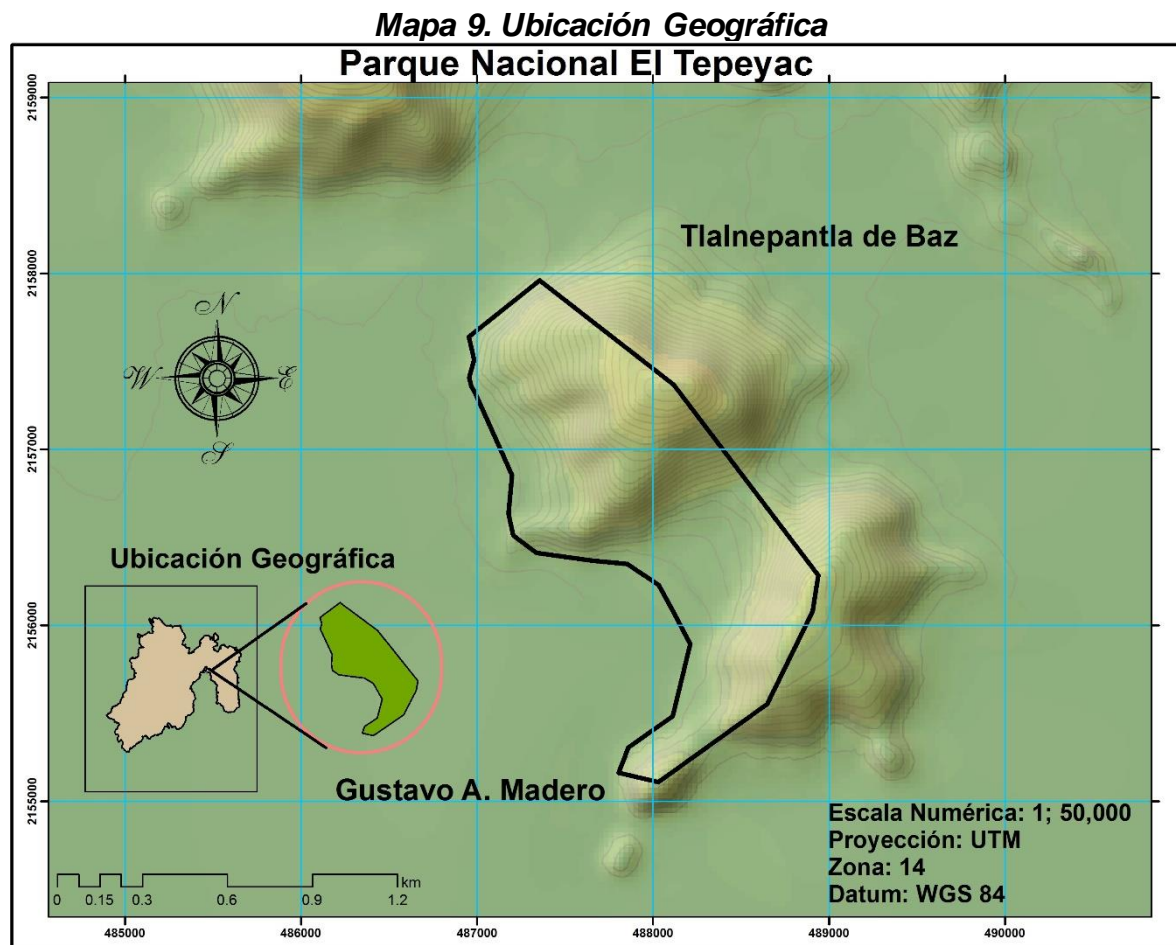
4.2 Parque Nacional El Tepeyac (PNET)

4.2.1 Caracterización Geográfica del PNET

Localización geográfica

En el mapa 9 se observa la ubicación geográfica del Parque Nacional El Tepeyac (PNET), la mayor parte de su territorio pertenece a la Ciudad de México, Delegación Política Gustavo A. Madero (95%), y la porción Noroeste del parque se encuentra en el municipio de Tlalnepantla (5%) en el Estado de México (INEGI, 2010).

El Parque Nacional el Tepeyac fue decretado el 18 de febrero de 1937, cuenta con una superficie de 259 ha. El parque está formado por una pequeña cordillera al sureste de la Sierra, integrada por los cerros: Zacatenco, Vicente Guerrero, Gachupines y Tepeyac, los cuales cubren una superficie de 284.66 ha, con una altitud entre 2250 y 2500 msnm.

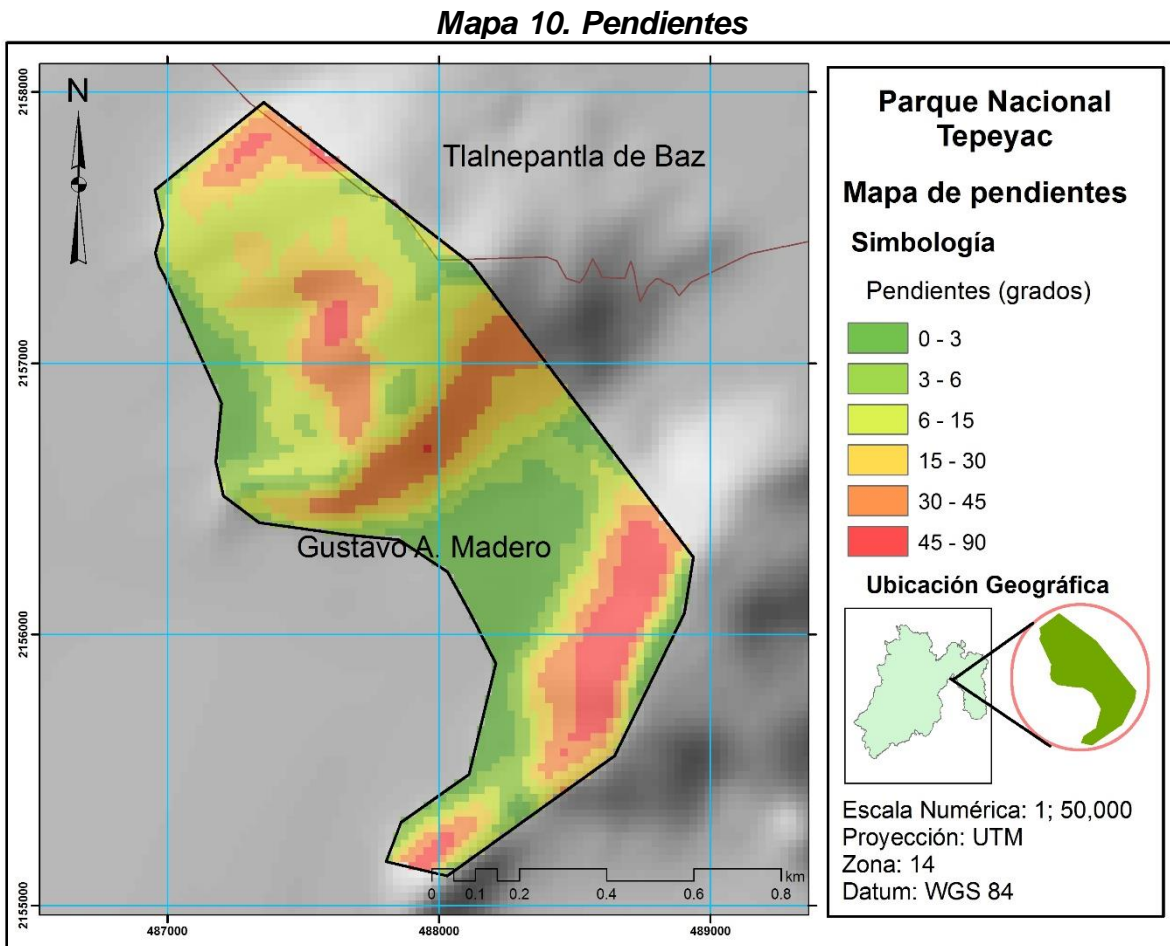


Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2023).

Fisiografía

La fisiografía del parque es de origen volcánico, debido a los procesos explosivos de gran intensidad que se presentaron en las etapas iniciales de su formación y que culminaron con procesos extrusivos, lo que generó derrames de lava de corta extensión, ejemplo de ello son los volcanes Vicente Guerrero y Zacatenco (Mosser, 1990).

Otras elevaciones se originaron debido a la actividad efusiva, como es el caso de los domos volcánicos, conocidos como el Chiquihuite y el Tepeyac (Mapa 10).



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2023).

Litología

La geología que presenta el Parque Nacional El Tepeyac está compuesta por rocas andesitas y brechas volcánicas. En la mayoría de sus elevaciones se encuentran laderas donde la pendiente es mayor que (25%) en las que predominan rocas andesitas, incluyendo brechas y pórfidos (Mosser, 1990).

La roca andesita es de origen ígnea volcánica de composición intermedia, compuesta fundamentalmente por plagioclasa cálcica, (labradorita - andesina) y piroxenos, pueden presentar vidrio volcánico, biotita, cristales de cuarzo, andalucita, anfíboles (hornblenda), suelen tener tonos grisáceos o pardos y rojizos por alteración. Por su parte, la brecha volcánica se forma con fragmentos de rocas volcánicas compactados con cenizas, se encuentra distribuida en la zona sur del parque como se muestra en el mapa 12 (INEGI, 2015).

Clima

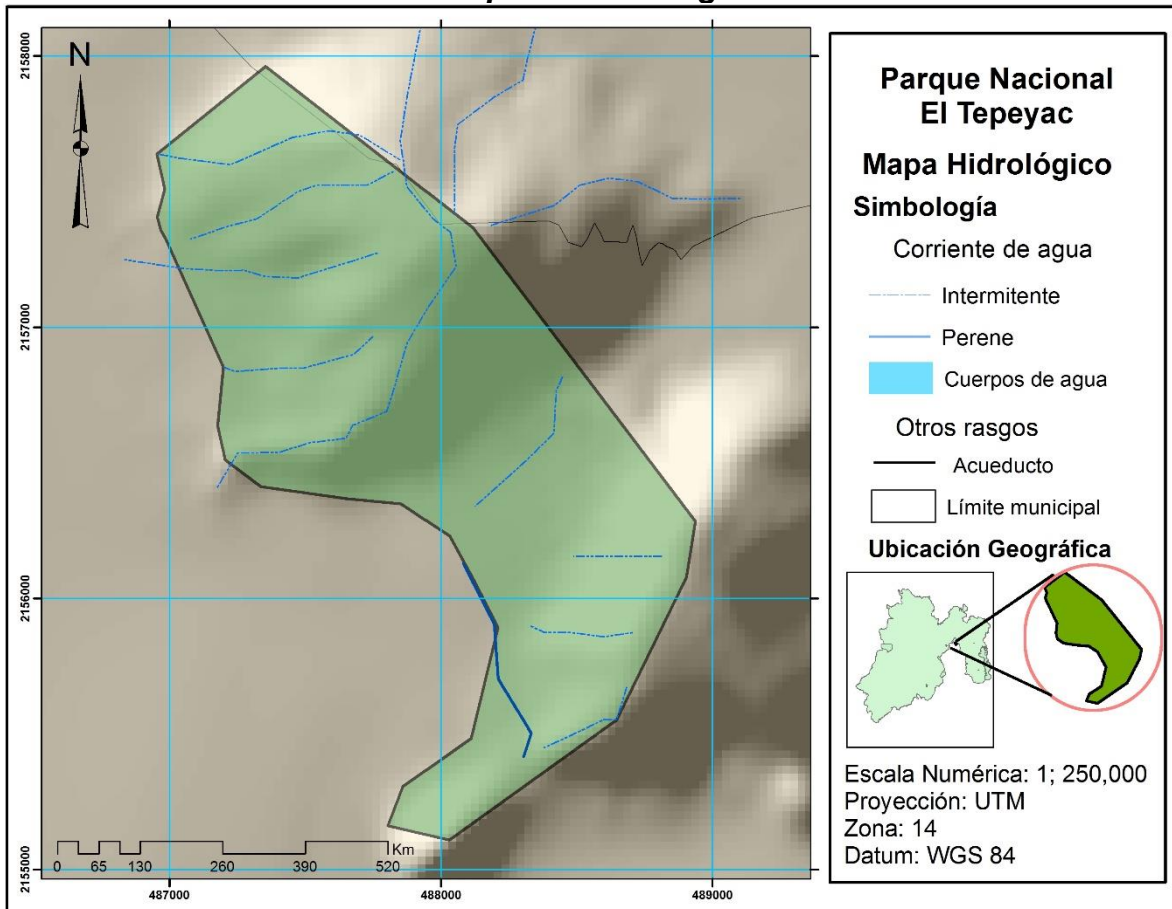
El clima, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1988), es templado subhúmedo C(wo)(w), con precipitaciones escasas en el verano, siendo la temperatura media anual de 16 °C y la precipitación total anual de 584.7 mm. (Vela y Flores, 2000).

Hidrología

El Parque Nacional El Tepeyac no cuenta con algún afluente cercano. Anteriormente los lagos de Texcoco y Zumpango bordeaban parte de los cerros. Debido a la falta del líquido para el consumo humano se construyó el Acueducto de Guadalupe, que surtía de agua a la cercana Villa de Guadalupe y provenía con el vital líquido desde el poblado de Tlalnepantla (Mapa 11).

Recibe prácticamente las aportaciones pluviales de los meses de verano, que lamentablemente en las laderas que han sido urbanizadas se pierden en el sistema de drenaje (POAT, 2008).

Mapa 11. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2023).

Edafología

El Parque Nacional está constituido por suelos de tipo Phaeozem lépticos y lúvicos. El grupo de suelos que predomina son los Phaeozem lépticos que se encuentran en las laderas y partes más altas de los cerros Zacatenco y Gachupines, donde ocupan 229.39 ha equivalentes a 80.58% de la zona en estudio. Los Phaeozem lúvicos ocupan 55.27 ha o sea 19.42%, se localizan en los terrenos que están sujetos a uso agrícola en el cerro Vicente Guerrero. Los suelos se formaron a partir del intemperismo de rocas eruptivas, como la andesita, y de diversos materiales piroclásticos que se consolidaron en el momento de su depósito, por lo que los suelos son someros, pedregosos y tienden a la neutralidad además son ricos en materia orgánica (Vela y Flores, 2004).

Diversidad de fauna

El Parque Nacional cuenta con una gran diversidad de fauna, dentro de la cual se destacan especies representativas identificadas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2008), entre las que se incluyen:

- Aves: Colibrí Pico Ancho (*Cyanthus latirostris*), Tortolita Cola Larga (Columbina inca), Colibrí Berilo (*Saucerottia beryllina*) y Jilguerito Dominicano (*Spinus psaltria*).
- Reptiles: Lagartija Espinosa de Collar (*Sceloporus torquatus*), Culebra Gris Nariz de Pala (*Conopsis nasus*) y Lagartija Alicante Neovolcánico (*Barisia imbricata*)
- Mamíferos: Zorrillo Manchado Sureño (*Spilogale angustifrons*)

4.2.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNET

El Parque Nacional El Tepeyac se encuentra ubicado dentro del Sistema Volcánico Transversal que forma parte de la Sierra de Guadalupe, de acuerdo con Mosser (1990) presenta una fisiografía con una gran diversidad altitudinal (2250 y 2500 m.s.n.m), lo que favorece a que existan diversos microclimas ideales para el desarrollo de diversos ecosistemas forestales.

1.- Bosque mixto de piñonero-pirul

El bosque mixto de piñonero-pirul denominado así para esta investigación está conformado por el piñón (*Pinus cembroides*), que es un árbol nativo de México de la familia de las pináceas, sus principales características son, baja estatura llegando a medir hasta 10 metros de altura, sus hojas son muy pequeñas y sus conos miden de 5 a 6 cm (Vela y Flores 2004).

Por otra parte, el pirul (*Schinus molle*), es un árbol de tamaño pequeño a mediano, habitualmente de 6 a 8 m de altura, con registros de individuos de 25 metros de alto. El diámetro del tronco puede llegar a medir hasta 50 cm, ramas colgantes, corteza exterior café o gris, muy áspera, exfoliante en placas largas, tricomas erectos o curvados, hasta 0.1 mm de largo, blanquecinos; plantas dioicas (CONANP, 2024) (Foto 6).

Fotografía 6. Bosque mixto de piñonero-pirul en el PNET



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

2.- Bosque mixto de cedro-eucalipto.

El bosque mixto de cedro-eucalipto denominado así para esta investigación, está conformado por el cedros blancos (*Cupressus lindleyi*), son arboles de hasta 30 m de alto, con el tronco hasta 1.5 m de diámetro, corteza rojiza, delgada, fisurada longitudinalmente; ramas no arregladas en un plano, extendidas o ascendentes formando una copa cónica (CONAFOR, 2015).

Por otra parte, los eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis*), crecen hasta 20 m, llegan a veces a 60 m de altura; su ritidoma (corteza) gruesa (3 cm) esponjosa, mezclando los rojizos, grises, verdosos y blancuzcos (Foto 7)

Fotografía 7. Bosque mixto de cedro-eucalipto en el PNET



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

3.- Vegetación secundaria.

La vegetación secundaria está conformada por dos tipos de matorral, y polígonos dispersos de árboles de palo dulce o palo cuate (*Eysenhardtia polystachya*), cuajilote amarillo (*Bursera sp*), casahuate (*Ipomoea sp*), mezquite (*Prosopis juliflora*) y membrillo cimarrón (*Cotoneaster*), se tomaron en cuenta por la contribución de captura de carbono que generan, si bien son elementos aislados, en su totalidad aportan cantidades importantes en la generación de oxígeno (Foto 8) (Jiménez, 2013).

Fotografía 8. Vegetación secundaria en el PNET



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.- Zona urbana

La zona urbana está conformada por la infraestructura vial, localidades urbanas y rurales. Dentro del Parque Nacional El Tepeyac la principal aglomeración urbana es la Alcaldía Gustavo A. Madero, habitan alrededor de habitan 1,64, 477 habitantes, por lo cual la expansión de la mancha urbana consecuencia de la demanda de bienes y servicios para dicha población (CONAPO, 2023).

Fotografía 9. Localidades urbanas en el PNET.



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.2.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional El Tepeyac.

El Parque Nacional El Tepeyac presenta para el año de 2022 una superficie de 249 hectáreas distribuidas en cuatro distintos ecosistemas (Tabla 14), es uno de los parques nacionales con menor superficie, sin embargo su importancia radica en que es de las pocas áreas forestales dentro de la zona metropolitana de la Ciudad de México. El bosque mixto de piñero-pirul cuenta con una superficie de 66 hectáreas que es el de mayor proporción forestal (26.51%) y se distribuye principalmente en la zona centro, norte y este del ANP.

Tabla 14. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNET

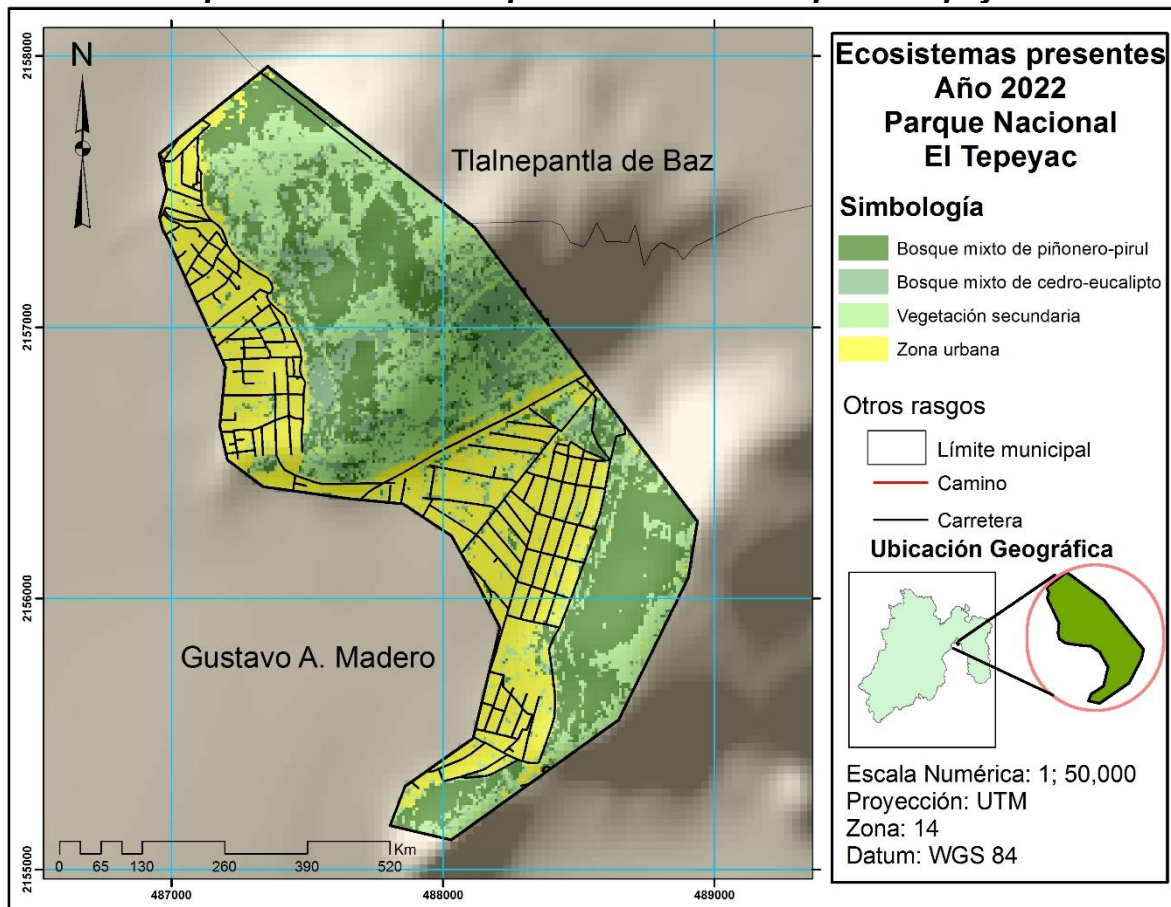
No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de piñero-pirul	66	26.51
2	Bosque mixto de cedro-eucalipto	31	12.45
3	Vegetación secundaria	65	26.10
4	Zona urbana	87	34.94
	Total	249	100

Fuente: elaboración propia, con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque mixto de cedro-eucalipto cuenta con una superficie de 31 hectáreas equivalente al (12.45%) está distribuido en la zona oeste y norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,400 a los 2,700 msnm.

El tercer ecosistema es la vegetación secundaria con 65 hectáreas (26.10%) distribuido la mayor parte en la zona norte (Mapa 12). El cuarto ecosistema es la zona urbana cuenta con una superficie de 87 hectáreas (34.94%) es el de mayor extensión territorial distribuidas en la zona norte y suroeste del ANP.

Mapa 12. Ecosistemas presentes en el Parque El Tepeyac



Fuente: elaboración propia con base en la CONANP, (2023).

4.2.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNET

Se validaron 400 puntos de muestreo en el mapa final correspondiente al año 2022, distribuidos en 100 puntos de verificación en campo (verdad terreno) por cada ecosistema identificado (categorías del mapa = verdad imagen). En la matriz de confusión para dicho año, se observó que, de los 400 puntos de verificación, 393 coincidieron con el ecosistema asignado, mientras que solo 7 puntos correspondieron a un ecosistema distinto.

El análisis se llevó a cabo considerando la proporción de la superficie (porcentaje de las categorías clasificadas) y el número total de puntos de muestreo verificados

en campo. A partir de esta información, se determinó el porcentaje de superficie ocupada por cada ecosistema en los mapas generados (Tabla 15).

Tabla 15. Matriz de error para los ecosistemas del PNET del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque mixto de piñero-pirul	Bosque mixto de cedro-eucalipto	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque mixto de piñero-pirul	98	1	1	0	100
	Bosque mixto de cedro-eucalipto	1	98	0	0	100
	Vegetación secundaria	0	1	98	1	100
	Zona urbana	1	0	1	99	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	400

Fuente: elaboración propia, con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 16), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 7 puntos que no coinciden 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: bosque mixto de piñero-pirul (24.9% de la superficie total); bosque mixto de cedro-eucalipto (25.2%); vegetación secundaria (28.7%) y localidades urbanas (21.1%).

Tabla 16. Confiabilidad de la cartografía para los ecosistemas del PNET del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque mixto de piñero-pirul	Bosque mixto de cedro-eucalipto	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque mixto de piñero-pirul	0.23	0.08	0	0.08	0.25
	Bosque mixto de cedro-eucalipto	0.03	0.24	0.02	0	0.25
	Vegetación secundaria	0.01	0	0.22	0.08	0.25
	Zona urbana	0	0	0.05	0.19	0.25
Total verdad imagen		0.24	0.25	0.28	0.21	1.0
Proporción representada en el mapa		0.26	0.12	0.26	0.34	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

La tabla 17 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 forestales (verdad imagen). Para el bosque mixto de piñero-pirul (25.5% de la superficie total); bosque mixto de cedro-eucalipto (12.5%); vegetación secundaria (28.1%) y localidades urbanas (34.4%).

Tabla 17. Matriz de error corregida para los ecosistemas del PNET del año 2022

Año 2022		Bosque mixto de piñero-pirul	Bosque mixto de cedro-eucalipto	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque mixto de piñero-pirul	0.24	0.04	0	0.01	0.26
	Bosque mixto de cedro-eucalipto	0.04	0.12	0.02	0	0.12
	Vegetación secundaria	0	0	0.20	0.01	0.21
	Zona urbana	0	0	0.06	0.32	0.39
Total verdad imagen		0.25	0.12	0.28	0.34	1.0
Proporción representada en el mapa		0.26	0.12	0.26	0.34	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza para la cartografía de los ecosistemas del PNET del año 2022

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional El Tepeyac es del (97.7% verdad imagen) y (0.61%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global (Tabla 18).

Tabla 18. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza

Año 2022	Bosque mixto de piñero-pirul	Bosque mixto de cedro-eucalipto	Vegetación secundaria	Zona urbana	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	98	98	97	99	97.75	0.61
Error de comisión	2	2	3	1		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	1.06	0.98	0.97	1.12		
Confiabilidad del productor	97	99	96	97		
Error de omisión	3	1	4	3		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.30	0.01	0.206	0.30		

Fuente: elaboración propia, con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados

La tabla 19 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 19. Superficies corregidas para cada ecosistema

Año 2022		Bosque mixto de piñero-pirul	Bosque mixto de cedro-eucalipto	Vegetación secundaria	Zona urbana	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque mixto de piñero-pirul	1.39	0.05	0	0.05	66	0.26	68
	Bosque mixto de cedro-eucalipto	0.02	1.46	0.01	0	31	0.12	28
	Vegetación secundaria	0.07	0	1.37	0.05	65	0.21	69
	Zona urbana	0	0	0.33	1.16	87	0.39	84
Proporción representada en el mapa		0.26	0.12	0.26	0.34	249	1.0	249

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

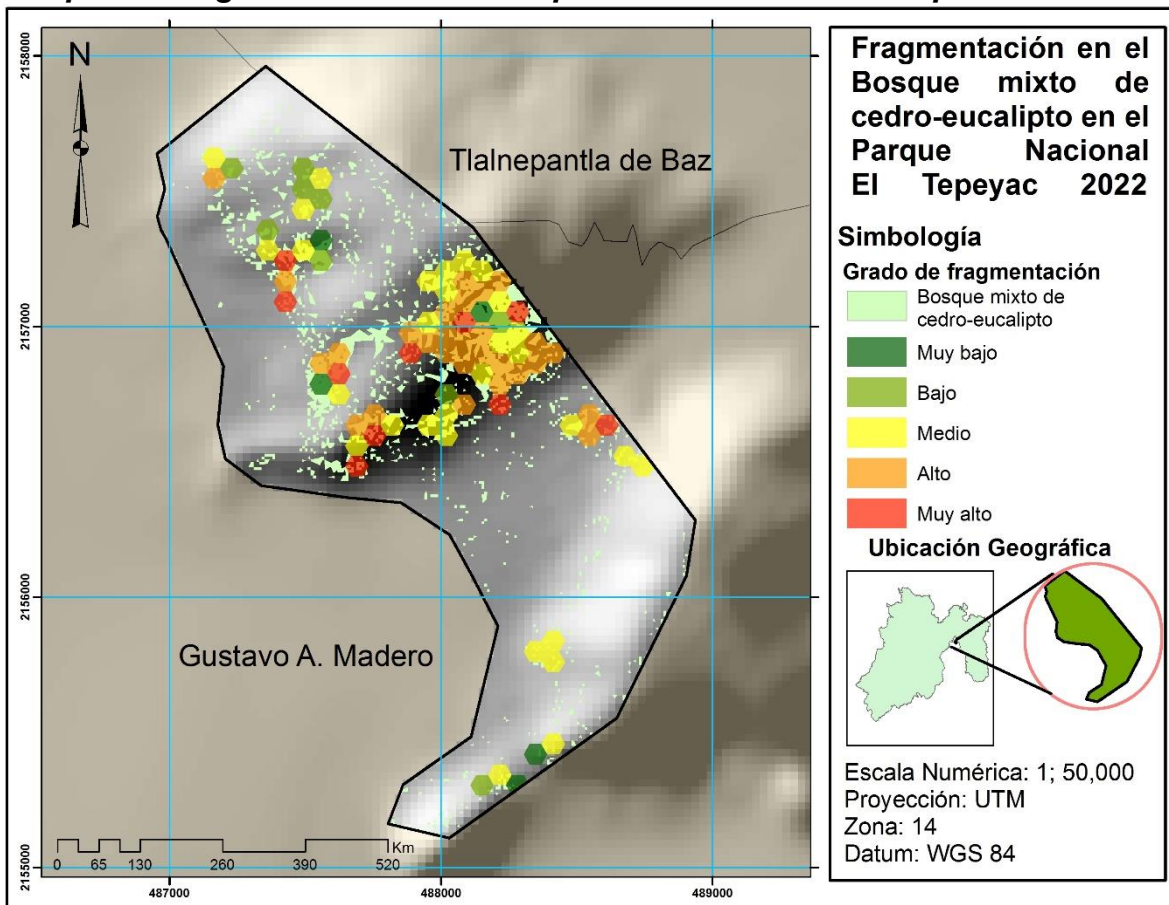
4.2.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNET

La cartografía referente al grado de fragmentación forestal del bosque mixto de cedro-eucalipto y bosque mixto de piñonero-pirul en el Parque Nacional El Tepeyac para el año 2022 se presenta a continuación.

Para el bosque de cedro-eucalipto la leyenda corresponde a cinco categorías de acuerdo con Correa *et al.* (2012), que en la suma de todas estas encontramos un total de 82 polígonos, los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (5), bajo (9), medio (30), alto (28) y muy alto (10).

Los valores más bajos de densidad forestal se concentran en las zonas centro y oeste del parque, donde las pendientes son menores lo que favorece a que se desarrollen múltiples actividades recreativas, de comercio y turísticas, mismas que provocan un aumento en la deforestación (Mapa 13).

Mapa 13. Fragmentación en el bosque mixto de cedro-eucalipto en el PNET



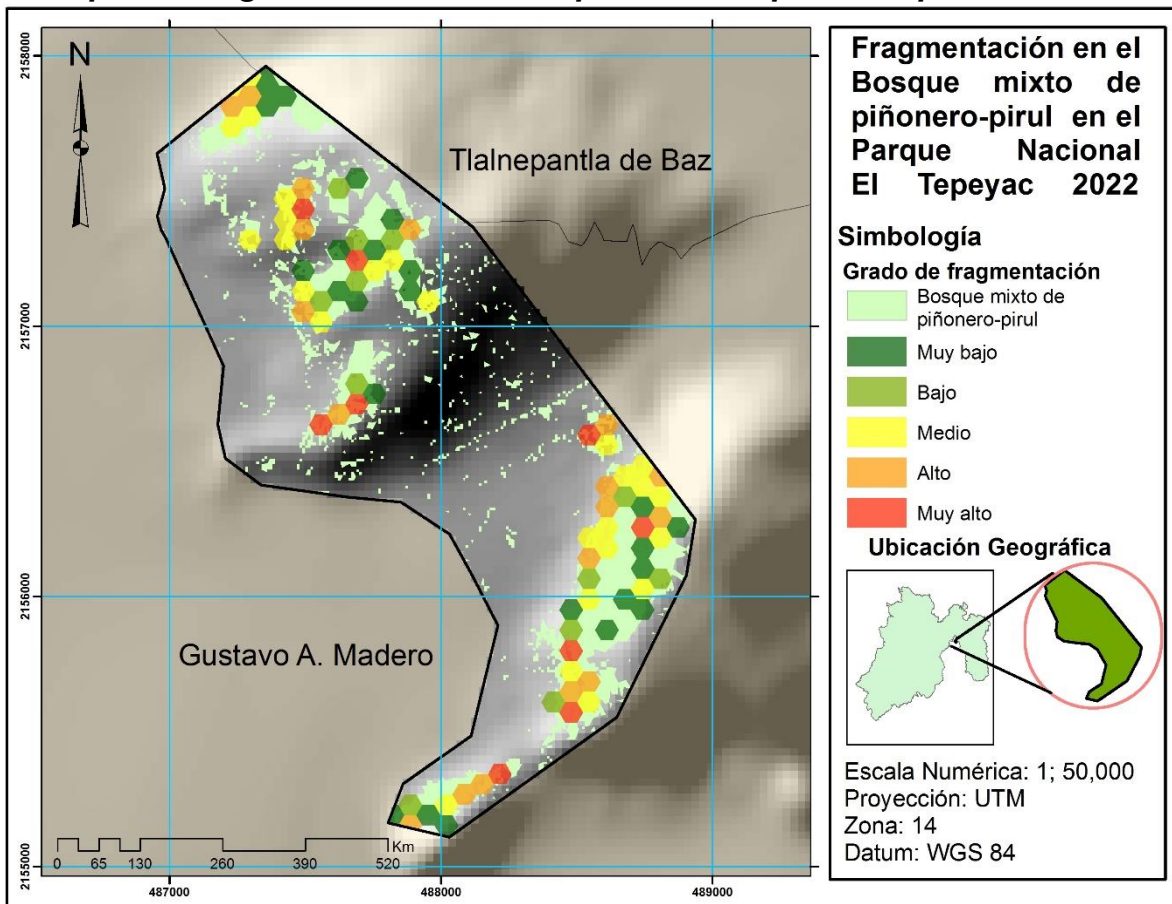
Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2023).

En el ecosistema forestal bosque mixto de piñonero-pirul se determinaron cinco categorías, con un total de 91 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (25), bajo (12), medio (27), alto (18) y muy alto (9).

Los polígonos referentes a los valores más bajos de fragmentación se concentran en la zona norte del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan las pendientes menos pronunciadas lo que favorece la implementación de diversas campañas de reforestación y planes de restauración (Mapa 14).

Por otra parte, en la zona centro existe actividad económica referente al comercio informal, lo que genera contaminación a los espacios naturales.

Mapa 14. Fragmentación en el bosque mixto de piñonero-pirul del PNET



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2023).

4.2.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNET

El bosque mixto de cedro-eucalipto sin el análisis de la fragmentación forestal este bosque ocupaba 31 ha distribuidas en la zona centro y norte del ANP. El carbono capturado para el año 2022 fue de 13.99 ton. El análisis de la fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, con este análisis la superficie para el bosque de cedro-eucalipto disminuyó en 10 ha equivalentes a 4.51 toneladas menos de carbono capturado (Tabla 20).

Tabla 20. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNET

Nº	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque mixto de cedro-eucalipto	31	21	0.4516	13.99	9.48
2	Bosque mixto de piñonero-pirul	66	45.5	0.4576	30.20	20.82

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

El ecosistema forestal bosque mixto de piñonero-pirul sin el análisis de fragmentación forestal, tenía una superficie de 66 hectáreas distribuidas en la zona sureste del área de estudio, en las que se capturaron 30.20 toneladas de carbono. Para el bosque mixto de piñonero-pirul con el análisis de la fragmentación forestal la superficie fue reducida en 10.5 ha por lo que disminuyó el carbono capturado en 4.8 toneladas para ese mismo año.

4.2.7 Diagnóstico integral del Parque Nacional El Tepeyac

Los resultados de la caracterización geográfica y ambiental permitieron identificar los principales problemas ambientales, sociales y económicos que afectan directamente la conservación del parque. Además, se las zonas con menor densidad forestal (Tabla 21).

Tabla 21. Identificación de los problemas identificados en el PNET

Problemas identificados	Fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Cambios de uso de suelo	Observación directa en campo e INEGI, 2015
2.- Erosión de suelo	Observación directa en campo y Programa General de Ordenamiento Ecológico 2015
3.- Residuos solidos	Observación directa en campo, INEGI 2018
Problemas sociales	
1.- Delincuencia	(CONAPO, 2017)
Problemas económicos	
1.-Turismo no regulado	Observación directa en campo y Subprocuraduría De Protección Ambiental, 2017
2.- Comercio informal	Observación directa en campo

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

Los problemas ambientales en el PNET están vinculados a la limitada regulación de las actividades turísticas y a la escasa aplicación de la legislación ambiental para la protección del parque. La falta de instrumentos legales que garanticen la conservación de la cobertura forestal y restrinjan los cambios de uso del suelo con fines económicos, lo cual ha propiciado una dinámica socio-ambiental compleja y difícil de gestionar. Como consecuencia, la fragmentación del ecosistema forestal continúa en aumento, comprometiendo la integridad ambiental del área y la provisión de sus servicios ecosistémicos (POAT, 2017).

El Parque Nacional El Tepeyac se ubica dentro de una zona habitacional, donde la creciente demanda de servicios y comercios por parte de la población ha promovido la construcción de establecimientos en la zona central y norte del parque, sin considerar las implicaciones ambientales que esto conlleva (INEGI, 2015).

El inadecuado manejo de los residuos sólidos por parte de las autoridades del parque, junto con la falta de educación ambiental entre los visitantes, contribuyen de manera significativa a la degradación del suelo, en las zona central, la erosión es evidente, agravada por la acumulación de basura. A pesar de algunos esfuerzos municipales para abordar esta problemática, las acciones han sido insuficientes, lo que ha llevado al deterioro progresivo de este ecosistema de alto valor ambiental. Además, la ausencia de un Plan de Manejo impide la implementación de estrategias efectivas de conservación y regulación, ya que el parque carece de instrumentos de política pública en materia ambiental (Programa General de Ordenamiento Ecológico, PGOE, 2010).

Problemas sociales

En las localidades colindantes al parque nacional, específicamente en la alcaldía Gustavo A. Madero, se ha identificado una insuficiencia estructural en el sistema de alumbrado público, caracterizada por una cobertura limitada y condiciones técnicas deficientes. Esta problemática incide directamente en el incremento de actos delictivos y de vandalismo dentro del parque, lo que a su vez compromete la seguridad de los visitantes y disminuye el uso recreativo de estos espacios, especialmente en los sectores sur y norte, donde se reportan los mayores niveles de vulnerabilidad.

La ausencia de condiciones mínimas de infraestructura urbana no solo pone en riesgo la integridad física de quienes transitan o visitan el parque, sino que restringe el potencial social, educativo y ambiental de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) como espacios públicos de cohesión comunitaria.

En este sentido, se vuelve indispensable la formulación e implementación de políticas públicas integrales y multisectoriales, que incluyan la modernización del sistema de alumbrado público con tecnologías eficientes, la ampliación de esquemas de vigilancia comunitaria y articulación institucional, y la recuperación de espacios públicos mediante estrategias de seguridad ambiental urbana.

Dichas acciones deben enmarcarse en un enfoque de gobernanza territorial participativa, que reconozca la interacción entre las condiciones socio-urbanas y la conservación ambiental, garantizando no solo el acceso equitativo a estos espacios,

sino también su funcionalidad ecológica, social y simbólica en el tejido urbano (CONAPO, 2017).

Problemas económicos

Los problemas económicos que inciden negativamente en la protección ambiental del PNET se encuentran estrechamente vinculados con conflictos de uso del suelo y disputas territoriales entre comunidades locales, particularmente en los límites del parque. En estas zonas de transición, persiste una presión constante sobre las áreas destinadas a la conservación forestal, motivada por intereses económicos divergentes. Esta situación ha propiciado un aumento significativo de actividades ilegales como la tala clandestina, especialmente en sectores de difícil acceso, así como el establecimiento de prácticas agrícolas y ganaderas que alteran de forma directa la integridad ecológica del ecosistema (CONANP, 2018).

En la zona central del parque, se observa una proliferación del comercio informal no regulado, cuya expansión territorial ha generado una transformación evidente del paisaje natural. Las autoridades del Gobierno de la Ciudad de México han implementado campañas de reforestación y recolección de residuos como medidas de restauración ambiental, estas han mostrado resultados limitados debido a la baja participación social (Subprocuraduría de Protección Ambiental, 2017).

4.2.8 Consideración final sobre el Parque Nacional el Tepeyac

La cartografía generada evidenció polígonos con altos niveles de fragmentación forestal, localizados principalmente en las zonas centro y sur del parque, en el Estado de México. En estas regiones se desarrollan actividades turísticas, económicas y religiosas, las cuales han tenido un impacto directo en la degradación de los ecosistemas forestales, consecuencia del manejo inadecuado de residuos sólidos, lo que limita la regeneración y el equilibrio ecológico del bosque.

Un ejemplo representativo de las tensiones entre los ámbitos social, económico y ambiental es la concesión de espacios dentro del ANP a particulares, para la realización de actividades comerciales y turísticas. Esta situación ha generado procesos de transformación del paisaje en la zona centro, donde el cambio del uso del suelo está orientado a la construcción de infraestructura urbana.

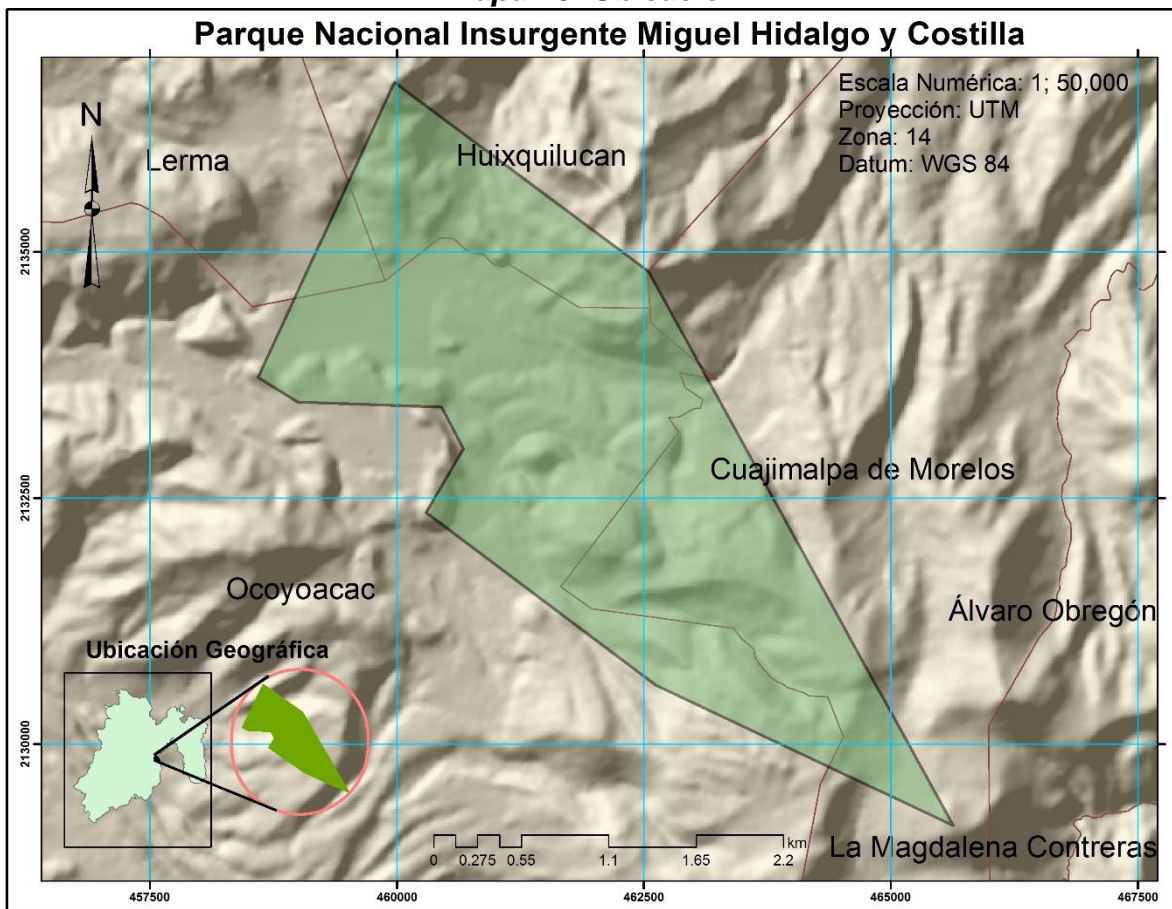
4.3 Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla (PNIMHC)

4.3.1 Caracterización geográfica del PNIMHC

Localización geográfica

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla (PNIMHC) fue decretado el 18 de septiembre de 1936 con una extensión territorial de 1,889 hectáreas. Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas $99^{\circ} 19' 40''$ y $99^{\circ} 23' 31''$ de longitud Oeste y entre los paralelos de $19^{\circ} 15' 20''$ y $19^{\circ} 19' 20''$ de latitud Norte (Vargas, 2000). El parque nacional se encuentra ubicado dentro de los municipios Huixquilucan, Lerma y Ocoyoacac del Estado de México y Cuajimalpa de la Ciudad de México (Mapa 15).

Mapa 15. Ubicación

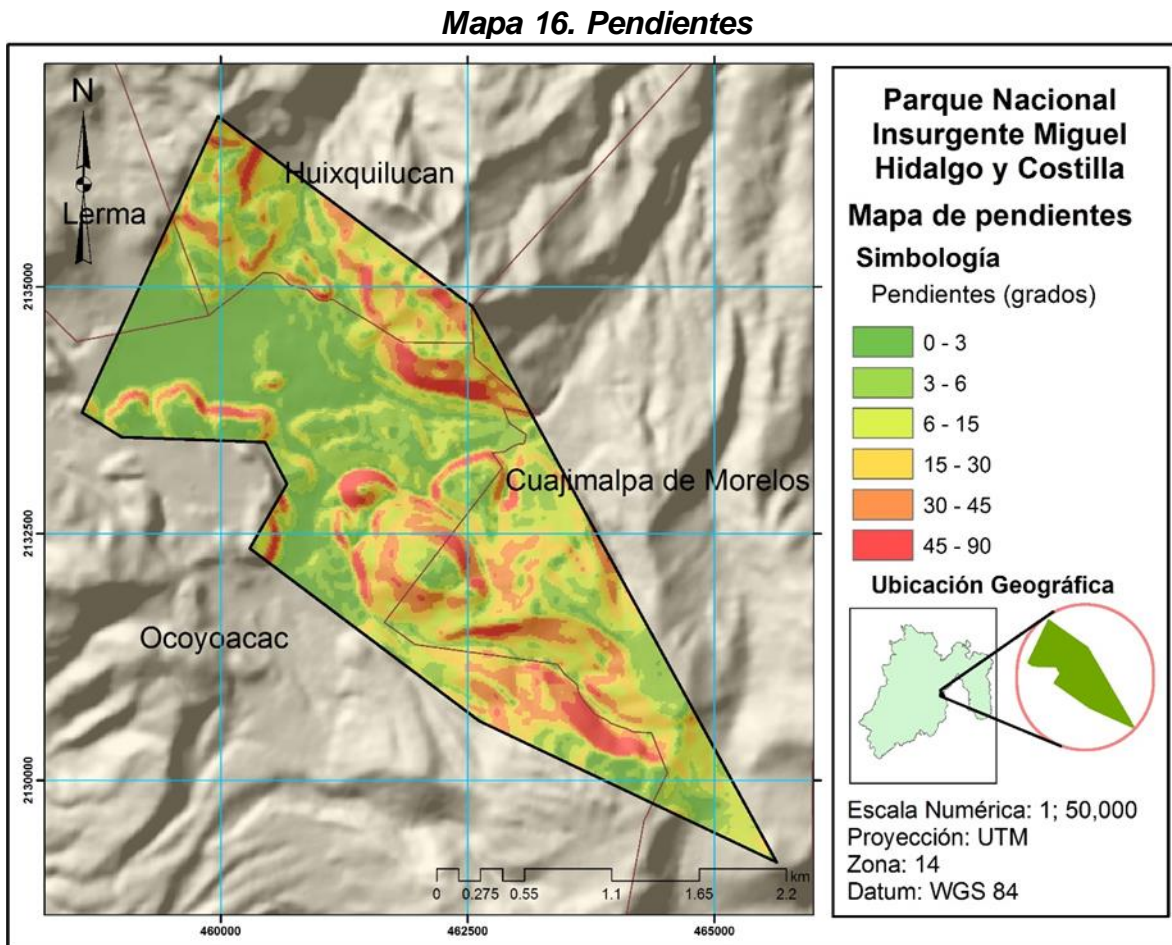


. Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

El parque nacional se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal. Es una zona montañosa donde destaca el mirador de Peñas Barrón, cuenta con llanos y cerros (Vargas, 2000).

Al centro se encuentran las planicies, al sur se encuentran cuencas y escarpes creando un sistema de desagüe joven que erosionan las montañas formando grandes y profundos valles, tiene un rango altitudinal que va de los 3,000 a los 3,800 m.s.n.m. (Mapa 16).



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Litología

En el parque nacional las rocas ígneas extrusivas intermedias se integran en formaciones montañosas localizadas a partir de los 3,100 y hasta los 3,800 m.s.n.m. son intermedias por su composición mineralógica de feldespatos potásicos y plagioclasas sódicas. El principal tipo de roca es de tipo andesita, con presencia de fracturas al norte y oeste del parque (Programa de Manejo Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, 2017).

En las partes bajas, de los 2,900 a los 3,150 m.s.n.m., se observa un conjunto heterogéneo de rocas ígneas, como las tobas, que son formaciones de materiales volcánicos sueltos consolidados de diversos tamaños y composición mineralógica, formadas a partir de cenizas volcánicas, arenas, lapillo y bombas (GEM, 1993).

Clima

El parque nacional presenta un clima semifrío, subhúmedo C (b) (w2) (w), con verano fresco largo, con lluvias en verano y clima frío C (E) (m) (w) se presenta en la zona sur de parque.

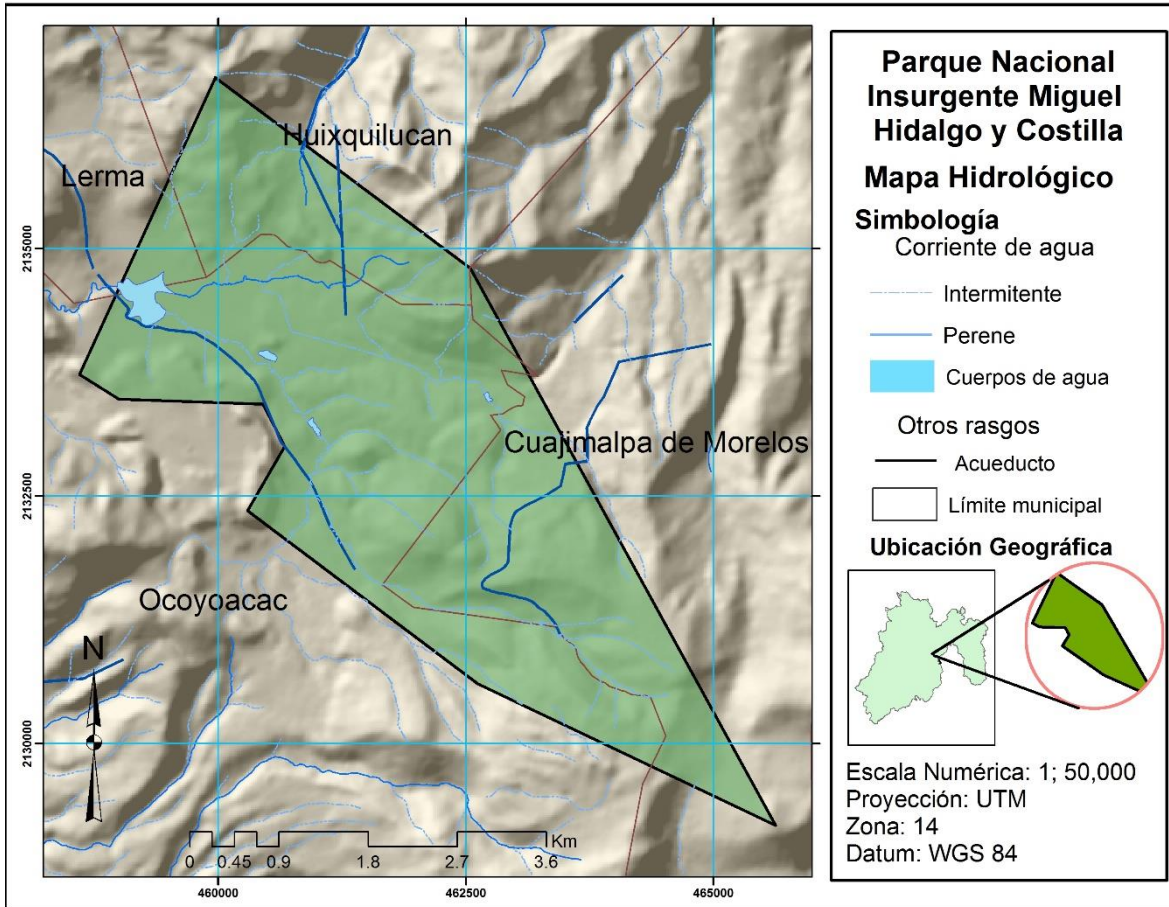
De acuerdo con la información climatológica de la estación La Marquesa del Servicio Meteorológico Nacional en el Estado de México, en un periodo de observación de treinta años. Se registra una temperatura promedio de 10.1 °C, con precipitación pluvial promedio de 1,306.5 mm (García, 1981).

Hidrología

El parque se encuentra ubicado en el parteaguas de dos regiones hidrológicas (RH), denominadas RH12 Lerma-Santiago y RH26 Pánuco. La RH12 pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y se origina en las sierras que rodean el Valle de Toluca, donde nace el Río Lerma y escurre con dirección noroeste, conocido como El Alto Lerma (Mapa 17). La RH26 pertenece a la vertiente del Golfo de México y se origina en el área citada anteriormente, pero escurre en dirección centro noreste y pertenece a la Cuenca del Río Moctezuma (CONAGUA, 2016).

La RH12 corresponde a la cuenca A del Río Lerma-Toluca, pertenece a la subcuenca A del Río Almoloya-Otzolotepec, corresponde a la Cuenca del Río Moctezuma, pertenece la subcuenca del Lago de Texcoco y Zumpango (CONAGUA, 2016).

Mapa 17. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Edafología

En el parque nacional hay presencia de un suelo dominante de tipo andosol, que se complementa con un tipo de suelo secundario húmico, cuenta con una textura media (menos de 35 por ciento de arcilla y menos del 65% de arena (INEGI, 2014).

El tipo de suelo Andosol se localiza en la mayor parte del territorio, en la zona norte del área de estudio. Estos tipo de suelos se caracterizan por estar formados de materiales como cenizas volcánicas, son suelos muy sueltos que presentan textura esponjosa, su vocación es únicamente forestal y suelen ser muy susceptibles a la erosión cuando quedan desprovistos de vegetación (GEM, 2002).

Presenta suelos Cambisoles ubicados en las comunidades de San Jerónimo Acazolco y San Pedro Atlapulco, este tipo de suelos son jóvenes, poco desarrollados y se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa de roca (CONANP 2007).

Diversidad de fauna

El parque nacional se encuentra dentro del Área de Importancia para la Conservación de las Aves, con un hábitat de 208 especies de aves. De las principales especies que se distribuyen en el Parque Nacional están la cerceta ala verde (*Anas crecca*), cerceta ala azul (*Anas discors*), vencejo de vaux (*Chaetura vauxi*), y pato arcoiris (*Aix sponsa*) (Vargas, 1997).

La dirección del parque nacional cuenta con registros de 76 especies de mamíferos, de los cuales destacan la musaraña orejillas mexicana (*Cryptotis nelsoni*), zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), coyote (*Canis latrans*), murciélago (*Pteronotus parnellii* y *Dermanura azteca*), tlacuache (*Didelphis marsupialis*), conejo serrano (*Sylvilagus cunicularius*) (Programa de Manejo Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, 2019).

Así mismo, se cuenta con registro de 18 especies de reptiles, tales como culebra terrestre dos líneas (*Conopsis biserialis*), víbora de cascabel (*Crotalus intermedius*), culebra sorda mexicana (*Pituophis deppei*), culebra listonada cuello negro (*Thamnophis cyrtopsis*), etc. (P.D.M, 2019).

4.3.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNIMHC

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, fue declarado Área Natural Protegida con la categoría de parque nacional el 18 de septiembre de 1936. Esta designación responde a su relevancia ambiental, al ubicarse estratégicamente entre dos importantes centros urbanos: la Ciudad de México y la zona conurbada de la Ciudad de Toluca. Entre sus elementos más representativos se encuentran los Llanos de Salazar, que es una extensa planicie, marcada por una diversidad orográfica que da lugar al desarrollo de múltiples ecosistemas ambientales, los cuales se describen a continuación.

1.- Bosque de Oyamel

Este tipo de vegetación se distribuye principalmente en las cumbres y laderas de montañas, cañadas o barrancas con altitudes de 3,660 m.s.n.m., son bosques monoespecífico de oyamel (*Abies religiosa*). La altura promedio de los árboles en este tipo de vegetación sobrepasa los 30m (Foto 10). Los bosques de oyamel dentro del parque nacional forman masas homogéneas, que se distribuyen sobre suelos rocosos, profundos, bien drenados y ricos en materia orgánica en la zona más húmeda del parque, (INEGI, 2014).

Fotografía 10. Bosque mixto de oyamel en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

2. - Bosque de pino

Este tipo de vegetación se caracteriza por desarrollarse en un estrato arbóreo con alturas promedio de 15 a 30 metros, los pinares tienen un estrato inferior relativamente pobre en arbustos, pero con abundantes gramíneas, esta condición se relaciona con los frecuentes incendios y la tala clandestina en el área de estudio (INEGI, 2014).

La mayoría de las plantas herbáceas desaparecen durante la temporada de secas, en algunas áreas donde la humedad se concentra, es posible observar un estrato rasante formado por musgos, líquenes y hongos en la zona norte del área de estudio (Programa de Manejo Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, 2019) (Foto 11).

Fotografía 11. Bosque de pino en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

3.- Vegetación secundaria.

La vegetación secundaria denominada así para esta investigación está conformada por matorral, pastizales y manchas aisladas de árboles de encino (*Quercus laurina*), encino (*Quercus rugosa*) y encino capulincillo (*Quercus crassipes*, *Quercus laurina* y *Quercus rugosa*) (Rodríguez, 2009) (Foto 12).

Fotografía 12. Vegetación secundaria en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.- Agro-ecosistemas

De acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT (2010) y las observaciones realizadas durante los recorridos de campo, se identificó que la actividad agrícola dentro del Área Natural Protegida se concentra principalmente en el Cerro de Las Palmas, al norte del Parque Nacional. Esta zona agrícola forma parte de los bienes comunales de Huixquilucan y en la localidad de Salazar. Las prácticas productivas están dominadas por el cultivo en milpas, que funcionan como agroecosistemas diversificados, en los que se siembran principalmente maíz, avena (grano y forraje), frijol, diversas hortalizas y flores.

Fotografía 13. Agro-ecosistemas en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

5.- Zona urbana

Existen cuatro localidades dentro del Parque Nacional: Salazar, en el municipio de Lerma; La Marquesa y el Zarco (Las Truchas), en el municipio de Ocoyoacac; y La Cima, en el municipio de Huixquilucan. Las cuales demandan bienes y servicios por lo que generan presiones y cambios del uso del suelo a la cobertura forestal dentro del parque (INEGI, 2014).

Fotografía 14. Zona urbana en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

6.- Cuerpos de agua

Entre los numerosos arroyos del parque nacional destaca el Arroyo Salazar, que tiene sus orígenes al este del cerro El Ángel, desciende de una altitud de 3,450 m.s.n.m. a 3.5 km de su nacimiento; atraviesa la población de La Marquesa y a partir de este punto toma el nombre de Río La Marquesa (CEAMA, 2007).

Fotografía 15. Cuerpos de agua en el PNIMHC



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.3.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNIMHC.

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla presenta para el año de 2022 una superficie de 1,889 ha distribuidas en seis distintos ecosistemas (Tabla 22). El bosque de oyamel cuenta con una superficie de 984 hectáreas, que es el de mayor proporción forestal (52.1%) y se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

Tabla 22. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNIMHC

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de oyamel	984	52.1
2	Bosque de pino	304	16.1
3	Vegetación secundaria	362	19.2
4	Agricultura	36	1.9
5	zona urbana	190	10.1
6	Cuerpo de agua	13	0.7
	Total	1889	100

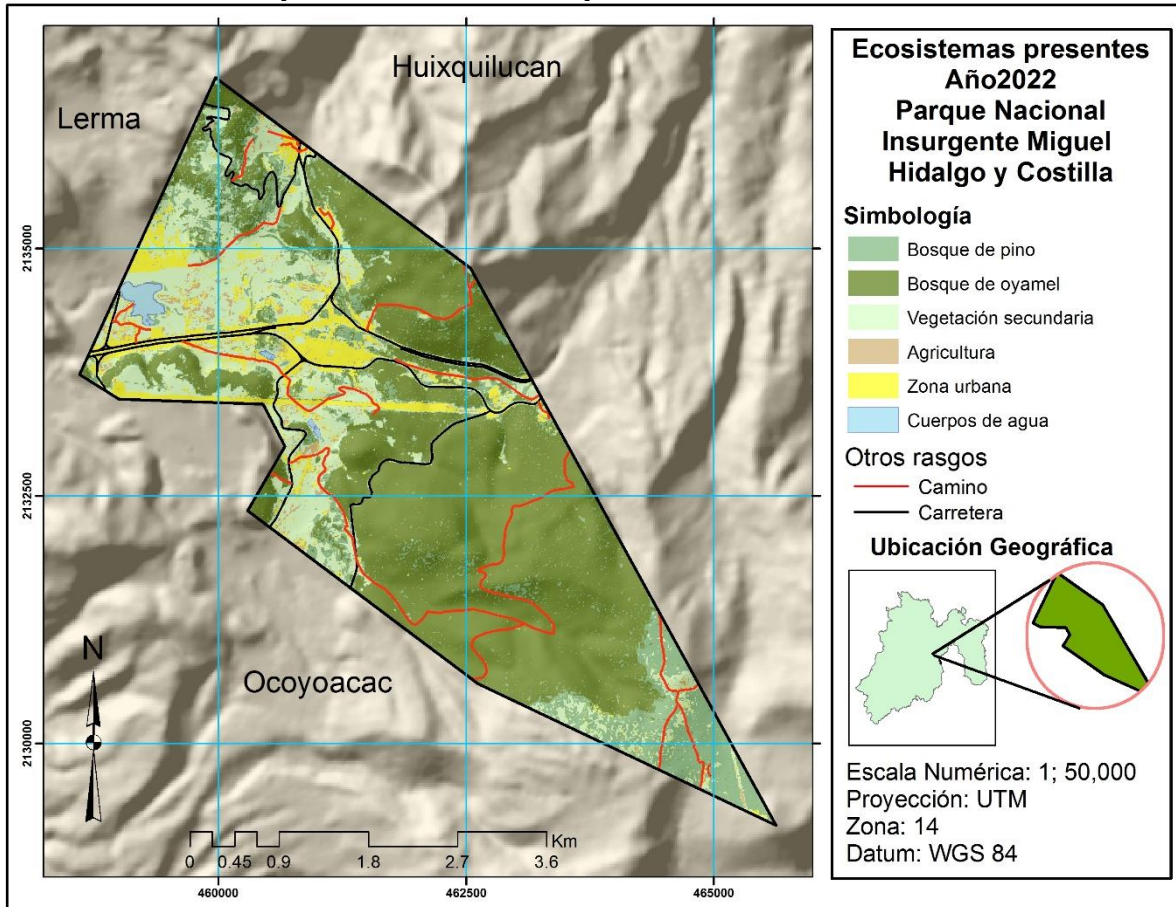
Fuente: elaboración propia, con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque de pino cuenta con una superficie de 304 hectáreas equivalente al 16.1% está distribuido en la zona oeste y norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,400 a los 2,700 m.s.n.m., el tercer ecosistema es la vegetación secundaria con 362 hectáreas (19.2%) distribuidas la mayor parte en la zona norte.

En orden de superficie el cuarto uso de suelo es la agricultura que cuenta con una superficie de 36 hectáreas (1.9%) es el de menor extensión territorial distribuida en la zona centro y norte del ANP.

La zona urbana se encuentra principalmente en el norte del área de estudio, donde se registran las mayores concentraciones de población, ocupando una superficie de 190 hectáreas, lo que representa el 10.1% del total. En contraste, el ecosistema natural de menor extensión corresponde a los cuerpos de agua, con solo 13 hectáreas, equivalentes al 0.7% de la superficie total. Por otro lado, el afluente de mayor tamaño se ubica en la zona norte, como se muestra en el mapa 18.

Mapa 18. Ecosistemas presentes en el PNIMHC



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2020).

4.3.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNIMHC del año 2022

Se verificaron 600 puntos de muestreo en el mapa final correspondiente al año 2022. La validación se llevó a cabo mediante percepción remota, lo que permitió abarcar una mayor extensión para cada ecosistema. En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 600 puntos de verificación, 586 corresponden al ecosistema asignado; 14 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado (Tabla 23).

Tabla 23. Matriz de error año 2022 de los ecosistemas PNIMHC del año 2022

a) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de pino	Bosque de oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Zona urbana	Cuerpo de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	97	2	2	0	0	0	100
	Bosque de oyamel	2	97	0	2	1	0	100
	Vegetación secundaria	1	0	97	0	2	0	100
	Agricultura	0	1	1	98	0	0	100
	Zona urbana	0	0	0	0	97	0	100
	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	100	100
	Total verdad imagen	100	100	100	100	100	100	600

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

De los puntos de verificación analizados, se identificaron 14 puntos que no coinciden con las categorías en el mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios, dando como resultados ajustados para los siguientes porcentajes.

El bosque de pino (16.6% de la superficie total); bosque de oyamel (16.6%); vegetación secundaria (16.7%), agricultura (16.6%), zona urbana y cuerpos de agua con el 16.6% respectivamente en cada ecosistema (Tabla 24).

Tabla 24. Matriz de error expresada en proporción

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de pino	Bosque de oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Zona urbana	Cuerpo de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de pino	0.11	0.08	0.03	0	0	0	0.2
	Bosque de oyamel	0.04	0.06	0	0	0.01	0	0.2
	Vegetación secundaria	0.01	0	0.09	0	0.00	0	0.2
	Agricultura	0	0.01	0.03	0.16	0	0	0.2
	Zona urbana	0	0	0	0	0.14	0	0.2
	Cuerpo de agua	0	0	0	0	0	0.16	0.2
Total verdad imagen		0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.0
Proporción representada en el mapa		0.16	0.52	0.19	0.01	0.10	0.06	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

La tala 25 presenta los resultados obtenidos a través del método de Card (1982), el método pondera el número de sitios de verificación (verdad terreno) en correlación con la superficie para cada uno de los ecosistemas forestales (verdad imagen).

El bosque de oyamel (6.6% de la superficie total); bosque de pino (13.9%); bosque mixto de pino-encino (13.4%), vegetación secundaria (28.5%); agricultura (38.4%) y cuerpos de agua (0.1%).

Tabla 25. Matriz de error corregida de acuerdo con Card (1982)

b) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.05	0.02	0	0.01	0	0	0.06
	Bosque de pino	0.02	0.10	0	0	0.04	0	0.10
	Bosque mixto de pino-encino	0	0.04	0.13	0.02	0.08	0	0.15
	Vegetación secundaria	0.01	0.01	0	0.28	0.01	0	0.31
	Agricultura	0	0.01	0	0	0.35	0	0.37
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0.01	0.01
Total verdad imagen		0.06	0.13	0.13	0.28	0.38	0.01	1.0
Proporción representada en el mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0.01	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza para la cartografía de los ecosistemas del PNIMHC del año 2022

La tabla 26 representa la confiabilidad del productor, los cuerpos de agua presentan una confiabilidad del 100%, los ecosistemas que presentan los valores más altos son bosque de oyamel, vegetación secundaria y agricultura con una proporción del 95% (verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al 5%; por otra parte, el ecosistema que presenta la mínima confiabilidad del productor es el bosque de pino con el 93% y el mayor nivel de error de omisión con el 4%.

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla es del 95.7% (verdad imagen) y 1.5% del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 26. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza

Año 2022	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	92	94	100	99	92	100	95.7	1.58
Error de comisión	8	6	0	1	8	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	5.84	5.02	0.02	2.12	5.84	0		
Confiabilidad del productor	95	93	94	95	95	100		
Error de omisión	5	7	6	5	5	0		
Intervalo de confianza de del productor	0.04	0.04	0.06	0.04	0.047	0		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

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 con el resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección, resultado de la presencia de errores de omisión y comisión

Tabla 27. Superficies corregidas por cada ecosistema

Año 2022		de Bosque oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	agricultura	de Cuerpos de agua	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo	Bosque de oyamel	0.97	0.01	0	0.04	0	0	953	0.06	933
	Bosque de pino	0.03	0.94	0	0	0.01	0	1894	0.10	1885
	Bosque mixto de pino- encino	0.01	0.03	0.92	0.06	0.01	0	1958	0.15	1984
	Vegetación secundaria	0.02	0.09	0	0.84	0.04	0	4169	0.35	4174
	agricultura	0.05	0.11	0	0	0.82	0	5623	0.33	5621
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	1	18	0.01	18
Proporción representada en el mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0	1461	1.0	1461

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

4.3.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNUMHC.

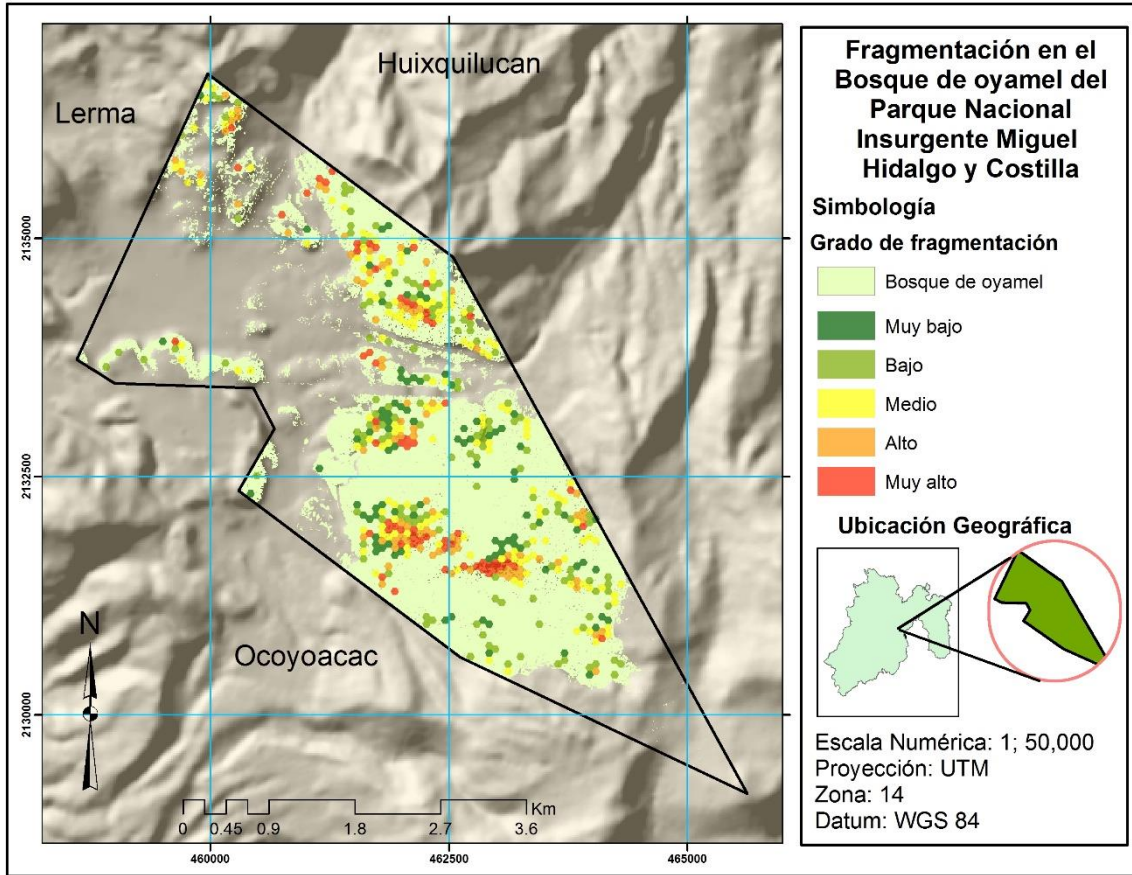
Se elaboró cartografía para representar el grado de fragmentación de los ecosistemas forestales del bosque de oyamel y el bosque de pino dentro del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla para el año 2022.

En el caso del bosque de oyamel, la clasificación se estableció en cinco categorías, sumando un total de 522 polígonos distribuidos de la siguiente manera: muy bajo (91), bajo (135), medio (148), alto (84) y muy alto (64).

El análisis espacial muestra que los polígonos con los niveles más altos de fragmentación forestal se concentran en la zona sur del parque. Esta área es particularmente vulnerable debido a la intensa actividad recreativa y turística, como paseos a caballo, carreras de motos y otras actividades de alto impacto ambiental. La constante perturbación en esta región ha acelerado la fragmentación del bosque, lo que puede repercutir en la conectividad ecológica, la biodiversidad y la estabilidad del ecosistema a largo plazo (Mapa 19).

Este patrón de fragmentación sugiere la necesidad de estrategias de manejo que regulen el uso del suelo y las actividades humanas dentro del parque, con el fin de mitigar la degradación del ecosistema ambiental y promover su conservación en el ANP.

Mapa 19. Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNUMHC

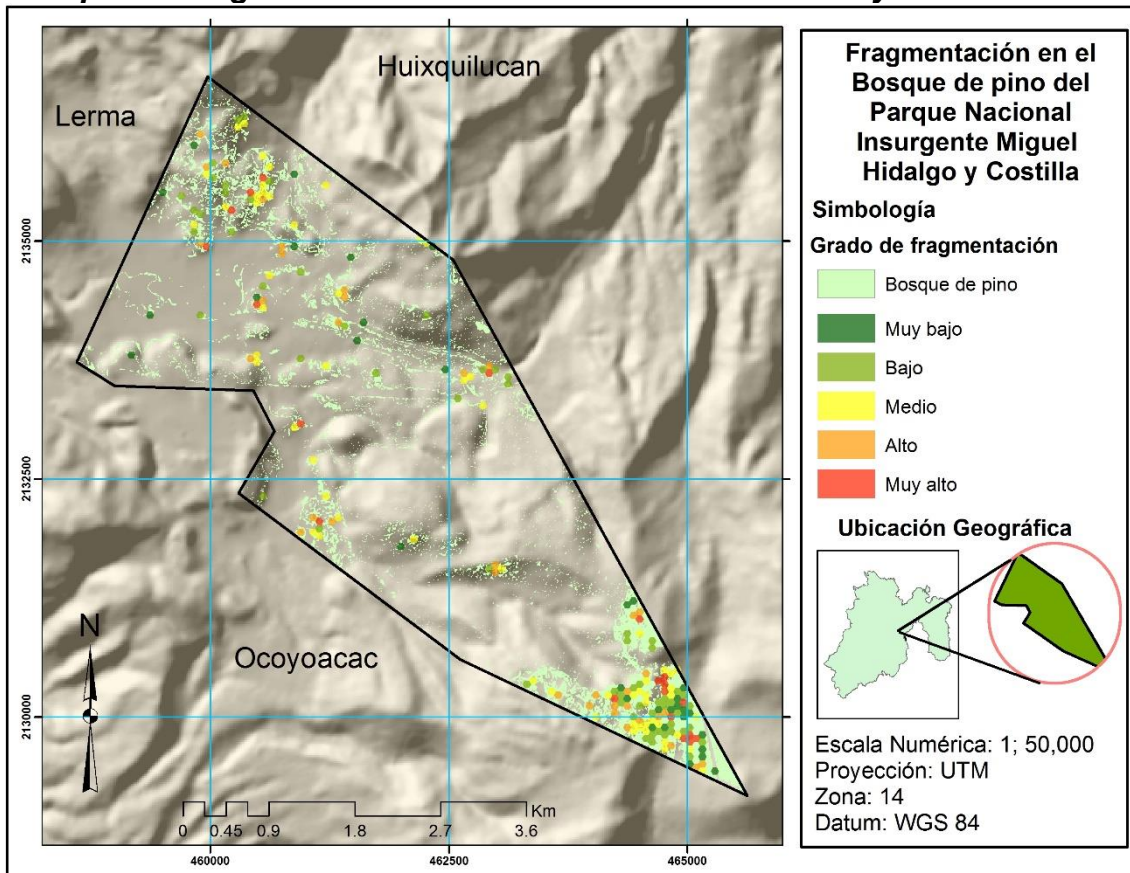


Fuente: elaboración propia con base a CONAFOR, (2023).

En el caso del bosque de pino se determinaron cinco categorías, con un total de 210 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (32), bajo (60), medio (61), alto (36) y muy alto (21).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan las pendientes más ligeras, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas y aumenta el cambio del uso del suelo (Mapa 20).

Mapa 20. Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNIMHC



Fuente: elaboración propia con base a CONAFOR, (2023).

4.3.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC.

El Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla presenta dos tipos de ecosistemas forestales: el bosque de oyamel sin análisis de fragmentación forestal ocupaba 984 ha distribuidas en la zona centro y norte del ANP. El carbono capturado para el año 2022 sin contemplar el análisis de fragmentación forestal fue de 465.92. El análisis de fragmentación forestal permitió realizar una comparación más detallada de la pérdida de superficie forestal, con este análisis se observó, que la superficie disminuyó a 759 hectáreas, lo que equivale a una captura de 359.38 toneladas menos de carbono capturado (Tabla 28).

Tabla 28. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIMHC

o N	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de oyamel	984	759	0.4735	465.92	359.38
2	Bosque de pino	304	229.5	0.4687	142.48	107.56

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

El ecosistema forestal bosque de pino sin análisis de la fragmentación forestal tenía una superficie de 304 hectáreas distribuidas en la zona sureste del área de estudio, en las que se capturaron 142.98 toneladas de carbono en el año 2022, por otra parte al incluir el análisis de fragmentación forestal el bosque de pino disminuyó su superficie a 229.5 hectáreas, por lo que el carbono capturado se redujo 107.56 toneladas para ese mismo año.

Estos datos evidencian la reducción en la capacidad de los ecosistemas forestales para almacenar carbono, lo que podría tener implicaciones en la regulación climática y en la estabilidad ecológica del área.

4.3.7 Diagnóstico integral del el PNIMHC.

El análisis de la caracterización geográfica y ambiental permitió identificar algunos problemas ambientales, sociales y económicos que afectan la preservación del parque. A partir de los recorridos en campo, se observaron diversas las zonas vulnerables, por lo que se analizaron investigaciones que respalden lo observado en campo (Tabla 29).

Tabla 29. Identificación de los problemas identificados en el PNIMHC.

Problemas identificados	Fuente consultadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Cambios de uso de suelo	Observación directa en campo Plan de Manejo (2020)
2.- Erosión de suelo	Observación directa en campo (CONABIO, 2016).
3.- Residuos solidos	Observación directa en campo
4.- Tala clandestina	Observación directa en campo (SEMARNAT, 2014).
Problemas sociales	
1.- Marginación	Observación directa en campo (CONABIO, 2016).
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	Estrategia de Cambio Climático desde las Áreas Naturales Protegidas, 2014).
3.- Comercio informal	(Marco Geoestadístico, 2014).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

El incremento de la fragmentación forestal se debe al crecimiento de la zona urbana y comercial en el centro recreativo La Marquesa, así como a la construcción del Tren Interurbano México-Toluca. Este proyecto incluyó varios kilómetros de obra dentro del Área Natural Protegida, lo que provocó una transformación del paisaje, a pesar de contar con la aprobación de la Manifestación de Impacto Ambiental por parte de la CONANP y las autoridades del parque (SEMARNAT, 2014).

Es importante mencionar que el PNIMHC cuenta con su Plan de Manejo publicado el 2 de marzo del 2020 donde menciona que uno de los principales objetivos es preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas.

En este contexto, el cambio de uso del suelo es una problemática crítica, ya que la fragmentación forestal afecta directamente los servicios ecosistémicos que ofrece esta área natural siendo esenciales para las comunidades que habitan tanto dentro del Área Natural Protegida como en su zona de influencia.

Entre los servicios más afectados se encuentran la infiltración y recarga de mantos acuíferos, la captura de carbono, la retención de suelos, la conservación del hábitat para especies de flora y fauna, la regulación climática y el valor escénico y recreativo del área. Por ello, la conservación de las superficies forestales es fundamental para mantener la recarga hídrica, reducir la presión sobre los mantos acuíferos y garantizar la sostenibilidad del ecosistema a largo plazo (CONABIO, 2016).

Según el análisis realizado por el Programa de Manejo Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla (2019), las masas forestales se encuentran en terrenos con pendientes mayores a 30°, lo que ha funcionado como una barrera natural que limita el desarrollo de actividades antropogénicas, favoreciendo así su conservación en las zonas elevadas. No obstante, las áreas prioritarias de atención se localizan principalmente en las planicies menores de 15°, específicamente en los límites del parque, donde se concentran las actividades recreativas y turísticas, generando una mayor presión sobre el ecosistema.

En la zona central del Parque Nacional convergen las carreteras, federal y de cuota México-Toluca, lo que ha favorecido el desarrollo de actividades turísticas, principalmente la venta de alimentos y la oferta de recreación en llanos conocidos como valles, rodeados de macizos forestales.

La acumulación de residuos sólidos se ha convertido en un problema, agravado por la deficiente gestión de desechos por parte de las autoridades y la falta de conciencia ambiental de los visitantes. Esta situación ha intensificado la degradación del suelo, evidenciada por la erosión en las zonas elevadas del área central del parque, además de generar contaminación en los mantos acuíferos cercanos, comprometiendo así la integridad ecológica del ecosistema (Ortiz, 2002).

Las actividades turísticas en el Parque Nacional también generan problemas ambientales, entre ellos la compactación del suelo, causada por el tránsito libre de personas a pie, a caballo y en vehículos motorizados en los valles del parque. Esta situación es especialmente crítica en áreas con pendientes pronunciadas y suelos frágiles, lo que acelera los procesos de erosión y degradación.

Ante este panorama, la Dirección del Parque Nacional considera fundamental desarrollar e implementar un programa de planificación turística que contemple la delimitación de rutas y senderos con señalización adecuada, así como la capacitación de visitantes y prestadores de servicios bajo un esquema de educación ambiental. Este enfoque permitiría garantizar la conservación de los ecosistemas, generar beneficios económicos para la población local y mejorar la experiencia recreativa de los visitantes (CONANP, 2008).

Problemas sociales

Las localidades cercanas al parque enfrentan diversos problemas sociales, siendo la marginación uno de los más significativos. Las viviendas ubicadas en los límites del parque carecen de alumbrado público y servicios básicos como agua potable y drenaje, lo que contribuye a una baja calidad de vida y acentúa las condiciones de vulnerabilidad.

Esta situación no solo afecta a los habitantes, sino que también repercute en la seguridad del parque, ya que la falta de vigilancia y programas de protección por parte de las autoridades municipales ha propiciado un aumento en el vandalismo y la delincuencia, especialmente en horarios nocturnos. Como resultado, algunas zonas del sur y norte del parque presentan baja afluencia de visitantes, lo que limita su potencial turístico y recreativo (INEGI, 2010).

Problemas económicos

Como en el resto de los parques de la zona de estudio existen problemas muy severos respecto a la tenencia de la tierra por parte de ejidatarios y autoridades del parque lo que genera conflictos de interés económico sobre todo en la zona centro donde se desarrollan la mayor parte de las actividades turísticas, esto por los predios de mayor plusvalía para el comercio informal dentro del parque.

Los problemas económicos que afectan la protección del Parque Nacional es la tala clandestina en las zonas de difícil accesos, ya que las especies de oyamel en las zonas altas del parque son de uso maderable importante económicamente para los grupos dedicados a estas actividades (Estrategia de Cambio Climático desde las Áreas Naturales Protegidas, 2014).

En zona centro del parque la población se inclina por el comercio informal no regulado generando basura y conflictos de interés por seguir con estas actividades, es evidente la transformación del territorio, sin embargo ONG's han implementan campañas de reforestación y recolecta de basura sin mucho éxito por la poca participación social.

4.3.8 Consideración final sobre el PNMHC.

El análisis del grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque permitió identificar con precisión las áreas con menor densidad de cobertura boscosa. Los resultados cartográficos revelan que los polígonos con mayores niveles de fragmentación forestal se concentran predominantemente en la zona sur del parque, específicamente dentro del municipio de Ocoyoacac, Estado de México, donde la presión antrópica ha provocado una notable alteración en la continuidad del paisaje forestal.

Los valores de fragmentación refieren el grado de conservación de la cobertura forestal siendo las áreas con los valores muy bajo y bajo los que tienden a presentar mayor grado de conservación en las zonas suroeste y centro oeste, los valores medios son aquellos que pueden sufrir cambios menores hacia la conservación o a la pérdida y se sitúan en las zonas centro y centro oeste, mientras que los valores altos y muy altos son las zonas que tienden a cambiar de cobertura o deforestarse se identifican en la zona sur del área de estudio (Correa *et al.* 2019).

4.4 Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP)

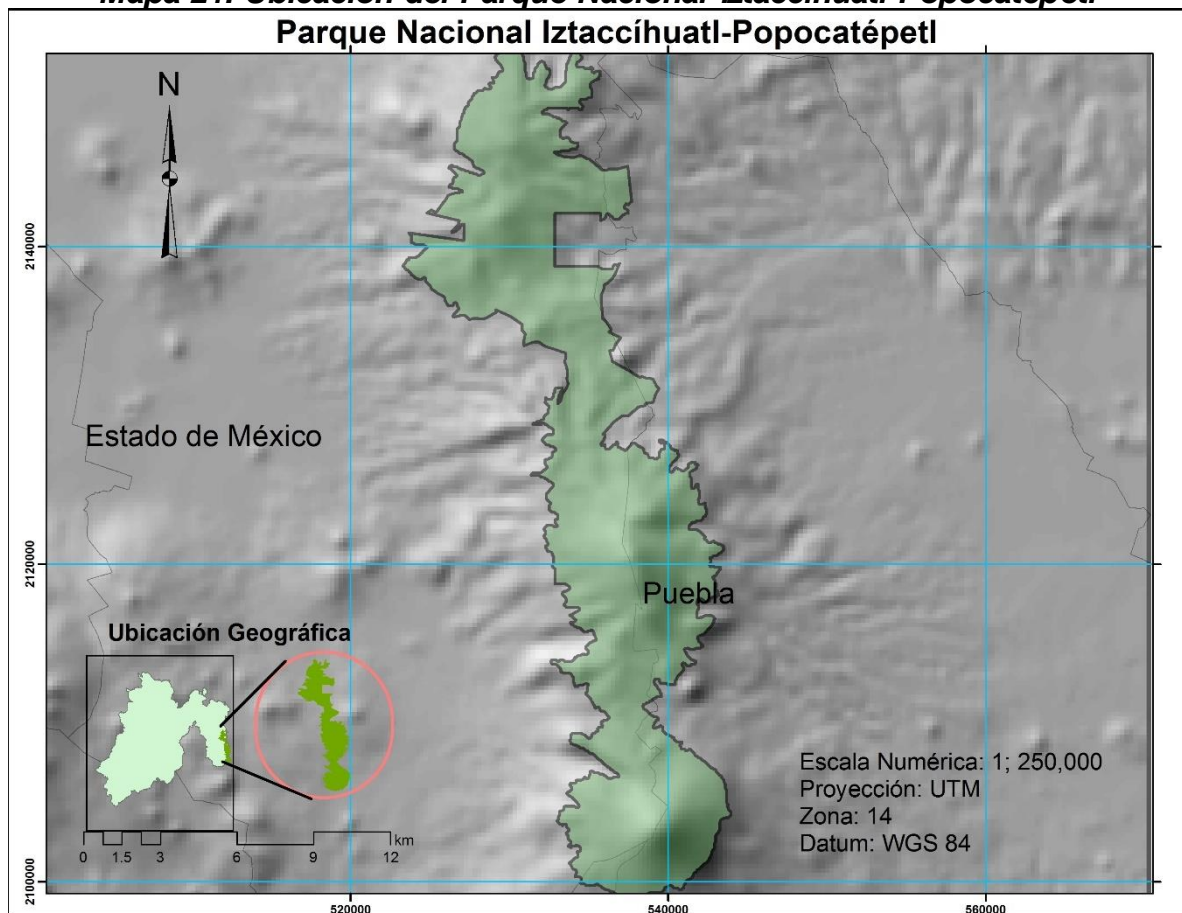
4.4.1 Caracterización geográfica del PNIP

Localización geográfica

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNIP) se localiza entre las siguientes coordenadas extremas 18°59'00.43" y 19°28'09.44" de Latitud Norte y 98°34'55.88" y 98°46'40.95" de Longitud Oeste. Abarca una superficie de 39,819 hectáreas dividida entre el Estado de México, con 28,307 hectáreas (71.09%); Puebla con 11,072 hectáreas (27.81%); y Morelos con 438.6 hectáreas (1.10%) (CONANP 2013).

Forma parte de los municipios de Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo, en el Estado de México; Santa Rita Tlahuapan, San Salvador el Verde, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en Puebla; y Tetela del Volcán, en Morelos (Mapa 21)

Mapa 21. Ubicación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

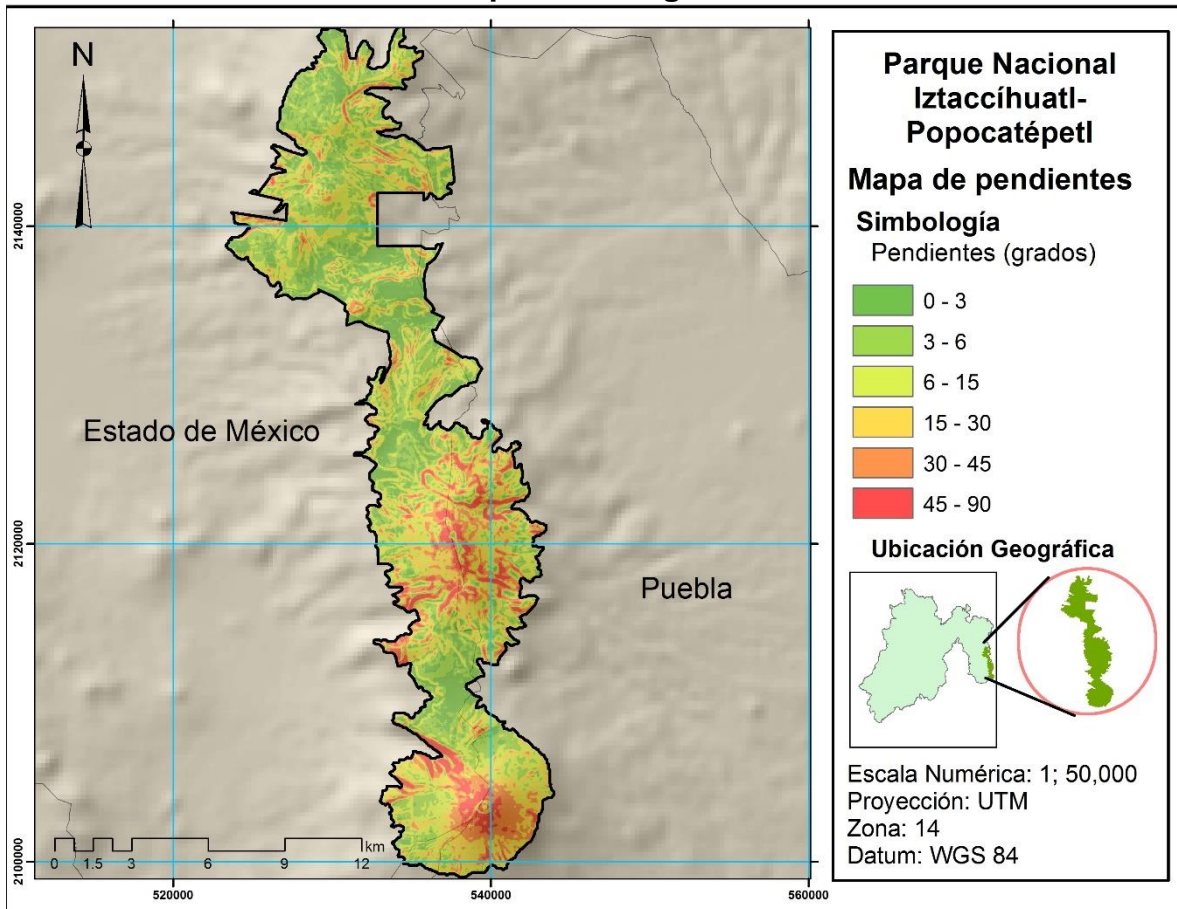
Fisiografía

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl se encuentra en la parte centro-oriental del Sistema Volcánico Transversal, ocupando una parte sustancial de la Sierra Nevada. La Sierra Nevada, es un macizo montañoso de alrededor de 100 kilómetros que va de norte a sur separando las cuencas de México y Puebla; sobre ella se encuentra la tercera cumbre más alta del país: la Iztaccíhuatl (5,220 m.s.n.m.). Muy cerca, a 14 km hacia el sur, se erige el simétrico cono del volcán Popocatepetl, la segunda cumbre más alta de México.

El cráter del Popocatepetl no ocupa el punto más alto por ser de forma elíptica; su eje mayor mide 850 metros y su eje menor 750 metros. La serranía de Ahalco une ambos volcanes en el lugar llamado Tlamacaxco o Paso de Cortés (Vargas, 1984). El accidentado relieve del parque tiene cañadas de fuerte inclinación que van de 25 a 50°; y laderas con pendientes suaves de entre 2 a 10°, las cuales dieron origen a la conformación de lomeríos. En el extremo occidental se ubican los denominados abanicos aluviales que forman lomeríos de topografía llana (Vargas, 1997).

Estos abanicos constituyen el sector de transición entre las montañas y la planicie baja de la Cuenca de México. En todo el parque existen también valles intermontanos, que son áreas de acumulación de materiales acarreados fluvialmente (Mapa 22).

Mapa 22. Fisiografía



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Litología

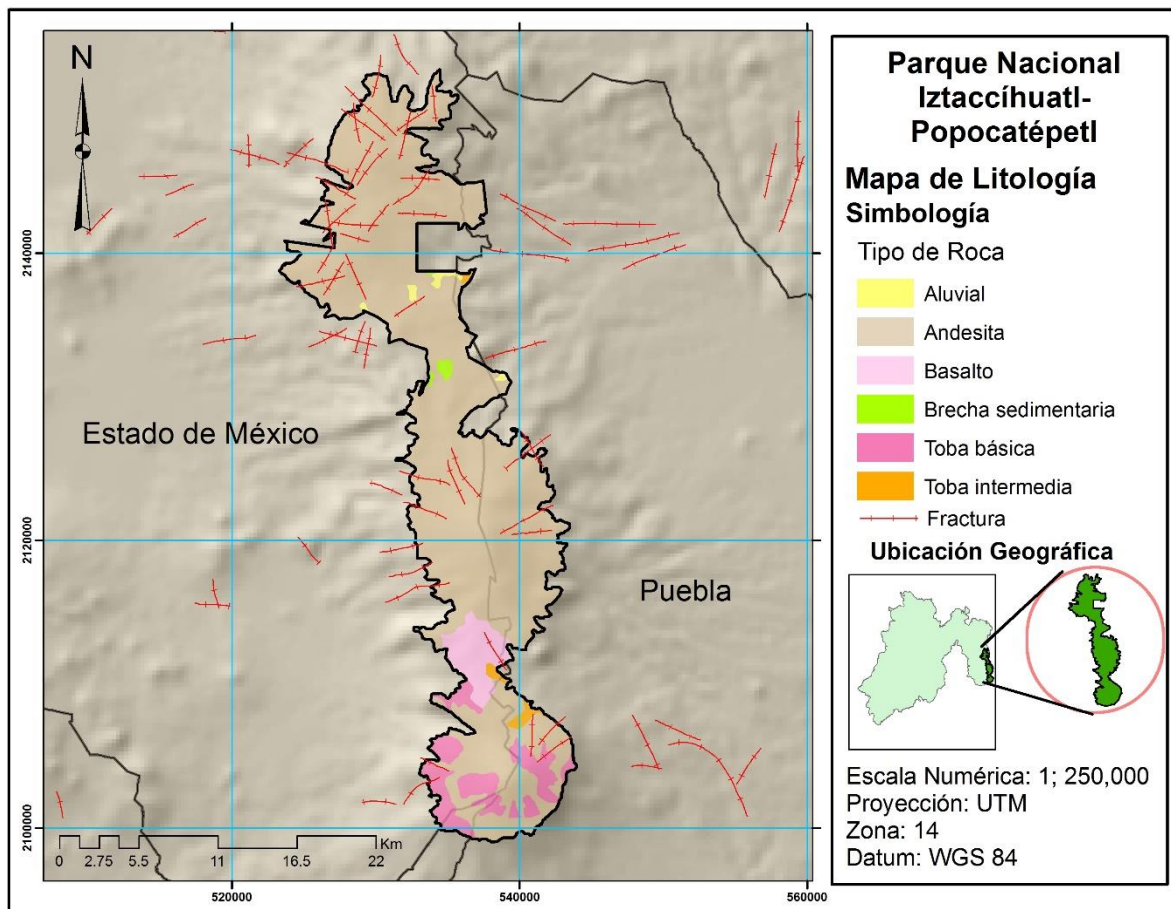
El PNIP está conformado por una gran diversidad litológica debido a su extensa y variada actividad volcánica alrededor de casi más de 20 millones de años y que han formado estratos de considerable espesor, así como afloramientos en grandes superficies que se extienden hasta las aplanadas cumbres (Mooser, 1972).

En el mapa 23 se pueden observar la diversidad litológica que se encuentra dentro del parque de las que destacan la roca andesita; es 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 (INEGI, 2015).

El basalto; de origen ígnea volcánica extrusiva. Su formación proviene de un fenómeno geológico, existiendo importantes coladas basálticas en la superficie de la Tierra, por efusión de lava; enfriamiento del magma (INEGI, 2015).

La toba; de origen ígnea volcánica extrusiva piroclástica, que se forma de materiales volcánicos sueltos consolidados de diversos tamaños y composición mineralógica, formada a partir de ceniza volcánica, arenas, lapillo y bombas (GEM, 1993).

Mapa 23. Litología del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl



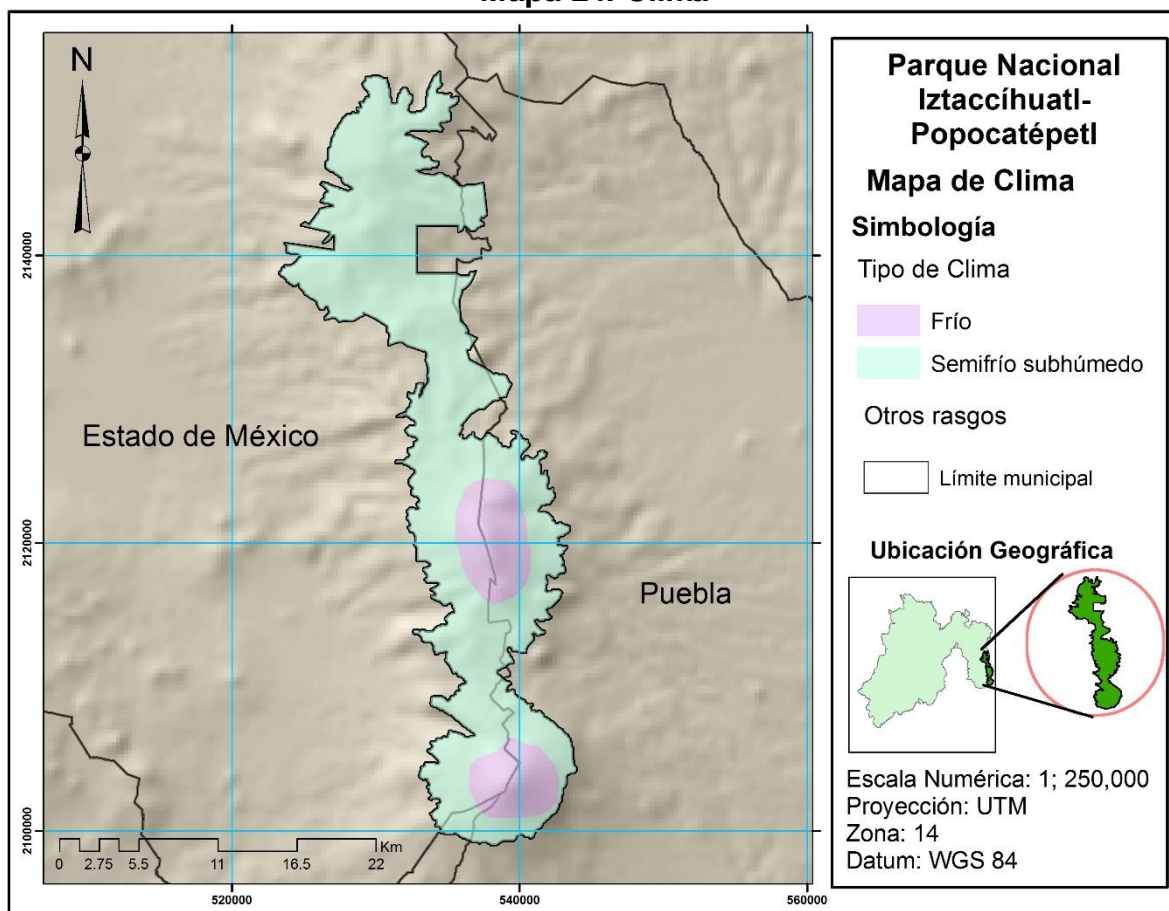
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Clima

Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas semifrío y frío C (w''2) (w) (b') ig; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68°C por cada 100 metros. Existe una red de estaciones meteorológicas dentro y fuera del parque, sin embargo, no se cuenta con estaciones a una altura mayor a los 4,000 msnm, por lo que no se tienen registros de las zonas más frías donde están los glaciares (Mapa 24) (SEMARNAT, 2005).

Por la latitud esta región se ve afectada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las latitudes medias, como los frentes fríos y la invasión de masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical como los huracanes y las ondas tropicales (Rodríguez, 2003).

Mapa 24. Clima



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Hidrología

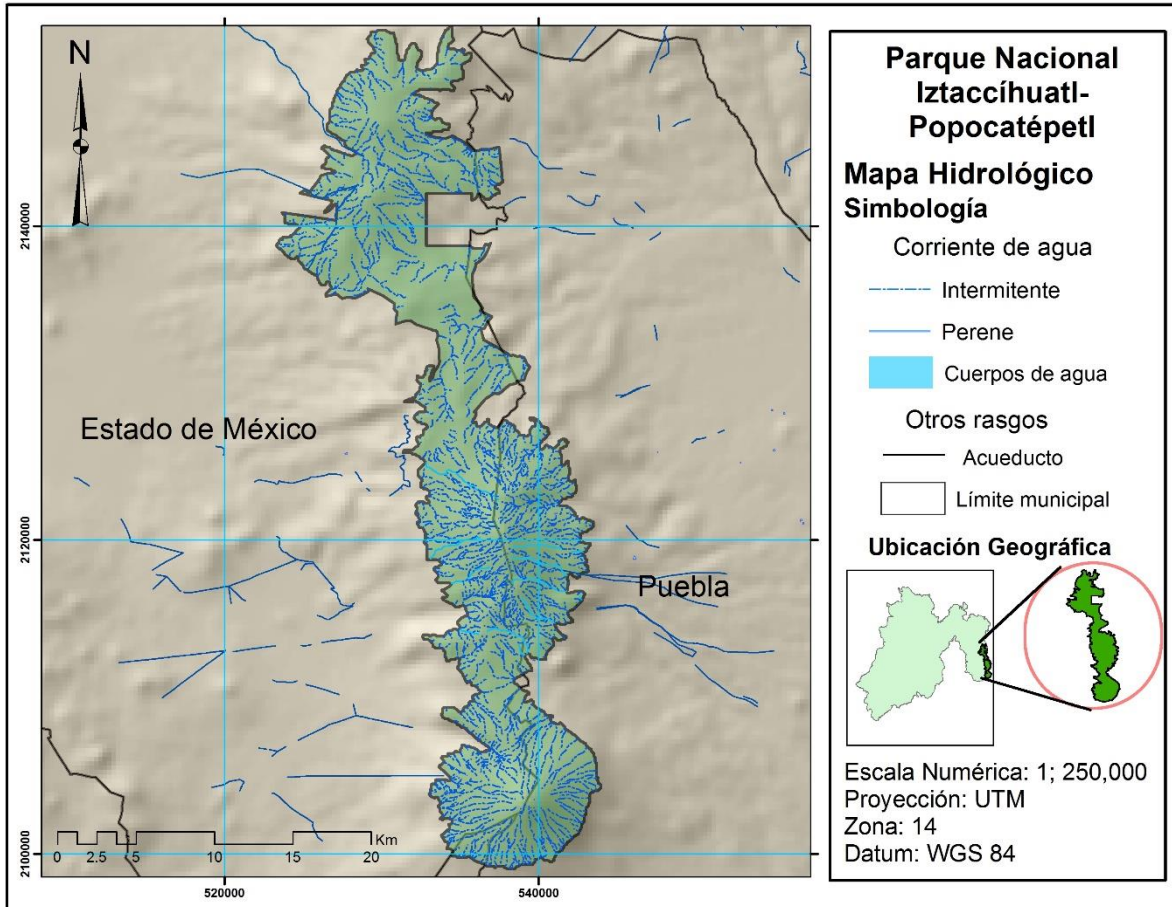
Según el Ordenamiento Ecológico del Volcán Popocatepetl (2013), la Sierra Nevada se divide en cuatro subcuencas. Una de ellas es la subcuenca Chalco-Texcoco, ubicada en el flanco occidental de la sierra. Esta subcuenca se caracteriza por ser el área de los antiguos lagos de Chalco y Texcoco, cuyas aguas provienen de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc. Aunque originalmente corresponden a dos subcuencas de la cuenca endorreica de la antigua Tenochtitlan, debido a la desproporción entre sus partes, se considera una sola subcuenca para efectos prácticos.

Los recursos hídricos que se originan en el Parque Nacional se forman principalmente por el deshielo de los glaciares y la precipitación pluvial la cual es abundante en la región, y sobrepasa los mil milímetros anuales. Las corrientes superficiales pueden ser permanentes o intermitentes, éstas últimas son innumerables durante la época lluviosa y también se produce gran infiltración de agua que va a alimentar las corrientes subterráneas (Robin, 1984).

La distribución altitudinal de los recursos hídricos se caracteriza por una pendiente pronunciada en su curso alto, arriba de los 4,500 m.s.n.m., y es cada vez más atenuada conforme descienden (Rodríguez y Franco, 2003).

Dentro del Parque Nacional, no existen localidades, por lo que el agua corre libremente sin obstrucciones y sin riesgo de contaminación ya que no se le da ningún uso. El parteaguas de la Sierra Nevada, donde se localizan los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, es el origen de la división de las aguas tributarias del Océano Atlántico (Golfo de México) y de las del Océano Pacífico, formando dos de las más importantes cuencas del país; la de México y la del Alto Balsas y de varias subcuencas que abastecen a numerosas comunidades y municipios incluyendo aquellas que rodean al Parque Nacional (Mapa 25).

Mapa 25. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Edafología

En la región se encuentran cinco grupos de suelo como se observa en el mapa 22. De acuerdo con la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2014):

Regosoles: Estos suelos se originan a partir de materiales sueltos como arena, grava o piedra, y se encuentran generalmente a altitudes inferiores a los 3,900 m.s.n.m. Suelen ser suelos con bajo contenido de materia orgánica y nutrientes, lo que limita su capacidad para sustentar vegetación densa.

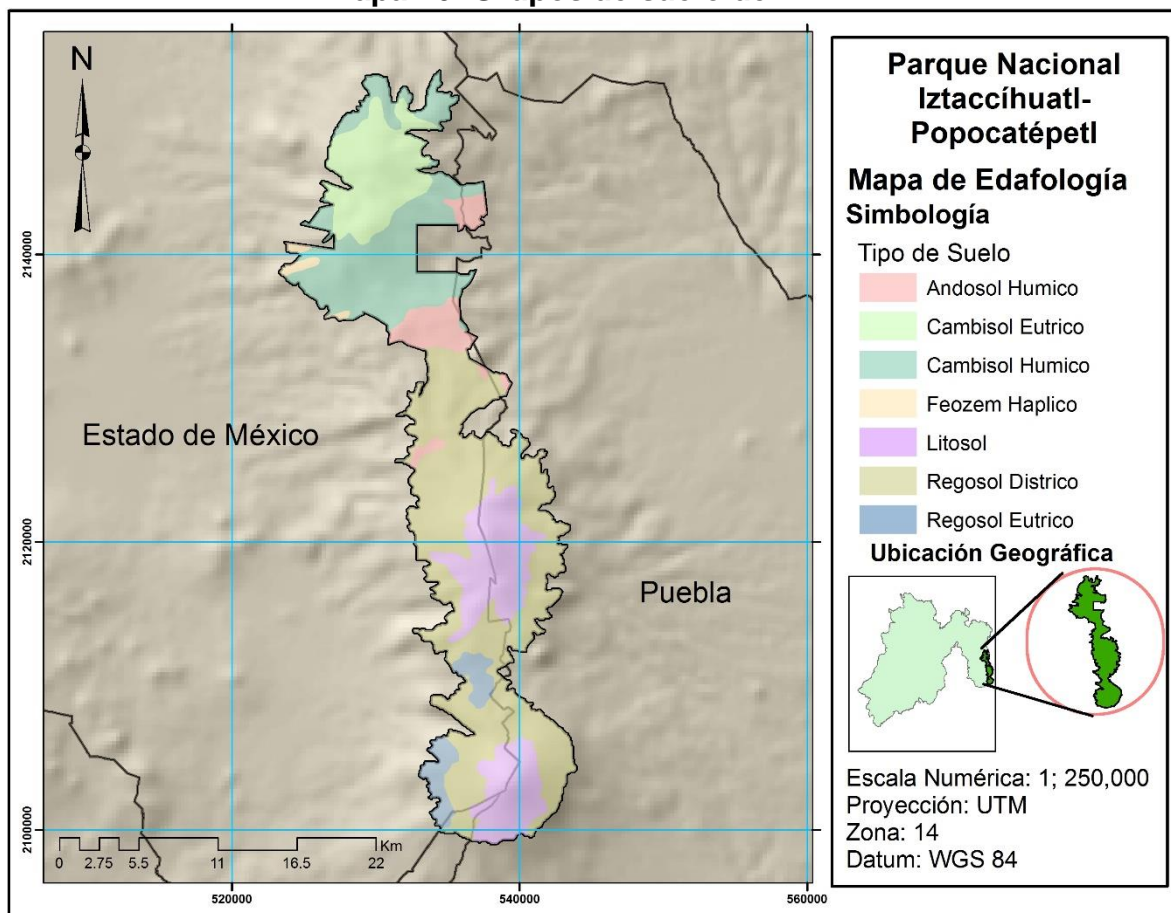
Andosoles: Derivados de cenizas volcánicas recientes, los Andosoles son suelos ligeros con alta capacidad de retención de humedad y un buen contenido de nutrientes. Estos suelos son ricos en materia orgánica, y la presencia de vidrios volcánicos en su composición.

Cambisoles: Los Cambisoles presentan un desarrollo más avanzado, con horizontes A y B bien diferenciados. A pesar de ser suelos relativamente pobres en nutrientes, tienen un considerable potencial para el desarrollo forestal, especialmente cuando se emplean prácticas adecuadas de manejo para la conservación del suelo y la captación de humedad.

Litsoles: Se trata de suelos someros con un grosor inferior a 0.1 metros, formados sobre tepetates. Estos suelos conservan las características del material parental, y debido a la velocidad de percolación del agua, tienen una capacidad limitada para sustentar vegetación.

Feozem: Son suelos ricos en materia orgánica y nutrientes, situados en laderas donde favorecen la actividad de pastoreo. Su alto contenido de nutrientes los convierte en suelos altamente productivos, siendo aptos para diversas actividades agropecuarias (Mapa 26).

Mapa 26. Grupos de suelo del PNIP



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Diversidad de fauna

En el Parque Nacional se encuentra una gran diversidad de fauna dentro de los que destacan los mamíferos como la musaraña oscura (*Sorex vagrans*) y el tejón o tlalcoyote (*Taxidea taxus*), la rata canguro (*Dipodomys phillips*), los roedores, zorros, zorrillos, coyotes y mapaches, entre otros. (Flores, 1998).

Aves: gavilancillos, aguilillas, correcominos, codornices, lechuzas, búhos, cuervos, cenizales, jilgueros, calandrias, gorriones, azulejos, tórtolas, coquitos, chillones, tigrillos, primavera, carpinteros, colibríes, chochoyotas, sesetos, cardenales, cacaxtles o charas, tordos y mulatos (Flores, 1998).

Reptiles: Los anfibios y reptiles, dadas sus características fisiológicas, son más afines a regiones templadas y húmedas (Flores, 1998).

4.4.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNIP

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, fue decretado como Área Natural Protegida con carácter de Parque Nacional el 8 de noviembre de 1935, toma su nombre de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Esta región geográfica de las cuencas de México y del alto Balsas, donde la población es de 25 millones de habitantes, adquiere una importancia estratégica porque conserva una importante reserva hidrológica y diversidad de ecosistemas forestales mismos que se describen a continuación (INEGI, 2015).

1.- Bosque de oyamel

El ecosistema bosque de oyamel es la especie dominante de los bosques (*Abies religiosa*). Tiene un rango altitudinal entre 2,400 a 3,500 metros. El dosel suele estar entre los 20 y 40 metros sobre el nivel del suelo. Los suelos son típicamente profundos, bien drenados pero húmedos todo el año (CONABIO, 2016) (Foto 16). En muchos sitios se hallan limitados a cañadas o barrancas más o menos profundas que ofrecen un microclima especial. No se desarrollan sobre terrenos planos o poco inclinados, pero tal hecho quizá está en función de la escasez de estos terrenos en la zona montañosa y en parte de la influencia humana (CONANP, 2008).

Fotografía 16. Bosque de oyamel en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

2.-Bosque de encino:

Dentro del parque el ecosistema forestal de bosque de encino tiene diversas características singulares en su desarrollo. Las asociaciones de bosques de encino son todavía más complejas que las del pino y se entremezclan con otros tipos de vegetación. De 2,400 a 3,100 metros sobre el nivel del mar se distribuye la asociación de (*Quercus laurina*) con (*Quercus crassifolia*), (*Quercus rugosa*), con abetos, madroños, cedros y pinos (CONABIO, 2016) (Foto 17).

Fotografía 17. Bosque de encino en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

3.- Bosque de pino:

Los bosques de pino del parque se caracterizan por ser bosques maduros en buen estado de conservación y con zonas importantes de regeneración natural. Se

presenta una alta densidad sobre todo en las zonas aledañas al Popocatepetl, en gran parte por la restricción de acceso al volcán y en la zona de las cañadas gracias a condiciones microclimáticas, al bajo impacto de actividades antropogénicas, y en la zona de Zoquiapan (CONABIO, 2016) (Foto 18).

Fotografía 18. Bosque de pino en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

4.- Vegetación secundaria:

La vegetación secundaria se encuentra conformada por arbustos e individuos fragmentados de los diferentes tipos de bosques, en su mayoría de pastizales dentro de los que destaca el zacatonal que se distribuye en el parque nacional está representado por una combinación de zacatonales primigenios y secundarios como consecuencia de la introducción de zacatales destinados a la ganadería. El pastizal alpino se establece entre los 4,000 y los 4,500 m.s.n.m. (CONANP, 2008).

Fotografía 19. Vegetación secundaria en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

5.- Área sin vegetación:

Son áreas que no cuentan con algún tipo de cobertura forestal, no tiene destinado un uso de suelo definido consecuencia de su orografía y geomorfología ya que la mayor parte de su superficie se encuentra en las partes altas de los volcanes ya mencionados. Pero es importante mencionar que estos espacios tiene una función fundamental en el desarrollo de los demás ecosistemas ya que son zonas de recarga para acuíferos, así como un gran depósito de aguas (González, 2002) (Foto 20).

Fotografía 20. Área sin vegetación en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

6.- Agricultura:

Estas áreas se destinan principalmente al desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas; sin embargo, también son las más afectadas por una intensa presión derivada del cambio de uso de suelo. Esta transformación se ha visto acelerada por el impulso gubernamental y privado hacia la urbanización, particularmente mediante la construcción de grandes complejos habitacionales (CONABIO, 2016).

Fotografía 21. Agricultura en el PNIP



Fuente: CONANP, (2023).

4.4.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNIP

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl presenta para el año de 2022 una superficie de 39,796 hectáreas distribuidas en seis distintos ecosistemas (Tabla 30). El bosque de pino cuenta con una superficie de 13,491 hectáreas es el de mayor proporción forestal (33.9%) se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

Tabla 30. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNIP

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de pino	13,491	33.9
2	Bosque encino	8,335	20.9
3	Área sin vegetación	6,453	16.2
4	Bosque de oyamel	5,444	13.7
5	Vegetación secundaria	3,990	10.0
6	Agricultura	2,083	5.2
	Total	39,796	100

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

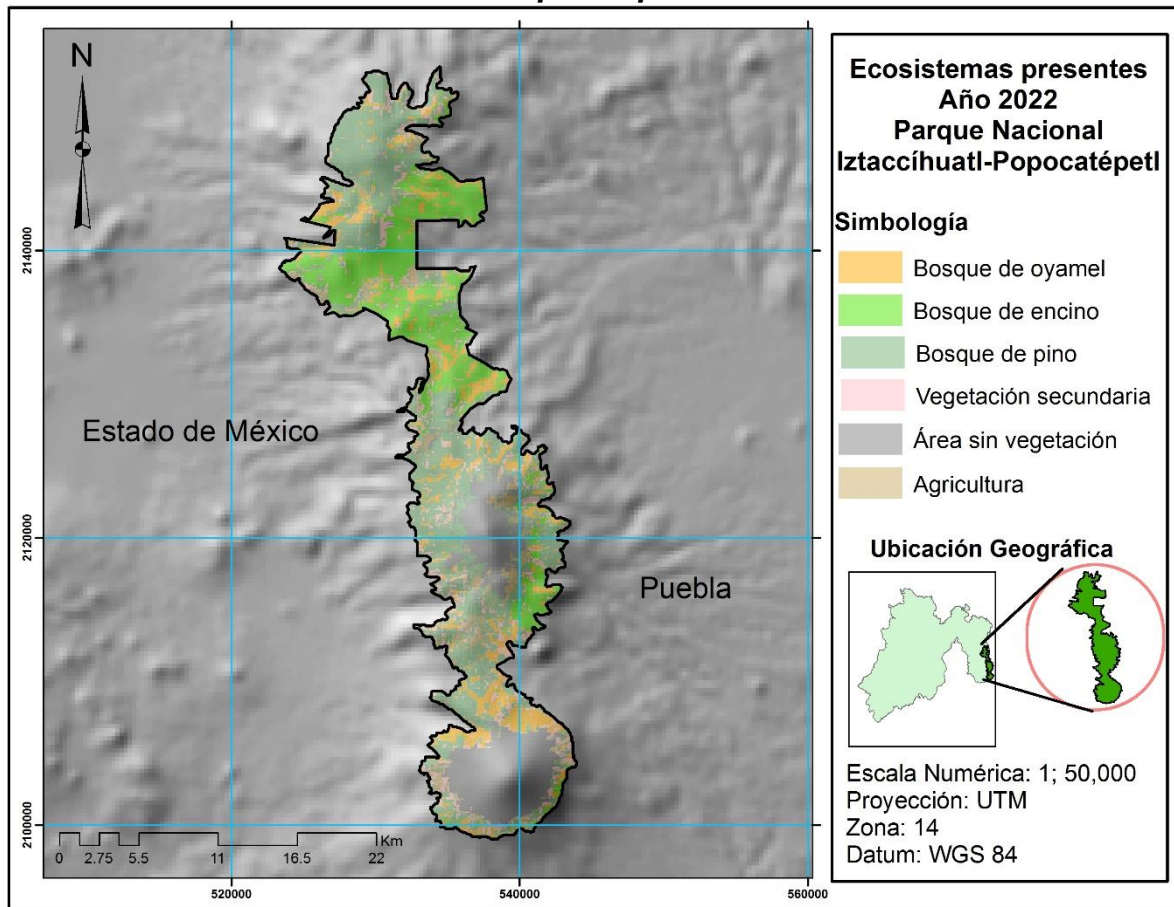
El ecosistema forestal bosque de encino cuenta con una superficie de 8,335 hectáreas equivalente al (20.9%) está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 m.s.n.m., el tercer ecosistema es el área sin vegetación secundaria con 6,453 hectáreas (16.2%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes de los dos volcanes (Mapa 27).

El cuarto ecosistema presente en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl es el bosque de oyamel, que abarca una superficie de 5,444 hectáreas, representando el 13.7% del área total. Este ecosistema se caracteriza por su alta densidad arbórea, favorecida por su proximidad al bosque de pino, lo que contribuye a su estabilidad ecológica y biodiversidad.

Además, la vegetación secundaria ocupa 3,990 hectáreas (10% del parque) y se encuentra principalmente en la zona norte, donde se observan concentraciones significativas de pastizales. Este tipo de vegetación desempeña un papel clave en la regeneración natural del ecosistema y en la provisión de hábitats para diversas especies.

Por otro lado, los agroecosistemas, destinados a actividades agrícolas, cubren una superficie de 2,083 hectáreas, lo que equivale al 5.2% del área total. Estos espacios representan una interacción entre las prácticas humanas y los ecosistemas naturales, influyendo en la dinámica ambiental del parque y en su conservación.

Mapa 27. Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.4.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNIP del año 2022

Se verificaron 600 puntos de muestreo en el mapa final para el año 2022 correspondientes a 100 puntos de verificación, en la matriz de confusión error para el año 2022, de los 600 puntos de verificación, 586 corresponden al ecosistema asignado; 14 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado (Tabla 31).

Tabla 31. Matriz de error año 2022 de los ecosistemas PNIP del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						Total verdad terreno
		Bosque de oyamel	Bosque de encino	Bosque pino	Vegetación secundaria	Área sin vegetación	Agricultura	
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	97	1	1	1	0	0	100
	Bosque de encino	2	98	1	0	0	0	100
	Bosque pino	0	1	97	1	1	0	100
	Vegetación secundaria	0	0	1	98	1	0	100
	Área sin vegetación	0	0	0	0	98	0	100
	Agricultura	1	0	0	0	0	100	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	100	100	600

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 32), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 14 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema:

Bosque de oyamel (17.2% de la superficie total); bosque de encino (16%); bosque de pino (16.6%), vegetación secundaria (17.1%), área sin vegetación (16.1%) y agricultura con el (16.7%).

Tabla 32. Matriz de error expresada en proporción

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de encino	Bosque pino	Vegetación secundaria	Área sin vegetación	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.16	0	0.03	0	0	0.01	0.2
	Bosque de encino	0.06	0.15	0.04	0	0	0	0.2
	Bosque pino	0.02	0.03	0.15	0.03	0	0	0.2
	Vegetación secundaria	0.01	0	0.01	0.16	0	0	0.2
	Área sin vegetación	0	0	0.01	0.01	0.16	0	0.2
	Agricultura	0	0	0	0	0	0.16	0.2
Total verdad imagen		0.17	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	1.0
Proporción representada mapa		0.13	0.33	0.20	0.10	0.16	0.05	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

La tabla 33 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 forestales (verdad imagen). Para el bosque de oyamel (13.7% de la superficie total); Bosque de encino (33.9%); bosque de pino (21.1%) vegetación secundaria (10%); área sin vegetación (16.2%) y agricultura (5.2%).

Tabla 33. Matriz de error corregida de los ecosistemas PNIP del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						Total verdad terreno
		Bosque de oyamel	Bosque de encino	Bosque pino	Vegetación secundaria	Área sin vegetación	Agricultura	
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.12	0	0.04	0	0	0.01	0.13
	Bosque de encino	0.01	0.33	0.05	0	0	0	0.34
	Bosque pino	0.01	0.01	0.19	0.02	0	0	0.20
	Vegetación secundaria	0.02	0	0.01	0.09	0	0	0.09
	Área sin vegetación	0	0	0.02	0.19	0.16	0	0.16
	Agricultura	0	0	0	0	0	0.05	0.05
Total verdad imagen		0.13	0.39	0.21	0.10	0.16	0.05	1.0
Proporción mapa		0.13	0.33	0.20	0.10	0.16	0.05	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza para la cartografía de los ecosistemas del PNIP del año 2022

La tabla 34 representa la confiabilidad del productor la vegetación secundaria y la agricultura presentan una confiabilidad del (97%), el ecosistema que presentan los valores más bajos es bosque el bosque de encino con una proporción del (93% verdad imagen), por lo que el error de omisión corresponde al (7%); por otra parte, los ecosistemas bosque de oyamel y área sin vegetación presentan valores del (95%).

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl es del (95.8% verdad imagen) y (2.2%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 34. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas del PNIP del año 2022

Año 2022	Bosque de oyamel	Bosque de encino	Bosque pino	Vegetación secundaria	Área sin vegetación	Agricultura	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad usuario	96	94	98	99	94	98	95.80	2.21
Error de comisión	4	6	2	1	6	2		
Intervalo de confiabilidad usuario	5.84	5.02	4.32	2.12	5.84	2.33		
Confiabilidad productor	95	93	94	97	95	97		
Error de omisión	5	7	6	3	5	3		
Intervalo confianza confiabilidad productor	0.04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.84		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los ecosistemas del PNIP del año 2022

La tabla 35 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 35. Superficies corregidas por el método de Card

Año 2022		Bosque de oyamel	Bosque de encino	Bosque pino	Vegetación secundaria	Área sin vegetación	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque oyamel	0.97	0	0.02	0	0	0	5444	0.06	5628
	Bosque encino	0.03	0.93	0.02	0	0	0	8335	0.13	8313
	Bosque pino	0.01	0.02	0.93	0.02	0	0	1349	0.13	12673
	Vegetación secundaria	0.01	0	0.02	0.98	0	0	3990	0.28	4236
	Área sin vegetación	0	0	0.010	0.01	0.97	0	6453	0.39	6864
	Agricultura	0	0	0	0	0	1.0	2083	0.01	2081
Proporción representada en el mapa		0.13	0.33	0.20	0.10	0.16	0.05	3979	1.0	39796

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

4.4.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNIP

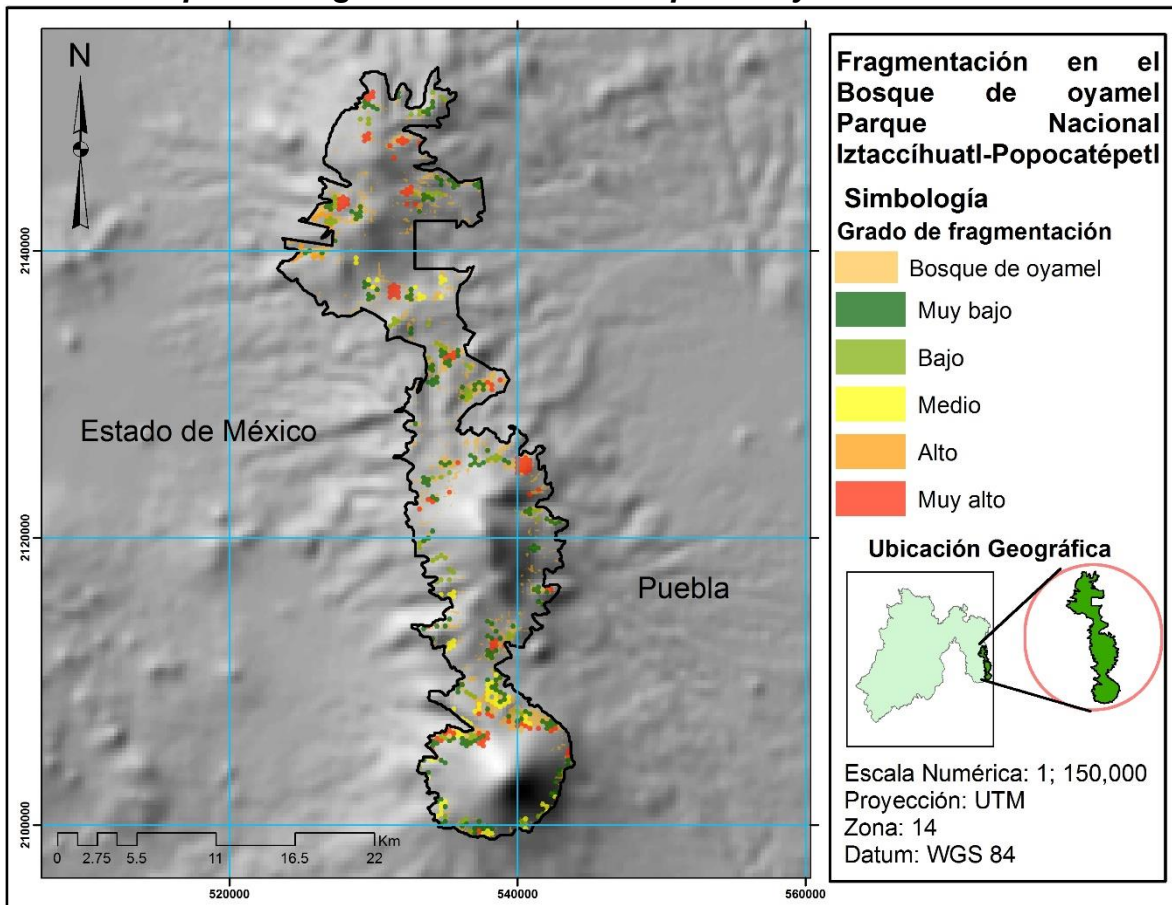
La cartografía referente al grado de fragmentación forestal del bosque de oyamel, pino y encino en el PNIP para el año 2022 se presenta a continuación.

Para el bosque de oyamel la leyenda corresponde a cinco categorías, que en la suma de todas estas encontramos un total de 479 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: Muy bajo (198), Bajo (84), Medio (71), Alto (19) y Muy alto (107).

Los valores más bajos de densidad forestal se concentran en la zona sur y norte del parque (Mapa 28), el principal factor como en la mayoría de los casos de los de más parques está relacionado con el problema de la tenencia de la tierra en las Áreas Naturales Protegidas lo cual es muy común para lograr una adecuada y eficaz administración de este Parque Nacional, existen diversas inconformidades de ejidatarios y comuneros que se sienten afectados por la falta de la indemnización y

nula aplicación de pago por servicios ambientales, esto genera un aumento en la diversificación de actividades económicas para el sustento de las comunidades lo que genera un aumento en el aprovechamiento negativo de los recursos forestales como la tala clandestina (Hernández y Granados, 2006).

Mapa 28. Fragmentación en el bosque de oyamel en el PNIP



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

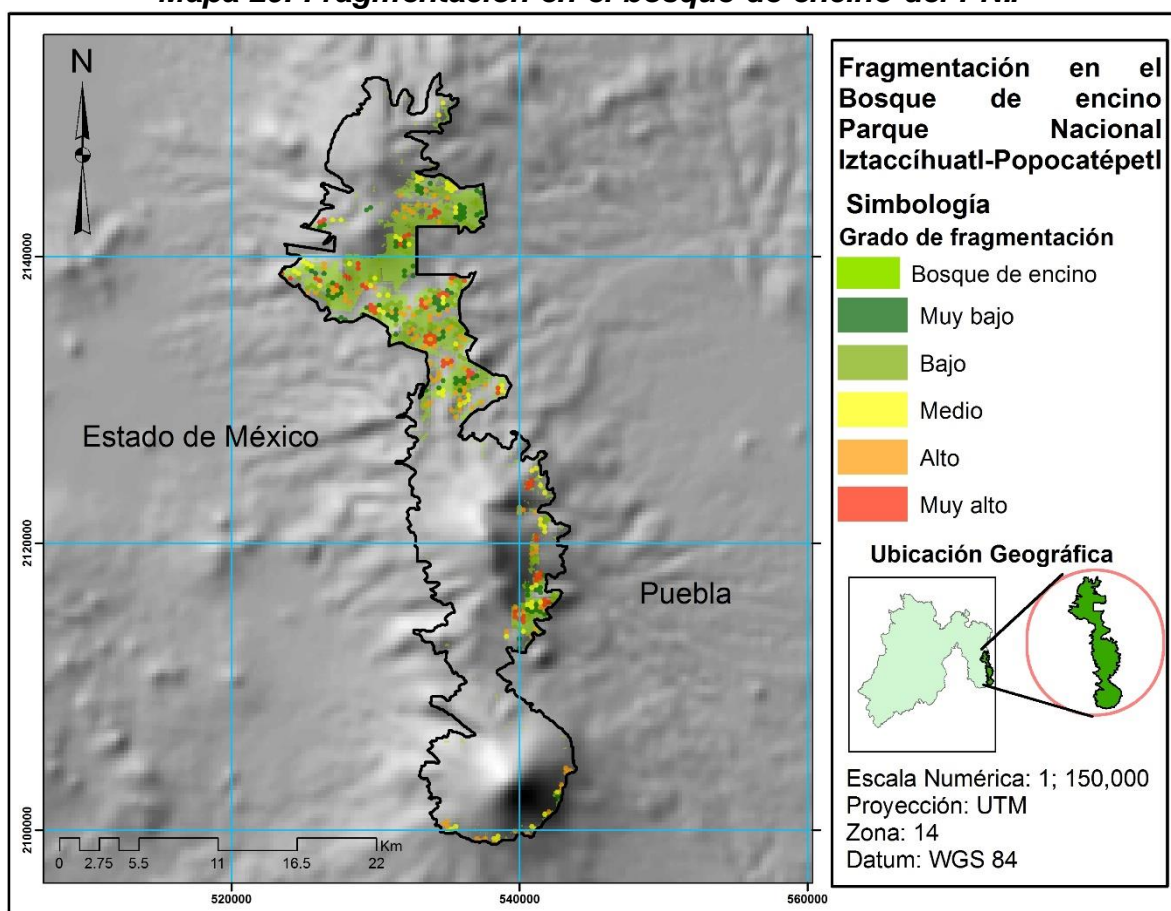
En el ecosistema forestal bosque de encino se determinaron cinco categorías, con un total de 441 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (91), bajo (107), medio (70), alto (104) y muy alto (69).

Para el ecosistemas forestal bosque de encino el proceso de fragmentación es similar al bosque de encino, los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona norte del parque, los factores que lo generan corresponde a las áreas donde la tala ha devastado grandes superficies de bosque, se ha logrado controlarse solo en pequeñas zonas dentro del parque, pero el problema persiste

en la zona de influencia, consecuencia de la nula cultura forestal sólida en los pobladores debido, entre otras cosas, a que los pueblos y comunidades poco se han beneficiado del valor de sus bosques, por lo que esta actividad no se realiza de manera sustentable (Mapa 29).

Por otra parte, los incendios forestales son provocados por técnicas agrícolas no sustentables, como la “roza, tumba y quema”, y la que realizan los ganaderos para renovar el pastizal y el ganado pueda alimentarse del “pelillo” que brota después del incendio, esta práctica es la que ocasiona mayores superficies quemadas (Sandoval y Oyarzun, (2003).

Mapa 29. Fragmentación en el bosque de encino del PNIP



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

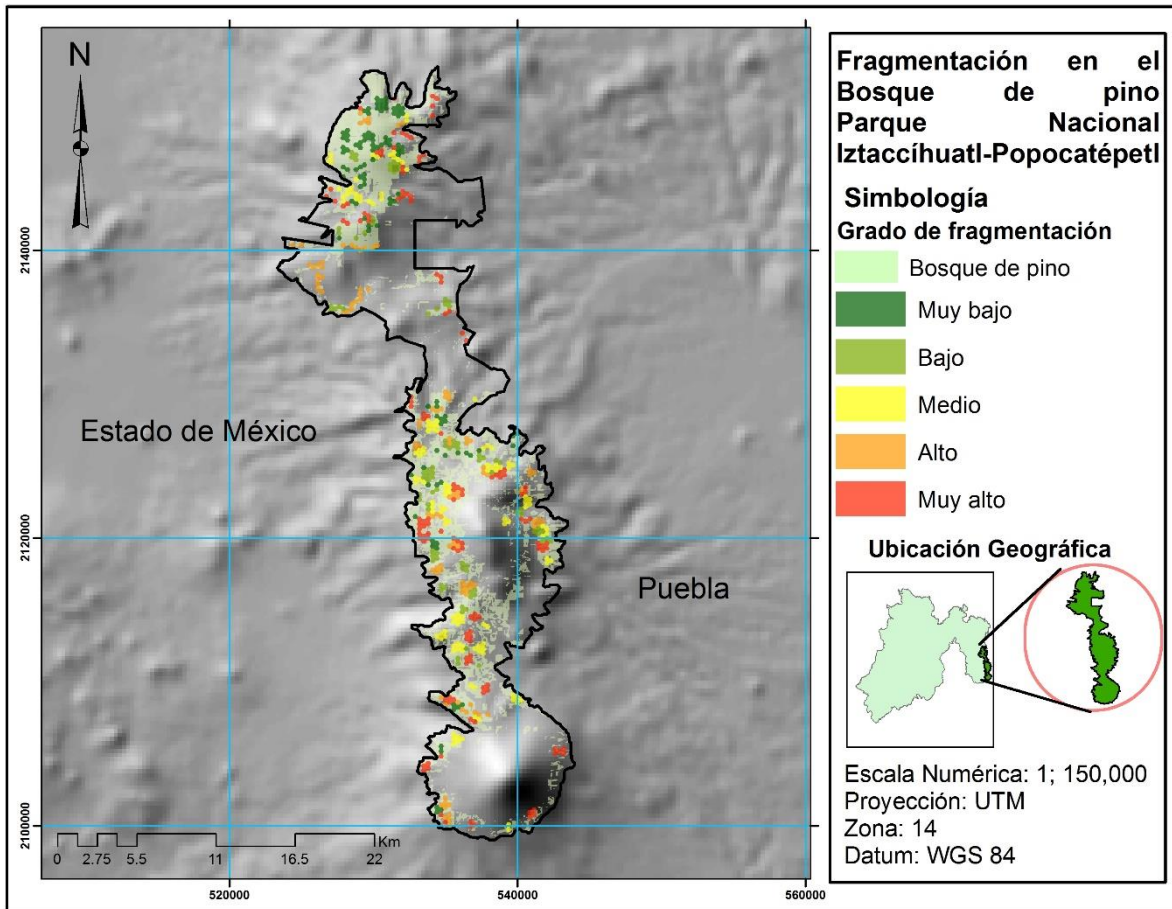
El mapa 30 correspondiente a la fragmentación forestal del ecosistema forestal bosque de pino se constituye de 579 polígonos dividido en cinco rangos muy bajo (108), bajo (88), medio (134), alto (110) y muy alto (139).

El ecosistema forestal del bosque de pino en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl presenta los niveles más altos de fragmentación en la zona central del parque, aunque también se observan concentraciones significativas en los límites del área protegida, particularmente en la zona de amortiguamiento. Esta fragmentación está estrechamente relacionada con factores topográficos y de accesibilidad, ya que las áreas con pendientes menores a 15° y la existencia de caminos abiertos al público facilitan el acceso descontrolado, lo que dificulta una regulación efectiva de las entradas y salidas del parque. La combinación de estos factores ha propiciado un incremento en la tala clandestina, actividad en la que participan no solo ejidatarios y comuneros locales en busca de sustento, sino también organizaciones delictivas que operan a mayor escala, intensificando la degradación del ecosistema forestal (CONANP, 2007).

Además, el uso de la biota del parque por parte de las comunidades aledañas constituye otra limitante para la conservación del bosque de pino. Aunque históricamente los recursos naturales han sido aprovechados para el autoconsumo, en los últimos años se ha observado una creciente extracción con fines comerciales, lo que ejerce una presión adicional sobre el ecosistema (CONANP, 2013).

Ante este panorama, es fundamental implementar estrategias de manejo sostenible que incluyan el control y monitoreo de accesos, la regulación del uso de recursos forestales y el fortalecimiento de esquemas de gobernanza que involucren a las comunidades en la conservación del parque (Rodríguez, 2013).

Mapa 30. Fragmentación en el bosque de pino del PNIP



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

4.4.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIP

La captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuestos por Jiménez E., (2013) y Morfín, *et al.* (2015).

El PNIP presenta tres tipos de ecosistemas forestales; el bosque de oyamel sin análisis de fragmentación forestal presentó una superficie de 5,444 ha distribuidas en la zona centro y norte del ANP, las cuales capturaron 2,577 ton de carbono para el año 2022.

El ecosistema forestal bosque de encino presentó una superficie de 8,335 hectáreas equivalentes a 3,939 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona sureste del área de estudio. Por su parte, el bosque de pino cuenta 13,491 ha que equivalen a 6,323 toneladas de carbono capturado (Tabla 36).

Tabla 36. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNIP

o N	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de oyamel	5,444	4710	0.4735	2,577.73	2,230.18
2	Bosque de encino	8,335	6,925	0.4726	3,939.12	3,272.75
3	Bosque de pino	13,491	9,701	0.4687	6,323.23	4,546.85

Fuente: elaboración propia con base en Correa (2012).

El análisis de la fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, la superficie para el bosque de oyamel disminuyó su superficie 734 ha equivalentes a 347 toneladas de captura de carbono, para el bosque de encino la superficie reducida fue de 1,410 ha equivalentes a 666 toneladas de captura de carbono menos para este año, por último el bosque de pino redujo su superficie 3,790 ha equivalentes a 1,776 toneladas de captura de carbono (Tabla 36).

4.4.7 Diagnóstico integral del PNIP.

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl (PNIP) es una de las ANP más relevantes del país, tanto por su importancia ambiental como por su extensa superficie, no obstante, su extensión territorial, sumada a la compleja dinámica social en su entorno, ha representado un reto significativo para su protección y un manejo sustentable de las actividades realizadas dentro del área. Esta situación ha contribuido al desequilibrio ecológico en varias de sus áreas, afectando negativamente la calidad y continuidad de los servicios ecosistémicos que brinda a la población y a las comunidades locales.

A continuación, se presentan los principales problemas identificados a través de la caracterización geográfica y ambiental (Hernández y Granados, 2005) (Tabla 37).

Tabla 37. Análisis de los problemas identificados en el PNIP.

Problemas identificados	Fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Cambios de uso de suelo	Análisis de cartografía
2.- Erosión de suelo	(Hernández y Granados, 2005)
3.- Residuos solidos	(Arriaga, 2000).
4.- Tala clandestina	(CCMS, 2008).
Problemas sociales	
1.- Marginación	(Programa de Majeo, 2013).
2.-Delincuencia	(Zamorano (2002). (CONABIO, 2009).
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	(CONANP, 2008).
2.-Turismo no regulado	(Programa de Majeo, 2013).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Cuentan con un Plan de Manejo publicado el 3 de diciembre del 2013, de sus objetivos principales es resguardar y recuperar los espacios de mayor impacto ambiental, no obstante los problemas ambientales se han incrementado, alterando los servicios ambientales que brinda los ecosistemas forestales (Rodríguez, 2013).

Problemas ambientales

La baja densidad forestal es evidente específicamente en los límites del parque zona sur y norte, a causa de diversos factores como la tala, han destruido una importante superficie de bosque y fragmentado los ecosistemas. Si bien esta tala ha logrado controlarse dentro del parque, sigue siendo intensa en la zona de influencia.

Los incendios forestales en gran proporción, son provocados por técnicas agrícolas no sustentables, como la “roza, tumba y quema”, y la que realizan los ganaderos para renovar el pastizal y el ganado pueda alimentarse del “pelillo” que brota después del incendio, esta práctica es la que ocasiona mayores superficies quemadas (Hernández y Granados, 2005)

Bajo este aspecto, los cambios de uso de suelo son de los problemas importantes por resolver, la disminución de la densidad forestal reduce los servicios ambientales que son importantes para la población que vive tanto dentro del Área Natural Protegida como en su zona de influencia, principalmente infiltración y recarga de mantos acuíferos, captura de carbono, retención de suelos, hábitat de especies de flora y fauna, regulación del clima, belleza escénica y recreación. Por tal razón, es necesario conservar las superficies forestales que contribuyen a la recarga de los mantos acuíferos, a fin de mitigar el aumento de la presión de explotación de dichos mantos (Arriaga, 2000).

Las masas forestales se distribuyen principalmente en terrenos con pendientes pronunciadas, lo que ha actuado como una barrera natural contra la expansión de actividades humanas, favoreciendo su conservación en las zonas altas. No obstante, las áreas de mayor deforestación se encuentran en las planicies, particularmente en los límites del parque, donde la intensificación de actividades recreativas y turísticas representa una mayor presión sobre el ecosistema (CCMS, 2008).

A pesar de tener gran importancia ecológica y sociocultural, el PNIP y su región colindante enfrentan varias amenazas. En la región colindante la principal amenaza está relacionada con la disminución de la cobertura forestal y el cambio de uso de suelo. Las principales fuerzas de cambio que inciden en la transformación del

paisaje desde los años 80 son la expansión urbana, la transición de actividades tradicionales hacia prácticas menos sostenibles y la intensificación del uso del bosque (Rodríguez, 2013).

La Dirección del Parque Nacional considera importante impulsar la elaboración e implementación de un programa de planeación turística que incluya el establecimiento de rutas y senderos con adecuada señalización, y capacitación bajo un esquema de educación ambiental, que permita garantizar la conservación de los ecosistemas brindando beneficios económicos a la población local y permitiendo la recreación de los visitantes (CONANP, 2013).

Problemas sociales

La incidencia delictiva representa una amenaza directa para la protección del parque. La falta de vigilancia efectiva facilita la realización de actividades ilegales como la tala clandestina, la caza furtiva, la ganadería no regulada y el turismo desordenado, lo que compromete la integridad del ecosistema (Zamorano (2002).

El fortalecimiento de la vigilancia y la aplicación rigurosa de las disposiciones jurídicas son elementos clave para mitigar estos impactos. Una gestión efectiva permitiría reducir la presión sobre los recursos naturales y garantizar la conservación de la biodiversidad, la estabilidad de los ecosistemas y la continuidad de los servicios ecosistémicos que el parque proporciona (OMT, 1999).

Tradicionalmente, en el Parque Nacional se realizan actividades como el pastoreo, la obtención de leña, la extracción de tierra, arena y musgo y la colecta de hongos y plantas medicinales para su consumo y venta en los mercados regionales.

La actividad económica de pastoreo extensivo se desarrolla de manera tradicional en toda la región de Paso de Cortés, se ha logrado expulsar todo el ganado de esos predios, la presión del ganado (vacuno, bobino y caprino) que ejerce sobre los recursos naturales y la vida silvestre conlleva a un detrimento constante de la calidad de los recursos. Por lo que una estrategia fundamental de trabajo por parte del parque para evitar la extinción de especies y pérdida de espacios donde se desarrolle la vida silvestre, es el de generar la reconversión de actividades productivas en la zona de influencia, buscando impulsar procesos organizativos y productivos alternos y sustentables con el medio ambiente (CONABIO, 2019).

Problemas económicos

El problema de la tenencia de la tierra en las Áreas Naturales Protegidas, es un factor común para poder desarrollar con éxito la conservación y protección del patrimonio natural de nuestro país, y de manera específica, para lograr una adecuada y eficaz administración de este Parque Nacional, (CONANP, 2008).

La preocupación sobre la titularidad de la tierra ya sea pública, social y/o privada, facilita el establecimiento de modalidades de uso de los recursos naturales que en ella se contienen, y por ende, de las actividades que se pueden permitir o no. En este decreto se establece claramente que la “conservación forestal no puede obtenerse de una manera eficaz si prevalecen los intereses privados vinculados a la propiedad comunal, ejidal o de particulares, bajo este contexto existen problemas severos por el aprovechamiento maderable de los bosques por parte de las localidades que interactúan con el parque. (Hernández y Granados, 2005).

Cuando las nevadas estacionales son intensas los turistas de las ciudades vecinas, particularmente de la Ciudad de México, acuden en masa al Parque, la capacidad del personal del parque para atender y controlar a la cantidad de turistas en aspectos como: cobro de la entrada, vigilancia de las zonas restringidas, supervisión de los prestadores de servicios, manejo de residuos, servicios sanitarios, atención a las emergencias de salud, entre otros es superada drásticamente, (Programa de Majeo, 2013).

4.4.8 Consideración final sobre el PNIP

El análisis sobre la captura de carbono con base en el análisis de fragmentación forestal permitió conocer en detalle cuáles son los bosques y las zonas con menor densidad forestal.

La cartografía generada consiste en la identificación de polígonos con los valores más altos de fragmentación en los tres ecosistemas forestales, se ubican en la zona centro, norte y sur del parque, donde se desarrollan múltiples actividades turísticas, económicas y culturales lo que repercute directamente en el desarrollo de los bosques ya que no existe una adecuada regulación en entradas y salidas del parques y de uso sustentable de los recursos forestales (Inclán, 2005).

Por otra parte, existe un ordenamiento ecológico del territorio el cual es un instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente así como la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos (Olivares, 2015).

Por ello, resulta fundamental abordar el estudio del parque desde una perspectiva de las ciencias ambientales, que permita identificar zonas prioritarias de atención para su recuperación y conservación. Además, es necesario fortalecer la difusión del valor ecológico, cultural y social de estos espacios, con el objetivo de que la población desarrolle un sentido de pertenencia y se fomente el orgullo por el patrimonio natural y cultural de la región. Este enfoque busca no solo generar conciencia, sino también inspirar una participación activa que conduzca a valorar, reflexionar y actuar en favor de la conservación del Área Natural Protegida, promoviendo un movimiento colectivo orientado al rescate y preservación del territorio.

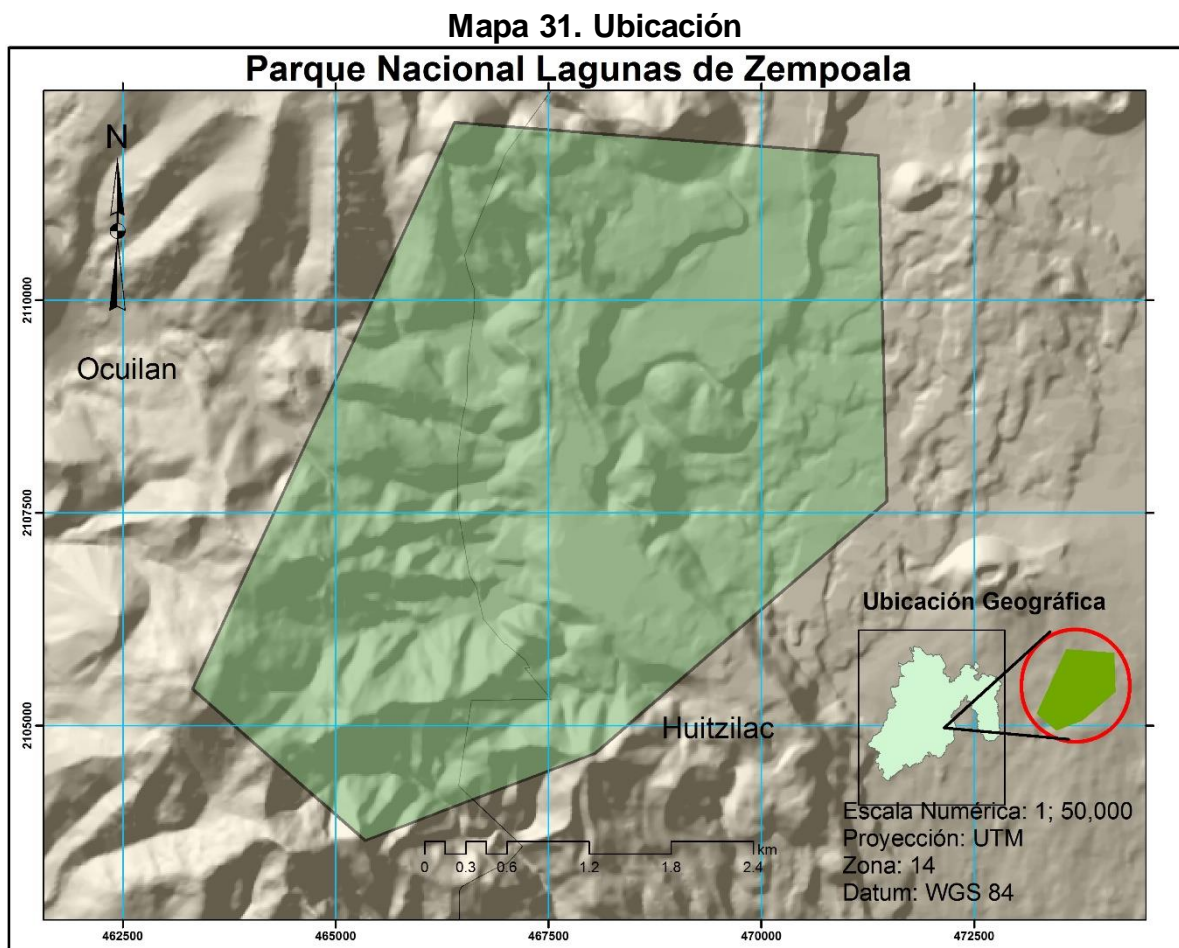
4.5 Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ)

4.5.1 Caracterización geográfica del PNLZ

Localización geográfica

El Área Natural protegida Parque Nacional Lagunas de Zempoala (PNLZ) 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.(Mapa 31).

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.



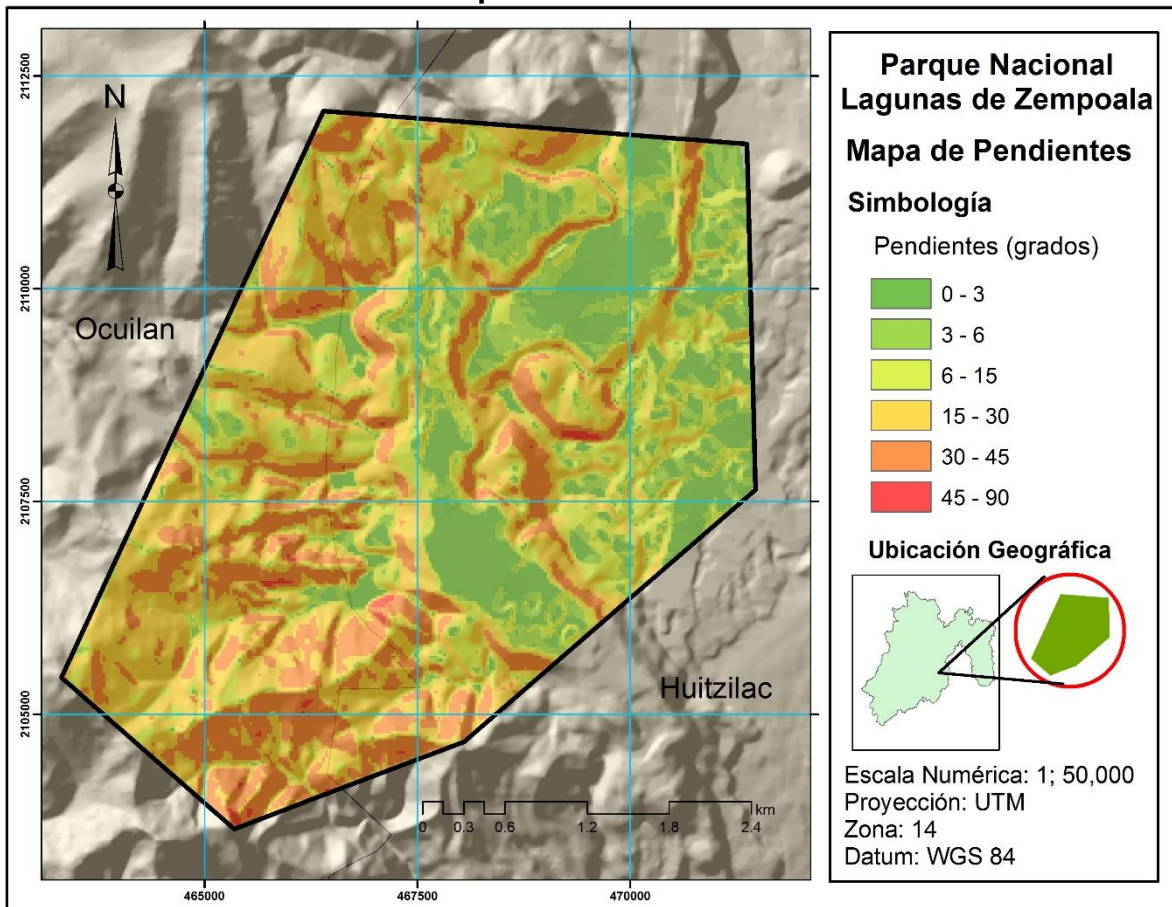
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

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 32).

Las altitudes que presenta varían de los 2,720 a 3,700 m.s.n.m. 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 (Vargas, 1997).

Mapa 32. Pendientes



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

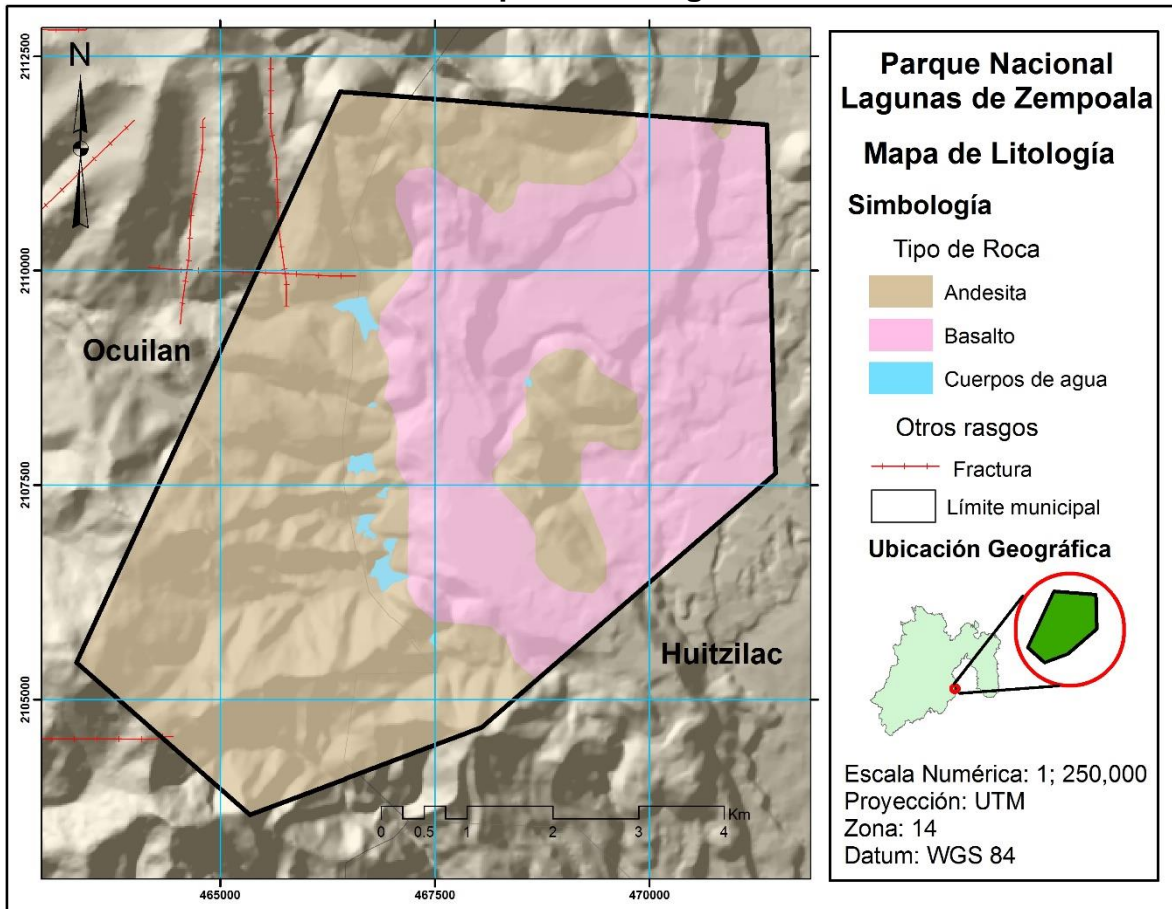
Litología

En el parque Nacional Lagunas de Zempoala prevalecen dos principales tipos de roca (mapa 33), 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, su formación procede de roca de origen volcánico, que proviene de un fenómeno geológico, existiendo importantes coladas basálticas, 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 por agua en la Andesita Zempoala”.

Mapa 33. Litología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Clima

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 Ocuilán (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.

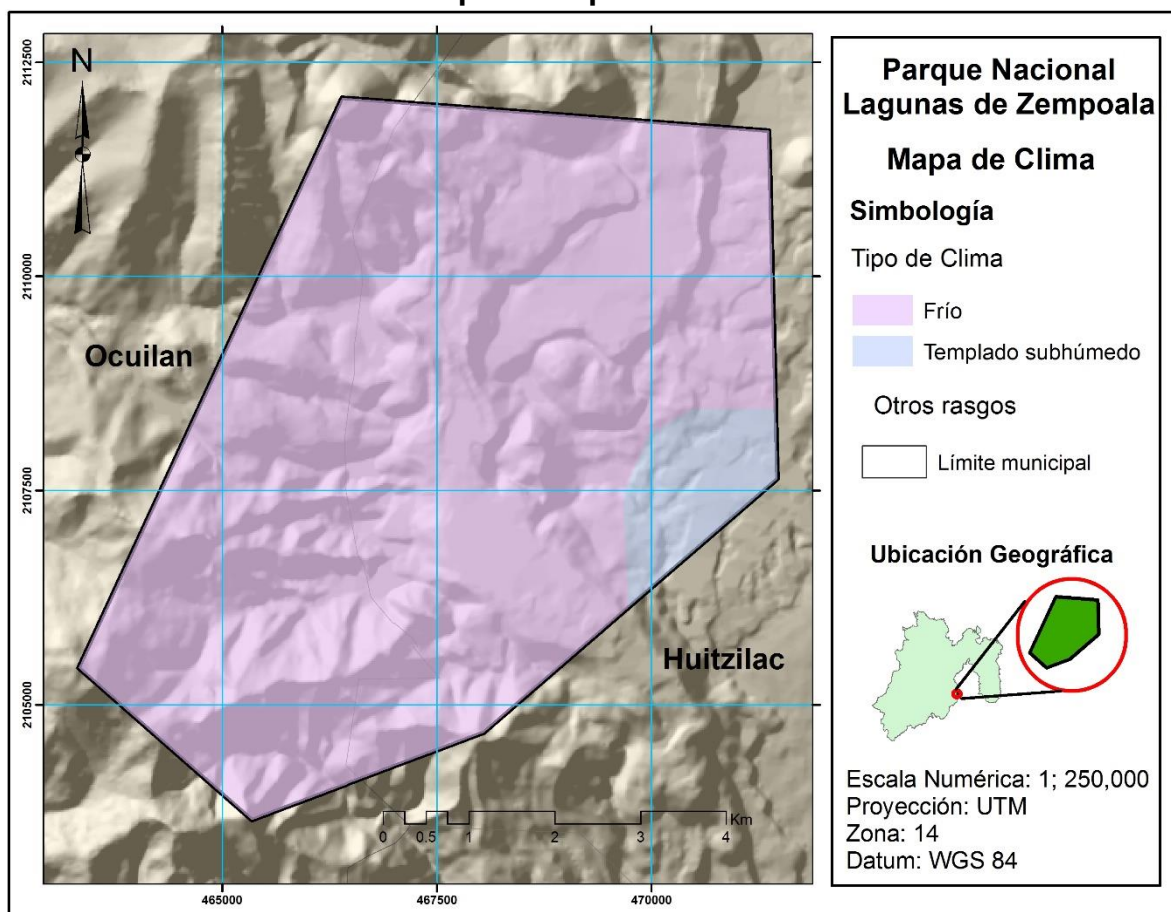
Este clima se localiza en las zonas más altas del Parque, altitudes por encima de los 3000 m.s.n.m., se encuentra distribuido en la parte sureste en los límites del municipio de Huitzilac (Mapa 34).

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).

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 con el 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 (Vargas, 1997).

Mapa 34. Tipos de clima



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Hidrología

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).

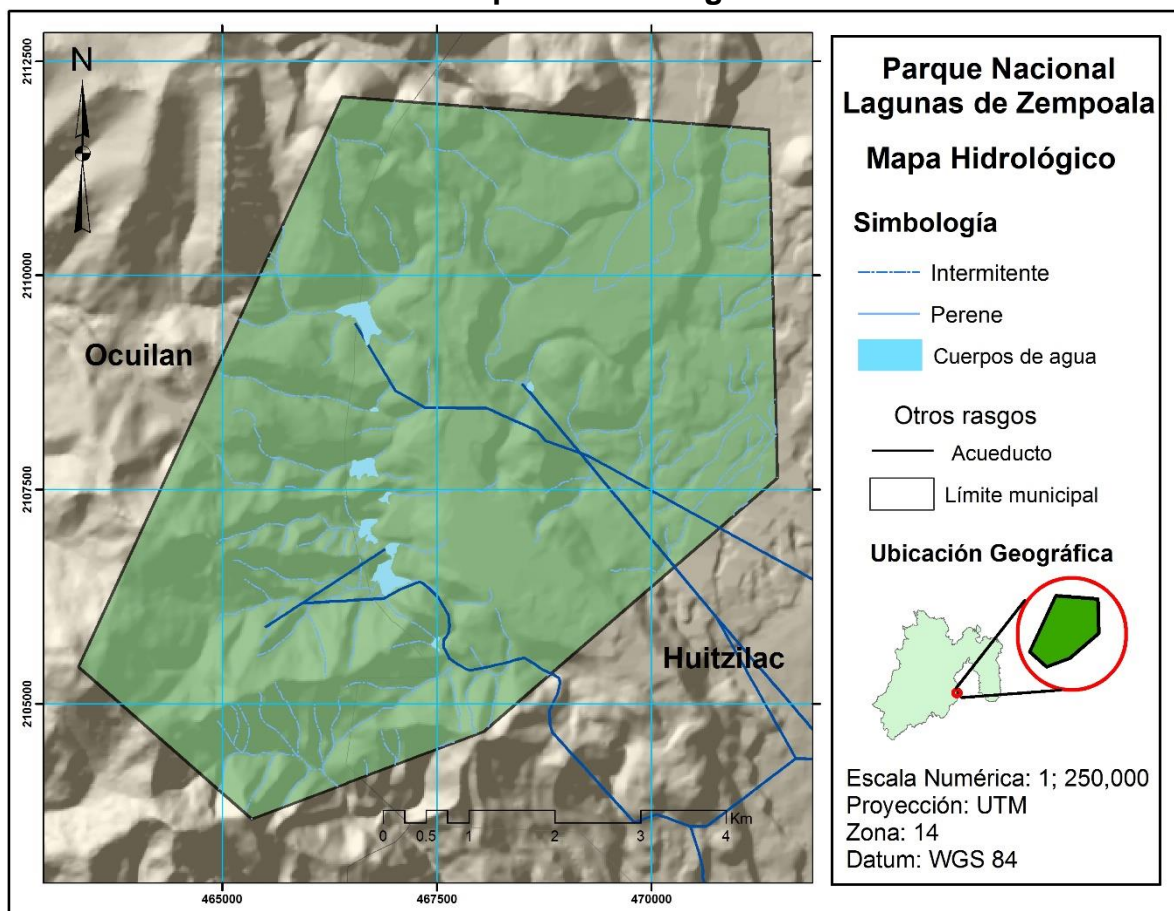
De acuerdo con CONAGUA (2002), el Parque Nacional Lagunas de Zempoala está conformado de distintos cuerpos de agua que dieron origen a su nombre: Lago Zempoala, Compila, Tonatiahua, Acomantla, Acoyotongo, Quila, y Hueyapan. Las depresiones de estos lagos fueron provocadas por material volcánico emitido 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 (SEMARNAT, 2010).

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 (CONANP, 2008).

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 35).

Mapa 35. Hidrología



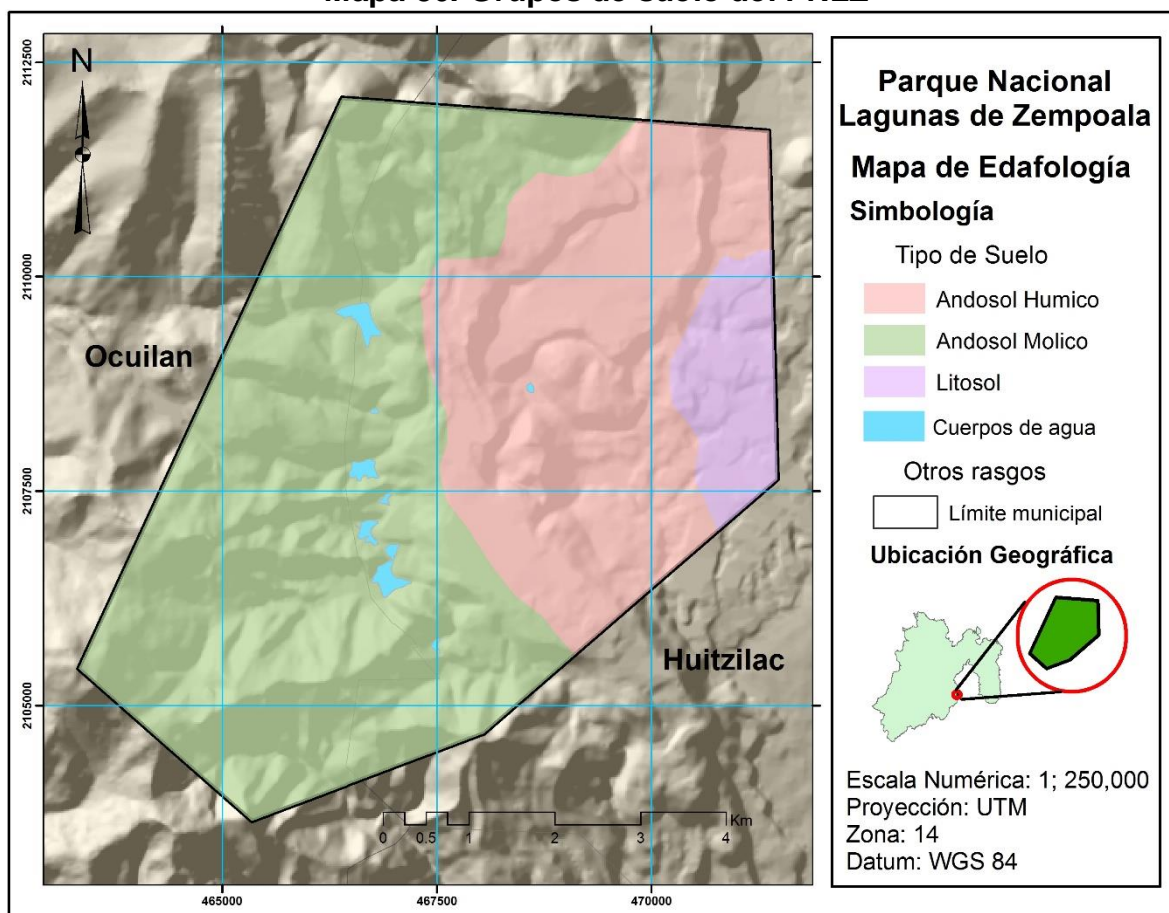
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Edafología

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 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 (Vargas 1997) (Mapa 36).

Mapa 36. Grupos de suelo del PNLZ



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

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 de acuerdo a la CONANP (2013) son los siguientes:

Mamíferos: 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 sp*), y tlacuaches (*Didelphys virginiana*), éste último distribuido en todas las asociaciones vegetales” (CONANP, 2008).

Aves: 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).

Anfibios y reptiles: 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 (CONANP, 2008).

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).

4.5.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNLZ

Las interacciones entre los diversos componentes ambientales, como el clima, la hidrología, la geomorfología y el tipo de suelo, crean las condiciones propicias para el establecimiento y desarrollo de los ecosistemas en el Parque. En este sentido, las características ambientales del Área Natural Protegida favorecen la diversidad y el crecimiento de una amplia gama de ecosistemas, proporcionando un entorno adecuado para su conservación y evolución.

1.- 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 m.s.n.m., 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).

Fotografía 22. Bosque de oyamel en el PNLZ



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

2.- 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 23)

Fotografía 23. Bosque de pino en el PNLZ



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

3.- Bosque mixto de pino-oyamel

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 24. Bosque mixto de pino-oyamel en el PNLZ



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.- 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 25).

Fotografía 25. Pastizales en el PNLZ



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

5.- Agricultura:

El ecosistema agrícola presente en el área del parque corresponde a agroecosistemas de carácter temporal, resultado directo de la intervención humana, comúnmente conocidos como milpas. Estos espacios son aprovechados principalmente por las comunidades rurales que habitan en las zonas colindantes al parque, en particular los ejidatarios de San Juan Atzingo, en el municipio de Huitzilac, Estado de Morelos.

Fotografía 26. Agricultura en Santa Lucia Ocuilan Edo. Mex



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

6.-Cuerpos de agua:

Los cuerpos de agua denominados así para esta investigación se refieren a las lagunas que conforman un sistema de lago perteneciente a una cuenca lacustre y endorreica con condiciones hidrológicas estáticas, con escasa circulación de la masa de agua (Foto 27). 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 27. Laguna Zempoala



Fuente: Foto tomada por Santiago Juan Medina Silva, (2023).

4.5.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNLZ

El Parque Nacional Laguna de Zempoala presenta para el año de 2022 una superficie de 4,555 hectáreas distribuidas en seis distintos ecosistemas (Tabla 38). El bosque mixto de pino-oyamel cuenta con una superficie de 1,727 hectáreas es el de mayor proporción en cuanto superficie (37.9%) su distribución espacial es en la zona centro, norte y este del ANP.

Tabla 38. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLZ

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de pino-oyamel	1,727	37.9
2	Bosque de oyamel	1,681	36.9
3	Bosque de pino	881	19.3
4	Pastizales	164	3.6
5	Agricultura	93	2.0
6	Cuerpos de agua	9	0.2
	Total	4555	100

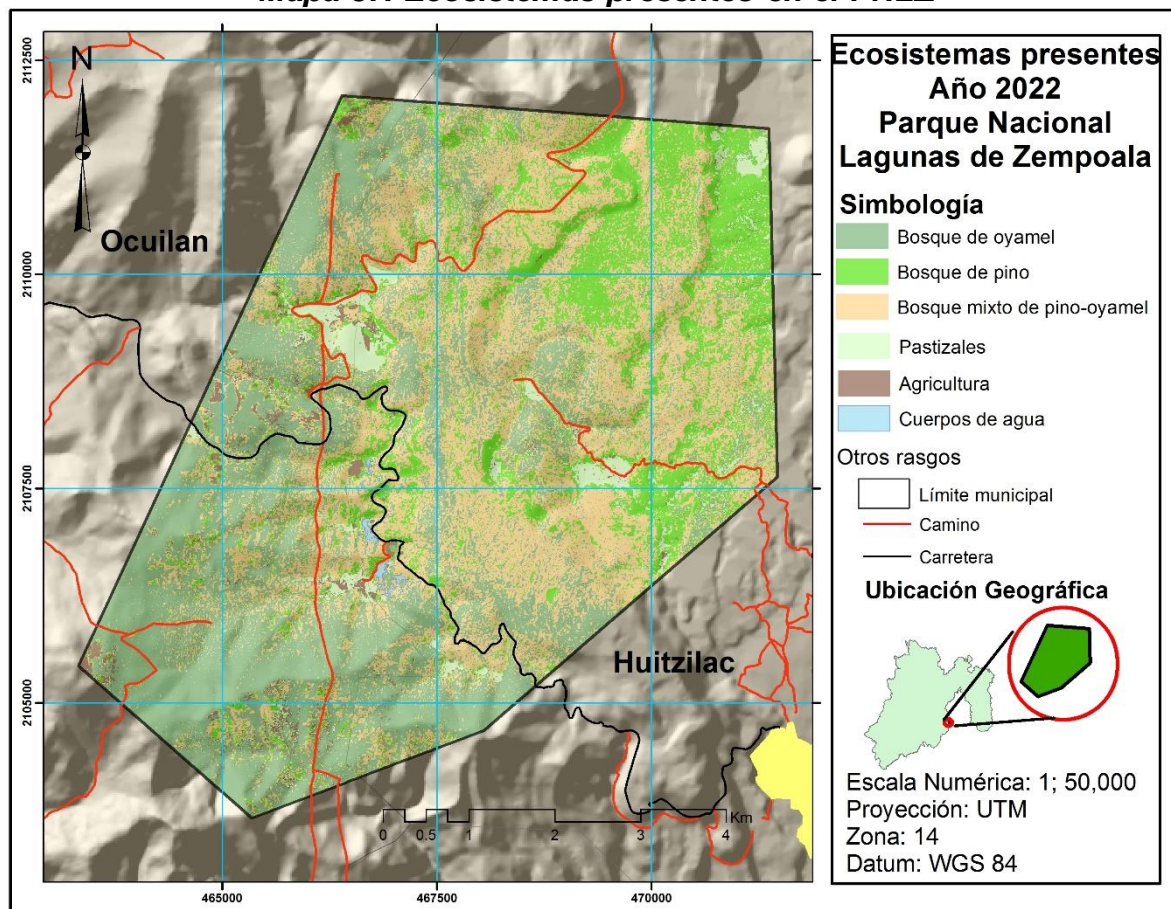
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque de oyamel cuenta con una superficie de 1,681 hectáreas equivalente al (36.9%) está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 msnm.

El tercer ecosistema es el bosque de pino con 881 hectáreas (19.3%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes 3,000 a los 3,700 msnm (Mapa 37).

Los pastizales cuentan con una superficie de 164 hectáreas (3.6%) es de los de mayor densidad por su vecindad inmediata con el bosque de pino. La agricultura cuenta con una superficie de 93 hectáreas lo que representa el (2%), se encuentra distribuido en la zona norte. Los cuerpos de agua son el ecosistema con la menor superficie con 9 hectáreas equivalentes a (0.2%) del total de la superficie.

Mapa 37. Ecosistemas presentes en el PNLZ



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.5.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNLZ

En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 600 puntos de verificación, 587 corresponden al ecosistema asignado; solo 13 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado. Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías) de los mapas (Tabla 39).

Tabla 39. Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	97	1	0	2	1	0	100
	Bosque de pino	1	98	0	1	1	0	100
	Bosque mixto de pino-oyamel	0	0	97	0	0	0	100
	Vegetación secundaria	0	0	1	97	0	0	100
	Agricultura	2	1	2	0	98	0	100
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	100	100
	Total verdad imagen	100	100	100	100	100	100	600

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 40), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 12 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema.

Tabla 40. Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque oyamel	0.06	0.02	0	0.79	0.61	0	0.2
	Bosque de pino	0.03	0.13	0	0.02	0.13	0	0.2
	Bosque pino oyamel	0	0	0.05	0	0	0	0.2
	Vegetación secundaria	0	0.01	0.07	0.16	0	0	0.2
	Agricultura	0.05	0	0.03	0	0.16	0	0.2
	Cuerpos agua	0	0	0	0	0	0.16	0.2
Total verdad imagen		0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.0
Proporción mapa		0.36	0.19	0.37	0.03	0.02	0.01	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

La tabla 41 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 forestales.

Tabla 41. Matriz de error corregida de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022

a) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.15	0.02	0	0.01	0.01	0	0.17
	Bosque de pino	0.08	0.15	0	0.06	0.01	0	0.24
	Bosque pino oyamel	0	0	0.11	0	0	0	0.11
	Vegetación secundaria	0	0.01	0.17	0.05	0	0	0.21
	Agricultura	0.12	0	0.08	0	0.02	0	0.24
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0.01	0.02
verdad imagen		0.36	0.19	0.37	0.03	0.02	0.02	1.0
Proporción mapa		0.36	0.19	0.37	0.04	0.01	0.01	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl es del (96.5% verdad imagen) y (1.5%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 42. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022

Año 2022	Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	98	96	93	97	97	100	96.50	1.52
Error de comisión	2	4	7	3	3	0		
Intervalo de confianza del usuario	2.2	4.5	2.76	2.46	4.10	0.00		
Confiabilidad del productor	96	95	94	97	95	100		
Error de omisión	4	5	6	3	5	0		
Confianza del productor	0.03	0.04	0.97	0.87	0.23	0		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los de los ecosistemas presentes en el PNLZ año 2022

La tabla 43 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 43. Superficies corregidas por el método de Card

a) Año 2022		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-oyamel	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Superficie (Ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.46	0.12	0	0.02	0.09	0	1681	0.17	1691
	Bosque de pino	0.23	0.88	0	0.01	0.17	0	881	0.24	881
	Bosque pino-oyamel	0	0	0.31	0	0	0	1727	0.11	1701
	Vegetación secundaria	0	0.06	0.44	0.93	0	0	164	0.21	179
	Agricultura	0.35	0	0.23	0	0.98	0	93	0.24	94
	Cuerpos agua	0	0	0	0	0	1.0	9	0.02	9
Proporción mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0.01	4555	1.0	4555

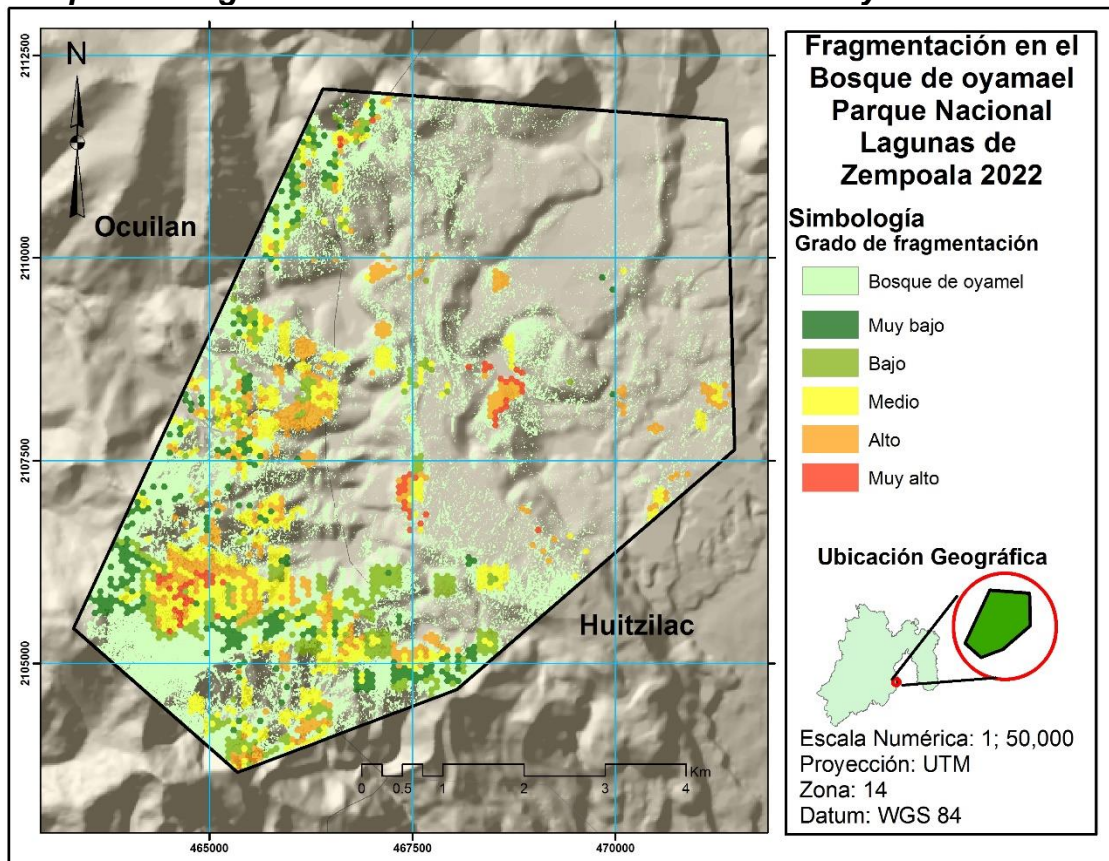
Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

4.5.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNLZ

Se elaboró cartografía del grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque de oyamel, bosque de pino y bosque mixto de pino oyamel del Parque Nacional Lagunas de Zempoala para el año 2022.

En el caso del bosque de oyamel la leyenda corresponde a cinco categorías, que en la suma de todas estas encontramos un total de 1662 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (259), bajo (364), medio (556), alto (420) y muy alto (63). Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, que corresponde a las áreas donde se desarrollan múltiples actividades recreativas y turísticas como los paseos a caballo y carreras de motos, entre otras (Mapa 38).

Mapa 38. Fragmentación en el ecosistema forestal de oyamel del PNLZ

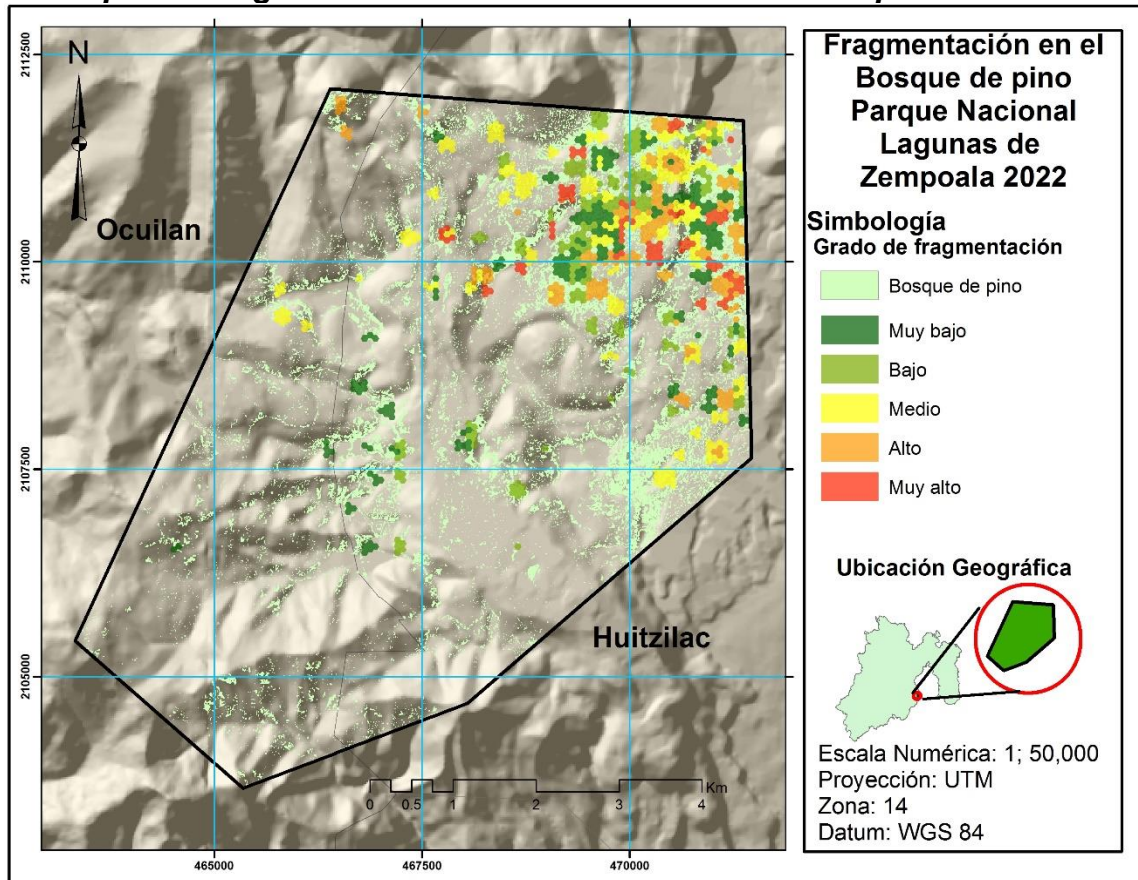


Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

En el caso del bosque de pino se determinaron cinco categorías, con un total de 956 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (215), bajo (201), medio (259), alto (186) y muy alto (95).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan las pendientes más bajas, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas y aumenta el cambio de uso de suelo (Mapa 39).

Mapa 39. Fragmentación en el ecosistema forestal de pino del PNLZ

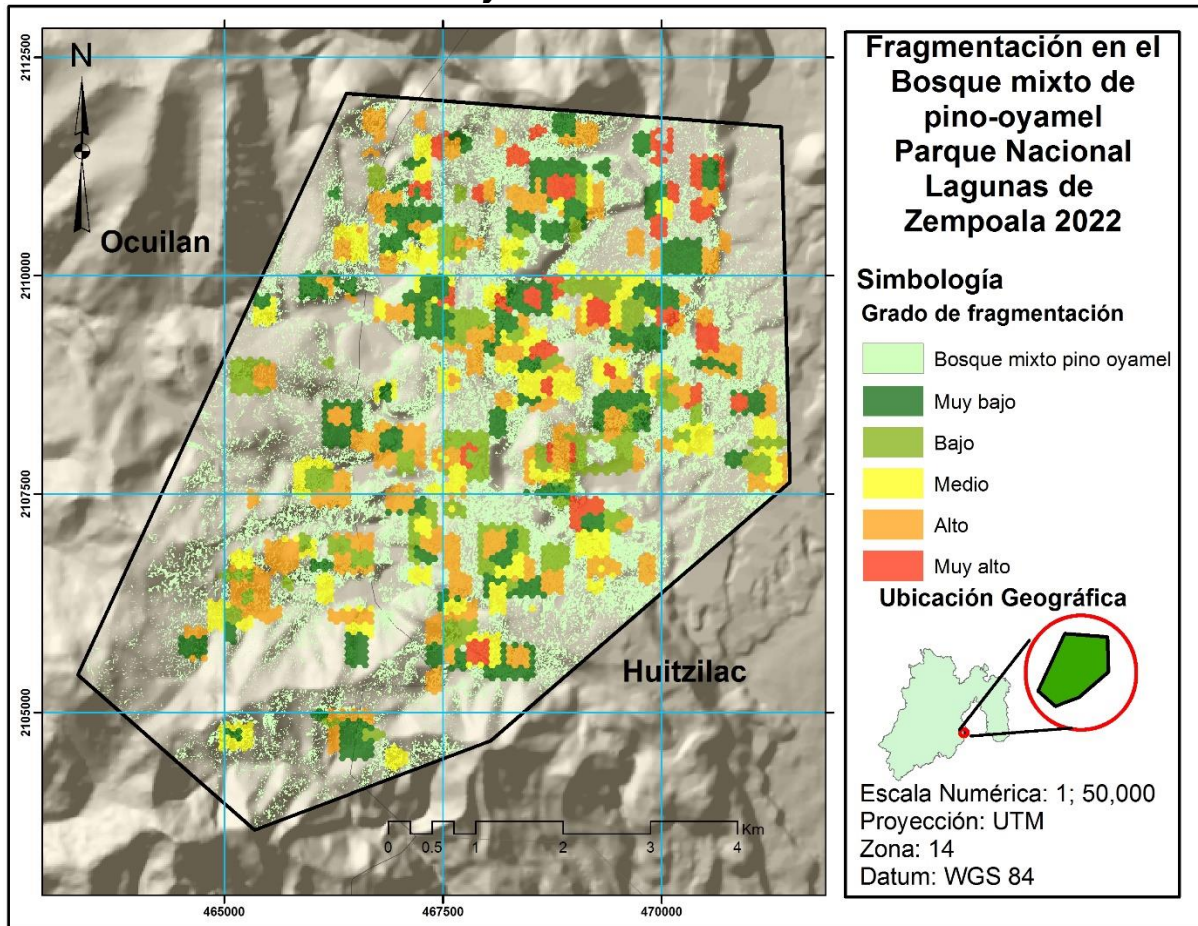


Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

El bosque mixto de pino-oyamel presentó cinco categorías, con un total de 3062 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (781), bajo (535), medio (590), alto (897) y muy alto (259).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se pueden identificar en la zona sur y centro del parque, donde se ubica las principales vías de acceso al parque, además de que es la zona donde se desarrollan la mayor parte de las actividades turísticas que brinda el parque (Mapa 40).

Mapa 40. Fragmentación en el ecosistema forestal bosque mixto de pino-oyamel del PNLZ



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

4.5.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLZ

El Parque Nacional Lagunas de Zempoala presenta tres tipos de ecosistemas forestales, la captura de carbono para el año 2022 sin fragmentación forestal en el bosque oyamel fue de 795.95 ton equivalentes a 1,681 ha, distribuidas en la zona centro, norte y sur del ANP.

El ecosistema forestal bosque de pino tiene una superficie de 881 hectáreas equivalentes a 412.92 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona centro y norte del área de estudio. El bosque mixto de pino oyamel tiene una superficie de 1727 ha equivalentes a 813.50 toneladas de captura de carbono para este año (Tabla 44).

Tabla 44. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLZ

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura de carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de oyamel	1,681	1,102	0.4735	795.95	521.79
2	Bosque de pino	881	623	0.4687	412.92	292
3	Bosque mixto de pino-oyamel	1,727	956	0.4711	813.58	450.37

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

La fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, la superficie para el bosque de oyamel disminuyó considerablemente a 579 ha equivalentes a 274.15 toneladas de captura de carbono, para el bosque de pino la superficie se redujo 258 ha equivalentes a 120.92 toneladas de captura de carbono para este año. El bosque mixto de pino oyamel redujo su superficie 771ha equivalentes a 363.32 toneladas de captura de carbono para este año (Tabla 44).

4.5.7 Diagnóstico integral del PNLZ.

El Parque Nacional Lagunas de Zempoala posee un alto valor ecosistémico, el cual se define como la integración de los valores de todas las especies que lo conforman y los servicios ambientales que proporciona a la sociedad. Estos servicios ecosistémicos incluyen la captura de carbono, la retención del suelo y la recarga de mantos acuíferos, entre otros, desempeñando un papel fundamental en la estabilidad ambiental de la región (Ortega *et al.* 2017).

Sin embargo, los conflictos político-administrativos entre los municipios que integran el parque han exacerbado diversas problemáticas ambientales y de gestión administrativa. A continuación, se presentan los principales problemas derivados de esta situación (Tabla 45).

Tabla 45. Análisis de los problemas identificados en el PNLZ.

Problemas identificados	Fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Degradación y pérdida de los ecosistema	Observación directa en campo Análisis de cartografía (Rendón, 2019).
2.- Erosión de suelo	Observación directa en campo (Medina, 2021).
3.- Residuos solidos	Observación directa en campo
4.- Contaminación del agua	(CONANP, 2016).
5.- Extinción de especies	(SEMARNAT, 2006).
Problemas sociales	
1.- Marginación	(CONANP, 2019)
2.-Delincuencia	(Díaz <i>et al.</i> 2006).
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	(CONANP, 2008)

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

Dentro del PNLZ se asignó una superficie para la realización de actividades de recreación y esparcimiento, la vía de acceso principal está representada por la carretera federal Cuernavaca-Toluca y un camino de tercería de aproximadamente 1.5 km. Las entradas y salidas no cuentan con una regulación establecida por alguna institución ambiental lo que genera un incremento en los problemas mencionados anteriormente (Rendón, 2019).

Los ecosistemas forestales en general son afectados por las condiciones sociales que intervienen directamente sobre en espacio natural, en el caso del parque el aumento de la influencia de visitantitas a incrementando la zonas de comercio para la demanda de productos y alimentos lo que ha generado cambios de uso de suelo, la fragmentación forestal en la zona centro es visible a simple vista, es de los problemas más importantes por resolver, la deforestación está asociada 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 4,263 ha (Medina, 2021).

Lo anterior repercute en la infiltración y recarga de mantos acuíferos, captura de carbono, retención de suelos, hábitat de especies de flora y fauna, regulación del clima, belleza escénica y recreación (CONANP, 2016).

Problemas sociales

En materia de supervisión y vigilancia, se cuenta con el apoyo de la PROFEPA para la realización de operativos y recorridos en materia de inspección y vigilancia. Con esta procuraduría se tiene intercambio de información sobre actos u omisiones que constituyen alguna infracción a las disposiciones legales aplicables dentro del Área Natural Protegida y se fortalecen acciones de capacitación en materia de prevención del delito (CONANP. 2019).

La mitigación de actividades ilícitas dentro del Parque Nacional requiere una estrategia integral que combine vigilancia permanente, mecanismos eficaces de denuncia ante la PROFEPA, y la aplicación oportuna de sanciones. Sin embargo, la extensión territorial del Área Natural Protegida y su compleja topografía, sumadas a la limitada disponibilidad de personal especializado, hacen imprescindible la participación activa de las comunidades locales en las labores de monitoreo y conservación. Las presiones derivadas de las actividades humanas, en especial el turismo desregulado, han provocado impactos localizados, como la degradación de la cobertura vegetal, el cambio de uso de suelo y la acumulación de residuos sólidos. Ante este escenario, la recuperación ecológica de las zonas alteradas debe centrarse en acciones de restauración que devuelvan las condiciones ecológicas necesarias para conservar la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas del parque (Díaz *et al.*, 2006).

Problemas económicos

El comercio informal dentro del parque es evidente por lo que es indispensable contar con la señalización apropiada para el ordenamiento de las actividades en el Área Natural Protegida, lo que permitirá disminuir los impactos sobre el entorno natural. La señalización logrará advertir a los visitantes acerca de las actividades permitidas y las no permitidas en cada subzona, (CONANP, 2008).

4.5.8 Consideración final sobre el PNLZ

Con base en los resultados se concluye que existe deterioro ambiental, 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 (Medina *et al.* 2021).

Por otra parte, los valores medios son aquellos que pueden sufrir cambios menores hacia la pérdida de densidad y se sitúan en las zonas centro y centro oeste; mientras que los valores altos y muy altos son las zonas que tienden a cambiar de cobertura o deforestarse, y se identifican en la zona sur del área de estudio (Ramírez, 2010).

La fragmentación forestal es fundamental en estudios sobre transformaciones de los ecosistemas forestales, ya que favorece la identificación de áreas prioritarias de atención, a una escala detallada, a un análisis más preciso del territorio y más cercano a la realidad. A partir de ello, será posible realizar estudios posteriores que permitan implementar actividades de manejo a fin de minimizar los impactos negativos, de acuerdo y para el cuidado de la cobertura forestal (CONABIO, 2006).

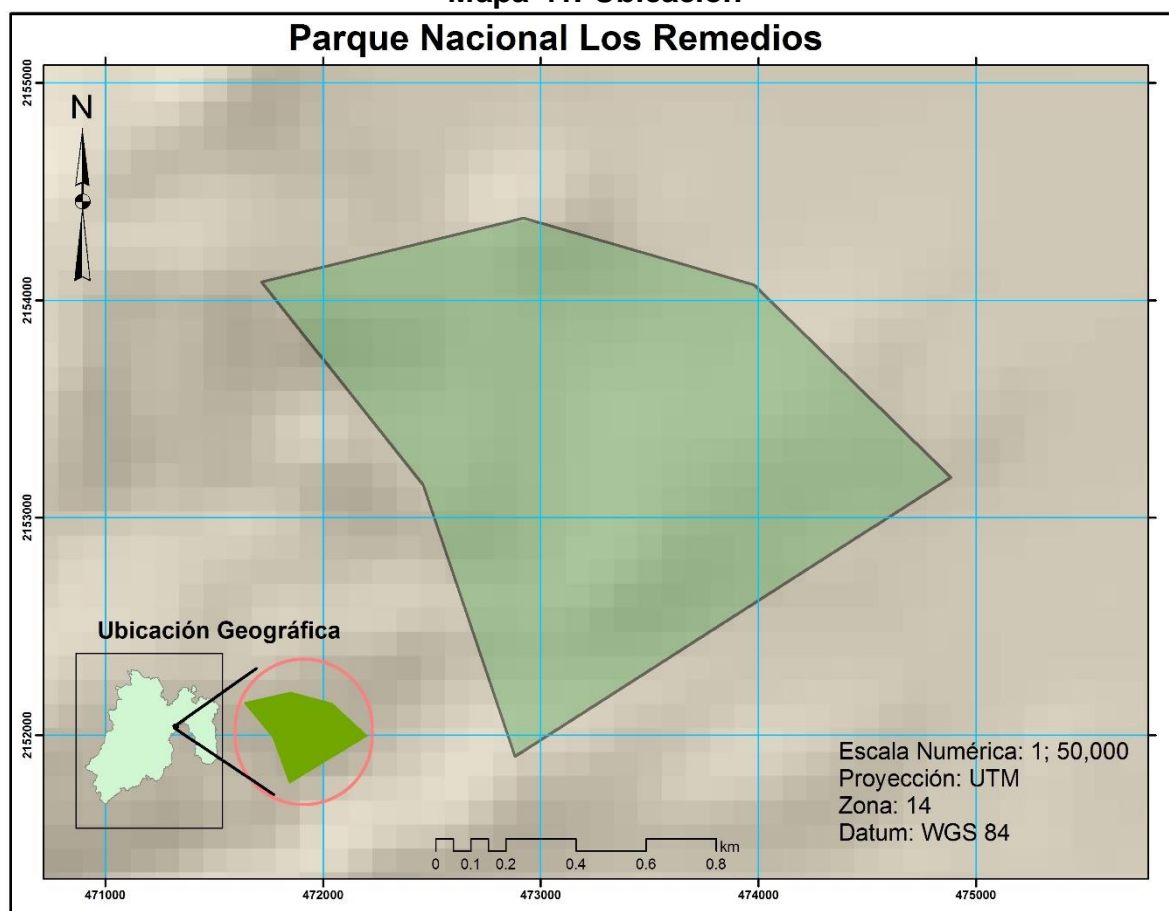
4.6 Parque Nacional Los Remedios (PNLR)

4.6.1 Caracterización geográfica del PNLR

Localización geográfica

El Parque Nacional Los Remedios (PNLR) se encuentra al oeste del municipio de Naucalpan de Juárez, en el Estado de México al noroeste de la Ciudad de México (Mapa 41). Este parque fue creado por decreto el 15 de abril de 1938 por el gobierno federal con un área de 400.16 hectáreas. Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas $99^{\circ} 14' 18''$ y $99^{\circ} 16' 13''$ de longitud Oeste y entre los paralelos de $19^{\circ} 28' 57''$ y $19^{\circ} 27' 45''$ de latitud Norte (Vargas, 1984).

Mapa 41. Ubicación



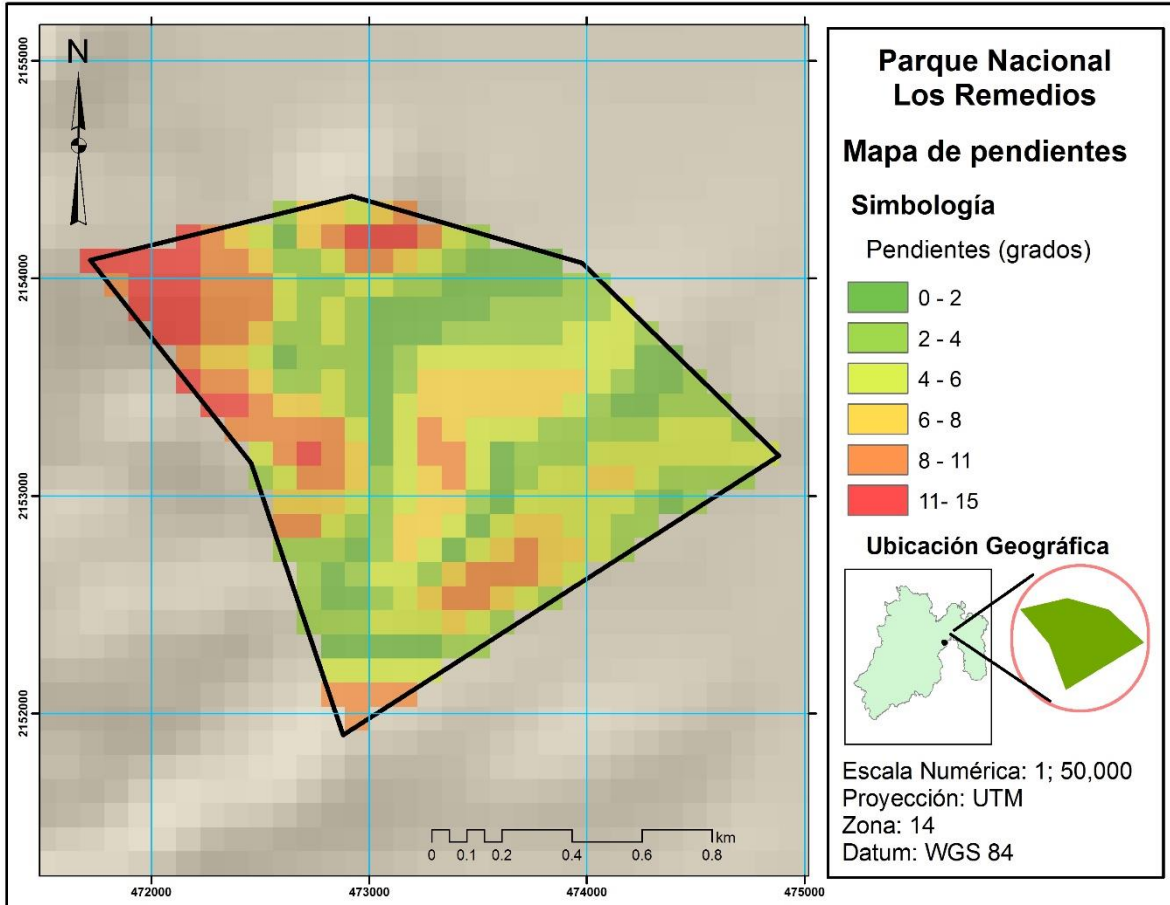
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

El PNLR se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica del Sistema Volcánico Transversal. El terreno se encuentra conformado principalmente por cerros y lomas dentro de los que destacan el cerro de los Remedios y Moctezuma formando parte de la sierra de Monte Alto, tiene un rango altitudinal que va de los 2,350 a los 2,500 m.s.n.m. (Vargas, 1997).

En el mapa 42 se estima que en la zona sureste del parque se encuentra el terreno más accidentado del parque con pendientes mayor a 10° y máximas de 15° por otra parte en la zona centro y oeste existen planicies menores a 4°.

Mapa 42. Pendientes



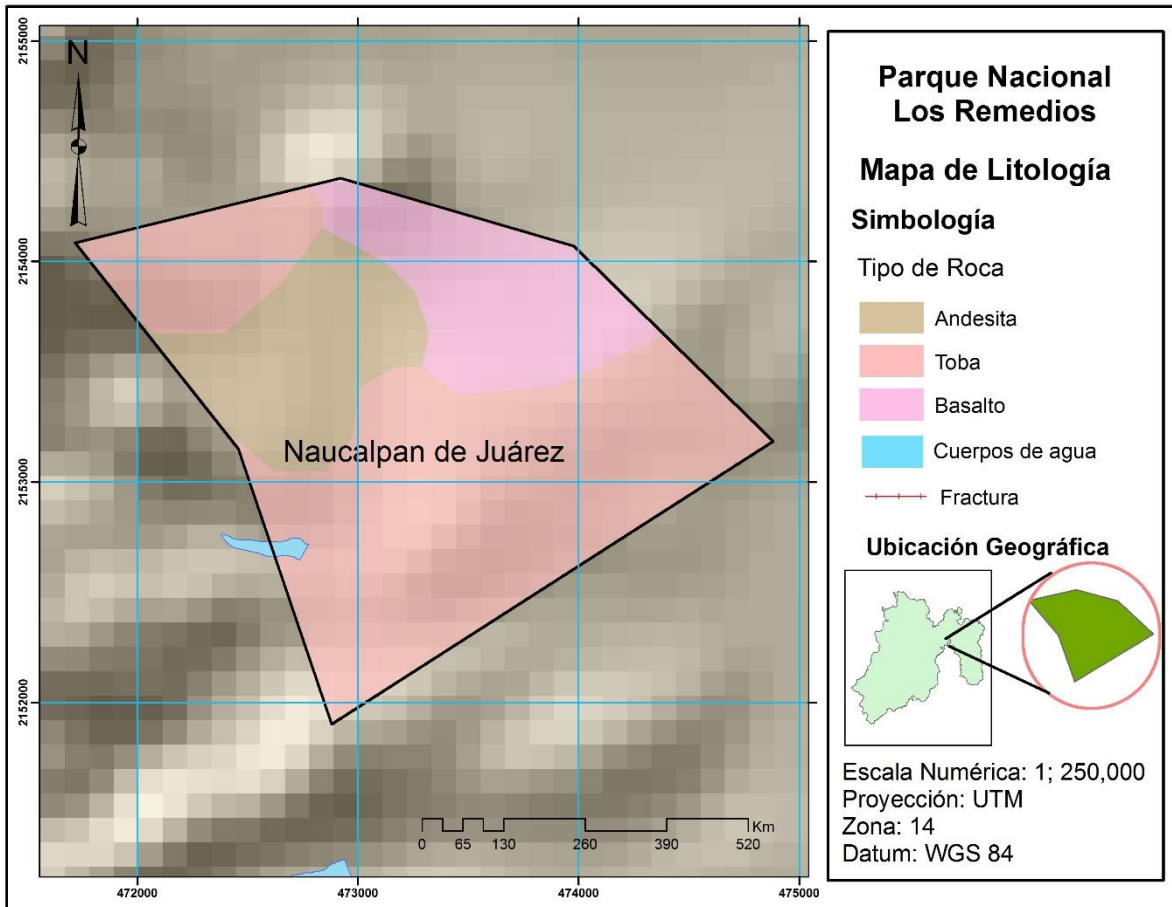
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Litología

El PNLR está conformado de materiales ígneos, andesitas y basalto como se muestra en el mapa 43, asimismo aflora tepetate en algunas zonas. Del mioceno se pueden observar rocas volcánicas, lavas, brechas y tobas principalmente basálticas y andesíticas con una permeabilidad media (SARH, 1993).

Las tobas tienen composiciones geoquímicas andesíticas y riolíticas y presentan características geoquímicas semejantes a las de las lavas, con textura piroclástica que presenta cristales alargados de hornblenda de 1.0 mm de longitud (INEGI, 2014).

Mapa 43. Litología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

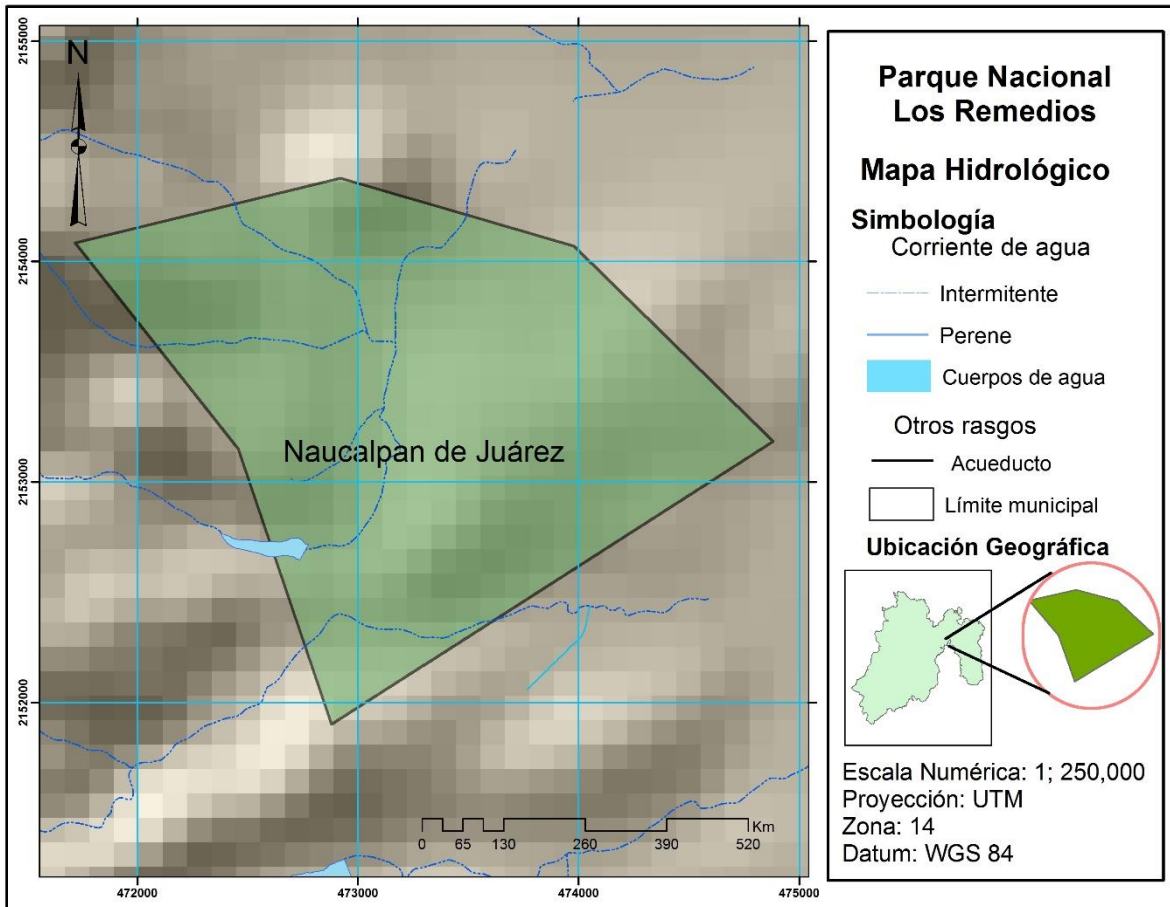
Clima

El Parque Nacional Los Remedios presenta un clima templado-subhúmedo (Cw) con régimen de lluvias en verano. La Temperatura media anual es de 12 a 18° C, con el mes más frío con 3 a 18° C; la temperatura media más caliente es de 6.5 a 22° C, con oscilación de 5 a 7° C, con verano fresco y heladas frecuentes de octubre a abril, la precipitación anual es de 750 milímetros en verano (Vargas, 1997).

Hidrología

El municipio de Naucalpan se encuentra inmerso dentro de la región hidrológica “Pánuco RH26” esta región cubre cerca del 30% del total del estado de México; abarca la parte norte, noreste y noroeste (Atlas de Riesgos del Municipio de Naucalpan de Juárez, 2014). En el municipio el sistema hidrológico superficial está formado por ocho ríos: Río Hondo, Arroyo el Sordo, Río Verde, Río Chico de los Remedios, San Mateo, San Joaquín, Los Cuartos y Río Totolinga, además de diversos escurrimientos intermitentes (Mapa 44).

Mapa 44. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Edafología

El Parque Nacional presenta un suelo de tipo Feozem, suelos más o menos profundos, aunque en la mayoría se encuentra la fase lítica como limitante a menos de 100 cm de profundidad; en algunas áreas existe alto contenido de arcillas en el horizonte subyacente (Feozem lúvico); algunos presentan carbonates dentro de los 50 cm superficiales (Feozem calcárico), y en otros no hay otra característica distintiva (Feozem háplico).

Diversidad de fauna en el Parque Nacional Los Remedios

La fauna silvestre está compuesta por especies resistentes al impacto humano, como los tlacuaches (*Didelphis virginiana*); ratas de campo como *Neotoma mexicana* y armadillos (*Dasypus novemcintus*) (CONABIO, 2015).

4.6.2 Ecosistemas presentes en el PNLR

A partir del análisis físico ambiental realizado previamente se identificaron diversos ecosistemas ambientales producto de las interacciones socio-ambientales, para el caso del Parque Nacional Los Remedios se identificaron cuatro usos de suelo diferentes, los cuales se describen a continuación.

1.- Bosque mixto de eucalipto-pino:

Una de las grandes críticas a las plantaciones comerciales es el uso de especies llamadas exóticas o introducidas en lugar de las naturales o nativas. En el caso del área de estudio eucalipto (*Eucalyptus sp*), es introducido por sus características de adaptación y su entorno al ambiente.

Para el caso del Pino (*Pinus sp*) dentro del PNLR 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).

Fotografía 28. Bosque mixto de eucalipto-pino en el PNLR



Fuente: Google Street View, (2022).

2.-Bosque mixto de fresno-pirul:

La vegetación denominada fresno es introducida de manera aleatoria en el centro y sur del parque específicamente en corredores dentro y en los límites de los pabellones de las principales avenidas del área. El pirul se desarrolla en zonas perturbadas con vegetación secundaria, en pedregales y lomeríos, terrenos agrícolas, pendientes (20 a 40%) (CEPANAF, 2014).

Se desarrolla de igual forma en vecindad inmediata a los bosques de fresno y sus principales características son del arboles de tipo perennifolio, de 4 a 8 m (hasta 15 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de 25 a 35 cm. Copa redondeada y abierta, proporcionando sombra moderada. Hojas compuestas, alternas, de 15 a 30 cm de largo. (CEAMA, 2007).

Foto 29. Bosque mixto de fresno-pirul en el PNLR



Fuente: Google Street View, (2022).

3.-Vegetación secundaria:

El ecosistema vegetación secundaria denominado así para esta investigación está conformado por arboles aislados de los bosques mencionados anteriormente y de pastizales de matorral con especies de arbustos se encuentran distribuidas en general en la zona centro donde la fragmentación de los bosques es de mayor amplitud (Ordoñez Y Flores, 1995).

Foto 30. Vegetación secundaria en el Parque Nacional Los Remedios

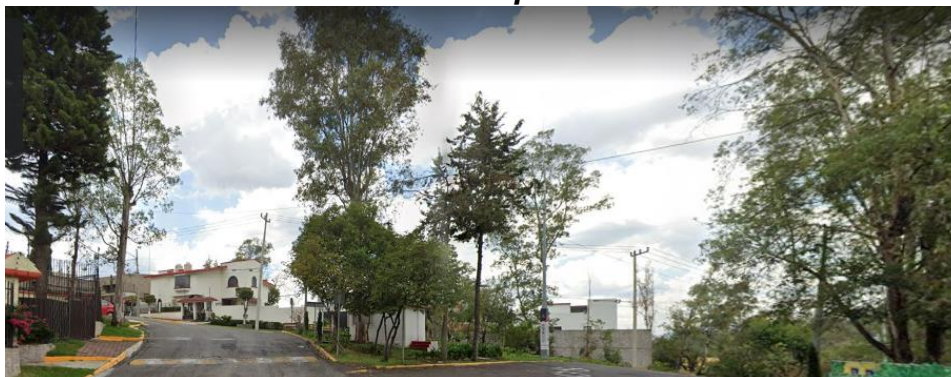


Fuente: Google Street View, (2022).

4.- Zona urbana:

Dentro de esta denominación se encuentran los asentamientos irregulares del municipio de Naucalpan, zonas habitacionales, centros comerciales y el Parque Estatal Metropolitano de Naucalpan que se encuentra en sobre posición al PNLR (SEMARNAT 2017).

Foto 31. Zona urbana en el Parque Nacional Los Remedios



Fuente: Google Street View, (2022).

4.6.3 Análisis de los ecosistemas del PNLR

El Parque Nacional Los Remedios presenta para el año de 2022 una superficie de 400 hectáreas distribuidas en cuatro usos de suelo (Tabla 46). El bosque mixto de eucalipto-pino cuenta con una superficie de 56 hectáreas equivalente a (14%) se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

Tabla 46. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNLR

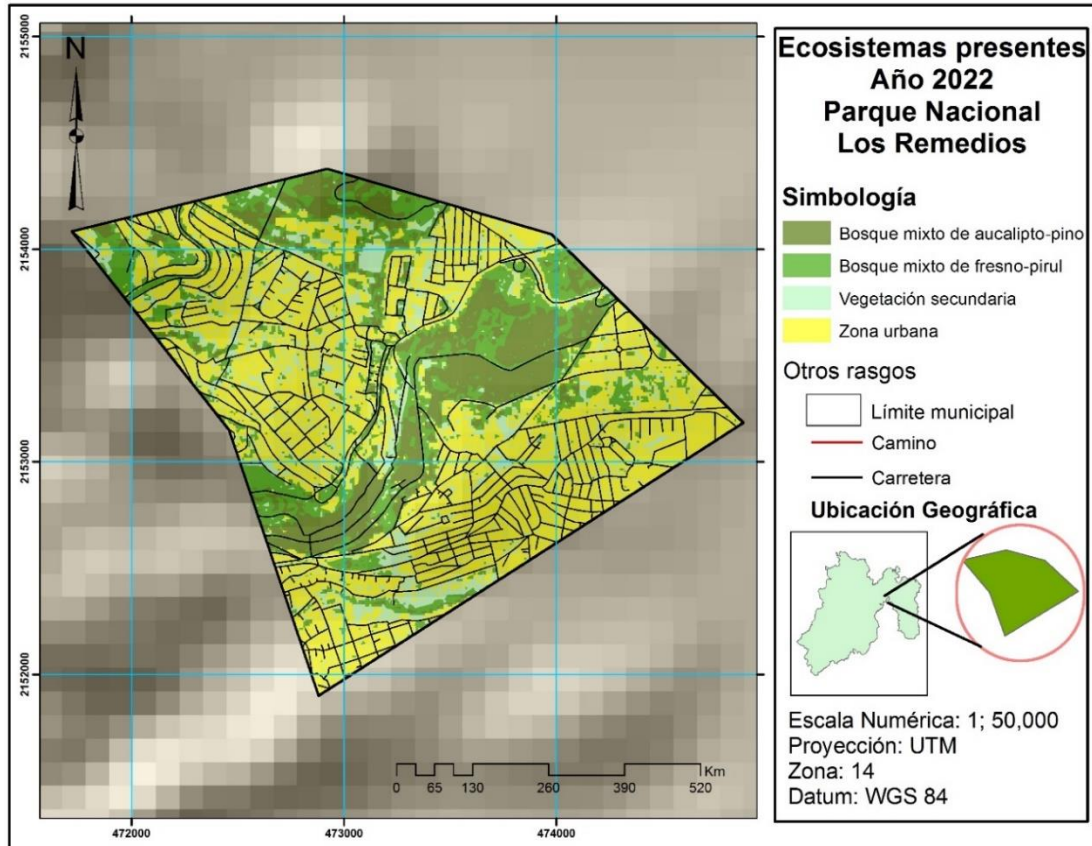
No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque mixto de eucalipto-pino	56	14
2	Bosque mixto de fresno-pirul	76	19
3	Vegetación secundaria	56	14
4	Zona urbana	212	53
	Total	400	100

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque mixto de fresno-pirul cuenta con una superficie de 76 hectáreas equivalente al (19%) está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 msnm, el tercer ecosistema es el área sin vegetación secundaria con 56 hectáreas (14%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes de los dos volcanes (Mapa 45).

El cuarto uso de suelo es la zona urbana, es el de mayor proporción cuentan con una superficie de 212 hectáreas (53%) está distribuida en toda la superficie del parque.

Mapa 45. Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Los Remedios



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.6.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNLR del año 2022

En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 400 puntos de verificación, 390 corresponden al ecosistema asignado; solo 10 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado (Tabla 47).

Tabla 47. Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNLR del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque mixto eucalipto-pino	Bosque mixto fresno-pirul	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque mixto eucalipto-pino	98	2	0	1	100
	Bosque mixto fresno-pirul	1	97	1	0	100
	Vegetación secundaria	1	1	97	1	100
	Zona urbana	0	0	2	98	100
Total verdad		100	100	100	100	400

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 48), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 10 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema.

Tabla 48. Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNLR del año 2022

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque mixto de eucalipto-pino	Bosque mixto de fresno-pirul	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque mixto de eucalipto-pino	0.18	0.02	0.04	0	0.25
	Bosque mixto de fresno-pirul	0.09	0.07	0.07	0	0.25
	Vegetación secundaria	0	0.04	0.15	0.05	0.25
	Zona urbana	0	0	0.15	0.09	0.25
Total verdad imagen		0.27	0.14	0.42	0.14	1.0
Proporción mapa		0.14	0.19	0.14	0.53	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

En la tabla 49 muestra el total de porcentaje de la superficie corregida, para el bosque de mixto de eucalipto-pino (18.1% de la superficie total); bosque de mixto de fresno-pirul (13.9%); vegetación secundaria (29.4%) y la zona urbana (39.7%).

Tabla 49. Matriz de error corregida de los ecosistemas PNLR del año 2022

b) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque mixto de eucalipto-pino	Bosque mixto de fresno-pirul	Vegetación secundaria	Zona urbana	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque mixto de eucalipto-pino	0.09	0.01	0.02	0	0.13
	Bosque mixto de fresno-pirul	0.08	0.10	0.07	0	0.26
	Vegetación secundaria	0	0.01	0.05	0.06	0.13
	Zona urbana	0	0	0.15	0.32	0.47
Total verdad imagen		0.18	0.13	0.29	0.39	1.0
Proporción mapa		0.14	0.19	0.14	0.53	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza de los ecosistemas PNLR del año 2022

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Los Remedios es del (97.7% verdad imagen) y (0.8%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 50. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNLR del año 2022

Año 2022	Bosque mixto de eucalipto-	Bosque mixto de fresno-pirul	Vegetación secundaria	Zona urbana	Confiabilidad global (%)	Intervalo confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	98	99	97	99	97.75	0.80
Error de comisión	2	1	3	1		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	1.59	2.02	0.87	1.12		
Confiabilidad del productor	97	98	96	98		
Error de omisión	3	2	4	2		
Intervalo confianza confiabilidad productor	0.33	0.01	0.14	0.37		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas de los ecosistemas PNLR del año 2022

La tabla 51 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 51. Superficies corregidas por el método de Card de los ecosistemas PNLR del año 2022

Año 2022		Bosque mixto de eucalipto-pino	Bosque mixto fresno-pirul	Vegetación secundaria	Zona urbana	Superficie (Ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo de (Clases)	Bosque mixto eucalipto-pino	1.08	0.16	0.252	0	56	0.13	58
	Bosque mixto de fresno-pirul	0.57	0.47	0.45	0	76	0.26	68
	Vegetación secundaria	0	0.25	0.91	0.33	56	0.13	87
	Zona urbana	0	0	0.95	0.54	212	0.47	187
Proporciónre mapa		0.14	0.19	0.14	0.53	400	1.0	400

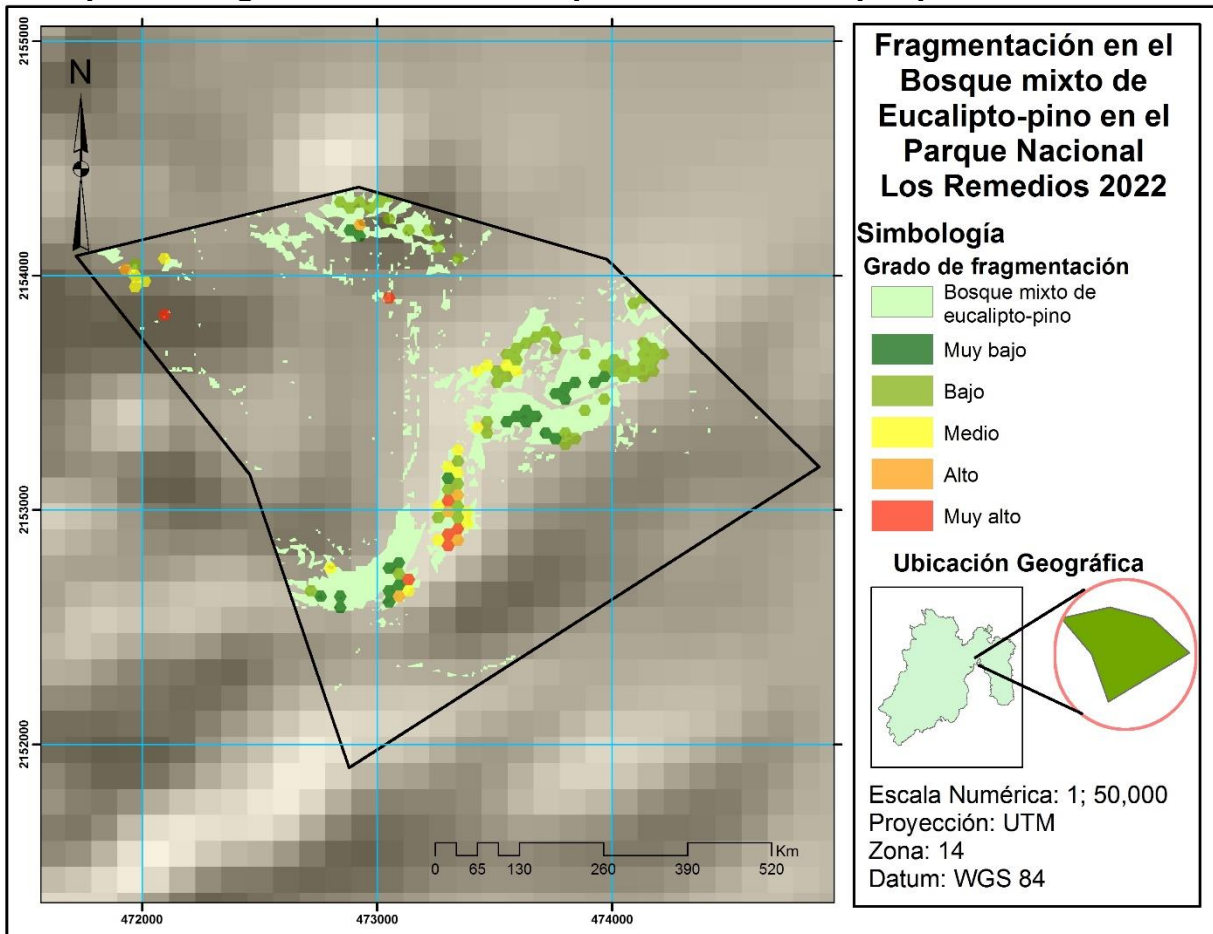
Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

4.6.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNLR

Se elaboró cartografía del grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque mixto de eucalipto-pino y el bosque mixto de fresno-pirul del Parque Nacional Los Remedios para el año 2022.

En el caso del bosque mixto de eucalipto-pino la leyenda corresponde a cinco categorías, que en la suma de todas estas encontramos un total de 111 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (24), bajo (56), medio (18), alto (6) y muy alto (7). Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur del parque, que corresponde a las áreas donde se desarrollan múltiples actividades recreativas y nuevos conjuntos habitacionales (Mapa 46).

Mapa 46. Fragmentación en el bosque mixto de eucalipto-pino del PNLR

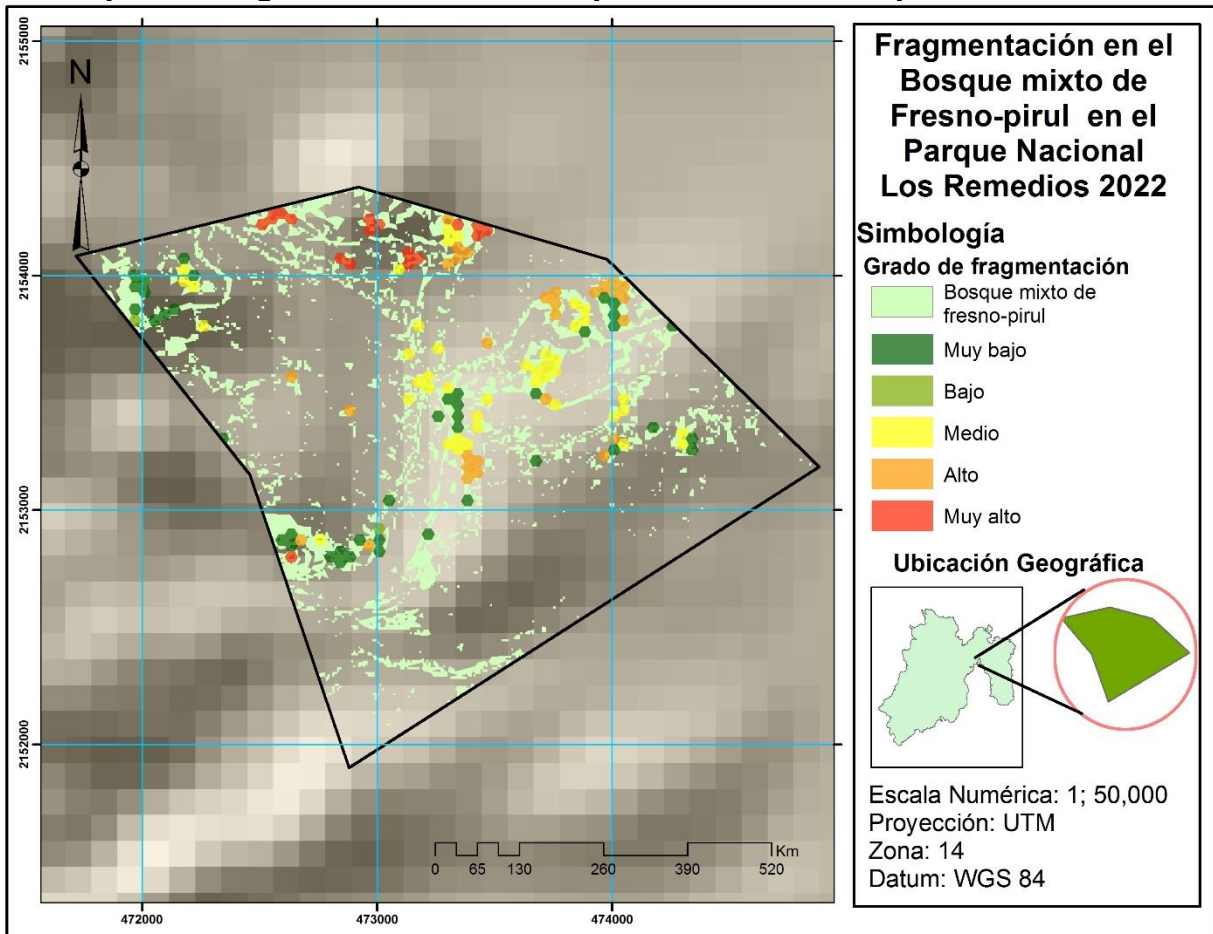


Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

En el caso del bosque mixto de fresno-pirul se determinaron cinco categorías, con un total de 134 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (42), bajo (2), medio (43), alto (29) y muy alto (18).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona norte del parque, lo que corresponde a las áreas donde se presentan las pendientes más bajas, lo que favorece el desarrollo de actividades agrícolas y aumenta el cambio de uso de suelo (Mapa 47).

Mapa 47. Fragmentación en el bosque mixto de fresno-pirul del PNLR



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

4.6.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLR

La captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuesto por (Chimbo *et al.* 2016) y Hernández, (2014). El Parque Nacional Los Remedios presenta dos tipos de ecosistemas forestales, la captura de carbono para el año 2022 sin fragmentación forestal en el bosque mixto de eucalipto-pino fue de 21.28 ton equivalentes a 56 ha, distribuidas en la zona centro del ANP.

El ecosistema forestal bosque mixto de fresno-pirul tiene una superficie de 76 hectáreas equivalentes a 34.96 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona centro y norte del área de estudio (Tabla 52).

Tabla 52. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNLR

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura de carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque mixto de eucalipto-pino	56	34	0.38	21.28	12.92
2	Bosque mixto de fresno-pirul	76	49.5	0.46	34.96	22.77

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

La fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, la superficie para el bosque mixto de eucalipto-pino disminuyó considerablemente a 34 ha equivalentes a 12.92 toneladas de captura de carbono, para el bosque mixto de fresno-pirul la superficie fue de 49.5 ha equivalentes a 22.7 toneladas de captura de carbono para este año (Tabla 52).

4.6.7 Diagnóstico integral del PNLR.

Parque Nacional Los Remedios no cuenta con su Plan de Mejo o un instrumento en materia política ambiental que proteja los ecosistemas forestales del parque, el uso que predomina en el parque es el urbano por lo que existe una gran cantidad de problemas ambientales que repercuten directamente con la conservación de ANP. La demanda de bienes y servicios por parte de la zona conurbada de Naucalpan ha provocado disminución en la provisión de los servicios ecosistémicos que brindan el área natural, la tabla 53 se mencionan los principales problemas que enfrenta el PNLR.

Tabla 53. Análisis de los problemas identificados en el PNLR.

Problemas identificados	Fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Cambio de uso de suelo	(Plan de Desarrollo Municipal de Naucalpan, 2013) Análisis de cartografía
2.- Residuos solidos	(CONANP, 2008).
Problemas sociales	
2.-Delincuencia y vandalismo	(Plan de Desarrollo Municipal de Naucalpan, 2013)
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	(POAT, 2010)
2.- Comercio informal	(Plan de Desarrollo Municipal de Naucalpan, 2013).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

El PNLR cuenta con una superficie aproximadamente de 400 ha, en sus límites se encuentra el Santuario de la Virgen de Los Remedios, un acueducto colonial y una zona arqueológica con un templo Chichimeca que son los principales atractivos turísticos, al no estar regulado por alguna institución ambiental los problemas ambientales van en aumento de los que destacan los siguientes (Plan de Desarrollo Urbano Naucalpan, 2013).

La extensión original del Parque Nacional ha disminuido considerablemente debido al crecimiento demográfico del municipio de Naucalpan. Los fragmentos de vegetación se encuentran delimitados por el Parque Estatal Metropolitano de Naucalpan, el cual se superpone al Parque Nacional. Esta situación ha generado un deterioro ambiental significativo, agravado principalmente por la presencia de eucaliptos, una especie exótica que afecta la dinámica ecológica del área (CONANP, 2008).

Las campañas de reforestación organizadas por activistas y por parte de programas de conservación del parque no han sido aplicadas correctamente ya que las especies introducidas no son endémicas del lugar, dando algunos resultados negativos como lo son la migración de especie e incluso erosión del suelo.

El Parque Nacional ha sufrido una reducción drástica en su superficie original debido a la expansión urbana del municipio de Naucalpan. Ante esta situación, se recomienda evaluar su re-categorización, ya que actualmente no cuenta con un programa de conservación y manejo, lo que limita su protección y sostenibilidad a largo plazo (Melo, 2002).

Problemas sociales

La vigilancia dentro del ANP es escasa ya que las autoridades políticas administrativas no se ponen de acuerdo con las responsabilidades correspondientes al parque metropolitano y al parque nacional, se cuenta con el apoyo de la CONANP para la realización de operativos y recorridos en materia de inspección y vigilancia, sin embargo los esfuerzos disminuyen los fines de semana y durante la noche (POAT, 2010).

Las actividades humanas, relacionadas con el turismo, han generado impactos ambientales localizados dentro del Parque Nacional que requiere atención urgente. Entre las principales afectaciones se encuentran la pérdida de cobertura forestal, el cambio de uso de suelo y la acumulación de residuos sólidos. Estas alteraciones comprometen la integridad ecológica del área protegida y, por tanto, demandan estrategias específicas para su mitigación. Para garantizar la conservación de los ecosistemas y de la biodiversidad que albergan, es fundamental implementar acciones de restauración ecológica orientadas a restablecer las condiciones naturales de los sitios degradados (Plan de Desarrollo Municipal de Naucalpan, 2013).

Problemas económicos

Los intereses económicos por los predios de gran plusvalía dentro del parque ha generado cambios de uso de suelo, específicamente para zonas habitacionales, de acuerdo con las dependencias encargadas de la administración y cuidado de bosque o la ausencia de planes de manejo de desarrollo del ANP, expedientes de denuncias (Profepa) mapas, informes y acuerdos realizados entre los tres niveles del gobierno para transferirse las responsabilidades del lugar y con los que se gestionó el abandono de este bosque (Censo de Población y Vivienda INEGI, 2010).

4.6.8 Consideración final sobre el PNLR

Los resultados del estudio confirman la existencia de un deterioro ambiental significativo en el parque, evidenciado por un proceso de deforestación estrechamente ligado al desarrollo de actividades humanas, como la ganadería, el comercio y la construcción de zonas habitacionales.

El análisis de la fragmentación de los ecosistemas forestales permitió identificar las áreas con menor densidad forestal y determinar los sectores más afectados. De acuerdo con la cartografía generada, los polígonos con los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona centro y norte del parque, áreas de alta plusvalía donde se desarrollan gran parte de las actividades económicas, lo que acelera la pérdida de cobertura forestal.

Las zonas con valores muy bajos y bajos de fragmentación, ubicadas en el suroeste y centro-oeste, presentan una mayor estabilidad y tienden a conservarse.

Las áreas con valores medios podrían experimentar cambios menores en su densidad forestal y se localizan en la zona centro-oeste. Los sectores con valores altos y muy altos son los más vulnerables a la pérdida de cobertura forestal y deforestación, predominando en la zona norte del área de estudio.

Estos hallazgos permiten orientar futuras investigaciones y el diseño de estrategias de manejo y conservación que mitiguen los impactos negativos y protejan la cobertura forestal del parque.

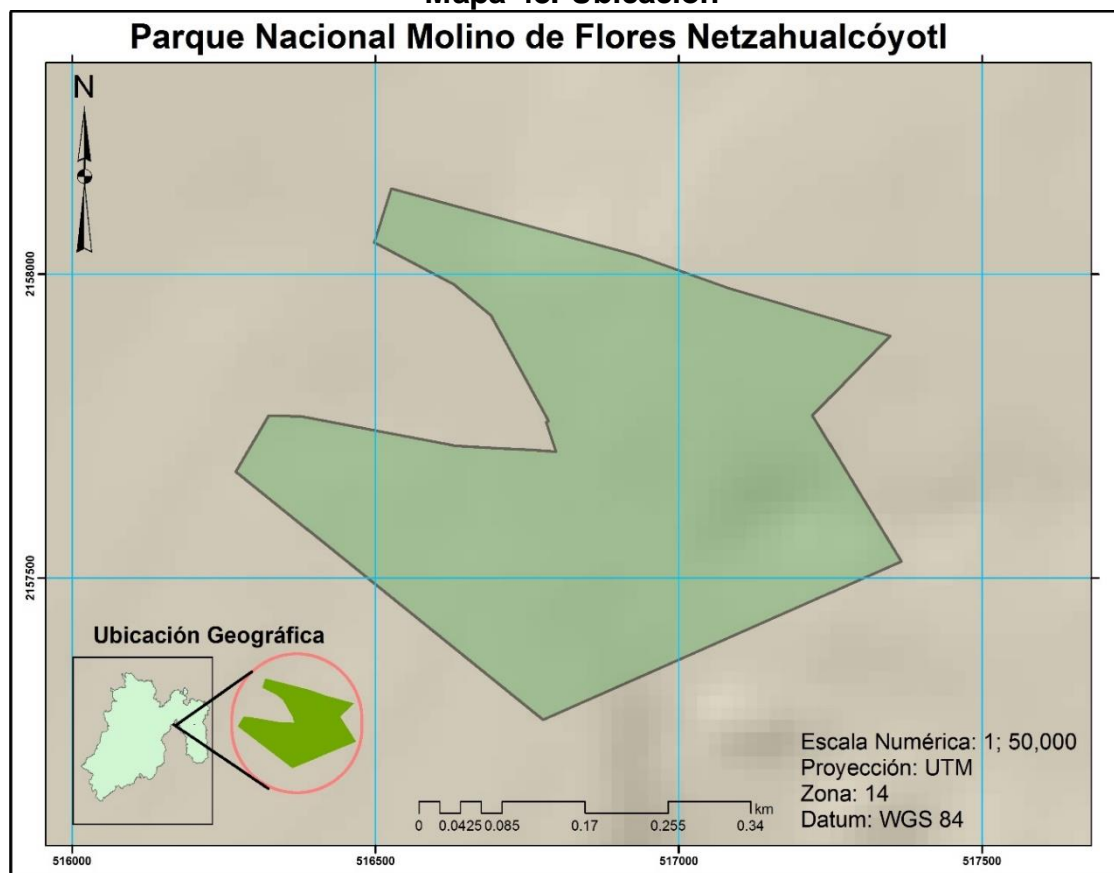
4.7 Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl (PNMFN)

4.7.1 Caracterización geográfica del PNMFN

Localización geográfica

El Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl (PNMFN) se localiza en el Estado de México, municipio de Texcoco. En las coordenadas 19° 30' 30" y 19° 30' 50", entre 98° 50' y 98° 50' 40" (Mapa 48). Cuenta con una superficie de 49.28 hectáreas. El Parque fue decretado el 5 de noviembre de 1937 (Vargas, 1984).

Mapa 48. Ubicación

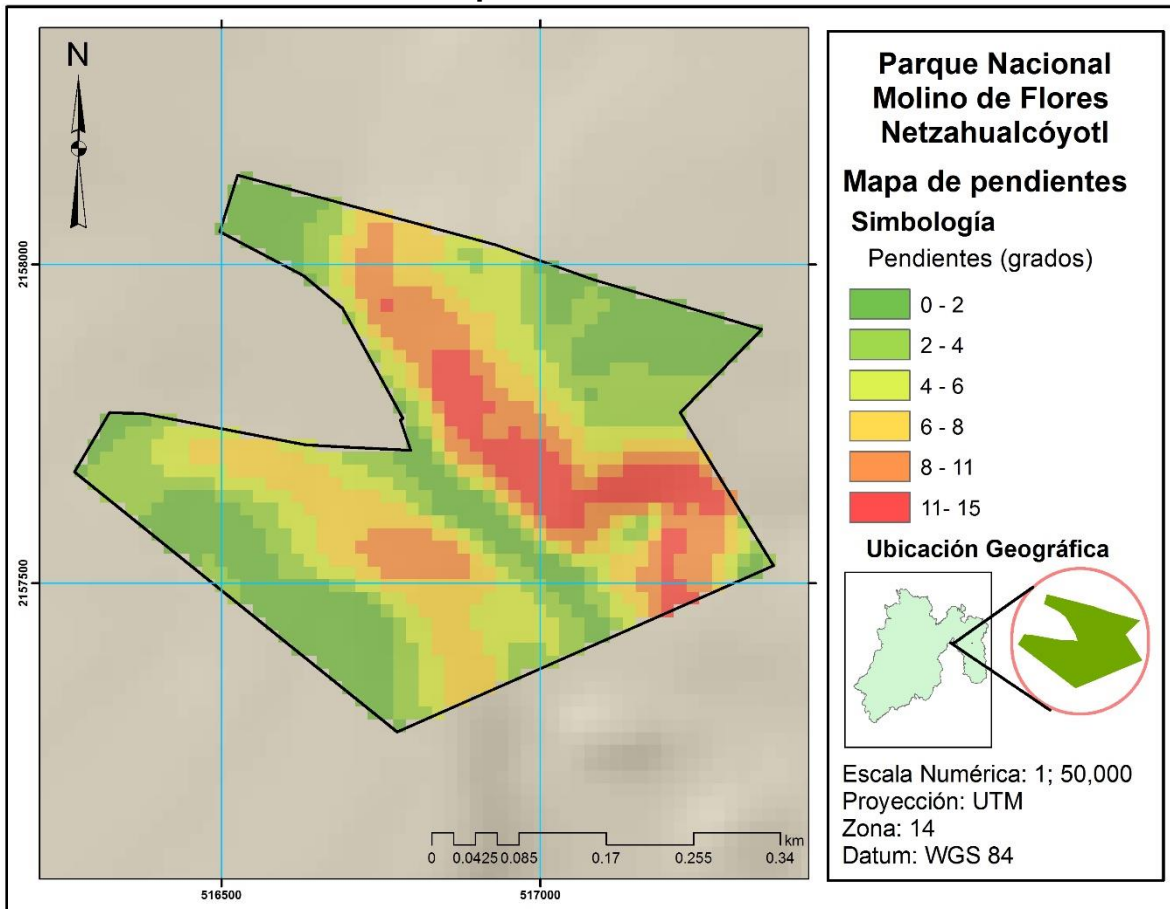


Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

El Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl se encuentra dentro del Sistema Terrestre Tlaixpan, al oriente de la Cuenca del Valle de México. El ANP se encuentra en una zona de lomerío, con pendientes que varían de 4.5% al sureste y de 10% en la ribera del Río Coxcacuaco. Las pendientes mayores de 10° se encuentran en la zona centro y este del parque (Mapa 49). Tiene un rango altitudinal que va de los 2,310 a los 2,340 m.s.n.m (CONANP, 2008).

Mapa 49. Pendientes



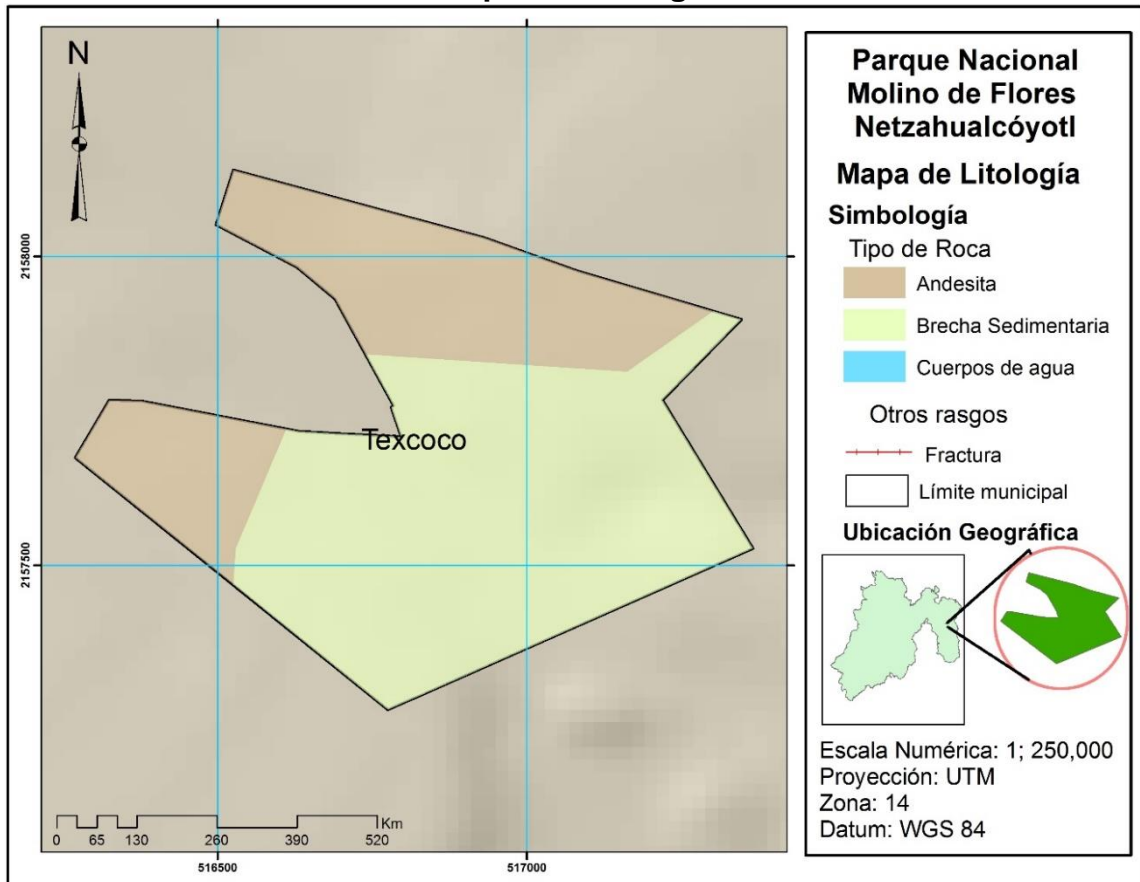
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Litología

La geología del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl se conforma por andesitas 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.

Por otra parte la brecha sedimentaria tiene su origen generalmente en el ambiente terrestre. Normalmente se forman en aluviones o conos aluviales transportada gravitacionalmente o glaciares (morrenas) transportada por el hielo. Generalmente los clastos son de mala clasificación (significa diferentes tamaños de los clastos) (CONANP 2008) (Mapa 50).

Mapa 50. Litología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Clima

Presenta el tipo de clima templado subhúmedo, con temperatura media anual de 12 a 18° C, el mes más frío de -3 a 18° C, el cociente precipitación/temperatura mayor de 43.2, el porcentaje de lluvia invernal mayor del 5 del anual, verano fresco, la temperatura media del mes más caliente de 6.5 a 22°C, oscilación de 5 a 7°C. Los vientos dominantes son los del NW durante la estación seca de invierno y los del NE en la estación cálida húmeda (CONABIO, 2016).

Hidrología

El Río Coxcacuaco atraviesa el parque de oriente a poniente; la fuente de abastecimiento principal de este río es el manantial de San Francisco que se encuentra en Amanalco y San Juan Totolapa, además del Manantial de la Joya en Santa María Tecuanulco (Vázquez, 1995). Antiguamente este río tenía uso para los pobladores de Santa María Tecuanulco y San Jerónimo Tecuanulco, y Xocotlán; el río no cumple las funciones antiguamente prestadas.

Edafología

La unidad de suelo del Parque Nacional Molino de Flores es Feozem háplico en su fase lítica, donde se observa el material parental en las áreas con pendientes pronunciadas, además de tepetates clasificados como Litosol, más Regosol eútrico, los cuales cubren más del 50% de la superficie del parque. La zona de tepetates descansa sobre material ígneo del terciario y conglomerado sobre andesita y tobas. Los tepetates presentan una textura de arena migajosa (Vázquez, 1995).

Diversidad de fauna en el Parque Nacional Molino de flores Netzahualcóyotl

En cuanto a la fauna silvestre, en el parque es posible encontrar especies como ardilla gris (*Sciurus nelsoni*), rata almizclera (*Ondata zibethicus*), palomas (*Columbigallina passerina*), golondrinas (*Hirundo*) *rustica*, ratón de campo (*Microtus mexicanus*), tuza (*Cratogeomys*) y huilotas (*Zenaida macrorura*) (Ibid) (CONABIO, 2016).

4.7.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNMFN

A partir de las relaciones ambientales analizadas previamente se identificaron cuatro diferentes tipos de ecosistemas ambientales en el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl, se presentan ecosistemas forestales tales como el bosque de encino y el bosque de pino, vegetación secundaria y zonas agrícolas.

1.- Bosque de encino

Los bosques de encino (*Quercus o encinares*) son comunidades vegetales muy características de las zonas montañosas de México. De hecho, junto con los pinares constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo. No se limitan, sin embargo, a estas condiciones ecológicas, pues también penetran regiones de clima caliente, no faltan en las francamente húmedas y aún existen en las semiáridas, pero en estas últimas asumen con frecuencia la forma de matorrales (Rzedowski, 1981).

Fotografía 32. Bosque de encino en el PNMFN



Fuente: Google Street View, (2022).

2.- Bosque de pino:

Las características de relieve y las condiciones ecosistémicas del Parque se van transformando y los ecosistemas de pino comienzan a predominar. El pino dentro del PNMFN 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 33)

Fotografía 33. Bosque de pino en el PNMFN



Fuente: Google Street View, (2023).

3.- Vegetación secundaria:

El ecosistema vegetación secundaria está conformado por arboles aislados de los bosques mencionados anteriormente y de pastizales de matorral con especies de arbustos se encuentran distribuidas en general en la zona centro donde la fragmentación de los bosques es de mayor amplitud (CONAN, 2008).

Fotografía 34. Vegetación secundaria PNMFN



Fuente: Google Street View, (2022).

4.- Agricultura:

El ecosistema agricultura se desarrollan a causa de la intervención de actividades antrópicas, 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 municipio de Amecameca (García y Jiménez, 1997).

Fotografía 35. Agricultura en el PNMFN



Fuente: Google Street View, (2022).

4.7.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNMFN

El Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl presenta para el año de 2022 una superficie de 49 hectáreas distribuidas en cuatro usos de suelo (Tabla 54). El bosque de encino cuenta con una superficie de 3 hectáreas equivalente a (6.1%) se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

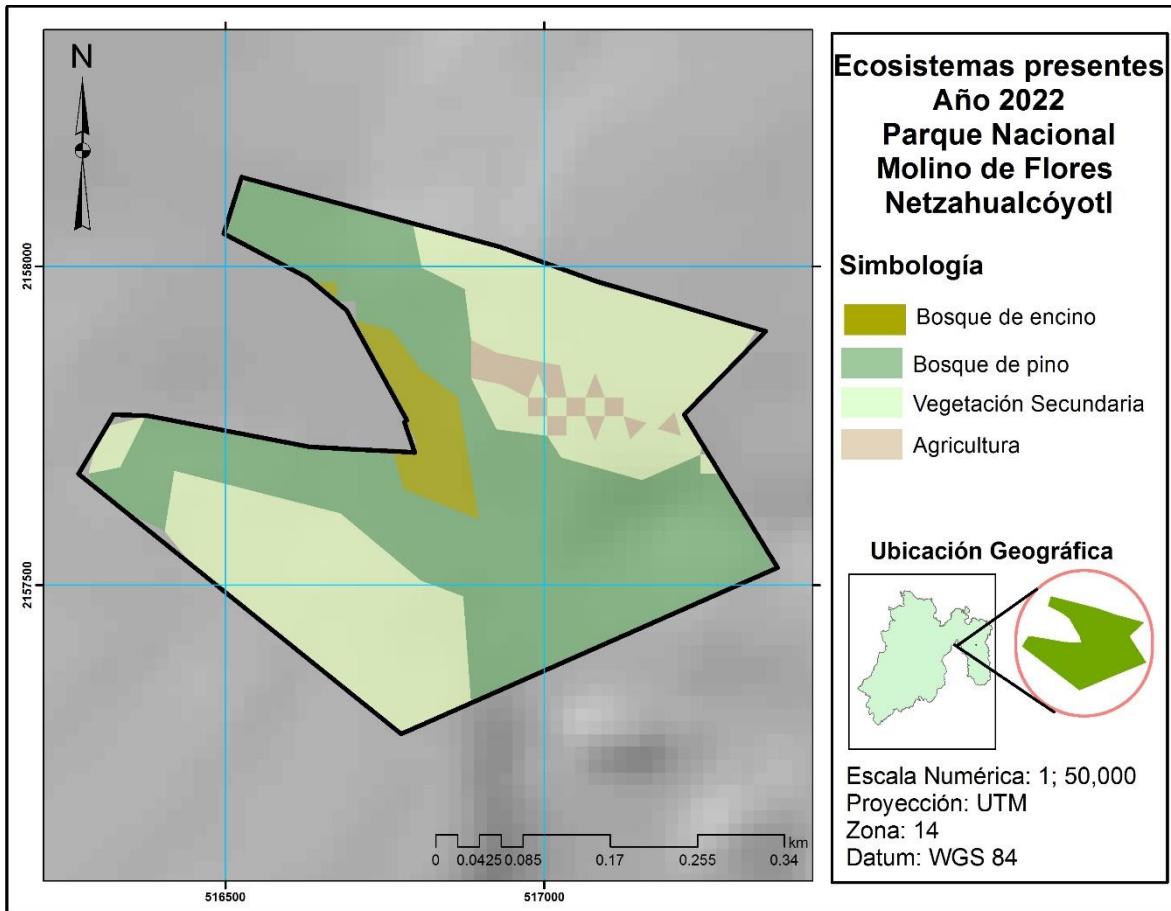
Tabla 54. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNMFN

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
	Bosque de encino	3	6.1
2	Bosque de pino	25	51.0
3	Vegetación secundaria	20	40.8
4	Agricultura	1	2.0
	Total	49	100

Fuente: elaboración propia, con base en INEGI (2023).

El ecosistema forestal bosque de pino cuenta con una superficie de 25 hectáreas equivalente al (51%) del total de la superficie, está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 m.s.n.m., el tercer ecosistema es la vegetación secundaria con 20 hectáreas (40.8%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes de los dos volcanes (Mapa 51). El cuarto uso de suelo es la agricultura, es el de mayor proporción cuentan con una superficie de una hectárea (2%) está distribuida en toda la superficie del parque.

Mapa 51. Ecosistemas presentes en el PNMFN



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.7.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Se verificaron 400 puntos de muestreo en el mapa final para el año 2022 correspondientes a 100 puntos de verificación (verdad terreno) para cada ecosistema identificado (categorías del mapa=verdad imagen). En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 400 puntos de verificación, 391 corresponden al ecosistema asignado; solo 9 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado. Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías) de los mapas (Tabla 55).

Tabla 55. Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque de pino	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno de (Clases referencia)	Bosque de encino	98	2	0	0	100
	Bosque de pino	1	97	2	0	100
	Vegetación secundaria	1	1	97	1	100
	Agricultura	0	0	1	99	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	400

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 56), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 9 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema.

Tabla 56. Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque de pino	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de encino	0.01	0.09	0.14	0	0.25
	Bosque de pino	0.16	0.04	0.04	0	0.25
	Vegetación secundaria	0	0.06	0.08	0.09	0.25
	Agricultura	0	0	0.04	0.20	0.25
Total verdad imagen		0.16	0.20	0.32	0.29	1.0
Proporción representada en el mapa		0.06	0.51	0.40	0.02	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

En la tabla 57 muestra el total de porcentaje de la superficie corregida, para el bosque de encino (4.9% de la superficie total); bosque de pino (41.3%); vegetación secundaria (52.1%) y la agricultura (2.0%).

Tabla 57. Matriz de error corregida de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque de pino	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
terreno de	Bosque de encino	0.01	0.20	0.26	0	0.47
	Bosque de pino	0.04	0.10	0.08	0	0.23
Verdad (Clases referencia)	Vegetación secundaria	0	0.10	0.10	0.01	0.21
	Agricultura	0		0.06	0.01	0.08
Total verdad imagen		0.04	0.413	0.52	0.02	1.0
Proporción representada en el mapa		0.06	0.51	0.40	0.02	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

En relación a la confiabilidad del productor para la vegetación secundaria presenta una proporción del (97%), con respecto al resto de las coberturas presentaron un (98%). En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el PNMFN es del (98.1% verdad imagen) y (0.66%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 58. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Año 2022	Bosque de encino	Bosque de pino	Vegetación secundaria	Agricultura	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	99	98	98	99	98.12	0.66
Error de comisión	1	2	2	1		
Intervalo confiabilidad del usuario	1.02	1.02	0.97	1.12		
Confiabilidad del productor	98	98	97	98		
Error de omisión	2	2	3	2		
Intervalo confiabilidad del productor	0.68	0.01	0.21	0.37		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

La tabla 59 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 59. Superficies corregidas de los ecosistemas PNMFN del año 2022.

Año 2022		de Bosque encino	Bosque de pino	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo	Bosque de encino	0.05	0.59	0.90	0	3	0.47	2
	Bosque de pino	0.95	0.25	0.24	0	25	0.23	21
	Vegetación secundaria	0	0.39	0.50	0.59	20	0.21	25
	Agricultura	0		0.29	1.25	1	0.08	1
Proporción representada en el mapa		0.06	0.51	0.40	0.02	49	1.0	49

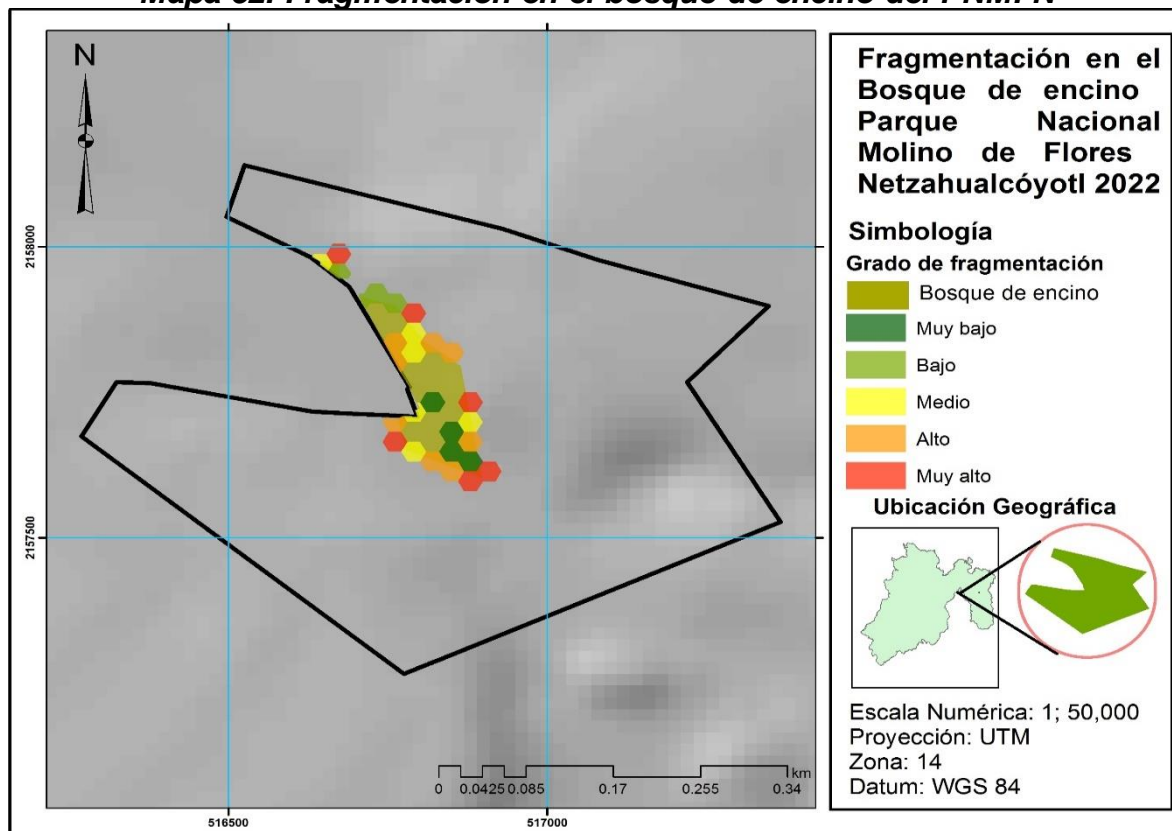
Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

4.7.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNMFN

La cartografía referente al grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque encino y el bosque de pino del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl para el año 2022. En el caso del bosque encino la leyenda corresponde a cinco categorías, que en la suma de todas estas encontramos un total de 28 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (4), bajo (4), medio (6), alto (8) y muy alto (6).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona oeste del parque, donde se desarrollan múltiples actividades recreativas en áreas para de día de campo de aproximadamente cinco hectáreas donde se ofrecen bancos, sanitarios y juegos infantiles, un estacionamiento de una hectárea en regulares condiciones, camino asfaltado a la entrada del parque y caseta de vigilancia, la mala administración de estas actividades limita al desarrollo del ecosistema forestal bosque de encino (García y Jiménez 1997) (Mapa 52).

Mapa 52. Fragmentación en el bosque de encino del PNMFN

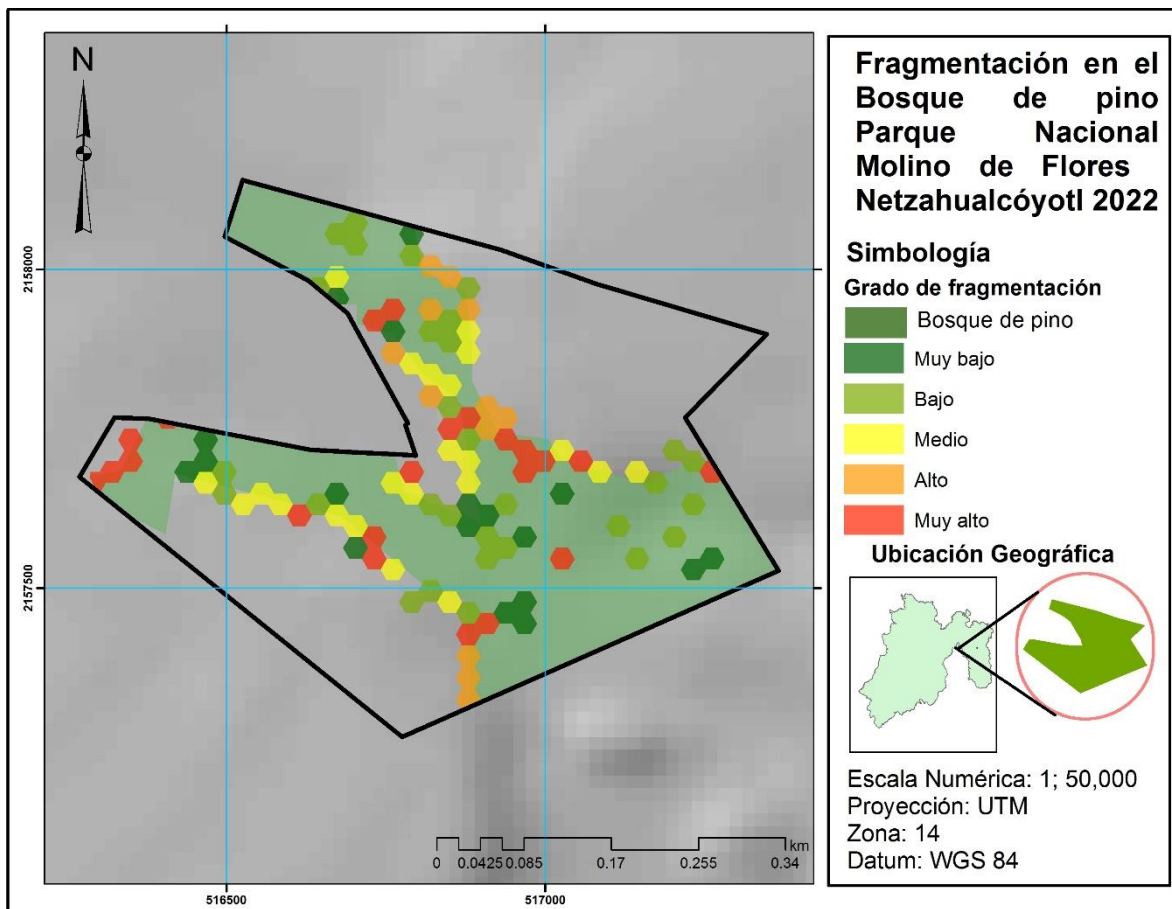


Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

Para el ecosistema forestal bosque de pino se determinaron cinco categorías, con un total de 104 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (18), bajo (30), medio (22), alto (12) y muy alto (22).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona centro y sur del parque, los factores que contribuyen a que existan estos valores es la contaminación por descarga de aguas residuales, que provoca el centro de Prevención y Readaptación Social Alfonso Quiroz Cuarón, al Río Coxcacuaco. Presenta una alta tasa de erosión hídrica, la cual afecta directamente los espacios de recreación del parque, y provoca la acumulación de azolve en el río Coxcacuaco (Vázquez, 1995) (Mapa 53).

Mapa 53. Fragmentación en el bosque de pino del PNMFN



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR, (2023).

4.7.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNMFN

La captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuesto por (Morfin *et al.* 2015). El Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl presenta dos tipos de ecosistemas forestales bosque de pino y encino, la captura de carbono para el año 2022 sin fragmentación forestal en el bosque de encino fue de 1.41 ton equivalentes a 3 ha, distribuidas en la zona centro del ANP.

El ecosistema forestal bosque de pino presenta una superficie de 25 hectáreas equivalentes a 11.71 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona centro y norte del área de estudio (Tabla 60).

Tabla 60. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNMF

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de encino	3	2.3	0.4726	1.41	1.08
2	Bosque de pino	25	15	0.4687	11.71	7.03

Fuente: elaboración propia con base (2023).

La fragmentación forestal permitió realizar un análisis comparativo a mayor detalle, la superficie para el bosque de encino disminuyó 0.7 ha equivalentes a 0.32 toneladas de captura de carbono, para el bosque de pino la superficie reducida fue de 10 ha equivalentes a 46.87 toneladas de captura de carbono para este año (Tabla 60).

4.7.7 Diagnóstico integral del PNMFN.

El Parque Nacional Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl es de gran importancia por su valor ecosistémico al brindar servicios ambientales a las localidades cercanas. Es de los parques nacionales con la menor superficie sin embargo la problemática política administrativa entre los municipios que lo conforman ha provocado un aumento en los problemas que se enlistan a continuación (Tabla 61).

Tabla 61. Análisis de los problemas identificados en el PNMFN.

Problemas identificados	fuentes empleadas para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Degradación y pérdida de los ecosistema	Análisis de cartografía
2.- Erosión de suelo	(Vázquez, 1995).
3.- Residuos solidos	(Rivas, 2001).
Problemas sociales	
1.- Marginación	(CONANP, 2008)
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	(Pérez, 2000).
2.- Comercio informal	(Solano, 1997).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

El Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl es un área natural protegida que carece de un plan de manejo o alguna otra guía o documento de planeación que marque pauta en el manejo y conservación de sus recursos naturales, los problemas presentes y en gran mayoría con tendencias de deterioro que padece el parque: disminución de cobertura vegetal, contaminación de suelo y agua, descargas de aguas residuales contaminadas en el río Coxcacuaco, altas tasas por erosión hídrica, deforestación y extracción de recursos forestales (Vázquez, 1995). Lo mencionado tiene relación con la reducción en la superficie de los ecosistemas forestales, Es necesario realizar programas de monitoreo permanentes que permitan evaluar el estado de la biodiversidad del Parque Nacional en relación con las condiciones abióticas y bióticas que prevalecen en su hábitat en función de las actividades humanas que se presentan en el área (Rivas, 2001).

Problemas sociales

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el H. Ayuntamiento de Texcoco, Estado de México. Desde el año 2019, la CONANP inició un programa de capacitación a los comerciantes del Parque (Prestadores de Servicios Turísticos) quienes tenían la necesidad de conocer conceptos básicos y aplicación de una metodología que permitiera aprovechar adecuadamente la actividad turística, en beneficio de sus familias, comunidad de comerciantes y del propio PNMFN; sin embargo, durante la pandemia de Covid-19 por disposición federal el parque cerró sus puertas al público por año y medio (2020-2021) quedando en pausa el proyecto de capacitación.

Problemas económicos

El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN), conocido localmente como “El Molino de Flores” cuenta con dos áreas de alimentos y bebidas, un área de recreación donde se ofrece servicios de juegos mecánicos (feria), motos, cabaña del tío chueco y paseos a caballos. El parque no cuenta con un Programa de Manejo que regule estas actividades dentro del área lo que provoca problemáticas ambiental severamente (Solano, 1997).

Existe un grupo de personas que se dedican a ofrecer servicios y comercio, quienes están organizados y reconocidos como Unión de Comerciantes Parque Nacional Molino de Flores. Integran una mesa directiva representada por un presidente, secretario, tesorero y dos vocales, encargados de llevar a cabo la organización de faenas para mejoras del entorno de su área de trabajo, mantenimiento de infraestructura de sanitarios, composta, cisternas, drenaje, así como la organización de la fiesta patronal de la Capilla de San Joaquín y del Señor del Pueblo, sin embargo los esfuerzos por mantener limpia la zona no son suficientes ya que en fechas importantes de festividades los visitantes sobre pasan la respuesta de estos activistas (Pérez, 2000).

La CONANP, el INAH, el H. Ayuntamiento de Texcoco, el Centro Universitario UAEM Texcoco y el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, se llevó a cabo el programa de capacitación con la comunidad de prestadores de servicios turísticos. Se abordaron temas relacionados con la actividad turística para

concientizar la importancia de mejorar los servicios y vender productos de calidad, así como proteger y cuidar el entorno natural y cultural del parque. Los talleres de capacitación turística se llevaron a cabo con una asistencia promedio de 25 a 30 personas por sesión. La unión de comerciantes del PNMFN ha mostrado interés por continuar con las capacitaciones, ya que reconocen la necesidad de mejorar la calidad de los servicios ofrecidos al visitante y la imagen de la zona comercial. Se formularon cursos-talleres específicamente para el área de prestadores de servicios el cual está integrada por una diversidad de productos y servicios (Vázquez, 1995).

4.7.8 Consideración final sobre el PNMFN

Los hallazgos del presente estudio evidencian un notable deterioro ambiental en el Parque Nacional, principalmente derivado de un proceso de deforestación vinculado al crecimiento descontrolado de actividades económicas dentro del área natural protegida. Entre las principales presiones identificadas se encuentran la instalación excesiva de comercios informales, como puestos de alimentos, y el desarrollo de actividades recreativas no reguladas, incluyendo paseos a caballo, en cuatrimoto y la operación de un zoológico. El análisis de la cartografía generada permitió determinar que las zonas con mayor grado de fragmentación forestal se localizan en las porciones centro y norte del parque. Estas dinámicas antrópicas, además de aumentar la generación de residuos sólidos, han limitado la regeneración natural de los ecosistemas forestales, afectando negativamente su estructura, función y resiliencia ecológica. Es indispensable avanzar hacia estrategias integrales de manejo y restauración ecológica que garanticen la conservación de estos espacios en el mediano y largo plazo.

En general es una superficie muy pequeña, de 49.28 hectáreas que si bien existen campañas de reforestación la mayoría son mal ejecutadas. Su principal atractivo es la ex hacienda Molino de Flores y la venta de antojitos.

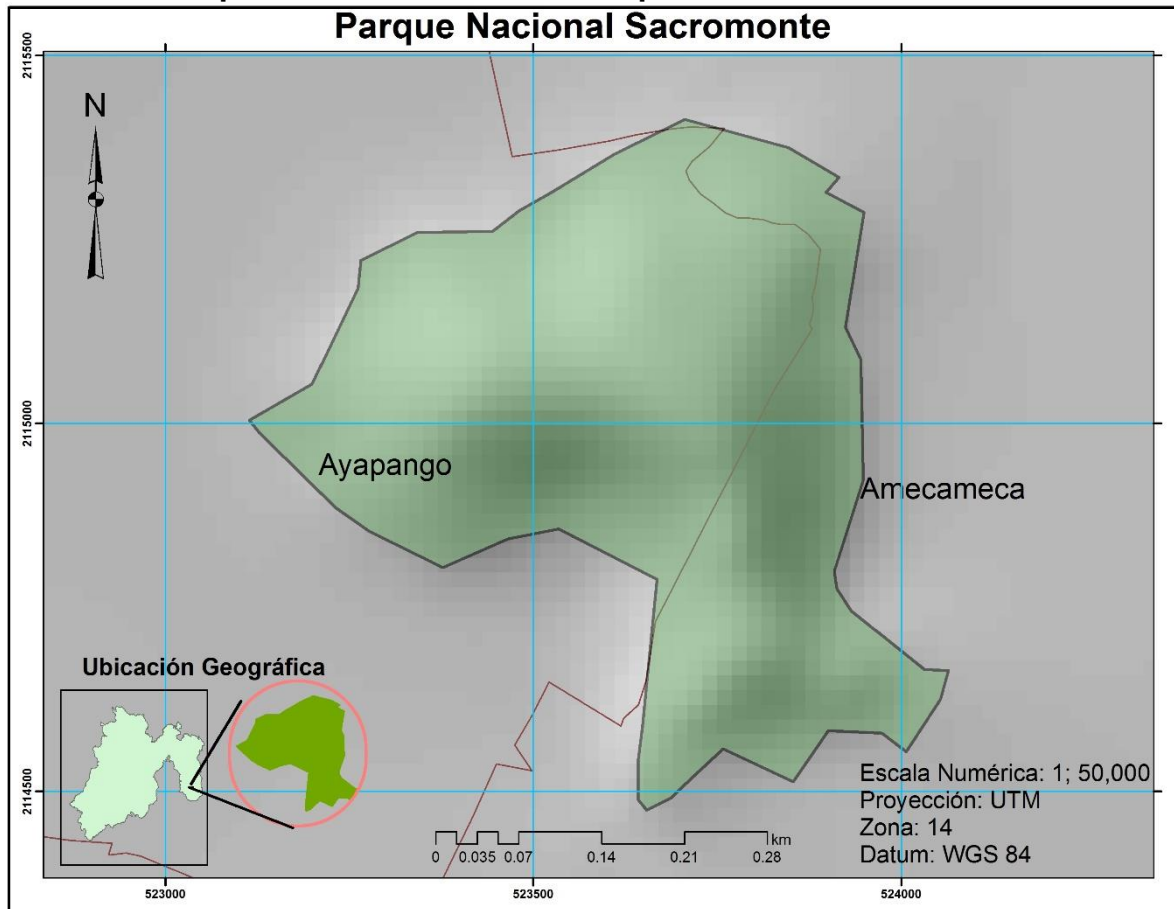
4.8 Parque Nacional Sacromonte (PNS)

4.8.1 caracterización geográfica del PNS

Localización geográfica

El Parque Nacional Sacromonte (PNS) se encuentra ubicado entre los municipios de Amecameca y Ayapango en el Estado de México, en las coordenadas $19^{\circ} 07' 25''$ y $19^{\circ} 07' 50''$. Entre $98^{\circ} 46' 20''$ y $98^{\circ} 46' 46''$, se declara Parque Nacional bajo la denominación de Sacromonte el 29 de agosto de 1939. El Parque Nacional cuenta con una superficie de 43.73 hectáreas (Mapa 54) (Vargas, 1984).

Mapa 54. Localización del Parque Nacional Sacromonte

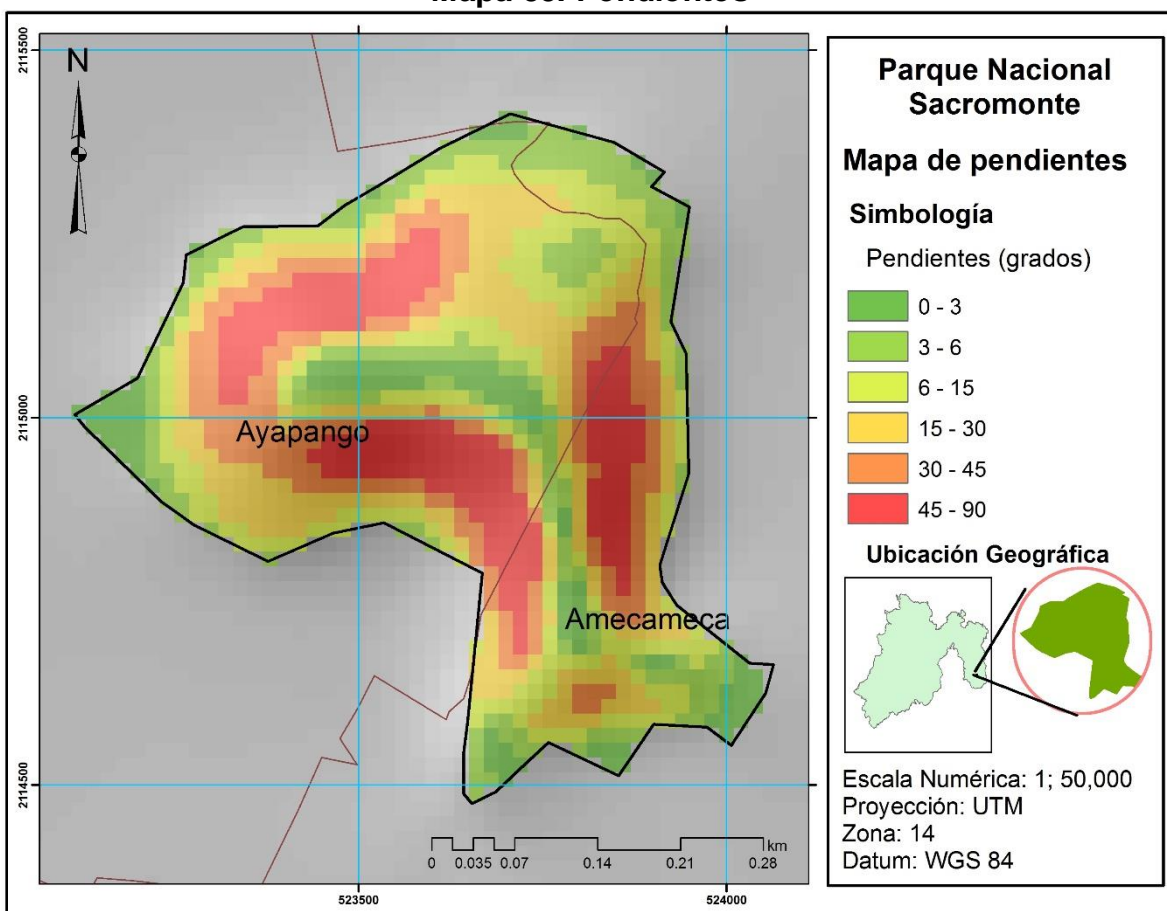


Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

El parque se encuentra ubicado dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcanico Transversal, tiene un rango altitudinal que va de los 2,450 a los 2,580 m.s.n.m. (Mapa 55). El relieve se caracteriza por amplias llanuras y algunas elevaciones, el Cerro del Sacromonte es la elevación principal está situado a inmediaciones de la Ciudad de Amecameca, estado de México, es un lugar de gran belleza natural (Vela, 2019).

Mapa 55. Pendientes



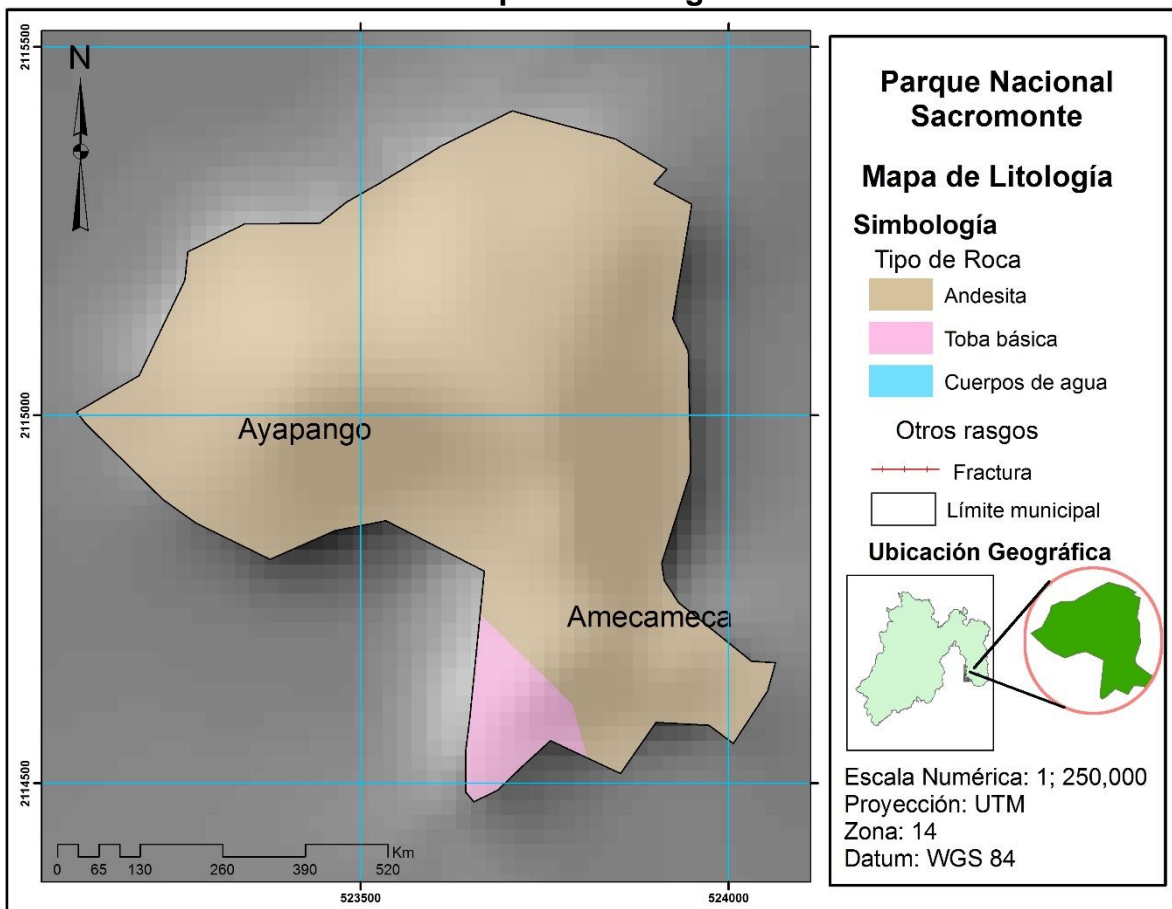
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Litología

El Parque Nacional está compuesto por rocas ígneas extrusivas, la roca con mayor extensión territorial es la andesita y el segundo tipo es la toba básica (Mapa 56). En base al Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ayapango (2013) está formado por rocas volcánicas, formados de alternancias de capas de ceniza y escoria volcánica y ocasionalmente derrames de lava sólida y lava en bloques (Flores, 2016).

Las estructuras volcánicas del área forman parte de un sistema de fallamiento o fisuramiento complejo y oculto, propio de la Sierra de Chichinautzin, sin embargo, localmente el fisuramiento (inferido) principal se ubica en el área Chiconquiaco, donde puede trazarse una fisura orientada NE-SW.

Mapa 56. Litología



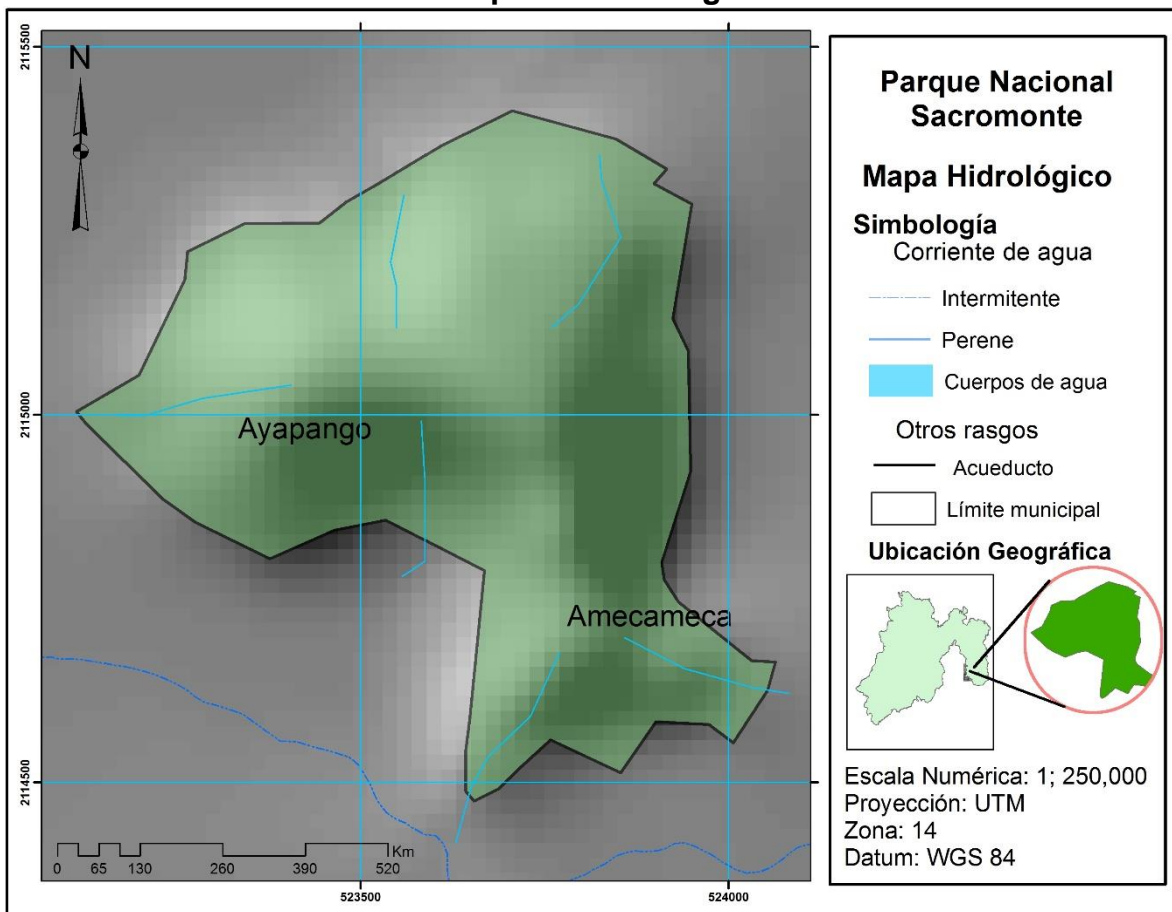
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Hidrología

El Parque Nacional forma parte de la Región Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, dentro de los municipios atraviesan ríos de caudal intermitente que confluyen en Ayapango. La dotación de agua depende de los ramales provenientes del municipio de Amecameca en base al Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ayapango (2013).

El municipio de Ayapango también se ubica en la microcuenca del Río Amecameca que abastece a varios municipios, sin embargo carece de manantiales, lagos y lagunas (Mapa 57).

Mapa 57. Hidrología



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Clima

El clima que presenta el Parque es un clima templado subhúmedo C (WI) (W) B (I) g, con lluvias en verano, con temperatura media anual de 12° a 18° C. Cociente precipitación entre temperatura 43.2 a 55.

El clima templado subhúmedo o templado monzónico, también llamado clima tropical de altitud, es un clima de influencia monzónica, es decir, de verano lluvioso e invierno seco, que se encuentra en latitudes subtropicales y subecuatoriales. En la mayoría de los casos se presenta como un clima de montaña o de altitud.

Edafología

En el Parque Nacional predomina el suelo denominado Regosol formado a partir de la descomposición de pastizales, musgo y algas. Cuenta con un 15% de materia orgánica, este tipo de suelo es óptimo para usos forestales intensivos, en general son suelos muy jóvenes, habitualmente resultado del depósito reciente de roca y arena acarreadas por el agua; de ahí que se encuentren sobre todo al pie de las sierras, donde son acumulados por los ríos que descienden de la montaña cargados de sedimentos.

No obstante, en el parque gran parte de la superficie de este suelo es utilizado para la agricultura con base en Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Ayapango (2013).

Diversidad de fauna en el Parque Nacional Sacromonte

De acuerdo con los ecosistemas forestales que presenta el parque y al tipo de clima el ANP las especies más representativas dentro de la zona son el gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*), búho cornudo (*Bubo virginianus*) la serpiente de cascabel (*Crotalus spp.*) y lagartija espinosa de collar (*Sceloporus torquatus*), (CONANP, 2008).

4.8.2 Ecosistemas presentes en el PNS

La caracterización geográfico-ambiental realizada previamente permitió identificar cuatro tipos principales de ecosistemas, resultado de las dinámicas e interacciones socio-ambientales que se desarrollan en el Parque Nacional. El área alberga ecosistemas forestales como el bosque de encino y el bosque mixto de encino-fresno, así como vegetación secundaria derivada de procesos de perturbación y zonas destinadas a usos agropecuarios. Esta diversidad refleja la influencia tanto de factores naturales como de actividades humanas en la configuración actual del paisaje.

1.- Bosque de encino:

Son comunidades dominadas por árboles altos mayormente pinos y encinos acompañados por otras varias especies habitan en zonas montañosas con clima templado a frío, Se distribuyen en mayor grado en el norte y sur del parque en altitudes entre 2,000 y 3,400 m. Se desarrollan en zonas con temperaturas promedio entre 12 y 23°C, aunque en invierno la temperatura puede llegar hasta por debajo de cero grados. Son ecosistemas de subhúmedos a templado húmedos, con una precipitación anual entre 600 y 1,000 mm (Flores 2016).

Fotografía 36. Bosque de encino PNS



Fuente: Google Street View, (2022).

2.- Bosque mixto de encino-fresno:

En el PNS el bosque mixto de pino-encino se caracteriza por ocupar la misma franja altitudinal que los encinos, mezclándose con ellos frecuentemente; sin embargo, en

algunos casos pueden presentarse como asociaciones más o menos definidas, dependiendo de las condiciones medioambientales.

Para el caso del fresno (*Fraxinus uhdei*) es un árbol nativo de México pertenece a la familia de las oleáceas. Mide hasta 35 m de altura con hojas compuestas pinnadas y flores monoicas. Es una especie introducida distribuida principalmente en los corredores viales de la ciudad (CONANP, 2008).

Fotografía 37. Bosque mixto de encino-fresno en el PNS



Fuente: Google Street View, (2022).

3.- Vegetación secundaria:

El ecosistema vegetación secundaria denominado así para esta investigación está conformado por arboles aislados de los bosques mencionados anteriormente y de pastizales de matorral con especies de arbustos se encuentran distribuidas en general en la zona centro donde la fragmentación de los bosques es de mayor amplitud (Peterson *et al.* 2005).

Fotografía 38. Vegetación secundaria en el PNS



Fuente: Google Street View, (2022).

4.- 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 municipio de Amecameca (Soberón, 2009).

Fotografía 39. Agricultura en el PNS



Fuente: Google Street View, (2022).

4.8.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNS

El Parque Nacional Sacromonte presenta para el año de 2022 una superficie de 44 hectáreas distribuidas en cuatro usos de suelo (Tabla 62). El bosque de encino cuenta con una superficie de 15 hectáreas equivalente a (34%) se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

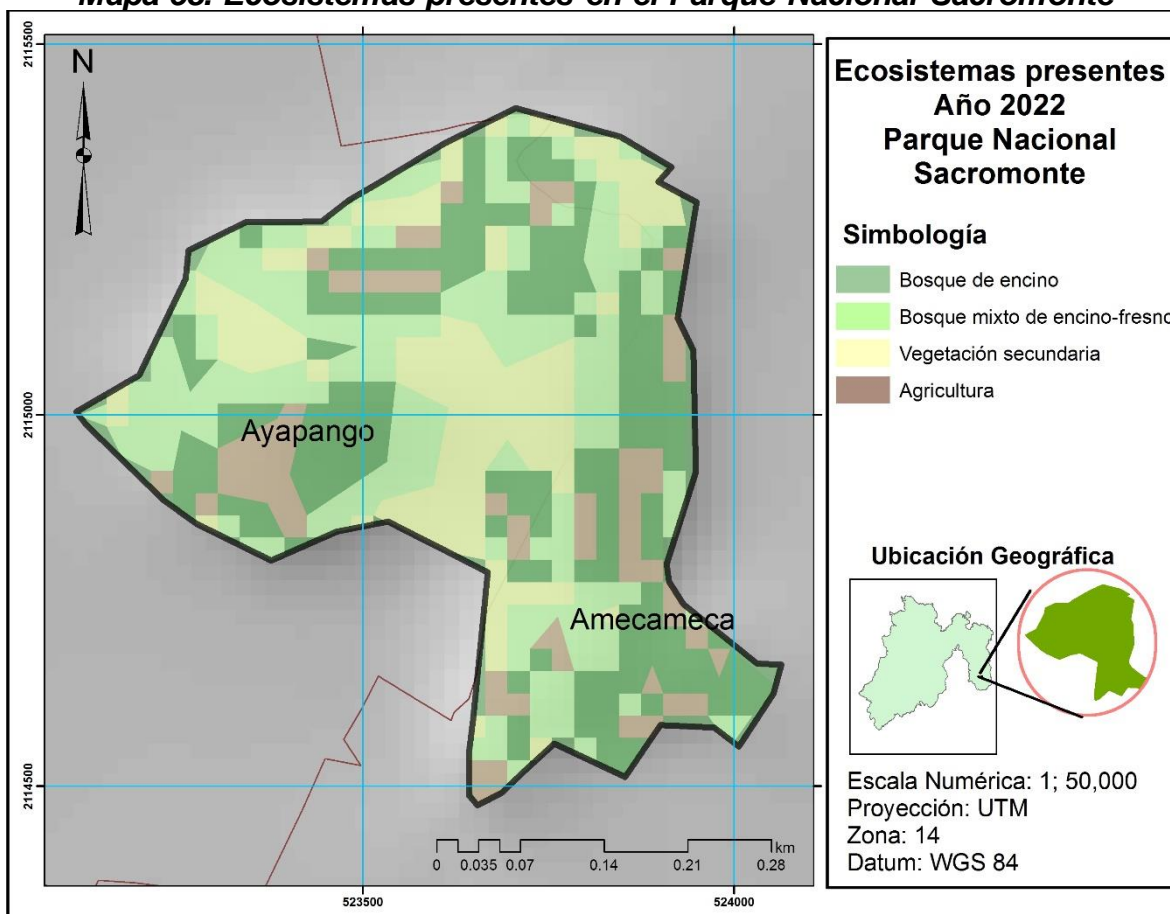
Tabla 62. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNS

No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de encino	15	34
2	Bosque mixto de encino-fresno	14	32
3	Vegetación secundaria	9	20
4	Agricultura	6	14
	Total	44	100

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque mixto de encino-fresno cuenta con una superficie de 14 hectáreas equivalente al (32%) del total de la superficie, está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 m.s.n.m., el tercer ecosistema es el área sin vegetación secundaria con 9 hectáreas (20%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes de los dos volcanes (Mapa 58).

Mapa 58. Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Sacromonte



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.8.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNS del año 2022.

Los resultados obtenidos en la tabla 63 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), la superficie en porcentaje de los ecosistemas de los mapas (verdad imagen).

Tabla 63. Confiabilidad de la cartografía de los ecosistemas PNS del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque mixto de encino-fresno	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de encino	98	2	0	0	100
	Bosque mixto de encino-fresno	0	98	1	0	100
	Vegetación secundaria	1	0	98	1	100
	agricultura	1	0	1	99	100
Total verdad imagen		100	100	100	100	400

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 64), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 7 puntos que no coinciden con las categorías del mapa.

Tabla 64. Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNS del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque mixto de encino-fresno	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases)	Bosque de encino	0.18	0	0.04	0.02	0.25
	Bosque mixto de encino-fresno	0.04	0.20	0	0	0.25
	Vegetación secundaria	0	0.07	0.14	0.03	0.25
	Agricultura	0	0	0.10	0.14	0.25
Total verdad imagen		0.22	0.27	0.29	0.20	1.0
Proporción representada mapa		0.25	0.25	0.38	0.11	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

En la tabla 65 muestra el total de porcentaje de la superficie corregida, para el bosque de encino (24.1% de la superficie total); bosque de mixto de encino-fresno (24.6%); vegetación secundaria (46.3%) y la agricultura (9.6%).

Tabla 65. Matriz de error corregida de los ecosistemas PNS del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)				
		Bosque de encino	Bosque mixto de encino-fresno	Vegetación secundaria	Agricultura	Total verdad terreno
Verdad terreno de (Clases referencia)	Bosque de encino	0.20	0	0.07	0.01	0.28
	Bosque mixto de encino-fresno	0.04	0.18	0	0	0.22
	Vegetación secundaria	0	0.05	0.19	0.01	0.26
	Agricultura	0	0	0.19	0.07	0.26
Total verdad imagen		0.24	0.24	0.46	0.09	1.0
Proporción representada mapa		0.25	0.25	0.38	0.11	1

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza de los ecosistemas PNS del año 2022.

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl es del (98.3 % verdad imagen) y (0.6%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 66. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNS del año 2022.

Año 2022	Bosque de encino	Bosque mixto de encino-fresno	Vegetación secundaria	Agricultura	Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	98.	99	98	99	98.37	0.61
Error de comisión	2	1	2	1		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	1.02	1.02	0.97	1.12		
Confiabilidad del productor	98	99	98	98		
Error de omisión	2	1	2	2		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.10	0.01	0.10	0.60		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los ecosistemas PNS del año 2022.

La tabla 67 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 67. Superficies corregidas por el método de Card

Año 2022		Verdad imagen (clase mapa)						
		de Bosque encino	Bosque mixto de encino-fresno	Vegetación secundaria	Agricultura	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo de (Clases referencia)	Bosque de encino	1.09	0	0.27	0.13	11	0.28	12
	Bosque mixto de encino-fresno	0.29	1.22	0	0	11	0.22	14
	Vegetación secundaria	0	0.42	0.86	0.21	17	0.26	14
	Agricultura	0	0	0.61	0.88	5	0.26	4
Proporción representada en el mapa		0.25	0.25	0.38	0.11	44	1.0	44

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

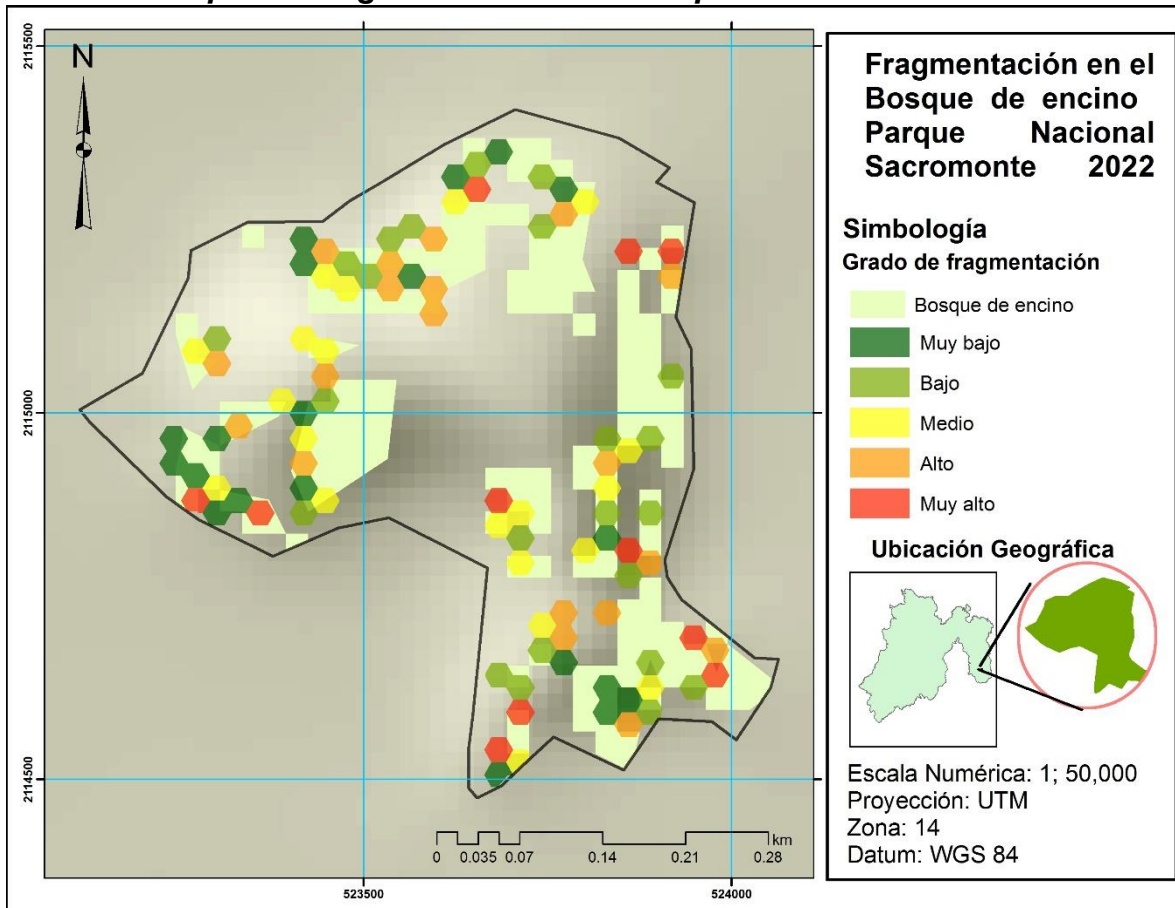
4.8.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNS

La cartografía referente al grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque encino y el bosque mixto de encino-fresno del Parque Nacional Sacromonte para el año 2022. En el caso del bosque encino la leyenda corresponde a cinco categorías (Mapa 59), que en la suma de todas estas encontramos un total de 93 polígonos, de los cuales se encuentran divididos en las siguientes clases: muy bajo (20), bajo (23), medio (20), alto (19) y muy alto (11).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur y oeste del parque, en esta zona se encuentra el Monasterio de Sacromonte, tiene un valor histórico ligado a las tradiciones de los pueblos de Amecameca, Sacromonte y Tlalmanalco, con un interesante atractivo turístico y

cultural por lo que se desarrollan múltiples actividades recreativas y religiosas, la mala administración de estas actividades limita al desarrollo de los bosques.

Mapa 59. Fragmentación en el bosque de encino del PNS



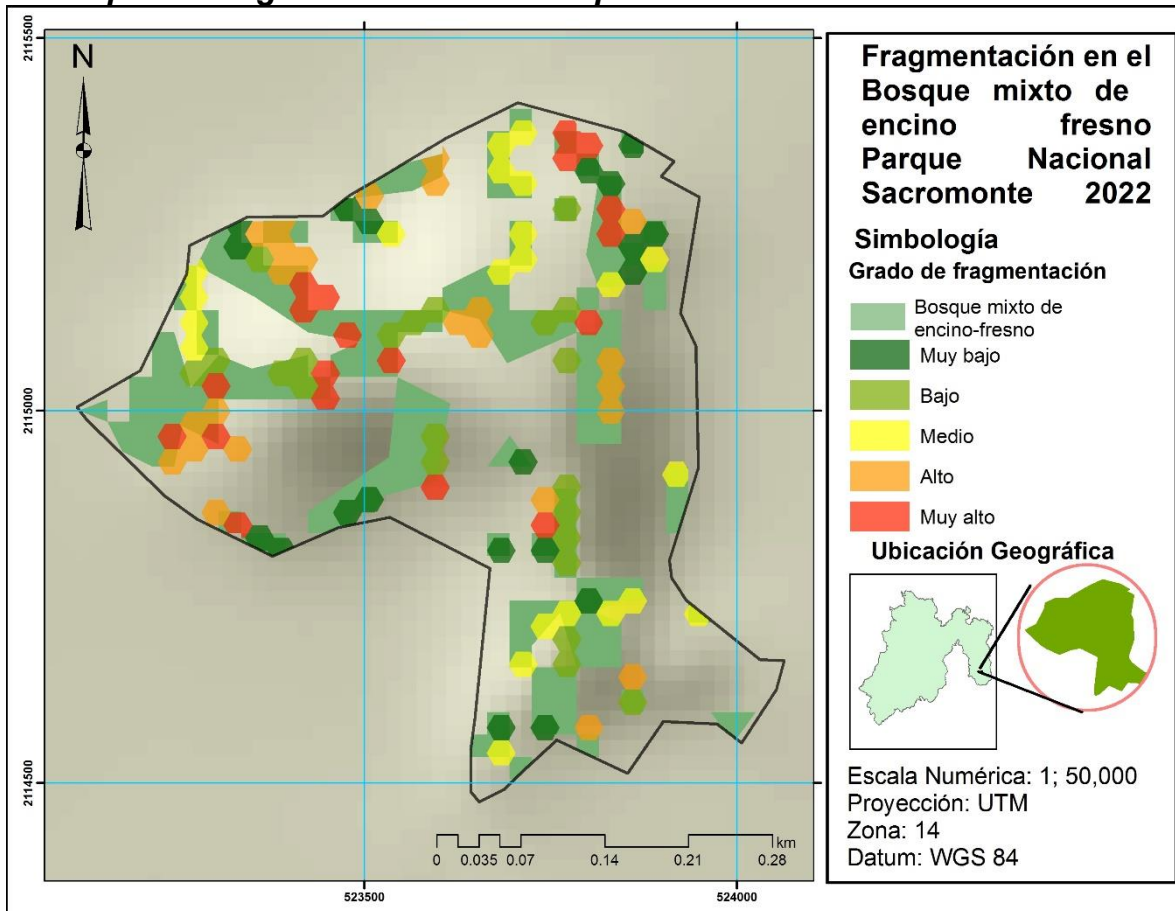
Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2023).

Para el ecosistema forestal bosque mixto de encino-fresno se identificaron cinco categorías, con un total de 107 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (20), bajo (22), medio (22), alto (24) y muy alto (19).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona norte del parque, Los principales problemas en esta zona son los asentamientos irregulares, incendios y plagas forestales (Vargas, 1997).

Por otra parte, la falta de instrumentos como los son el Plan de manejo del Área Natural Protegida tiene como resultado una mala regulación de estos espacios provocando Invasiones de zonas habitacionales, incendios y plagas forestales dentro del Parque (Mapa 60).

Mapa 60. Fragmentación en el bosque mixto de encino fresno del PNS



Fuente: elaboración propia con base en CONAFOR (2023).

4.8.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNS

La captura de carbono se calculó por ecosistema forestal para el año 2022, se realizó a partir de los índices de captura de carbono propuesto por (Morfin *et al.* 2015). El carbono capturado se calculó al multiplicar el índice de captura por la superficie de cada ecosistema forestal, lo que se hizo antes y después del cálculo de la fragmentación forestal, con el fin de comparar el carbono capturado antes y después.

El Parque Nacional Sacromonte presenta dos tipos de ecosistemas forestales bosque de encino y bosque mixto de encino fresno, la captura de carbono para el año 2022 sin fragmentación forestal en el bosque de encino fue de 16.9 ton equivalentes a 5 ha, distribuidas en la zona centro y norte del ANP (Flores 2016).

El ecosistema forestal bosque mixto de encino-fresno tiene una superficie de 14 hectáreas equivalentes a 3.6 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona centro y norte del área de estudio (Tabla 68).

Tabla 68. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNS

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de encino	15	9	0.4726	6.9	4.1
2	Bosque mixto de encino-fresno	14	8	0.4612	6.4	3.6

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

La fragmentación forestal permitió comparar a mayor detalle los resultados relacionados con la superficie del bosque de encino que disminuyo 6 ha equivalentes a 2.8 toneladas de captura de carbono, para el bosque mixto de encino-fresno la superficie reducida fue de 6 ha equivalentes a 2.8 toneladas de captura de carbono para este año.

4.8.7 Diagnóstico integral del PNS.

El Parque Nacional Sacromonte carece de un Plan de Manejo por lo que las actividades antrópicas realizadas dentro del parque no son reguladas de manera formal por una institución gubernamental o privada en pro de la conservación de los ecosistemas forestales, lo que genera diversas problemáticas que se enlistan a continuación (Tabla 69).

Tabla 69. Análisis de los problemas identificados en el PNS.

Problemas identificados	Fuentes para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Degradación y pérdida de los ecosistema	Análisis de cartografía
2.- Erosión de suelo	(Vela, 2019)
3.- Residuos solidos	(Mendoza, 2017).
4.- Contaminación del agua	(Mendoza, 2017).
Problemas sociales	
1.- Marginación	(CONANP, 2008).
Problemas económicos	
1.-Turismo no regulado	(SEMARNAT, 2005)

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

Dentro del PNS se asignó una superficie para la realización de actividades de recreación, esparcimiento y religioso ya que encuentra el Monasterio de Sacromonte, donde se celebran fiestas tradicionales de los pueblos de Amecameca, Sacromonte y Tlalmanalco, lo anterior ha provocado alteraciones a los ecosistemas forestales de encino predomina en sus límites pero también se pueden identificar especies de fresno, casuarina y eucalipto, la deforestación está asociada principalmente al desarrollo de actividades antrópicas dentro del parque, tales como actividades turísticas no reguladas, ganaderas y de infraestructura vial; por lo que los ecosistemas forestales han presentados cambios en su superficie (Vela, 2019). Las actividades antropogénicas, principalmente las turísticas y de comercio han ocasionado afectaciones que si bien son focalizadas dentro del parque nacional, se requiere de su atención, para lograr la protección y conservación de los ecosistemas y su biodiversidad presentes en el Parque Nacional, se requiere recuperar las condiciones originales de los sitios que presentan algún tipo de impacto a través de las acciones de restauración de los ecosistemas (Mendoza, 2017).

Problemas sociales

En materia de supervisión y vigilancia, las autoridades del parque llevan a cabo operativos e inspecciones con el objetivo de reducir los robos a visitantes cometidos por grupos delictivos tanto dentro como fuera del Área Natural Protegida (ANP).

Para mitigar estos delitos, es fundamental establecer una vigilancia constante y promover la denuncia ante las autoridades competentes, a fin de que se apliquen las sanciones correspondientes a los infractores. Sin embargo, debido a la extensa superficie del ANP y su topografía compleja, así como a la insuficiencia de personal capacitado, se requiere la participación activa de las comunidades aledañas en las labores de monitoreo y protección del área (CONANP, 2008).

Problemas económicos

El comercio informal dentro del parque no está regulado, por lo que es indispensable contar con la señalización apropiada para el ordenamiento de las actividades en realizar un estudio de impacto ambiental de los locales que prestan este servicio dentro del Área Natural Protegida, lo que permitirá disminuir los impactos sobre el entorno natural. La señalización es una de las soluciones para que los visitantes estén conscientes acerca de las actividades permitidas y las no permitidas en cada subzona (SEMARNAT, 2005).

4.8.8 Consideración final sobre El Parque Nacional Sacromonte

Los resultados de la fragmentación y el análisis de la captura de carbono refleja un importante proceso deterioro ambiental en el parque, se observa un proceso de deforestación asociado principalmente al desarrollo de actividades económicas, turísticas y culturales dentro del parque, además de que el parque no cuenta con normas ni una regulación establecida para la práctica de las actividades ya mencionadas por lo que no existe el Plan de Manejo del Parque (Padilla *et al.* 2014). De acuerdo al análisis realizado a partir de la cartografía generada, la concentración de polígonos con los valores más altos de fragmentación se encuentra en la zona centro, sur y norte del parque, donde se desarrollan actividades económicas y religiosas,

El parque carece de una administración en materia ambiental desarrollo sustentable, conservación y preservación en general es una superficie muy pequeña, de 43.7 hectáreas por los que se puede considerar la recategorización del parque consecuencia del grado de degradación del mismo (Vega, 2015).

4.9 Parque Nacional Bosencheve (PNB)

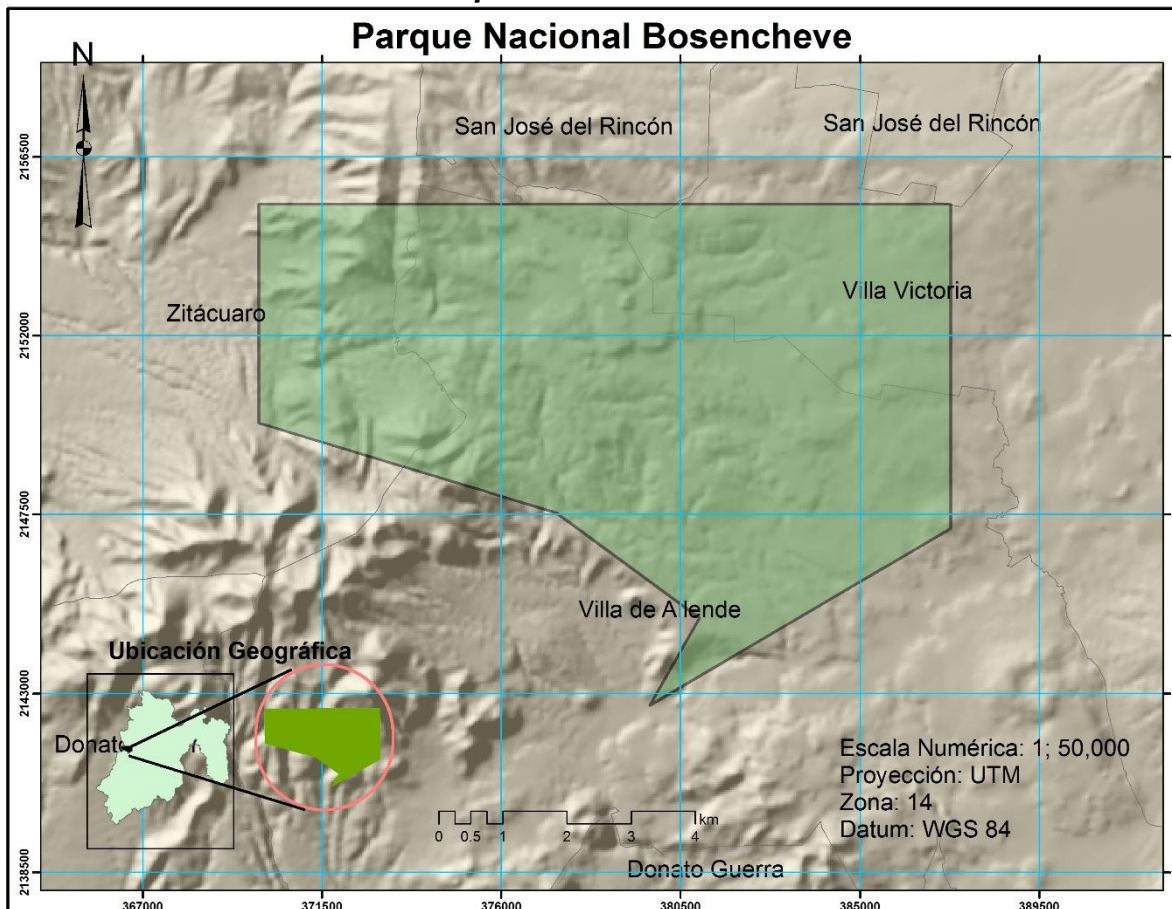
4.9.1 Caracterización geográfica del PNB

Localización geográfica

El Parque Nacional Bosencheve (PNB) se ubica en los estados de México y Michoacán, abarcando una superficie total de 14,008.25 hectáreas (Mapa 61).

Dentro del Estado de México, el parque se distribuye en los municipios de Villa de Allende (39%) y Villa Victoria (46%), mientras que en Michoacán se encuentra en el municipio de Zitácuaro (15%). Geográficamente, se localiza entre los meridianos 100° 05' 00" y 100° 14' 31" de longitud oeste, y los paralelos 19° 22' 30" y 19° 28' 16" de latitud norte (Vargas, 1984).

Mapa 61. Localización



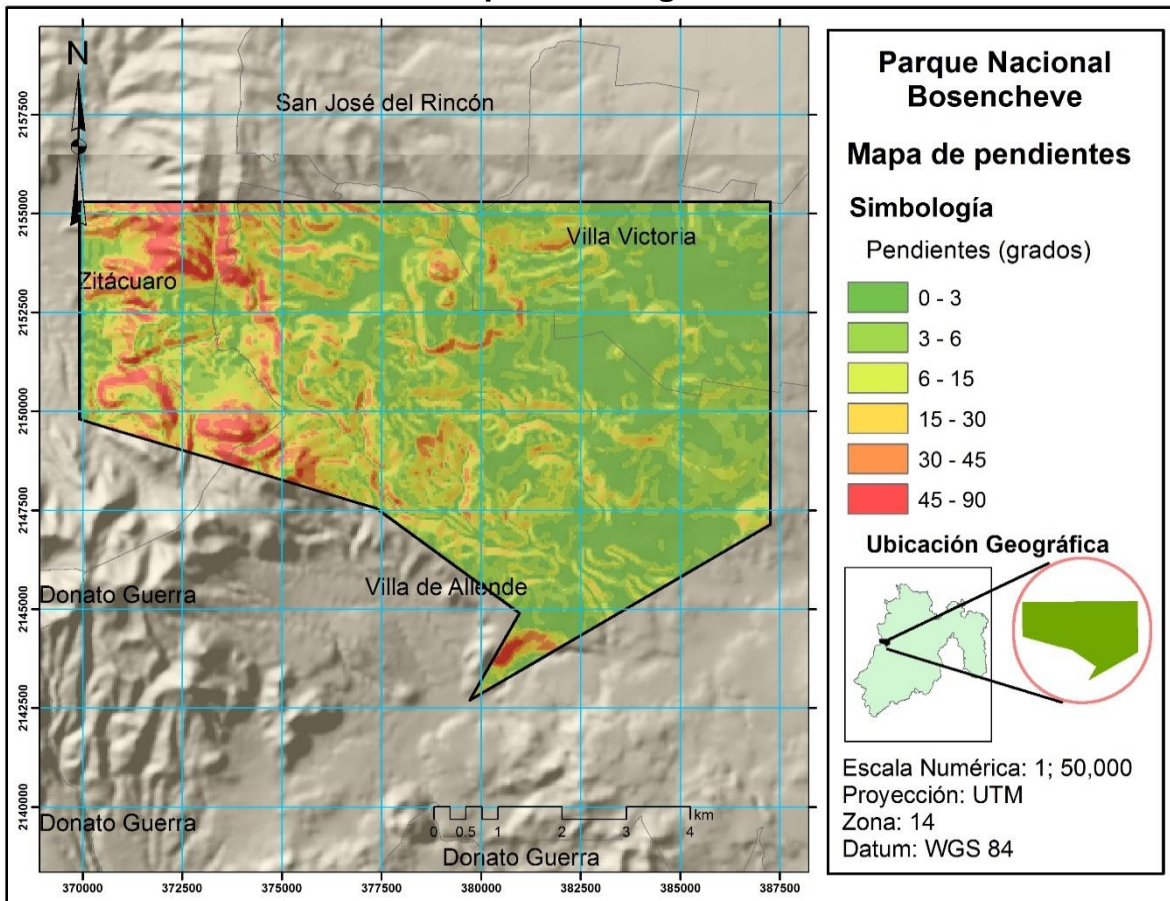
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Fisiografía

Esta área natural pertenece a la provincia fisiográfica del Sistema Neovolcanico Transversal forma parte del límite meridional de la placa tectónica norteamericana, y tiene inmediatamente al sur la zona de subducción de la placa de Cocos, que constituye la falla del río Balsas, que señala los límites geológicos entre América del Norte y América Central. Tiene un rango altitudinal que va de los 2,480 a los 3,240 metros sobre el nivel del mar (Vargas, 1984).

Presenta una gran diversidad de geoformas por su peculiar relieve accidentado, las pendientes mayores a 45° se distribuyen al este del parque, las pendientes menores a 10° se encuentran en dirección al oeste del parque donde encontramos planicies y pies de monte (Mapa 62).

Mapa 62. Fisiografía



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

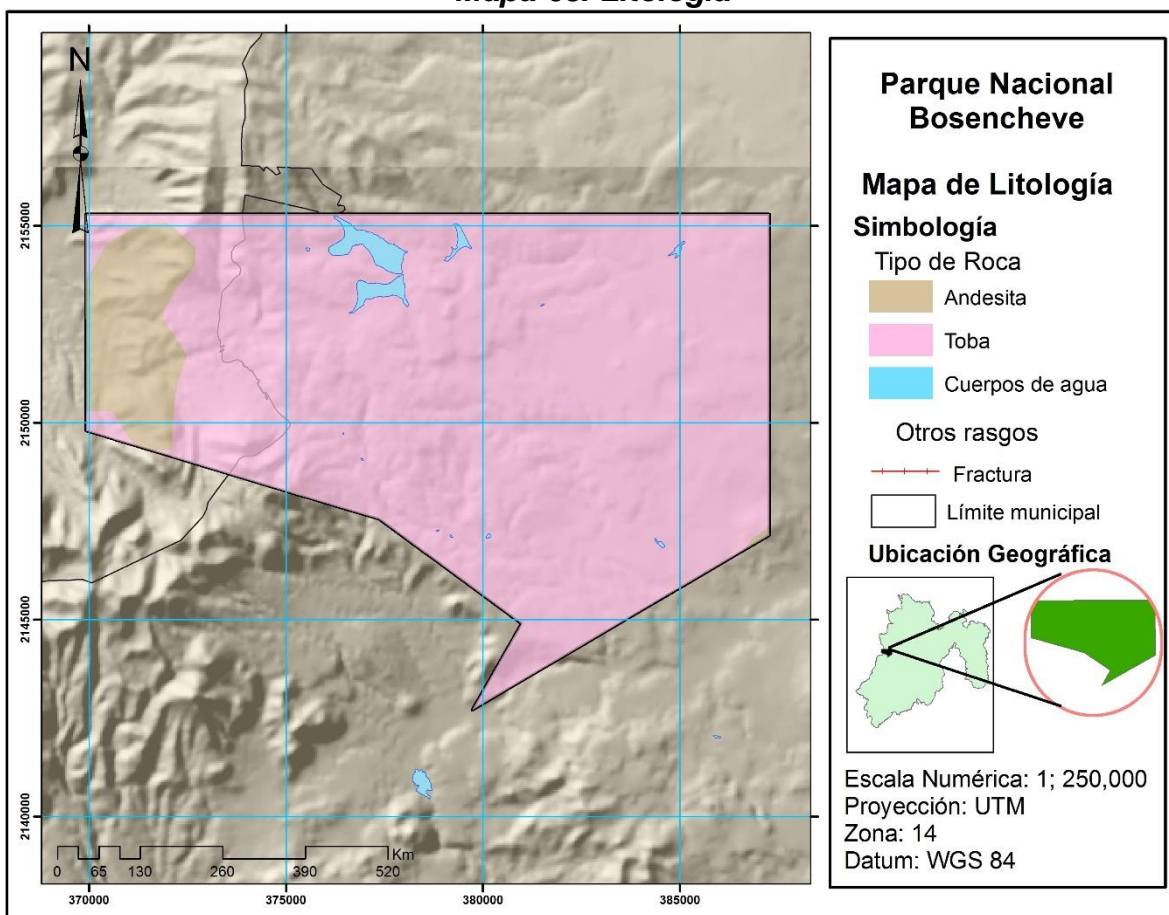
Litología

La geología de Parque Nacional Bosencheve se encuentra conformada por rocas ígneas volcánicas de tipo intrusivas que se forman a partir del magma enfriado lentamente en la corteza y de tipo extrusivas que se forman de lava enfriada en la superficie. Donde prevalecen dos tipos de roca andesita y toba (Mapa 63).

La toba es de origen ígnea volcánica extrusiva piroclástica, se forma de materiales volcánicos sueltos consolidados de diversos tamaños y composición mineralógica, formada a partir de ceniza volcánica, arenas, lapillo y bombas (GEM, 1993).

La roca andesita es 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, suele tener tonos grisáceos o pardos por alteración. (INEGI, 2015).

Mapa 63. Litología



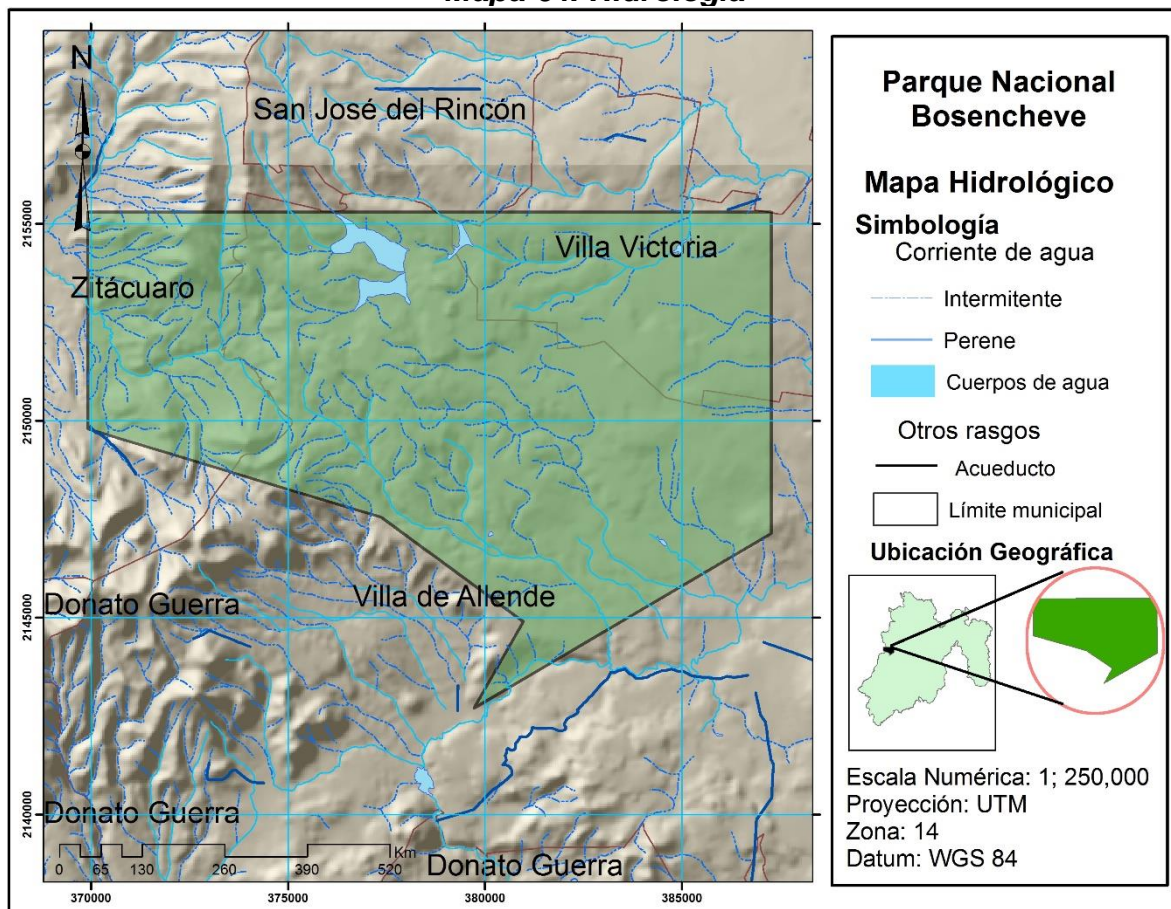
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Hidrología

La hidrología de la región, pertenece a la RH No.-18 denominada Cuenca del Medio y Bajo Balsas, como se observa en el mapa 64 al norte del parque existen dos lagunas formadas por la acumulación del agua de lluvia; una de ellas llamada Laguna Seca, casi desaparece en época de estiaje, y la otra, la Laguna Verde, que fluctúa su nivel según el volumen de precipitación y un bordo pequeño donde se acumula el agua, llamado San Diego (CONAGUA, 2010).

También dentro del parque se encuentran varios arroyos, denominados de la siguiente manera: El Jaral, Ojo de Agua, Pundereje, El Cardaro, Grande, Guadalupe, Lengua de Vaca, Las Peñitas, La Palma (INEGI, 2014).

Mapa 64. Hidrología

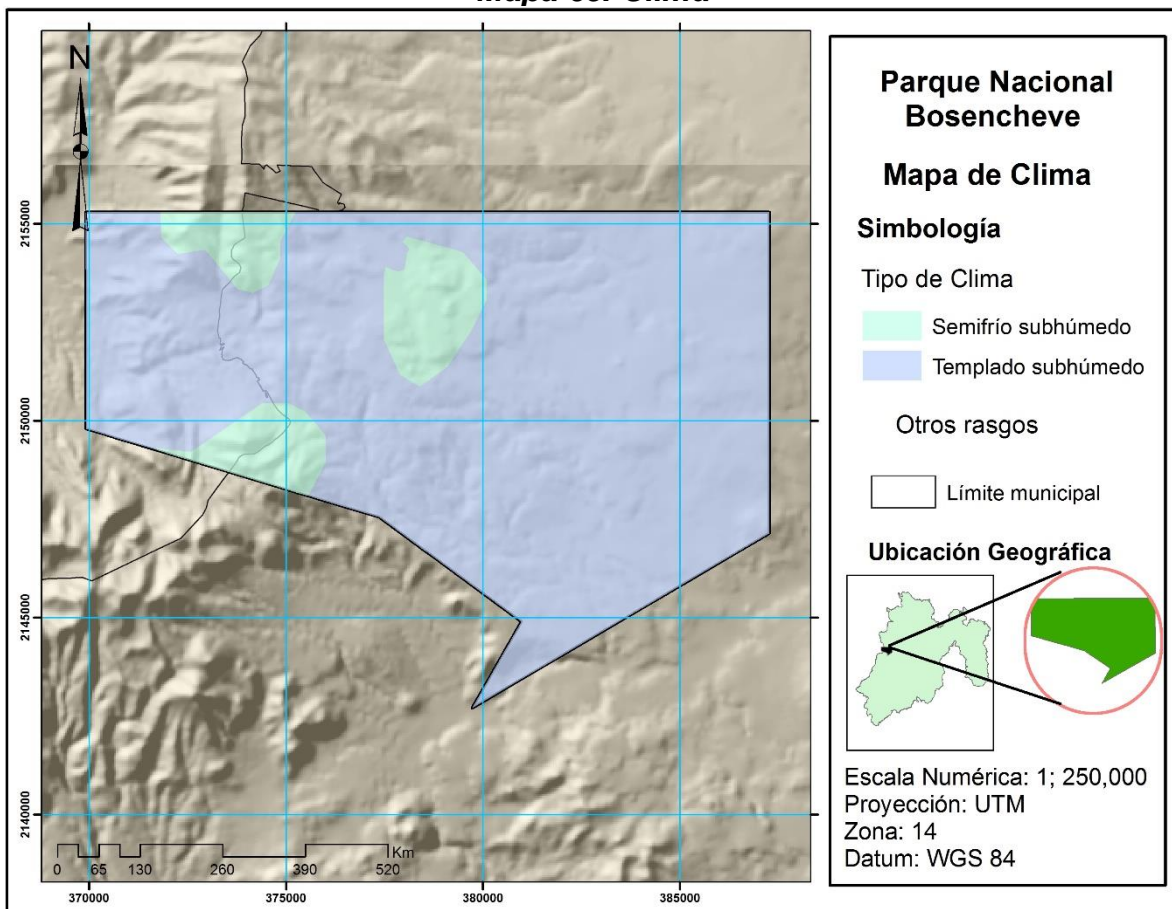


Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Clima

En el Parque Nacional Bosencheve existen dos tipos de clima, el templado subhúmedo es el que mayor predomina en el ANP, con t media anual de 12.3° C, la temperatura media anual del mes más frío es diciembre con 9.4° C y el mes más cálido es 14.6° C; la precipitación anual es de 971.4 mm, la menor precipitación se presenta en febrero con 5.7 mm., y la mayor cantidad en julio con 221.4 mm., las lluvias se presentan en el verano (Mapa 65). Por otra parte, en las zonas de mayor altitud se presenta el clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano, se registra una temperatura promedio de 10.1 °C. La precipitación pluvial promedio es de 1306.5 mm. (García, 1981).

Mapa 65. Clima



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Edafología

El parque Nacional Bosencheve está constituido por una gran diversidad edafológica debido a la variedad de sus ecosistemas litológicos como se observa en el mapa 66. Se encuentran cinco diferentes tipos de suelo de los que destacan Andosoles: Son suelos que se forman a partir de materiales ricos en vidrio volcánico, estos suelos son utilizados para la agricultura de temporal. Se encuentra en la zona oeste, norte y sur del Parque (P.D.M., 2013).

Se derivan de cenizas volcánicas recientes, por lo que son suelos ligeros con alta retención de humedad y buen contenido de nutrientes, así como con un alto contenido de materia orgánica (CONANP. 2003).

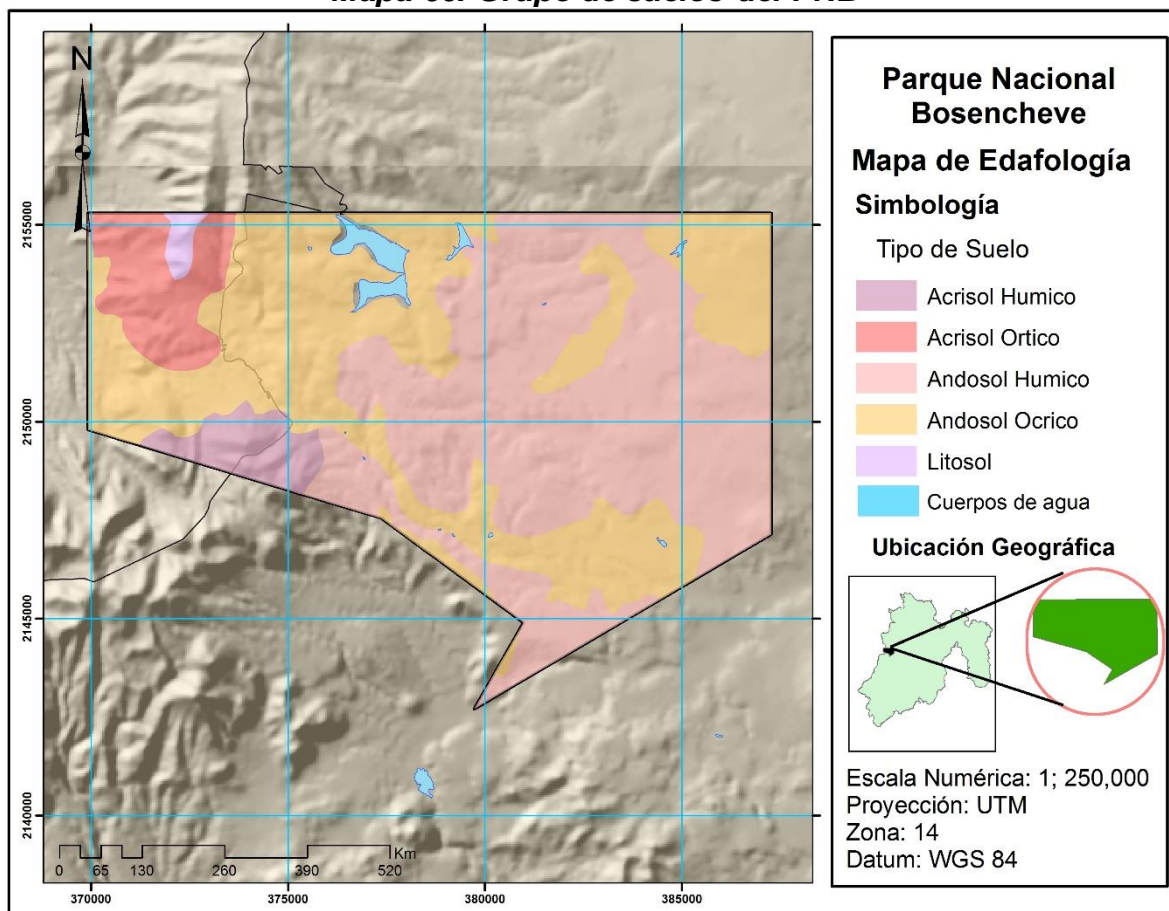
Litosol: Suelos someros, con menos de 0.1 metros de espesor, formados sobre tepetates y que conservan las características del material parental, uno de los grupos de suelos que deben su formación a condiciones topográficas, ya que se crean en zonas montañosas con pendientes pronunciadas. Así como también a orillas de ríos que depositan más grava que material fino o en planicies con base rocosa calcárea (P.D.M., 2013).

Debido a sus limitaciones físicas, fundamentalmente su poca profundidad y gran contenido rocoso, tienen un uso agrícola restringido. Sin embargo, con un manejo adecuado pueden ser suelos productivos para ciertos cultivos de hortalizas, papa y otros, así como para producción forestal (P.D.M., 2013).

Acrisol: Los Acrisoles se desarrollan principalmente sobre productos de alteración de rocas ácidas, con elevados niveles de arcillas muy alteradas, las cuales pueden sufrir posteriores degradaciones (CONANP, 2003).

Predominan en viejas superficies con una topografía ondulada o colinada, con un clima tropical húmedo, monzónico, subtropical o muy cálido. Los bosques claros son su principal forma de vegetación natural (P.D.M., 2013).

Mapa 66. Grupo de suelos del PNB



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Diversidad de fauna en el Parque Nacional Bosencheve

En cuanto a la fauna silvestre existen diversas especies de aves acuáticas migratorias, halcones, carpinteros, ardillas, conejos, armadillos, la salamandra, varias especies de tlaconetes, lagartijas, ranas, ardillas, tejones, murciélagos, garzas y colibrís, pez blanco y mexcalpique (SEMARNAT, 2016).

4.9.2 Identificación de los ecosistemas presentes en el PNB

A partir del análisis físico ambiental realizado previamente se identificaron diversos ecosistemas ambientales producto de las interacciones socio-ambientales, para el caso del Parque Nacional Bosencheve se identificaron seis diferentes tipos de suelo los cuales se describen a continuación

1.- 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 m.s.n.m., 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 (CONABIO, 2015).

Fotografía 40. Bosque de oyamel en el PNB.



Fuente: Google Street View, (2022).

2. - 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, (SARH, 1993), 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) (Foto 41).

Fotografía 41. Bosque de pino en el PNB



Fuente: CONANP, (2023).

3.- Bosque mixto de pino-encino

En México los bosques mixtos de pino-encino 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. (Vargas, 1997).

Fotografía 42. Bosque de pino en el PNB



Fuente: Google Street View, (2022).

4.- Vegetación secundaria:

El ecosistema vegetación secundaria denominado así para esta investigación está conformado por arboles aislados de los bosques mencionados anteriormente y de pastizales de matorral con especies de arbustos se encuentran distribuidas en general en la zona centro donde la fragmentación de los bosques es de mayor amplitud (INEGI, 2010).

Fotografía 43. Vegetación secundaria en el PNB



Fuente: Google Street View, (2022).

4.- Agricultura

El uso de suelo agrícola en el municipio de Villa Victoria, Estado de México, se desarrolla en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, lo que favorece la agricultura de temporal. Entre altitudes que van de los 2,500 a los 2,800 m.s.n.m, lo cual condiciona los tipos de cultivos que son principalmente maíz, papa, avena y trigo (CEPANAF, 2010).

Fotografía 44. Uso de suelo agrícola en el Parque Nacional Bosencheve



Fuente: Google Street View, (2022).

6.-Cuerpos de agua:

Los cuerpos de agua analizados en esta investigación hacen referencia a las lagunas que conforman el sistema lacustre de Villa Victoria, pertenece a una cuenca endorreica, es decir, sin salida natural al mar. En el caso específico de Villa Victoria, destaca la Presa Villa Victoria, uno de los cuerpos de agua más importantes del municipio, tanto por su función en el abastecimiento de agua al Sistema Cutzamala como por su influencia en el microclima y las actividades agrícolas y ganaderas de la región.

Sin embargo, también existen lagunas y cuerpos menores de origen natural y artificial, que forman parte de este sistema lacustre y que presentan alta vulnerabilidad ambiental debido al uso intensivo del suelo circundante y la escasa renovación del agua. (CONAGUA, 2010) (Foto 45).

Fotografía 45. Cuerpos de agua en el Parque Nacional Bosencheve



Fuente: Google Street View, (2022).

4.9.3 Análisis de los ecosistemas presentes en el PNB

El Parque Nacional Bosencheve presenta para el año de 2022 una superficie de 14,615 hectáreas distribuidas en seis usos de suelo (Tabla 70). El bosque de oyamel cuenta con una superficie de 953 hectáreas equivalente a (6.5 %) se distribuye principalmente en la zona centro del ANP.

Tabla 70. Superficie de los ecosistemas presentes en el PNB

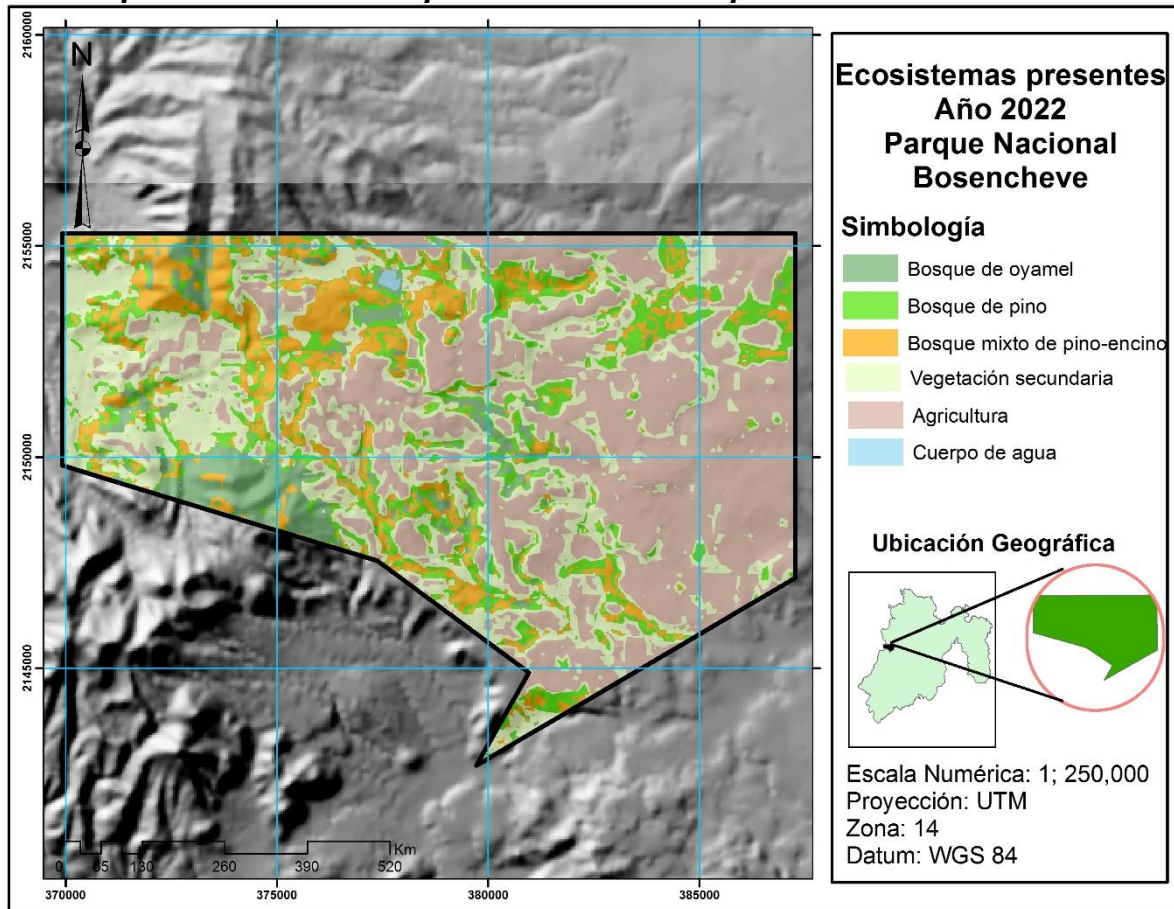
No	Ecosistema	Superficie (ha)	(%)
1	Bosque de oyamel	953	6.5
2	Bosque de pino	1894	13.0
3	Bosque mixto de pino-encino	1958	13.4
4	Vegetación secundaria	4169	28.5
5	Agricultura	5623	38.5
6	Cuerpo de agua	18	0.1
	Total	14615	100

Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque de pino cuenta con una superficie de 1,894 hectáreas equivalente al (13%) del total de la superficie, está distribuido en la zona norte del área de estudio entre las altitudes que van de los 2,700 msnm, el tercer ecosistema es el bosque mixto de pino-encino con 1,958 hectáreas (13.4%) distribuido la mayor parte en la zona norte donde se presentan las mayores altitudes de los dos volcanes (Mapa 67).

El cuarto uso de suelo es la vegetación secundaria, cuentan con una superficie de 4,169 hectáreas (28.5%) está distribuida en toda la superficie del parque. mientras que la agricultura cuenta con una superficie de 5,623 hectáreas equivalente al (38.5%) del total de la superficie del parque y los cuerpos de agua cuentan con una superficie de 18 hectáreas equivalente al (0.1%) del total de la superficie.

Mapa 67. Ecosistemas presentes en el Parque Nacional Bosencheve



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.9.4 Validación cartográfica de los ecosistemas PNB del año 2022.

Se verificaron 600 puntos de muestreo en el mapa final para el año 2022 correspondientes a 100 puntos de verificación (verdad terreno) para cada ecosistema identificado (categorías del mapa=verdad imagen). En la matriz de confusión error para el año 2022, de los 600 puntos de verificación, 581 corresponden al ecosistema asignado; solo 19 puntos resultaron de otro ecosistema diferente al asignado. Los resultados expresan el número de sitios correctamente clasificados de cada ecosistema (categorías) de los mapas (Tabla 71).

Tabla 71. Confiabilidad de la cartografía, de los ecosistemas PNB del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	97	2	0	1	0	0	100
	Bosque de pino	2	97	0	0	1	0	100
	Bosque mixto de pino-encino	1	2	95	1	1	0	100
	Vegetación secundaria	1	3	0	95	1	0	100
	Agricultura	1	2	0	0	97	0	100
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	100	100
Total verdad imagen		102	106	95	97	100	100	600

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Los resultados alcanzados mediante la matriz de confusión expresada en proporción (Tabla 72), son los siguientes, de los puntos de verificación analizados, se identificaron 19 puntos que no coinciden con las categorías del mapa, por lo que se procesaron y se generaron los ajustes necesarios dando como resultado ajustados los siguientes porcentajes en el mapa para cada ecosistema.

Tabla 72. Matriz de error expresada en proporción de los ecosistemas PNB del año 2022.

a) Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de oyamel	0.16	0.07	0	0.01	0	0	0.2
	Bosque de pino	0.08	0.15	0	0	0.02	0	0.2
	Bosque mixto de pino-encino	0.07	0.05	0.15	0.01	0.03	0	0.2
	Vegetación secundaria	0.01	0.01	0	0.14	0.02	0	0.2
	Agricultura	0.06	0.01	0	0	0.13	0	0.2
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0.16	0.2
Total verdad imagen		0.18	0.20	0.15	0.14	0.15	0.16	1.0
Proporción representada en el mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0.07	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

La tabla 73 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 forestales (verdad imagen).

En la tabla 73 muestra el total de porcentaje de la superficie corregida, para el bosque de oyamel (6.6% de la superficie total); bosque de pino (13.9%); bosque mixto de pino-encino (13.4%); vegetación secundaria (28.5%); la agricultura (38.4%) y los cuerpos de agua (0.1%).

Tabla 73. Matriz de error corregida de los ecosistemas PNB del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)						
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Total verdad terreno
Verdad terreno	Bosque de oyamel	0.07	0.06	0	0.01	0	0	0.06
	Bosque de pino	0.02	0.10	0	0	0.40	0	0.10
	Bosque mixto de pino-encino	0.04	0.07	0.14	0.02	0.08	0	0.15
	Vegetación secundaria	0.01	0.01	0	0.281	0.01	0	0.31
	Agricultura	0.04	0.01	0	0	0.35	0	0.37
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	0.01	0.01
Total verdad imagen		0.06	0.13	0.13	0.28	0.38	0.01	1.0
Proporción representada en el mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0.01	1.0

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Confiabilidad global e intervalos de confianza de los ecosistemas PNB del año 2022.

En relación a la confiabilidad del productor para para la confiabilidad del usuario para los cuerpos de agua cuenta con el (100%), mientras que el bosque de oyamel vegetación secundaria y la agricultura presento el (95%), el bosque de pino (93%), y el bosque mixto de pino-encino (94%)

En general la confiabilidad global que presenta el mapa de los ecosistemas presentes en el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl es del (95.7 % verdad imagen) y (1.58%) del intervalo de confianza de la confiabilidad global.

Tabla 74. Confiabilidad global y sus intervalos de confianza de los ecosistemas PNB del año 2022.

Año 2022	de Bosque oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	de Cuerpos agua	Confiabilidad global (%)	de Intervalo de confianza de la confiabilidad global (%)
Confiabilidad del usuario	92.00	94	100	99	92	100	95.75	1.58
Error de comisión	8	6	0	1	8	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del usuario	5.84	5.02	0	2.12	5.84	0		
Confiabilidad del productor	95	93	94	95	95	100		
Error de omisión	5	7	6	5	5	0		
Intervalo de confianza de la confiabilidad del productor	0.04	0.04	0.069	0.04	0.04	0		

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

Ajuste a las superficies derivadas de los mapas clasificados de los ecosistemas PNB del año 2022.

La tabla 75 presenta los resultados de los valores correspondientes a la proporción corregida en relación al resultado del ajuste de los errores de clasificación. El ecosistema vegetación secundaria requirió una mayor corrección resultado de la presencia de errores de omisión y comisión.

Tabla 75. Superficies corregidas de los ecosistemas PNB del año 2022.

Año 2022		Verdad imagen (Clases del mapa)								
		Bosque de oyamel	Bosque de pino	Bosque mixto de pino-encino	Vegetación secundaria	Agricultura	Cuerpos de agua	Superficie (ha)	Proporción corregida	Superficie corregida (ha)
Sitios de muestreo (Clases de referencia)	Bosque de oyamel	0.97	0.01	0	0.08	0	0	953	0.06	933
	Bosque de pino	0.03	0.94	0	0	0.01	0	1894	0.10	1885
	Bosque mixto de pino-encino	0.01	0.03	0.92	0.06	0.01	0	1958	0.15	1984
	Vegetación secundaria	0.02	0.09	0	0.84	0.04	0	4169	0.31	4174
	agricultura	0.05	0.11	0	0	0.82	0	5623	0.37	5621
	Cuerpos de agua	0	0	0	0	0	1.0	18	0.01	18
Proporción representada en el mapa		0.06	0.12	0.13	0.28	0.38	0.12	1461	1.0	14615

Fuente: elaboración propia con base en Card, (1982).

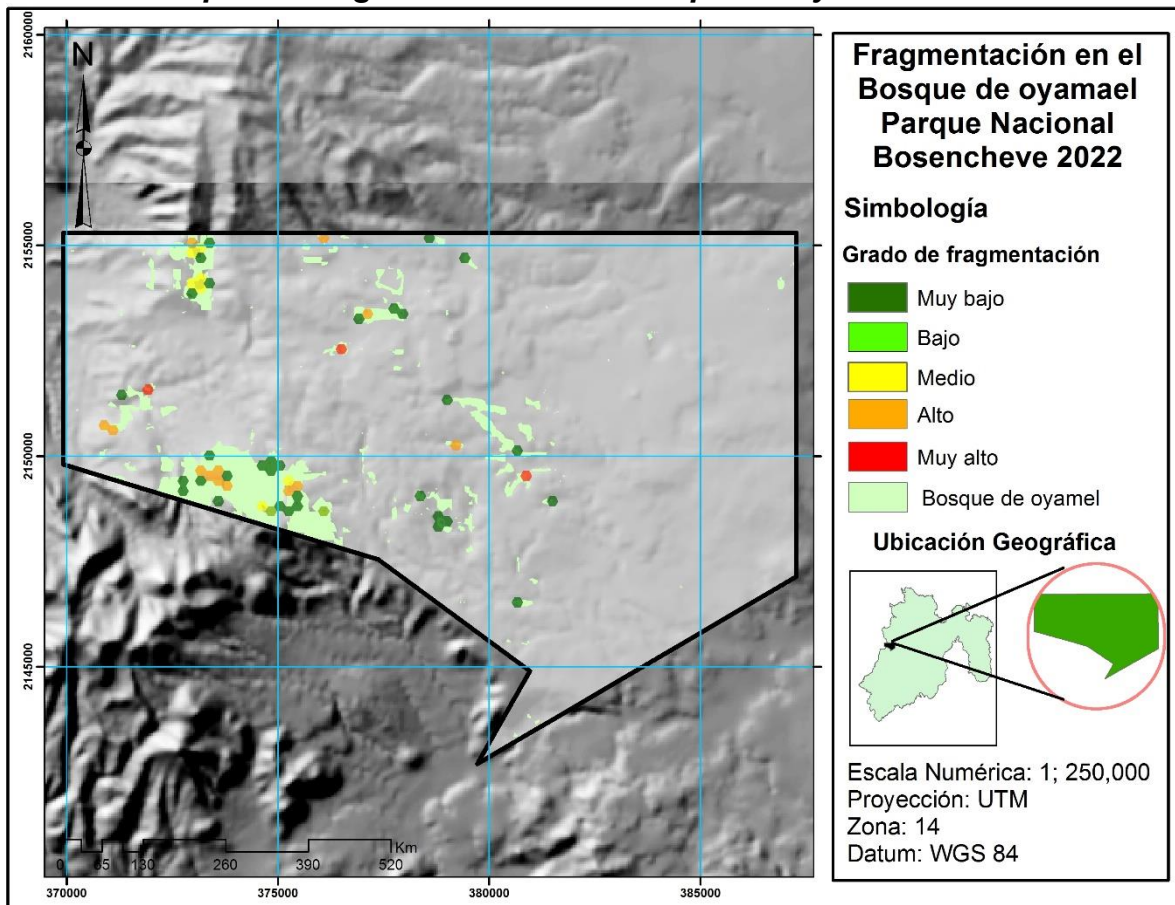
4.9.5 Fragmentación en los ecosistemas forestales del PNB

La cartografía referente al grado de fragmentación de los ecosistemas forestales bosque pino, bosque de oyamel y el bosque mixto de pino-encino del Parque Nacional Bosencheve para el año 2022.

El análisis del bosque de oyamel, representado en la cartografía correspondiente (Mapa 68), muestra una clasificación en cinco categorías de fragmentación. En total, se identificaron 57 polígonos, distribuidos de la siguiente manera: muy bajo (31), bajo (2), medio (7), alto (13) y muy alto (4).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona sur y oeste del parque, en esta zona no se cuenta con infraestructura turística formal, sin embargo, se practican actividades como lo son el excursionismo, observación de vida silvestre, campamentos, y la pesca de mojarra y carpa (CONANP, 2018).

Mapa 68. Fragmentación en el bosque de oyamel del PNB



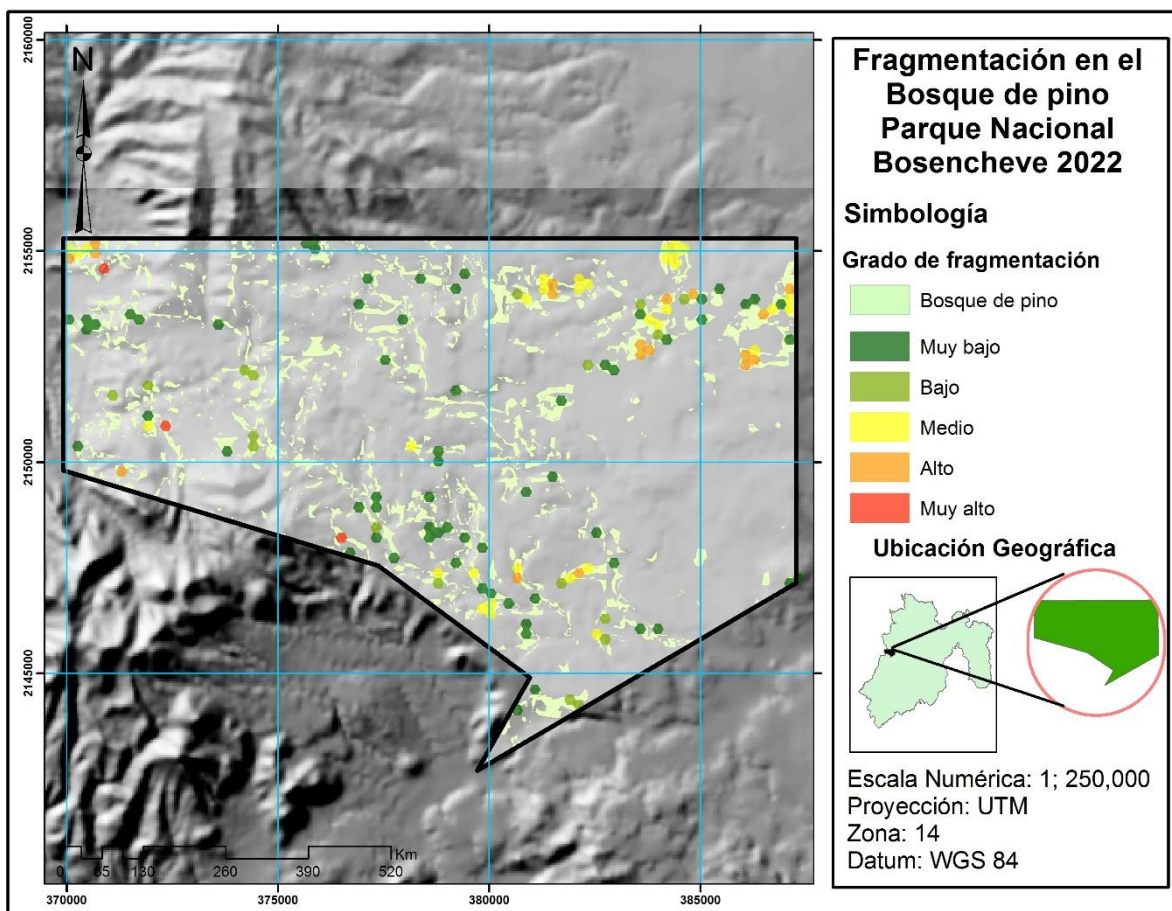
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

El ecosistema forestal bosque de pino presenta en general una densidad forestal alta de acuerdo a la categoría establecida por CONAFOR, (2020); se identificaron cinco rangos de fragmentación forestal, con un total de 131 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (65), bajo (18), medio (27), alto (18) y muy alto (3).

Los polígonos referentes a los valores altos de fragmentación se concentran en la zona oeste del parque, Los principales problemas en esta zona son los asentamientos irregulares, por falta de una regulación de parte del ayuntamiento municipal (Maass *et al.* 2006)

La falta de instrumentos como los son el Plan de manejo tiene como resultado una mala regulación de estos espacios provocando sobrepastoreo, extracción de tierra de monte, incendios forestales, plagas (de gusano barrenador, descortezador y muérdago) y cacería furtiva dentro del ANP (SEMARNAT, 2015).

Mapa 69. Fragmentación en el bosque mixto de pino del PNB



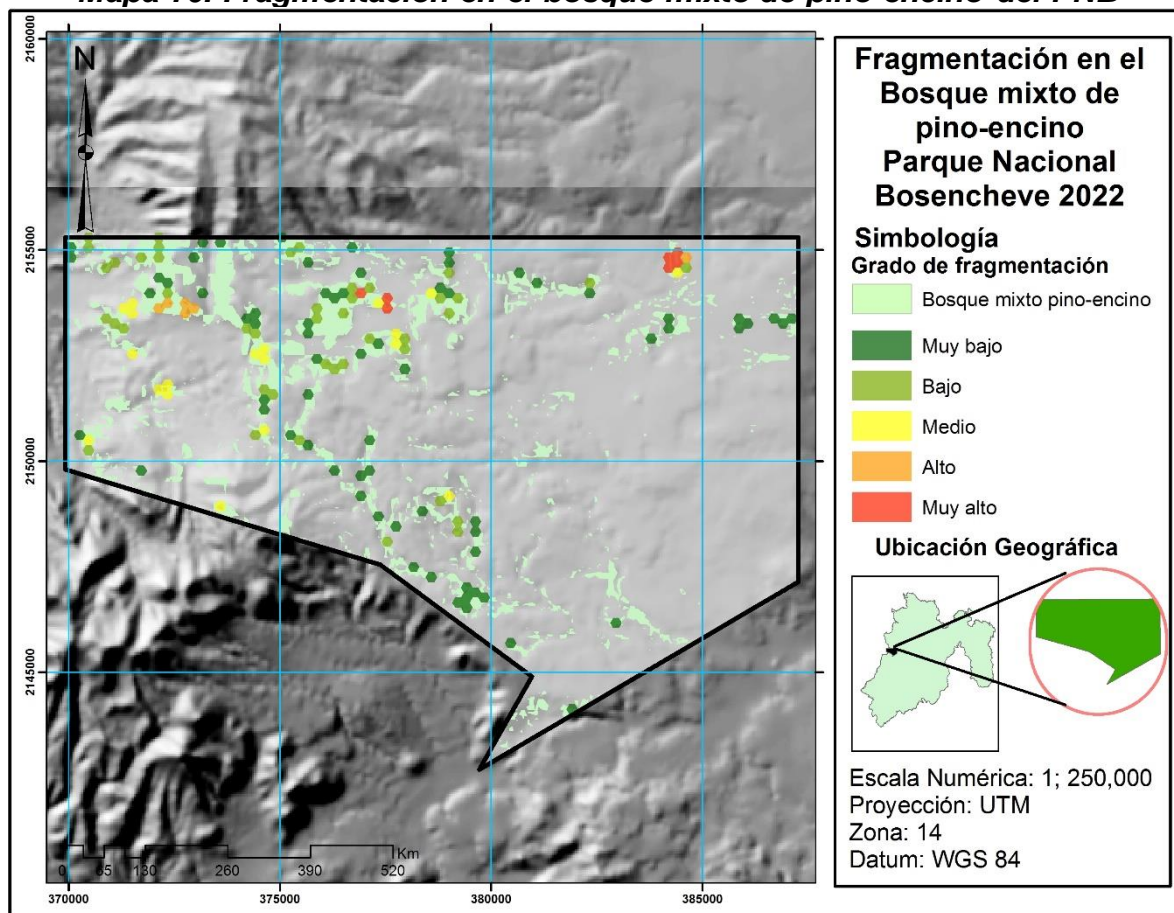
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

Para el ecosistema forestal bosque mixto de pino-encino se identificaron cinco categorías, con un total de 145 polígonos, los cuales se encuentran divididos en los siguientes rangos: muy bajo (70), bajo (43), medio (19), alto (6) y muy alto (7).

Los polígonos referentes a los valores más altos de fragmentación se concentran en la zona norte del parque, uno de los problemas graves en la zona son los asentamientos irregulares, debido a que los terrenos donde se localiza el parque, son en su mayor parte de propiedad ejidal y privada lo que ha contribuido a generar cambios de uso del suelo dentro del área de estudio (CONANP,2008).

Por otra parte, es importante mencionar que de acuerdo con la CONAFOR, (2015) los bosques de pino que forman parte del territorio ejidal del municipio de Zitácuaro, Michoacán, ubicados en la zona norte del parque fueron deforestados es mayor parte para realizar actividades agrícolas como sembrar maíz, cebada y avena (Mapa 70).

Mapa 70. Fragmentación en el bosque mixto de pino-encino del PNB



Fuente: elaboración propia con base en INEGI, (2023).

4.9.6 Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNB

El Parque Nacional Bosencheve presenta tres tipos de ecosistemas forestales bosque de oyamel, bosque de pino y bosque mixto de pino-encino fresco. La captura de carbono para el año 2022 sin el análisis de fragmentación forestal en el bosque de oyamel fue de 451.24 ton equivalentes a 953 ha, distribuidas en la zona centro y norte del ANP.

El ecosistema forestal bosque pino cuenta con una superficie de 1,894 hectáreas equivalentes a 569 toneladas de carbono almacenado, distribuidas en la zona centro y norte del área de estudio, por otra parte el bosque mixto de pino encino tiene una superficie de 1,958 ha equivalentes a 592 toneladas de captura de carbono para este año (Tabla 76).

Tabla 76. Captura de carbono en los ecosistemas forestales del PNB

No	Ecosistema	Superficie (ha) Sin análisis de fragmentación	Superficie (ha) Con análisis de fragmentación	Índice de captura de carbono	Carbono capturado (ton) Sin análisis de fragmentación	Carbono capturado (ton) Con análisis de fragmentación
1	Bosque de oyamel	953	668	0.4735	451.24	316.29
2	Bosque de pino	1,894	1,214	0.4687	887.71	569
3	Bosque mixto de pino-encino	1,958	1,260	0.4706	921.43	592.95

Fuente: elaboración propia con base en Correa, (2012).

El análisis de la fragmentación forestal permitió comparar los resultados relacionados con la superficie del bosque de oyamel que disminuyó 285 ha equivalentes a 135 toneladas de captura de carbono, para el bosque de pino la superficie se redujo a 660 ha equivalentes a 310 toneladas de captura.

Por su parte, el bosque mixto de pino-encino la superficie reducida fue de 698 ha equivalentes a 328 toneladas de captura de carbono para este año.

4.9.7 Diagnóstico integral del el PNB.

El Parque Nacional Bosencheve (PNB), posee un alto valor ecológico y paisajístico que lo convierte en un destino con gran potencial para el turismo de naturaleza. Su atractivo principal radica en la preservación de senderos naturales, paisajes poco intervenidos y una notable biodiversidad. Las actividades más comunes en la zona incluyen excursionismo, observación de vida silvestre, campismo, así como la pesca recreativa de especies como mojarra y carpa en sus cuerpos de agua.

La importancia ambiental del parque radica en la superficie que forma parte del santuario de la mariposa monarca, este atractivo turístico genera conflictos en la conservación ambiental del parque (CONABIO, 2016).

Tabla 77. Análisis de los problemas identificados en el PNB.

Problemas identificados	Métodos empleados para la identificación de problemas
Problemas ambientales	
1.- Tala clandestina	(INEGI, 2015).
2.- Residuos solidos	(SARH. 1993)
3.- Erosión de suelo	(SARH. 1993)
Problemas sociales	
1.- Deforestación	(Dirección de Áreas Naturales Protegidas, 1996).
Problemas económicos	
1.- Tenencia de la tierra	(Bray, 2005).
2.- Turismo no regulado	(Cardeña, 2005).

Fuente: elaboración propia con base en Linares *et al.* (2021).

Problemas ambientales

El aumento de la fragmentación forestal ocasionó la transformación del paisaje drásticamente ya que Bosencheve tiene dos lagunas formadas por agua de lluvia, que albergan a las aves acuáticas migratorias (Laguna verde y Laguna seca). Cuenta también con varios arroyos como El Jaral, Ojo de agua, Pundereje, El Cardaro, Las Peñitas y la Palma (INEGI, 2015).

La disminución de la densidad forestal impacta directamente en la provisión de servicios ambientales esenciales para las comunidades que habitan tanto dentro del Área Natural Protegida como en su zona de influencia. Entre los servicios más afectados destacan la infiltración y recarga de mantos acuíferos, la captura de carbono, la retención de suelos, el mantenimiento del hábitat de especies de flora y fauna, la regulación climática, así como el valor escénico y recreativo del paisaje.

Por ello, resulta fundamental conservar y restaurar las superficies forestales que contribuyen a la recarga hídrica, con el objetivo de reducir la presión sobre los mantos acuíferos y garantizar la sostenibilidad ecológica del territorio (SARH, 1993).

Problemas sociales

La tala clandestina es tanto un problema ambiental como un problema social, desde el enfoque social, la tala clandestina refleja desigualdad y pobreza; las comunidades rurales dependen de esta actividad como fuente de ingreso ante la falta de oportunidades económicas formales. Lo que debilita el tejido social cuando se vuelve una actividad tolerada o protegida por redes de corrupción, afecta la confianza en las instituciones y en las reglas comunitarias. Pone en riesgo a quienes la denuncian: defensores del medio ambiente, autoridades locales o habitantes que se oponen enfrentan amenazas, violencia o intimidación. Por estas razones, no puede abordarse únicamente desde el aspecto ambiental. Requiere una solución integral que contemple justicia social, fortalecimiento institucional, alternativas económicas sostenibles y participación comunitaria. (Dirección de Áreas Naturales Protegidas, 1996).

Problemas económicos

Existen problemas muy severos respecto a la tenencia de la tierra por parte de ejidatarios y autoridades del parque lo que genera conflictos de interés económico sobre todo en la zona centro donde se desarrollan la mayor parte de las actividades turísticas, esto por los predios de mayor plusvalía para el comercio informal dentro del parque.

Las actividades económicas de la población que habita en los límites del parque se concentran principalmente en el comercio informal, la agricultura y la ganadería. Estas prácticas han generado conflictos de interés dentro del Área Natural Protegida (ANP), particularmente por parte de los ejidatarios, quienes buscan continuar con el aprovechamiento del territorio para actividades productivas. Como resultado, es evidente la transformación del paisaje y la presión sobre los recursos naturales (Bray, 2005).

Algunas organizaciones no gubernamentales (ONGs) han implementado campañas de reforestación y recolección de residuos, estas han tenido poco impacto debido a la escasa participación social. Ante este escenario, una posible solución sería replantear dichas iniciativas, integrándolas con programas estatales y federales que ofrezcan incentivos económicos a la población local, con el objetivo de fomentar la participación comunitaria e impulsar un sentido de pertenencia e identidad en torno a la conservación del área (Cardeña, 2005).

4.9.8 Consideración final sobre el Parque Nacional Bosencheve

De acuerdo con la cartografía de los niveles de fragmentación forestal y el análisis de captura de carbono, el Parque Nacional Bosencheve presenta un marcado proceso de deterioro ambiental. Se identifica un avance de la deforestación, asociado principalmente al desarrollo de actividades económicas, turísticas y culturales dentro del ANP. Este deterioro se ve agravado por la ausencia de normativas claras y la falta de regulación específica que oriente y limite dichas prácticas.

Actualmente, el parque carece de un Plan de Manejo, lo que impide la implementación de estrategias efectivas de conservación y uso sostenible de sus recursos naturales, esta situación pone en riesgo la integridad ecológica del parque y resalta la necesidad de establecer instrumentos de gestión ambiental que aseguren su protección a largo plazo (Vargas, 1984).

Propuesta teórico-metodológica para la estimación de la captura de carbono

La presente investigación se fundamentó en una revisión crítica de estudios previos enfocados en la estimación de la captura de carbono en relación con la fragmentación forestal, para sustentar y fortalecer el diseño metodológico del estudio. Se llevó a cabo un análisis comparativo detallado de los enfoques teóricos, variables empleadas y escalas de análisis utilizadas en dichas investigaciones, lo que permitió identificar fortalezas, limitaciones y vacíos metodológicos significativos. A partir de esta evaluación, se procedió a la adaptación y ajuste de métodos existentes, mediante la modificación de parámetros, unidades de análisis y niveles de resolución espacial, con el fin de adecuarlos a las condiciones ambientales, territoriales y socio-ambientales específicas del área de estudio.

Estos ajustes metodológicos facilitaron el desarrollo de un enfoque propio e innovador para la estimación de la fragmentación forestal, además permitieron establecer rangos operativos que vinculan de manera directa los patrones de fragmentación forestal con la capacidad de carbono capturado de los ecosistemas analizados. En consecuencia, se logró construir un marco analítico robusto, sustentado tanto en evidencia empírica como en referentes teóricos actuales, que contribuye a una mejor comprensión de la relación entre degradación del paisaje forestal y funcionalidad ecológica, particularmente en el contexto de áreas naturales protegidas.

1. Fundamentos Teóricos-conceptuales de la Propuesta Teórica-metodológica

La presente investigación se fundamentó en las siguientes teorías, disciplinas científicas y conceptos, las cuales establecen las bases para describir y explicar las relaciones entre los elementos que conforman los ecosistemas forestales, a continuación, se describen cada fundamento teórico en cada postulado de las diferentes teorías.

Teoría General de Sistemas

La Teoría General de Sistemas, permitió estudiar las relaciones ambientales de los parques nacionales del Estado de México bajo su perspectiva holística e integradora Bertalanffy (1976) menciona, que la teoría representa un esfuerzo de estudio interdisciplinario que trata de explicar las relaciones comunes entre subsistemas que se presentan en todos los niveles de la realidad (Morales, 2022).

En el diagrama 6 podemos observar un esquema que representa a los parques nacionales como sistemas socio-ambientales complejos, integrados por múltiples subsistemas interdependientes, entre los que destacan los ecosistemas naturales, las dinámicas sociales, los factores institucionales, y los procesos biofísicos.

Desde las Ciencias Ambientales ofrecen una visión integradora al estudiar las interacciones entre componentes bióticos y abióticos, así como los impactos antrópicos sobre el entorno. En el caso de los parques nacionales, estas ciencias permiten:

- Analizar los flujos de energía y materia entre los ecosistemas internos del parque.
- Evaluar el estado de conservación y fragmentación de los diferentes ecosistemas.
- Medir la capacidad de resiliencia ecológica, así como la prestación de servicios ambientales (como captura de carbono, regulación hídrica, conservación de biodiversidad).
- Identificar los impactos ambientales derivados de actividades humanas, como el turismo, la tala o el cambio de uso de suelo.

Las Ciencias Ambientales actúan como un puente entre lo ecológico y lo social, permitiendo una interpretación holística del territorio.

Desde las Ciencias Sociales, en particular la geografía humana, la antropología, la sociología y la economía ecológica, aportan herramientas clave para analizar los procesos sociales, culturales y económicos que inciden en los parques nacionales.

- Las relaciones entre comunidades locales y el entorno natural, incluyendo sistemas de gobernanza, conflictos ambientales y modelos de manejo comunitario.
- Los efectos del turismo, la migración o la urbanización sobre el territorio.
- La forma en que las políticas públicas y la normativa ambiental influyen en la gestión territorial y la conservación.

- La construcción social del valor de la naturaleza, el patrimonio biocultural y la participación ciudadana en la protección de áreas naturales.

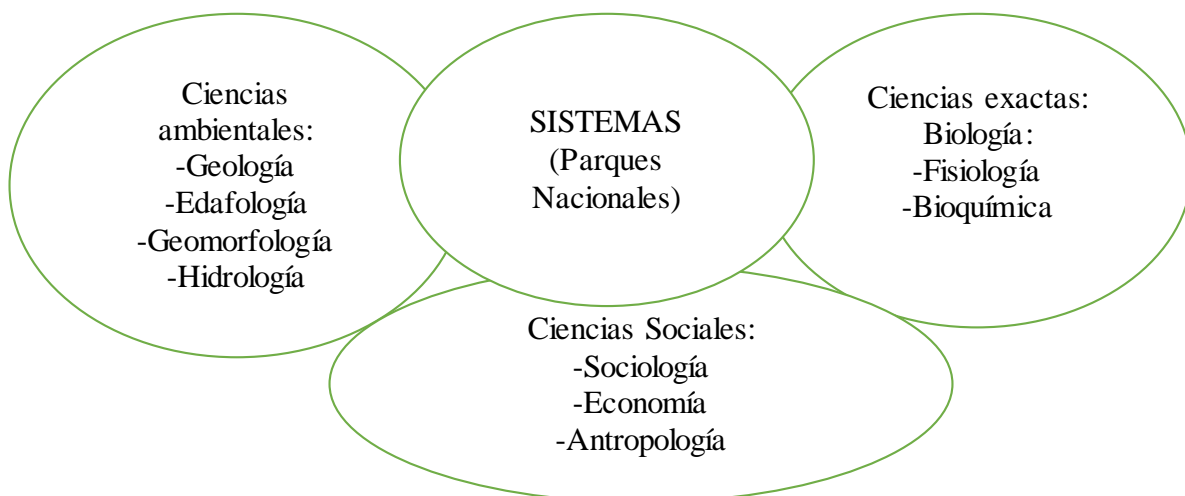
Estas ciencias permiten entender a los parques como espacios socio-territoriales, en conflictos de intereses, narrativas y disputas por el uso del territorio.

Las Ciencias exactas, como la biología, la química, la física y la matemática aplicada, proporcionan las bases técnicas y cuantitativas para modelar y comprender con precisión los procesos naturales y su variabilidad. En el contexto de los parques nacionales, contribuyen a:

- Elaborar modelos matemáticos y estadísticos que simulan la dinámica de los ecosistemas o la evolución del cambio de cobertura forestal.
- Aplicar la teledetección, sensores remotos y SIG para monitorear el uso del suelo, la deforestación y la biodiversidad.
- Estudiar los procesos bioquímicos del suelo y el agua, así como la calidad del aire y de los cuerpos hídricos.

Su precisión técnica es fundamental para la toma de decisiones basada en evidencia científica.

Diagrama 6. Análisis multidisciplinario de los parques nacionales como un sistema

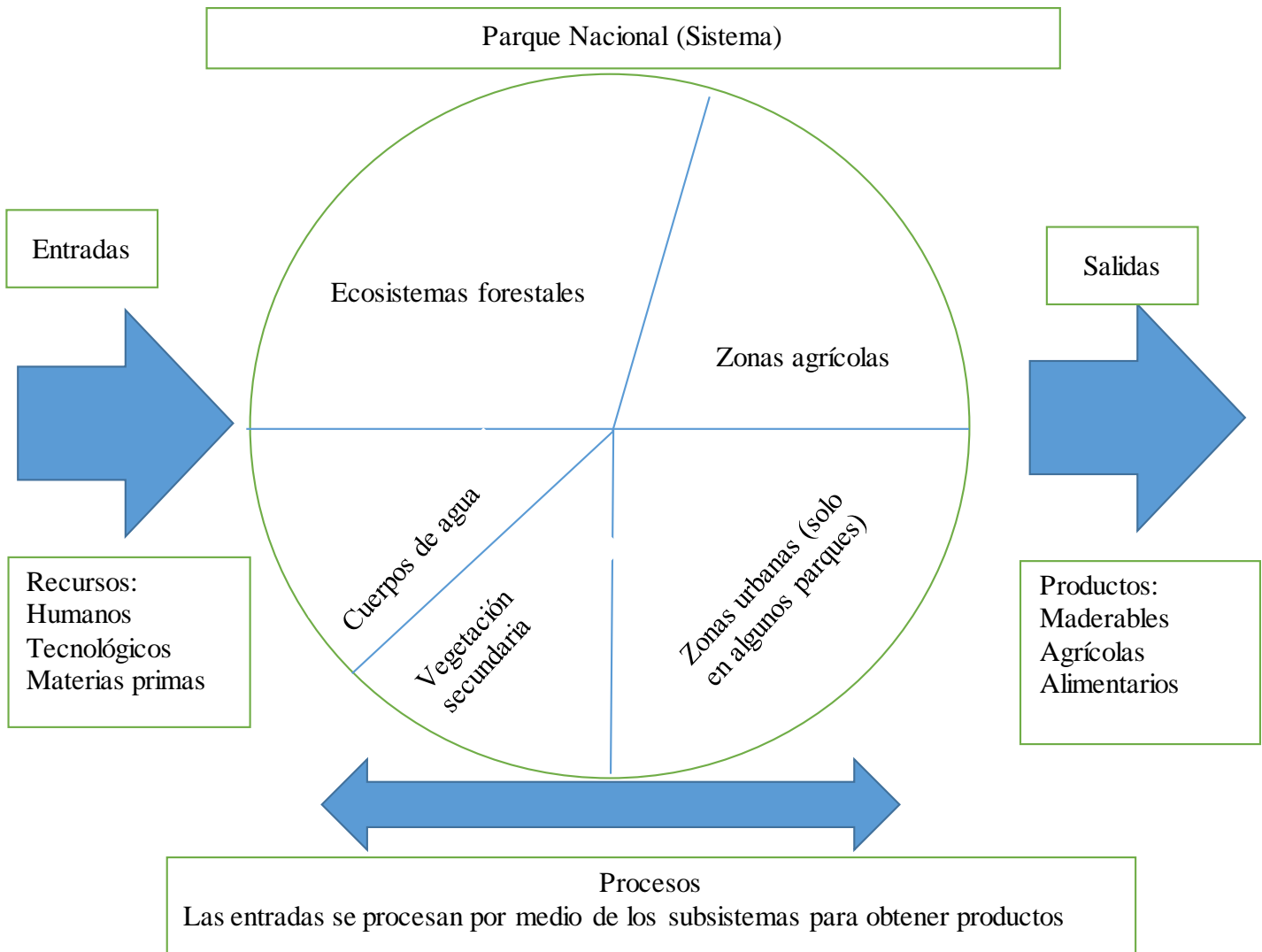


Elaboración propia con base en Morales, (2022).

La TGS aportó los fundamentos teóricos bajo el paradigma sistémico, que cada parque nacional está compuesto de sistemas de menor tamaño conformado por elementos que están en constante interacción, bajo los principios de la TGS, la investigación se basó en un enfoque sistémico complejo donde el estudio es analizado desde diferentes perspectivas, como resultado de un estudio holístico e integral, en este sentido, la investigación represento un esfuerzo por comprender las relaciones que existen entre ambientes naturales y sociales dentro de los parques nacionales, con el objetivo de identificar los problemas ambientales que se generan a partir de las relaciones entre ambos sistemas (Arnold y Rodríguez, 1990). De acuerdo a Arnold, (1989) los parques nacionales pueden integrarse como un macro ecosistemas conformado de elementos, las interrelaciones generadas dentro de un parque es la dependencia que tiene un subsistema del otro.

Se estudió cada parque nacional analizando cada componente (subsistemas), considerando que cada ecosistema forma parte integral del parque, cada ecosistema recibe insumos (entradas), que pueden ser personal especializado, tecnología o recursos naturales, los cuales son procesados al interior del ecosistema. Como resultado de estos procesos, se obtienen productos o servicios (salidas), que pueden incluir bienes tangibles como madera o alimentos, y también intangibles como regulación climática o valor paisajístico (Diagrama 7).

Diagrama 7. Estructura Sistemática de un Parque Nacional.



Elaboración propia con base en Arnold y Rodríguez, (1990).

Teoría de Sistemas Complejos (TSC).

La Teoría de los Sistemas Complejos analiza los procesos de degradación ambiental, integrando aspectos políticos, económicos y sociales para un establecer un análisis segmentado identificando el funcionamiento de cada elemento. La TSC en la realidad empírica carecen de límites claros, tanto en su extensión geográfica como en su problemática, por lo que se considera que se trata de sistemas abiertos difusos, donde es necesario establecer recortes o límites relativamente arbitrarios para construir el sistema que se quiere estudiar (Buckley, 1973).

En el mundo real las situaciones y los procesos no pueden ser relacionados exclusivamente con alguna disciplina, dado que son una realidad compleja. En este contexto un sistema complejo es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizada como una totalidad organizada. Cada parque cuenta con diferentes elementos o subsistemas para el caso de la investigación son los diferentes ecosistemas identificados en la cartografía (bosques y usos de suelo) mismos que lo hacen único e irrepetible, pero de igual forma comparten características y similitudes en los objetivos por los que están en esta categoría de ANP, que se caracterizan, de manera principal, por que presentan dinámicas irreversibles, súbitas, imprevisibles, aperiódicas (Rodríguez y Arnold, 1991).

Disciplinas y conceptos que sustentaron la investigación

Las Ciencias Ambientales

Es una ciencia holista que es capaz de articular las síntesis conceptuales y metodológicas de distintas disciplinas en diversos aspectos micros o particulares. Basa sus objetivos de estudio en los efectos sobre los seres vivos como centro de las problemáticas ambientales (Giannuzzo, 2010).

Bajo este contexto, el objetivo de las CA puede definirse como la búsqueda de conocimiento nuevo, derivado del análisis y explicaciones en el ámbito social y ambiental. Dentro de sus principales características, es la relación directa con la calidad de vida humana, apoyada la sustentabilidad del funcionamiento, a corto y largo plazo. Para el caso de esta investigación las Ciencias Ambientales permitieron estudiar los parques nacionales desde un enfoque multidisciplinario e integrador, ya que estos espacios implican tanto componentes naturales como sociales, económicos y políticos específicamente en el diagnóstico integral donde se identificaron los principales problemas que afectan directamente la conservación del área de estudio.

La Geografía Ambiental

Es una disciplina que estudia el hábitat natural y las relaciones existentes dentro o fuera del medio natural en el espacio y el tiempo, con el objetivo de mantener la protección del medio ambiente.

Su objeto de estudio se centraliza en las variantes que se producen en la relación sociedad/naturaleza, de las cuales derivan consecuencias que inciden en los factores económicos y sociales, generando cambios a mayor escala que los procesos naturales en un tiempo y espacio dados (Cervantes et al. 2014).

La geografía ambiental asocia las disciplinas, sin que ninguna de ellas tenga una superioridad o jerarquía preponderante, dado que la complicación de los problemas ambientales requiere la visión compleja para poder explicar los diversos ámbitos y dimensiones, a partir de un problema ambiental (Cervantes et al. 2014).

Para el presente estudio la geografía ambiental permitió analizar desde una perspectiva integral los parques nacionales, tomando en cuenta dimensiones espaciales, ecológicas y humanas. Este enfoque se centra en analizar las relaciones entre el territorio, el medio ambiente y las actividades humanas, fue fundamental para comprender los procesos de transformación del paisaje.

Un ejemplo representativo es el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, que presenta cambios de uso del suelo en zonas de accesos turísticos vinculado a la expansión de infraestructura recreativa, caminos y servicios para visitantes.

Estas transformaciones han producido alteraciones significativas en los servicios ambientales que ofrecen los bosques del parque, como la regulación del microclima, captación de agua para el Valle de México y la conservación de especies endémicas, generando desequilibrios ecológicos y presiones sobre la biodiversidad local.

Ecología

La ecología es considerada una disciplina científica, cuyo objetivo principal es el análisis de las condiciones y relaciones que forman el hábitat del conjunto y de cada uno de los seres de la Naturaleza” (Milián, 2007). Estudia científicamente las “interacciones que determinan la distribución y abundancia de los organismos”, teniendo en cuenta a los seres vivos y los ecosistemas en los que se desarrollan (Bermúdez y De Longi, 2008).

En este sentido, desde la perspectiva de la ecología, la tala clandestina en los parques nacionales se entiende como un factor de perturbación que altera el equilibrio de los ecosistemas y desencadena una serie de impactos negativos tanto a corto como a largo plazo.

Ejemplo de ello, el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, ubicado entre los estados de Morelos y el Estado de México, es un área natural protegida de gran importancia ambiental, presenta una diversidad de ecosistemas forestales como el oyamel, el pino y el encino, funciona como una importante zona de recarga hídrica para la Cuenca del Valle de México. Sin embargo, en las últimas décadas ha sido afectado por un proceso creciente de tala clandestina, lo que ha desencadenado una serie de impactos ecológicos graves.

Desde el enfoque ecológico, la tala clandestina ha provocado la fragmentación progresiva del bosque, reduciendo la conectividad ecológica necesaria para especies que requieren amplios territorios, como el zacatuche (*Romerolagus diazi*) y diversos mamíferos medianos. Además, al talar árboles de gran porte, se altera el microclima del sotobosque, afectando la regeneración natural y el ciclo de nutrientes del suelo.

También existe un descenso en la calidad y cantidad de agua disponible en las lagunas y manantiales del parque, ya que la tala masiva interrumpe los procesos de captación e infiltración hídrica. Esto afecta no solo al ecosistema local, sino también a comunidades aguas abajo que dependen de este recurso.

Desde el punto de vista ecológico aplicado, se considera que la capacidad de resiliencia del parque ha sido rebasada en algunas zonas, lo que exige medidas urgentes de restauración y manejo adaptativo. En este contexto, la ecología no solo

permite identificar los impactos ambientales de la tala clandestina, sino también proponer modelos de restauración ecosistémica, monitoreo de biodiversidad y planes de manejo basados en indicadores ecológicos que consideren la fragilidad del ecosistema y su capacidad de recuperación.

Servicios Ecosistémicos (SE).

Los servicios ecosistémicos 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. La MEA agrupa los SE en cuatro categorías, servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales con la intención de facilitar la toma de decisiones (MEA, 2005).

Captura de carbono

Dentro de los SE de soporte se encuentra la captura de carbono que se puede definir como la incorporación dióxido de carbono (CO₂) a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis, para formar todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (Ordóñez, 1999).

Los bosques son fundamentales en el ciclo de carbono al absorber y retener CO₂ atmosférico, el cual en parte fluye de nuevo a la atmósfera en los procesos de respiración de la vegetación y el suelo. Existe un ciclo del carbono sumamente complejo debido a que los flujos y tiempos de residencia del carbono es diferente dependiendo la estimación de los flujos netos de carbono entre los bosques y la atmósfera (IPCC, 2014).

Los servicios ambientales que producen los ecosistemas forestales contribuyen a eliminar el carbono del ambiente y almacenarlo, conforme aumenta el deterioro ambiental, también crece la preocupación en grandes sectores de la población por encontrar herramientas para revertir estas tendencias negativas, tomando en cuenta los problemas sociales y económicos específicos de cada sociedad.

Principales causas de pérdida 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).

En la pérdida de los ecosistemas forestales influyen diferentes factores como plagas, tala ilegal, quema forestal o cambio de uso de suelo entre muchas otras. La degradación de los ecosistemas forestales 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.

Fragmentación en los ecosistemas forestales

La fragmentación es la transformación de un bosque continuo en unidades más pequeñas y aisladas entre sí, cuya área resultante es menor a la del bosque original. La fragmentación es un proceso que permite analizar el deterioro de la cobertura forestal, conocer el grado de segmentación y la dinámica que se está presentando para su pérdida y así poder relatar las modificaciones en el patrón del hábitat a lo largo del tiempo (Bustamante & Grez, 1995).

La conversión de los hábitats naturales es la causa más grande de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y alteraciones del ciclo hidrológico, el balance entre hábitat y paisaje humano (MAE, 2015).

Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La percepción remota es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, las aplicaciones para las imágenes satelitales son una fuente global de recursos para los gobiernos, las empresas y los ciudadanos particulares, los SIG y la teledetección, permiten estimar los cambios asociados a procesos de degradación de los ecosistemas forestales.

2. Fundamentos metodológicos de la propuesta teórica-metodológica.

Primera etapa metodológica: Caracterización geográfica ambiental en los Parques Nacionales del Estado de México

La primera etapa metodológica se fundamentó en la Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental por su perspectiva holística e integradora lo que permitió relacionar procesos metodológicos aplicados con otros sitios similares al área de estudio.

En este sentido, se analizaron múltiples estudios que emplean diversos enfoques y metodologías; sin embargo, se identificó un vacío significativo de información en relación con la identificación integral de problemáticas ambientales, particularmente aquellas que consideren un diagnóstico que priorice la dimensión socio-ambiental de manera articulada.

Para tener un contexto legal se integró un marco jurídico, donde se identificaron las diferentes leyes y reglamentos que protegen legalmente los parques nacionales, conforman el instrumento de política ambiental con mayor definición jurídica para la conservación de la naturaleza dentro de las categorías establecidas por la CONANP, (2008).

Las Ciencias Ambientales constituyen un campo fundamental para el análisis de las relaciones entre el ser humano y la naturaleza, al permitir la comprensión de cómo las actividades antrópicas inciden en los sistemas ecológicos. Este enfoque posibilita el estudio integral de los procesos que generan impactos negativos directos sobre los ecosistemas y, a partir de ello, proporciona fundamentos científicos para el diseño de propuestas orientadas a la sostenibilidad. La articulación entre las Ciencias Ambientales y las Ciencias Sociales resulta indispensable para abordar de manera eficaz los problemas socioambientales, ya que cada disciplina contribuye con marcos teóricos, metodológicos y criterios analíticos que, al complementarse, enriquecen significativamente la comprensión y el abordaje de las problemáticas ambientales (Saavedra, 2014).

La Geografía del paisaje como ciencia multidisciplinaria fundamentó el análisis de la localización de los procesos ambientales que se desarrollan en la el área de estudio. El estudio de las actividades antrópicas están condicionadas por el entorno geográfico y sus características físicas, dichas condiciones geográficas pueden

favorecer la adquisición de materias primas para generar transformaciones en su entorno, las entradas a los parques pueden ser de diferente índole tangible o intangible ejemplo de ello son las actividades turísticas que ofrece cada parque, en casos como el PNIMHC repercuten directamente con la transformación del paisaje, para acondicionar los espacios para dichas actividades como paseos a caballo y motocicletas, campamentos entre otros (Cervantes *et al.* 2014).

Segunda etapa metodológica: Identificación de los ecosistemas forestales presentes en los Parques Nacionales del Estado de México

Para la segunda etapa metodológica fue necesario identificar las principales características físicas y ambientales de cada parque, se establecieron los procesos a seguir para la identificación de los ecosistemas forestales en el área de estudio para ello se tomaron en cuenta cuestiones tecnológicas referentes a percepción remota y a los sistemas de información geográfica

Chuvieco (2002), menciona que la percepción remota es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre, desde esta perspectiva la etapa mencionada se desarrolló bajo los lineamientos establecidos en el marco teórico donde se incluyen variables atmosféricas. Posterior al procesamiento de imágenes de satélite los SIG facilitaron la manipulación para la obtención y análisis de los productos cartográficos.

Una vez identificados los ecosistemas forestales presentes en cada parque nacional se procedió a describir sus principales características físicas y sociales, a través de principios teóricos de la ecología forestal como lo son la interdependencia, el reciclaje, el flujo de la energía del sol, la asociación, la flexibilidad, la diversidad, la co-evolución, y como consecuencia de ellos, la sostenibilidad Capra & Pauli, (1995), el estudio de los bosques se analizó a una escala de paisaje, se identificaron características del ambiente en diferentes zonas lo que permitió tener una visión a mayor detalle de lo complejo que de los ecosistemas forestales y sus procesos de desarrollo.

Los ecosistemas forestales están conformados por árboles en su estructura ecosistémica presentan ambientes acuáticos y terrestres, son sistemas complejos para comprender lo anterior Pineda, (2009) menciona que la cubierta forestal es el conjunto de plantas que cubren el suelo, desde los árboles hasta el estrato inferior

del sotobosque. Es importante entender que la degradación de los ecosistemas forestales se genera a partir de diversas causas de las principales destaca la pérdida de la masa forestal, sin embargo la FAO (2006), enlista las enfermedades y plagas de forma natural, además las generadas por desastres naturales, como deslizamientos, por otra parte, los generados por las actividades humanas incluyen, la deforestación por tala clandestina e incremento de la frontera agrícola y expansión de las zonas urbanas industriales y turísticas.

Tercera etapa metodológica: Análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México

Para el desarrollo de la tercera etapa metodológica se tomaron en cuenta los trabajos de Andrén, (1994) donde menciona que, el proceso de fragmentación forestal permite analizar el deterioro de la cobertura forestal, identificar el grado de segmentación y las modificaciones en el patrón del hábitat a lo largo del tiempo, lo anterior permitió identificar las zonas de mayor degradación ambiental en el área de estudio. La transformación de los ecosistemas forestales genera alteraciones del ciclo hidrológico, aumenta la erosión del suelo y modifica el paisaje natural, el análisis de la fragmentación forestal es fundamental para identificar zonas prioritarias de atención y conservar la diversidad forestal en los Parques Nacionales del Estado de México.

Cuarta etapa metodológica: Análisis del Servicio Ecosistémico de soporte captura de carbono

Para entender el proceso de captura de carbono se retomaron diversos autores como Ordóñez (1999), quien menciona que la captura de carbono es todo proceso, actividad o mecanismo que sustrae de la atmósfera un gas de efecto invernadero, un aerosol, en los ecosistemas forestales está compuesto por flujos y almacenes que se relacionan principalmente con la dinámica de hojarasca.

El ciclo del carbono es complejo por los flujos y tiempos de residencia del carbono es diferente dependiendo el escenario. En este marco el carbono capturado por los ecosistemas forestales permite comprender la importancia que tienen los bosques para los seres vivos. Es importante destacar que para el caso de estudio el análisis de este servicio ecosistémico permitió cuantificar las toneladas almacenadas por ecosistema forestal en el área de estudio (IPCC, 2014).

3. Propuesta Teórica Metodológica (Relaciones entre los Fundamentos Teóricos y los Fundamentos Metodológicos)

Contexto Jurídico de las Áreas Naturales Protegidas en México

En la primera etapa metodológica, el contexto jurídico de las Áreas Naturales Protegidas en México se constituyó de diversas leyes y normas a partir del decreto de cada parque, teniendo en cuenta que solo 3 de los 9 parques cuentan con un plan de manejo, fue fundamental integrar un marco jurídico del cual se deriven alternativas de solución para estudios posteriores.

El contexto Jurídico de los parques nacionales en México para esta investigación fundamentó las bases legales que tiene cada parque desde el momento de ser decretado como Parque Nacional, con el principal objetivo de identificar los Parques Nacionales que cuentan con un instrumento de política ambiental que regule las actividades y contribuya a la conservación ambiental de estos espacios.

Por otra parte, para los parques que no cuentan con un plan o programa de manejo existen leyes y reglamentos que regulan las actividades humanas en términos legales dentro de un Área Natural Protegida entre otras acciones.

La Teoría General de Sistemas

La Teoría General de Sistemas aplicada al Sistema Ambiental fundamentó el estudio bajo el paradigma sistémico, que cada parque nacional está compuesto de sistemas de menor tamaño entendiendo que cada ecosistemas identificado corresponde a un subsistema que a su vez está compuesto de elementos que están en constante interacción ejemplo de ello es los ecosistemas forestales con la retención del suelo, la cobertura vegetal previene la erosión y ayuda a la infiltración de agua para los mantos freáticos esto se describe a mayor detalle en la segunda y tercera etapa metodológica, se retomaron estas variables para clasificar los diferentes ecosistemas identificados en cada parque nacional. Cabe señalar que estos sistemas son abiertos lo que genera que elementos externos tengan efectos tanto negativos como positivos.

A continuación se explica la relación de los parques nacionales con base a los principios de la TGS de acuerdo con: Bertalanffy (1976).

- Los sistemas existen dentro de otros sistemas: el sistema general es representado por cada parque nacional mientras que los subsistemas son representados por los ecosistemas forestales y usos del suelo.
- Los sistemas son abiertos: los parques nacionales y subsistemas (ecosistemas) tienen entradas y salidas
- Las funciones de un sistema dependen de su estructura: en cada parque nacional los ecosistemas tienen jerarquías de mayor peso que otros, ejemplo un ecosistema forestal puede subsistir sin usos de suelo como la agricultura y el uso urbano.
- El todo es más que la suma de sus partes: cada ecosistema por separado es fundamental, pero la unión de todos permite el equilibrio ambiental y ecológico dentro de un parque nacional.

La investigación se basó en un enfoque sistémico complejo donde el estudio es analizado desde diferentes perspectivas, como resultado de un estudio holístico e integral, en este sentido, la investigación representó un esfuerzo por comprender las relaciones que existen entre ambientes naturales y sociales dentro de los parques nacionales, con el objetivo de identificar los problemas ambientales que se generan a partir de las relaciones entre ambos sistemas.

Por otra parte, la Teoría de Sistemas Complejos (TGS) con base a sus principios y fundamentos se definieron los elementos necesarios que permitieron establecer la discusión teórica empírica, el funcionamiento de cada subsistema es diferente por la complejidad y propiedades de sus elementos, es decir cada Parque Nacional analizado tiene particularidades distintas, por el simple hecho de su ubicación geográfica.

En este contexto, la TGS permitió acotar el problema a estudiar, en la segunda etapa metodológica, se identificaron los distintos ecosistemas que conforman cada ANP, sin embargo, cabe resaltar que esta clasificación se generalizó.

La Teoría de Sistemas Complejos (TSC)

La Teoría de Sistemas Complejos permitió estudiar los parques nacionales con un grado de complejidad por los elementos que lo constituyen y su interacción además de los factores externos que interviene dentro de estos espacios como el sistema social y económico bajo los siguientes principios de acuerdo con García, (2024)

- Los sistemas están compuestos por relaciones: cada subsistema del parque depende de algunos otros elementos como el clima, suelo, hidrología, fisiografía para tener un desarrollo óptimo.
- Los sistemas tienen procesos de equilibrio: un subsistema forestal fragmentado puede recuperarse mediante alternativas de solución y con el paso del tiempo sin llegar a ser el mismo.
- Los sistemas tienen resistencia al cambio: algunos subsistemas pueden ser transformados en gran parte de su totalidad pero seguir manteniendo su funcionamiento, ejemplo de ello son los bosques fragmentados, pueden seguir teniendo un papel fundamental para el equilibrio del área de estudio y seguir produciendo servicios ambientales.
- Los sistemas tienen límites o fronteras: cada subsistema cuenta con límites sobre otros ecosistemas.
- Los sistemas tienen el potencial de cambiar mediante sus relaciones externas: las entradas pueden ser negativas o positivas pero repercuten de alguna forma en los ecosistemas que constituyen el parque.
- La complejidad de un sistema está ligada a que los elementos y procesos pertenecen a distintas disciplinas: dentro de los ecosistemas se pueden situar factores sociales como localidades y zonas de comercio.

Las Ciencias Ambientales (CA)

Las Ciencias Ambientales, en la cuarta etapa metodológica permitió realizar un análisis para entender las interacciones en el sistema social que han impactado en el medio natural, se identificaron los procesos de degradación ambiental bajo un enfoque holístico entendiendo que el objeto de estudio está conformado de diferentes elementos que cuentan con características propias.

La Geografía Ambiental

La Geografía Ambiental en la quinta etapa metodológica bajo sus principios como ciencia multidisciplinaria permitió comprender la relación que existe entre el ser humano y la naturaleza en un espacio geográfico

La geografía ambiental se basa en principios que permiten comprender la interacción entre la naturaleza y la humanidad. Estos principios son los siguientes de acuerdo con (Bocco y Urquijo, 2013).

- **Interacción:** Examina cómo los elementos naturales, como el clima, el suelo y la vegetación, interactúan con las actividades humanas. Para el caso de los parques las relaciones existentes de las actividades sociales repercuten directa o indirectamente con la conservación de los espacios naturales.
- **Sostenibilidad:** Analiza cómo los desarrollos actuales pueden satisfacer las necesidades actuales sin comprometer las generaciones futuras. La sobre explotación de los recursos maderables que ofrecen los ecosistemas forestales pueden colapsar en su desarrollo natural para próximas generaciones.
- **Cambio:** Observa cómo los eventos naturales y humanos pueden alterar los paisajes geográficos, los cambios de uso de suelo dentro de los parques transforma negativamente el paisaje natural que ofrecen cada ANP.

La geografía ambiental estudia la alteración del medio natural debido a la acción humana. Esto incluye la destrucción, deterioro, sobreexplotación o contaminación a través de la actividad agrícola, industrial, las guerras, el turismo o la contaminación urbana. Por otra parte, la Geografía Ambiental contribuyó a sustentar la investigación bajo las características socio-ambientales con el objetivo de analizar la relación de las actividades antropogénicas en el ambiente y como intervienen directamente en la degradación ambiental de ANP, partiendo que el hombre por naturaleza tiene necesidades básicas de subsistencia como el alimento. De igual forma, depende de que los ecosistemas naturales mantengan un funcionamiento adecuado para que proporcionen servicios ambientales.

La ecología forestal

La Ecología se define como el estudio de la estructura y función de la naturaleza así como las interacciones que determinan la distribución de los organismos (Krebs 2008). La ecología fue la base para entender los subsistemas en los ecosistemas forestales en la segunda y tercera etapa metodológica mediante sus principios que de acuerdo a Krebs (2008) son los siguientes:

- Conservación: Mantener y mejorar las funciones del bosque, como la captura de carbono y la regulación del clima.
- Biodiversidad: Proteger la diversidad de especies y sus ciclos de vida.
- Sucesión ecológica: Comprender cómo cambia la organización de la comunidad biológica con el tiempo.
- Interdependencia: Reconocer que los organismos y el medio ambiente están relacionados.
- Resiliencia: Garantizar la capacidad de los bosques para adaptarse y sobrevivir.
- Sostenibilidad: Contribuir a la sostenibilidad ambiental, social y económica.

La ecología forestal parte del estudio de los ecosistemas forestales tanto a escala de rodal como de paisaje, para el caso de esta investigación solo se estudió de manera general, con el objetivo de clasificar los ecosistemas forestales de acuerdo a (CONAFOR 2018), para el caso del marco teórico aportó fundamentos y definiciones para entender la estructura de las comunidades o unidades de vegetación dominada por árboles, esto implica que la cobertura es mayormente arbórea.

Los Servicios Ecosistémicos

El desarrollo del concepto de los Servicios Ecosistémicos (SE) ayudo a conceptualizar la definición acorde para la investigación pero también permitió dar un panorama de la clasificación en México y el mundo, cómo ha ido evolucionando a lo largo del tiempo en torno al incremento de los impactos al medio natural y la preocupación global por resolverlos.

En el marco teórico conceptual se retomó la clasificación de la MEA donde la captura de carbono forma parte de la su clasificación de los servicios ecosistémicos

de soporte por sus funciones dentro del ecosistema, estrechamente relacionadas con la capacidad de los procesos e implicaciones directas sobre el bienestar humano.

Dentro del marco teórico se incluyó la clasificación propuesta por la (MEA) en 2005, incluye servicios de soporte, regulación, aprovisionamiento y culturales con la intención de dar el panorama claro donde se ubica la captura de carbono y cuál es su función dentro de un ecosistema forestal en un parque nacional. En este sentido, la captura de carbono está estrechamente relacionada con los ecosistemas forestales, en el marco teórico se define como la incorporación dióxido de carbono (CO_2) a los procesos metabólicos de las plantas mediante la fotosíntesis para la generación de oxígeno en términos generales.

Cabe resaltar, que en este apartado se explica cómo es el mecanismo y funcionamiento del ciclo del carbono que posteriormente en la cuarta etapa metodológica, se obtuvieron datos del carbono capturado por ecosistema forestal en los 9 parques que conforman el área de estudio.

Es importante mencionar que bajo la escala utiliza para el análisis de la fragmentación forestal, se alcanzaron niveles de detalle óptimos para este tipo de estudio, pero solo es una representación de la realidad que bajo la metodología aplicada contempla márgenes de error en los datos presentados en los resultados y en la cartografía.

Una vez identificados los ecosistemas forestales en la tercera etapa metodológica fue necesario darles una clasificación y describirlos para ello fue necesario tener conocimiento de los elementos generales de los componentes que existen en cada tipo de ecosistema, para ello se describieron en el marco teórico los diferentes tipos de ecosistemas formulando los propios de esta manera establecer la clasificación más adecuada para cada parque nacional.

Cada parque cuenta con sus propias particularidades y factores de degradación ambiental, en este sentido en la cuarta etapa metodológica se realizó un análisis cuantitativo de cuál es la captura de carbono tomando en cuenta la densidad forestal y cuáles son las principales causas de la pérdida de ecosistemas forestales en cada ANP del área de estudio.

Por otro lado, el análisis de las principales causas de la fragmentación de los ecosistemas forestales fue esencial para comprender el estado actual de conservación de cada tipo de ecosistema presente en el parque. Este análisis permitió identificar no solo los factores directos que provocan dicha fragmentación, sino también sus consecuencias ecológicas y territoriales.

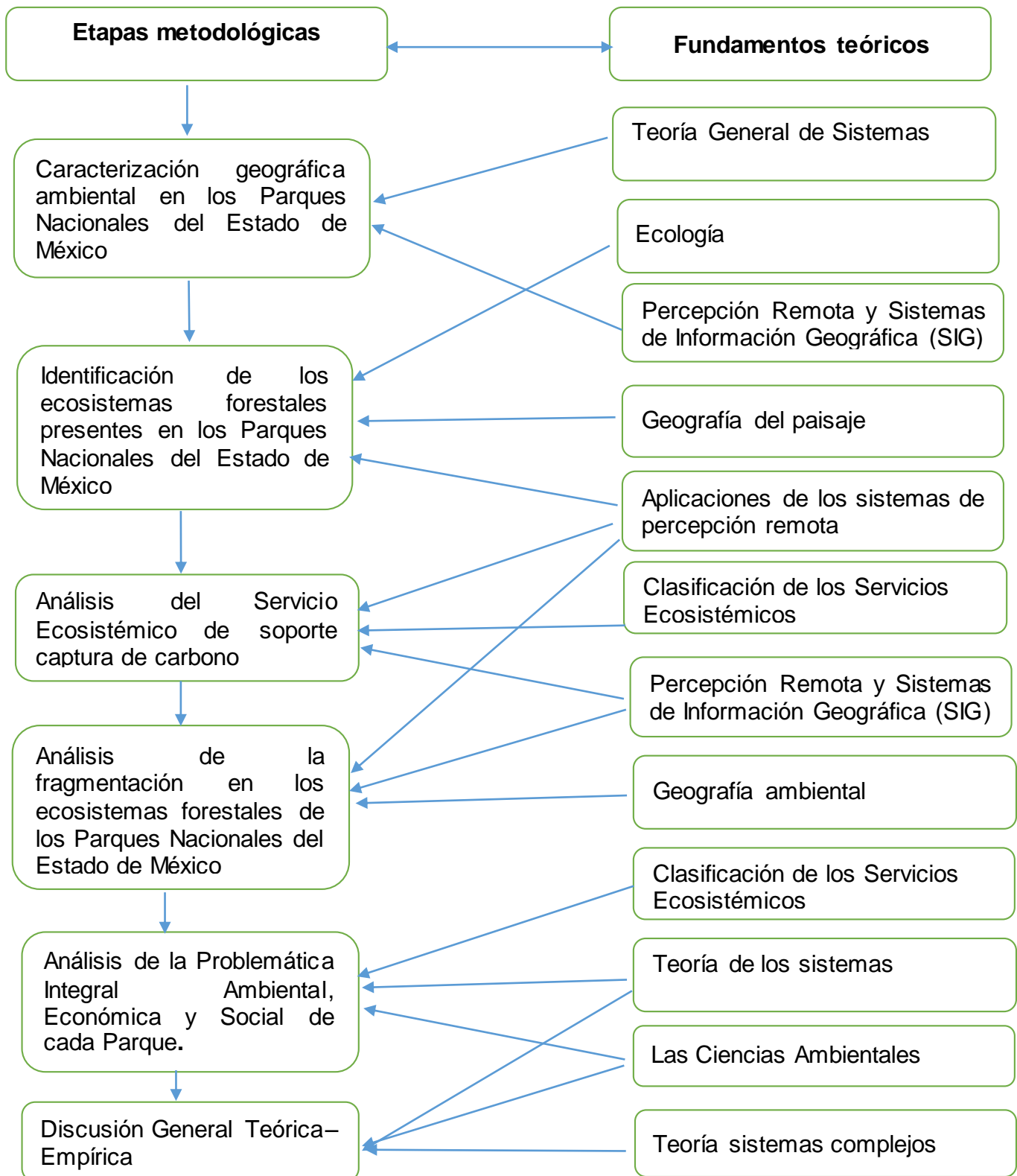
En el apartado de discusión se profundiza en cómo este fenómeno afecta negativamente la provisión de servicios ecosistémicos, al estar estrechamente vinculado con procesos ecológicos clave. Asimismo, se expone cómo esta problemática trasciende lo ambiental, impactando también en los ámbitos social y económico, como se detalló previamente en el diagnóstico de los principales conflictos en cada parque nacional.

La fragmentación en los ecosistemas forestales

La fragmentación de los ecosistemas forestales fue un elemento clave para definir los rangos de clasificación utilizados en la cartografía desarrollada durante la quinta etapa metodológica. Con base en las variables y factores específicos de cada ecosistema, se revisaron y ajustaron los rangos propuestos por la CONAFOR (2005), los cuales fueron contrastados con las referencias teóricas establecidas en el marco conceptual del estudio. Este enfoque permitió generar una representación cartográfica más precisa y detallada, tanto en términos visuales como en la calidad de los datos utilizados.

De manera general se abordó en las etapas tercera y cuarta de la metodología, donde se analizó la interacción de factores físicos, químicos, biológicos, sociales, económicos y culturales, todos ellos interconectados. Bajo este enfoque sistémico, cualquier alteración en uno de estos factores repercute directamente en los demás, lo que refuerza la necesidad de considerar de manera integral las variables ambientales descritas en cada apartado del análisis. Las relaciones entre los fundamentos teóricos y los fundamentos metodológicos de la Propuesta Teórica Metodológica, se presentan de forma esquemática en el Diagrama 8.

Diagrama 8. Relaciones entre los fundamentos teóricos-conceptuales y los fundamentos metodológicos de la propuesta teórica metodológica.



Fuente: elaboración propia.

VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA TEÓRICO- METODOLÓGICA

La validación de la propuesta teórico-metodológica se llevó a cabo mediante una revisión crítica y sistemática de literatura especializada, con el objetivo de contrastar los supuestos teóricos y enfoques metodológicos propuestos en esta investigación con los empleados en estudios previos de naturaleza y escala similar. Se seleccionaron investigaciones relevantes que compartieran enfoques conceptuales análogos y condiciones ambientales comparables, lo cual permitió establecer un marco de análisis para identificar similitudes, divergencias y oportunidades de mejora en la construcción de esta propuesta.

Este ejercicio comparativo permitió evaluar la coherencia y pertinencia de los métodos utilizados por otros autores en el campo de estudio. A partir de este análisis, se pudo determinar con fundamentos sólidos la idoneidad del marco teórico adoptado, en función de su capacidad explicativa y operativa para abordar la problemática ambiental específica planteada. La elección de este marco respondió a una evaluación rigurosa de su aplicabilidad en contextos ambientales complejos, y a su potencial para integrarse de forma coherente con las herramientas metodológicas empleadas, especialmente aquellas orientadas al análisis espacial, la fragmentación del paisaje y la estimación de servicios ecosistémicos.

Asimismo, esta validación permitió ajustar variables, escalas y categorías analíticas, de tal manera que el diseño metodológico final tuviera robustez teórica, viabilidad operativa y relevancia científica, alineándose con los estándares actuales de investigación interdisciplinaria en el ámbito de las ciencias ambientales.

DISCUSIÓN GENERAL

Al concluir los resultados de las etapas metodológicas fue posible elaborar la discusión teórica empírica, se compararon los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados reportados por diferentes autores, los cuales fueron incluidos en el marco teórico.

El desarrollo del marco teórico permitió analizar las teorías que fueron la base para realizar el análisis y comparación de los resultados, la TGS bajo sus fundamentos teóricos contribuyó a describir las relaciones ambientales, sociales y culturales existentes dentro de los parques nacionales, se retomaron principios de la teoría de socialidad para explicar el comportamiento del ser humano dentro de estos espacios naturales, entendiendo sus necesidades así como sus responsabilidades morales para la conservación de los recursos naturales que brindan las ANP

La Teoría de Sistemas Complejos permitió contrastar los resultados identificando los elementos de cada ecosistema y su relación con la producción del carbono capturado en cada tipo de bosque, por otra parte, se realizó un análisis de las características físicas que debido a los aspectos geomorfológicas como valles y barrancos por sus altitudes o pendientes brindan barreras naturales protectoras.

Bajo los principios de las Ciencias Ambientales como disciplina integradora permitieron realizar un análisis de las actividades que brinda cada parque., además de las que no están reguladas por algún organismo o institución, con el objetivo de entender las relaciones socio-ambientales que repercuten negativamente en el medio natural. Con el enfoque holístico se establecieron los parámetros para explicar el objeto de estudio conformado por diferentes elementos que cuentan con características propias.

Por otra parte, la Geografía Ambiental sustentó la investigación a partir de sus principios holísticos para comprender y explicar las relaciones socio-ambientales, con el fin de identificar la fragmentación forestal.

Pérez *et al.* (2024) integraron un marco legal para la conservación de áreas naturales protegidas en México, ellos plantean que las áreas protegidas no garantizan la preservación a largo plazo de una porción significativa de la diversidad forestal. Para mejorar la conservación de la biodiversidad es necesario incorporar la conservación biológica de las tierras que se encuentran bajo algún régimen de

propiedad. En este sentido, el presente trabajo contemplo un análisis similar a partir de un diagnóstico integral, por medio del cual se identificaron problemas relacionados con la tenencia de la tierra dentro de los parques, con los que se enfrentan ejidatarios y comuneros, en parques como Lagunas de Zempoala, Bosencheve, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla entre otros.

La elaboración de un diagnóstico integral permitió analizar las posibilidades de instrumentar esquemas de conservación a partir del marco legal vigente, y con base en experiencias obtenidas de ANP en México que no cuentan con un Plan de Manejo. Las investigaciones consultadas plantean que es necesario adecuar la legislación vigente con la finalidad de incentivar la conservación ambiental de los Parques Nacionales.

Al concluir las etapas metodológicas se obtuvieron resultados de cada parque nacional, lo que permitió realizar una comparación con lo reportado por otros autores a nivel nacional e internacional. El desarrollo de la etapas metodológicas aplicadas para la obtención de la cartografía, se ejecutó mediante diversos procesos estandarizados, con el objetivo de generar cartografía detallada de los ecosistemas forestales; con este fin se realizó una clasificación supervisada de acuerdo con el algoritmo de máxima verosimilitud para la identificación de los ecosistemas forestales, Toro et al, (2015) proponen que el algoritmo automáticamente clasifica toda el área, respecto con el tipo de pixel que presenta reflectancia de un color del pixel diferente a los demás.

Posterior a la elaboración de la cartografía fue necesario validar los mapas referentes a los ecosistemas presentes con el objetivo de agregar confiabilidad al producto cartográfico, lo que permite a los usuarios del mapa tener una perspectiva más cercana a la realidad, y así asumir el riesgo de tomar decisiones con base en esta información cartográfica (Mas et al. 2003).

Mas et al, (2003) afirman, que el porcentaje mínimo permitido para la validación cartográfica corresponde a 80%, en este sentido la mayoría de los mapas presentados en los resultados de nuestra investigación referentes a la fragmentación forestal, están por encima del índice referido por Mas et al. (2003), lo que permitió establecer un análisis a mayor detalle y lo más cercano a la realidad.

Con relación a los resultados, en esta tesis el análisis de la fragmentación forestal a través de imágenes de satélite se trabajó bajo diferentes escalas y herramientas de teledetección, como imágenes de satélite o fotografías aéreas. En este sentido Ortega *et al.* (2016), determinaron la fragmentación por tipo de cobertura forestal y su cambio, con base en la clasificación temporal de imágenes de satélite. Ellos desarrollaron su estudio en el Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) “Sierra de Quila”, ubicada en el Estado de Jalisco, dentro de los municipios de Tecolotlán, Tenamaxtlán, San Martín Hidalgo y Cocula en el Estado de Jalisco.

Para este trabajo estos autores utilizaron cartas de vegetación de dos imágenes de satélite Landsat TM 4, de marzo de 1993 y Landsat ETM 7 de enero de 2000 obtenidas por Villavicencio (2004). En sus conclusiones Ortega *et al.* (2016), aseguran que el análisis de imágenes satelitales clasificadas permite no solamente identificar cambios en la cobertura forestal y del suelo; sino también que mediante la aplicación de patrones de fragmentación es posible monitorear la dinámica forestal por tipo de cobertura (clase) hasta el valor paisajístico que representa (Landscape).

Los resultados referentes a los rangos reportados por Ortega *et al.* (2016) coinciden con los resultados obtenidos en nuestra esta investigación del Parque Nacional Bosencheve, donde encontramos los valores bajos de fragmentación en las zonas orográficas con mayores altitudes y pendientes; mientras que los valores más altos se encuentran en áreas donde predominan los tipos de bosque de encino y pino, que son las especies maderables con mayor valor económico en el mercado para la producción de muebles y derivados.

Es importante mencionar que los autores utilizaron imágenes de satélite del sensor Landsat ETM 7, mientras que para el presente trabajo utilizamos imágenes Spot 5 y Sentinel-2 con mayor resolución, que además se complementaron con capas vectoriales para la ratificación de la información identificada en el desarrollo de los objetivos. Por otra parte, la investigación mencionada no contempla la validación de la cartografía en campo, la cual en nuestro estudio si se realizó.

Altamirano *et al.* (2007) evaluaron el efecto de la fragmentación sobre la estructura de la vegetación en poblaciones de la especie arbórea *Legrandia concinna* en el

centro-sur de Chile. Las variables utilizadas en su estudio fueron: área, índice de proximidad media, forma y distancia al borde de fragmentos, aplicados a mapas de cobertura forestal generados a partir de una imagen satelital Landsat ETM+ del año 2001.

Los resultados obtenidos por Altamirano *et al.* (2007) mostraron una alta predominancia de fragmentos de reducido tamaño, altos niveles de aislamiento y formas regulares. No hubo diferencias significativas en comparación con las variables utilizadas en nuestro estudio para la identificación de las zonas con niveles de fragmentación forestal y la distribución de los fragmentos con presencia de aislamiento. Si bien los tipos de bosque son diferentes en nuestra investigación las variables utilizadas para identificar el nivel de densidad forestal son similares. De igual forma el estudio se realizó dentro de un ANP, donde existen diferentes restricciones en el uso del suelo; así como en el manejo de los recursos forestales. Sin embargo, los resultados presentan diferencias significativas respecto al número de clases utilizadas para cada parque. es importante que en las dos investigaciones se proponen medidas de conservación de los ecosistemas forestales, dentro de las que destacan la inclusión dentro de áreas protegidas a aquellas poblaciones con mayor riesgo a desaparecer, la promoción de su conservación *ex situ* y el establecimiento de un programa de monitoreo.

En el estudio de Altamirano *et al.* (2007) estos autores señalaron un precedente respecto a la vinculación entre información en escala de paisaje proveniente de imágenes satelitales y la información de estructura de la vegetación medida en terreno. Ellos resaltaron el nivel de escala que se trabajó en parques nacionales con superficies menores, ya que el nivel de detalle alcanzado les permitió identificar áreas con los niveles de fragmentación forestal lo cual es una innovación metodológica que ofrece la posibilidad de monitorear las transformaciones en un tiempo definido, mediante herramientas factibles y económicamente viables; además de evaluar la efectividad de las metodologías aplicadas a través de validaciones establecidas.

Bajo este contexto, Tellería *et al.* (2021) estudiaron los efectos de la fragmentación en un paisaje castellano de bosques, estos autores analizaron los patrones de

distribución de especies, condición corporal o éxito reproductivo y el estudio de los procesos (efectos de la abundancia, estructura del hábitat, dispersión, depredación, gregarismo y comportamiento), utilizando diferentes modelos y metodologías.

Dentro de las conclusiones planteadas por Tellería *et al.* (2021) ellos difirieron con los resultados descritos para los parques nacionales que conforman nuestra área de estudio. La temporalidad es fundamental para detectar detalles precisos que muestren los factores que propician la degradación de la masa forestal en un lugar determinado, son estudios sumamente complejos en los que intervienen variables sociales y económicas que difícilmente se pueden medir o manipular durante la ejecución de metodologías. Es decir cada área de estudio tiene ciertas particularidades geográficas que definen y vuelven único a cada área de estudio.

España y Champo (2016) analizaron los bosques de Michoacán, a partir de imágenes satelitales Spot, de alta resolución (10 m); ellos estimaron la pérdida anual de la cubierta forestal, entre 2006 y 2012. Utilizando un criterio basado en el NDVI y la firma espectral, obtuvieron y validaron los mapas de suelo / vegetación, para cada año del período estudiado; la comparación de los mapas anuales les permitió construir el mapa de deforestación anual. En total, en su estudio fueron deforestadas 9,069 hectáreas, lo que equivale a 71% de la superficie vegetal existente en 2006. La mayor parte de la deforestación se produjo entre 2010 y 2011 (2,815 ha) y corresponde la zona más cercana al núcleo urbano; muchas zonas taladas también fueron quemadas. Estos resultados permiten dimensionar el problema de la deforestación en el bosque de Cherán y ayudan a entender la reacción de la comunidad ante la devastación de sus bosques.

Los resultados presentados anteriormente difieren de los obtenidos en la presente investigación, debido a diversos factores, entre los que destacan el análisis de los niveles de fragmentación, ya que la investigación citada previamente no contempla la densidad de los bosques, sin embargo sí coinciden con este estudio en las variables utilizadas para la clasificación de las imágenes de satélite. La integración de un análisis derivado de la cartografía referente a la fragmentación forestal, enriquece proporcionalmente el nivel de detalle de los resultados presentados para cada ecosistema.

Sahugun y Reyes (2016), analizaron los Impactos debidos al cambio de uso del suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México, por medio de análisis espacial y la simulación de escenarios de cambio potencial. Estos autores usaron imágenes satelitales para elaborar mapas del cambio de coberturas vegetales, entre los años 1989, 2000 y 2005.

Los resultados presentados por Sahugun y Reyes (2016), muestran que las ANP estudiadas están sometidas a presiones de cambio en el uso de la tierra, que amenazan la conservación del patrimonio natural que resguardan, por lo que ellos sugieren que deberían rediseñarse las estrategias de manejo y monitoreo a corto y mediano plazo.

La cartografía presentada por estos autores (2016), es similar a la obtenida en la presente investigación en cuanto a la escala y a los ecosistemas identificados, sin embargo, la cartografía que ellos generaron es más concreta ya que analizaron tres temporalidades diferentes, por lo que se puede realizar un mayor nivel de análisis comparativo en diferentes años e identificar las transformaciones más significativas. En sus conclusiones ellos mencionan que las Áreas Naturales Protegidas (ANP), presentan cambios en el uso del suelo que afectan las coberturas de selvas, bosques y matorrales existentes. Misma situación que se presenta en la mayoría de los parques nacionales que conforman nuestra área de estudio, ya que en estos se presentan impactos negativos que dificultan el uso sustentable de los servicios ecosistémicos que brindan los ecosistemas forestales; entre estos los cambios de suelo y la fragmentación forestal que están presente en cada uno de los parques.

Nuestra investigación coincide con Sahugun y Reyes (2016), en ambas se sugiere trabajar sobre la elaboración de los programas de manejo particulares para las distintas ANP, ya que cada área es diferente y tiene distintos niveles de fragmentación, además de que los sectores sociales y económicos son diferentes. Las políticas locales en materia de gestión ambiental dirigidas a mitigar la vulnerabilidad ante los cambios actuales y futuros en los ecosistemas forestales deben ser prioritarias para cada tipo de bosque.

Por otra parte, Aguirre (1997) propuso un sistema sustentable en el manejo forestal bajo un esquema tradicional, esto es, hacia el logro y mantenimiento de la condición

ecológica y forestal deseada, dentro de la cual sea posible conseguir el rendimiento sostenido de productos para satisfacer necesidades humanas.

Este autor afirma que la implementación de los modelos de manejo de ecosistemas forestales se percibe como un trabajo complicado que involucra diversos sectores de la sociedad, así como de equipos multidisciplinarios de profesionistas para la toma de decisiones; y que el objetivo debe ser lograr la mayor interacción entre necesidades sociales, necesidades económicas y capacidades de los ecosistemas. Los resultados obtenidos por este autor sobre la implementación de los modelos coinciden en la identificación de las causas que propician la disminución de la densidad forestal, como lo hicimos para el área de estudio de la presente investigación, resaltando el manejo inadecuado y la deficiente administración para los dos casos de estudio.

El trabajo de Aguirre (1997) tiene como base el concepto de rendimiento sostenido, el cual se refiere a la capacidad de las áreas boscosas de proveer de manera permanente y óptima los múltiples bienes y servicios que la sociedad demanda. Mientras que los objetivos planteados en nuestra investigación no contemplaron plantear alternativas de mitigación, solo se plantean algunas propuestas para el mejoramiento óptimo de las actividades sociales dentro de los parques. Por su parte el trabajo señalado previamente está orientado a la identificación de áreas prioritarias mismas que también se señalan en la cartografía presentada en el apartado de resultados de la presente tesis doctoral.

En el estudio de Gómez *et al.* (2021), estos autores describieron de manera general las relaciones entre los bosques y el agua, ellos incluyen la relación entre el cambio de cobertura y el escurrimiento superficial. Los análisis a partir de la identificación de estas relaciones destacaron las principales perturbaciones en los bosques, como consecuencia del cambio de uso del suelo. La aportación más relevante en su estudio enfatiza puntos críticos sobre el funcionamiento de los ecosistemas forestales, para finalmente proponer estrategias específicas sobre el manejo de estos ecosistemas, y así generar modelos con mayor capacidad de predicción de la dinámica de los bosques ante el cambio climático.

Las similitudes entre el trabajo citado y la presente investigación parten del análisis realizado sobre las relaciones existentes entre los diversos ecosistemas, ya que en nuestro trabajo se identificó para cada parque nacional, que el servicio de captura de carbono está ligado a la retención del suelo, y a la recarga de acuíferos, entre muchos otros servicios. Lo anterior permite proponer un funcionamiento óptimo y un equilibrio ecológico que contribuya a la conservación de las ANP.

Por otra parte, Hernández *et al.* (2021), evaluaron directamente las comunidades vegetales en campo y utilizando sistemas remotos como drones, con el objetivo de identificar el desempeño biológico de las reforestaciones en campo. Ellos afirman que la conservación y restauración forestal integra investigaciones básicas y aplicadas a la gestión sustentable de los recursos forestales. En la sección de conservación estos autores presentan estudios enfocados en evaluar y caracterizar la estructura de comunidades vegetales de interés ecológico y ambiental, en áreas bajo manejo forestal, conservadas y regeneradas después de algunos disturbios.

La escala utilizada en la investigación de los autores mencionados, es similar con la que aplicamos en nuestro estudio, para el análisis de fragmentación forestal en los Parques Nacionales del Tepeyac, el Carmen y Remedios; esto debido a que su superficie es menor que la de otras ANP.

Por su parte, Hernández (2021), estudió comunidades biológicas con mayor detalle, y con un objetivo diferente, mientras que en la presente investigación se normalizaron los diferentes ecosistemas forestales en categorías generales, sin embargo los resultados obtenidos en ambos estudios son afines, ya que la cartografía generada se validó en campo mediante herramientas de teledetección y SIG en las dos investigaciones.

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 para calcular la captura de carbono para cada 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, y así lograr la generación de mapas, gráficas y cartografía.

Sin embargo los procesos metodológicos aplicados por Tellería *et al.* (2021) comparten similitudes en relación con las variables utilizadas en nuestra investigación. Si bien para el cálculo del carbono capturado no se trabajó en el desarrollo de índices propios, se retomaron los establecidos por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013), quienes generaron índices que ellos obtuvieron bajo estrictos procesos en laboratorio dirigidos al cálculo de la biomasa total; en ellos se determinó el contenido de humedad; y 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 para cada componente estructural de todo el árbol.

En el año 2021 en España, Jiménez abordó a los ecosistemas forestales desde una perspectiva cuantitativa, destacando factores fundamentales para la producción del carbono capturado, este autor destacó que estos servicios ambientales proporcionan bienes y servicios al ser humano, además el definió la productividad como la producción de biomasa de plantas, y calculó de la productividad primaria real, lo que realizó para las parcelas de pies mayores, para una parte de la península Ibérica. Concluyó que en la región mediterránea las mayores productividades se observan en los principales sistemas montañosos, como Pirineos, Sistema Central, Sistema Ibérico y Bético.

Contrastando la información reportada por Jiménez, (2021) con la obtenida en nuestra investigación, la temporalidad para el cálculo de la captura de carbono fue igual, ya que en las dos investigaciones se calculó para un año específico, sin embargo las especies que se analizaron difieren por sus características físicas y biológicas, además de que en su investigación este autor tomó en cuenta la edad de los bosques; los resultados fueron diferentes principalmente debido a la aplicación de los índices retomados para nuestra investigación.

Para realizar una comparación relativa a los índices aplicados para el cálculo del carbono en la presente investigación, se analizó el estudio que Buendía *et al.* (2019), realizaron en Nuevo León, México, un estudio en el que estos autores caracterizaron un ecosistema forestal y generaron un modelo para describir el comportamiento de la captura de carbono de diversas especies forestales, a través de índices. Ellos utilizaron 10 sitios de muestreo de 2,500 m², y calcularon la altura

promedio, diámetro normal promedio (d1.30), área basal (G), contenido de carbono (CC) e índices de Shannon-Wiener (H') y Pretzsch (A).

Las variables utilizadas por Buendía *et al.* (2019) para el cálculo de captura de carbono a través de índices, son afines a las utilizadas por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013), quienes obtuvieron los índices de captura de carbono por ecosistema forestal, mediante la obtención de la biomasa total por componente estructural de los árboles (fuste, ramas, follaje, corteza).

En nuestra investigación de igual forma se realizó la validación en campo bajo criterios similares, se evaluó el estado y porte de los árboles con la finalidad de identificar las principales características de los árboles, se midió el diámetro y altura de los árboles. Este proceso de validación se realizó a manera de muestro en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala.

Con el fin de destacar los servicios ecosistémicos que ofrece del Parque Nacional Badii (2007), analizó las diferentes clases de ecosistemas forestales en México destacando la relevancia de los mismos en relación con los servicios ecosistémicos que ofrecen, además de su importancia esencial para el mantenimiento de la vida en una sociedad.

Este autor hace mención de los atributos críticos de los tres elementos vitales del planeta: el agua, el suelo y la atmósfera. En su investigación resalta la importancia de los ecosistemas naturales, para proporcionar todo lo que es necesario para vivir sanamente en una sociedad.

La presente investigación resaltó similitudes en aspectos tales como: la localización de las zonas prioritarias de atención, la importancia del cuidado y recuperación de los espacios con degradación ambiental dentro de los Parques Nacionales. La cartografía presentada en nuestros resultados es similar en cuanto a la identificación de las zonas críticas por deforestación. A partir de ello para las dos investigaciones se plantearon diversas alternativas de solución dirigidas a la mitigación del uso irracional de los servicios ecosistémicos.

En términos generales, la mayoría de las investigaciones citadas previamente presentan similitudes con los procedimientos metodológicos desarrollados en la

presente tesis doctoral, particularmente en cuanto al enfoque dirigido a alcanzar los objetivos planteados.

No obstante, algunas de ellas utilizaron temporalidades distintas y escalas espaciales amplias, lo que en ciertos casos muestra variaciones relevantes en los resultados obtenidos. La principal aportación de esta investigación radica en la incorporación del análisis de fragmentación forestal, que permitió una evaluación más detallada de la densidad forestal y un cálculo más preciso de la captura de carbono, proporcionando una visión actualizada sobre el estado de conservación de los ecosistemas forestales en los parques nacionales del Estado de México.

Es necesario resaltar que los estudios enfocados a ubicar y calcular los usos del suelo en parques nacionales se realizan basados en materiales cartográficos y en escalas con precisión limitada. Estas limitaciones metodológicas provocan que determinados usos del suelo sean clasificados de manera imprecisa, ya que no se observan los procesos de fragmentación forestal recientes y actualizados.

Todas las investigaciones revisadas coinciden en la necesidad de fortalecer la participación de las comunidades locales en el manejo de los recursos forestales. Aunque los factores que propician la degradación ambiental son múltiples y complejos, se resalta que la educación ambiental desempeña un papel crucial, especialmente al involucrar a las nuevas generaciones en la comprensión del valor ecológico, cultural y social de los espacios naturales.

Para mitigar el impacto ambiental en las Áreas Naturales Protegidas (ANP), diversos autores enfatizan la importancia de aplicar de manera estricta la normatividad ambiental, en especial aquellas regulaciones que restringen el cambio de uso de suelo dentro de los Parques Nacionales. La problemática de la fragmentación forestal, además, se reconoce como una tendencia global, frecuentemente relacionada con deficiencias en la aplicación de políticas públicas a nivel local, estatal y nacional. Finalmente, se subraya la importancia de utilizar tecnologías recientes como sensores remotos, sistemas de información geográfica y análisis multitemporal, ya que estas herramientas permiten obtener datos más precisos y confiables, optimizando los procesos metodológicos e incrementando la calidad del análisis sobre el deterioro ambiental en las ANP.

La cartografía generada referente al Parque Nacional Desierto del Carmen o de Nixcongo se representa en los polígonos con los valores más altos de fragmentación, en la zona centro y sur del parque en el municipio de Tenancingo, Estado de México, donde se desarrollan múltiples actividades turísticas y religiosas lo que repercute directamente en el desarrollo de los bosques ya que existe un mal manejo de residuos sólidos que limiten el desarrollo óptimo de los bosques.

El análisis final sobre el Parque Nacional el Tepeyac sobre la captura de carbono permitió conocer a detalle cuáles son los bosques y las zonas con menor densidad forestal, se concluye que los polígonos con los valores altos de fragmentación forestal, se ubican en la zona centro y sur del parque, donde se desarrollan actividades turísticas, económicas y religiosas, esto afecta el desarrollo de los bosques, existe un deficiente manejo de residuos sólidos que limitan el crecimiento óptimo de los bosques.

Es evidente el descuido y mal cuidado por parte de autoridades gubernamentales y particulares en el manejo sustentable entre el medio natural y social, es fundamental seguir con el estudio de este parque, bajo la línea de ciencias ambientales para atender las zonas prioritarias de atención y de alguna manera contribuir con el rescate de estos espacios.

En el caso de estudio del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl presentó niveles bajos de fragmentación forestal por tanto se concluye que el análisis sobre la captura de carbono con base en el proceso de fragmentación forestal permitió identificar que bosques presentan la mayor densidad, los valores más altos de fragmentación forestal en los tres ecosistemas forestales, se ubican en la zona centro, norte y sur del parque, en estas zonas se han implementado diversos programas gubernamentales ambientales, como jornadas de reforestación, planes de recuperación de área verdes entre otros, lo anterior repercute directamente en la recuperación de los bosques degradados.

Por otra parte, existe una mala implementación del ordenamiento ecológico del territorio por parte de los municipios y estados que conforman el parque, en los resultados de la presente investigación se muestran la zonas con mayor afectación a la masa forestal; es importante promover la importancia de estos espacios para

que la población tenga sentido de pertenencia del lugar donde vive, para generar identidad, orgullo por el patrimonio natural y cultural de la región.

Respecto al Parque Nacional Lagunas de Zempoala los resultados obtenidos en esta investigación se concluye que los ecosistemas forestales presentaron un importante crecimiento de la fragmentación forestal, en contraste con los resultados reportados por Medina *et al.* 2021, quien menciona que se observa un proceso de deforestación asociado principalmente al desarrollo de actividades, agrícolas y de infraestructura vial; por lo que los ecosistemas forestales presentaron disminución en su superficie para el año 2021.

A partir del análisis realizado a partir de la cartografía obtenida, la concentración de polígonos con los valores altos de fragmentación se presentó en la zona centro y sur del parque, los factores antrópicos que se identificaron en el diagnóstico son actividades turísticas mal aplicadas especialmente la tala ilegal, a causa de lo anterior los bosques de encino y pino han reducido su superficie considerablemente. El presente estudio evidenció el grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque e identificó los bosques y las zonas con menor densidad forestal.

Los resultados alcanzados en el Parque Nacional Los Remedios muestran que existe deterioro ambiental, se observa un proceso de deforestación generado por actividades ganaderas, de comercio, sin embargo la que mayor repercute es el cambio de uso de suelo para la construcción de zonas habitacionales; el presente estudio evidenció el grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque, se identificaron los bosques y las zonas con menor densidad forestal. De acuerdo con el análisis realizado en cartografía, la concentración de fragmentación forestal se presentó en la zona centro y norte del parque, cabe destacar que esta área tiene una importante plusvalía.

El Parque Nacional Molino de las Flores o Nezahualcóyotl presenta al igual que los anteriores procesos de deforestación forestal, las actividades económicas que se realizan dentro del parque como comercio informal, influyen en el aumento de la superficie destinada para estas actividades, el presente estudio demostró el grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque.

En general el PNMFN presenta una superficie pequeña, 49.28 ha aproximadamente, actualmente no cuenta con un plan de manejo y los pocos esfuerzos por rescatar este espacio son campañas de reforestación que en su mayoría son mal ejecutadas y con nulo seguimiento. Su principal atractivo es cultural y religioso, resaltan la ex hacienda Molino de Flores y la venta de antojitos. La afluencia turística no está normada por lo se presentan irregularidades legales en la ocupación de espacios destinados para estas actividades, es importante realizar estudios posteriores en especial de impacto ambiental para dar certeza de un uso sustentable de este parque.

Los resultados de la fragmentación forestal y el análisis del carbono capturado en El Parque Nacional Sacromonte representó una importante contribución en la identificación de las zonas que presentan deterioro ambiental en el parque, existe un proceso de deforestación forestal resultado del desarrollo de actividades económicas, turísticas y culturales dentro del parque, además de que el parque no cuenta con normas ni una regulación establecida para la práctica de las actividades ya mencionadas por lo que no existe el Plan de Manejo del Parque.

De acuerdo al análisis realizado a partir de la cartografía generada, la concentración de polígonos con los valores más altos de fragmentación se encuentra en la zona centro, sur y norte del parque, donde se desarrollan actividades económicas y religiosas,

El parque no cuenta con las bases de manejo y administración en materia de desarrollo sustentable, conservación y preservación en general es una superficie muy pequeña, de 43.7 hectáreas por los que se puede considerar la re-categorización del parque consecuencia del grado de degradación del mismo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la fragmentación forestal y el análisis de la captura de carbono el parque nacional Bosencheve presenta un importante proceso deterioro ambiental, se observa un proceso de deforestación asociado principalmente al desarrollo de actividades económicas, turísticas y culturales dentro del parque, además de que el parque no cuenta con normas ni una regulación establecida para la práctica de las actividades ya mencionadas por lo que no existe el Plan de Manejo del Parque.

El parque cuenta con dos lagunas formadas por agua de lluvia que albergan a las aves acuáticas migratorias (Laguna verde y Laguna seca). Cuenta también con varios arroyos como El Jaral, Ojo de agua, Pundereje, El Cardaro, Las Peñitas y la Palma que no cuentan con la vigilancia necesaria para su protección pese a esto existe la acumulación de residuos sólidos en los límites de las lagunas como consecuencia de las actividades turísticas. Por otra parte, el estudio realizado sobre el grado de fragmentación en los ecosistemas forestales del parque permitió conocer a detalle cuáles son los bosques y las zonas con menor densidad forestal. Respecto con el trabajo de campo cabe resaltar que no fue posible visitar los nueve parques nacionales que conforman el área de estudio, en algunos casos fue por el nivel de inseguridad y otras por la lejanía del parque sin embargo, se plantearon diversas visitas a campo a parques nacionales como el Tepeyac, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Lagunas de Zempoala y Bosencheve, donde se realizaron recorridos “in situ” y observación directa, en los parques ya mencionados 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 parques como el Bosencheve, Lagunas de Zempoala o el Tepeyac, donde el cambio de uso del suelo es evidente y la aplicación de la normativa referente a ANP es nula o escasa.

Para mitigar o disminuir la deforestación en los ecosistemas forestales que conforman el área de estudio, no depende solo de implementar acciones para la conservación de bosques ya que es una problemática integral 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 de los Parques, optimizar y aplicar de mejor manera las actividades antrópicas a fin de darle un uso responsable a estos espacios, por otro lado, seguir con las campañas de reforestación y aplicar la normatividad sobre los usos del suelo dentro del ANP.

Finalmente, la fragmentación forestal es fundamental en estudios sobre transformaciones de los ecosistemas forestales, ya que favorece la identificación de áreas prioritarias de atención, a una escala detallada, a un análisis más preciso del

territorio y más cercano a la realidad. A partir de ello, será posible realizar estudios posteriores que permitan implementar actividades de manejo a fin de minimizar los impactos negativos, de acuerdo y para el cuidado de la cobertura forestal.

Las investigaciones asociadas a los cambios de uso de suelo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) son parte fundamental en la identificación de áreas prioritarias de atención y en la 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.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en la presente investigación y al análisis de los elementos teóricos, conceptuales se llegaron a las siguientes conclusiones en la presente investigación

Las teorías en las que se basó la investigación permitieron cumplir con los objetivos específicos planteados para sustentar las relaciones y cambios existentes entre los diferentes ecosistemas identificados en los parques nacionales que conforman el área de estudio, la TGS permitió establecer un análisis multidisciplinario en las relaciones de los diferentes sectores sociales y económicos que intervienen directamente en la conservación de los parques nacionales.

Una limitante en la regulación de los parques nacionales estudiados, parte de que no existen planes de manejo en seis, de los nueve parques que conforman el área de estudio, los encargados y dueños de predios dentro de los parques carecen de información jurídica en pro de cuidado de los bosques, en este sentido se realizó una recopilación de información para integrar un marco legal conformado por las principales leyes, normas y reglamentos.

En cuanto al primer objetivo específico, que fue el análisis de las características ambientales, sociales y económicas que prevalecen en los parques nacionales del Estado de México (PNEM), este se logró mediante la elaboración de una caracterización geográfico-ambiental detallada, en la que se analizaron las principales variables físicas, ambientales y territoriales del área de estudio. Esta etapa se logró mediante la aplicación de SIG para la clasificación de imágenes de satélite y obtener la identificación de los ecosistemas presentes en el área de estudio. Este análisis con enfoque geográfico permitió identificar las grandes diferencias que existen entre los PNEM, debido a sus diversas características fisiográficas, geológicas, geomorfológicas, climáticas, hidrológicas, edafológicas y biológicas. Esta etapa proporcionó un contexto robusto y contextualizado para el desarrollo de los análisis posteriores en particular el diagnóstico de la problemática existente en cada PNEM.

El segundo objetivo específico fue alcanzado y consistió en la identificación, ubicación y cuantificación de los ecosistemas presentes en cada parque. Lo cual se

realizó mediante SIG, foto interpretación cartográfica y análisis estadístico, los productos obtenidos fueron mapas de los ecosistemas presentes y tablas de las superficies ocupadas de cada ecosistemas, lo que permitió realizar un análisis de sus principales características físicas y dinámica espacial, lo que enriqueció la visión del área estudiada.

El tercer objetivo específico fue alcanzado y consistió, en la obtención de mapas que representan el grado de fragmentación para cada ecosistema forestal, los cuales se obtuvieron a partir de un análisis de fotointerpretación dirigido a identificar los parches en la cobertura forestal y posteriormente analizar sus características generales como el número de parches, su forma y tamaño. El análisis de fragmentación forestal, permitió una evaluación más detallada de la densidad forestal y un cálculo más preciso de la captura de carbono, proporcionando una visión actualizada sobre el estado de conservación de los ecosistemas forestales en los parques nacionales del Estado de México.

El cálculo de la superficie de cada ecosistema forestal incluyendo el análisis de fragmentación permitió ajustar los cálculos de captura de carbono con un mayor nivel de detalle técnico. El cálculo del carbono capturado para cada ecosistema forestal se realizó mediante los índices propuestos Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013). Este avance representa una mejora metodológica frente a enfoques convencionales que tienden a considerar los ecosistemas como unidades homogéneas; debido a que la superficie forestal disminuye con el análisis de fragmentación en consecuencia la cantidad de carbono capturado también disminuye; por lo que la información sobre captura de carbono adquiere mayor precisión.

El cuarto objetivo específico fue cubierto mediante la elaboración de un diagnóstico integral, en el cual se identificaron y analizaron los principales problemas ambientales, sociales y económicos que afectan la conservación de los parques nacionales. Este diagnóstico fue construido a partir de herramientas como la foto interpretación cartográfica, el análisis mediante SIG y el tratamiento estadístico de variables clave, lo que permitió una visión compleja y articulada del territorio.

La etapa siguiente consistió en el análisis de la problemática ambiental, social y económica de cada PNEM. Este objetivo se logró mediante la aplicación de entrevistas no estructuradas aplicadas a personas que están en contacto directo con los parques, observación directa en campo mediante recorridos, contrastados con la investigación documental referente a cada parque. Esta visión integradora desde un enfoque sistémico permitió identificar la problemática específica en cada parque.

Finalmente, el quinto objetivo específico fue alcanzado y consistió en la validación de la propuesta teórico-metodológica, la cual fue validada mediante el análisis crítico de los fundamentos conceptuales que la sustentan, la revisión sistemática de las etapas metodológicas aplicadas y la evaluación entre los distintos componentes de la propuesta. Esta validación respalda la solidez de la propuesta como instrumento replicable para estudios similares en otras áreas naturales protegidas.

Al concluir esta investigación, se cumplió satisfactoriamente el objetivo general, al desarrollar una propuesta teórico-metodológica para estimar la captura de carbono en los Parques Nacionales del Estado de México, incorporando el análisis de la fragmentación de los ecosistemas forestales mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta propuesta representa una contribución sustantiva al campo del análisis espacial aplicado a la evaluación de servicios ecosistémicos.

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman la hipótesis planteada, al demostrar que la inclusión del análisis de fragmentación forestal en la estimación del carbono capturado modifica significativamente los valores obtenidos acerca de la superficie forestal real, en comparación con aquellos derivados de un enfoque homogéneo del paisaje forestal. En este sentido, el estudio permitió evidenciar que los ecosistemas forestales dentro de los nueve parques nacionales analizados no constituyen masas forestales continuas e intactas, sino que presentan niveles diversos de fragmentación forestal que inciden directamente en su funcionalidad ambiental, particularmente en su capacidad de almacenamiento de carbono.

Esta aportación evidencia que la fragmentación forestal incide directamente sobre el proceso de captura de carbono lo que representa la necesidad de integrar este tipo de análisis en futuras evaluaciones ambientales.

El enfoque metodológico aplicado de manera sistemática a cada uno de los ecosistemas forestales presentes en los nueve parques nacionales incluidos en el estudio, permitió alcanzar un mayor nivel de precisión y profundidad analítica, aportando evidencia sólida para la toma de decisiones en políticas de conservación, manejo forestal y mitigación del cambio climático en Áreas Naturales Protegidas.

Con respecto a las aportaciones metodológicas de esta tesis doctoral; en la primera etapa metodológica, se llevó a cabo una caracterización geográfico-ambiental de los Parques Nacionales del Estado de México, con el objetivo de analizar los principales componentes ambientales presentes en estas áreas protegidas, se elaboraron representaciones cartográficas de variables clave como el clima, la litología y la edafología. Esta etapa se desarrolló conforme a los lineamientos metodológicos propuestos por Bocco (2001), lo que proporcionó una estructura analítica sólida y replicable.

La principal aportación metodológica de esta etapa consistió en el diseño y desarrollo de una cartografía especializada en geomorfología, particularmente enfocada en el análisis de pendientes dentro de los nueve parques nacionales estudiados. Para ello, se generaron mapas temáticos en los que se clasifican las pendientes en seis rangos, lo que permitió una lectura espacial y precisa del relieve. Cabe destacar que son escasas las investigaciones que integran la cartografía geomorfológica a este nivel de detalle, por lo que es necesario considerar su relevancia para comprender la interacción entre el medio físico y los procesos de transformación territorial. En este sentido, esta etapa representa una contribución metodológica significativa, al incorporar el relieve como una variable esencial en el análisis socio-ambiental, lo cual enriquece la interpretación espacial y fortalece la toma de decisiones en materia de conservación y ordenamiento ecológico.

En la segunda etapa metodológica, se realizó la identificación y delimitación de los ecosistemas presentes en los PNEM, mediante la clasificación de imágenes satelitales, siguiendo la metodología propuesta por Toro *et al.* (2015). Esta fase

permitió establecer una tipología detallada de coberturas forestales, diferenciando tipos específicos de vegetación, lo cual resultó fundamental para los análisis posteriores sobre fragmentación y captura de carbono.

La principal aportación metodológica en esta etapa radicó en la implementación de un esquema de validación mixta, que combinó técnicas de verificación en gabinete y en campo. Para la validación digital, se aplicaron los parámetros técnicos establecidos por Mas *et al.* (2003), quienes consideran la exactitud global y el análisis de errores de omisión y comisión. Por su parte, la validación en campo se basó en los criterios propuestos por Romahn y Ramírez (2010), quienes incluyen la verificación directa de tipos de vegetación, condiciones estructurales y cobertura real en puntos de control georreferenciados.

Esta doble validación permitió alcanzar un alto grado de certeza de la cartografía generada, lo cual contrasta con diversas investigaciones previas, que tienden a incorporar únicamente una de las dos estrategias de validación. De este modo, se fortaleció la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados, elevando el rigor técnico del análisis espacial.

La tercera etapa metodológica constituye la aportación central de esta investigación, al incorporar de manera rigurosa el análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales, como variable clave para el cálculo de la captura de carbono en los Parques Nacionales del Estado de México. Este enfoque representa un avance sustantivo frente a las metodologías convencionales, que tienden a tratar los ecosistemas forestales como unidades homogéneas, omitiendo la complejidad espacial y estructural de la cobertura vegetal.

Al integrar la fragmentación como factor de ajuste en el cálculo del carbono capturado, se logró una estimación más precisa y realista de este proceso ecosistémico. La inclusión de este análisis evidenció que, al reducirse la superficie continua de cobertura forestal debido a procesos de fragmentación, también disminuye la capacidad efectiva de captura de carbono. Este hallazgo tiene implicaciones directas tanto para la gestión ambiental como para la formulación de políticas públicas, al poner de manifiesto que los valores de captura de carbono

comúnmente reportados podrían estar sobreestimados si no se consideran las condiciones reales de integridad ecológica del paisaje.

En la cuarta etapa metodológica, se procedió al cálculo de la captura de carbono en los ecosistemas forestales de los Parques Nacionales del Estado de México, integrando dos escenarios comparativos: uno que incluye el análisis de fragmentación forestal y otro que prescinde de dicho análisis. La principal contribución metodológica de esta etapa radica precisamente en esta comparación, que permite evidenciar el impacto que tiene la fragmentación del paisaje forestal sobre la estimación de los servicios ecosistémicos, particularmente en lo que respecta al almacenamiento de carbono.

En la quinta etapa metodológica, se desarrolló un análisis integral de las problemáticas ambientales, económicas y sociales que inciden en la conservación de los Parques Nacionales del Estado de México. La contribución metodológica principal de esta etapa radica en la articulación de fuentes y enfoques: los problemas fueron identificados tanto mediante observación directa en campo, como a través del análisis en gabinete, lo que permitió validar y complementar los hallazgos mediante la consulta de literatura científica, registros institucionales y plataformas oficiales de organismos como la CONANP. Esta estrategia metodológica supera las limitaciones de estudios que se basan exclusivamente en enfoques etnográficos o entrevistas, sin integrar antecedentes documentales previos, ni evidencias empíricas sistematizadas.

En la sexta etapa metodológica se validó la Propuesta Teórica-Metodológica a partir de la pertinencia de los Fundamentos Teóricos para el desarrollo de las etapas metodológicas, se analizaron las teorías que permitieron explicar los procesos e interacciones encada parque, posteriormente se analizaron y describieron los principios de cada teoría que determinaron los alcances y objetivos de la investigación.

La aportación metodológica para esta etapa fue el análisis de los fundamentos metodológicos de cada etapa y proceso, correlacionado con los aspectos teóricos reportados anteriormente, con el objetivo de relacionar cada teoría con la etapa metodológica desarrollada.

Por otra parte, al finalizar la tesis doctoral se evidencia que contribuyó con el ODS número 15, ya que se obtuvieron diferentes productos cartográficos, mismos que se presentaron en diferentes congresos nacionales e internacionales con el objetivo de divulgar los problemas ambientales que enfrentan los Parques Nacionales del Estado de México, con el fin de crear conciencia acerca de los beneficios que obtiene la sociedad en general de estos espacios.

En relación con los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) la presente investigación representó un esfuerzo por exponer las consecuencias generadas a partir de la deforestación e identificar que parques son los que presentan los niveles más altos de fragmentación forestal y que las autoridades correspondientes actúen en pro del medio ambiente bajo la normativa legal de las actividades que se desarrollan dentro de los parques nacionales.

En el Marco General del Sistema de Evaluación y Acreditación de la Educación Superior (SEAS), esta tesis está enfocada en el criterio 4.2.1. Compromiso con la responsabilidad social, ya que la finalidad del programa y el grado de Doctor en Ciencias Ambientales, es contribuir a la sociedad a resolver los problemas medio ambientales que se enfrentan a nivel mundial, en este contexto la tesis presenta un diagnóstico para cada parque referente a los problemas sociales, económicos, culturales y sobre todo ambientales que enfrenta cada ANP, que conforma el área de estudio, con el objetivo de exponer que la solución de esta problemática depende de diferentes factores.

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 continuar indagando con mayor detalle investigaciones internacionales de trabajos relacionados con los índices de captura de carbono, con el fin de contrastar los resultados obtenidos con las características ambientales presentes en el área de estudio, ya que son variables que influyen directamente en la captura de carbono.

La caracterización geográfico-ambiental de los Parques Nacionales del Estado de México se llevó a cabo con base en los lineamientos metodológicos propuestos por Bocco (2001), orientados a la generación, análisis y representación cartográfica de variables biofísicas clave, tales como el clima, la litología y la edafología, se recomienda ampliar el enfoque metodológico incorporando de manera sistemática aspectos sociales y económicos que interactúan directamente con los elementos biofísicos del área de estudio. Y con esto incrementar el nivel de complejidad, bajo un enfoque holístico e integral.

La inclusión de aspectos como son la tenencia de la tierra, las actividades productivas y el nivel de participación comunitaria, permitirá construir una caracterización integral, fortaleciendo el potencial de esta metodología para ser replicada en otras Áreas Naturales Protegidas; y consolidando una herramienta diagnóstica que no solo describa las condiciones ambientales, sino que también explique las causas estructurales que influyen en su transformación y conservación.

La identificación y delimitación de los ecosistemas presentes en los PNEM, se realizó mediante la clasificación de imágenes satelitales, siguiendo la metodología propuesta por Toro *et al.* (2015) utilizando el criterio de máxima probabilidad. Para esta etapa metodológica se recomienda ampliar los campos de entrenamiento con el fin de disminuir el nivel de error en la cartografía final, además de utilizar materiales actualizados y así obtener resultados de mayor precisión.

El análisis de la fragmentación en los ecosistemas forestales se llevó a cabo mediante la consideración de variables estructurales clave, tales como el número de parches, su forma y tamaño, lo cual permitió generar cartografía detallada de los

niveles de fragmentación forestal dentro de los bosques de los PNEM. Para futuras investigaciones se sugiere ampliar el espectro de cobertura vegetal analizada, incorporando otras comunidades vegetales relevantes, tales como arbustales, pastizales, y particularmente, sistemas agroforestales y cultivos agrícolas tradicionales como maíz, caña de azúcar y trigo, debido a que estos también poseen la capacidad de capturar carbono en proporciones variables, dependiendo de su manejo y estructura.

En cuanto a la captura de carbono se retomaron los índices propuestos por Avendaño (2009), Díaz (2007) y Jiménez (2013), debido a que las condiciones de sus áreas de estudio, como el clima, la superficie y el tipo de suelo, presentan similitudes con las analizadas en esta investigación. Se sugiere consultar investigaciones nacionales e internacionales actuales con características similares para comparar otras fuentes y complementar los índices utilizados en esta investigación.

Por otra parte, el análisis integral de las problemáticas ambientales, económicas y sociales que inciden en la conservación de los Parques Nacionales del Estado de México se realizó a partir de una combinación de observación directa en campo, entrevistas no estructuradas y análisis documental en gabinete, con base en investigaciones previas y fuentes institucionales. Esta aproximación permitió identificar las principales problemáticas que intervienen en la conservación de las ANP. Se considera pertinente y necesario que, en futuras investigaciones, este análisis se enriquezca mediante metodologías participativas que incorporen de manera sistemática las percepciones, conocimientos y experiencias de las comunidades locales que interactúan directamente con estos espacios naturales. En este sentido, se sugiere integrar talleres participativos, entrevistas semiestructuradas, encuestas estructuradas y no estructuradas, así como técnicas de mapeo participativo y etnografía ambiental.

La metodología aplicada y desarrollada en esta tesis doctoral incluyó las siguientes etapas metodológicas; caracterización geográfico-ambiental, identificación de los ecosistemas presentes, fragmentación forestal, cálculo de carbono capturado y diagnóstico integral.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, C. y Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas, *Cinta de Moebio*, 3.
- Álvarez, P. (2012). Enfoques de la ciencia geográfica y su proyección en el proceso de enseñanza-aprendizaje. *Revista Científico-Metodológica*, 54: 58-64
- 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, *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.
- Bertalanffy Von, L. Teoría General de los Sistemas. Editorial Fondo de Cultura Económica. México. 1976.
- Benjamín, J. y Maserá, O. (2001). Captura de Carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*, vol. 7, núm. 1, 3-12.
- Braat, L. y de Groot. R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 1(1): 4-15.
- Camacho, J., Gutiérrez J., Balderas M, y Camacho J. (2021). Los ecosistemas de la zona poniente del Estado de México. Dinámica temporal y espacial. *Revista GeoSig*, 21, 1-12.
- 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
- Carvajal, B y Andrade, H (2020). Carbon capture regarding biomass from rural land use systems near the municipality of Yopal, Casanare, Colombia. *Orinoquia*, 2020; 24 (1): 13-22.
- Caro, C y Torres, M. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas, *Orinoquia* (2), 237-251.
- Cantú, P. (2013). La importancia social de los sistemas naturales para la sustentabilidad. *Ciencia UANL*. 16.
- Cervantes, M., Franco, A. y Juárez, M. (2014). Geografía ambiental de México. Distrito Federal, México: Jornadas.
- Ceballos, A. (2014). La teoría general de sistemas: su aplicación metodológica en la enseñanza del paisaje en geografía. Universidad Autónoma de Chile, 5-13.

- CONABIO. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2018). Bosques templados de México
Recuperado de <https://www.conabio.gob.mx/bosqueTemplado>.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (2008). Programa de Conservación y Manejo. Parque Nacional Lagunas de Zempoala., México.
- 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.
- Constante, V., Nava, E., Maciel, S., Cerano, J y Cabrera, A. (2020). CARBON AND CO2 STIMATION FROM THE TRUNK STRUCTURE OF PECAN TREE, *Ciencia e Innovación*, 3(1), 93-100.
- Costanza, R. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *articles NATURE | VOL 387*.
- Chuvieco, E. 2002. Fundamentos de Teledetección Espacial. 3ra edición. Rialp,S.A. Madrid, España.
- Chimbo, I. (2016). Evaluación de la Biomasa en las especies forestales introducidas (eucaliptus y pinus) y una especie nativa en el bosque Aguarongo. Universidad Politécnica Salesiana, 2-74
- 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.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, Y.J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263, pp. 185-190.
- 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*.
- 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).
- FAO, 2006. Global forest resources assessment 2005, Progress towards sustainable forest management, *Resources Assessment Working Paper* 147. Rome.
- Fisher, B. y Turner, K. (2008). Ecosystem services: classification for valuation. *Biology conservation*, 141(5): 1167-1169.
- Fisher, B.; Turner, K. y Morling, P. (2009). Defining and classifying Ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3): 643-653.
- 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.

- García, F. (2015). Ecosistemas Tecnológicos, *VAEP-RITA*, 3(1), 26-38.
- García O., F. y A. Ordóñez. (1999). El Papel de los suelos forestales en la captura de carbono. *Enviada a Nuestros Bosques*.
- Giannuzzo, A. (2010). Los estudios sobre el ambiente y la ciencia ambiental. *Scientle Studia*, 8(1): 129-156.
- 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.
- Jenkins, M. y Schaap, B. (2018). Forest Ecosystem Services. *Forest Ecosystem Services*: 1-41.
- 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).
- Jensen, J. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective* (2a. ed.). NJ: Prentice – Hall. Upper Saddle River.
- 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
- Leff, E. (2011). Sustentabilidad y racionalidad ambiental: hacia "otro" programa de sociología ambiental. *Revista Mexicana de Sociología*, 71 (1), 5-46.
- 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.
- Meral, F. (2005). Les services environnementaux en économie: revue de la littérature. Proyecto SERENA. Disponible en: <http://www.serena-anr.org/>
- Maldonado, C. (2014). ¿Qué es un sistema complejo?, *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, 14 (29). 71-93.
- 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (1995). *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Inglaterra.

- Mori, A., Lertzman, K. y Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54: 12-27. Doi: <http://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- IPCC. (2014). Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, (INECC) México. 2015.
- Uttam, R, y Mrinmoy, M. (2016). *Vulnerability of Watersheds to Climate Change Assessed by Neural Network and Analytical Hierarchy Process*. India: Springer.
- 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.
- Ramírez, J. y Chagna, E. (2019). Carbon sequestration in the aerial biomass of a plantation of *Eucalyptus grandis* W. Hill, *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 7(1):86-97.
- Reza, B., Gutiérrez, J., Espinosa, L, y Juan, J. (2021). CAMBIOS EN EL PROCESO DE EROSIÓN. EL PARQUE OTOMÍ –MEXICA, ESTADO DE MÉXICO (2014 Y 2018). *Papeles de Geografía*, 67 pp. 27-44.
- Rodríguez L. (2014). Epistemología y política de la metodología interdisciplinaria. *Revista Latinoamericana de Metodología de las Ciencias Sociales*, 4(1), 1-8.
- Rodríguez, L. (2017). Complejidad, interdisciplina y política en la teoría de los sistemas complejos, de Rolando. *Ciencias Sociales y Humanas*, 17(33), 221-242.
- Romahn, C., y Ramirez, H. (2010). *Dendrometría*. México, México: Division de Ciencias Forestales.
- 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.
- Rivadeneira, E. (2015). Comprensión teórica y proceso metodológico de la investigación cualitativa. In *Crescendo*. Institucional, 6(2), 169-183.
- 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.

- Stehman, S. y Czaplewski, R. (1998). *Desing and analysis for thematic map accuracy assessement fundamental principies*. 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.
- Vargas Márquez, Fernando. 1984. Parques Nacionales de México y Reservas Equivalentes. Pasado, presente y futuro. Colección: Grandes Problemas Nacionales. Serie: Los Bosques de México. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México, D.F. 266 páginas, más 34 de fotografías y mapa.
- Villegas, D., y Gómez, W. (2020). Procesos locales de transformación que detonan el cambio de uso de suelo y vegetación en un área natural protegida de la Región Centro de México. *Acta Universitaria* 30, e2864.

ANEXO 1

PRODUCTOS ACADÉMICOS Y CIENTÍFICOS OBTENIDOS EN EL DESARROLLO DE TESIS DOCTORAL

A partir del desarrollo del trabajo de tesis doctoral se desarrollaron los siguientes productos científicos como artículos científicos, capítulos de libro y ponencias que se presentaron en México y Argentina (Tabla 78).

Tabla 78. Productos académicos y científicos obtenidos en el desarrollo de la tesis doctoral

No.	Producto	Nombre	Revista/Libro/Evento	Parque
1	Artículo Publicado	Fragmentación Forestal y Captura de Carbono en el Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo Costilla del Estado de México.	Revista Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Noviembre 2023	Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla
2	Artículo Enviado	Fragmentación Forestal En El Parque Nacional Bosencheve.	Revista: Papeles de geografía 20 de agosto de 2024	Parque Nacional Bosencheve
3	Artículo Enviado	Fragmentación forestal y captura de carbono en el Parque Nacional Los Remedios, Estado de México.	Revista: Sociedad y Ambiente 28 de agosto de 2024	Parque Nacional Los Remedios.
4	Capítulo de libro Aceptado	Fragmentación en los ecosistemas forestales del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.	Libro: Ordenación y planeación territorial sustentables. Revisión y acciones urgentes ambientales y socioeconómicas. Extenso enviado el 28 de marzo Recibido Primer dictamen el 29 de abril Enviado corregido el 22 de mayo	Parque Nacional Lagunas de Zempoala

5	Capítulo de libro Aceptado	Fragmentación forestal y captura de carbono en el Parque Nacional El Tepeyac.	Libro: Gobernanza, riesgos y cambio climático: hacia la transdisciplina Extenso enviado el 28 de febrero 2024 Reenviado el 22 de mayo.	Parque Nacional El Tepeyac
6	Ponencia Constancia	Fragmentación en los ecosistemas forestales del Parque Nacional Lagunas de Zempoala.	XXIII Simposio Mexicano-Polaco: Ordenación y planeación territorial sustentables. Revisión y acciones urgentes ambientales y socioeconómicas 04 de Septiembre de 2023	Parque Nacional Lagunas de Zempoala
7	Ponencia Constancia	Fragmentación forestal y captura de carbono en el Parque Nacional El Tepeyac	9º Congreso Internacional de "Gobernanza, riesgos y cambio climático. Hacia la Transdisciplina RETESyG 16, 17 y 18 de enero de 2024	Parque Nacional El Tepeyac
8	Ponencia Constancia	Fragmentación forestal y captura de carbono en el parque nacional los Remedios en el Estado de México.	XX Congreso de la Federación Internacional de Estudios sobre América Latina y El Caribe (FIEALC) 19 al 23 de Septiembre del 2023	Parque Nacional los Remedios
9	Ponencia Constancia	Importancia del parque nacional molino de flores para la conservación biocultural y de la biodiversidad.	XIII Congreso Mexicano de Etnobiología 24 al 28 de junio de 2024	Parque Nacional Molino de Flores

10	Ponencia Resúmen enviado: aceptado	Fragmentación forestal y captura de carbono en el Parque Nacional Desierto del Carmen "Nixcongo" Estado de México.	Congreso: GLP's 5th Open Science Meeting: Pathways to Sustainable and Just Land Systems (OAXACA)	Desierto del Carmen o de Nixcongo
----	------------------------------------	--	--	-----------------------------------

Fuente: elaboración propia (2024).

← 📎 ⚠️ 🗑️ | 📧 📁 ⋮ 25 de 31 < >

[Geografía] Decisión del editor/a Recibidos x ✕ 🖨️ 📄

 **Dr. Alfredo Pérez Morales** via **Revistas Científicas de la Universidad d...** 📧 jue, 19 sept 2024, 11:21 ★ 😊 ↶ ⋮
para mí ▾

Estimado Santiago Juan Medina Silva:

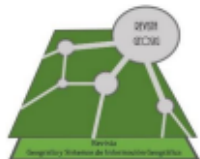
Hemos tomado una decisión sobre su envío en Papeles de Geografía, "FRAGMENTACIÓN FORESTAL EN EL PARQUE NACIONAL BOSENCHAVE".

Nuestra decisión es: Necesita revisiones

La evaluación del único revisor que hemos podido encontrar para la evaluación de su trabajo se incluye más abajo. Una vez haya atendido a todas las indicaciones realizadas, le rogamos que nos envíe los siguientes documentos en el plazo de un mes a contar desde el día 20/09/2024:

1. Nueva versión corregida de su trabajo en formato word.
2. Versión de su trabajo con los cambios realizados destacados en letra roja y texto tachado en letra roja cuando corresponda.
3. Carta de respuesta al revisor atendiendo a las peticiones que se hacen para la mejora de su artículo.

Revisión del artículo: "Fraagmentación forestal en el Parauue Nacional Bosencheve"



Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG).
Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en
Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad
Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 15, Número 27, 2023, Sección I: Artículos. pp. 1-21

FRAGMENTACIÓN FORESTAL Y CAPTURA DE CARBONO EN UN PARQUE NACIONAL DEL ESTADO DE MÉXICO

Santiago Medina Silva – Jesús Gutiérrez Cedillo – Miguel Balderas Plata – José
Isabel Pérez

Universidad Autónoma del Estado de México

santi040695@gmail.com

RESUMEN

En el presente estudio se realizó un análisis espacial con el objetivo de identificar los niveles de fragmentación forestal en los bosques presentes en el Área Natural Protegida (ANP) Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla durante el año 2022, mediante la aplicación de herramientas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). En la zona central del Parque Nacional se ubica la autopista México – Toluca, que ha propiciado el desarrollo de actividades turísticas, lo que ha provocado un incremento en la fragmentación de los ecosistemas forestales como consecuencia de la demanda de nuevos espacios para áreas recreativas y restaurantes tradicionales. La metodología que se aplicó en este estudio consta de las siguientes etapas: 1) clasificación e identificación de los ecosistemas presentes en el Parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema forestal, mediante fotointerpretación cartográfica; 2) delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema; 3) cálculo de la fragmentación por cada ecosistema forestal y 4) cálculo de la captura de carbono. Esto permitió identificar las zonas con los niveles de menor densidad forestal y mayor fragmentación dentro del área de estudio. Los resultados obtenidos consisten en la representación cartográfica de los niveles de fragmentación en los ecosistemas forestales representados en cinco rangos Likert; se identificó que los niveles de fragmentación forestal más altos se ubican en la zona centro y sur del parque, donde se desarrolla infraestructura para servicios turísticos.

Palabras clave: Análisis espacial, Fragmentación forestal, Ecosistemas forestales, Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, Validación de cartografía.



Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG).
Revista digital del Programa de Docencia e Investigación en
Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Universidad
Nacional de Luján, Argentina.

<http://www.revistageosig.wixsite.com/geosig> (ISSN 1852-8031)

Luján, Año 16, Número 29, 2024, Sección I: Artículos. pp. 1- 14

FRAGMENTACIÓN EN LOS ECOSISTEMAS FORESTALES DEL PARQUE NACIONAL LAGUNAS DE ZEMPOALA

Santiago Juan Medina Silva – Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Universidad Autónoma del Estado de México

santi040695@gmail.com

RESUMEN

La fragmentación forestal en Áreas Naturales protegidas en México es una problemática actual, por lo que la finalidad de la investigación es evaluar los niveles de fragmentación en los bosques del Parque Nacional Lagunas de Zempoala, en el año 2022. El Área Natural Protegida presenta diversos impactos ambientales, derivados de los cambios de uso de suelo y las actividades antrópicas no reguladas dentro del área de estudio. Los procesos metodológicos realizados para la elaboración cartográfica se dividieron en tres etapas metodológicas: como primera etapa se agruparon los diferentes elementos ambientales destacando los bosques para estimar la superficie de cada ecosistema, mediante una clasificación supervisada; en la segunda etapa se realizó una validación de la cartografía. Finalmente, se estimó la fragmentación forestal con el objetivo de delimitar las zonas con menor densidad forestal. Los productos finales son tres mapas referentes a los bosques de oyamel, pino y mixto de pino-oyamel, en la cartografía se identificaron las zonas con los niveles altos de fragmentación forestal. En el apartado de resultados se describen los diferentes elementos ambientales identificados, además se realizó un análisis y se concluyó que los bosques de oyamel y de pino presentan niveles altos de fragmentación forestal en la zona noreste y centro del área de estudio, consecuencia de diversas variables antrópicas como cambios de uso de suelo y la ineficiente aplicación de la normativa ambiental en Áreas Naturales Protegidas. Los estudios referentes a la fragmentación forestal representan un esfuerzo importante en la contribución para la recuperación de los bosques en los Parques Nacionales ya que brindan diversos servicios ecosistémicos a la sociedad en general.

Palabras clave: Área Natural Protegida, Fragmentación forestal, Parque Nacional, Lagunas de Zempoala, Validación cartográfica.



Universidad Autónoma
del Estado de México

La Universidad Autónoma del Estado de México
a través de la Facultad de Geografía
y la Facultad de Planeación Urbana y Regional

Otorgan la presente

Constancia

A:

Santiago Juan Medina Silva

Como ponente del trabajo de investigación:

***Fragmentación en los ecosistemas forestales del
Parque Nacional lagunas de Zempoala***

del "XXIII Simposio Mexicano-Polaco Ordenación y planeación territorial sustentables. Revisión y acciones
urgentes ambientales socioeconómicas" que se llevó a cabo de manera híbrida en la Facultad de Geografía el

Lunes 04 de Septiembre de 2023

ATENTAMENTE

CIENCIA Y TRABAJO

"2023, Conmemoración de los 100 años de la fundación del Instituto Literario del Estado de México"

Dr. en G. Rodrigo Huitrón Rodríguez

Director de la Facultad de Geografía



FACULTAD DE GEOGRAFÍA
DIRECCIÓN



FACULTAD DE PLANEACIÓN
URBANA Y REGIONAL
DIRECCIÓN

M. en E. U. y R. Isidro Rogel Fajardo

Director de la Facultad de Planeación Urbana y Regional



UNIVERSITY
OF WARSAW



ADMINISTRACIÓN
UNIVERSITARIA
2021 - 2025

19 Años
de trayectoria académica

UBAeconómicas
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS



CEINLADI

CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ESTUDIOS LATINOAMERICANOS
PARA EL DESARROLLO Y LA INTEGRACIÓN



CIALC
Centro de Investigaciones sobre
América Latina y el Caribe

XX CONGRESO DE LA FEDERACIÓN INTERNACIONAL DE
ESTUDIOS SOBRE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE-FIEALC

**"América Latina y su relación con el mundo. Aproximaciones multidimensionales
desde sus orígenes hasta la nueva realidad global".**

19 al 22 de septiembre 2023

POR CUANTO **Prof. Santiago Juan Medina Silva**

HA PARTICIPADO EN CALIDAD DE **Expositor**

"Fragmentación forestal y captura de carbono en el parque nacional los
Remedios en el Estado de México"

Prof. Dra. María de Monserrat LLairó
Directora CEINLADI



Universidad Autónoma
del Estado de México

Otorga la presente

Constancia

a

Santiago Juan Medina Silva

Por la **exposición de la ponencia "Fragmentación forestal y captura de carbono en el Parque Nacional El Tepeyac"**, en el marco del 9º Congreso Internacional de "Gobernanza, riesgos y cambio climático. Hacia la Transdisciplina", (modalidad Híbrida), efectuado los días 16, 17 y 18 de enero de 2024, en la Facultad de Geografía, UAEMéx.

Toluca de Lerdo, a 2 de febrero de 2024

Patria, Ciencia y Trabajo

"2024, Conmemoración del 60 Aniversario de la Inauguración del Grupo Universitaria"


Maestra en Geografía
Lidia Alejandra González Becerra
Directora



XIII Congreso Mexicano
de Etnobiología
Integrando la diversidad de miradas y concepciones del mundo



La Asociación Etnobiológica Mexicana

Otorga la presente

CONSTANCIA

**A: Santiago Juan Medina Silva, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo y
José Isabel Juan Pérez**

Por su participación con la ponencia: "Importancia del parque nacional molino de flores para la conservación biocultural y de la biodiversidad" presentada en el marco del simposio "El papel del conocimiento tradicional en la conservación biocultural del territorio"

Durante el XIII Congreso Mexicano de Etnobiología, celebrado del 24 al 28 de junio de 2024 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México



Dra. Claudia I. Camacho Benavides
PRESIDENTA DE LA AEM



Dr. José Blancas
PRESIDENTE DEL COMITÉ LOCAL



ANEXO 2

ACTIVIDADES DE RETRIBUCIÓN SOCIAL

Actividad 1. Taller sobre la Importancia del Área Natural Protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala”

Descripción de la actividad:

Se realizó el taller titulado Importancia del Área Natural Protegida “Parque Nacional Lagunas de Zempoala” el día 13 de Julio de 2024, expuesto a los ejidatarios y población de Ocuilan de Arteaga en la localidad de Santa Ana. La importancia de esta actividad radica en dar a conocer los diversos beneficios que brinda (servicios ambientales) el Parque, como pueden contribuir a los cuidados de los bosques y las consecuencias ambientales de la tala ilegal en la zona. El objetivo principal es dar a conocer las potencialidades de los ecosistemas forestales para concientizar a la sociedad de la importancia que tienen estos espacios naturales.

Los materiales que se utilizaron fueron una laptop, cañón para su proyección y unos folletos que se repartieron a los asistentes. Por otra parte, se eligió a esta población principalmente porque es la que está en constante interacción con el parque al ser ejidatarios y dueños de la mayor parte de superficie del parque.

El papel desempeñado por mi parte fue la elaboración de la presentación, lista de asistencia, diseño de folletos, exposición del taller así como la búsqueda de los principales actores dentro de la comunidad para la conexión con los ejidatarios del parque.

Evidencias de actividad 1



Actividad 2. Comentarista en las presentaciones finales del Seminario de Tesis I -Maestría Ciencias Ambientales de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Descripción de la actividad:

Se participó como comentarista en el las presentaciones finales del Seminario de Tesis I -Maestría Ciencias Ambientales de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México. En el evento se aportaron diversos puntos de vista sobre las investigaciones de los estudiantes del primer semestre de maestría.

El evento se llevó a cabo en la Sala de Videoconferencias de las instituciones del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (CCIQS, el día 14 y 21 de noviembre de 2024.

No se utilizaron materiales prácticos solo el conocimiento científico adquirido en mi formación para contribuir con mis comentarios a guiar los protocolos de investigación expuestos en los dos días del evento.

El papel desempeñado de mi parte fueron los comentarios para cada expositor al final de cada presentación, las aportaciones realizadas fueron con el objetivo de guiar los trabajos de investigación y ampliar el panorama científico para un mejor desempeño académico de los participantes.

Al termino dela actividad los expositores ampliaron su conocimiento para la construcción de un protocolo de investigación solido con base al método científico además de los comentarios relacionados con los alcances de cada investigación para que se desarrollen de la mejor manera y se culminen en tiempo y forma.

Evidencias de actividad 2.





Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Química

Coordinación de la Maestría y Doctorado en Ciencias Ambientales

Otorga la presente

Constancia

A:

Mtro. Santiago Juan Medina Silva

Por su valiosa y destacada participación como COMENTARISTA de las presentaciones finales de los Avances de Investigación de los alumnos de la Maestría en Ciencias Ambientales de la Unidad de Aprendizaje "Seminario de Tesis I", llevada a cabo en la Sala de Videoconferencias de las instalaciones del Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (CCIQS).

Toluca de Lerdo, 14 y 21 de noviembre de 2024

ATENTAMENTE

"PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO."

"2024, Conmemoración del 60 Aniversario de la Inauguración de Ciudad Universitaria"

Dña. Gabriela Roa Morales

**Coordinadora del Programa de Maestría y
Doctorado en Ciencias Ambientales
Facultad de Química**



U.A.E.M.
FACULTAD DE QUÍMICA
COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN
CENTRO CONJUNTO DE INVESTIGACIÓN
EN QUÍMICA SUSTENTABLE



Actividad 3. Participación en la Campaña Estatal de Reforestación en el municipio de Zinacantepec, Ejido San Cristóbal Tecolit”

Descripción de la actividad:

Se participó como voluntario en la Campaña Estatal de Reforestación en el municipio de Zinacantepec, Ejido San Cristóbal Tecolit en coordinación por representantes de Probosque, la actividad se realizó el día 14 de agosto de 2024 e punto de las 9:00 de la mañana, nos reunimos en el paradero conocido como la cabaña del oso. Se utilizaron herramientas como pico, pala y azadón, las especies que se utilizaron para la reforestación fueron pino y encino, mismos que fueron proporcionados por los encargados de la actividad.

El papel desempeñado de mi parte fue contribuir con la plantación de las especies de árboles ya mencionados con el resto de los participantes.

Al termino dela actividad se contribuyó a la recuperación de espacios degradados ambientalmente por los cambios de uso de suelo en el Municipio de Zinacantepec con el objetivo de mitigar las problemáticas causadas por la tala ilegal, con la participación en las campañas de reforestación se ayudó a crear responsabilidad ambiental en los habitantes de la comunidad del Ejido San Cristóbal Tecolit para cuidar los árboles plantados en la zona y su desarrollo de estas especies sea el ideal.

Evidencias de actividad 3.



