

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN Y MODELACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN EL
PARQUE OTOMÍ MEXICA DEL ESTADO DE MÉXICO. PROPUESTA
METODOLÓGICA**

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

PRESENTA:

BRENDA YAZMIN REZA CURIEL

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JESÚS GASTÓN GUTIÉRREZ CEDILLO

CO-DIRECTORES:

DR. LUIS MIGUEL ESPINOSA RODRÍGUEZ

DR. JOSÉ ISABEL JUAN PÉREZ

SEPTIEMBRE DE 2022

ÍNDICE

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN	13
ANTECEDENTES	16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
HIPÓTESIS.....	20
OBJETIVOS	21
JUSTIFICACIÓN	22
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....	26
1.1 Postura filosófica del estoicismo para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación.	27
1.2 Escuela del pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales aplicado a los Servicios Ecosistémicos.....	29
1.3 Importancia de los Servicios Ecosistémicos para la resiliencia socioambiental.....	32
1.4 Disciplinas que sustentan la investigación.....	34
1.5 Prospectiva de los Servicios Ecosistémicos	36
1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	40
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	42
<i>2. Primera etapa metodológica. Análisis espaciotemporal de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica.</i>	<i>45</i>
<i>2.2 Segunda etapa metodológica. Análisis espaciotemporal de los servicios ecosistémicos.....</i>	<i>61</i>
<i>2.3 Tercera etapa metodológica. Modelación de los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos.....</i>	<i>75</i>
<i>2.4 Cuarta etapa metodológica. Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.</i>	<i>81</i>
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
3.1 Características Geográficas y Ambientales en el Parque Otomí Mexica.....	85
3.2 Análisis espaciotemporal de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica (2014 y 2018).....	99
3.3 Distribución espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de regulación: captura de carbono 2014.....	121

3.3.1 Carbono capturado en cada ecosistema para el año 2014, mediante el índice de Morfín <i>et al.</i> , (2015).....	123
3.4 Distribución espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de regulación: almacenamiento de carbono 2018.....	126
3.4.1 Carbono capturado en cada ecosistema para el año 2018, mediante el índice de Morfín <i>et al.</i> , (2015).....	127
3.4.2 Validación “ <i>in situ</i> ” de las características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí-Mexica.....	131
3.5 Retención del suelo mediante la metodología de RUSLE en el Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014 y 2018.....	140
3.5.1 Factor R. Erosividad de la lluvia.....	141
3.5.2 Factor K. Erosionabilidad del suelo.....	144
3.5.3 Factor LS. Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno.....	150
3.5.4 Factor C. Cobertura vegetal.....	152
3.5.5 Erosión del suelo en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014.....	156
3.5.6 Erosión del suelo en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2018.....	159
3.5.7 Cambios en el proceso de erosión en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014 y 2018.....	161
3.6 Recarga de Acuíferos en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 – 2018.....	166
3.6.1 Estimación de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica 2014 y 2018.....	166
3.6.2 Estimación de la Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018.....	170
3.6.3 Estimación de evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018.....	173
3.6.4 Estimación de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018.....	175
3.7 Modelación de escenarios de servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica 1998 - 2025.....	183
3.7.1 Modelación de escenarios de Captura de Carbono (ton) en los ecosistemas forestales en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).....	183
3.7.2 Modelación de escenarios de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).....	189
3.7.3 Modelación de escenarios de Recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 – 2025).....	203

3.8 Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación en Áreas Naturales Protegidas.....	208
3.8.1 Componentes Teóricos de la Propuesta.....	208
3.8.1.1 Postura filosófica del estoicismo para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación	209
3.8.1.2 Escuela del pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales aplicado a los Servicios Ecosistémicos	210
3.8.1.3 Desarrollo Sustentable.....	210
3.8.1.4 Los Servicios Ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental.....	211
3.8.1.5 Las Ciencias Ambientales como disciplina integradora	212
3.8.1.6 Teoría de Sistemas Complejos para el análisis de los Servicios Ecosistémicos.....	212
3.8.1.7 Teoría de la Ecología Cultural.....	213
3.8.1.8 Prospectiva de los Servicios Ecosistémicos.....	213
3.8.2 Componentes Metodológicos de la Propuesta.....	214
3.8.2.1 Asociación de las características geográficas y ambientales.....	215
3.8.2.2 Servicios ecosistémicos evaluados.....	215
3.8.2.3 Identificación, monitoreo y análisis de variables y parámetros estadísticos.....	216
3.8.2.4 Discusión Teórico - Empírica e Interpretación de Resultados.....	217
3.8.2.5 Modelación y Prospectiva de los Escenarios para cada Servicio Ecosistémico.....	217
3.8.2.6 Propuesta Teórico Metodológica para el estudio de los Servicios Ecosistémicos en Áreas Naturales Protegidas (SEANP)	217
3.9 Discusión General	221
CONCLUSIONES.....	227
RECOMENDACIONES.....	229
Productos.....	231
de	231
Investigación.....	231
BIBLIOGRAFÍA	237

ÍNDICE DE FIGURAS

No.	Figura	Pág.
1	Clasificación de los servicios ecosistémicos	18
2	Procesos del ecosistema, servicios ecosistémicos y beneficios	19
3	Escuela del pensamiento ecológico	30
4	Modelo de resiliencia a partir de la biodiversidad	34
5	Modelo propuesto por Porter	38
6	Modelo propuesto por Iver B. Neumann y Erik F. Verland	39
7	Escenario ideal, tendencial y estratégico	40
8	Primera etapa metodológica 1.1 Estabilización para la asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica.	57
9	Primera etapa metodológica 1.2 Asociar los usos del suelo presentes en el Parque Otomí Mexica	58
10	Primera etapa metodológica 1.3 Integración de los tipos de vegetación presentes en el parque Otomí Mexica.	59
11	Primera etapa metodológica 1.4 Estabilización de los ecosistemas presentes en el parque Otomí Mexica.	60
12	Segunda etapa metodológica 2.1 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución del Almacenamiento de Carbono	64
13	Asignación de valor para K en función de la unidad de suelo y textura	67
14	Asignación de valor para C en función del uso de suelo y vegetación	68
15	Segunda etapa metodológica 2.2 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Retención de suelo	70
16	Segunda etapa metodológica 2.3 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Recarga del acuífero	74
17	Definir fecha, para el año 2014	77
18	Seleccionar Analizar regresión estimación curvilínea para el año 2014	78
19	Seleccionar variable dependiente por Servicios Ecosistémicos	78
20	Modelador de series temporales	79
21	<u>Tercera etapa metodológica. Modelación de los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos en el Parque Otomí</u>	80
22	<u>Cuarta etapa metodológica. Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.</u>	83
23	Mapa de Ubicación Geográfica del Parque Otomí – Mexica del Estado de México.	87
24	Mapa Hidrológico del Parque Otomí – Mexica	95
25	Mapa de Temperatura Mínima Parque Otomí – Mexica	96
26	Mapa de Temperatura Máximas Parque Otomí – Mexica	97
27	Mapa Geológico Parque Otomí - Mexica	98
28	Mapa de Clasificación de Roca Parque Otomí - Mexica	99

29	Uso de suelo y vegetación del Parque Otomí Mexica del Estado de México, año 2014	101
30	Uso de suelo y vegetación del Parque Otomí Mexica del Estado de México, año 2018	102
31	Mapa de Proceso de transformación Parque Otomí – Mexica 2014 – 2018.	121
32	Mapa de Distribución espacial de tipo de ecosistema. Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014.	123
33	Mapa de Distribución espacial de tipo de ecosistema. Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2018.	128
34	Factor R. Erosividad de la lluvia en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014.	143
35	Factor R. Erosividad de la lluvia en el Parque Otomí Mexica, Estado de México 2018	144
36	Factor K. Erosionabilidad del suelo en el Parque Otomí- Mexica Estado de México 2014 y 2018	150
37	Factor LS Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno en el Parque Otomí –Mexica, Estado de México 2014 y 2018	152
38	Cobertura vegetal (Factor C) en el Parque Otomí - Mexica 2014	154
39	Cobertura vegetal (Factor C) en el Parque Otomí - Mexica 2018	156
40	Erosión del suelo en el Parque Otomí - Mexica Estado de México 2014	159
41	Erosión del suelo en el Parque Otomí - Mexica Estado de México 2018	161
42	Cambios en el proceso de erosión en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 y 2018	162
43	Precipitación Pluvial Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014	169
44	Precipitación Pluvial Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018	170
45	Temperatura Media Anual Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014	172
46	Temperatura Media Anual Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018	173
47	Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014	174
48	Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018	175
49	Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica 2014	176
50	Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018	177
51	Selección de los componentes teóricos de la propuesta	209
52	Selección y diseño de los componentes metodológicos de la propuesta	215

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

No.	Diagrama	Pág.
1	Metodología general	45
2	Primera etapa metodológica. Identificación de ecosistemas	61
3	Segunda etapa metodológica fase 1 Almacenamiento de Carbono	65
4	Segunda etapa metodológica fase 2 Retención de suelo	71
5	Segunda etapa metodológica fase 3 Recarga del acuífero	75
6	Tercera etapa metodológica. Escenarios futuros de los Servicios Ecosistémicos	81
7	Cuarta etapa metodológica. Propuesta teórico metodológico	84

ÍNDICE DE TABLAS

No.	Tabla	Pág.
1	Principales ecosistemas en el Parque Estatal Otomí – Mexica del Estado de México.	51
2	Matriz de confusión o matriz de error	55
3	Matriz de confusión expresada en proporción	55
4	Índice de fiabilidad y medio intervalo de confianza	56
5	Localidades ubicadas en el contexto del Parque Otomí – Mexica, Estado de México.	88
6	Corrientes perennes dentro del Parque Estatal Otomí-Mexica, Estado de México.	90
7	Condiciones geológicas del territorio administrativo Parque Otomí-Mexica del Estado de México	94
8	Matriz de confusión 2014	105
9	Matriz de confusión 2018	106
10	Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2014	107
11	Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2018	108
12	Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2014)	109
13	Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2018)	110
14	Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2014	111
15	Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2018	112
16	Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2014	113
17	Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2018	114

18	Matriz de cambios del Parque Otomí – Mexica Estado de México. Periodo 2014 – 2018	117
19	Indicadores de cambio del Parque Otomí – Mexica Estado de México.	120
20	Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Oyamel	133
21	Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Encino	133
22	Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Pinus hartwegii	134
23	Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Encino - Pino	135
24	Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque mesófilo de montaña	136
25	Indice de almacenamiento de carbono en el bosque mixto pino – encino con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas	138
26	Indice de almacenamiento de carbono en el bosque de encino con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas	139
27	Indice de almacenamiento de carbono en el bosque de oyamel con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas	139
28	Indice de almacenamiento de carbono en el bosque pinus hartwegii con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas	140
29	Características ambientales y morfológicas de diferentes autores	163
30	Factor C con base en diferentes autores	164
31	Factor K con base en diferentes autores	165
32	Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Encino (<i>Quercus</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	184
33	Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque Mixto (Encino - Pino) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	186
34	Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Oyamel (<i>Abies Religiosa</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	187
35	Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Pino (<i>Pinus hartwegii</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	188
36	Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque mesófilo de montaña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	189
37	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Jiquipilco en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	190

38	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica. La Marquesa en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	191
39	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica San Luis Ayucan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	192
40	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santiago Tlazala, Isidro Fabela en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	193
41	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Presa Iturbide en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	194
42	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santa Cruz Ocuilan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	195
43	Ajuste del modelo Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Monte de Peña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	196
44	Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Mimiapan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	197
45	Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (<i>Pinus hartwegii</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	198
46	Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (<i>Quercus</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	199
47	Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (<i>Abies Religiosa</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	200
48	Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	201
49	Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	202
50	Ajuste del modelo del escenario de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	203
51	Ajuste del modelo del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	204
52	Ajuste del modelo del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	205
53	Ajuste del modelo del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	206
54	Propuesta Teórico Metodológica para el estudio de SEANP	218

ÍNDICE DE GRÁFICAS

No.	Gráfica	Pág.
-----	---------	------

1	Superficie de cada ecosistema en el Parque Otomí Mexica, 2014	124
2	Indice de Almacenamiento de carbono por tipo de ecosistema (ton/ha) Parque Otomí Mexica, 2014	125
3	Carbono total almacenado (ton) en el Parque Otomí Mexica, 2014.	126
4	Superficie de cada ecosistema en el Parque Otomí Mexica, 2018	129
5	Indice de Almacenamiento de carbono por tipo de ecosistema (ton/ha) Parque Otomí Mexica, 2018	130
6	Carbono total almacenado (ton) en el Parque Otomí Mexica, 2018.	130
7	Precipitación media anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.	142
8	Superficies de los suelos en el Parque Otomí – Mexica Estado de México	145
9	Textura de los suelos en el Parque Otomí – Mexica Estado de México	147
10	Materia Orgánica, Permeabilidad y Estructura de los suelos en el Parque Otomí – Mexica Estado de México	148
11	Precipitación Media Anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.	168
12	Temperatura media anual (TMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.	171
13	Precipitación Media Anual y Evapotranspiración Potencial del Parque Otomí Mexica.	178
14	Temperatura Media Anual del Parque Otomí Mexica	178
15	Balance hídrico del Parque Otomí Mexica	179
16	Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Encino (<i>Quercus</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	185
17	Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque Mixto (Encino - Pino) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	186
18	Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Oyamel (<i>Abies Religiosa</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	187
19	Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Pino (<i>Pinus hartwegii</i>) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	188
20	Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque mesófilo de montaña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	189
21	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Jiquipilco en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	190
22	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica La Marquesa en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	191

23	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica San Luis Ayucan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	192
24	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santiago Tlazala, Isidro Fabela en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	193
25	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Presa Iturbide en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	194
26	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santa Cruz Ocuilan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	195
27	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Monte de Peña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	196
28	Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Mimiapan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	197
29	Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (<i>Pinus hartwegii</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	198
30	Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (<i>Quercus</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	199
31	Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (<i>Abies Religiosa</i>) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	200
32	Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	201
33	Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	202
34	Modelación del escenario de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)	203
35	Modelación del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	204
36	Modelación del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	205
37	Modelación del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)	206

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal la evaluación de los servicios ecosistémicos del Parque Turístico y Recreativo Zempoala – La Bufo denominado Parque Otomí – Mexica del Estado de México. Cabe mencionar que en toda la investigación se retomó con el nombre Parque Otomí – Mexica del Estado de México y modelar escenarios futuros, en el cual se elaboró una propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas. Toda vez que los servicios ecosistémicos del Parque Otomí – Mexica del Estado de México, tiene problemas ambientales en los cuales es necesario establecer una relación saludable hombre – naturaleza. Inicialmente se estableció una asociación de la caracterización de los Servicios Ecosistémicos de regulación en el parque Otomí Mexica. La primera etapa metodológica fue la identificación de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí – Mexica, que incluyó clasificar, tipificar para posteriormente, cuantificar y fotointerpretar cartográficamente para después, ubicar espacialmente, en dicho proceso se obtuvo el mapa de uso de suelo, tipos de vegetación y ecosistemas presentes en el Parque Otomí – Mexica.

Posteriormente se procedió a la integración de la caracterización y cuantificación para la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: almacenamiento de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos, del Parque Otomí - Mexica. El estudio incluyó modelar escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos, el cual consistió en ubicar espacialmente los tipos de ecosistemas en Sistemas de Información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Y finalmente se procedió a la elaboración de una propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas.

INTRODUCCIÓN

La sociedad se relaciona de manera dinámica con los ecosistemas presentes en nuestro territorio lo que da lugar a distintos servicios ecosistémicos. Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT, (2019) México representa una parte significativa, que equivale al 10% de la biodiversidad global. Es fundamental que la población conozca la importancia que tienen los Servicios Ecosistémicos en el entorno para tomar decisiones con opciones informadas y críticas para frenar el impacto ambiental y hacer conciencia en la conservación de los ecosistemas.

A partir de los 90's los Servicios Ecosistémicos se popularizaron, según Daily, (1997) "las condiciones y procesos a través de las cuales los ecosistemas naturales, y las especies que lo conforman sostienen y realizan la vida humana". Costanza *et al.*, (1997) "los beneficios que las poblaciones humanas derivan, directa o indirectamente, de las funciones de los ecosistemas". Los servicios ecosistémicos que se abordaron son de regulación entre ellos están: captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero dichos servicios ecosistémicos mantienen un equilibrio en los ecosistemas.

Para llevar a cabo cada objetivo planeado fue necesario el desarrollo e instrumentación de tres capítulos, el primer capítulo contiene el análisis, selección y descripción de la postura filosófica, escuela del pensamiento, importancia de los servicios ecosistémicos, disciplinas que sustentan la investigación y prospectiva de los servicios ecosistémicos.

En el segundo capítulo se describen las fases metodológicas, el método de determinación, unidades de medición, variables, parámetros estadísticos y un producto que determina cada una de las etapas, técnicas, herramientas e insumos geotecnológicos utilizados en la investigación.

En el tercer capítulo se describieron los resultados obtenidos de la investigación, 1) se estableció la asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica con base en los principios y el método

cartográfico, se validaron los resultados de los mapas de uso de suelo a través de matrices de confusión, aplicados por Camacho, (2019) para obtener el índice de confiabilidad de intervalos de confianza para cada ecosistema.

2) Se evaluó el servicio ecosistémico de captura de carbono, se aplicó el índice de Morfín *et al.*, (2015) posteriormente se hizo una comparación del carbono almacenado con diferentes autores bajo las características ambientales y morfológicas, se finalizó con la validación “in situ” de las condiciones ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí Mexica.

3) Se evaluó el servicio ecosistémico de retención del suelo, se retomó la metodología de Vargas, (2015) el cual utilizó el RUSLE Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año, obteniendo el factor R erosividad de la lluvia en mm/ha año, factor k erosionabilidad el suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha h), factor L longitud del terreno (adimensional), factor S pendiente del terreno (adimensional) y factor C cobertura y manejo de la vegetación (adimensional). Lo que nos dio como resultado la retención de suelo en el Parque Otomí Mexica para los años 2014 – 2018.

4) Se evaluó el servicio ecosistémico de recarga del acuífero se aplicó el método empleado fue de Llerena (2003), utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo comprendido 2014 – 2018. Las etapas metodológicas empleadas incluyen 1) Estimación de Precipitación Pluvial, 2) Temperatura Media Anual, 3) volumen evapotranspirado y 4) evapotranspiración anual real.

5) Se modelaron los escenarios a futuro de los Servicios Ecosistémicos, de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero del Parque Otomí Mexica se aplicó el modelo propuesto por Porter el cual consiste en: 1) identificación de variables, 2) elementos dependientes, 3) cambios estructurales predeterminados, 4) ecosistemas futuros, 5) elementos constantes de los ecosistemas.

6) Se identificaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible el cual se fundamentó en los Servicios Ecosistémicos, en la gestión sosteniblemente de los bosques del Parque Otomí Mexica, en la lucha contra la desertificación, así como en detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad

7) Se diseñó la propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas. Se aplicó la siguiente metodología 1) Selección de los componentes teóricos de la propuesta: posturas filosóficas, escuelas del pensamiento, teorías y disciplinas. 2) Selección y diseño de los componentes metodológicos de la propuesta: servicios ecosistémicos evaluados Identificar variables y parámetros estadísticos de cada variable. 3) Propuesta de modelo teórico metodológico.

Se finaliza con una serie de conclusiones y recomendaciones para tomar decisiones en futuras investigaciones.

ANTECEDENTES

A nivel internacional la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, (2019), da a conocer los servicios de regulación por medio de una breve síntesis en el cual resumen lo más importante para que el usuario pueda comprender de la manera más sencilla el almacenamiento de carbono.

A nivel Estado de México se destaca el artículo científico de los autores Farfán y Orozco (2007) hace una propuesta de pasar del enfoque unidisciplinario en el estudio de los recursos naturales a una cosmovisión más integradora se sustenta en los propósitos de la ciencia ambiental.

Caro y Torres, (2015), mezcla métodos y la puesta en común de los datos parece ser el único camino a seguir en la valoración de servicios ecosistémicos, destacando el potencial de la investigación interdisciplinaria sistemática y formal que integre los puntos de vista, los métodos y los datos extraídos de las ciencias naturales y las ciencias sociales.

García; Almeida y Ávila, (2016) los autores anteriores realizaron un estudio en el cual analizan la riqueza biológica de la cuenca en el que se originó el decreto estatal de dos áreas naturales protegidas: el Parque Estatal Otomí Mexica (Poder Ejecutivo del Estado de México, 1980) y el Santuario del Agua y Forestal Presa Guadalupe (Poder Ejecutivo del Estado de México, 2004), ubicadas en la parte alta y baja de la cuenca, respectivamente.

Villegas; Gutiérrez; Gómez y Espinosa (2018) los autores anteriores hacen un análisis integral de los componentes territoriales (biofísicos y socioculturales) del parque Otomí Mexica, mediante las consideraciones epistemológicas de tres premisas teóricas, la primera de ellas es la Teoría General de Sistemas de Bertalanffy (1950), de la cual se retoma la postura multidisciplinaria, la cual tiene por objetivo estudiar y analizar los diferentes niveles de la realidad, siendo cada nivel estudiado por una disciplina o varias.

Posteriormente el antecedente al concepto de servicio ecosistémico fue descrito por primera vez en 1970 en el informe *Study of critical environmental problems*, donde se menciona como “función ecosistémica” (Nahuelhual y Núñez, 2011). Más tarde Ehrlich *et al.*, (1983) emplearon el término “funciones del ambiente global para la provisión de servicios públicos”. Tiempo después Ehrlich y Mooney (1983) lo simplificaron a “servicio ecosistémico”. Es hasta 1997 cuando Daily (1997) y Costanza *et al.*, (1997) propusieron los primeros listados. Posteriormente, De Groot *et al.*, (2002) plantearon cuatro categorías para agrupar funciones y servicios ecosistémicos. Dicha taxonomía fue reconocida por la Millennium Ecosystem Assessment MEA por sus siglas en inglés, (2005), la cual es la clasificación más reconocida y usada en todo el mundo. Ver (figura, 1) se muestra la clasificación de los servicios ecosistémicos.

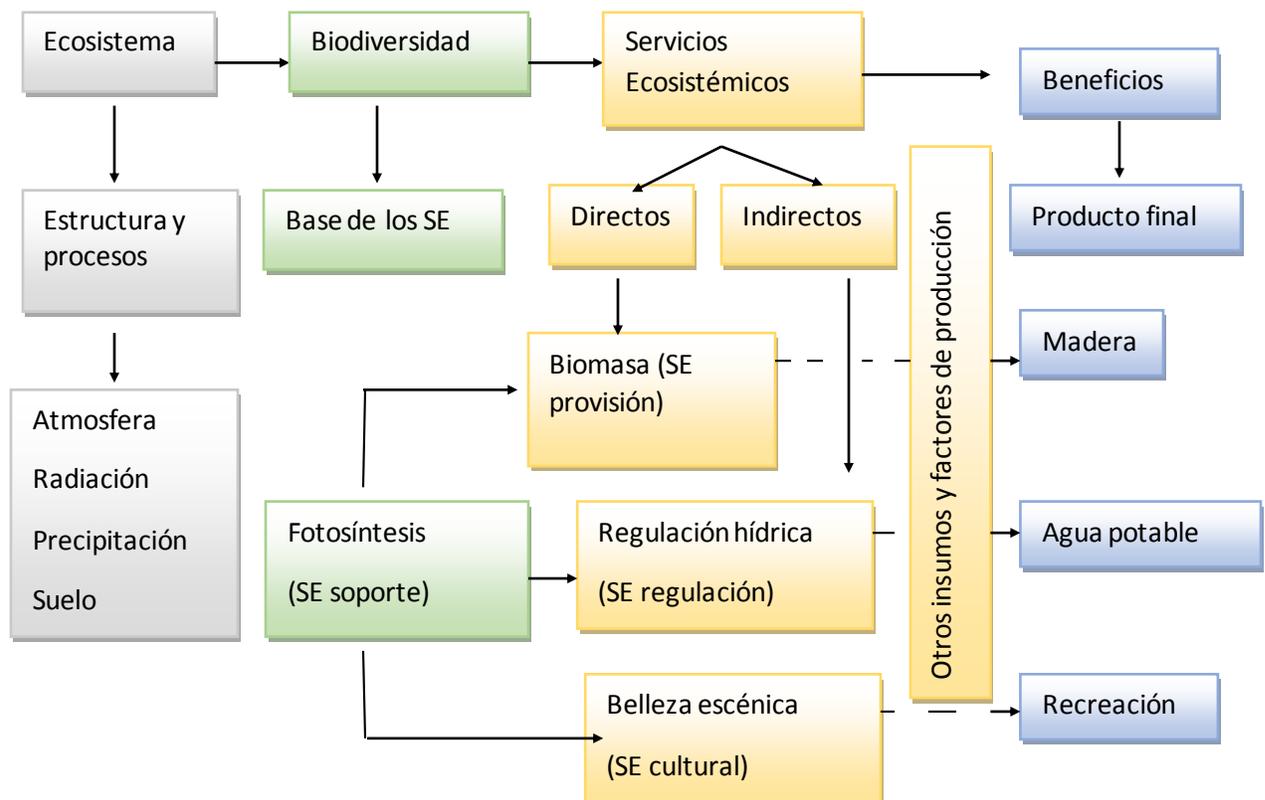
Figura 1. Clasificación de los servicios ecosistémicos

Autor, Año y aporte	Costanza <i>et al.</i>, (1997) Realizan listado	De Groot <i>et al.</i>, (2002). Agrupan los Servicios	MEA (2005). Clasificación más aceptada
Servicios	<p>Producción</p> <p>Oferta de agua Producción de alimentos Materias primas Regulación de gases Regulación de clima Regulación de disturbios Regulación hídrica Control de erosión Control biológico Tratamiento de desechos Recreación Formación de suelo ciclaje de nutrientes Recursos genéticos Polinización Refugio y hábitat</p>	<p>Producción</p> <p>Alimentos, materias primas, recursos genéticos y medicinales.</p> <p>Regulación</p> <p>De gases, del clima, hídrica, prevención de disturbios, previsión de agua, formación de suelo, ciclo de nutrientes, tratamiento de residuos, polinización, control biológico.</p> <p>Información</p> <p>Estética, recreación, ecoturismo, inspiración cultural y artística, espiritual e histórica, científica y educacional.</p> <p>Hábitat</p> <p>Refugio, protección</p>	<p>Provisión</p> <p>Alimentos, recursos ornamentales y genéticos, medicinas naturales y fibras.</p> <p>Regulación</p> <p>Calidad del aire, del clima, del agua, de la erosión, de enfermedades, polinización, control biológico, tratamiento de residuos, ciclo de nutrientes.</p> <p>Culturales</p> <p>Diversidad cultural, valores religiosos, espirituales, educativos y estéticos, recreación y ecoturismo, sistemas de conocimiento.</p> <p>Soporte</p> <p>Formación de suelo, fotosíntesis, producción primaria, ciclo de nutrientes, ciclo del agua.</p>

Fuente: Elaboración propia con base en Nahuelhual y Núñez, (2011) en García (2019)

Los servicios ecosistémicos (SE) segregan desde los activos naturales como son; agua, plantas, suelo, animales y atmósfera. Proporcionando a la sociedad beneficios ecológicos, culturales y económicos De Groot *et al.*, (2002), los cuales repercuten en las interacciones complejas entre las especies y los componentes abióticos. Para Nahuelhual y Núñez. (2011) la base de diversidad de servicios se explica en la (imagen 1) en donde la relación entre diversidad biológica y SE no es simple. Por ello, Flombaum y Sala (2011) suponen que la biodiversidad es fundamental para los ciclos biogeoquímicos, entre los más importantes es el del carbono, debido a los múltiples flujos entre sus componentes. Un proceso similar a esto, es la producción primaria neta o productividad de biomasa Chapin *et al.*, (2002) ver (Figura, 2)

Figura 2. Procesos del ecosistema, servicios ecosistémicos y beneficios



Fuente: Elaboración propia con base en Nahuelhual y Núñez, (2011) en García (2019)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Parque Otomí – Mexica presenta modificaciones por el manejo incorrecto de los recursos naturales ejemplo de ellos es la explotación y contaminación de los recursos hídricos pérdida de cubierta forestal, la afectación trasciende de manera negativa y directamente al brindar bienes y servicios, como consecuencia está la reducción de pérdida de bienestar. El crecimiento inadecuado de la población afecta en la pérdida de cobertura vegetal que ha ocasionado alteraciones en los ciclos de lluvia, aumento de la temperatura, pérdida de especies tanto animales como vegetales, así como la disminución de la recarga de mantos acuíferos, erosión del suelo y calidad del aire.

Debido a la sobrepoblación de más de 27 millones de personas que habitan las metrópolis de la Ciudad de México y la Ciudad de Toluca se ven en la necesidad de nuevos espacios para satisfacer la demanda de: (vivienda, establecimientos industriales, centros comerciales, espacios recreativos; así como la apertura de zonas agrícolas y de pastoreo para la producción de alimentos, los cuales son reservados para los asentamientos humanos que habitan en el territorio administrativo del Parque Otomí Mexica.

La localización está generando cambio de usos del suelo afectando los servicios ecosistémicos, los cuales afectan de forma negativa sobre los componentes y funciones del parque, dando como consecuencia la pérdida de biodiversidad de flora y fauna, contaminación hidrológica y de suelos; todos son servicios ecosistémicos vitales para el desarrollo local y regional de los asentamientos humanos.

La sociedad se relaciona de manera dinámica con los ecosistemas que se presentan en el territorio lo que da lugar a varios beneficios o servicios ecosistémicos. Según la SEMARNAT, (2019) México representa el 10% de la biodiversidad global. Es fundamental que la población identifique la importancia que tienen los Servicios Ecosistémicos en nuestro entorno para tomar decisiones con opciones informadas y críticas para frenar el impacto ambiental y conservar los ecosistemas. Los beneficios de los servicios ecosistémicos como agentes de

resiliencia socioambiental son utilizados para la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico.

Las preguntas de investigación que orientan este estudio son:

1 ¿Cuáles son los ecosistemas presentes y los cambios en el uso del suelo en el Parque Otomí - Mexica?

2 ¿Cómo es la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación almacenamiento de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos, del Parque Otomí Mexica?

3 ¿Cómo se prevén los escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos y cuáles son los componentes de la propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica?

HIPÓTESIS

- 1) Existe una amplia diversidad de ecosistemas y una dinámica acelerada de cambios de uso de suelo en el Parque Otomí Mexica.
- 2) La distribución espacial de los Servicios Ecosistémicos en el parque Otomí Mexica es dispersa y heterogénea.
- 3) Los escenarios a futuro 1994-2025 de los Servicios Ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica en general se prevén en disminución

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar y modelar los servicios ecosistémicos del Parque Otomí Mexica Estado de México. Propuesta teórico metodológica.

Objetivos específicos:

1. Establecer una asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica con base en los principios y el método geográfico.
2. Evaluar los servicios ecosistémicos a partir de la caracterización y cuantificación para la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación; captura de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos, del Parque Otomí – Mexica por medio de los métodos de clasificación, tipificación y ubicación bajo un enfoque geográfico.
3. Modelar escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos por medio del método estadístico y prospectivo.
4. Diseñar una propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas por medio del análisis de los fundamentos teóricos y de los enfoques metodológicos.

JUSTIFICACIÓN

Aportaciones teóricas

La postura filosófica que dará aportaciones parte del estoicismo la cual se justifica en que la vida está determinada por las leyes de la naturaleza las cuales se repiten cíclicamente en este caso los Servicios Ecosistémicos parten de dicha postura.

La escuela del pensamiento que hará aportaciones en el Servicio Ecosistémico de regulación es la escuela de pensamiento ecológico el cual se divide en ambiental y desarrollo sustentable, la cual se justifica en los principios básicos como es el crecimiento económico, la innovación tecnológica y el manejo de los recursos naturales (Tetreault, 2008)

Por otro parte el enfoque de los Servicios Ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental aportará la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico, en cuanto a la resiliencia de la captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero.

Las disciplinas que aportaron al sustento de dicha investigación son: 1) Ciencias Ambientales: entendiéndose como la relación directa con la calidad de vida humana apoyada en la sustentabilidad esto puede ser a corto y largo plazo. 2) Teoría de Sistemas Complejos: el cuál abordo una metodología de trabajo interdisciplinario en cuál se fundamenta sobre bases epistemológicas como aporte para los Servicios Ecosistémicos.

Aportaciones metodológicas

La metodología que se empleará permitirá documentar casos teóricos la cuál aportará lo siguiente: Clasificación – tipificación, cuantificación – fotointerpretación cartográfica y la ubicación espacial, con ello se obtendrán los siguientes mapas de Servicios Ecosistémicos de:

- ✓ Regulación de Carbono - parámetro estadístico – Ecuación lineal
- ✓ Retención de suelo – parámetro estadístico – Ecuación RUSLE
- ✓ Recarga del acuífero – parámetro estadístico – Estimación de Precipitación Pluvial, Temperatura Media Anual, volumen evapotranspirado y evapotranspiración anual real.
- ✓ Escenarios futuros de servicios ecosistémicos.

Aportaciones contextuales: geográfico, ambientales, sociales, económicas, territoriales, ecológica y académica.

El Área Natural Protegida del Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala la Bufo, denominado Parque Otomí-Mexica del Estado de México, es el ANP de mayor extensión territorial en el Estado de México (105,844.13 ha). Por su ubicación geográfica el territorio del parque desempeña una función biofísica y sociocultural de vital importancia para los más de 27 millones de habitantes que viven en las Zonas Metropolitanas adyacentes al ANP (INEGI, 2015).

Desde el punto de vista ambiental aporta solución al cambio de uso de suelo por consecuencia antrópica generadas por los habitantes que viven en zonas internas y aledañas al Parque Otomí Mexica.

Desde el punto de vista social la conservación y funcionamiento adecuado de los ecosistemas que conforman el territorio del parque es importante, ya que es una fuente valiosa de componentes naturales que provee diversos servicios ecosistémicos como: agua, oxígeno, alimentos, recursos maderables y minerales, materias primas para la elaboración de medicamentos, utensilios del hogar y herramientas de trabajo, algunos de ellos indispensables para el bienestar de las poblaciones que habitan dentro y en la periferia de sus territorio administrativo.

Desde el punto de vista económico, los componentes territoriales del parque proporcionan múltiples beneficios para el funcionamiento de mercados locales y regionales, gran parte de los alimentos, ganado, herramientas que se comercializan en ellos, son producto de las actividades agrícolas, ganaderas y económicas que las personas desarrollan dentro del territorio.

Desde el punto de vista ecológico el área de estudio desarrolla una función de vital importancia para la flora y fauna que alberga dentro de sus límites, esta se compone de 357 especies del reino animal, de las cuales 115 de ellas son aves, 73 helmintos, 56 mamíferos, 25 reptiles, 22 anfibios, 21 peces, 54 artrópodos y 7 moluscos. Muchas de ellas endémicas y en riesgo de extinción (EcoCiencia, 2009).

Los resultados derivados de esta investigación ayudarán académicamente a futuras investigaciones priorizando la protección, conservación, restauración y aprovechamiento con la finalidad de garantizar la continuidad de los procesos ecológicos y asegurar la provisión de servicios ambientales para futuras generaciones. Con el propósito de lograr un equilibrio en el desarrollo sustentable de dicha investigación.

Primer Capítulo

Marco Teórico

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

El presente marco teórico está estructurado de la siguiente forma: consta de diez apartados. En primer lugar, se aborda la postura filosófica para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación en el estoicismo el cual indica que el curso de la vida está determinado por las leyes de la naturaleza que se repiten cíclicamente.

Posteriormente cuenta con la escuela del pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales, la cual es de gran apoyo para argumentar el Desarrollo Sustentable en los estudios de Servicios Ecosistémicos que se van a abordar en esta investigación.

Continúa con los Servicios Ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental, para así analizar el comportamiento de la capacidad de un sistema biológico de resistir un impacto y permanecer en equilibrio dinámico.

Posteriormente se mencionan las disciplinas que sustentan la investigación: a) Ciencias Ambientales como disciplina integradora ya que su principal objetivo es buscar y conocer las relaciones que mantiene el ser humano consigo mismo y con la naturaleza. b) la Teoría de Sistemas Complejos para el análisis de los Servicios Ecosistémicos se abordó desde una metodología de trabajo interdisciplinario y como un marco conceptual para fundamentar bases epistemológicas.

En el siguiente paso se aborda la prospectiva de los Servicios Ecosistémicos, lo que se pretende es modelar a futuro el comportamiento de los Servicios Ecosistémicos de regulación, para así observar cómo su tendencia cambiará a lo largo de cuatro años.

Por último, se abordó el Objetivo de Desarrollo Sostenible el cual se fundamentó en los Servicios Ecosistémicos, en la gestión sosteniblemente de los bosques del Parque Otomí Mexica, en la lucha contra la desertificación, así como en detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

Los apartados anteriores dan fundamento para llevar a cabo la investigación de Servicios Ecosistémicos.

1.1 Postura filosófica del estoicismo para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación.

La filosofía, para los estoicos, en general, era en primera instancia una necesidad, una forma de vida, que no persigue utilidad alguna. Con la aparición de "la filosofía estoica" en la historia ya no se busca solamente la verdad, sino más bien, un repertorio de nuevas convicciones que le ayuden a un buen vivir suyo, ejercicio esencial es la búsqueda de la "felicidad", (Parra, 2000)

El hombre, para los estoicos debe conocer todo aquello que le permita conseguir la felicidad, primordialmente la felicidad interior, y no el goce de las cosas externas, (Parra, 2000)

Tradicionalmente los estoicos dividían la filosofía en tres partes, según nos informa Diógenes Laercio: en la física como a la ética y la lógica. Así lo dividió por primera vez Zenón de Citio en su obra el racionio, (Flores, 2016)

La explicación de cada división se explica a continuación: bajo el título de lógica, los estoicos estudian la estructura del lenguaje, incluida la teoría de los significados, la gramática y la comunicación; dentro del objeto de estudio de la lógica, incluía la teoría del conocimiento, por lo que se debe entender también por lógica, la epistemología estoica, (Flores, 2016)

La física comprende la cosmología, los tipos de entidades existentes, la estructura causal del universo, pasando por sus principios y elementos.

Finalmente, la ética explica el estudio de las pasiones y causas del comportamiento humano.

Los estoicos recurrían a los principios (archai), de los cuales estaba compuesta la sustancia corpórea única:

Los estoicos confirman que en la naturaleza existen dos principios que dan origen a los seres vivos las cuales son; la causa y la materia. La materia yace inerte, dispuesta a cualquier mutación, la cual estaría inactiva si nadie lo moviese; en

cambio la causa, que es la razón, conforma la materia, la cual la transforma en el sentido que quiere, (Flores, 2016)

Los estoicos, guiados por Heráclito, identifican al principal motor no como Dios, sino como fuego eterno, que es el que genera del movimiento como en la cosmología heracliteana. Reporta Estobeo que los estoicos distinguían dos tipos de fuego los cuales son: uno, ajeno al arte, que convierte al alimento en su propia sustancia y otro, por el contrario, artístico que hace crecer y conservar, el cual es naturaleza y alma, (Flores, 2016)

Zenón (a. IV a. C-II d.C.) fue el primero que en su obra sobre la naturaleza del hombre expuso que debemos vivir de acuerdo con la naturaleza, lo que significa vivir según tu virtud. A ésta en efecto, nos lleva la naturaleza, (Flores, 2016)

Diógenes Laercio, (1985) afirmó que Zenón manifestó que el fin último del hombre es vivir de acuerdo con la naturaleza.

En esta corriente explica que el sabio es aquél que tiene la felicidad y sabe diferenciar lo malo; detiene la vanidad y lo suple por grandeza, hace una diferencia entre lo ilustre y el orgulloso mostrando lo que es el mundo y lo que pertenece, (Flores, 2016)

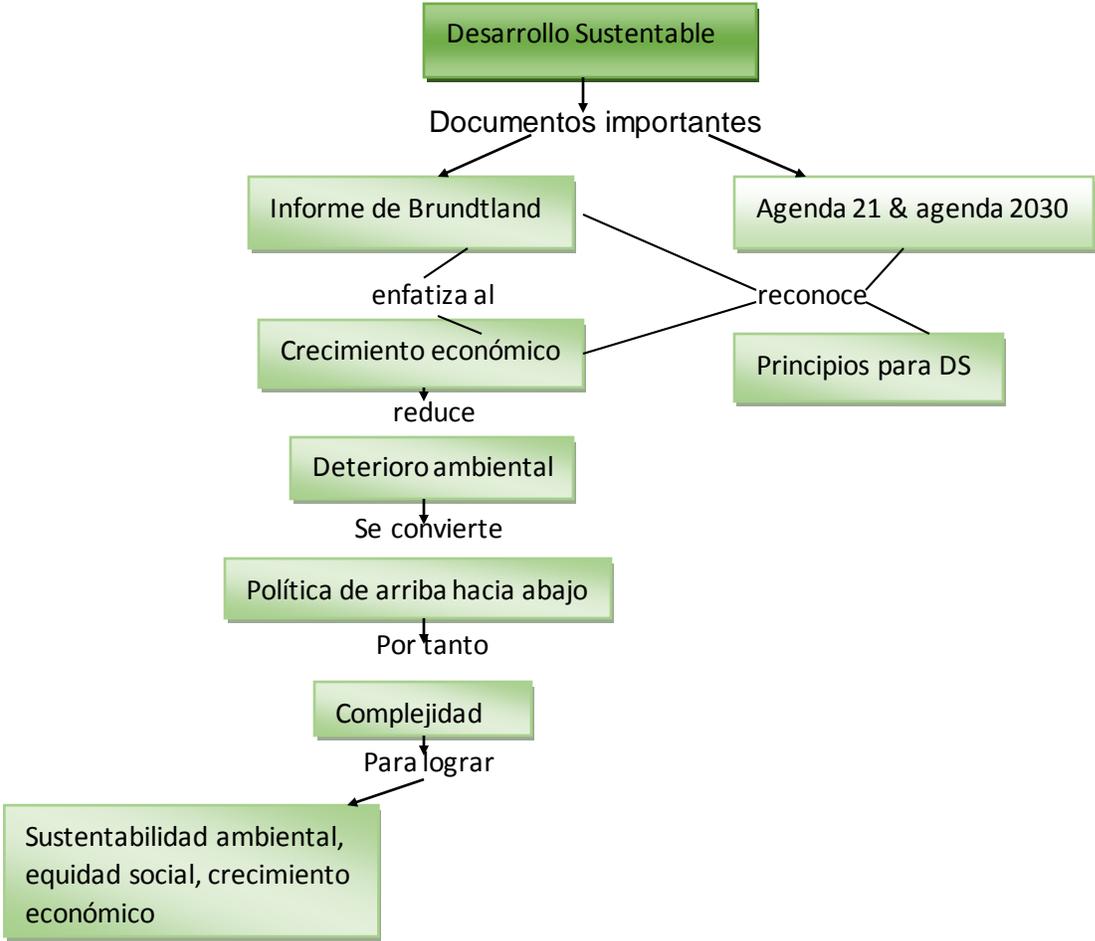
Dando a conocer la naturaleza tal y como es en realidad, comprendiendo las cosas divinas, ampliando las leyes que regulan la vida humana y que generalmente se extienden en todas las cosas, (Flores, 2016)

Los estoicos reflexionan que en todo acto humano se realiza a partir de un principio el cual es guiado por la acción, es decir lo que sea más apropiado para alcanzar el fin último de éste. Sin embargo, las acciones humanas dependen de un conjunto de causas denominadas destino.

1.2 Escuela del pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales aplicado a los Servicios Ecosistémicos.

El presente diagrama muestra cómo está constituida la escuela del pensamiento ecológico, el cual se divide en ambiental y desarrollo sustentable, según (Tetreault, 2008), ver (Figura, 3).

Figura 3. Escuela del pensamiento ecológico



Fuente: Elaboración propia con base en (Tetreault, 2008) y (García, 2019).

El primer hito de la escuela del pensamiento ecológico fue la Conferencia de Estocolmo, cuya declaración contiene los principios básicos del desarrollo sustentable: el crecimiento económico, la innovación tecnológica, la transferencia de tecnología del Norte al Sur, mejor manejo de recursos naturales, la reducción

de la tasa de crecimiento de la población mundial, la cooperación internacional y la elaboración de las leyes ambientales (UNCHE, 1972 en Tetreault, 2008).

Además, la conferencia de Estocolmo dio lugar al Programa de las Naciones Unidas para la Protección del Medio Ambiente (PNUMA), cuyo propósito es el de coordinar programas ambientales entre el sistema de las Naciones Unidas y promover una cooperación internacional sobre cuestiones ambientales, (Tetreault, 2008)

Los documentos más sobresalientes son: el informe de Brundtland en donde se define al concepto de sustentabilidad; y la Agenda 21 con principios para lograr el DS (Foladori, 2002; Gutiérrez, 2008; Tetreault, 2008). En el informe de Brundtland se enfatiza al crecimiento económico como el medio para solucionar la problemática ambiental, porque considera a la pobreza como la causa del deterioro de los recursos naturales. La Agenda 21 reconoce que se debe contar con un crecimiento económico dinámico y confiable (Tetreault, 2008).

Ambos documentos reconocen al consumo excesivo del Norte como causa del deterioro ambiental, pero no se le obliga a reducirlo, recomiendan que los modos de producción y de consumo sean más eficientes (Gutiérrez, 2013 en García, 2019).

Los autores anteriores dan a conocer los documentos en los que se sustenta la investigación dentro de los más importantes son: el informe de Brundtland y la agenda 21 los cuales centran la atención en el consumo excesivo del Norte dando como consecuencia el deterioro ambiental.

Bajo la premisa de crecimiento económico en ambos documentos, permite realizar dos elementos importantes del desarrollo sustentable: a) dotar y diseñar tecnologías ecológicamente racionales para mejorar la eficiencia ecológica de las actividades económicas, extendiendo así los límites de la tierra respecto a su habilidad de proveer materias primas y de asimilar desechos; y b) mejorar la gestión de los recursos naturales mediante mecanismos como la formulación de leyes, reglamentos, convenios y protocolos a nivel nacional e internacional para

regular y controlar la contaminación. La creación y el fortalecimiento de agencias gubernamentales ambientales; la incorporación de factores ecológicos en los modelos económicos y en la toma de decisiones económicas, esto último constituye el enfoque principal de la economía ambiental. Sin embargo, ambos elementos requieren de mucho dinero para implementarse en un nivel internacional para lograr altas tasas de crecimiento económico en todas partes del mundo (Naredo, 1996; Foladori, 2002; Tetreault, 2008 en García, 2019).

En la anterior cita explica que es necesario de los dos elementos que constituyen al desarrollo sustentable tanto la tecnología ecológica como la gestión de recursos naturales para controlar la contaminación.

Evolución de la agenda 21 & agenda 2030

Para lograr construir una agenda territorial se necesita la participación tanto de actores sociales como del dialogo institucional en todos sus niveles. El trabajo de la agenda es lograr los objetivos planteados en los niveles: económico, social, ambiental y el enfoque de equidad, los cuales se basan en las agendas locales para la internacionalización y tránsito hacia la agenda 2030 para fortalecer las estrategias territoriales.

La diferencia de la agenda 21 con la agenda 2030 es el logro de los objetivos y metas en cada Estado, esto puede ser en países desarrollados o en países en desarrollo, en el cual hay dos marcos territoriales de actuación; ámbito interior (nivel estatal, autonómico y local) y ámbito exterior (cooperación internacional), (Pérez *et al.*, 2018)

El Desarrollo Sustentable es una estrategia de políticas que buscan el consenso entre los grupos principales que son las grandes potencias mundiales, las instituciones internacionales de desarrollo, los gobiernos nacionales y las corporaciones transnacionales. Sin embargo, se hace hincapié en la necesidad de fomentar la participación social de otros grupos, por ejemplo: las ONG, los grupos

indígenas y las mujeres (Barkin, 2000; Foladori, 2002; Tetreault, 2008 en García, 2019).

Los autores anteriores describen el nivel de jerarquía del Desarrollo Sustentable, el cual está conformado por: 1) grandes potencias mundiales, 2) instituciones internacionales de desarrollo, 3) gobiernos nacionales, 4) corporaciones transnacionales, intervención de otros grupos como 5) Organización No Gubernamental, 6) grupos indígenas y las mujeres.

La sustentabilidad forma parte de la discusión sobre desarrollo. Para ello se requieren nuevos enfoques para la defensa del ambiente, la conservación de los ecosistemas, el fortalecimiento y reconstrucción de la capacidad económica y social de la población con el conocimiento y habilidades para emplearse en actividades productivas requeridas para proteger y enriquecer los sistemas naturales (Naredo, 1996; Leff, 2009; Barkin, 2000 en García, 2019).

Los autores anteriores explican que la sustentabilidad requiere de nuevos enfoques como son: la defensa del ambiente, la conservación de los ecosistemas, fortalecimiento, reconstrucción económica y social de la población los cuales son necesarios para preservar los sistemas naturales.

1.3 Importancia de los Servicios Ecosistémicos para la resiliencia socioambiental.

El beneficio de los servicios ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental es utilizado para la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico como la expresa la siguiente cita textual.

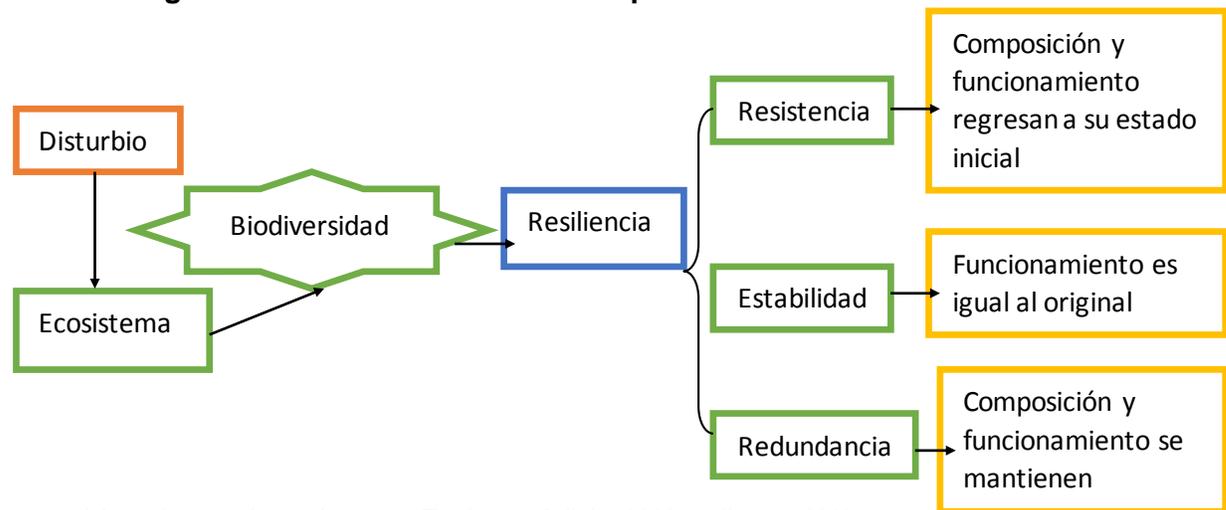
En la actualidad, el abordaje de la resiliencia desde el ámbito biológico ha aumentado, debido a la búsqueda de mecanismos de adaptación al entorno por parte de las personas. En este sentido la resiliencia socioambiental se entiende como la capacidad de un objeto o sistema biológico de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico (Tilman *et al.*, 2006).

Según Allison y Martiny (2008) “a medida que aumenta la diversidad biológica, un ecosistema puede ser resiliente. Dichos autores proponen que la biodiversidad

amortigua las variaciones ambientales, ya que las especies tienen distinta capacidad de crecimiento ante diferentes condiciones climáticas; por ejemplo, algunas plantas resistirían condiciones de sequía y dominarían años secos, otras por el contrario aprovecharían la abundancia de humedad”, (Figura 4).

Los autores anteriores concuerdan en que la biodiversidad disminuye de acuerdo a las variaciones ambientales dependiendo de las condiciones climáticas.

Figura 4. Modelo de resiliencia a partir de la biodiversidad



Fuente: elaboración propia con base en (Flombaum & Sala; 2018 en García; 2019).

“Otro punto de vista sobre la resiliencia se relaciona con la confianza y el optimismo ante la adversidad, debido a que permite reconocer las posibilidades, confiar en la ayuda de los demás y manejar las circunstancias ante las cuales deben resistir para preservar la calidad de vida (Arias, 2005; Bravo, 2013; Ortunio & Guevara, 2016 en García, 2019).

Los autores anteriores dan a conocer que la resiliencia tiene la libertad y seguridad ante la adversidad, en la cual debemos tener confianza en los demás para preservar la calidad de vida.

“De esta definición, se propone que una población de individuos es regulada por un sistema en que la base energética, alimentaria, las limitaciones del espacio y

refugio, está condicionado a este. Por ello, la adaptación incluye el contexto sociocultural de la comunidad” (Simonetti & Dirzo, 2011 en García, 2019). En este sentido “es una recuperación después de eventos adversos, que hace posible vivir, reproducirse y adaptarse al ambiente” (Ospina, 2007; Losada & Latour, 2012 en García, 2019).

1.4 Disciplinas que sustentan la investigación

a) Ciencias Ambientales como disciplina integradora

Las ciencias ambientales son un área de conocimiento que comienza a desarrollarse a nivel mundial y nacional desde finales de los años sesenta del siglo XX. Este nuevo campo de estudio y acción surge ante la necesidad de comprender y encontrar soluciones a la grave y compleja crisis ambiental que vive la sociedad globalizada en sus relaciones con la naturaleza, de la cual sólo se ha tomado conciencia en las últimas décadas, (RCFA, 2007).

Las Ciencias Ambientales como disciplina integradora. Según (Bocco, 2010) menciona una definición de trabajo, el autor propone de manera simple que las Ciencias Ambientales tienen por objeto el estudio del ambiente y de nuestro rol (como sociedad) en él. Analiza las interacciones entre los componentes físicos, químicos y biológicos del ambiente, aunque más específicamente el impacto de la actividad humana sobre el mismo, así como los efectos en los organismos.

El quehacer de las Ciencias Ambientales puede definirse como la búsqueda de conocimiento nuevo, de conceptualizaciones y explicaciones en el ámbito del socioambiental y de proposición de soluciones concretas (Chiras, 2006).

Lo más característico de las Ciencias Ambientales es su accionar es la relación directa con la calidad de vida humana apoyada en la sustentabilidad del funcionamiento, a corto y largo plazo, de su base biofísica sobre el planeta, (García, 2019)

La definición de Ciencias Ambientales es estrictamente operacional: son ciencias que contribuyen al desarrollo económico (o bienestar humano) sobre una base ecológicamente sustentable. Las ciencias y profesiones que contribuyen a esta

meta son múltiples y las Ciencias Ambientales constituyen la confluencia de distintos acercamientos disciplinarios al estudio y solución de problemas relacionados con la interacción hombre-ambiente. De hecho, el mayor desafío para las Ciencias Ambientales está en la materialización de un enfoque interdisciplinario, las define como una rama del conocimiento científico que busca entender, de manera interdisciplinaria, el funcionamiento del ambiente, las diversas formas en que lo afectamos y las estrategias que podemos implementar para enfrentar tales efectos (Jaksin, 1997; Chiras 2006 en García, 2019)

b) Teoría de Sistemas Complejos para el análisis de los Servicios Ecosistémicos

La característica distintiva de la TSC propuesta por García (2006), se define en la articulación sistémica y explícita (interrelaciones) entre los componentes de los sistemas.

Esta característica se puede vislumbrar bajo las siguientes dimensiones: a) propone una metodología operativa desde el punto de vista empírico e interdisciplinario; b) se fundamenta desde las bases epistémicas del marco conceptual del constructivismo; y c) es una herramienta para el diagnóstico integrado de sistemas complejos que permitan actuar sobre el sistema para transformarlo (Rodríguez, 2018 en Villegas, 2020)

De acuerdo con García (2006), un sistema complejo se puede definir como aquel sistema cuyos elementos son heterogéneos en el dominio que pertenecen a distintas disciplinas, pero los elementos que lo conforman interactúan entre sí, de tal manera que son interdefinibles. La interdefinibilidad es la principal característica de un sistema complejo, ya que, los componentes (naturales o socioculturales) que conforman un territorio, no se pueden estudiar de manera aislada, ya que, la modificación de alguno de ellos actúa como una cadena que va repercutiendo en el funcionamiento de todo el sistema (García, 2006 en Villegas, 2020).

Ningún sistema está dado en el punto de partida de la investigación. El sistema no está definido, pero es definible. Una definición adecuada sólo puede surgir en el

transcurso de la propia investigación y para cada caso particular. La información anterior no constituye una proposición metodológica, aunque las implicaciones metodológicas son obvias. Su fundamentación es estrictamente epistemológica. En efecto, la afirmación allí contenida es antiempirista, en tanto niega que las características del sistema estén dadas y sean accesibles a la experiencia directa de cualquier "observador neutro", (García, 2006).

1.5 Prospectiva de los Servicios Ecosistémicos

La planeación por escenarios (o análisis de escenarios) tiene su origen en la concepción militar en la segunda guerra mundial en los años 40, pero se consolida como un modelo de planeación organizacional en 1950, introducido por Herman Kahn, (1967) quien trabajaba para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

Kahn, (1967) considera a los escenarios, como secuencias hipotéticas de eventos contruidos con el propósito de centrar la atención en los procesos causales y la toma de decisiones.

En 1992, la escuela prospectiva representada por Michael Godet, propone que los escenarios pueden servir no solo para predecir un futuro, sino como orientación para construir un futuro idealizado, integrándola como herramienta en los estudios prospectivos estratégicos, (Godet, 1996).

Chermack, (2005) realiza un ajuste a la planeación por escenarios al modelo basado en el método de ocho pasos de Dubin, teorizando aún más el proceso de su construcción.

Desde sus inicios, para la planeación por escenarios se han desarrollado diversas metodologías catalogadas en tres grandes escuelas: la lógica e intuitiva, la prospectiva y de tendencia probabilística, (Bradfield *et al.*, 2005)

La primera de ellas propuesta por Herman Kahn en 1967 se caracterizaba por ser un esquema totalmente cualitativo basado más en la intuición y juicios de valor, que en un soporte científico. La primera aproximación en el empleo de métodos cuantitativos está a cargo de Amara y Lipinski (Georgantzas y Acar, 1995 en

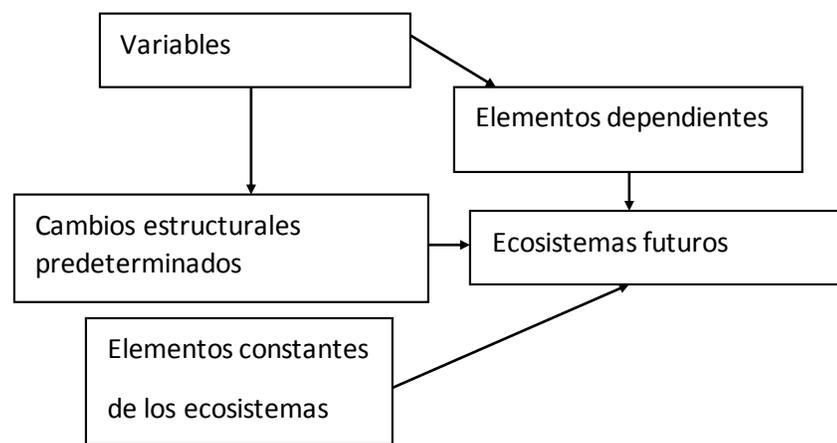
Vergara *et al.*, 2010), con la introducción de algoritmos estructurales y modelos matemáticos para la definición y evaluación de cada escenario.

En 1992, la escuela prospectiva representada por (Godet, 1996 en Vergara *et al.*, 2010) propone que los escenarios pueden servir no solo para predecir un futuro, sino como orientación para construir un futuro idealizado, integrándola como herramienta en los estudios prospectivos estratégicos. (Van Der Heijden, 1996 en Vergara *et al.*, 2010) populariza, su propia metodología estructurada y postula 5 criterios en el desarrollo de escenarios:

- Al menos dos escenarios son requeridos para reflejar la incertidumbre
- Cada escenario deber ser plausible (posible)
- Los escenarios deben ser internamente consistentes
- Los escenarios deben ser relevantes
- Los escenarios deben producir una nueva y original perspectiva

El modelo propuesto por Porter, (1985) ayuda a identificar los escenarios como se observa en la (figura, 5) se identifican las variables, para posteriormente seleccionar los elementos dependientes de cada ecosistema para identificar los cambios estructurales predeterminados y así obtener los elementos constantes de los ecosistemas para finalizar con los ecosistemas futuros.

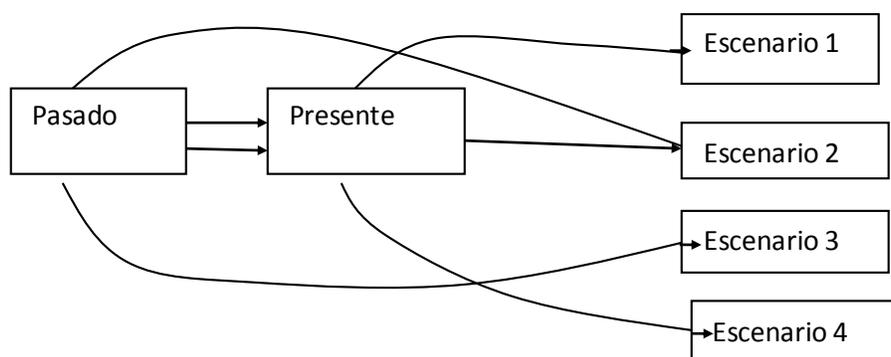
Figura 5. Modelo propuesto por Porter



Fuente: Elaboración propia con base en (Porter, 1985 en Vergara *et al.*, 2010)

El modelo propuesto por (Iver B. Neumann y Erik F. Verland, 2004 en Vergara *et al.*, 2010) Indican que las bases para el desarrollo de los escenarios pueden provenir directamente de datos del pasado, del presente o de ambos casos para obtener diferentes escenarios a futuro. (Figura 6)

Figura 6. Modelo propuesto por Iver B. Neumann y Erik F. Verland



Fuente: Elaboración propia con base en (Neumann y Verland, 2004 en Vergara *et al.*, (2010)

A continuación, se muestra la recopilación de diferentes autores para la construcción de escenarios futuros según Vergara *et al.* (2010), ver (tabla, 5).

Tabla 5. Recopilación de metodologías para la construcción de escenarios

Modelo / Metodología	Autor (es)	Categorías / aportes	Año
Future-Now	Herman Kahn	Emplea juicios razonados y la intuición. Método cualitativo	1967
Industry Scenarios	Michael Porter	Parte de que el análisis de la industria permite prever cómo será el mundo en el futuro	1985
Procedimiento para la construcción de escenarios	Peter Wack	Soporta los escenarios bajo una estructura robusta, complementados con un análisis numérico	1985
Metodología para la construcción de escenarios	Michel Godet	Uso de la perspectiva para el diseño de escenarios	1996
Metodología para el desarrollo de escenarios	Van Der Heijden	Método estructurado para el desarrollo de escenarios	1996
Teoría general para la planeación de escenarios basado en el método de ocho pasos de Dubin	Thomas J. Chermack	Aplicación teórica para la construcción y prueba de escenarios	2005
Metodología para la construcción de escenarios	Gutiérrez	Se basa en partir del pasado, pasando por el presente para llegar al futuro	2003

Fuente: elaboración propia con base en Vergara *et al.*, (2010)

La prospección se realiza desde el pasado, pasando por el presente para llegar a un futuro. Gutiérrez, (2013). La prospectiva es el análisis del estado futuro el cual puede ser a corto (5 a 10 años), medio (15 a 20 años) y largo plazo (30 a 50 años). Depende el territorio de estudio; ya que existen diferentes escalas: estatal, regional, local. Dicha investigación aplicó un estudio local. Dentro de la prospectiva existen tres tipos de escenarios: ideal, tendencial y estratégico, (figura, 7).

Figura 7. Escenario ideal, tendencial y estratégico

- 1.- Escenario ideal o deseado: Es como desea la población su territorio a futuro, necesariamente lo construye la población local.
 - 1.1.-Escenario tendencial o posible óptimo: Si la situación mejora.
 - 1.2.-Escenario tendencial o posible Medio: Si permanece igual
 - 1.3.-Escenario tendencial o posible Pésimo: Si empeora
- 2.- Escenario estratégico deseable y posible (imagen objetivo): Depende de los escenarios anteriores. Se busca lograr un equilibrio entre lo que se quiere y lo que se puede. De estos surge la propuesta.

Fuente: Elaboración propia con base en Gutiérrez, (2013)

El escenario que se ocupó para dicha investigación es el estratégico deseable y posible (imagen objetivo).

Prospectiva y modelado

Prospectiva es una actuación crítica y creativa, caracterizada por plantear opciones o alternativas de solución a los problemas suscitados por una situación.

Modelo: es la representación de la realidad del territorio. Modelar es desarrollar una descripción lo más exacta posible de un sistema y de las actividades llevadas a cabo en él. También la caracterización y el diagnóstico son modelos, (Gutiérrez, 2013)

1.6 Objetivos de Desarrollo Sostenible

En la presente investigación el Objetivo de Desarrollo Sostenible se fundamentó en los Servicios Ecosistémicos, en la gestión sosteniblemente de los bosques del Parque Otomí Mexica, en la lucha contra la desertificación, así como en detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad.

Específicamente en las siguientes metas: 15.1 Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales, (ONU, 2022)

15.2 Para 2020, promover la gestión sostenible de todos los tipos de bosques, poner fin a la deforestación, recuperar los bosques degradados e incrementar la forestación y la reforestación a nivel mundial. 15.3 Para 2030, luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo. 15.4 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.

15.5 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. 15.9 Para 2020, integrar los valores de los ecosistemas y la diversidad biológica en la planificación nacional y local, los procesos de desarrollo, las estrategias de reducción de la pobreza y la contabilidad, (ONU, 2022)

Segundo Capítulo

Metodología

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Es importante conocer la estructura de la metodología ya que aquí se plasma la serie de pasos dirigidos para la obtención de dicha investigación la cual es la siguiente 1) Se identificaron los ecosistemas presentes en el parque Otomí – Mexica, 2.1) se caracterizó y cuantificó la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: almacenamiento de carbono, 2.2) retención de suelo y 2.3) recarga del acuífero, 3) se modelaron los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos y 4) se elaboró una propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas

En primera etapa metodológica se identificaron los ecosistemas presentes en el parque Otomí – Mexica, primer paso: clasificar y tipificar posteriormente, cuantificar y Fotointerpretar cartográficamente para después, ubicar espacialmente, dicho proceso se aplicará para la caracterización, uso de suelo, tipos de vegetación y ecosistemas presentes en el Parque Otomí – Mexica.

La segunda etapa metodológica se divide en varios apartados uno de ellos fue caracterizar y cuantificar la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: (Almacenamiento de Carbono). El método que se aplica es: clasificar y tipificar después, cuantificar y Fotointerpretar cartográficamente, para continuar con ubicar espacialmente los Servicios Ecosistémicos de regulación de almacenamiento de carbono.

Para el servicio ecosistémico de captura del carbono se llevó a cabo un análisis espacio temporal en el cual se utilizó la metodología de índice de captura de carbono de Morfín *et al.*, (2015) posteriormente se argumentaron los autores que incide y los que difieren bajo las características ambientales y morfológicas, se finalizó con la validación “*in situ*” de las condiciones ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí Mexica.

La tercera etapa se enfocó en caracterizar y cuantificar la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: (Retención de suelo). El método que se aplicará es: cuantificar y Fotointerpretar cartográficamente, para continuar con

ubicar espacialmente los Servicios Ecosistémicos de regulación de (Retención de suelo). En este apartado se utilizará la ecuación de RUSLE.

En el servicio ecosistémico de retención del suelo, se retomó la metodología de Vargas, (2015) en el cual se aplicó el RUSLE Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año, continuando con la validación del área de estudio.

En la cuarta etapa se caracterizó y cuantifico la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación (Recarga del acuífero). El método que se aplicó fue: cuantificar y Fotointerpretar cartográficamente, en esta etapa se aplicarán varias ecuaciones para obtener la recarga del acuífero y son: Estimación de Precipitación Pluvial, Temperatura Media Anual, volumen evapotranspirado y evapotranspiración anual real.

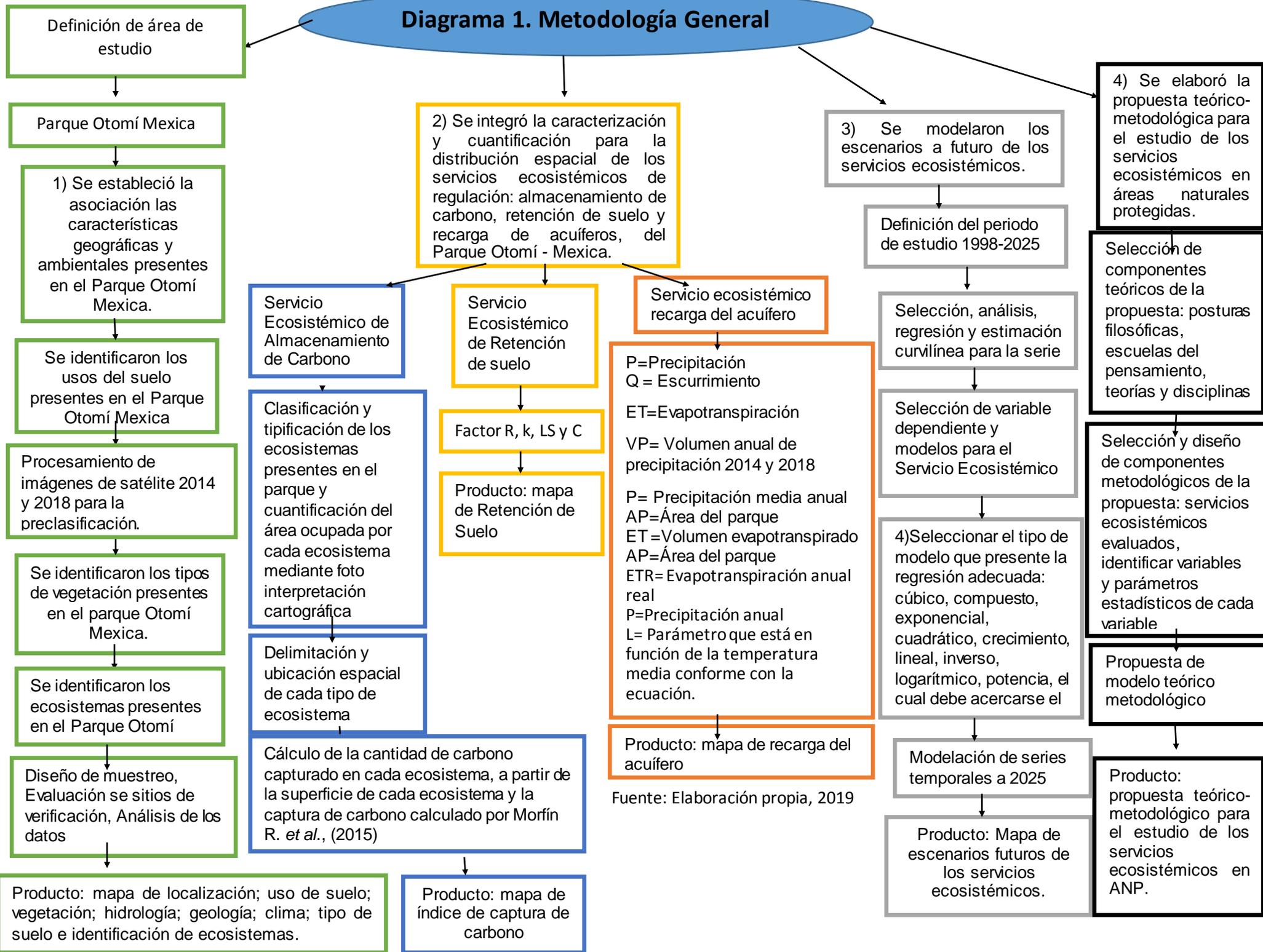
Para el servicio ecosistémico de recarga del acuífero se aplicó la metodología de Llerena (2003), en el cual se determinaron las áreas con exceso hídrico, déficit hídrico y estabilidad hídrica para los años 2014 y 2018.

La quinta etapa metodológica consistió en modelar los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos, el método que se aplicará es: clasificar y tipificar posteriormente, cuantificar y Fotointerpretar cartográficamente para después, ubicar espacialmente los tipos de ecosistemas en Sistemas de Información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo.

La sexta etapa metodológica se enfocó a elaborar una propuesta teórico-metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas, el método que se aplicará es teórico y metodológico, ver (Diagrama metodológico general).

A continuación, se presenta el diagrama 1. Metodología general en el cual se analiza cómo está estructurada dicha investigación.

Diagrama 1. Metodología General



La metodología que se aplicó parte del método geográfico, la cual consiste en 1) localización: Friedrich Ratzel. Consiste en ubicar el lugar exacto de un hecho o fenómeno geográfico tomando en cuenta algunos aspectos espaciales como: latitud, longitud, altitud, límites, superficie. 2) Descripción: Paul Vidal de La Blache. Consiste en dar a conocer las características de un hecho o fenómeno geográfico que queramos estudiar. 3) Comparación o Analogía: Karl Ritter y Paul Vidal de La Blache. Consiste en establecer semejanzas y diferencias entre el hecho o fenómeno geográfico que estemos estudiando con otro que se ubica en otras latitudes del globo. 4) Causalidad u Origen: Friedrich Wilhelm Heinrich Alexander Freiherr Von Humboldt. Permite identificar el porqué de la ocurrencia de un hecho o fenómeno geográfico. Otorga carácter científico a la geografía. 5) Actividad, Dinamismo o Evolución: Jean Brunhes. Señala que todo se encuentra en constante transformación, teniendo como agentes transformadores al hombre o a la naturaleza. 6) Conexión o Relación: Jean Brunhes. Plantea que todo hecho o fenómeno geográfico debe ser estudiado como un todo y no de forma aislada.

El método cartográfico que se aplicará en dicha investigación consiste en la generación de mapas para su descripción, análisis y procesamiento de cada uno de los resultados obtenidos en cada etapa metodológica.

Etapas Metodológicas

A continuación, se describen las etapas metodológicas de la investigación.

2. Primera etapa metodológica. Análisis espaciotemporal de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica.

En esta etapa se identificó el área de cada ecosistema del Parque Otomí Mexica por medio de los mapas de uso de suelo, retomando la metodología de Camacho (2019), en el cual se llevó a cabo un proceso de validación mediante puntos de verificación (sitios de muestreo). Para el mapa uso de suelo del parque Otomí Mexica del año 2014 se registraron un total de 450 puntos, de los cuales 415 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa y 35 pertenecieron a una categoría diferente, para el mapa de uso de suelo del parque Otomí Mexica del año 2018, un total de 450

puntos de muestreo, de los cuales 407 coinciden con las categorías de la leyenda del mapa y 43 pertenecieron a una categoría diferente.

2.1 Caracterización geográfica ambiental del parque Otomí Mexica.

Esta etapa se realizó bajo las consideraciones epistemológicas de los principios geográficos (localización, descripción, comparación, causalidad, actividad y relación), las bases teóricas de los Sistemas Complejos (pensamiento sistémico), La Ecología Cultural (relación cultura-naturaleza) y los Sistemas de Información Geográfica (cartografía temática). Estos fundamentos permitieron ubicar, analizar y describir, las interrelaciones que existen entre los elementos que componen el subsistema biofísico y el subsistema sociocultural del territorio administrativo del parque y con ello determinar su estado actual.

Comprende todas las actividades asociadas con la descripción cuantitativa, cualitativa de los rasgos homogéneos que predominan en el Parque Otomí – Mexica como son; ubicación, tipo de roca, hidrología, temperatura máxima y mínima, uso de suelo, clasificación de roca, era geológica. Con la finalidad de dar a conocer la región estudiada.

2.1.2 Identificación de los usos del suelo presentes en el Parque Otomí Mexica.

La identificación de los usos del suelo presentes se llevó a cabo mediante la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo para conocer su grado de fiabilidad. En esta etapa se da a conocer una representación de cómo está estructurada la distribución del suelo, es una aproximación de la realidad del terreno, la representación cartográfica de los suelos de un territorio determinado constituye una visualización de las propiedades intrínsecas de los suelos y la delimitación de su ámbito concreto de distribución. La expresión cartográfica de esta información constituye un notable esfuerzo de síntesis y concreción. Los usos del suelo deben integrar de una manera armónica la escala de trabajo, la cantidad de información que se debe representar, la calidad en la definición y delimitación de unidades y la capacidad de interpretación de los usuarios de la información.

Las formas diferentes en la que se emplea un terreno y la cubierta vegetal se les denomina usos del suelo. Desde el punto de vista geográfico los tipos de uso de suelo y el grado de explotación influyen en la diversidad de paisajes los cuales son modificados por los cambios de uso del suelo, dichos cambios son investigados en el centro de la investigación ambiental, en el cual se analizan las pérdidas de hábitat, biodiversidad, bienes y servicios ambientales y la capacidad productiva de los ecosistemas.

El cambio de uso de suelo durante décadas ha sido constituido como uno de los factores del cambio global, alterando procesos y ciclos.

Para la identificación de los usos del suelo presentes en el área de estudio, se descargaron imágenes de satélite del sensor Landsat Thematic Mapper (TM). Estos insumos fueron descargados del servidor Glovis del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey). Las imágenes o escenas corresponden a la época soca- fría de 02 de diciembre de 2014 y 10 de enero de 2018 (ambas imágenes pertenecen al path 27 y row 47). A cada escena se le asignó el sistema de coordenadas UTM, con datum WGS84. Pasos para la obtención del mapa uso del suelo:

Procesamiento de imágenes de satélite 2014 y 2018 para la preclasificación

En esta etapa se eliminan ruidos causados por la señal que llega al satélite por atravesar la atmosfera. “El efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los niveles digitales de los píxeles. Se trata de radiaciones radiométricas y geométricas que no coinciden con el tono, posición y tamaños de los objetos”. (Chuvienco, 1996 en Camacho 2019)

Con la finalidad de tener menor error en el proceso de clasificación y postclasificación se aplicaron métodos, técnicas y procedimientos relacionadas con la corrección geométrica y corrección atmosférica de las imágenes de satélite mencionadas.

Para realizar la corrección geométrica de las imágenes de satélite se hizo mediante puntos de control con una imagen de referencia.

El ajuste entre cada una de las diferentes imágenes de satélite y el mosaico se realizó a partir de una función de transformación de segundo grado u orden, que considera como mínimo seis puntos de control (Chuvieco, 2008 en Camacho, 2019). Para dicha investigación se registraron 70 puntos de control para cada imagen, para tener una mayor precisión entre las imágenes de satélite y el mosaico, el error medio cuadrático fue de 8 metros.

La distribución de puntos de control se colocó en toda la imagen de satélite omitiendo colocar puntos en intersecciones de carreteras, caminos, paisajes, ríos, entre otros.

“Una vez corregidas las imágenes fue necesario transferir (ubicar) los niveles digitales (ND) de las imágenes originales (con errores geométricos) a su nueva posición. Esto fue posible mediante el método del vecino más próximo, pues es el único método de interpolación radiométrica o remuestreo que preserva los valores originales al no introducir promedios”, (Chuvieco, 2008 en Camacho, 2019). Los procesos descritos se llevan a cabo en ArcMap 10.4 (ESRI, 2016).

La corrección atmosférica de las imágenes satelitales se realizó en el módulo ATMOSC (Atmospheric Correction) del software Idrisi Selva (Eastman, 2012), a partir del módulo de Reflectancia Aparente (Chuvieco, 2008 en Camacho 2019), considerando la fecha y la hora de adquisición de la imagen, la longitud de onda media de cada banda (en micras), la radiancia mínima y máxima, el ND máximo de la imagen, ángulo de visión del satélite, y la elevación solar. Estos datos se obtuvieron del archivo de metadatos de cada imagen.

La calibración de la radiancia de cada una de las bandas correspondientes a cada imagen se realizó mediante la opción Lmin/Lmax. En este sentido según (Chander y Markham, 2003 en Camacho, 2019) argumentan que cuando se comparan imágenes de distintas fechas (como en este estudio) es necesario transformar los valores de radiancia a reflectancia debido a que se remueve el efecto producido por el ángulo solar, para compensar las diferencias en los valores de la irradiancia solar extra-atmosférica. Esto es posible a través de la corrección atmosférica.

2.1.3 Identificación de los tipos de vegetación presentes en el parque Otomí Mexica.

La identificación de tipos de vegetación en el área de estudio se realizó por medio de la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo para conocer su grado de fiabilidad de la serie IV de INEGI para el año 2014 y la serie VI de INEGI para el año 2018 escala 1: 250,000 cada mapa cuenta con nueve categorías las cuales son: 1) bosque de pino, 2) bosque de encino, 3) bosque de oyamel, 4) bosque pino- encino, 5) bosque mesófilo de montaña, 6) agricultura de temporal, 7) asentamientos humanos, 8) pastizal inducido, 9) agricultura de riego, para ser analizada mediante cartografía automatizada.

2.1.4 Identificación de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica.

Se identificaron los ecosistemas por medio de su ubicación para ello está la tendencia espacial de distribución de los Ecosistemas como son:

- 1) Latitud: hace referencia a la posición geográfica en relación al meridiano donde el ecosistema se encuentra ubicado. De esto depende si el ecosistema tendrá un clima frío (ubicado cerca de los polos) o cálido (cerca de la línea ecuatorial).
- 2) Altitud: otro factor característico está determinado por la altitud pues a mayor altura, mayor cantidad de precipitaciones y menores temperaturas.

Delimitación de cada ecosistema considerando píxeles individuales debido a que la clasificación de las imágenes de satélite se llevó a cabo píxel a píxel, la identificación de cada ecosistema con un tamaño de muestra de 50 sitios por categoría determinado por (Congalton, 1991 en Camacho 2019), y cuantificación de la superficie ocupada por cada ecosistema en ambos periodos; y validación de la cartografía para conocer el grado de confiabilidad de los mapas de ecosistemas por medio de matrices de confusión para cada año de estudio, que es una tabla bidimensional donde generalmente las filas representan las clases de referencia

(verdad terreno o sitios de verificación) y las columnas las categorías del mapa (Verdad imagen).

En la (tabla 1), se identifican los ecosistemas presentes de la serie III INEGI, (2002), a partir de ello se determinarán los tipos de vegetación y ocupación del suelo.

Tabla 1. Principales ecosistemas en el Parque Estatal Otomí – Mexica del Estado de México.

CATEGORIA	DESCRIPCIÓN
Bosque de pino	Se refiere a la cobertura arbórea de tipo disperso.
Bosque de encino	Se caracteriza por que está constituida por formaciones densas o al menos cerradas, sin embargo, en algunas zonas del parque estas especies crecen separadas con amplios espacios cubiertos por arbustos y herbáceas.
Bosque de oyamel	Se caracteriza por desarrollarse generalmente en suelos profundos y suelos someros con presencia de una capa muy delgada de ceniza volcánica, ricos en materia orgánica.
Bosque pino-encino	Se caracteriza por tener comunidades arbóreas de gran altura acompañados por otras especies entre las que destacan el madroño, aile y trompillo, especies latifoliadas y consideradas poco representativas en cuanto a abundancia y distribución.
Bosque mesófilo de montaña	Se caracterizan por que crecen los árboles a lo largo de los ríos.
Agricultura de temporal	Se considera solo la agricultura de temporal
Asentamientos humanos	Son zonas donde se concentran las viviendas de distintos tipos, comercios, escuelas e infraestructura urbana, principalmente. Se refiere a las cabeceras municipales, localidades urbanas y a los asentamientos aislados que son perceptibles desde las imágenes.
Pastizal inducido	Constituye los pastos inducidos que se establecieron y desarrollaron después de eliminar la vegetación primaria. También se incluyen las praderas cultivadas para el ganado.

Agricultura de riego	Se considera solo la agricultura de riego
----------------------	---

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2014 -2018) y Trabajo de campo (2020).

El siguiente paso es la selección y delimitación de los campos de entrenamiento o áreas de interés (número total de píxeles) se realizó con base en la regla general establecida por (Jense 1996) en Camacho, (2019), quien recomienda seleccionar mínimo 10 veces el número de bandas utilizadas en el desarrollo de las estadísticas de entrenamiento, o bien, para calibrar el clasificador.

Se utilizaron para esta investigación seis bandas de la escena de Landsat TM (excluyendo la banda térmica) y a partir de estas se generó un compuesto de falso color con las bandas TM4 (infrarrojo cercano), TM3 (visible rojo) y TM2 (visible verde). Posteriormente se digitalizaron un total de 70 campos o áreas de entrenamiento distribuidos de manera aleatoria y uniforme, en cada una de las diferentes imágenes 2014 y 2018 (mínimo 10 campos por cada una de las clases).

Para la localización de los campos de entrenamiento se realizó a partir del conocimiento experto y producto de los recorridos de campo *in situ*. Dicha actividad aprobó la identificación de cada cobertura por medio de la observación directa y la ubicación de las mismas mediante el Sistema de Geoposicionamiento Global. Esta etapa se complementó con datos auxiliares derivados de la interpretación visual de imágenes de alta resolución espectral, disponible en Google Earth. La selección de campos de entrenamiento se llevó a cabo para dos imágenes de satélite.

La digitalización de los polígonos correspondientes a esta clase se realizó mediante el uso de imágenes de alta resolución espectral del año 2014, disponibles en Google Earth.

Debido a la topografía existente en el Parque Otomí- Mexica, fue necesario delimitar campos de entrenamiento para las zonas de sombra. Esto con el propósito de minimizar los errores temáticos al momento de validar o evaluar el grado de confiabilidad de los mapas de coberturas y usos del suelo producto de la clasificación.

Con base en los píxeles prototipo de cada categoría (campo de entrenamiento) se obtuvieron firmas espectrales para realizar el análisis de la separabilidad espectral a través del método de Divergencia Transformada. La aplicación de este método se justifica debido a que es el más utilizado en estudios donde se emplea la clasificación de máxima verosimilitud (Mausel *et al.*, 1990 en Camacho, 2019), como el caso de este estudio. Se obtuvieron valores mayores a 1 900 (buena separabilidad) entre cada una de las categorías de análisis.

A partir de las firmas espectrales se realizó la clasificación supervisada de las imágenes de satélite, aplicando el método de clasificación puntual (Lira, 2010 en Camacho, 2019) y el algoritmo de máxima verosimilitud o máxima probabilidad que es el más comúnmente utilizado en la Percepción Remota y se considera uno de los procedimientos de discriminación más acertados y eficiente, toda vez que los datos sigan una función de distribución normal (Masselli *et al.*, 1992; Lillesand *et al.*, 2007; García y Mas, 2011 en Camacho, 2019).

En total se clasificaron nueve categorías para el mapa del año 2014 y nueve para el mapa 2018. A las coberturas clasificadas se les aplicó el filtro de moda para reducir el efecto “sal y pimienta” y con ello minimizar la probabilidad de que píxeles aislados sesgaran la evaluación de la confiabilidad post-clasificatoria (Chuvieco, 2008 en Camacho, 2019). Esta fase metodológica se llevó a cabo en el software Idrisi Selva.

La identificación de los usos del suelo presentes se llevó a cabo mediante la validación de los mapas de cobertura y uso del suelo para conocer su grado de fiabilidad. Distintos especialistas en el tema argumentan que cuantificar la fiabilidad de un producto cartográfico, permite a los usuarios valorar su ajuste con la realidad y así, asumir el riesgo de toma de decisiones con base a esta información. Además, ayuda a conocer y modelar el error que resulte del uso de estos datos modelados en un SIG (Luneta *et al.*, 1991; Goodchild *et al.* 1992; Burrough, 1994 en Camacho, 2019). Por lo que la evaluación de confiabilidad temática de los mapas de cobertura y usos del suelo se realizó a partir de las siguientes etapas metodológicas (Mas *et al.*, 2003 en Camacho, 2019):

- ✓ **Diseño de muestreo.** En esta etapa se determinaron las unidades de muestreo, el método de muestreo y el tamaño de la muestra. Como unidades de muestreo se consideraron píxeles individuales debido a que la clasificación de las imágenes de satélite se llevó a cabo píxel a píxel (Janssen y van der Wel, 1994 en Camacho, 2019).
- ✓ Se aplicó el método aleatorio estratificado para asegurar que no se sobremuestren las categorías con mayor superficie con relación a las de menor extensión territorial (Card, 1982 en Camacho, 2019). El tamaño de la muestra se determinó con base a (Congalton, 1991 en Camacho), que sugiere verificar, por lo menos, 50 sitios por categoría. Por tanto, se verificaron 450 puntos de muestreo para el mapa del año 2014 y 450 puntos para el mapa de 2018.
- ✓ **Evaluación de sitios de verificación.** Consistió en asociar los puntos de muestreo con base en una clase principal y una adicional del mapa, para evitar subestimar la confiabilidad de los insumos cartográficos evaluados (Khorram *et al.*, 2000 en Camacho, 2019). El mapa del año 2014 se validó a partir de la interpretación visual y el conocimiento experto de un especialista en la temática, considerando la imagen de satélite que se utilizó en el proceso de clasificación de este mapa. A través de este mismo procedimiento se evaluó el mapa de 2018, sólo que se utilizaron imágenes de alta resolución espectral de Google Earth del mismo año.
- ✓ **Análisis de los datos.** Esta etapa consistió en confrontar los sitios de verificación (puntos de muestreo) con las categorías clasificadas en los mapas. Esto mediante una matriz de confusión o matriz de error, que es una tabla bidimensional donde generalmente las filas representan las clases de referencia (verdad terreno o sitios de verificación) y las columnas las categorías del mapa (Verdad imagen), lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado. La diagonal de la matriz expresa el número de puntos de verificación para los cuales existe una correspondencia entre las categorías del mapa clasificado y las clases de referencia, mientras los

marginales indican errores de asignación (USDA, 1995; Mas et al., 2003; Franco *et al.*, 2006 en Camacho, 2019), (Tabla, 2)

Tabla 2. Matriz de confusión o matriz de error

Verdad en el terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (categorías del mapa = j)				
	j ₁	j ₂	...	j _q	Total
i ₁	i _{1j1}	i _{1j2}	...	i _{1jq}	i ₁₊
i ₂	i _{2j1}	i _{2j2}	...	i _{2jq}	i ₂₊
...
i _q	i _{qj1}	i _{qj2}	...	i _{qjq}	i _{q+}
Total	+j ₁	+j ₂	...	+j _q	$\sum +j$ $\sum i +$

Fuente: Elaboración propia con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Nota: ij = corresponde al número de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; i1+ = es la suma de los píxeles (superficie) correspondiente a la clase de referencia i1; +j1 = corresponde a la suma de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa j1; $\sum +j$ o $\sum i +$ = es el total de la suma de los píxeles de las clases de referencia ($\sum Pi+$), o bien, el total de la suma de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa ($\sum P+j$). También este dato corresponde al número total de puntos o sitios mostrados.

Así mismo se construyeron dos matrices de confusión, misma que fueron corregidas o ajustadas con el propósito de ponderar el número de sitios de verificación en relación (proporción) a la superficie de cada categoría representada en el mapa (Card, 1982) (Tabla 3). A partir de los ajustes realizados a estas matrices se calculó la proporción y área de cada una de las categorías o clases de análisis (Mas y Couturier, 2011, en Camacho; 2019)

Tabla 3. Matriz de confusión expresada en proporción

Verdad en el terreno (Clases de referencia = i)	Verdad imagen (categorías del mapa = j)				
	j ₁	j ₂	...	j _q	Total
i ₁	P _{i1j1}	P _{i1j2}	...	P _{i1jq}	P _{i1+}
i ₂	P _{i2j1}	P _{i2j2}	...	P _{i2jq}	P _{i2+}
...
i _q	P _{iqj1}	P _{iqj2}	...	P _{iqjq}	P _{iq+}
Total	P _{+j1}	P _{+j2}	...	P _{+jq}	$\sum P +j$ $\sum P i +$

Fuente: Elaboración propia con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Nota: P ij = proporción de píxeles (superficie) correctamente clasificados de cada categoría o clase; P i1+ = es la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) correspondiente a la clase de referencia i1; P +j1 = corresponde a la suma de las proporciones de los píxeles (superficie) de la categoría del mapa j1; $\sum P +j$ o $\sum Pi+$ = es el total de la suma de las proporciones de los píxeles de las clases de referencia ($\sum Pi+$), o bien, el total de la suma de las proporciones de los píxeles correspondientes a las categorías del mapa ($\sum P+j$).

Con base en los datos incluidos en las matrices de error o confusión (Tabla 3) se determinaron los índices de fiabilidad para cada una de las categorías y el medio intervalo de confianza (Aronoff, 1982; Janssen y van der Wel, 1994; Stehman y

Czaplewski, 1998; Chuvieco, 2008; Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019). Para el cálculo de este último se consideró una fiabilidad estimada del 80% (Tabla 4)

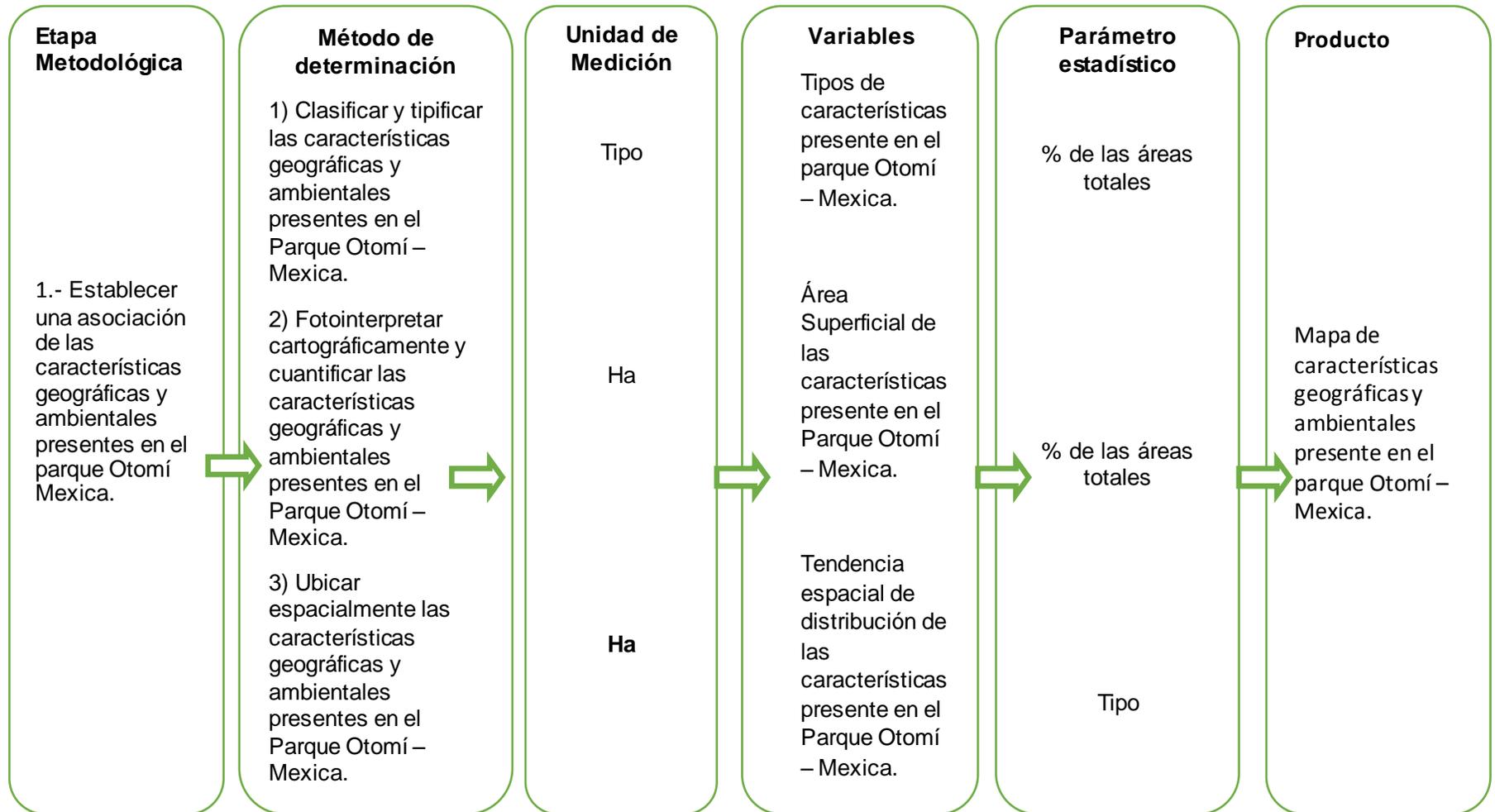
Tabla 4. Índice de fiabilidad y medio intervalo de confianza.

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

Fuente: Elaboración propia con base en (Aronoff, 1982; Janssen y van der Wel, 1994; Stehman y Czaplewski, 1998; Chuvieco, 2008, Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

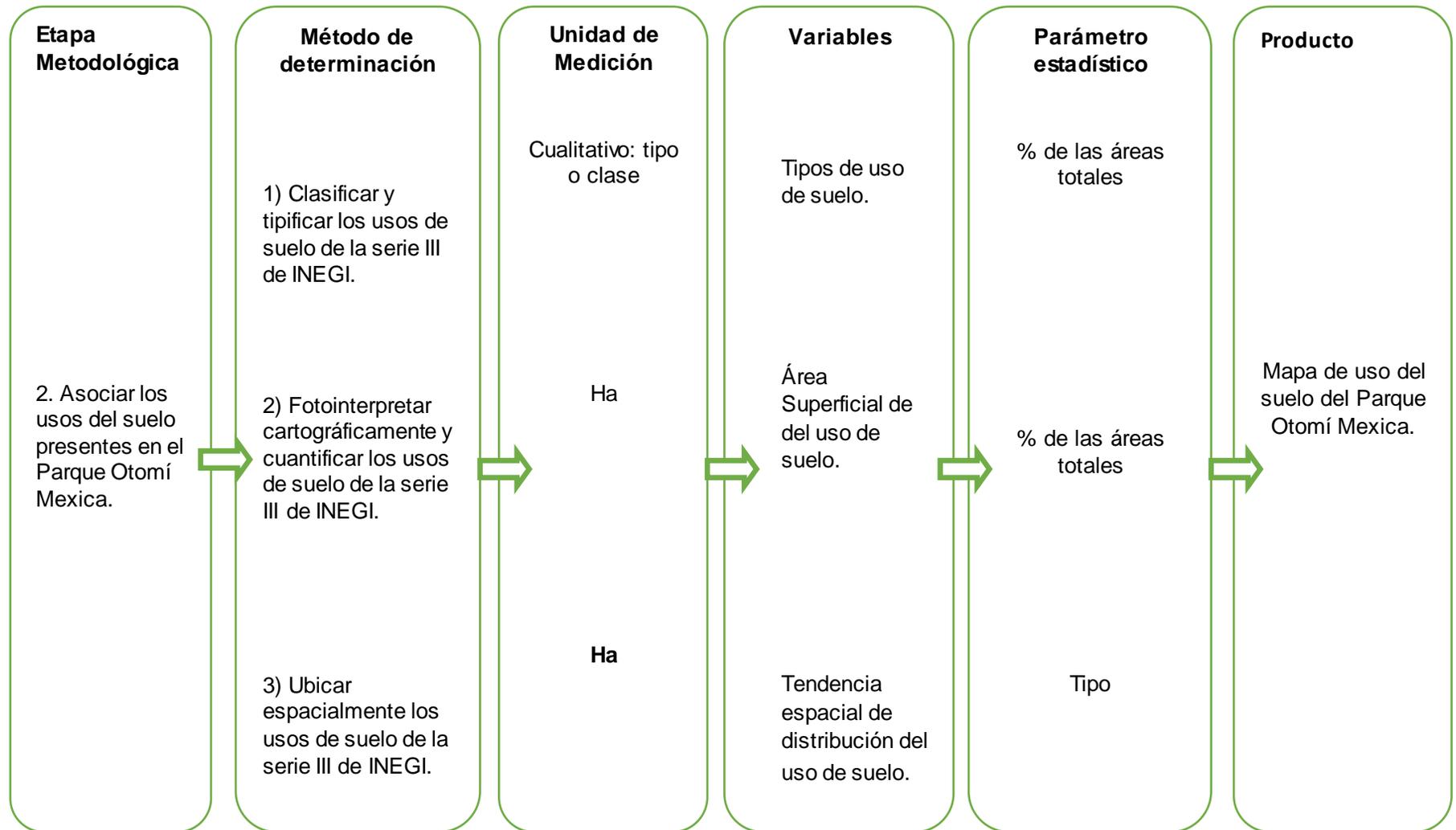
A continuación, se presenta la explicación de la primera etapa metodológica, ver (figuras,8,9,10,11 y diagrama, 2).

Figura 8. Primera etapa metodológica 1.1 Estabilización para la asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica.



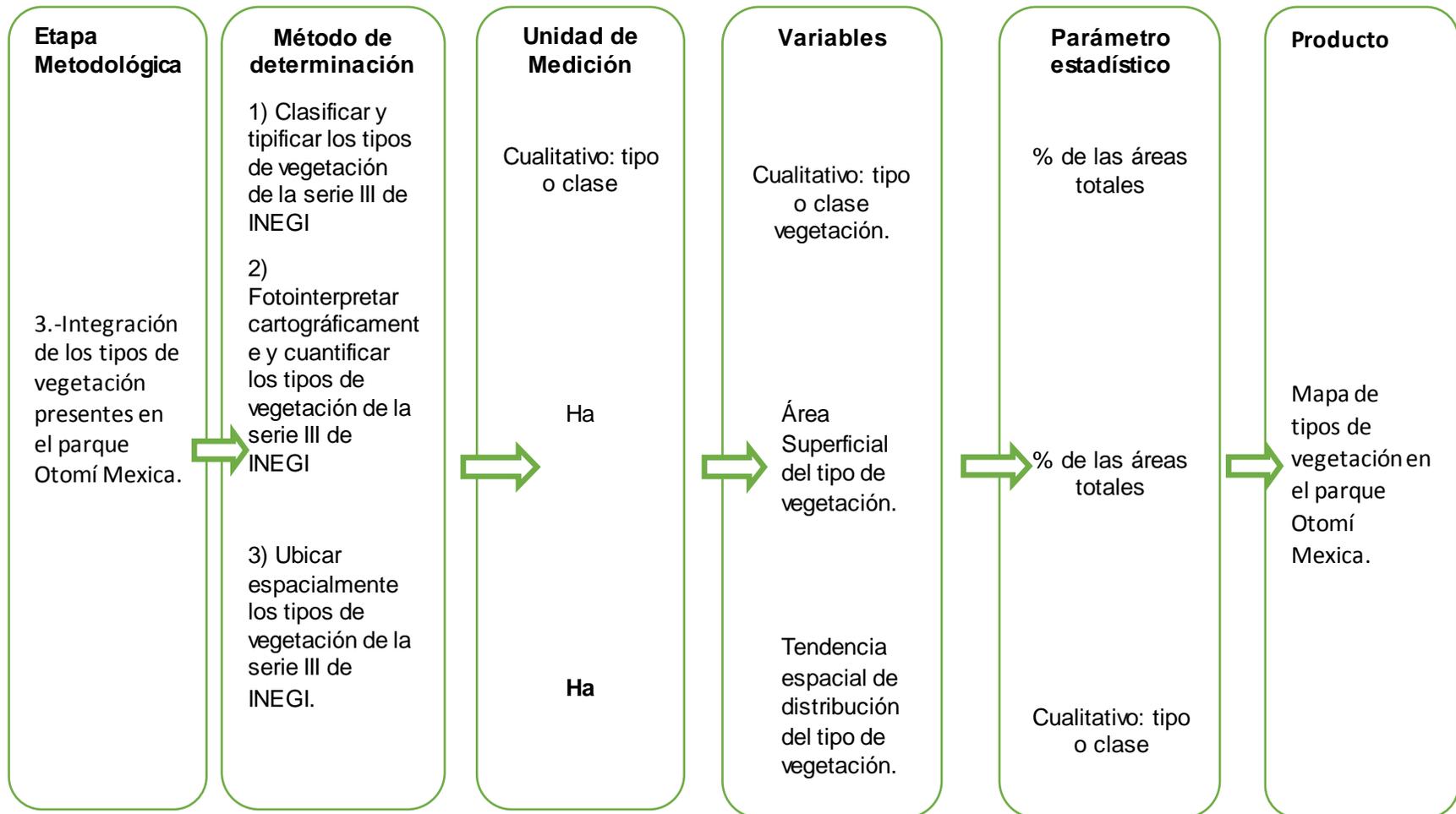
Fuente: Elaboración propia, 2019

Figura 9. Primera etapa metodológica 1.2 Asociar los usos del suelo presentes en el Parque Otomí Mexica.



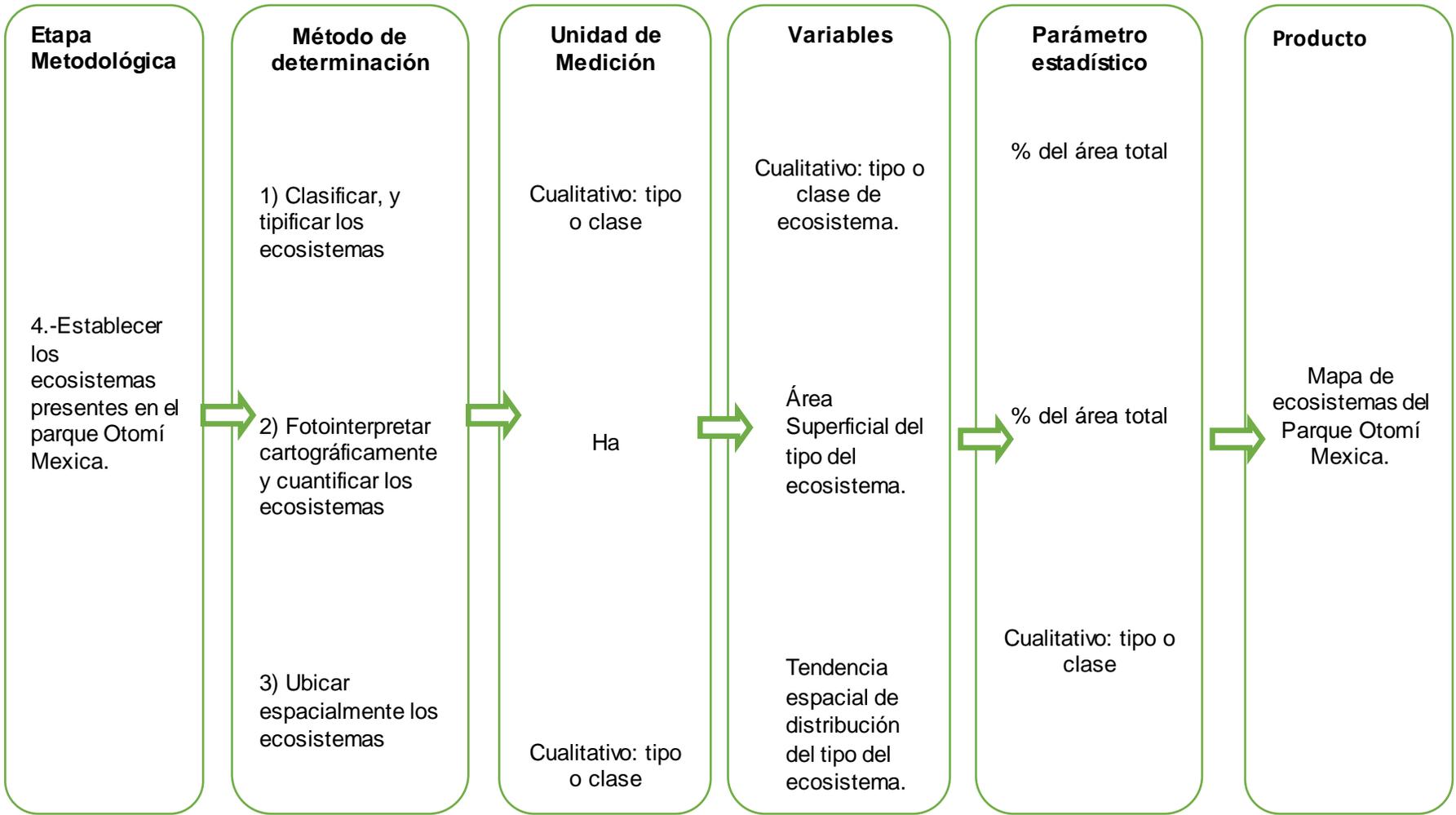
Fuente: elaboración propia, 2019

Figura 10. Primera etapa metodológica 1.3 Integración de los tipos de vegetación presentes en el parque Otomí Mexica.



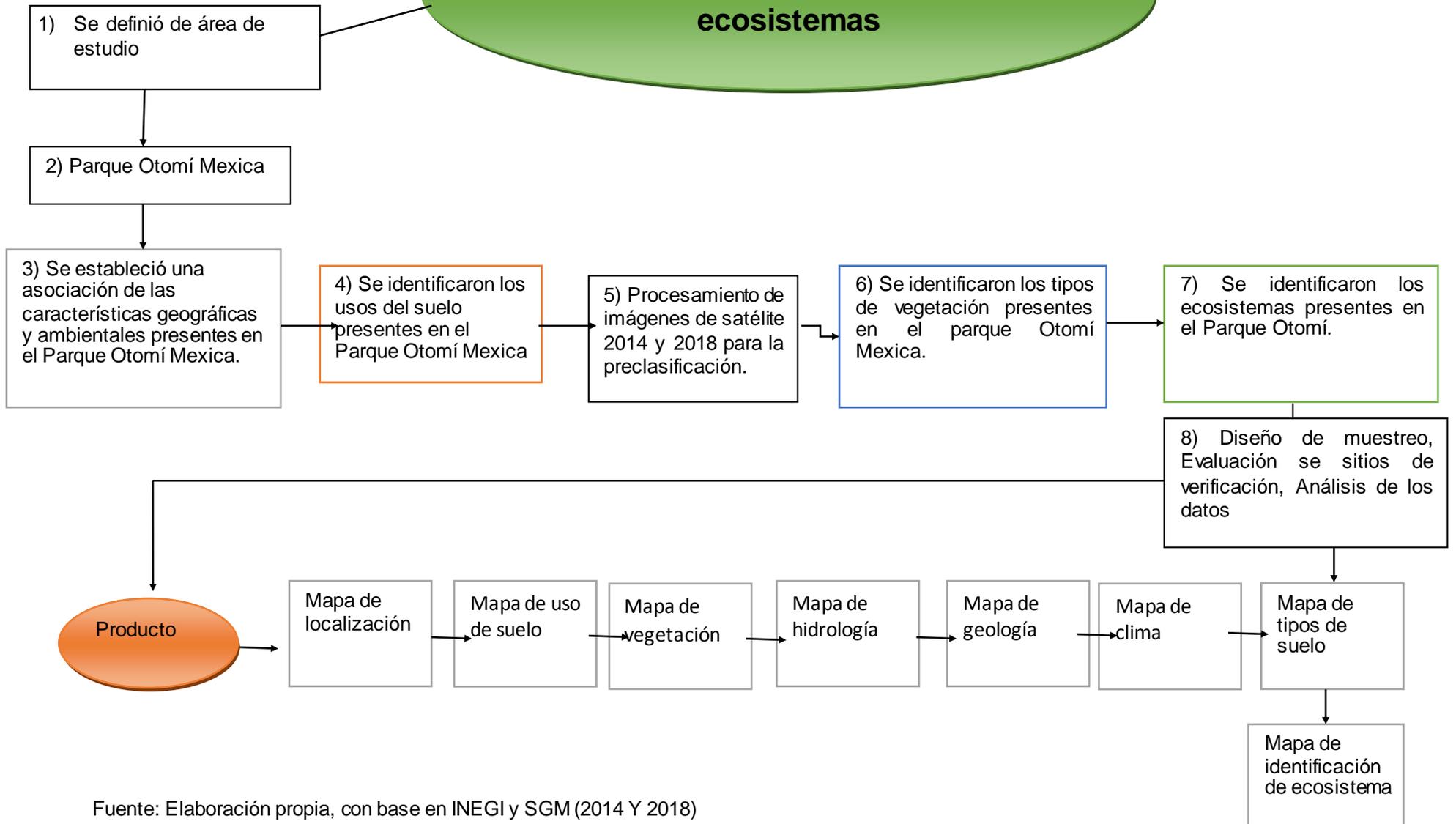
Fuente: elaboración propia, 2019

Figura 11. Primera etapa metodológica 1.4 Estabilización de los ecosistemas presentes en el parque Otomí Mexica.



Fuente: Elaboración propia, 2019

Diagrama 2. Primera Etapa Metodológica. Identificación de ecosistemas



Fuente: Elaboración propia, con base en INEGI y SGM (2014 Y 2018)

2.2 Segunda etapa metodológica. Análisis espaciotemporal de los servicios ecosistémicos.

2.2.1 Análisis espaciotemporal del almacenamiento de carbono.

La metodología que se aplicó en esta etapa consiste en los siguientes pasos: 1) Clasificación y tipificación de los ecosistemas presentes en el Parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema mediante fotointerpretación cartográfica; 2) Delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema; 3) Cálculo de la cantidad de carbono capturado en cada ecosistema, a partir de la superficie de cada ecosistema y la captura de carbono calculado por Morfín R. *et al.*, (2015); para representar la tendencia de distribución y cuantificación de la distribución espacial del servicio ecosistémico almacenamiento de carbono. A continuación, se describen cada uno de los apartados en el cual se describen la serie de pasos que se realizaron para dicha investigación.

2.2.1.1 Clasificación y tipificación de los ecosistemas presentes en el Parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema mediante fotointerpretación cartográfica

Este apartado se desarrolla en tres etapas: 1) gabinete, 2) trabajo de campo, 3) aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Primera etapa revisión de la información en fuentes oficiales como lo es el decreto del Parque Estatal Otomí – Mexico. Segunda etapa trabajo de campo para confirmar los ecosistemas presentes. Tercera etapa mediante los SIG se rectifican los ecosistemas en las dos etapas anteriores. Para la cuantificación y fotointerpretación cartográfica se digitalizo cada uso de suelo para obtener la superficie de cada ecosistema del área de estudio.

2.2.1.2 Delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema

La delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema se llevó a cabo mediante la carta de Uso de Suelo y Vegetación serie IV para el año 2014 y la serie VI de INEGI para el año 2018 escala 1: 250,000 las cuales fueron validadas en el

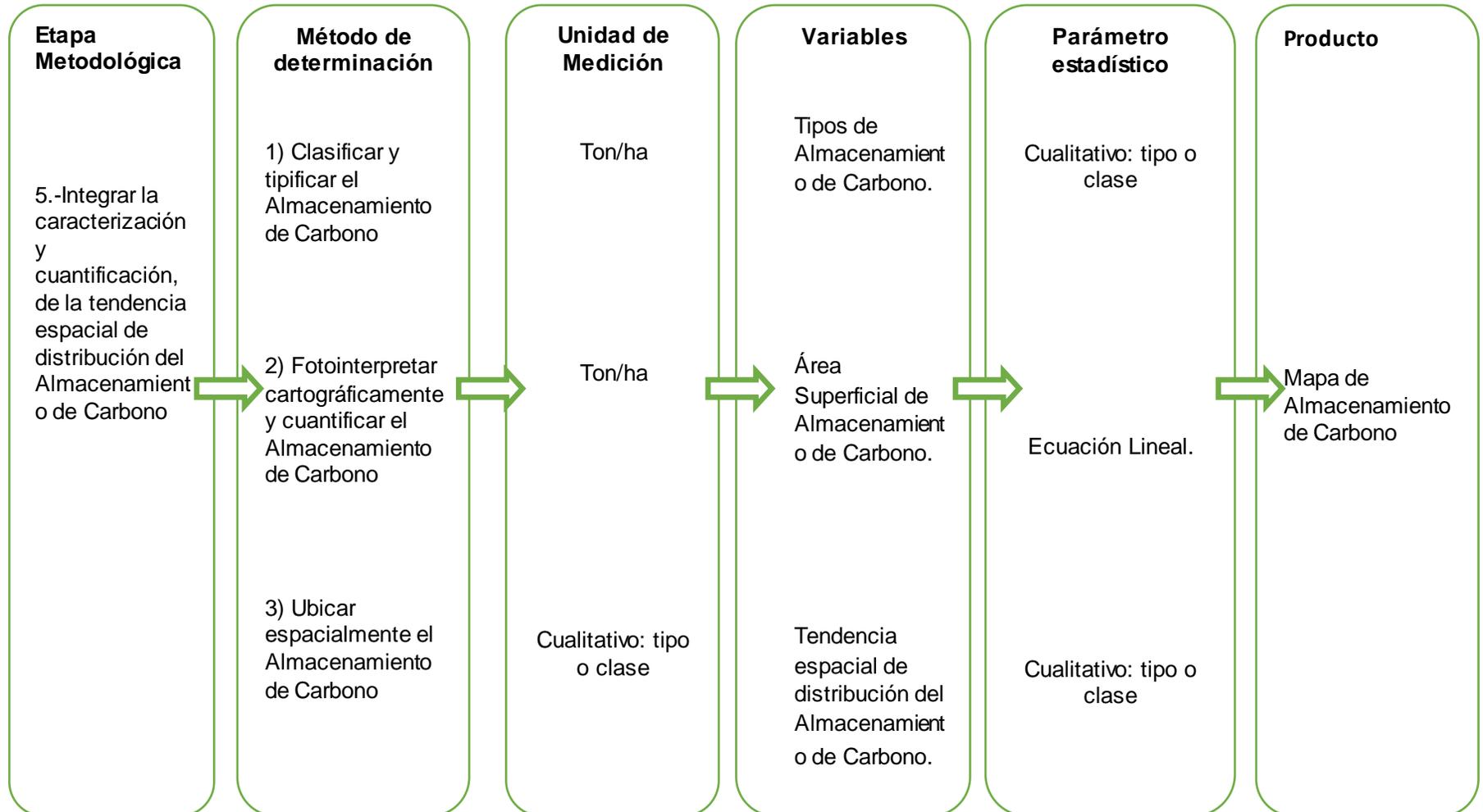
software Arc Map ^{10.4}. En el caso del mapa de ubicación se descargó el SHP de INEGI de Municipios 2015 y colocar el área de estudio para su mejor localización.

2.2.1.3 Cálculo de la cantidad de carbono capturado en cada ecosistema, a partir de la superficie de cada ecosistema y la captura de carbono calculado por Morfín R. et al., (2015).

Para las estimaciones de captura de carbono, se requiere de los siguientes pasos. Paso 1: Se define el grupo de individuos (vivos, muertos y tocones). Paso 2: Usando las coordenadas del centro del sitio se obtiene las clases de cobertura. Paso 3: Usando la base de datos de modelos alométricos, la biomasa se clasifica en tipos de especie, género y vegetación. Paso 4. Se ejecuta la ecuación seleccionada para la estimación de biomasa y el resultado es convertido a carbono por medio de los factores de expiación de carbono para México. Morfín R. et al., (2015)

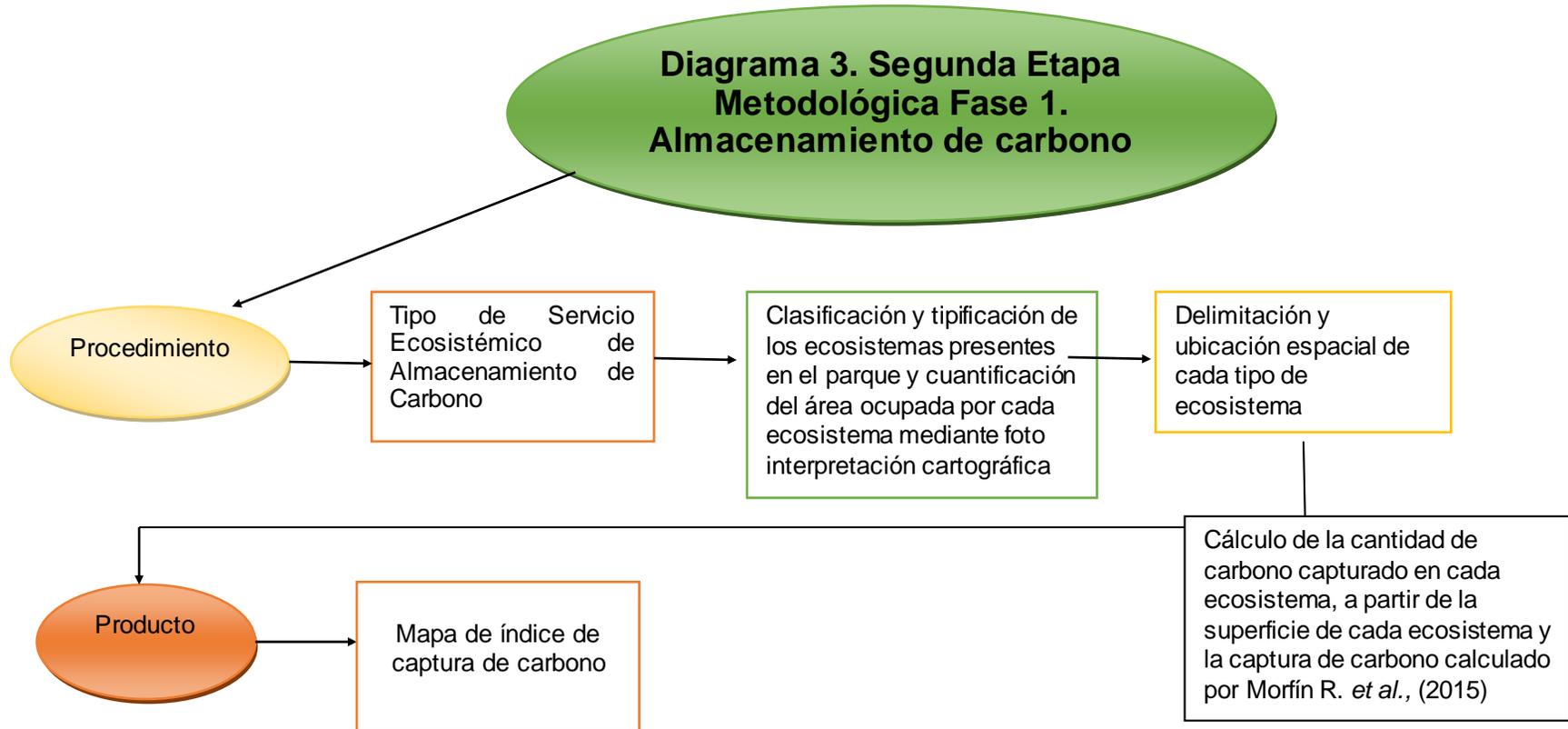
A continuación, se presenta la explicación de segunda etapa metodológica, ver (figura, 12 y diagrama, 3)

Figura 12. Segunda etapa metodológica 2.1 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución del Almacenamiento de Carbono



Fuente: Elaboración propia, 2019

Diagrama 3. Segunda Etapa Metodológica Fase 1. Almacenamiento de carbono



Fuente: Elaboración propia, 2019

2.2.2 Análisis espaciotemporal de la retención de suelo

Se optó por este método ya que utiliza una ecuación práctica que permite representar los distintos grados de erosión además es una de las metodologías más usadas para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, (Vargas, 2015).

Donde la erosión del suelo de la siguiente manera: $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C$

Donde:

A, es la pérdida de suelo en t/ha año.

R, es el factor erosividad de la lluvia en $Mjmm/ha$ año.

K, es el factor erosionabilidad el suelo en $(t/ha)/(Mj.mm/ha h)$

L, es el factor longitud del terreno (adimensional).

S, es el factor pendiente del terreno (adimensional).

C, es el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional).

Factor R. Se utilizó la capa base de Precipitación Pluvial generada para el modelo de requerimientos agroecológicos, aplicando la fórmula del Factor R.

Aplicar la fórmula del factor R

$$R = 0.0483 Pa^{1.610} \quad Pa \leq 850 \text{ mm. (2.4)}$$

$$R = 587.8 + 1.249 Pa + 0.004105 Pa^2 \quad Pa > 850 \text{ mm. (2.5)}$$

Dónde:

R= factor de erosividad (MJ mm/ ha hr año)

Pa= precipitación total anual (mm)

Factor K. Se elaboró mediante el uso del monograma propuesto por la FAO (1980), un valor por unidad de suelo y textura superficial, utilizando los grupos de textura: fina, media y gruesa (Figura, 13).

Procedimiento:

- Ubicar unidad de suelo
- Identificar la clase de textura o texturas que presenta la unidad o grupo
- Asignar el valor de acuerdo a la relación unidad de suelo-tipo de textura correspondiente.

Para la obtención de los datos de la edafología se retomó la información de la caracterización, que previamente se consultó en el geo portal de INEGI a partir de la información cartográfica recopilada con escala 1: 50,000 se identificaron nueve tipos de suelo con sus principales características.

Figura 13. Asignación de valor para K en función de la unidad de suelo y textura.

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

Fuente: FAO, (1980).

Parámetro C. el parámetro se determinará en función de la cobertura de suelo presente, se realizará la asignación de valores con la ayuda de tablas para cada cobertura descrita en el manual (Figura, 14).

Figura 14. Asignación de valor para C en función del uso de suelo y vegetación.

Bosque de pino – encino:	0.0200
Pastizal inducido:	0.0270
Bosque de pino:	0.0400
Selva baja espinosa subperennifolia:	0.04370
Selva Subcaducifolia:	0.0800
Palmar natural:	0.1000
Bosque de mezquite:	0.1800
Bosque de encino:	0.1880
Selva perennifolia:	0.1930
Bosque de conífera:	0.2000
Agricultura de temporal:	0.2500
Selva subcaducifolia:	0.2700
Pastizal natural:	0.2725
Suelo desprotegido:	1.0000
Cuerpo de agua:	0.0010
Vegetación inducida:	0.0020
Agricultura de riego:	0.0040
Selva caducifolia:	0.0100

Fuente: Elaboración propia con base en Wischmeier y Smith (1978)

Parámetro P. Para representar las prácticas de conservación de suelo es necesario investigar si en el Parque Otomí-Mexica se llevan a cabo este tipo de instrumentos, en caso contrario se genera cartografía de la zona con un solo valor.

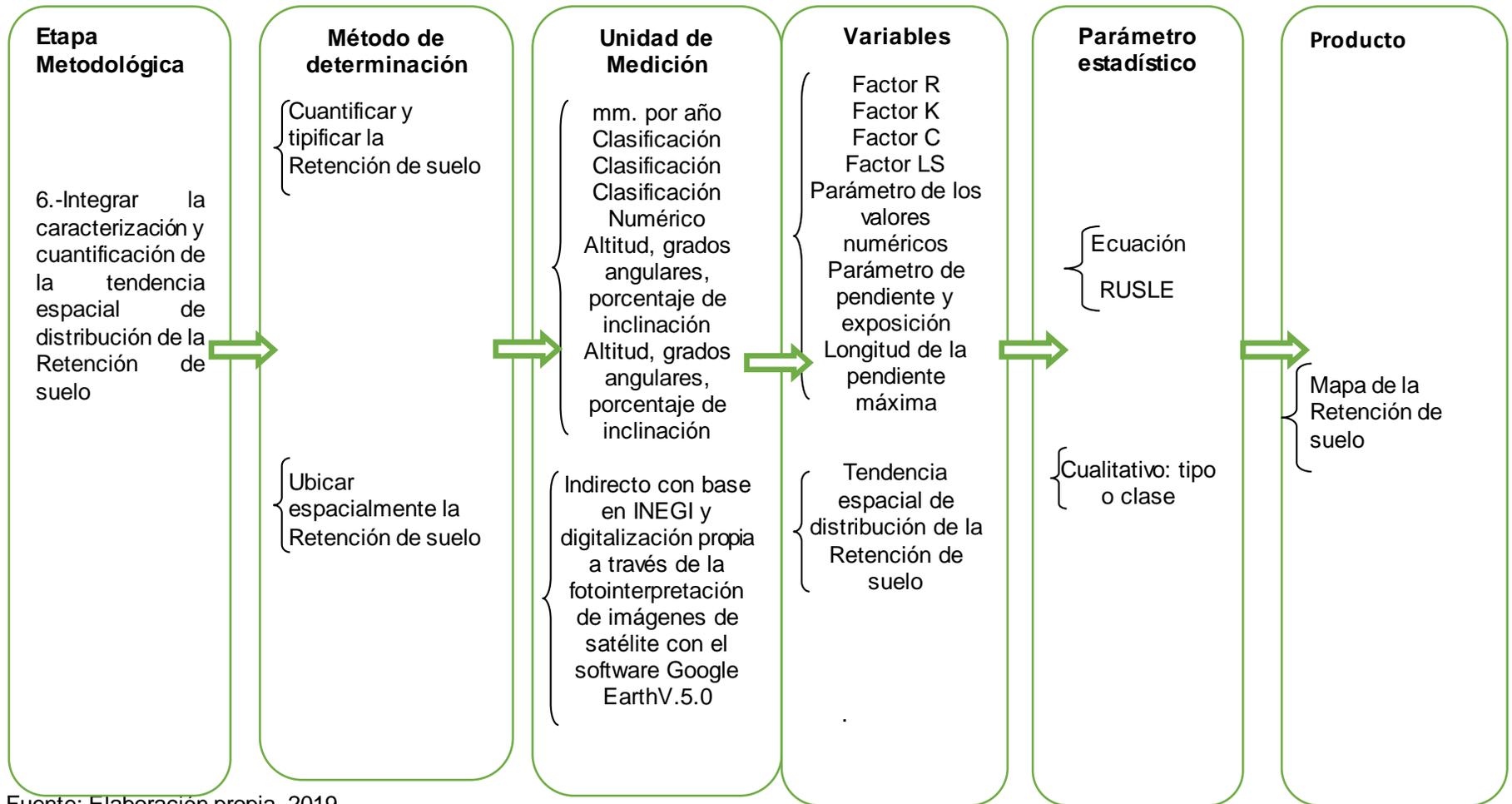
Parámetros de los valores numéricos: se emplearán subunidades territoriales donde se toma en cuenta el área y la resolución del píxel.

Parámetros de pendiente y exposición. Se elaboraron con base en las subunidades territoriales empleando diferentes módulos (aspect, slope).

Longitud de la pendiente máxima: se obtendrán multiplicando el valor del tamaño del píxel por un factor numérico. Para obtener el resultado final son multiplicados los factores anteriores con la finalidad de definir la tasa de erosión en corto tiempo.

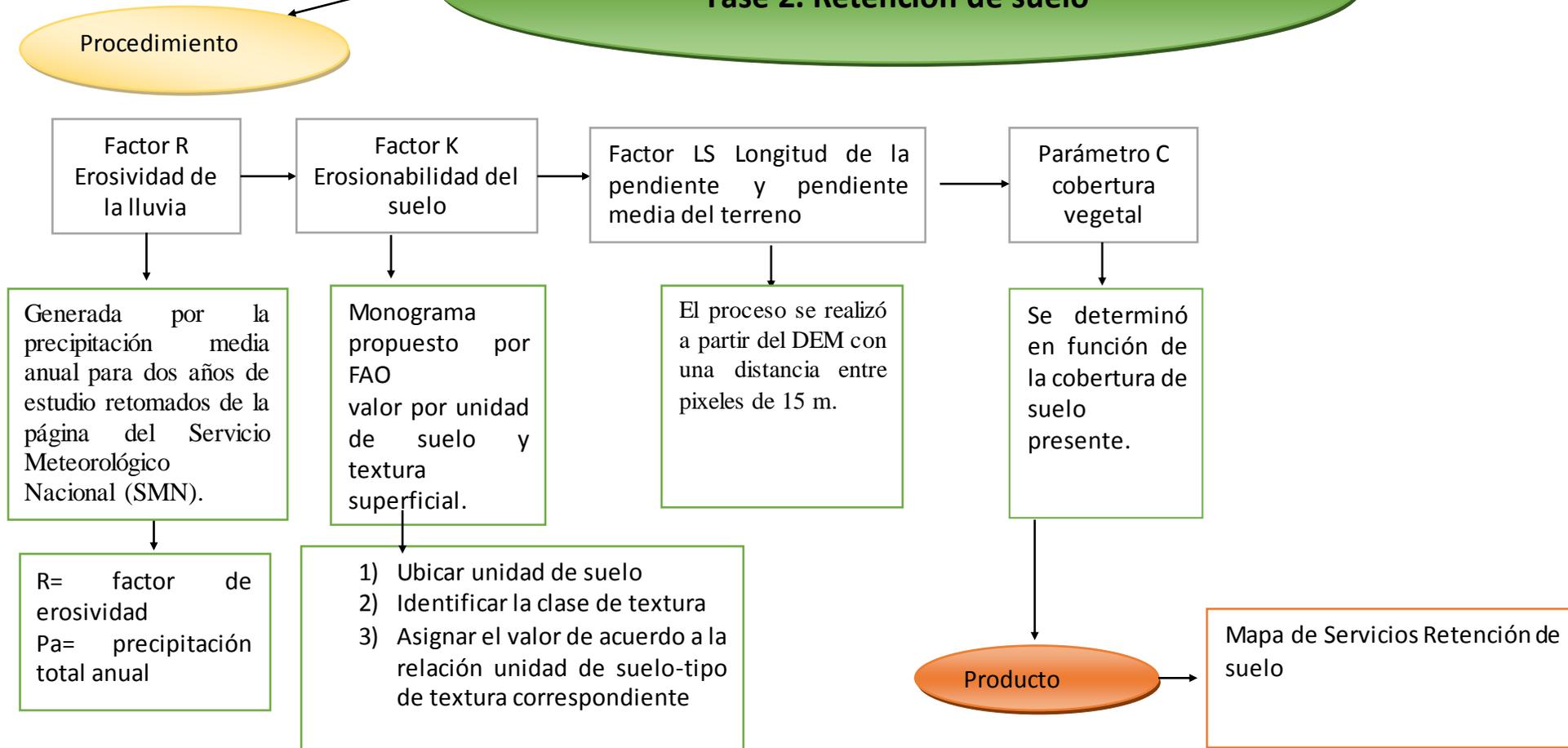
A continuación, se explica la segunda etapa metodológica, ver (Figura 15 y diagrama, 4)

Figura 15. Segunda etapa metodológica 2.2 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Retención de suelo



Fuente: Elaboración propia, 2019

Diagrama 4. Segunda Etapa Metodológica Fase 2. Retención de suelo



Fuente: Elaboración propia, 2019

2.2.3 Análisis espaciotemporal de la recarga de acuíferos

Para conocer la importancia que tiene el Parque Otomí – Mexica como zona de recarga del acuífero y regulación ecosistemas se estimó el volumen anual de agua (m^3) que escurre y se infiltra, comparando áreas dentro y fuera del área natural protegida, para las cuales se generó su polígono respectivo. Para el cálculo se utilizaron los promedios medios anuales reportados en el área.

Se usó la metodología del balance hídrico –ecuaciones propuesta por Llerena (2003).

$$P = Q + ET$$

donde:

P = Precipitación (m^3)

Q = Escurrimiento (m^3)

ET = Evapotranspiración (m^3)

2.2.3.1 Estimación de la Precipitación

La estimación del volumen anual precipitado se realizó mediante álgebra de mapas en el sistema de información geográfica (SIG) ArcMap 10.4, con base en las ecuaciones propuestas por Aparicio (2009) para datos de precipitación media anual (ecuación 4).

$$VP = P * AP$$

donde:

VP = Volumen anual de precipitación (m^3)

P = Precipitación media anual (m^3)

AP = Área del parque (m^2)

Para determinar VP se ubicaron las estaciones climatológicas del área de estudio con medias mensuales y anuales de precipitación y temperatura. Se interpolan los valores anuales de precipitación (m) para obtener un raster que refleja el

comportamiento promedio de la precipitación del área de estudio. El cálculo del volumen de lluvia se obtiene a partir del raster precipitación multiplicada por el área del parque, tanto dentro como fuera del área natural protegida para obtener las Precipitación Pluvial. Posteriormente se realiza una interpolación con los valores anuales de temperatura °C para obtener un raster que refleje las áreas homogéneas con las mismas temperaturas del área de estudio, para obtener la Temperatura Media Anual.

Estimación del Volumen de Evapotranspiración

El volumen anual de evapotranspiración, se obtuvo con la ecuación.

$$ET = AP * ETR$$

donde:

ET =Volumen evapotranspirado (m³)

AP = Área del parque (m²)

ETR= Evapotranspiración anual real (m)

Para fines prácticos la determinación de la evapotranspiración anual real se utilizó el método de Turc, quien propone una fórmula simple en función de la precipitación y la temperatura del lugar de estudio (ecuación 11).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + (P/L)^2}}$$

donde:

ETR= Evapotranspiración anual real (m)

P = Precipitación media anual (m³)

L = Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación.

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^3$$

donde:

P = Precipitación media anual (mm)

T = Temperatura media anual (°C)

El último paso es dividir la Precipitación Pluvial entre la evapotranspiración anual real.

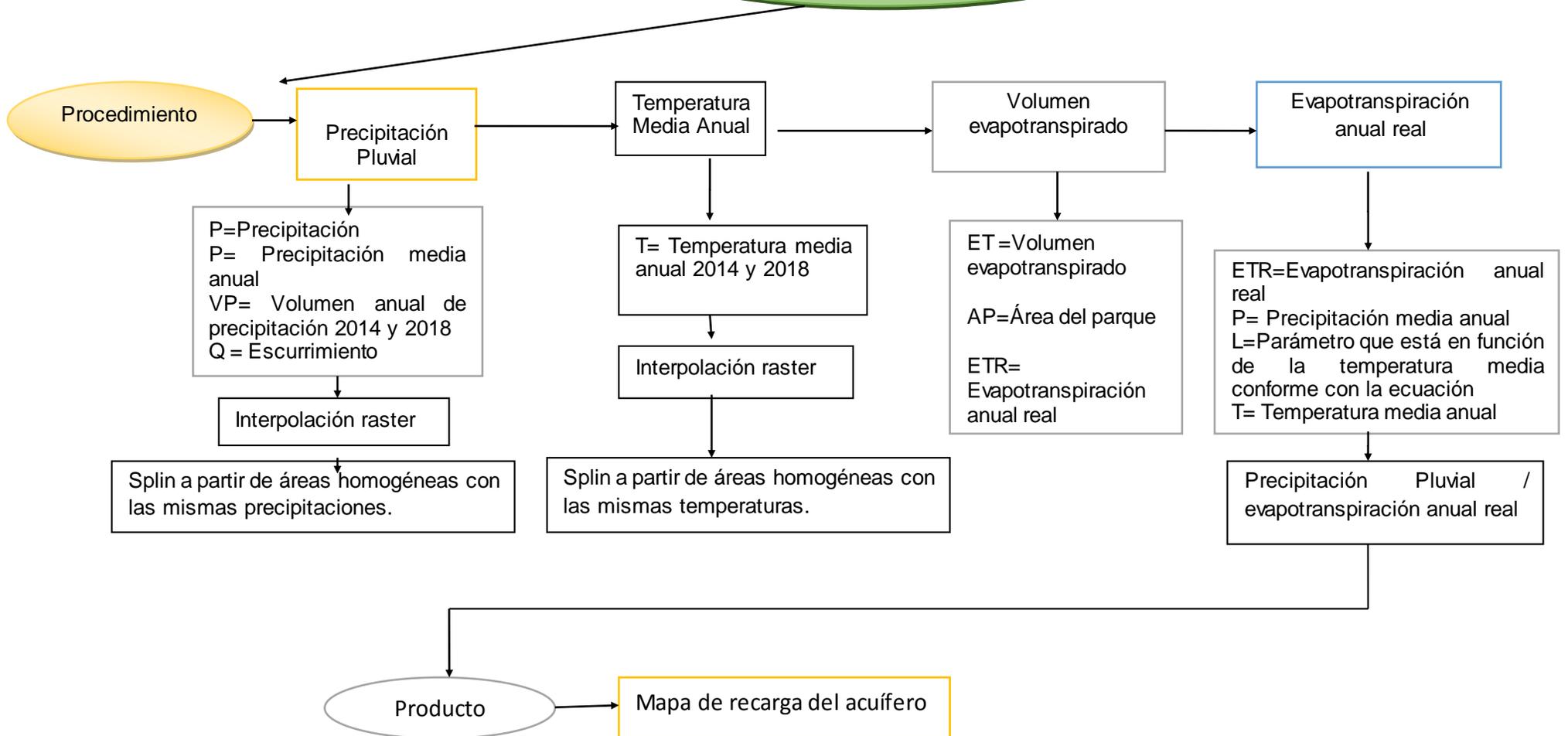
A continuación, se presenta la explicación de la segunda etapa metodológica , ver (Figura 16 y diagrama, 5).

Figura 16. Segunda etapa metodológica 2.3 Integración de la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Recarga del acuífero

Etapa Metodológica	Método de determinación	Unidad de Medición	Variables	Parámetro estadístico	Producto
7.-Integrar la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Recarga del acuífero	Fotointerpretar cartográficamente y cuantificar la Recarga del acuífero	m^3 m^3 C° m^3 m^2 m	<p>P=Precipitación Q=Escurrimiento</p> <p>ET=Evapotranspiración</p> <p>T= Temperatura media anual 2014 y 2018</p> <p>VP =Volumen anual de la precipitación</p> <p>P= Precipitación media anual</p> <p>AP=Área del parque</p> <p>ET=Volumen evapotranspirado</p> <p>AP= Área del parque</p> <p>ETR= Evapotranspiración anual real</p> <p>P= Precipitación media anual</p> <p>L=Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación</p>	<p>Precipitación Pluvial</p> <p>Temperatura Media Anual</p> <p>Volumen anual de la precipitación</p> <p>Evapotranspiración anual real</p>	<p>Mapa de la Retención de suelo</p>

Fuente: Elaboración propia con base en Castro M. *et al.* (2016)

Diagrama 5. Segunda Etapa Metodológica Fase 3. Recarga del acuífero



Fuente: Elaboración propia, con base en Castro M., *et al.* (2016)

2.3 Tercera etapa metodológica. Modelación de los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos.

La siguiente investigación se realizó en el software SPSS, una de las razones más importantes para realizar el análisis de las series temporales es prever los valores futuros de la serie. Un modelo de la serie explicó los valores pasados también se pronosticó si aumentará o disminuirá en los próximos valores y en qué medida lo hará. Cada campo de serie temporal contiene los datos para una sola serie temporal. Es la estructura tradicional de los datos de serie temporal, tal como se utiliza en el procedimiento del modelador de series temporales, el procedimiento de descomposición estacional y el procedimiento de diagramas espectrales. Por ejemplo, para definir una serie temporal en el Editor de datos, en la pestaña vista de variables e introdujo un nombre de variable en cualquier fila vacía. Cada observación de una serie temporal corresponde con un caso (una fila del Editor de datos). Si abre una hoja de cálculo que contiene datos de series temporales, cada serie se deberá organizar en una columna en la hoja de cálculo.

Prospectiva y modelado

Prospectiva es una actuación crítica y creativa, caracterizada por plantear opciones o alternativas de solución a los problemas suscitados por una situación.

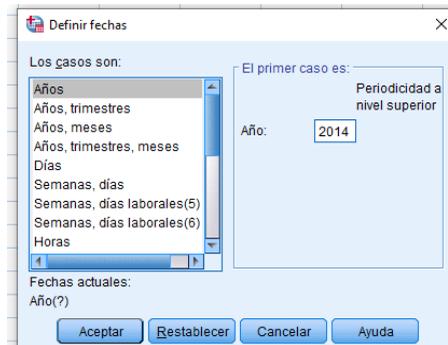
La siguiente investigación se realizó en el software SPSS Statistical Package for Social Sciences Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales, el análisis de las series temporales de cada servicio ecosistémico de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero fue prever los valores futuros de la serie. En el cual se explica en el apartado de resultados si aumentarán o disminuirán los servicios ecosistémicos y en qué medida lo harán.

El modelo debe cumplir ciertos criterios: *Que la r^2 se acerque a "1", que no sean números negativos y que no tienda a "0"

2.3.1 Definir fecha, para el año 2014

En el menú Datos genera las variables de fecha que se utilizan para establecer la periodicidad y para distinguir entre periodos históricos, de validación y de predicción. Predicciones está diseñado para trabajar con las variables creadas por el procedimiento Definir fechas, (figura, 17)

Figura 17. Definir fecha, para el año 2014

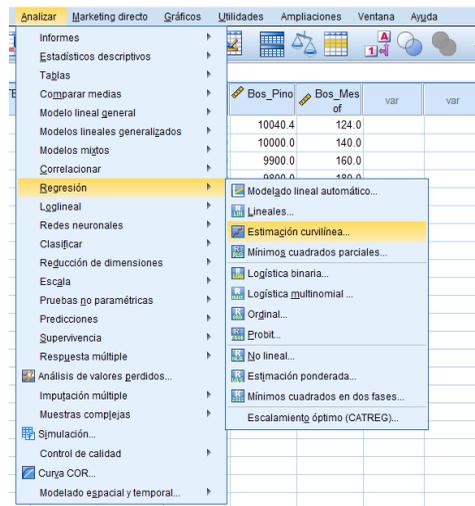


Fuente: Elaboración propia con base en el software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

2.3.2 Seleccionar Analizar → regresión → Estimación curvilínea para analizar la serie de tiempo para el año 2014.

En el contexto del modelado causal temporal, el término causal hace referencia a la causalidad Granger. En una serie temporal X se indica que la "causa Granger" provoca otra serie temporal Y si realiza una regresión para Y en términos de valores pasados de ambos resultados, X - Y, en un modelo mejor para Y que realiza una regresión solo en los valores pasados en Y, (figura, 18).

Figura 18. Seleccionar Analizar regresión estimación curvilínea para el año 2014

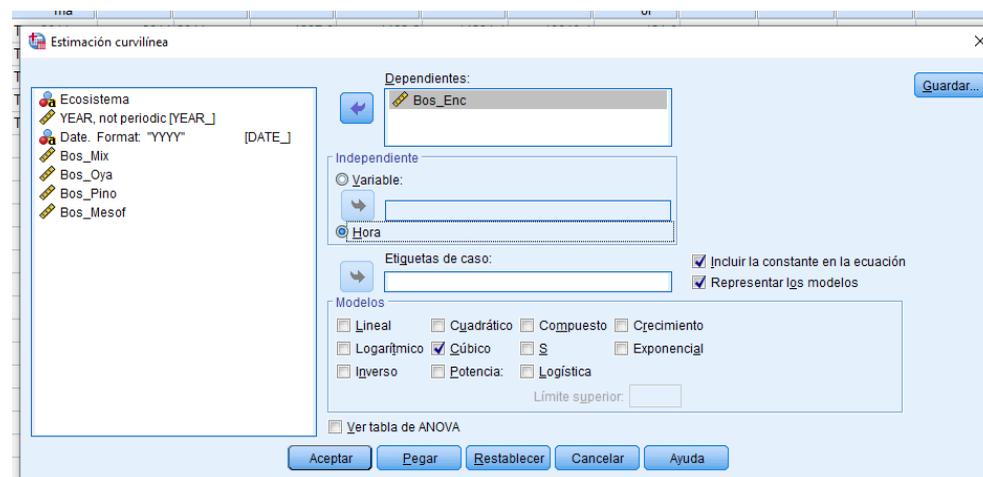


Fuente: Elaboración propia con base en el software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

2.3.3 Seleccionar variable dependiente y seleccionar modelos por Servicio Ecosistémicos.

La variable dependiente en este caso es una serie temporal, lo que significa que cada caso representa un punto del tiempo, los casos son consecutivos separados por un intervalo de tiempo constante. Posteriormente al seleccionar el modelo crea modelos de series temporales y genera predicciones, (figura, 19).

Figura 19. Seleccionar variable dependiente por Servicios Ecosistémicos.



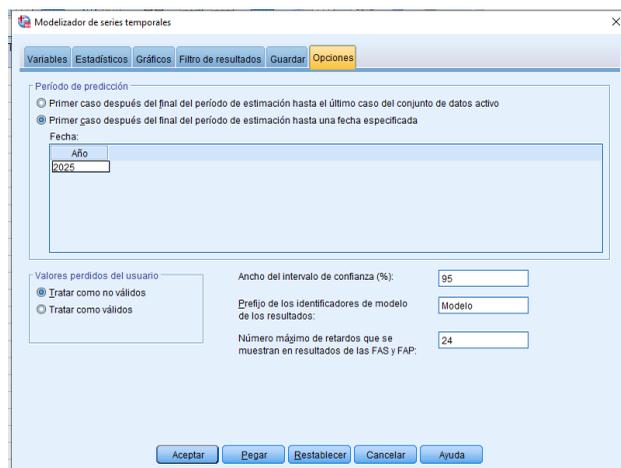
Fuente: Elaboración propia con base en el software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Los modelos que se presenta de regresión son nueve tipos: cúbico, compuesto, exponencial, cuadrático, crecimiento, lineal, inverso, logarítmico, potencia, cada uno es diferente y esto es porque cuentan con una velocidad de ritmo diferente, para dicho estudio se tomara en cuenta el modelo cúbico porque es el que se acerca más al R cuadrado 1 el cual indica que es el modelo adecuado para cada ecosistema.

El período de estimación define el conjunto de casos utilizados para volver a estimar los parámetros del modelo. De forma predeterminada, el período de estimación incluye todos los casos del conjunto de datos activo. Para establecer el periodo de estimación, seleccione basándose en el rango del tiempo o de los casos en el cuadro de diálogo Seleccionar casos. Según los datos disponibles, el período de estimación utilizado por el procedimiento puede variar según el modelo y, por consiguiente, ser distinto del valor mostrado. Para un modelo determinado, el período de estimación real es el período restante tras eliminar de todos los valores perdidos contiguos, de la variable dependiente del modelo, que aparecen al principio o al final del período especificado.

Los pasos a seguir son los siguientes: analizar, predicciones, crear modelos tradicionales, en la variable dependiente se selecciona el ecosistema, en el apartado de opciones colocar el año final del período de estimación (figura, 20).

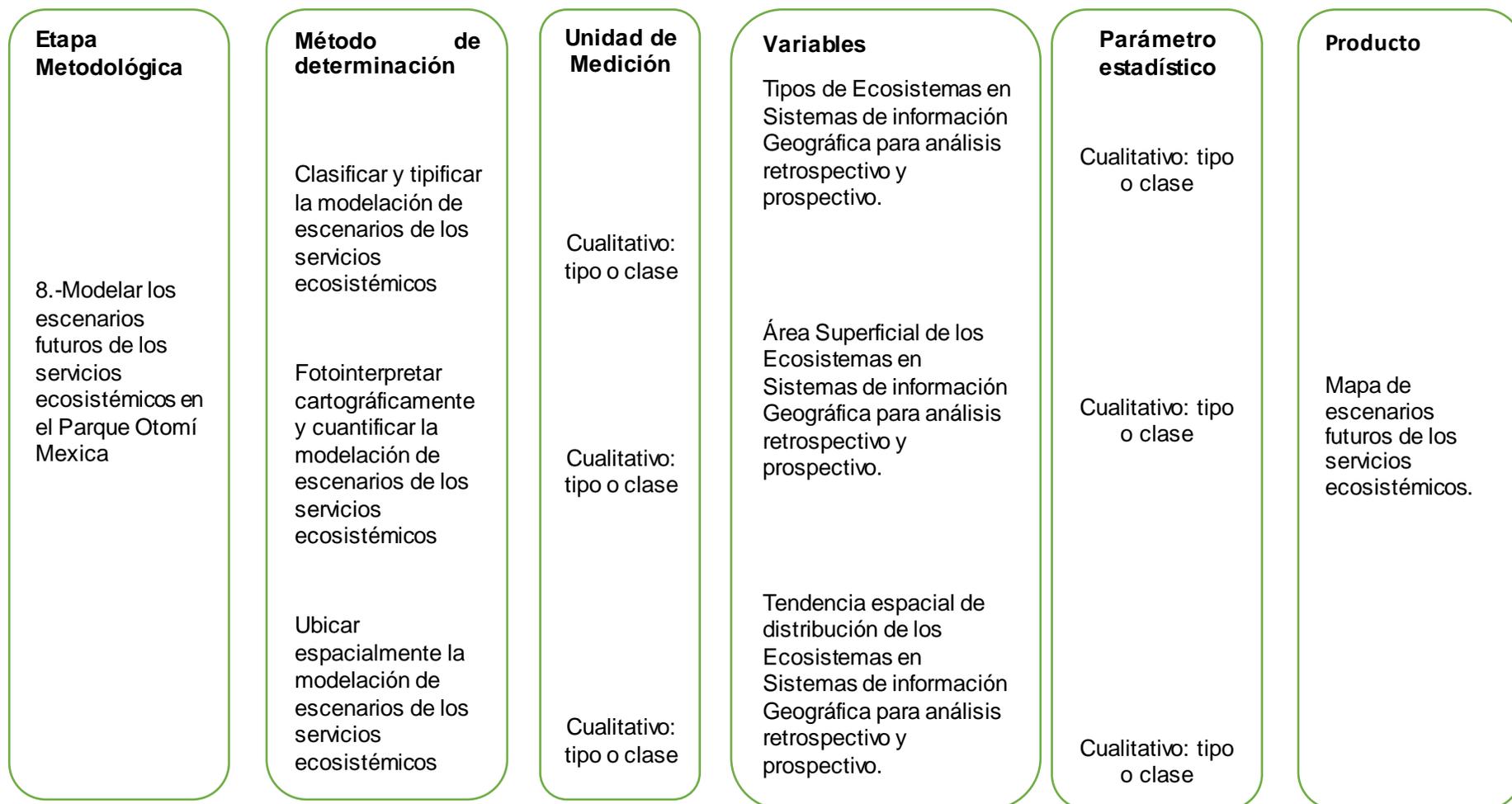
Figura 20. Modelador de series temporales



Fuente: Elaboración propia con base en el software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

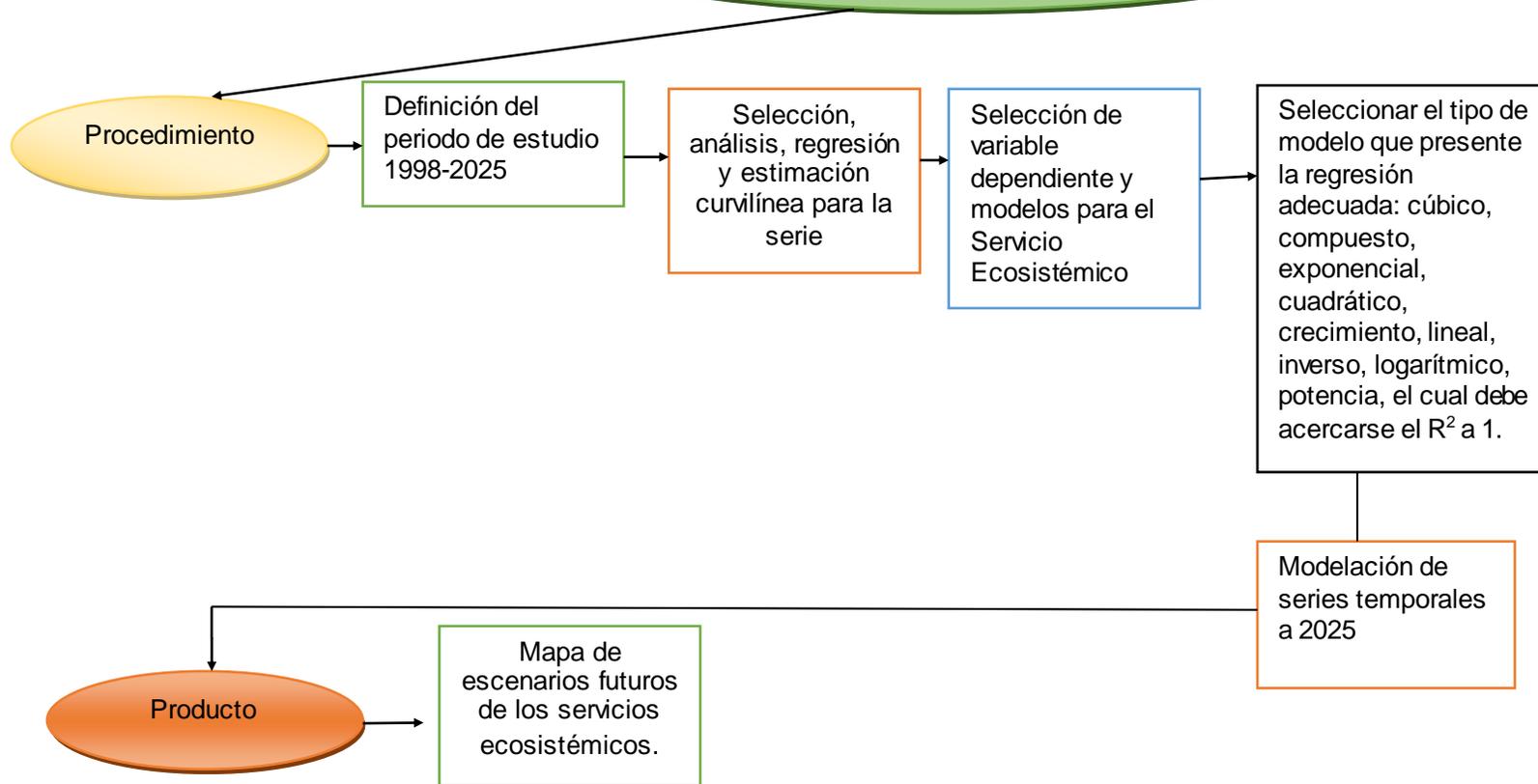
A continuación, se muestra la tercera etapa metodológica, ver (figura, 21 y diagrama 6)

Figura 21. Tercera etapa metodológica. Modelación de los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica



Fuente: Elaboración propia, 2019

Diagrama 6. Tercera etapa metodológica. Escenarios futuros de los Servicios Ecosistémicos



Fuente: Elaboración propia, 2019

2.4 Cuarta etapa metodológica. Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.

En la última etapa el método será teórico y metodológico. Las variables a analizar son nominales, ordinales, dependientes estadísticos, independientes. Lo que permitirá la construcción de la propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.

2.4.1 Componentes teóricos de la propuesta

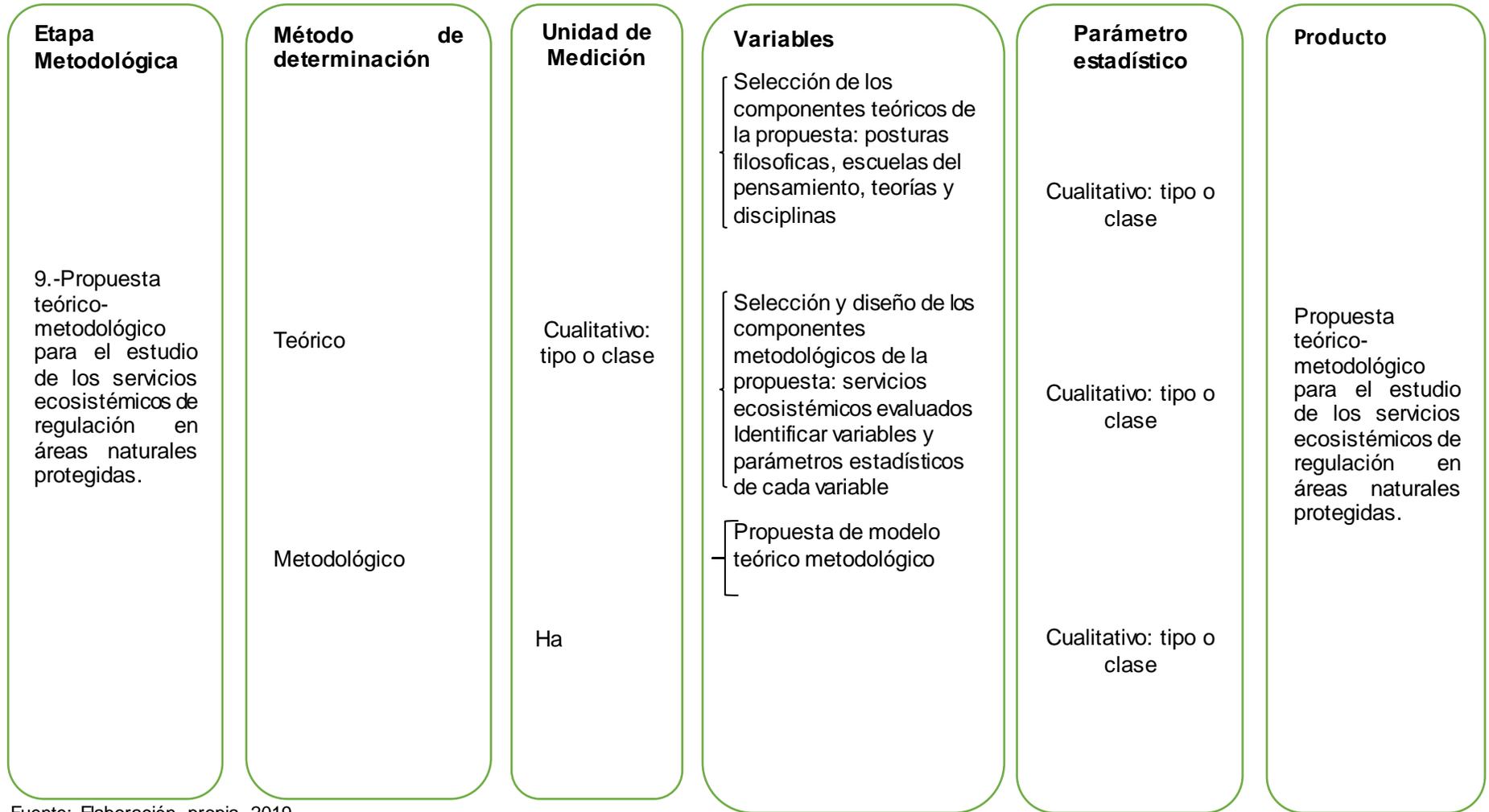
La propuesta teórica está integrada a partir de los siguientes componentes teóricos: postura filosófica del estoicismo, escuela del pensamiento ecológico, teorías y disciplinas.

2.4.2 Componentes metodológicos de la propuesta

La propuesta metodológica se integró a partir de los siguientes componentes metodológicos: servicios ecosistémicos evaluados, identificación de variables y parámetros estadísticos de cada variable. Propuesta de modelo teórico metodológico. El método que se aplicó es: clasificar - tipificar, cuantificar – fotointerpretación y ubicar espacialmente.

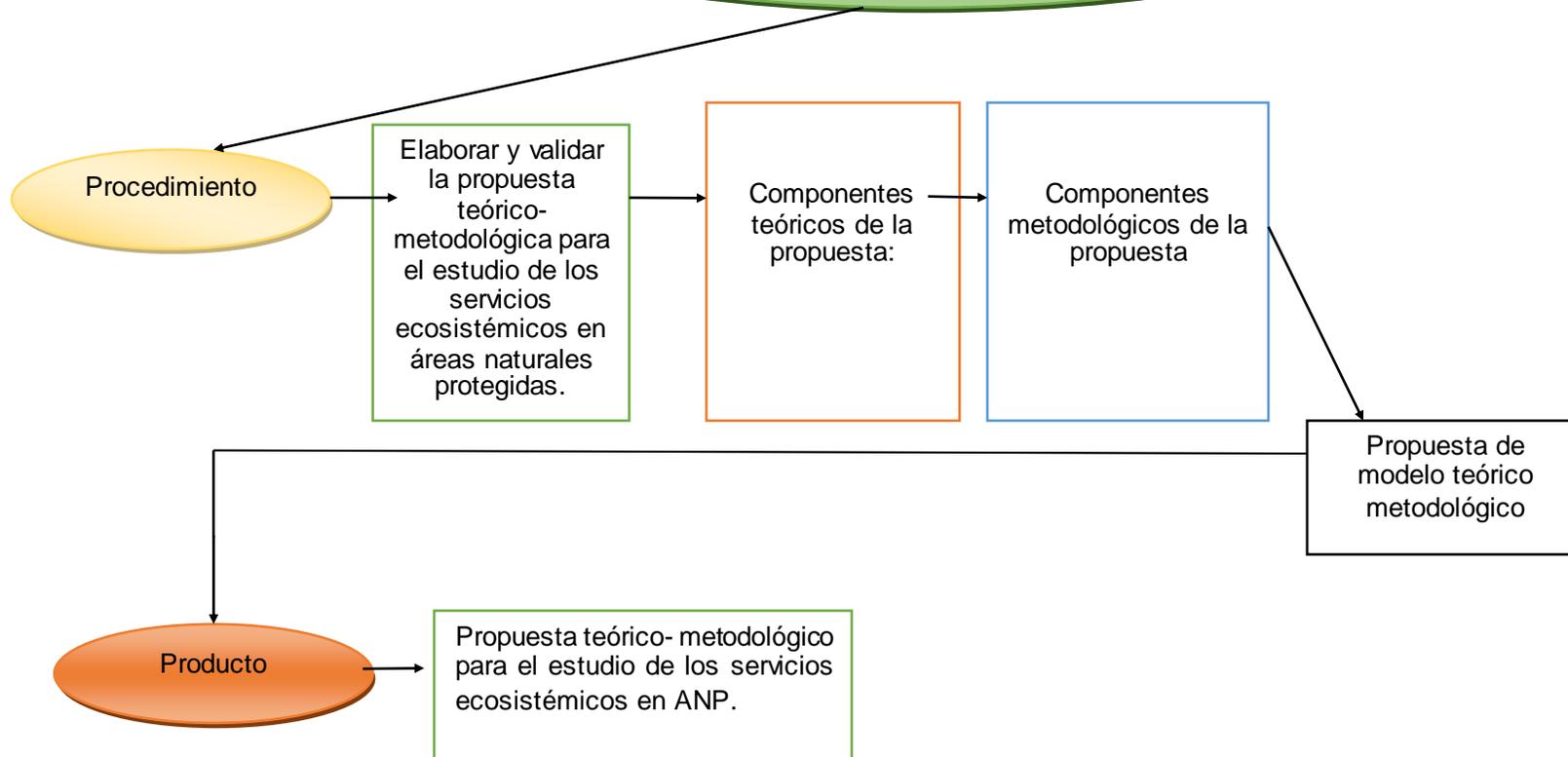
A continuación, se muestra la cuarta etapa metodológica, ver (Figura, 22 y diagrama 7).

Figura 22. Cuarta etapa metodológica. Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.



Fuente: Elaboración propia, 2019

Diagrama 7. Cuarta Etapa Metodológica. Propuesta teórico - metodológico



Fuente: Elaboración propia, 2019

Tercer Capítulo

Resultados

y Discusión

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

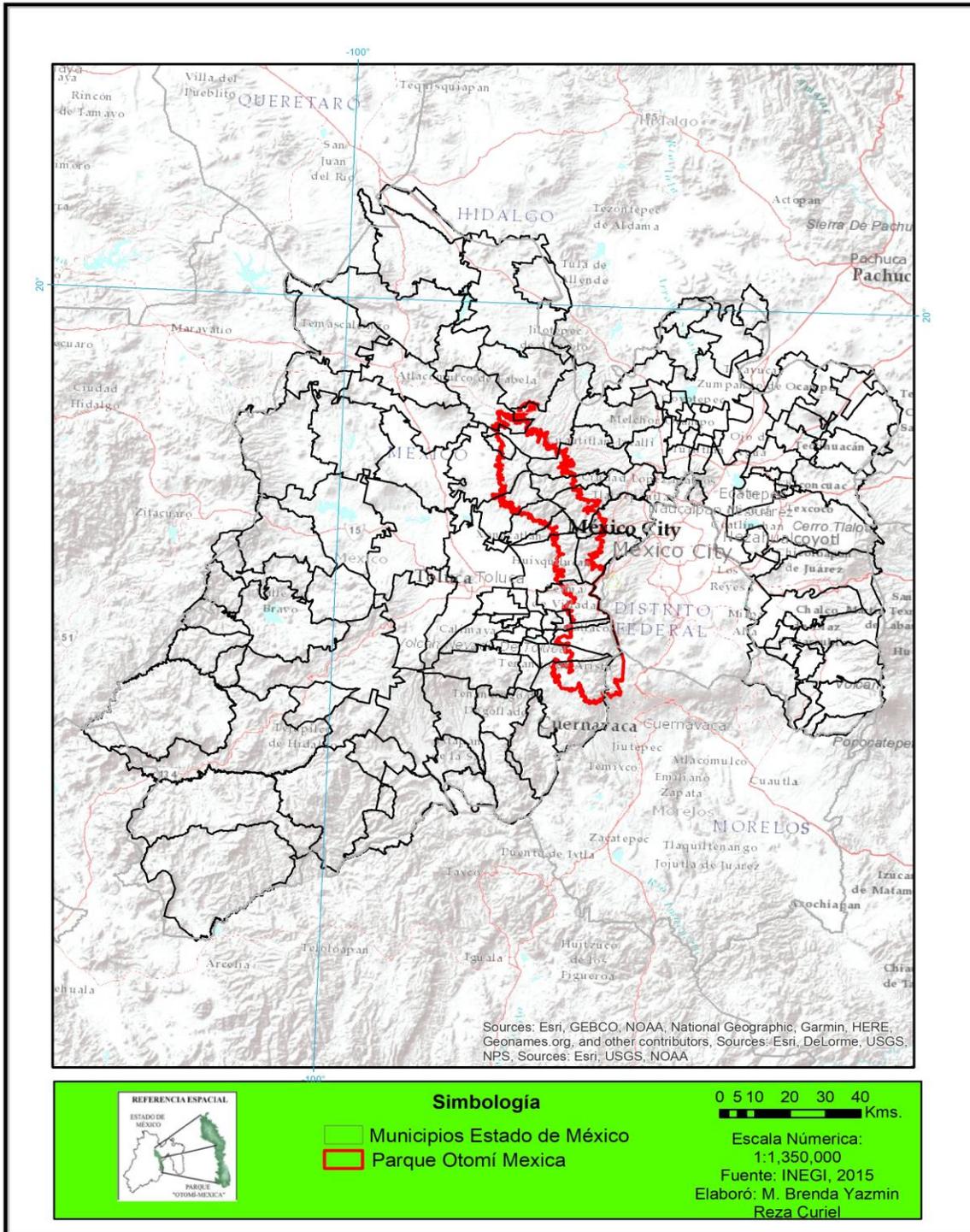
3.1 Características Geográficas y Ambientales en el Parque Otomí Mexica.

El Parque Otomí – Mexica Estado de México, está ubicado en el contexto geográfico del centro de México, donde convergen, la Zona Metropolitana del Valle de México, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y la Zona Metropolitana de Cuernavaca. Sus coordenadas geográficas extremas son: 18° 59' 59.57" - 19° 45' 19.34" de latitud norte y 99° 20' 21.75" - 99° 32' 01.41" de longitud oeste.

Tiene una superficie aproximada de 105, 875 hectáreas, que se encuentran distribuidas espacialmente en 17 municipios¹ del Estado de México: Chapa de Mota, Huixquilucan, Isidro Fabela, Jilotzingo, Jiquipilco, Lerma, Naucalpan, Nicolás Romero, Ocoyoacac, Ocuilan, Otzolotepec, Morelos, Temoaya, Tianguistenco, Villa del Carbón, Xalatlaco y Xonacatlán, (Juan *et al.*, 2017). Este Parque se ubica arriba de la cota 2800 metros sobre el nivel del mar, GEM, (1980), ver (Figura, 23).

¹ De los 17 municipios que integran el Parque Otomí Mexica en algunos casos solamente son porciones.

Figura 23. Mapa de Ubicación Geográfica del Parque Otomí – Mexica del Estado de México.



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, (2015)

El Parque Otomí Mexica, al estar situado en una zona de transición ecológica, entre las regiones biogeográfica Neártica y Neotropical, alberga una composición ecológica que concentra una gran biodiversidad con numerosas especies vegetales y animales, en relación con su extensión territorial, se pueden encontrar ecosistemas característicos de zonas boreales como bosque de coníferas, bosques de niebla o mesófilos, bosques templados y matorrales asociados (Soberón et al., 2008 en Villegas 2020). A continuación, se muestran las localidades ubicadas en el contexto del Parque Otomí-Mexica, Estado de México. (Tabla, 5).

Tabla 5. Localidades ubicadas en el contexto del Parque Otomí – Mexica, Estado de México.

Municipios	Localidades
Capulhuac	Capulhuac No se ubica ninguna localidad.
Huixquilucan	Agua Blanca, Bosques del Torreón, Colonia Glorieta, El Guarda, El Hielo, El Laurel, El Palacio, General Ignacio Allende, La Cañada, Piedra Grande, San Juan Yautepec, San José Huiloteapan y Santa Cruz Ayotuxco.
Isidro Fabela	Cashte, Colonia de la Palma, Colonia La Aurora, Endeguido, Las Canoitas (Presa Iturbide), R. Las Palomas (Los Techos), Tlazala de Fabela, Agua Bendita, Cerro de San Pablo, Dongú, Engoxte, La Cumbre, La Esperanza, Las Palomas 2, Loma del Río, Organillos, Ampliación Ejido Palma (Ejido San Francisco) , Xitoxi.
Jilotzingo	Dangu, Damoshu, Doditay, Doro, El Calvario, Santa Ana Jilotzingo, El Cerro (San Miguel Tecpan), La Cruz (Santa María Mazatla), Loma de la Huerta (San Miguel Tecpan), San José de las Manzanas, Quishiguada (Santa Ana Jilotzingo), San Miguel Tecpan y Santa María Mazatla.
Jiquipilco	2ª. Manzana y Las Palomitas (Puerto Juquipilli).
Lerma	Cañada de Alférez, Colonia Guadalupe Victoria, Colonia López Mateos, La Concepción Xochicautla, La Unidad Huitzizilapan, Las Mesas Huitzizilapan, Salazar, San Agustín Huitzizilapan, San Martín Huitzizilapan (Las Rajas), Santa Cruz Huitzizilapan y Zacamulpa Huitzizilapan.
Naucalpan	Campestre, San Francisco Chimalpa y Villa Alpina.
Nicolás Romero	Transfiguración.
Ocoyoacac	Cañada Honda, El Peñón, El Portezuelo, El Zarco, Joquicingo, La Conchita, La Marquesa, San Pedro Atlapulco, La Era, Presa Salazar, Santa María Coaxusco, Valle del Conejo y Valle del Silencio.

Ocuilan	Coyoltepec, La Esperanza y Santa Martha.
Otzolotepec	El Hosco (Rancho El Hosco), El Capulín (Santa Ana Jilotzingo), El Caño Grande, La Capilla, La Trampa (Rhanguadi), La Presa y Santa Ana Jilotzingo.
Morelos	San José El Quelite, San Sebastián Buenos Aires y Santa Clara de Juárez.
Temoaya	Adolfo López Mateos, Centro Ceremonial Otomí, El Laurel 1ª. Sección, El Laurel 2ª. Sección, Enthavi 1ª. Sección, Enthavi 2ª. Sección, Enthavi 3ª. Sección, Jiquipilco El Viejo 2ª. Sección, Jiquipilco El Viejo Centro, Luis Donaldo Colosio Murrieta, La Cañada, San Pedro Arriba 1ª. Sección, San Pedro Arriba 2ª. Sección, San Pedro Arriba 3ª. Sección, San Pedro Arriba 4ª. Sección, San Pedro Arriba 5ª. Sección, Solalpan 2ª. Sección, Taltenanguito y Vista Hermosa.
Tiangüstenco	Chiquilpa (Chiquixpac), Chiquixpac II Sección, El Apilulco, La Lagunilla, La Magdalena de los Reyes, Techmaninalli, Tlaltezuntle y Tzitzicazapa.
Villa del Carbón	El Varal, La Esperanza, Las Vigas, Llano Grande, Los Barbechos, Monte de Peña y San Isidro del Bosque.
Xalatlaco	Coexapa, Cruz Larga, El Aguila, El Potrero, El Yete, Escalerillas (Barrio San Francisco), Los Tejocotes, La Mesa (El Águila), Morelos (Unidad Morelos), San Francisco Chimalpa, San Juan Tomasquillo (La Herradura) y Techichili.
Xonacatlán	Barrio de Guadalupe, El Rancho, Comunidad Murillos, Cumbre de dos Caminos, Loma Bonita, La Gonda, San Juan El Potrero (El Potrero), San Pedro (Barrio San Pedro Mimiapan), Santa Cruz, Tenería (Barrio Tenería) y Santiago Tejocotillos.

Fuente: Elaboración propia con base en Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Otomí - Mexica (2009) en Juan *et al.*, (2017)

Debido a su ubicación geográfica y el relieve accidentado que se presenta a lo largo del Parque Otomí-Mexica, producto de los procesos geológico-volcánicos, estructurales y morfodinámicas de la región central de México, se ubican diversas estructuras geomorfológicas: sierra de escudo-volcanes con mesetas, sierra volcánica con estratovolcanes o estratovolcanes aislados, llanuras de vaso lacustre de piso rocoso o cementado, lomeríos de tobas, sierras complejas, y sierra de escudo - volcanes. La litología está constituida principalmente por rocas ígneas extrusivas como: andesitas, basaltos, tobas básicas y brechas volcánicas básicas (Juan *et al.*, 2017).

El análisis realizado a partir de una división natural de las subcuencas tributarias; y de acuerdo con lo establecido en el (Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Otomí – Mexica; 2009 en Juan *et al.*, 2017) se estima que anualmente escurren 221.16 mm³ en el territorio del Parque Estatal Otomí-Mexica. Las corrientes perennes se distribuyen a lo largo de todo el ANP, se concentran en la zona norte y están fraccionadas por subcuencas tributarias. Las corrientes intermitentes están presentes en todo el territorio del ANP, debido a que los escurrimientos tienden a modificar su trayectoria adecuándose al relieve del terreno.

La hidrología subterránea se encuentra determinada por los componentes geológicos y edafológicos que caracterizan al Parque Estatal Otomí – Mexica. La infiltración es de 58.2 mm³, cifra que representa el 5% del total de lluvia anual. La infraestructura hidráulica en el territorio que comprende el Parque Otomí Mexica, uno de los componentes importantes es el recurso agua y su manejo, por lo que, existen 207.2 km de acueductos distribuidos en distintos ambientes, de los cuales 95% (196.6 km) son subterráneos y se localizan principalmente en los municipios de Lerma y Huixquilucan, mientras que 5% (10.6 km) son superficiales, (Tabla, 6).

Tabla 6. Corrientes perennes dentro del Parque Estatal Otomí-Mexica, Estado de México.

Subcuenca tributaria	Nombre de la corriente
1. Presa Antonio Alzate	Nepeni
2. Arroyo El Pescado	La Ciénega La Ceniza
3. Presa Madín	San Luis El Silencio Córdoba
4. Río de los Remedios	Ojo de Agua Canaleja San Juan

	Pe de Santo
5. Río San Lorenzo	San Lorenzo Arroyo Seco San Mateo Dando Camalero México
6. Arroyo Sila, Presa el Jabalí	La Garita Malacota San Bartolo Bomini
7. Ciénega de Almoloya del Río	Tlajipehualapa Cacalapa Huayatlaco
8. Presa Guadalupe	Las Palomas Tecuane Cuautitlán El Mogogo Santa Ana Xinte Navarrete
9. Río Tepeji	La Piedra Arroyo Verde La Esperanza San Jerónimo Los Sabios El Oro La Zanja
10. Río Arroyo Muerto	Salazar

	Arroyo México Arroyo Muerto El Potrero Agua Chica Agua de Pájaros Agua de Cadena Los Ailes
11. Zempoala, Río Tembembe	El Pocito Arroyo Chico Rincón Las Trancas Zanjastenco
12. Río Mayorazgo	Agua Blanca Tres Ojuelos Los Ajolotes El Llanito La Vega Bernal Valdez Mayorazgo Navarrete El Conejo Dos Ríos Salto del Agua

Fuente: Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Otomí - Mexica (2009) en Juan *et al.*, (2017).

La hidrología superficial se determinó principalmente por corrientes perennes con una longitud aproximada de 1,599 kilómetros, las corrientes intermitentes con un total de 231 kilómetros, que sumadas dan un total de 1,830 kilómetros; así como de manantiales que afloran en diferentes puntos del parque. De acuerdo con el

Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal “Otomí-Mexica” (2009), se estima que anualmente escurren aproximadamente 221.16 mm³ en el territorio del parque, que abastecen de forma directa a los mantos freáticos del Valle de México y Toluca. (Juan *et al.*, 2017).

La Hidrología del área de estudio cuenta con las siguientes regiones hidrológicas: a) Lerma-Santiago (RH12), b) Balsas (RH18) y c) Pánuco (RH26), esto de acuerdo a la nomenclatura de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), ver (figura, 24). Las corrientes perennes se encuentran distribuidas a lo largo del territorio, pero especialmente en la zona norte destacan por su aglomeración. Las corrientes intermitentes se basan en la geomorfología esto es que los escurrimientos tienden a modificar su trayectoria adecuándose a las condiciones de relieve del terreno (Juan *et al.*, 2017).

Con base en la altitud de los distintos ambientes que conforman el área de estudio y otros componentes geográficos como la latitud y su ubicación, entonces, los climas más representativos son: a) Templado Subhúmedo con lluvias en verano C (w2) (w) y el que más predomina en el parque es b) Semifrío Subhúmedo con lluvias en verano C (E) (w2) (w). La temperatura media anual oscila entre los 8 °C y 10 °C en las porciones montañosas con mayor altitud, el resto del área presenta una temperatura que fluctúa entre 10 °C y 14 °C. (García, 1980 en Juan *et al.*, 2017)

En verano ocurre con mayor frecuencia el régimen de lluvias. La precipitación total anual oscila entre 800 y 1,300 mm. La temperatura mínima oscila en 0° a 3° (figura, 25). La temperatura máxima oscila entre 15° a 18° según datos de INEGI, (2020). Se observa en la (figura, 26).

La litología está constituida por rocas ígneas extrusivas como: andesitas, basaltos, tobas básicas y brecha volcánicas básicas. Las rocas volcánicas y

volcanoclásticas forman parte de la región fisiográfica Eje Neovolcánico y se cree que fueron producidas simultáneamente durante los periodos Terciario Superior y Cuaternario, formando en este último el sistema de fracturas con orientación nortesur, factor asociado con la actividad volcánica ocurrida durante estos periodos. La geología con mayor proporción en el área de estudio es la siguiente: TlpA-Da2 Andesita-Dacita localizada en gran parte como es el centro y sur de color café, TplLh-TA2 Lahar – Toba Andesítica, que se localiza al norte y al noroeste de color beige, QhoA-B5 Andesita Basalto, se localiza al sur de color marrón, (figura, 27).

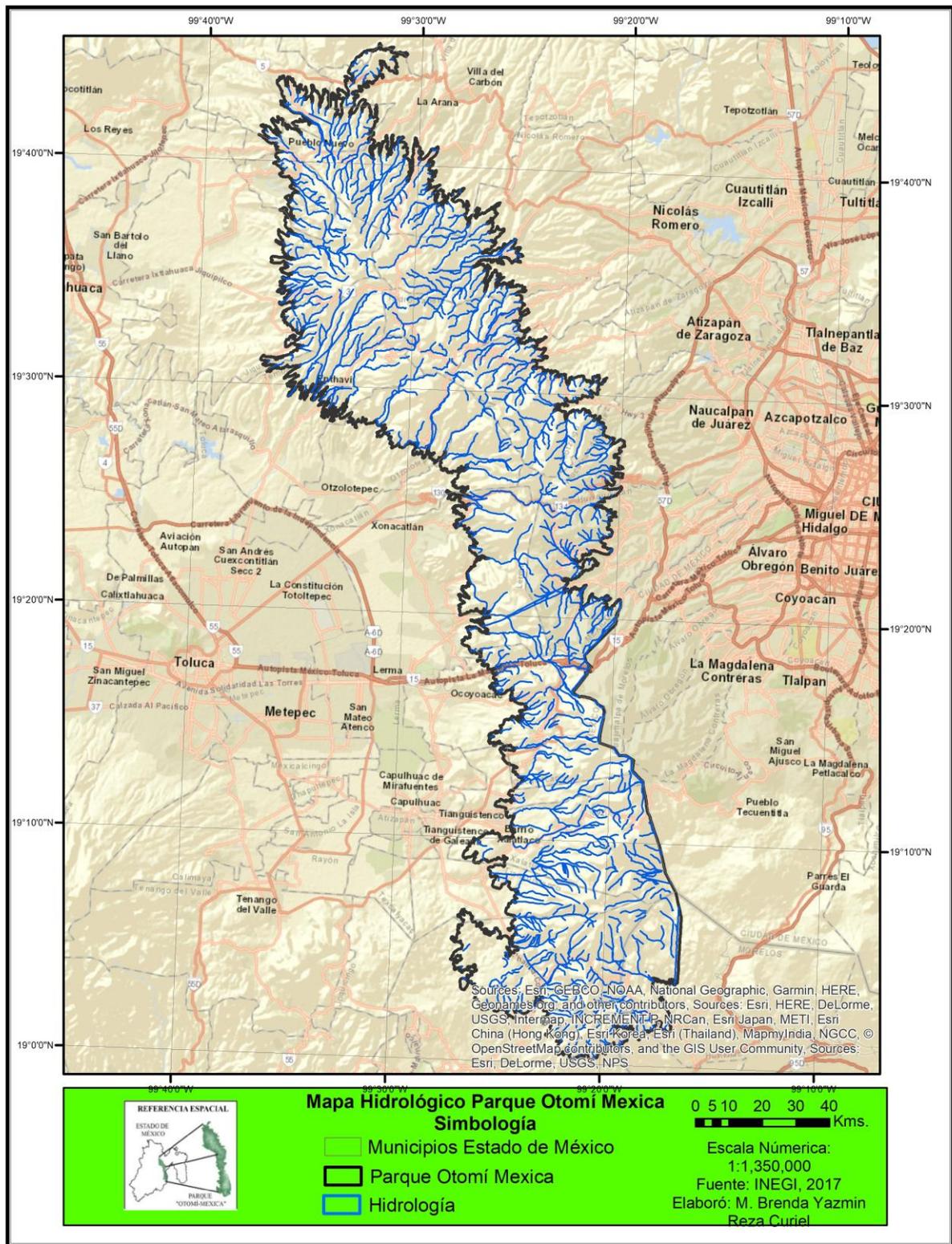
La composición petrográfica de las rocas es variable. Son abundantes los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica (tabla, 9). Además, hay presencia de algunas unidades geológicas conocidas tradicionalmente como basálticas (*EcoCiencia*, 2009 y Juan *et al.*, 2017). La clasificación de Roca del Parque Otomí – Mexica que más predomina es la roca sedimentaria 1.09 hectáreas y las rocas ígneas extrusivas con 104, 874.82 hectáreas y no clasificada 0.09 has. Ver (figura, 28)

Tabla 7. Condiciones geológicas del territorio administrativo Parque Otomí-Mexica del Estado de México

Rocas por su origen	Tipos	Subtipos	
Rocas ígneas	Rocas ígneas intrusivas	Acidas, Intermedias, Básicas	
	Rocas ígneas extrusivas	Acidas, Intermedias, Básicas	
	Rocas piroclásticas	Tobas ácidas	
	Brecha		Brecha volcánica ácida
			Brecha volcánica intermedia
Brecha volcánica básica			
Roca sedimentaria	Clásticas o detríticas. No clásticas o químicas.		

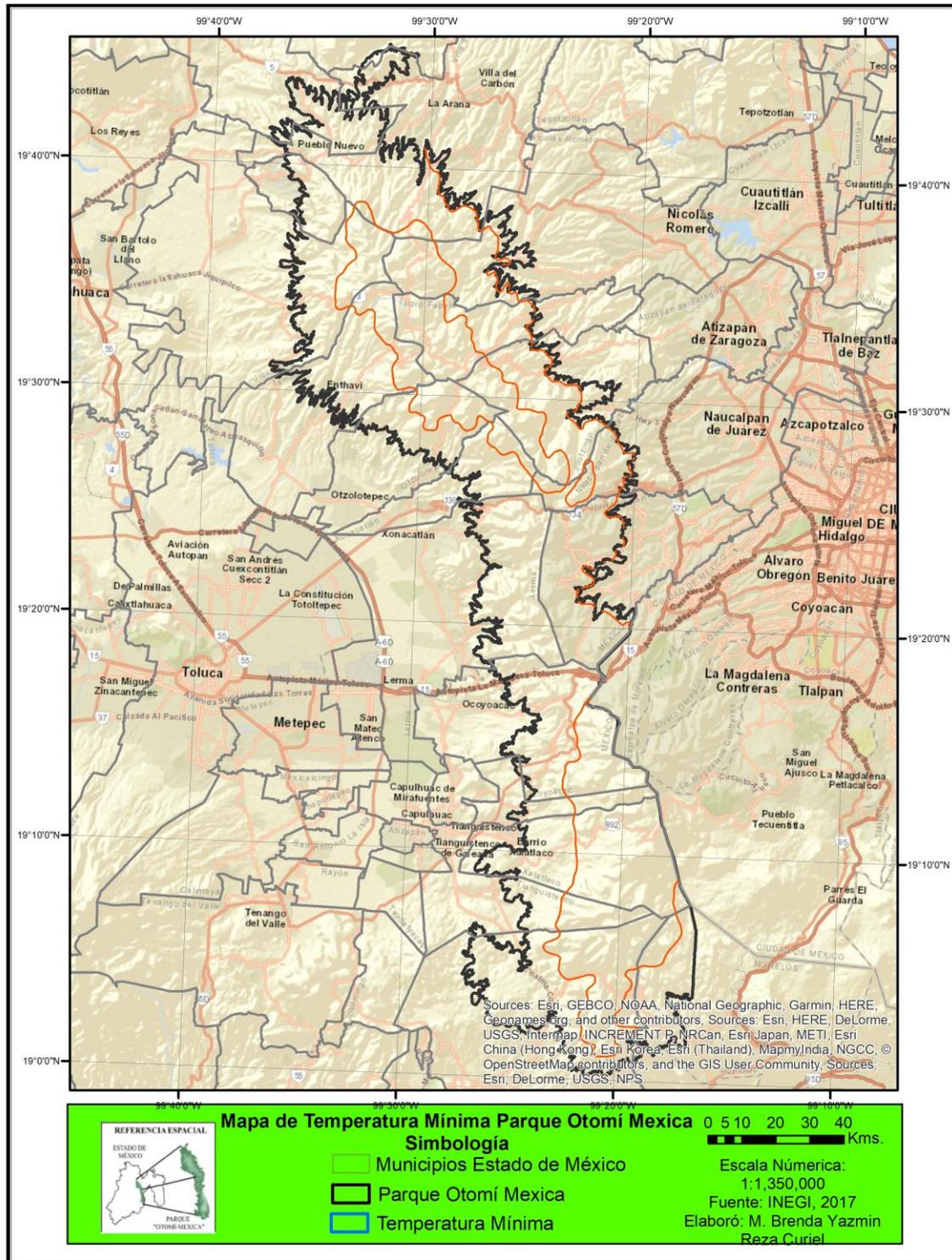
Fuente: elaboración propia con base en Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Otomí-Mexica (2009) en Villegas (2020)

Figura 24. Mapa Hidrológico del Parque Otomí - Mexico



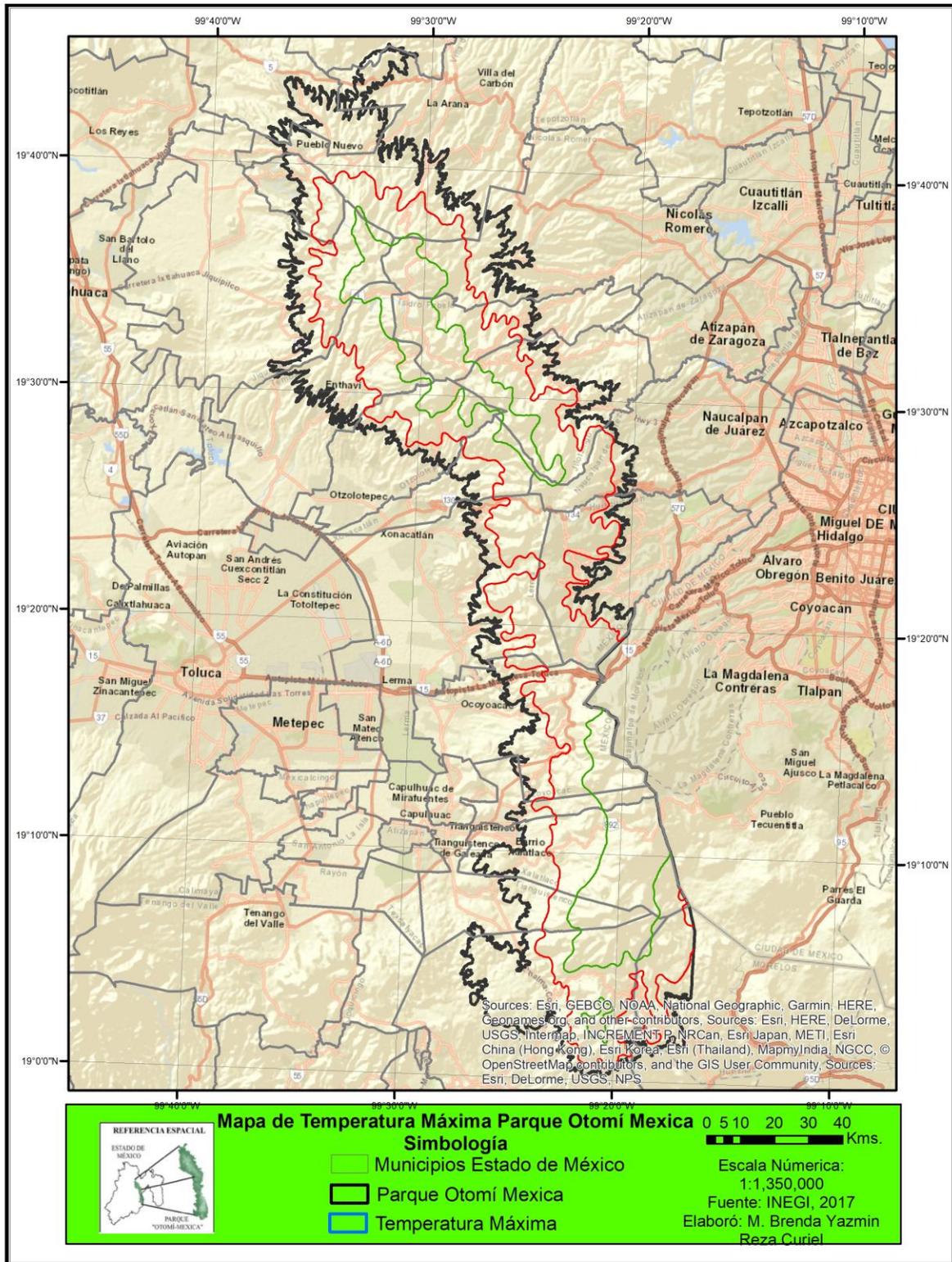
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, (2017).

Figura 25. Mapa de Temperatura Mínima Parque Otomí - Mexica



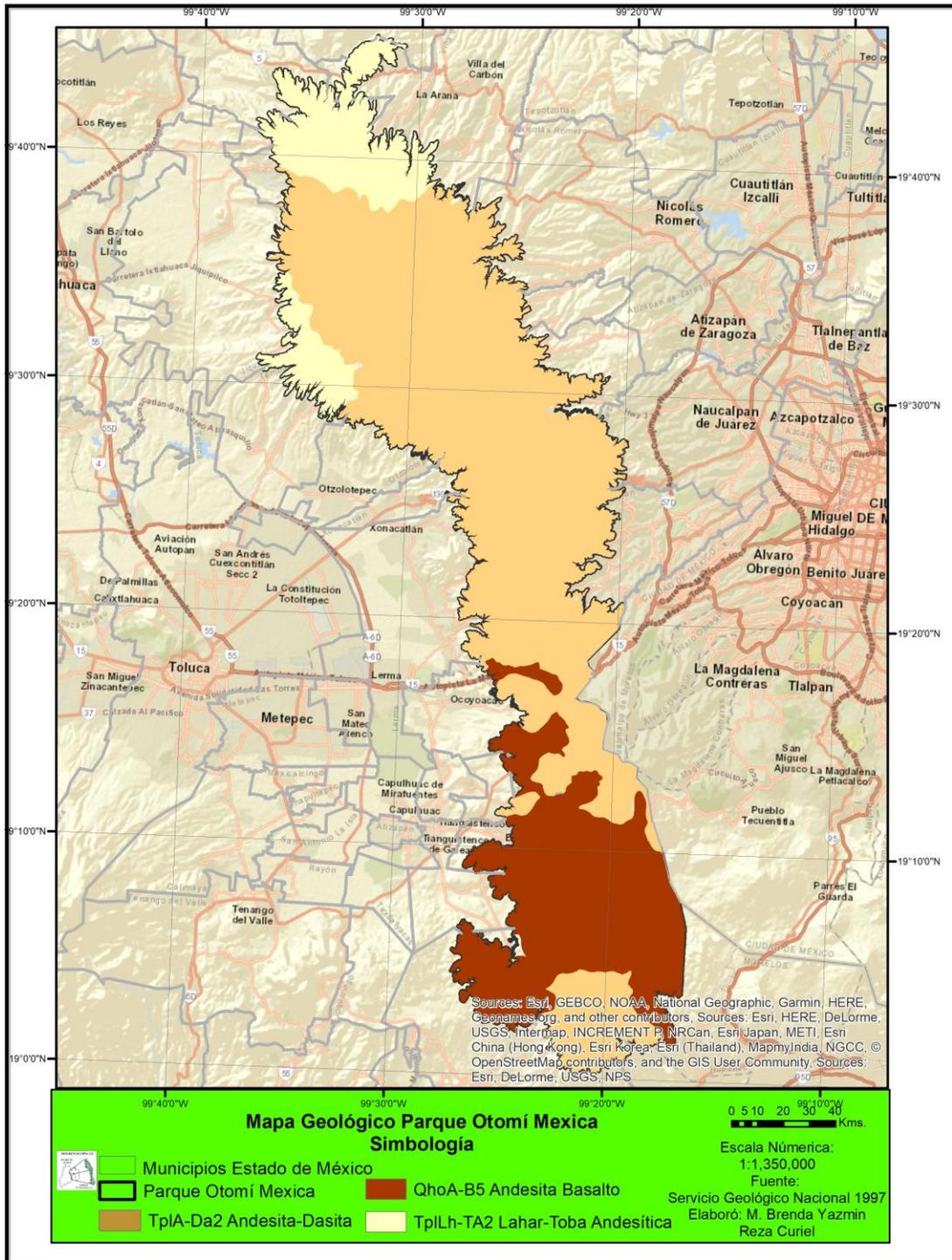
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2017).

Figura 26. Mapa de Temperatura Máximas Parque Otomí - Mexica



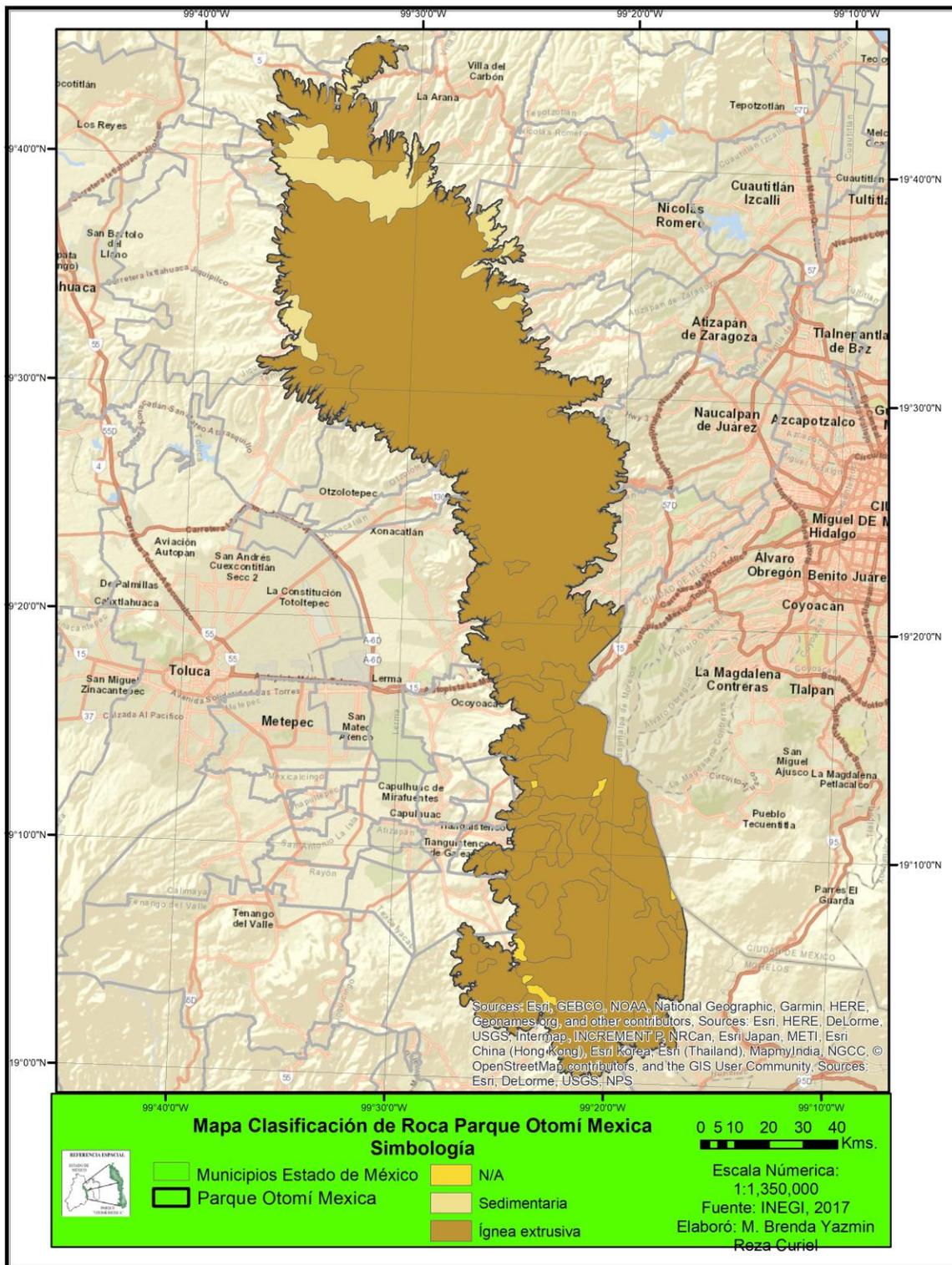
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2017).

Figura 27. Mapa Geológico Parque Otomí - Mexico



Fuente: Elaboración propia con base en Servicio Geológico Nacional (1997).

Figura 28. Mapa de Clasificación de Roca Parque Otomí - Mexica



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2017).

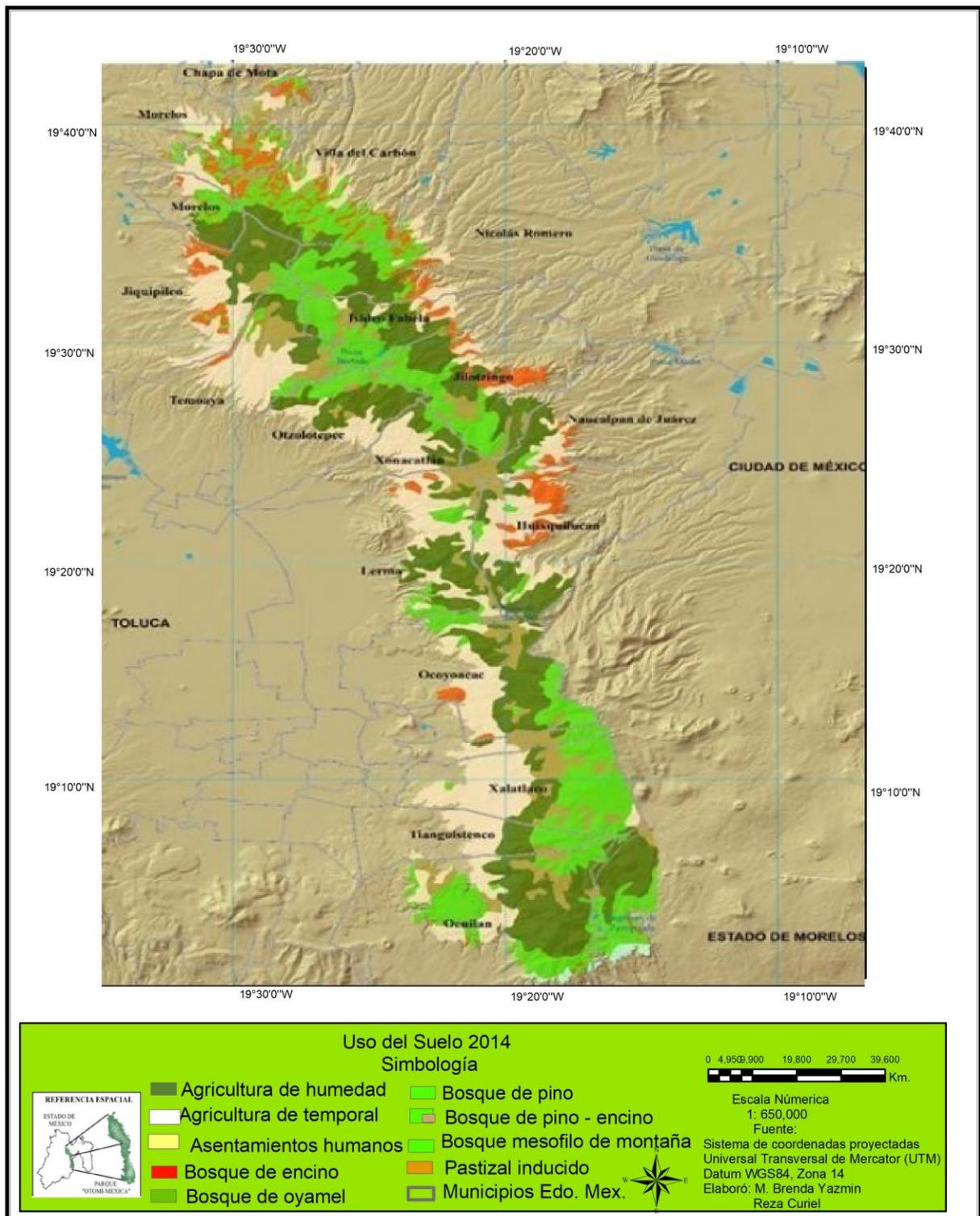
3.2 Análisis espaciotemporal de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica (2014 y 2018)

Se identificaron los siguientes ecosistemas corresponde a nueve categorías: 1) bosque de pino, 2) bosque de encino, 3) bosque de oyamel, 4) bosque pino- encino, 5) bosque mesófilo de montaña, 6) agricultura de temporal, 7) asentamientos humanos, 8) pastizal inducido, 9) agricultura de riego, ver (figura, 29).

De acuerdo con esta figura, el ecosistema con mayor proporción es el bosque de oyamel con 30,400 hectáreas, agricultura de temporal 29,294 hectáreas, bosque de pino 21,422 hectáreas, bosque de encino – pino 9,483 hectáreas, pastizal inducido 9,300 hectáreas, bosque de encino 4,014 hectáreas, agricultura de riego 1,701 hectáreas, bosque mesófilo de montaña 250 hectáreas y asentamientos humanos 11 hectáreas. Teniendo un total de 105,875 hectáreas.

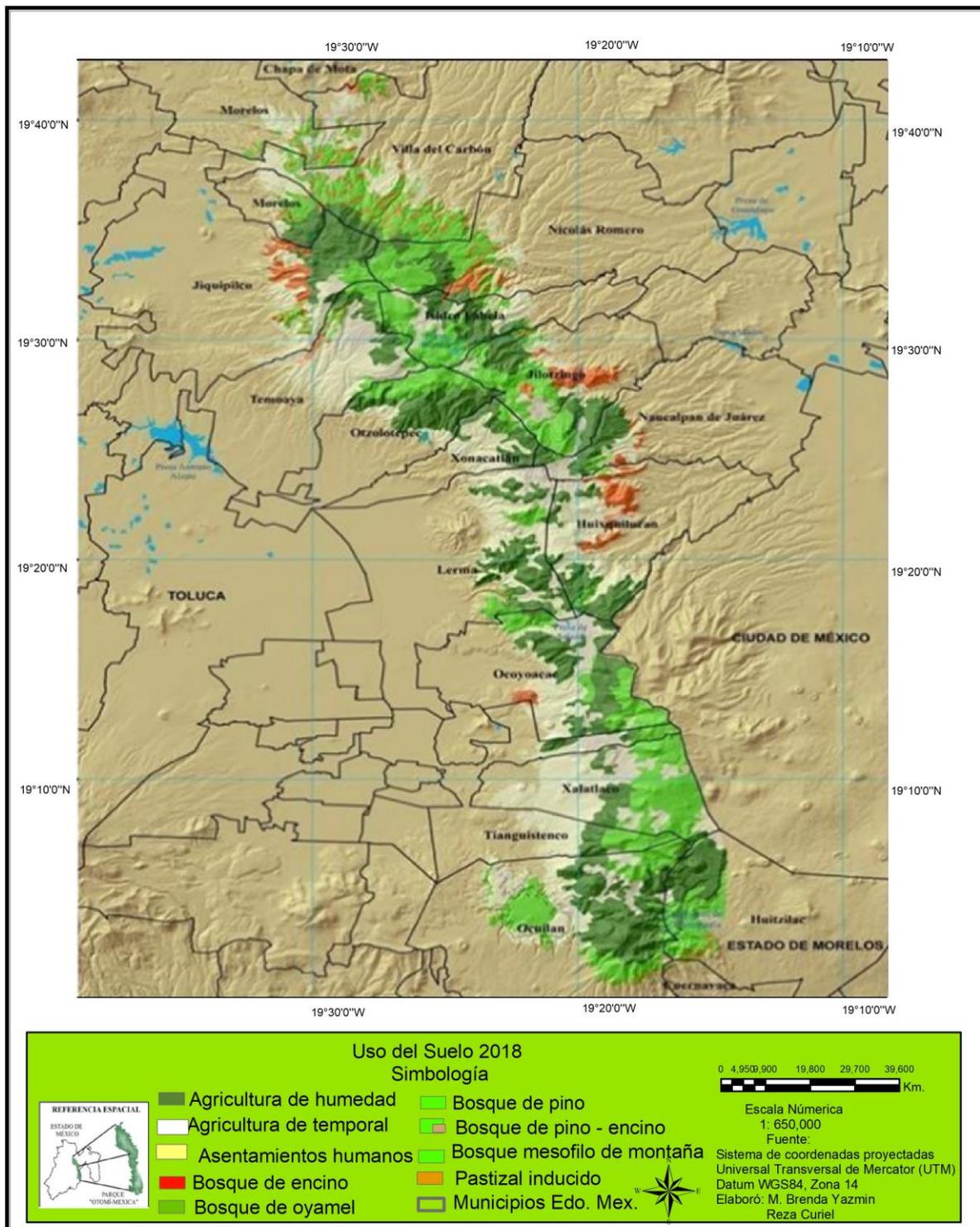
La figura, 30 Uso de suelo y vegetación del Parque Otomí – Mexica del Estado de México, (2018) incluye las mismas características del primero. La cobertura con mayor proporción en el Parque Otomí – Mexica fue: bosque de oyamel 29974.4 hectáreas, agricultura de temporal con 29170.6 hectáreas, bosque de pino 23335.4 hectáreas, pastizal inducido 9829.81 hectáreas, bosque de encino - pino 8984.77 hectáreas, bosque de encino 4147.07 hectáreas, bosque mesófilo de montaña 353.19 hectáreas, asentamientos humanos 14.78 hectáreas, agricultura de riego 65.16 hectáreas, con un total de 105875 hectáreas.

Figura 29. Uso de suelo y vegetación del Parque Otomí Mexica del Estado de México, año 2014



Fuente: elaboración propia con base en Serie IV, Uso de Suelo y Vegetación INEGI, (2014) y Villegas (2020)

Figura 30. Uso de suelo y vegetación del Parque Otomí Mexica del Estado de México, año 2018



Fuente: Elaboración propia, con base en Serie VI, Uso de Suelo y Vegetación INEGI (2018); Villegas (2020)

3.2.1 Evaluación de la confiabilidad de los mapas uso del suelo del Parque Otomí – Mexica 2014 y 2018.

Los mapas fueron validados mediante puntos de verificación (sitios de muestreo). Para el mapa del año 2014 se registraron un total de 450 puntos, de los cuales 415 coincidieron con las categorías de la leyenda del mapa y 35 pertenecieron a una categoría diferente (Tabla, 8). Para el año 2018, del total de 450 puntos de muestreo, de los cuales 407 coinciden con las categorías de la leyenda del mapa y 43 pertenecieron a una categoría diferente (Tabla, 9).

En el siguiente cuadro se observan los mismos elementos descritos en la tabla 10 y 11, es decir la comparación entre las categorías clasificadas en el mapa (Verdad imagen) y las clases de referencia recopiladas en campo (Verdad terreno), sólo que los valores se encuentran expresados en proporciones (Tabla, 12 y 13).

Los valores de las tablas 12 y 13 anteriores son el resultado de la aplicación del método Card (1982), es decir los coeficientes que comprenden a estos son el producto de las correcciones o ajustes a los cuales se sometieron los datos incluidos en los cuadros anteriores. La suma de la proporción de cada una de las categorías correspondientes a la Verdad imagen es igual a la proporción de la categoría representada en el mapa. (Tabla, 14 y 15).

En la tabla 16 se muestran los datos correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas clasificados. Se obtuvo una fiabilidad global de 92.22 % y un intervalo de confianza de 4.47% para el mapa del año 2014. La categoría de bosque mesófilo de montaña registró el mayor error de comisión (20%), el bosque de encino, bosque mesófilo de montaña y agricultura de temporal fueron las categorías que registraron los mayores errores de omisión con (20%). (Tabla, 17) muestran los datos correspondientes a los índices de confiabilidad e intervalos de confianza de los mapas clasificados, 2018 se obtuvo una confiabilidad global de 90.44% y un intervalo de confianza de 7.48%. La categoría de agricultura de

temporal fue la que tiene mayor error de comisión 30.35%, mientras que en la categoría de error de omisión el bosque de encino obtuvo el 24%.

En la tabla 18 se observan los índices de confiabilidad e intervalos de confianza calculados a partir de datos incluidos en las matrices de confusión corregidas o ajustadas por el método Card (1982). Se obtuvo una confiabilidad global de 94.44% y un intervalo de confianza de 3.12% para el año 2014, el bosque de pino – encino registro un error de comisión de 16.66% y el bosque de oyamel registro un error de omisión de 20%. (Tabla, 19) se observan los índices de confiabilidad e intervalos de confianza calculados a partir de datos incluidos en las matrices de confusión corregidas o ajustadas por el método Card, para el mapa del año 2018 se registro una confiabilidad global de 89.89% y un intervalo de confianza de 5.5%. La categoría que registro mayor error de comisión fue el bosque de encino con el 28.58%, mientras que el error de omisión más alto fue el bosque de oyamel con el 36.37%.

Tabla 8. Matriz de confusión 2014

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									Total Verdad terreno
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	
Verdad terreno (Clases de referencia)	bosque de pino	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50
	bosque de encino	0	40	0	0	10	0	0	0	0	50
	bosque de oyamel	0	0	45	5	0	0	0	0	0	50
	bosque encino - pino	0	0	0	50	0	0	0	0	0	50
	bosque mesófilo de montaña	0	0	10	0	40	0	0	0	0	50
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	40	0	0	10	50
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50
Total verdad imagen		50	40	55	55	50	40	50	50	60	450

Fuente: elaboración propia, con base en (USDA, 1995; Mas et al., 2003; Franco et al., 2006 en Camacho, 2019)

Tabla 9. Matriz de confusión 2018

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque de galería	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	bosque de pino	47	0	0	3	0	0	0	0	0	50
	bosque de encino	0	38	0	0	0	12	0	0	0	50
	bosque de oyamel	0	7	43	0	0	0	0	0	0	50
	bosque encino - pino	0	5	0	45	0	0	0	0	0	50
	bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	39	0	0	11	50
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	50	0	50
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	5	0	0	45	50
Total verdad imagen		47	50	43	48	50	56	50	50	56	450

Fuente: elaboración propia, con base en (USDA, 1995; Mas et al., 2003; Franco et al., 2006 en Camacho, 2019)

Tabla 10. Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2014

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno	bosque de pino	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
	bosque de encino	0	0.099	0	0	0.011	0	0	0	0	0.11
	bosque de oyamel	0	0	0.088	0.022	0	0	0	0	0	0.11
	bosque pino-encino	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0.11
	bosque mesófilo de montaña	0	0	0.011	0	0.099	0	0	0	0	0.11
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.099	0	0	0.011	0.11
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0.11
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.11
	Total verdad imagen		0.11	0.099	0.099	0.132	0.11	0.099	0.11	0.11	0.121
Proporción representada en el mapa		0.135	0.045	0.12	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 11. Matriz de confusión o de error expresada en proporción 2018

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									Total Verdad terreno
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	
Verdad terreno	bosque de pino	0.08	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0.11
	bosque de encino	0	0.10	0	0	0	0.01	0	0	0	0.11
	bosque de oyamel	0	0.04	0.07	0	0	0	0	0	0	0.11
	bosque pino-encino	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0	0.11
	bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0	0.11
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.09	0	0	0.02	0.11
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0.11
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0.11
Total verdad imagen		0.08	0.14	0.07	0.14	0.11	0.10	0.11	0.11	0.13	1.00
Proporción representada en el mapa		0.035	0.05	0.17	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.08	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 12. Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2014)

Año 2014		Verdad imagen (clases del mapa)									
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	Total Verdad terreno
Verdad terreno (Clases de referencia)	bosque de pino	0.135	0	0	0	0	0	0	0	0	0.135
	bosque de encino	0	0.045	0	0	0.005	0	0	0	0	0.05
	bosque de oyamel	0	0	0.08	0.02	0	0	0	0	0	0.1
	bosque pino-encino	0	0	0	0.07	0	0	0	0	0	0.07
	bosque mesófilo de montaña	0	0	0.04	0	0.025	0	0	0	0	0.065
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.250	0	0	0.02	0.27
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.09	0	0	0.09
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.055	0	0.055
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0.15
Total verdad imagen		0.135	0.045	0.12	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00
Proporción representada en el mapa		0.135	0.045	0.12	0.099	0.035	0.250	0.09	0.055	0.170	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 13. Matriz de confusión o de error expresada en proporción y corregidas en proporción por el método de Card (2018)

Año 2018		Verdad imagen (clases del mapa)									Total Verdad terreno
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	
Verdad terreno	bosque de pino	0.035	0	0	0.020	0	0	0	0	0	0.055
	bosque de encino	0	0.03	0	0	0	0.020	0	0	0	0.05
	bosque de oyamel	0	0.01	0.17	0	0	0	0	0	0	0.18
	bosque pino-encino	0	0.01	0	0.048	0	0	0	0	0	0.058
	bosque mesófilo de montaña	0	0	0	0	0.135	0	0	0	0	0.135
	agricultura de temporal	0	0	0	0	0	0.021	0	0	0.03	0.051
	asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0.029	0	0	0.029
	pastizal inducido	0	0	0	0	0	0	0	0.39	0	0.39
	agricultura de riego	0	0	0	0	0	0.002	0	0	0.05	0.052
Total verdad imagen		0.035	0.05	0.17	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.08	1.00
Proporción representada en el mapa		0.035	0.05	0.17	0.068	0.135	0.043	0.029	0.39	0.08	1.00

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 14. Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2014

Año 2014	Verdad imagen (clases del mapa)									Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	bosque de pino %	bosque de encino %	bosque de oyamel %	bosque pino-encino %	bosque mesófilo de montaña %	agricultura de temporal %	asentamientos humanos %	pastizal inducido %	agricultura de riego %		
Confiabilidad del usuario	100	100	81.81	90.90	80.00	100	100	100	83.33	92.22	4.47
Error de comisión	0	0	18.18	0.09	20	0	0	0	16.66		
Intervalo de confianza del usuario	0	0	0.01	9.01	0	0	0	0	0.01		
Confiabilidad de productor	100	80	90	100	80	80	100	100	100		
Error de omisión	0	20	10	0	20	20	0	0	0		
Intervalo de confianza del productor	0	0	0.02	0	0.02	0.02	0	0	0		

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 15. Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión sin correcciones o ajustes) 2018

Año 2018	Verdad imagen (clases del mapa)									Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	bosque de pino %	bosque de encino %	bosque de oyamel %	bosque pino-encino %	bosque mesófilo de montaña %	agricultura de temporal %	asentamientos humanos %	pastizal inducido %	agricultura de riego %		
Confiabilidad del usuario	100	76	100	93.75	100	69.64	100	100	80.35	90.44	7.48
Error de comisión	0	24	0	6.25	0	30.35	0	0	19.64		
Intervalo de confianza del usuario	0	31	0	14.05	0	0	0	0	15		
Confiabilidad de productor	94	76	86	90	100	78	100	100	90		
Error de omisión	6	24	14	10	0	22	0	0	10		
Intervalo de confianza del productor	0	0.05	0	0.020	0	0	0.070	0	0.04		

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 16. Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2014

Año 2014	Verdad imagen (clases del mapa)									Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	bosque de pino %	bosque de encino %	bosque de oyamel %	bosque pino-encino %	bosque mesófilo de montaña %	agricultura de temporal %	asentamientos humanos %	pastizal inducido %	agricultura de riego %		
Confiabilidad del usuario	100	100	88.88	83.33	90	100	100	100	90	94.44	3.12
Error de comisión	0	0	11.11	16.66	10	0	0	0	10		
Intervalo de confianza del usuario	0	0	11.0	8.9	5.9	0	0	0	5.9		
Confiabilidad de productor	100	90	80	100	90	90	100	100	100		
Error de omisión	0	10	20	0	10	10	0	0	0		
Intervalo de confianza del productor	0	0	0	0	0.005	0	0	0	0.007		

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Tabla 17. Índice de confiabilidad e intervalos de confianza (matriz de confusión corregidas por el método Card) 2018

Año 2018	Verdad imagen (clases del mapa)										Confiabilidad global (%)	Intervalo de confianza (%)
	bosque de pino %	bosque de encino %	bosque de oyamel %	bosque pino-encino %	bosque mesófilo de montaña %	agricultura de temporal %	asentamientos humanos %	pastizal inducido %	agricultura de riego %			
Confiabilidad del usuario	100	71.42	100	78.57	100	81.81	100	100	84.61	89.89	5.5	
Error de comisión	0	28.58	0	21.43	0	18.19	0	0	15.39			
Intervalo de confianza del usuario	0	14.05	0	10.05	0	9.05	0	0	7.09			
Confiabilidad de productor	72.72	90.90	63.63	100	100	81.81	100	100	100			
Error de omisión	27.28	9.1	36.37	0	0	18.19	0	0	0			
Intervalo de confianza del productor	0	0.025	0	0	0	0	0	0	0.05			

Fuente: elaboración propia, con base (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

3.2.2 Análisis espaciotemporal sobre los cambios de cobertura y uso del suelo por cada ecosistema en el periodo estudiado (2014-2018).

La descripción de los procesos de cambio del Parque Otomí – Mexica, Estado de México se realizó a partir de la matriz de cambios, los indicadores e índices de cambio, las tasas de cambio y el mapa de cambios.

En la matriz de cambios se observa que, en el año 2014 el bosque de pino tenía una superficie de 21,422 ha, para el año 2018 solamente se conservaron (permanecieron) 18,049.43 ha, producto del proceso de deforestación. Por tanto, se eliminaron 3,373 ha de bosque de pino, las cuales fueron ocupadas por otras categorías: bosque de oyamel (248.59 ha), bosque de pino – encino (128.32 ha), bosque mesófilo de montaña (61.85 ha), agricultura de temporal (1,534.45 ha), pastizal inducido (1,395.02 ha) y agricultura de riego (4.34 ha).

El bosque de pino también experimentó un proceso de revegetación, acción que coadyuvó, al incremento de la superficie conservada, es decir a 18,049.43 ha de bosque de pino que pertenecían al área conservada (permanencia), se adicionaron 5,286 ha de superficie recuperada, de las cuales pertenecían a bosque de encino 114 ha, bosque de oyamel 2712 ha, bosque de pino – encino 1028 ha, bosque mesófilo de montaña 45 ha, agricultura de temporal 856 ha, asentamientos humanos 0.10 ha, pastizal inducido 251 ha y agricultura de riego 280 ha, de superficie total para el año 2018.

A pesar de que las categorías de bosque de pino experimento un proceso de revegetación, el área correspondiente a la deforestación fue mayor (casi el doble de la superficie recuperada).

Por su parte, las categorías de bosque de encino, bosque de oyamel, bosque de pino – encino, bosque mesófilo de montaña, agricultura de temporal, asentamientos humanos, pastizal inducido y agricultura de riego, registraron un notable incremento en la superficie, a pesar de la presencia de procesos vinculados con el ascenso y descenso en la cobertura que comprende a cada una

de estas. Este incremento puede atribuirse a actividades relacionadas con la apertura de nuevos reservorios de agua (cuerpos de agua artificiales: bordos, presas) y procesos asociados a la urbanización, revegetación y expansión de las fronteras agropecuarias (tabla, 18)

Tabla 18. Matriz de cambios del Parque Otomí – Mexica Estado de México. Periodo 2014 – 2018.

Fecha 1 (2014)											
		bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	Total Año 2018
Fecha 2018	bosque de pino	18,049.43	113.98	2,711.9	1,027.97	45.14	855.95	0.10	250.59	280.34	23,335.4
	bosque de encino	0.00	3,729.34	30.65	218.87	0.00	37.96	0.00	0.0	130.25	4,147.07
	bosque de oyamel	248.59	0.00	27,506.00	1,248.15	0.21	273.25	0.11	582.34	115.75	29,974.4
	bosque pino-encino	128.32	0.17	25.75	4,768.29	0.00	945.89	0.00	2,476.46	639.89	8984.77
	bosque mesófilo de montaña	61.85	28.05	0.00	0.00	204.5	0.00	0.00	0.00	58.79	353.19
	agricultura de temporal	1,534.45	40.28	20.49	320.00	0.00	27,179.8	0.11	75.47	0.00	29,170.6
	asentamientos humanos	0.00	0.01	0.90	1.20	0.00	1.05	10.54	1.08	0.00	14.78
	pastizal inducido	1,395.02	102.06	89.06	1898.34	0.15	0.0	0.14	5,914.06	430.98	9829.81
	agricultura de riego	4.34	0.29	15.25	0.18	0.00	0.10	0.00	0.00	45.00	65.16
	Total año 2014	21,422	4,014	30,400	9,483	250	29,294	11	9,300	1,701	105875

Fuente: elaboración propia, con base (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

En relación a los indicadores de cambio, el 82.38% (87,226.96 ha) del territorio que comprende el Parque Otomí – Mexica permaneció estable durante el periodo 2014 – 2018, mientras el 34.88% (36,936.26ha) presentó cambios en las coberturas y usos de suelo que caracterizan a este espacio geográfico. De este último porcentaje. 29.73% (31,478.85ha) corresponde a intercambios entre categorías y sólo 5.06 % (5,366.32 ha) representa el cambio neto.

Respecto a los cambios en términos de ganancias y pérdidas, el Bosque de pino encino, pastizal inducido y bosque de pino fueron las categorías perdedoras con 4.45% (4,714.71 ha), 3.19% (3,385.94 ha) y 3.18% (3,372.57 ha). Mientras que las clases ganadoras fueron bosque de pino, bosque de pino – encino, pastizal inducido con 4.99%(5,285.97 ha), 3.98% (4,216.48 ha), 3.69%(3,915.75 ha) respectivamente. Por otra parte, el análisis del cambio neto permitió identificar que la cobertura del Bosque de pino disminuyó 5.06%(5,366.32 ha) respecto a la que tenía en 2014; mientras que las categorías agricultura de riego, pastizal inducido, bosque de pino – encino, bosque de oyamel, bosque de encino, agricultura de temporal, bosque mesófilo de montaña y asentamientos humanos, incrementaron su superficie en 1.54% (1,635.84 ha), 0.50% (529.81 ha), 0.47% (425.6 ha), 0.40% (425.6 ha), 0.12% (133.07 ha), 0.11% (123.4 ha), 0.09% (103.19 ha) y 0.003% (3.78 ha)respectivamente.

Por lo tanto, se determina que los valores correspondientes al cambio neto pueden brindar una aproximación a la interpretación de los cambios producidos. Sin embargo, no es suficiente para establecer una visión clara sobre la dinámica territorial de un determinado espacio geográfico, pues estos datos no consideran las áreas del intercambio producidas entre coberturas, ni tampoco el cambio total que se registró durante el periodo de estudio; es decir, se puede saber cuánta superficie cambio con respecto al año de origen y en qué sentido , pero no se puede saber si esa cobertura presentó modificaciones espaciales al interrelacionarse con otras, ni a cuánto ascendió el valor total de ese cambio al final del periodo. Por esta razón, es necesario considerar el cálculo de la ganancia,

la pérdida y el intercambio para cada categoría (López y Plata, 2009 en Camacho, 2019).

Para comprender lo anterior, se puede considerar como ejemplo las categorías bosque de pino – encino, pastizal inducido y bosque de pino. En ambas clases se observa que el cambio total (real) resultó ser superior al cambio neto, pues el intercambio de la superficie (7.96% para bosque de pino - encino, 6.39% para pastizal inducido y 6.37% para bosque de pino) con otras categorías, producto de la ganancia y pérdida, determinó su variación espacial. Considerando esto, ambas categorías resultaron ser las que más cambios registraron en el Parque Otomí Mexica con el bosque de pino – encino 8.43% (8,931.19 ha), pastizal inducido 8.18% (7,301.69 ha) y bosque de pino 8.17% (8,658.54 ha) para pastizal inducido (tabla, 19).

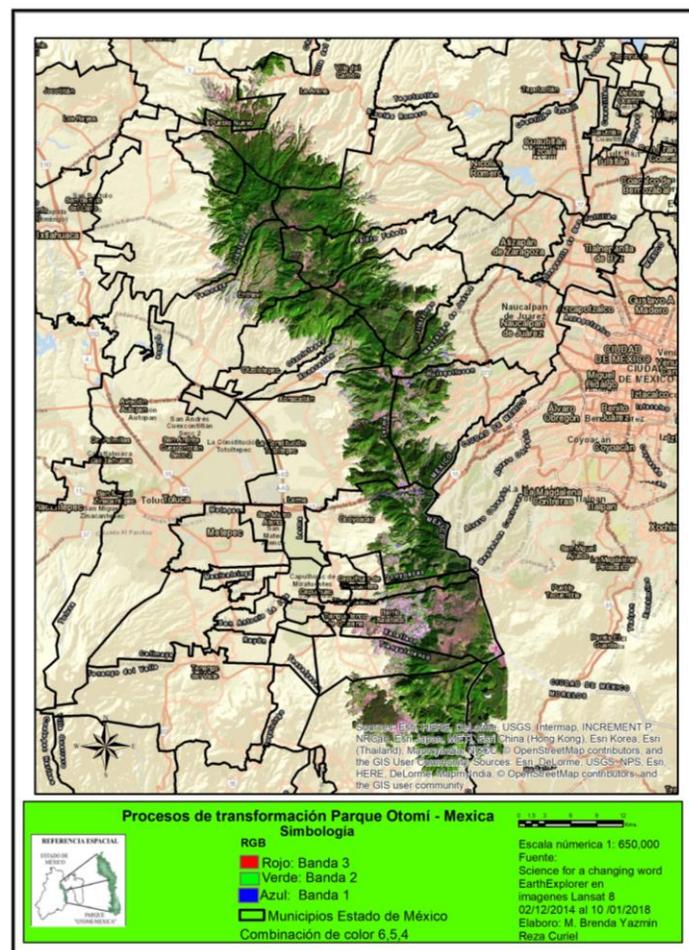
Tabla 19. Indicadores de cambio del Parque Otomí – Mexico Estado de México.

	bosque de pino	bosque de encino	bosque de oyamel	bosque pino-encino	bosque mesófilo de montaña	agricultura de temporal	asentamientos humanos	pastizal inducido	agricultura de riego	Total Año 2018
Area 2014 (ha)	21,422	4,014	30,400	9,483	250	29,294	11	9,300	1,701	105875
%	20.23	3.79	28.71	8.95	0.23	27.66	0.010	8.78	3.21	100.00
Area 2018 (ha)	23,335.4	4,147.07	29,974.4	8,984.77	353.19	29,170.6	14.6	9,829.81	65.16	105875
%	22.04	3.91	28.31	8.48	0.33	27.55	0.013	9.28	0.06	100.00
Persistencia	18,049.43	3,729.34	27,506.0	4,768.29	204.5	27,179.8	10.54	5,914.06	45.00	87,226.96
%	17.04	3.52	25.97	4.50	0.19	25.67	0.009	5.58	0.04	82.38
Pérdidas	3,372.57	284.66	2,894	4,714.71	45.5	2,114.2	0.46	3,385.94	1,656.00	18,468.04
%	3.18	0.26	2.73	4.45	0.04	1.99	0.0004	3.19	1.56	17.44
Ganancias	5,285.97	417.73	2,468.4	4,216.48	148.69	1,990.8	4.24	3,915.75	20.16	18,468.22
%	4.99	0.39	2.33	3.98	0.14	1.88	0.004	3.69	0.01	17.44
Cambio total	8,658.54	702.39	5,362.4	8,931.19	194.19	4,105	4.7	7,301.69	1,676.16	36,936.26
%	8.17	0.66	5.06	8.43	0.18	3.87	0.004	8.18	1.58	34.88
Cambio Neto	1,913.4	133.07	425.6	498.23	103.19	123.4	3.78	529.81	1,635.84	5,366.32
%	1.80	0.12	0.40	0.47	0.09	0.11	0.003	0.50	1.54	5.06
Intercambios	6,745.14	569.32	4,936.8	8,432.87	0	3,981.6	0.92	6,771.88	40.32	31,478.85
%	6.37	0.53	4.66	7.96	0	3.76	0.0008	6.39	0.03	29.73

Fuente: elaboración propia, con base en (Mas y Couturier, 2011 en Camacho, 2019)

Derivado de la intersección de imágenes de satélite 2014 y 2018, con la combinación de bandas 6, 5 y 4 dan como resultado los procesos de cambios del área de estudio, representando cartográficamente los cambios que han sufrido con 11,296.32 hectáreas, lo que representa el 11% del área de estudio, los municipios que representaron mayores cambios fueron Xalatlaco, Ocuilan, Tianguistenco, Ocoyoacac, Huixquilucan, Morelos, Villa del Carbón, Temoaya ², ver (figura, 31)

Figura 31. Mapa de Proceso de transformación Parque Otomí – Mexica 2014 – 2018.



Fuente: elaboración propia con base en Science for changing Word Earth Explorer en imágenes Landsat 8 2014 -2018

² De los municipios antes mencionados solamente son porciones, pues una parte de ellos está conformada por infraestructura urbana.

3.3 Distribución espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de regulación: captura de carbono 2014.

En la figura, 32 se observa la distribución espacial del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono 2014 se comportó de la siguiente manera: 1) bosque de encino: *quercus* 0.4726 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios del área de estudio, al suroeste del municipio de Ocoyoacac, al norte de Huixquilucan, al suroeste de Naucalpan, al norte de Lerma, al centro de Jilotzingo, al centro de Isidro Fabela, al suroeste de Nicolás Romero, al suroeste de Nicolás Romero, al suroeste de Villa del Carbón, al sur de Chapa de Mota, al sur de Morelos, al noreste y sureste de Jiquipilco.

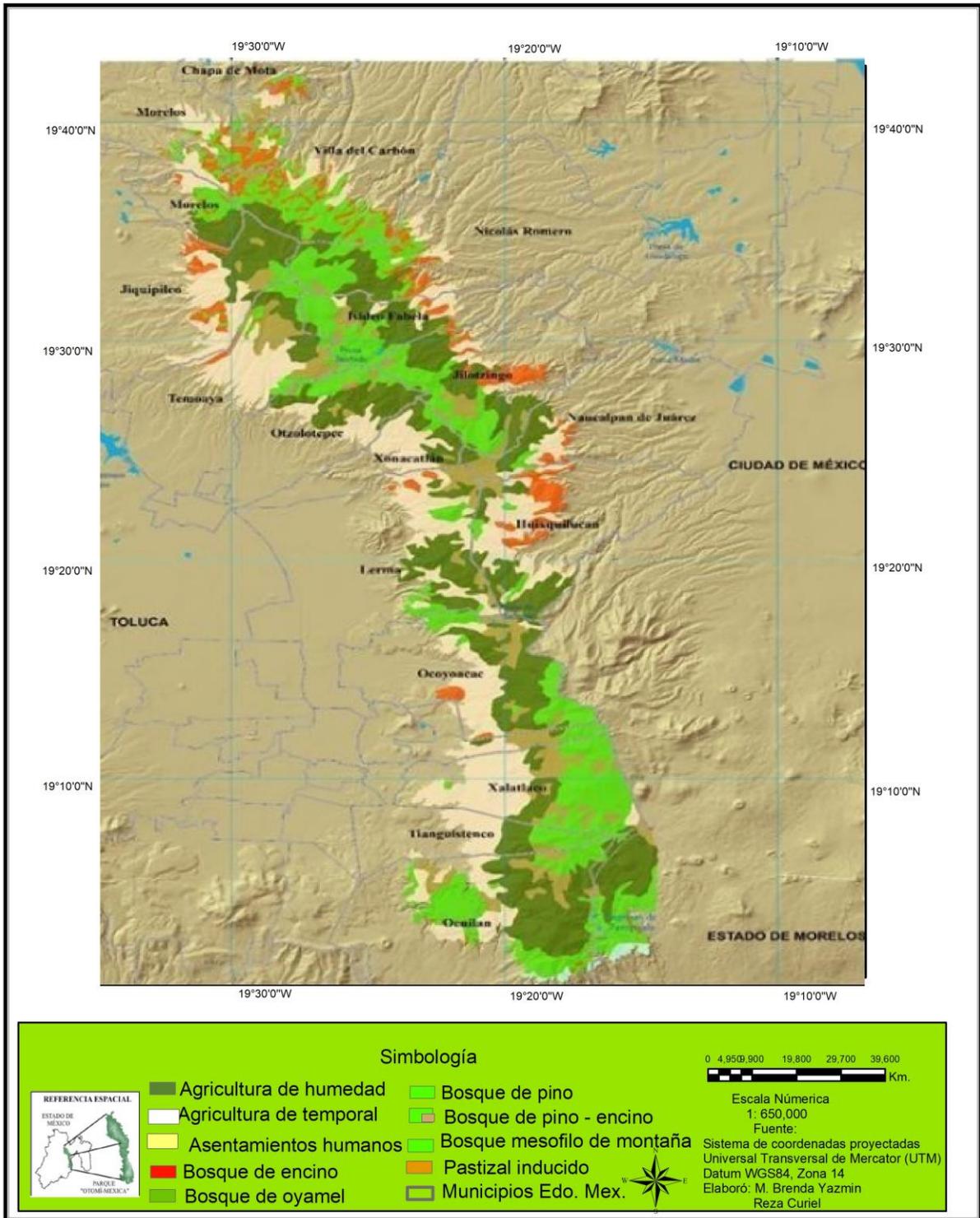
2) bosque mixto encino – pino 0.4706 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios, al noreste de Ocuilan, al norte de Xalatlaco, al noreste y sureste de Ocoyoacac, al norte y sureste de Lerma, noreste de Xonacatlán, noreste de Oztolotepec, noreste de Temoaya y noreste de Jiquipilco.

3) bosque de oyamel: *abies religiosa* 0.4735 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios, al noreste de Ocuilan, al sureste de Tianguistenco, al noreste y sureste de Xalatlaco, sureste de Ocoyoacac, noreste y sureste de Lerma, noroeste y suroeste de Jilotzingo, noreste de Oztolotepec, suroeste y noreste de Isidro Fabela, suroeste de Nicolás Romero, suroeste de Villa del Carbón, noroeste de Morelos y noreste de Jiquipilco.

4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 0.4687 ton/ha índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios al noreste de Ocuilan, al noreste de Xalatlaco, sureste y noreste de Lerma, norte de Oztolotepec, suroeste de Nicolás Romero y sureste de Morelos.

5) bosque mesófilo de montaña 0.4962 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono se localiza al noreste de Ocuilan.

Figura 32. Mapa de Distribución espacial por tipo de ecosistema. Parque Otomí Mexica Estado de México 2014



Fuente: elaboración propia con base en Serie IV, Uso de Suelo y Vegetación INEGI, (2014)

3.3.1 Carbono capturado en cada ecosistema para el año 2014, mediante el índice de Morfín *et al.*, (2015).

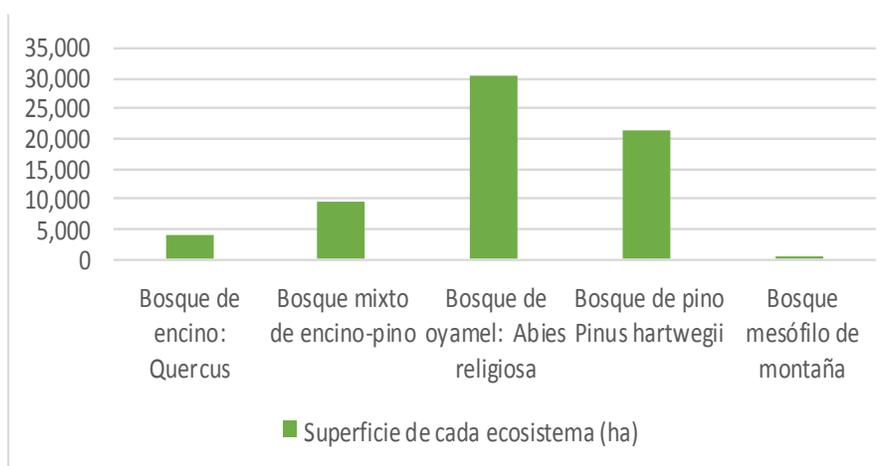
Estimación del carbono en la biomasa se estimó a nivel de agregación superior (UMS) bajo el enfoque conceptual propuesto Cairns *et al.*, (1997).

$$(Y) = \exp(-1.0587+0.8836(\ln(CBA)) +0.2840)$$

Se retomaron los resultados obtenidos en la investigación, “Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México” desarrollado por Morfín R. *et al.*, (2015), a través del Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP).

En la gráfica 1 la superficie de cada ecosistema para el año 2014 es el siguiente: 1) bosque de encino: *quercus* 4,014 ha 2) bosque mixto encino – pino 9,483ha 3) bosque de oyamel: *abies religiosa* 30,400ha 4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 21,422ha y 5) bosque mesófilo de montaña 250 ha

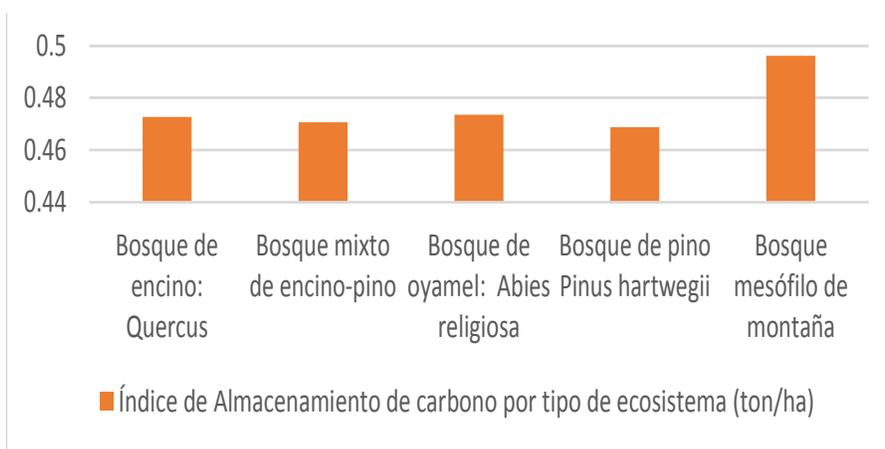
Gráfica 1. Superficie de cada ecosistema en el Parque Otomí Mexica, 2014



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa *et al.*, (2010); Jiménez E., (2013) y Morfín, *et al.*, (2015)

Se presentan los siguientes índices para la captura de carbono en los ecosistemas forestales: 1) bosque de encino: *quercus* 0.4726 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 2) bosque mixto encino – pino 0.4706 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 3) bosque de oyamel: *abies religiosa* 0.4735 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 0.4687 ton/ha índice de almacenamiento de carbono. 5) bosque mesófilo de montaña 0.4962 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, (Gráfica 2).

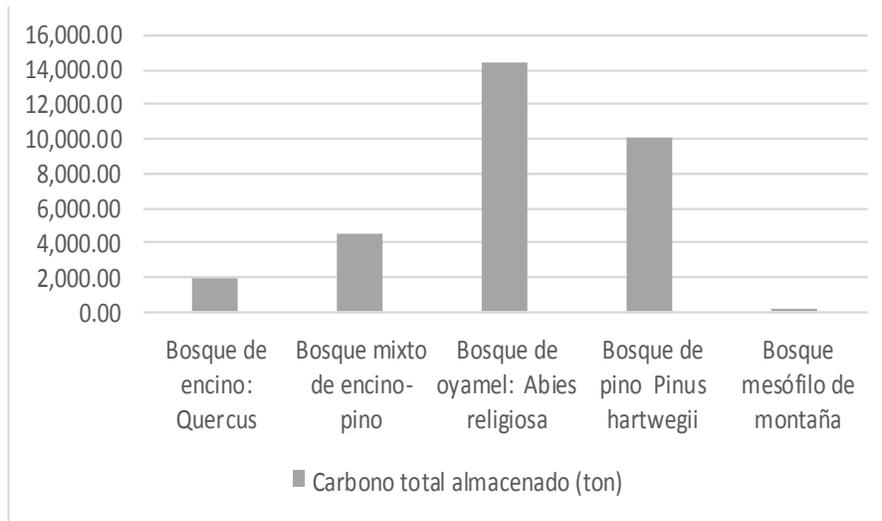
Gráfica 2. Índice de Almacenamiento de carbono por tipo de ecosistema (ton/ha) Parque Otomí Mexica, 2014



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa et al. (2010); Jiménez E., (2013) y Morfín, et al., (2015)

En la gráfica 3 se observa el carbono total almacenado (ton) en los siguientes ecosistemas: 1) Bosque de encino: *quercus* 1,897.0 (ton). 2) Bosque mixto de encino-pino 4,462.6 (ton). 3) Bosque de oyamel: *abies religiosa* 14,394.4 (ton). 4) Bosque de pino *pinus hartwegii* 10,040.4 (ton). 5) Bosque mesófilo de montaña 124.0 (ton).

Gráfica 3. Carbono total almacenado (ton) en el Parque Otomí Mexica, 2014.



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa *et al.*, (2010); Jiménez *E.*, (2013) y Morfín, *et al.*, (2015)

3.4 Distribución espaciotemporal del Servicio Ecosistémico de regulación: almacenamiento de carbono 2018.

En la figura, 33 se observa la distribución espacial del servicio ecosistémico de almacenamiento de carbono 2018 se comportó de la siguiente manera: 1) bosque de encino: *quercus* 0.4726 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono se localiza en los siguientes municipios: al suroeste de Ocoyoacac, noroeste de Huixquilucan, suroeste de Naucalpan, centro de Jilotzingo, suroeste de Nicolás Romero y al sureste de Jiquipilco.

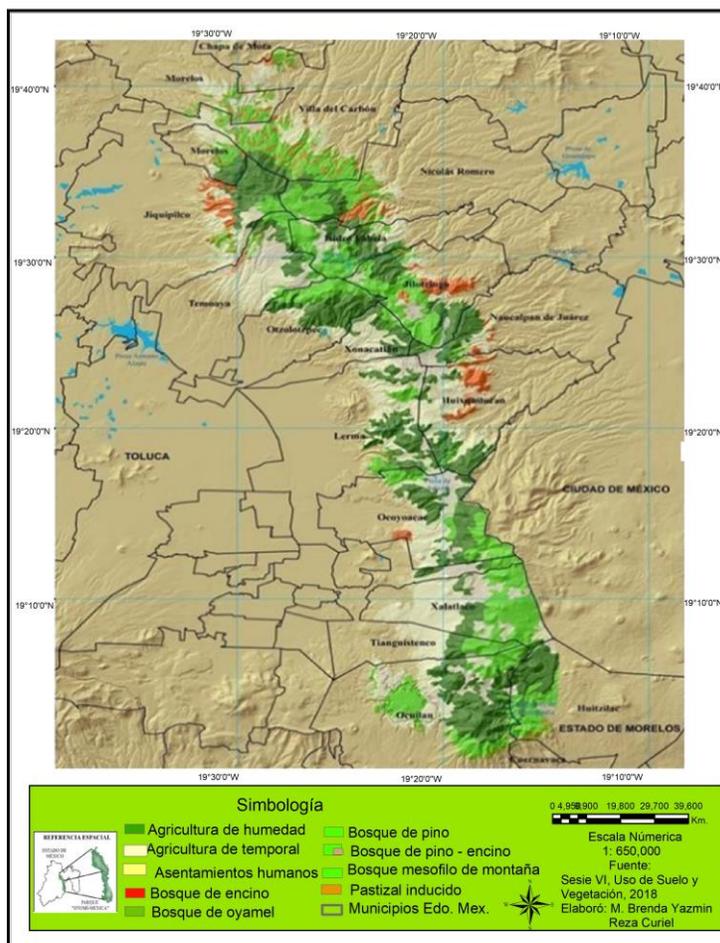
2) bosque mixto pino - encino 0.4706 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios, al noreste de Ocuilan, al norte de Xalatlaco, al noreste y sureste de Ocoyoacac, al norte y sureste de Lerma, noreste de Xonacatlán, noreste de Oztolotepec, noreste de Temoaya y noreste de Jiquipilco.

3) bosque de oyamel: *abies religiosa* 0.4735 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios, al noreste de Ocuilan, al sureste de Tlanguistenco, al noreste y sureste de Xalatlaco, sureste de Ocoyoacac, noreste y sureste de Lerma, noroeste y suroeste de Jilotzingo, noreste de Oztolotepec, suroeste y noreste de Isidro Fabela, suroeste de Nicolás Romero, suroeste de Villa del Carbón, noroeste de Morelos y noreste de Jiquipilco.

4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 0.4687 ton/ha índice de almacenamiento de carbono, se localiza en los siguientes municipios al noreste de Ocuilan, al noreste de Xalatlaco, sureste y noreste de Lerma, norte de Oztolotepec, suroeste de Nicolás Romero y sureste de Morelos.

5) bosque mesófilo de montaña 0.4962 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono se localiza al noreste de Ocuilan.

Figura 33. Mapa de Distribución espacial por tipo de ecosistema. Parque Otomí Mexica, Estado de México 2018



Fuente: Elaboración propia, con base en Serie VI, Uso de Suelo y Vegetación INEGI (2018); Villegas (2020)

3.4.1 Carbono capturado en cada ecosistema para el año 2018, mediante el índice de Morfín *et al.*, (2015).

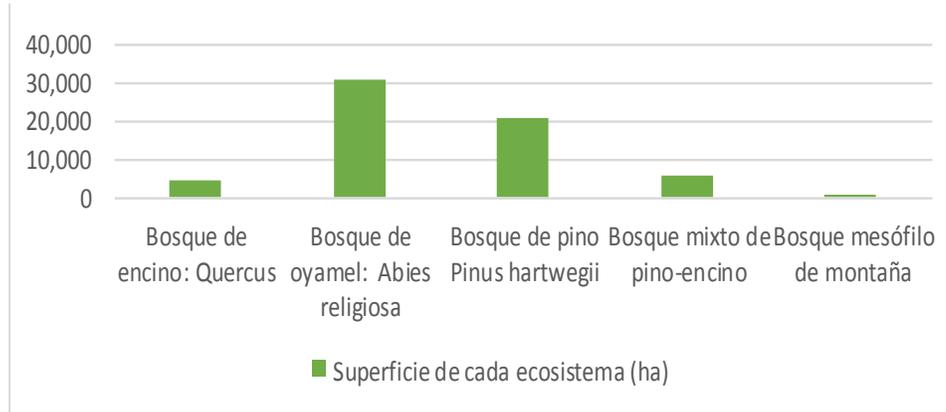
Estimación del carbono en la biomasa se estimó a nivel de agregación superiores (UMS) bajo el enfoque conceptual propuesto Cairns *et al.* (1997).

$$(Y) = \exp(-1.0587 + 0.8836(\ln(CBA)) + 0.2840)$$

En la gráfica 4 la superficie de cada ecosistema para el año 2018 es el siguiente: 1) bosque de encino: *quercus* 4,254ha 2) bosque mixto pino - encino 5,774ha 3) bosque

de oyamel: *abies religiosa* 30,961ha 4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 20,806ha y 5) bosque mesófilo de montaña 397 ha

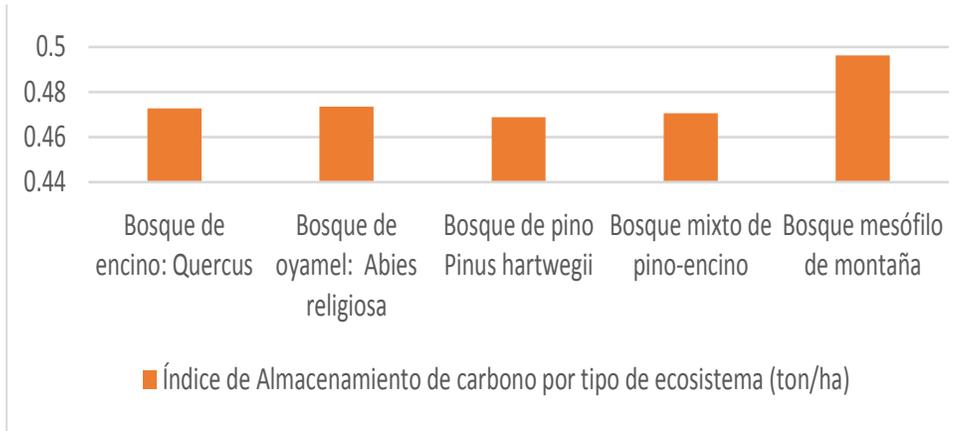
Gráfica 4 Superficie de cada ecosistema en el Parque Otomí Mexica, 2018



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa *et al.*, (2010); Jiménez E. (2013) y Morfín, *et al.*, (2015)

En la gráfica 5, se observan los siguientes índices para la captura de carbono para los siguientes ecosistemas forestales: 1) bosque de encino: *quercus* 0.4726 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 2) bosque mixto pino - encino 0.4706 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 3) bosque de oyamel: *abies religiosa* 0.4735 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono. 4) bosque de pino: *pinus hartwegii* 0.4687 ton/ha índice de almacenamiento de carbono. 5) bosque mesófilo de montaña 0.4962 ton/ha de índice de almacenamiento de carbono.

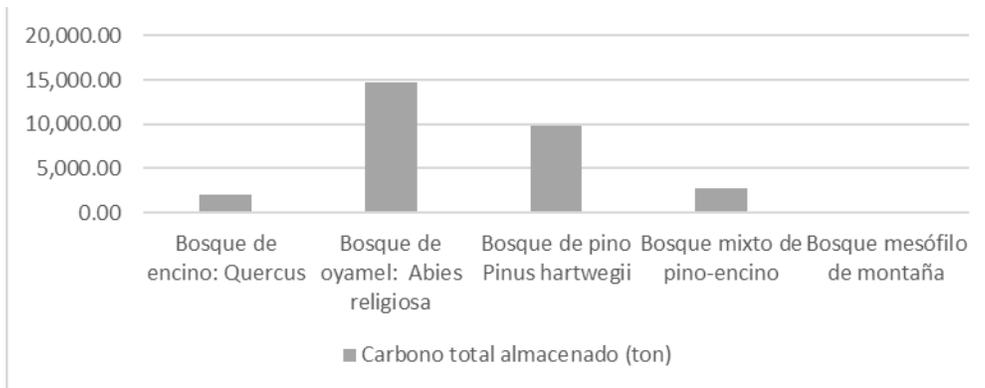
Gráfica 5. Índice de Almacenamiento de carbono por tipo de ecosistema (ton/ha) Parque Otomí Mexica, 2018



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa *et al.*, (2010); Jiménez *E.*, (2013) y Morfín, *et al.*, (2015)

En la gráfica 6, se observa el carbono total almacenado (ton) en los siguientes ecosistemas: 1) Bosque de encino: *quercus* 2,010.4 (ton). 2) Bosque mixto de pino - encino 2,717.2 (ton). 3) Bosque de oyamel: *abies religiosa* 14,660.0 (ton). 4) Bosque de pino *pinus hartwegii* 9,751.8 (ton). 5) Bosque mesófilo de montaña 197.0 (ton).

Gráfica 6. Carbono total almacenado (ton) en el Parque Otomí Mexica, 2018.



Fuente: elaboración propia con base en Figueroa *et al.*, (2010); Jiménez *E.*, (2013) y Morfín, *et al.*, (2015)

El suelo del bosque contiene alrededor de dos tercios del carbono en los ecosistemas forestales Dixon *et al.*, (1994). Esto fue comprobado ya que, la captura de carbono en el Parque Otomí – Mexica se refleja más en los ecosistemas

boscosos. La captura de carbono en el área de estudio quedo de la siguiente manera: bosques de oyamel 14,660.0 toneladas de carbono en segundo lugar, el bosque de pino con 9,751.8 toneladas de carbono y en tercer lugar el bosque de pino – encino con 2,717.2 toneladas de carbono.

3.4.2 Validación “in situ” de las características ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí-Mexica.

Las condiciones ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales que utilizó Morfín *et al.*, (2015) fueron basadas en técnicas de descripción sugeridas por INEGI, dadas las características externas que se apreciaron en campo, en primera instancia realiza un registro de la ubicación en el cual toma en cuenta lo siguiente (número, autor, fecha, estado de descripción, localidad). Posteriormente, identifica los factores formadores del suelo como son (clima, geoforma, uso de la tierra, vegetación, edad e historia del paisaje). Continúa con nivel de especie en el cual toma en cuenta la proximidad geográfica (ecorregión), rango diamétrico similar, mayor tamaño de muestra (n) y mayor coeficiente de determinación (R^2), lo aplica por género y tipo de vegetación.

A continuación, se presentan unas tablas de Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal para la obtención de carbono con base en la Estimación de Morfín *et al.*, (2015), las cuales están dentro de los parámetros de la zona de estudio, cabe mencionar que el estudio se analizó por nivel de especie, lo que implica unas variaciones.

El ecosistema de bosque de oyamel es el que predomina más en el Parque Otomí – Mexica, en recorridos en campo se determina que se desarrolla en ambientes con mayores niveles de humedad. A continuación, se describen las siguientes características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Oyamel (Tabla, 20)

Tabla 20. Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Oyamel

Tipo de ecosistema	Características	Parque Otomí – Mexica
 <p>Fotografía de Brenda Yazmin Reza Curiel. Localidad Temoaya, Estado de México, 2020.</p>	Grosor promedio de los árboles	40 a 150 cm.
	Altura de los árboles	25 a 50 metros
	Clima	Templado
	Precipitación	1,000 mm. anuales
	Temperatura	7 °C a 15 °C promedio anual
	Altitud	2,400 hasta 3,800 msnm
	Pendiente	22° a 43°

Fuente: Elaboración propia con trabajo de campo (2020)

El ecosistema de encino se desarrolla por compuestos de especies como son encino de hoja ancha (*Quercus rugosa*), encino prieto (*Quercus laeta*) y escobillo (*Quercus mexicana*) (CONABIO, 2018 en Villegas, 2020). Este ecosistema está constituido por formaciones densas. Se describen las siguientes características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Encino (Tabla, 21).

Tabla 21. Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Encino

Tipo de ecosistema	Características	Parque Otomí – Mexica
 <p>Fotografía de Brenda Yazmin Reza Curiel. Isidro Fabela, Estado de México, 2020.</p>	Grosor promedio de los árboles	1.50 cm.
	Altura de los árboles	30 metros
	Clima	Templado
	Precipitación	600 a 1,200mm
	Temperatura	12°C a 20°C
	Altitud	Menor de 3,300 msnm
	Pendiente	22° a 43°

Fuente: Elaboración propia con trabajo de campo (2020)

El ecosistema de *Pinus hartwegii* predomina en el municipio de Isidro Fabela, se caracteriza por mantener verde su follaje durante todo el año y presentar una corona amplia y redondeada. Se describen las siguientes características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de *Pinus hartwegii* (Tabla, 22).

Tabla 22. Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de *Pinus hartwegii*

Tipo de ecosistema	Características	Parque Otomí - Mexica
<p data-bbox="298 709 630 737">Bosque de <i>Pinus hartwegii</i></p>  <p data-bbox="298 1041 854 1098">Fotografía de Brenda Yazmin Reza Curiel. Localidad Isidro Fabela, Estado de México, 2020.</p>	Grosor promedio de los árboles	80 - 128 cm
	Altura de los árboles	31 metros
	Clima	Templado
	Precipitación	1,000 a 1,200 mm. anual
	Temperatura	5 °C y 12 °C
	Altitud	2,400 y 3,800 msnm
	Pendiente	43°

Fuente: Elaboración propia con trabajo de campo (2020)

El ecosistema de bosque de encino – pino se localizan principalmente en la zona norte del Parque Otomí – Mexica, principalmente en los municipios de Nicolás Romero y Villa del Carbón. Se describen las siguientes características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque de Encino - Pino (Tabla, 23).

**Tabla 23. Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal
Bosque de Encino - Pino**

Tipo de ecosistema	Características	Parque Otomí - Mexica
<p data-bbox="354 415 620 445">Bosque encino – pino</p>  <p data-bbox="354 785 945 842">Fotografía de Brenda Yazmin Reza Curiel. Villa del Carbón, Estado de México, 2020.</p>	Grosor promedio de los árboles	80 cm
	Altura de los árboles	30 metros
	Clima	Subhúmedos a templado húmedos
	Precipitación	600 y 1,000 mm
	Temperatura	12 °C y 23 °C
	Altitud	2,000 a los 3,400 msnm
	Pendiente	43°

Fuente: Elaboración propia con trabajo de campo (2020)

El ecosistema de bosque mesófilo de montaña se localiza en el municipio de Ocuilan, debido a que sus pendientes superan los 43° permite la generación de profundas cañadas con dirección norte-sur con clima templado-semifrío de la región Neártica lo que permite el desarrollo de densas formaciones arbóreas en distintos estratos que impide la penetración de rayos solares hasta su base (CONABIO, 2018). Se describen las siguientes características, ambientales y morfológicas del ecosistema forestal Bosque mesófilo de montaña (Tabla, 24).

**Tabla 24. Características ambientales y morfológicas del ecosistema forestal
Bosque mesófilo de montaña**

Tipo de ecosistema	Características	Parque Otomí - Mexica
<p data-bbox="380 384 737 411">Bosque mesófilo de montaña</p>  <p data-bbox="380 711 883 795">Fotografía de Aracely Rojas López en Villegas (2020) Cañadas de Ocuilan, Estado de México, 2016</p>	Grosor promedio	30 y 50 cm
	Altura de los árboles	15 a 35 m
	Clima	Templado húmedo
	Precipitación	1000 - 3000 mm
	Temperatura	12 °C y 23 °C
	Altitud	600 - 3,100 msnm
	Pendiente	43°

Fuente: Elaboración propia con trabajo de campo (2020)

3.4.3 Discusión sobre el servicio ecosistémico captura de carbono.

Haciendo una comparación de las características ambientales y morfológicas con el autor Aguirre y Jiménez (2007) y los datos retomados para el área de estudio de Morfín R. *et al.*, (2015), el índice de almacenado de carbono se comportó de la siguiente manera: para el bosque mixto de pino – encino hay una diferencia de almacenamiento de carbono de 0.0944 ton/has. En cuanto a las características ambientales y morfológicas la altura de los árboles, el clima, la temperatura y la altitud están dentro de los parámetros de los dos autores, en donde hay diferencia es en la precipitación, ver (Tabla, 25).

Comparando las características ambientales y morfológicas para los siguientes autores Morfín R. *et al.*, (2015); Figueroa *et al.*, (2010) y Aguirre Jiménez (2007) el bosque de encino (*Quercus*) la diferencia de almacenamiento de carbono es de 0.0117 ton/has. En cuanto a las características ambientales y morfológicas: el grosor promedio, la altura de los árboles, el clima, la precipitación, la temperatura, la altitud y la pendiente que usaron los dos autores son iguales, ver (Tabla, 26).

Haciendo un análisis con los autores Morfín R. *et al.*, (2015); Jiménez E. (2013) y Avedaño *et al.*, (2009), el bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) hay una diferencia de almacenamiento de carbono de 0.0087 ton/has. En cuanto a las características ambientales y morfológicas: el clima es el mismo, sin embargo, hay diferencias en el grosor promedio y en la altura de los árboles, ver (Tabla, 27)

Haciendo una comparación con los autores Morfín R. *et al.*, (2015); Galeana *et al.*, (2013) y Jiménez E., (2013), el Bosque de *Pinus hartwegii*, tiene una diferencia de almacenamiento de carbono de 0.005 ton/has. En cuanto a las características ambientales y morfológicas, dentro de los parámetros de los dos autores el clima es similar, a donde hay diferencia es en el grosor promedio, en la altura de los árboles y en la altitud, ver (Tabla, 28)

Por tanto, haciendo la comparación de los diferentes autores mencionados en el índice de almacenamiento de captura de carbono se identificó la diferencia en cada índice y las características ambientales y morfológicas utilizadas son básicamente similares, como se muestra a continuación.

Tabla 25. Índice de almacenamiento de carbono en el bosque mixto pino – encino con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas.

Autores	Validación propia <i>in situ</i>	Morfín R. <i>et al.</i>, (2015)	Aguirre y Jiménez (2007)
Tipo de Ecosistema	Bosque mixto pino - encino	Bosque mixto pino - encino	Bosque mixto pino - encino
Almacenamiento de carbono ton/has.	0.4706	0.4706	0.565
Grosor promedio	80 cm	-----	40 a 150 cm.
Altura de los árboles	30 metros	19 metros	20 - 30 metros
Clima	Subhúmedos a templado húmedos	Templado	Templado
Precipitación	600 y 1,000 mm	237mm.	1,000 mm. anuales
Temperatura	12 °C y 23 °C	9°C	5°C – 12°C
Altitud	2,000 a los 3,400 msnm	3,200msnm – 3,500msnm	3,200msnm – 3,500msnm
Pendiente	43°	-----	22° a 43°

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo y con base en Morfín R. *et al.*, (2015) y Aguirre & Jiménez (2007)

Tabla 26. Índice de almacenamiento de carbono en el bosque de encino con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas

Autores	Validación propia <i>in situ</i>	Morfín R. <i>et al.</i>, (2015)	Figueroa <i>et al.</i>, (2010)	Aguirre y Jiménez (2007)
Tipo de ecosistema	Bosque de encino: (<i>Quercus</i>)	Bosque de encino: (<i>Quercus</i>)	Bosque de encino: (<i>Quercus</i>)	Bosque de encino: (<i>Quercus</i>)
Almacenamiento de carbono ton/has.	0.4726	0.4726	0.4726	0.4843
Grosor promedio	1.50 cm.	-----	40 a 150 cm.	40 a 150 cm.
Altura de los árboles	30 metros	19 metros	20 - 30 metros	20 - 30 metros
Clima	Templado	Templado	Templado	Templado
Precipitación	600 a 1,200mm	237mm.	1,000 mm. anuales	1,000 mm. anuales
Temperatura	12°C a 20°C	9°C	5°C – 12°C	5°C – 12°C
Altitud	Menor de 3,300 msnm	3,200msnm – 3,500msnm	3,200msnm – 3,500msnm	3,200msnm – 3,500msnm
Pendiente	22° a 43°	-----	22° a 43°	22° a 43°

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo y con base en Figueroa *et al.*, (2010) y Aguirre & Jiménez (2007)

Tabla 27. Índice de almacenamiento de carbono en el bosque de oyamel con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas

Autores	Validación propia <i>in situ</i>	Morfín R. <i>et al.</i>, (2015)	Jiménez E. (2013)	Avedaño <i>et al.</i>, (2009)
Tipo de ecosistema	Bosque de oyamel: (<i>Abies religiosa</i>)			
Almacenamiento de carbono Ton/has.	0.4735	0.4735	0.4735	0.4648
Grosor promedio	40 a 150 cm.	-----	40 a 150 cm.	5.7 a 79 cm
Altura de los árboles	25 a 50 metros	19 metros	19 - 35 metros	6.8 a 45.5 metros
Clima		Templado	Templado	Templado – frío
Precipitación	1,000 mm. anuales	237mm.	600 a 1,200mm	-----
Temperatura	7 °C a 15 °C promedio anual	9°C	12°C – 20°C	-----
Altitud	2,400 hasta 3,800 msnm	3,200msnm.	3,200msnm – 3,500msnm	-----
Pendiente	22° a 43°	-----	22° a 43°	-----

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo y con base en Jiménez E., (2013) y Avedaño *et al.*, (2009)

Tabla 28. Índice de almacenamiento de carbono en el bosque *pinus hartwegii* con base en diferentes autores, características ambientales y morfológicas

Autores	Validación propia <i>in situ</i>	Morfín R. <i>et al.</i>, (2015)	Galeana <i>et al.</i>, (2013)	Jiménez E., (2013)
Tipo de ecosistema	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	Bosque de <i>Pinus hartwegii</i>	Bosque de <i>Pinus Hartwegii</i>	Bosque de <i>Pinus Hartwegii</i>
Almacenamiento de carbono Ton/has.	0.4687	0.4687	0.4737	0.4687
Grosor promedio	80 - 128 cm	-----	42.6 – 47.5 cm	40 – 150 cm
Altura de los árboles	31 metros	19 metros	1.30 metros	19 a 35 metros
Clima	Templado	Templado	Templado subhúmedo y semifrío subhúmedo	Templado
Precipitación	1,000 a 1,200 mm. anual	237mm.	-----	600 a 1,200 mm anuales
Temperatura	5 °C y 12 °C	9°C	-----	12°C - 20°C
Altitud	2,400 y 3,800 msnm	3,200msnm – 3,500msnm	2480msnm – 3860msnm	3,200msnm – 3500 msnm
Pendiente	43°	-----	-----	22° – 43°

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo y con base en Galeana *et al.*, (2013) y Jiménez E., (2013) pág. 137

3.5 Retención del suelo mediante la metodología de RUSLE en el Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014 y 2018.

La aplicación de la formula Ecuación Universal de la Pérdida del Suelo (RUSLE), se realizó en función del análisis de la retención de suelo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los diferentes factores de la RUSLE, para determinar la localización espacial de las zonas donde existen mayores rangos de pérdida de suelo, posteriormente se analiza que factores tienen mayor influencia en la erosión para identificar las zonas con menor retención del suelo.

Según (Vargas, 2015) el modelo RUSLE se presenta con letras mayúsculas a los factores que intervienen en el proceso de erosión del suelo de la siguiente manera: $A = R * K * LS * C$

Donde:

A, es la pérdida de suelo en t/ha año.

R, es el factor erosividad de la lluvia en $Mjmm/ha$ año.

K, es el factor erosionabilidad del suelo en $(t/ha)/(Mj.mm/ha h)$

L, es el factor longitud de la pendiente

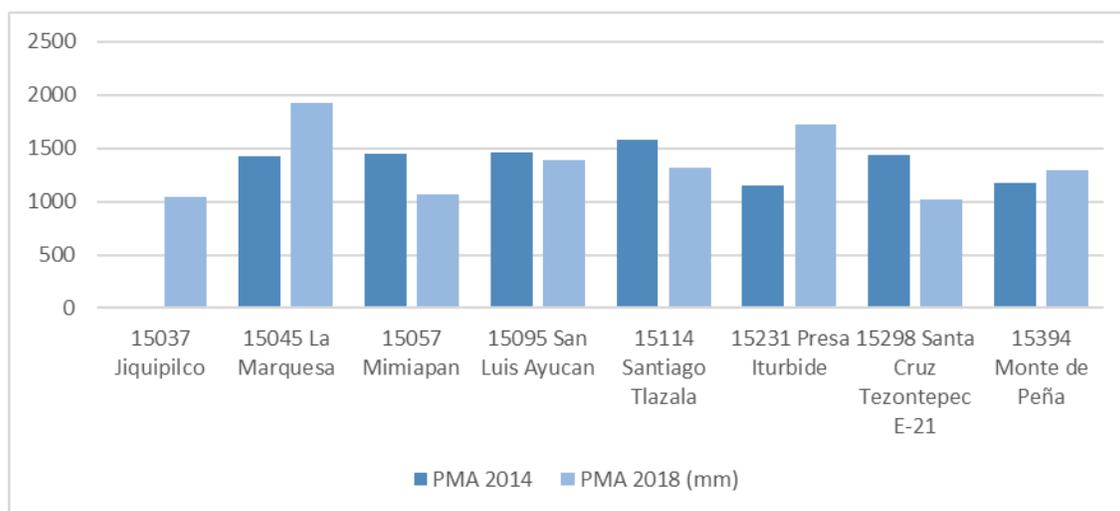
S, es el factor pendiente media del terreno

C, es el factor cobertura vegetal

3.5.1 Factor R. Erosividad de la lluvia.

El primer paso fue recopilar datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, posteriormente se descargaron los datos de precipitación media anual correspondientes a los años 2014 y 2018 de la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las cuales se observan en la (gráfica, 7).

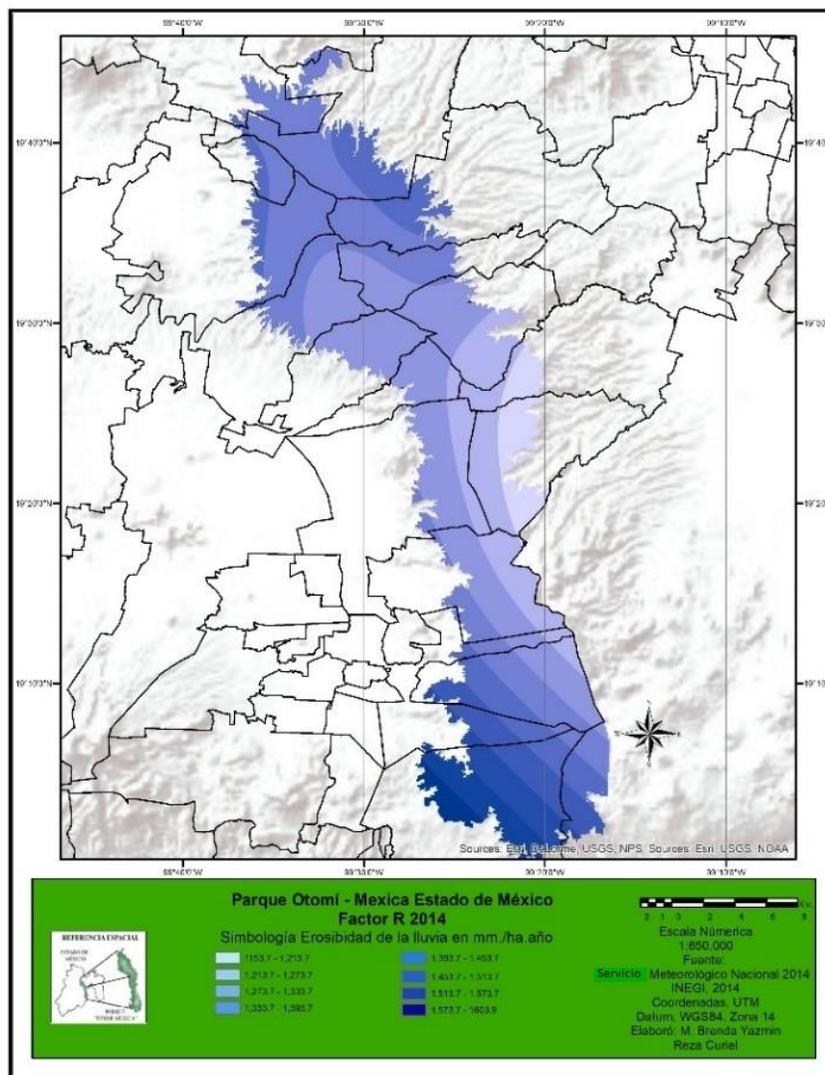
Gráfica 7. Precipitación media anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexico, Estado de México 2014 – 2018.



Fuente: elaboración propia con base en información del (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2019).

En la figura, 34 se observa que en el año 2014 la mayor erosividad (mm/ha año) se presenta en las zonas noreste, noroeste y suroeste, donde el efecto de la precipitación pluvial resultó más erosivo. Las zonas con mayor erosividad corresponden a las áreas de menor altitud y menores pendientes del Parque Otomí Mexica; en estas zonas se puede apreciar poca cobertura forestal. Sin embargo, la parte central del Parque es la zona donde la precipitación pluvial resultó ser menos erosivo, en esta zona se ubican las pendientes pronunciadas.

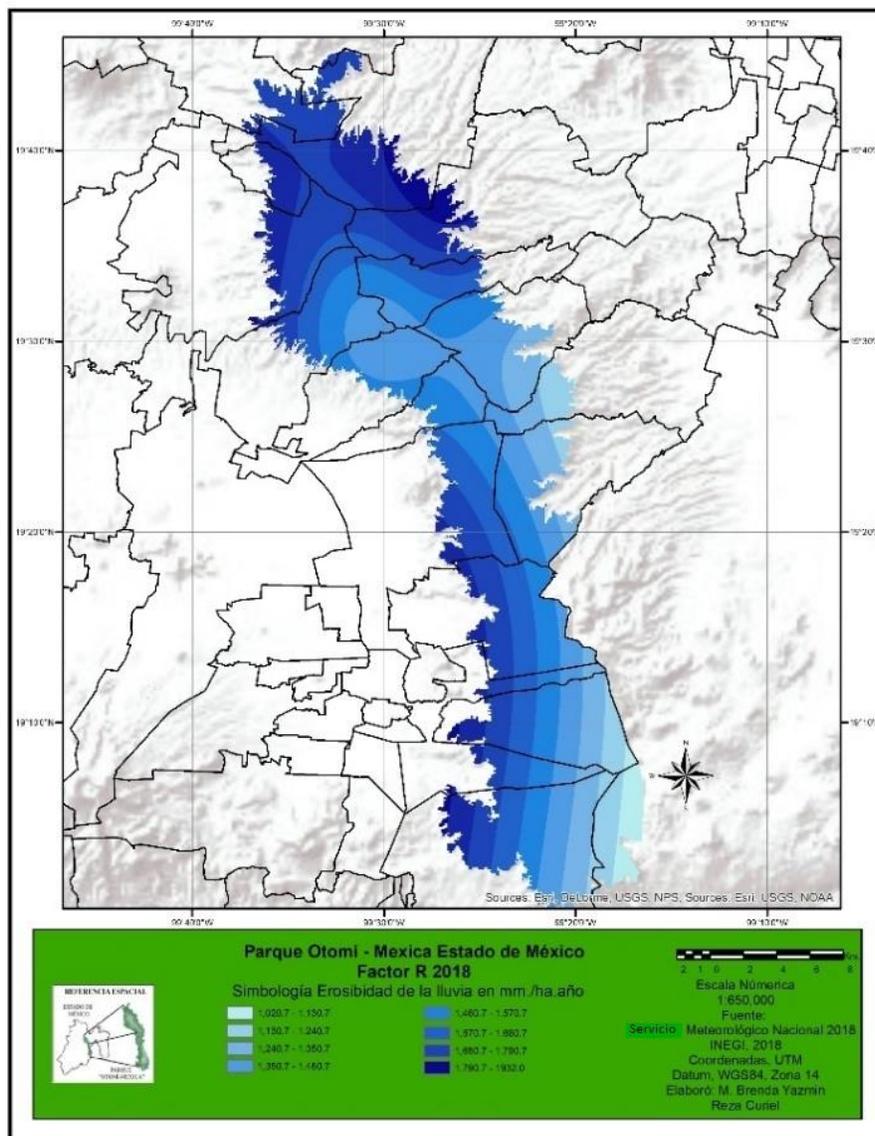
Figura 34. Factor R. Erosividad de la lluvia en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014.



Fuente: elaboración propia con base en Servicio Meteorológico Nacional e Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2014.

En la figura, 35 se observa que para el año 2018 las zonas noreste y noroeste muestran al igual que en 2014 la mayor erosividad; en la zona suroeste aumentó la erosividad. El efecto de la precipitación pluvial resultó más erosivo, después de cuatro años abarcando más área, en esta zona con las menores altitudes y las pendientes más bajas del Parque Otomí Mexica, en estas zonas se puede apreciar poca cobertura forestal. En la parte central del Parque se aprecian zonas donde la precipitación pluvial resultó ser más erosivo para este año.

Figura 35. Factor R. Erosividad de la lluvia en el Parque Otomí Mexica, Estado de México 2018

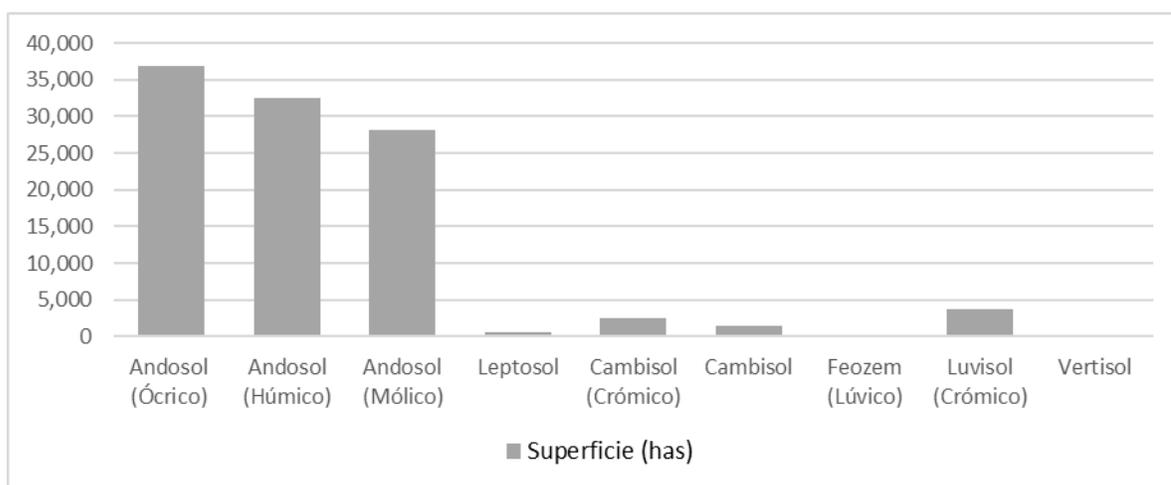


Fuente: elaboración propia con base en Servicio Meteorológico Nacional e Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018.

3.5.2 Factor K. Erosionabilidad del suelo.

Para la obtención de los datos sobre las características de los diferentes tipos de suelos se retomó la información consultada del INEGI (2014). A partir de la información cartográfica recopilada con escala 1; 50,000 se identificaron nueve tipos de suelo, a continuación, se presenta la superficie que ocupa cada uno de ellos: Andosol (ótrico) 36,780 hectáreas, andosol (húmico) 32,446 hectáreas, andosol (mólico) 28,112 hectáreas, leptosol 522 hectáreas, cambisol (crómico) 2,500 hectáreas, cambisol 1,450 hectáreas, feozem (lúvico) 104 hectáreas, luvisol (crómico) 3,744 hectáreas y vertisol 217 hectáreas. ver (gráfica, 8).

Gráfica 8. Superficies de los suelos en el Parque Otomí – Mexica Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014).

Los suelos de tipo Andosol son los más predominantes en el parque, están constituidos principalmente por cenizas, vidrios volcánicos y materiales piroclásticos, además son característicos de relieves montañosos. La textura que ocupa el tipo de suelo es la siguiente: Andosol (ótrico) 0.04 mm., andosol (húmico) 0.02 mm., andosol (mólico) 0.02 mm.

Los suelos de tipo leptosol en el área de estudio son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. La textura que ocupa es la siguiente: leptosol 0.079 mm.

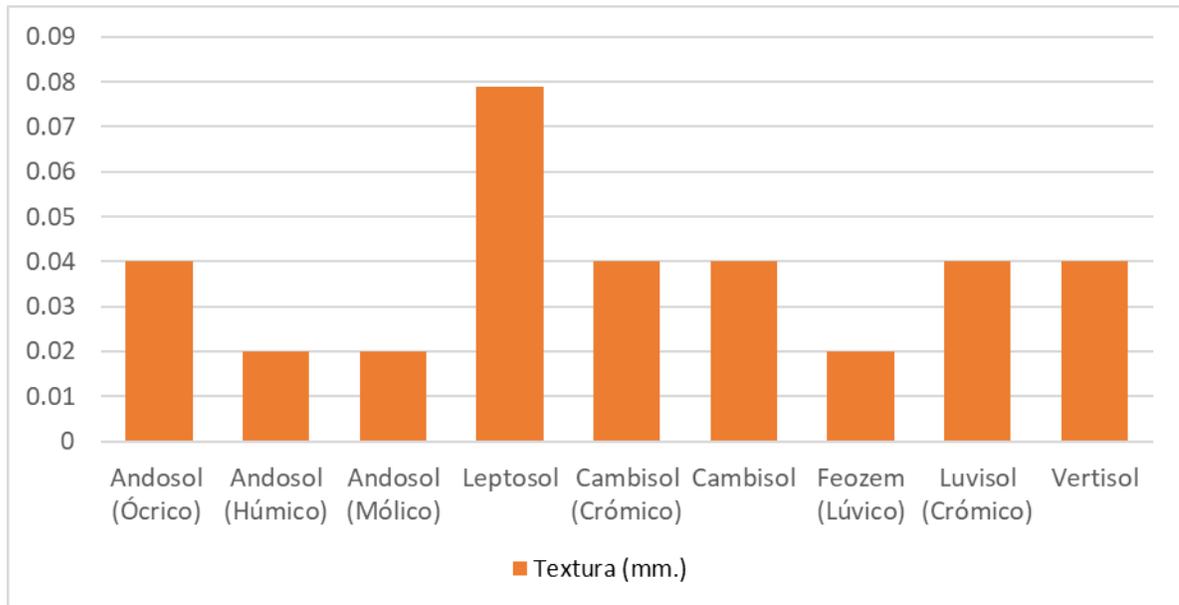
Los suelos de tipo Cambisol están ubicados en pequeñas porciones en las zonas centrales del parque, son considerados suelos jóvenes y poco desarrollados, esto como consecuencia de las condiciones climáticas, se distinguen por su alto contenido de nutrientes, sus rendimientos agrícolas varían de moderado a alto. La textura que ocupa es la siguiente: cambisol (crómico) 0.04mm., cambisol 0.04 mm.

Los suelos de tipo Feozem, se caracterizan por presentar una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y en nutrientes, además, están conformados principalmente por materiales no consolidados. La formación de estos suelos está asociada con los procesos de intemperismo de las rocas de origen ígneo extrusivo las cuales son frecuentes en el territorio. La textura que ocupa es la siguiente: feozem (lúvico) 0.02 mm.

Respecto a los suelos de tipo Luvisol, éstos se forman debido a las altas condiciones de humedad existentes en los ambientes del parque, así como por el material parental por lo que su origen está vinculado con procesos residuales. Estos suelos presentan una textura media, por lo que, sus condiciones de drenaje interno se ubican en un rango entre drenado a escasamente drenado. La textura que ocupa es la siguiente: luvisol (crómico) 0.04 mm.

Los tipos de suelo vertisol son suelos compuestos por arcilla, la textura que ocupa es la siguiente: vertisol 0.04 mm. Ver (gráfica, 9).

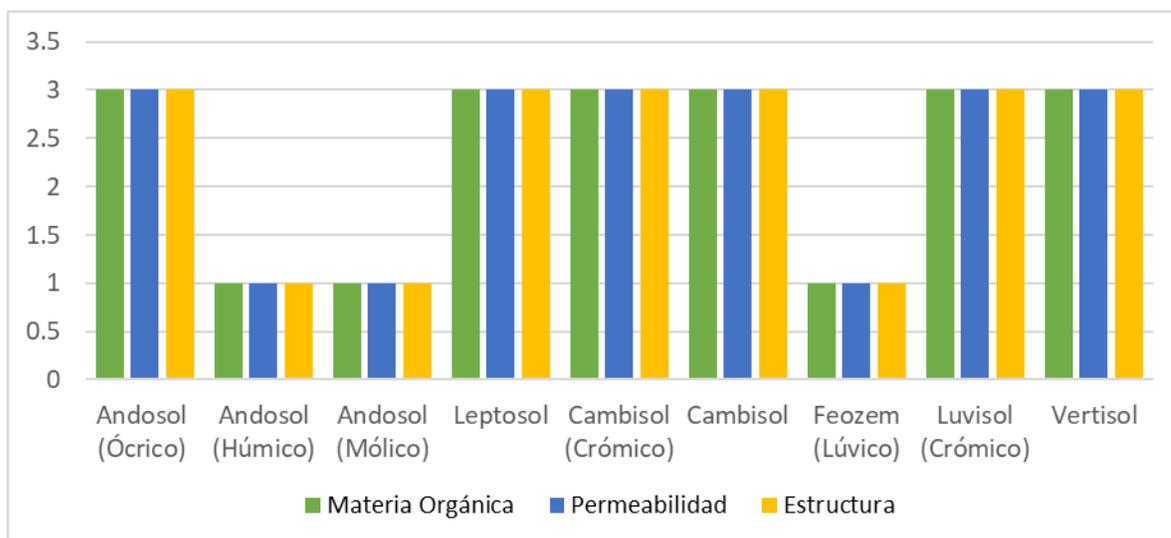
Gráfica 9. Textura de los suelos en el Parque Otomí – Mexica Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014).

A continuación se presenta la materia orgánica, permeabilidad y estructura de cada tipo de suelo del área de estudio: Andosol (Ócrico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 3, andosol (húmico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 1, andosol (mólico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 1, leptosol materia orgánica, permeabilidad y estructura 1, cambisol (crómico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 3, cambisol materia orgánica, permeabilidad y estructura 3, feozem (lúvico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 1, luvisol (crómico) materia orgánica, permeabilidad y estructura 3 y vertisol materia orgánica, permeabilidad y estructura 3. Ver (gráfica, 10).

Gráfica 10. Materia Orgánica, Permeabilidad y Estructura de los suelos en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México



Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2014).

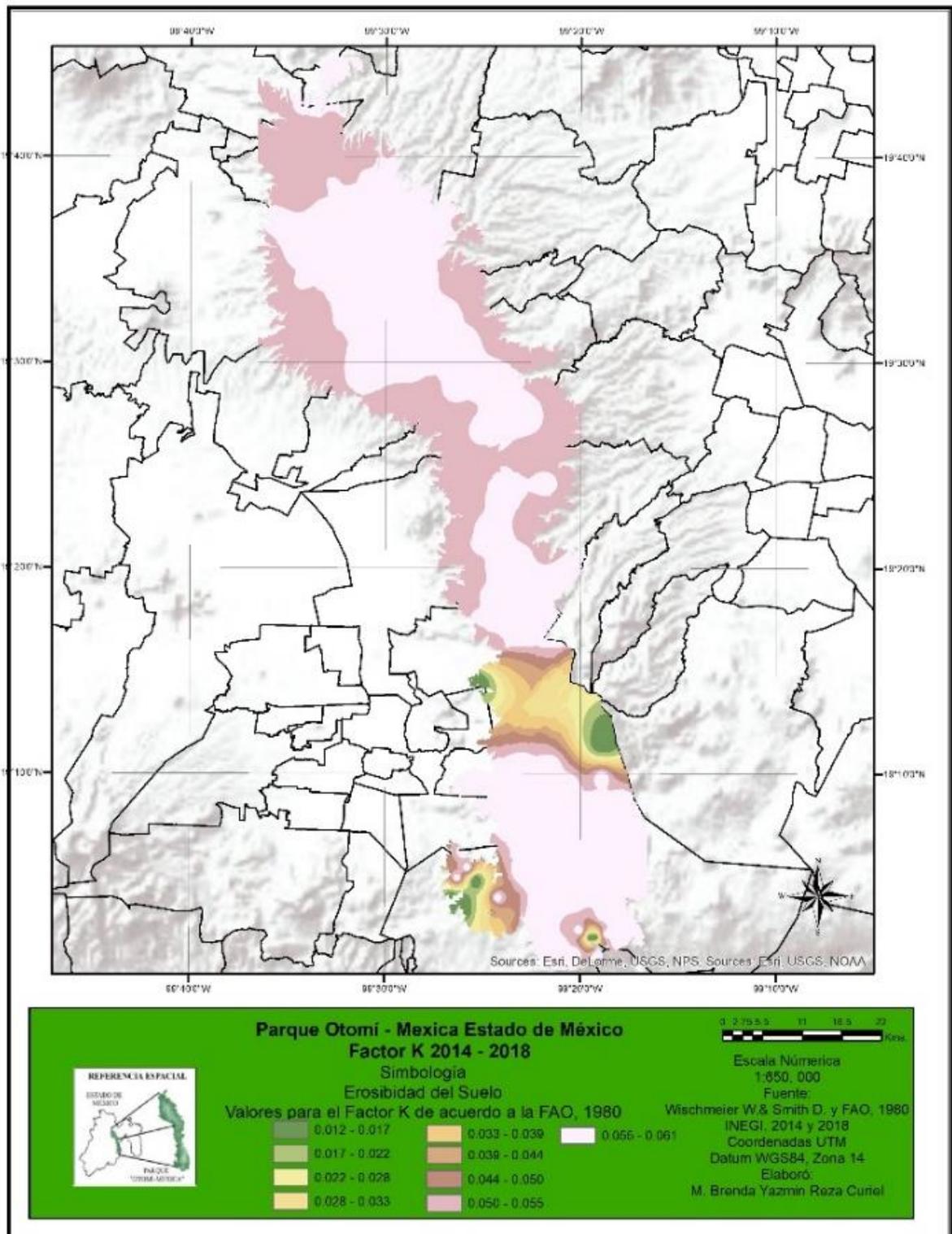
Posteriormente para la estimación del factor K, se retomó el método de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 1980). Utiliza una metodología de cálculo a partir de la textura superficial (fina, media y gruesa) y la unidad de suelo a que pertenece según la FAO/UNESCO.

Los valores del factor k para el área de estudio son los siguientes: Andosol (Ócrico) 0.051, Andosol (Húmico) 0.061, Andosol (Mólico) 0.061, Leptosol 0.012, Cambisol (Crómico) 0.051, Cambisol (Éutrico) 0.051, Feozem (Lúvico) 0.061, Luvisol (Crómico) 0.051 y Vertisol 0.051.

Una vez asignados los valores correspondientes se aplicó la herramienta poligon to raster de Arcgis con los valores correspondientes al factor K, el resultado fue una imagen raster. Esta imagen se empleó para los dos años 2014 y 2018.

En la figura 36, se observa la erosionabilidad del suelo (Factor K) del área de estudio, los valores calculados son los siguientes: andosol ócrico (0.051), andosol húmico (0.061), andosol mólico (0.061), feozem Lúvico (0.061), luvisol Crómico (0.051), leptosol (0.012), vertisol (0.051). En general son suelos con una gran cantidad de materia orgánica protegida por cubierta vegetal; otra de sus características es que pueden contener gran cantidad de agua por estar constituidos de un alto porcentaje de arcillas, y por lo tanto son suelos fácilmente erosionables. Los valores más altos de erosionabilidad del suelo corresponden al tipo de suelo andosol húmico, andosol mólico y feozem lúvico, que presentan mayor susceptibilidad a sufrir erosión; estos tipos de suelo se localizan en la mayor parte del área de estudio; y no se observaron diferencias entre los dos años estudiados (2014 y 2018).

Figura 36. Factor K. Erosionabilidad del suelo en el Parque Otomí- Mexica del Estado de México 2014 y 2018

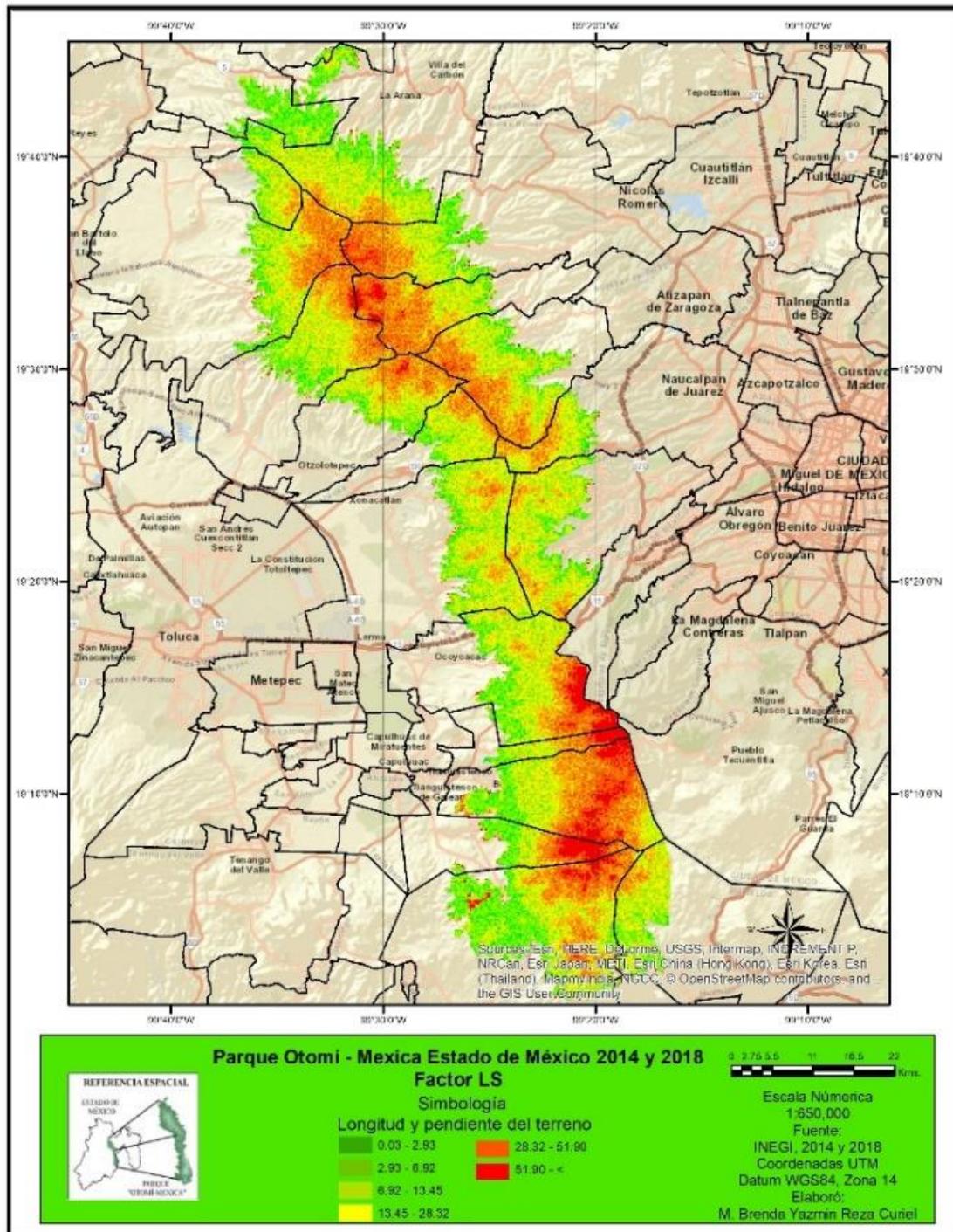


Fuente: Elaboración propia con base en (Wischmeier Walter & Smith Dwight, 1978; FAO,1980 e INEGI, 2014 y 2018)

3.5.3 Factor LS. Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno.

Los datos de longitud de la pendiente y pendiente media del terreno se obtuvieron a partir de las curvas de nivel de la carta topográfica con clave E14A-48. En la figura 37, se observa que no se presentaron cambios entre los años 2014 y 2018. En la zona norte y sur se encuentran las pendientes más pronunciadas del Parque Otomí Mexica, la longitud de la pendiente y pendiente media del terreno, dependen de las formas del relieve del Parque. Se observa que en las zonas donde la longitud de la pendiente y pendiente media del terreno tienen los valores altos, los accidentes topográficos las hacen más susceptibles al proceso erosivo.

Figura 37. Factor LS. Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno en el Parque Otomí –Mexica del Estado de México 2014 y 2018



Fuente: Elaboración propia con base en INEGI. (2014 y 2018)

3.5.4 Factor C. Cobertura vegetal

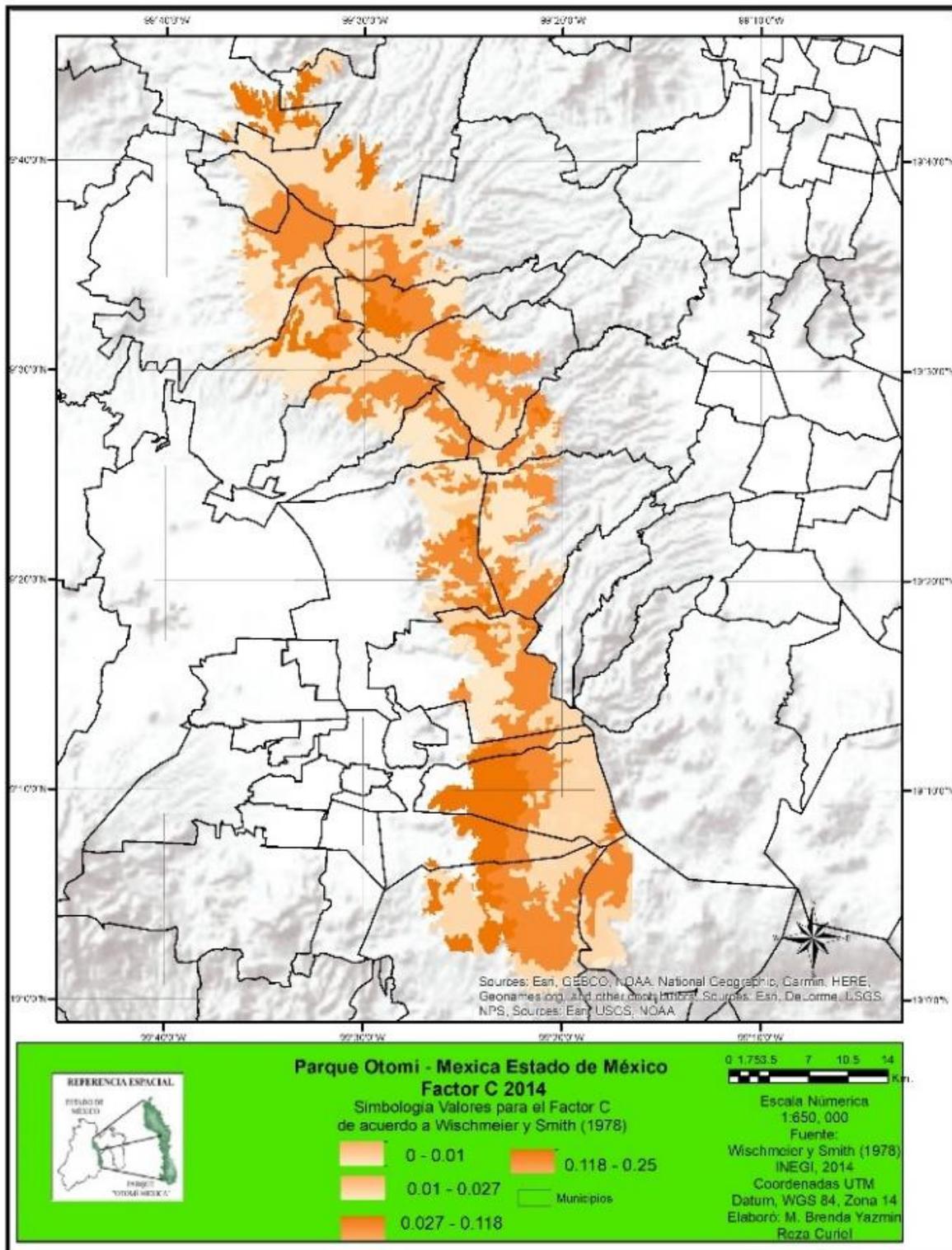
Para la obtención de datos de la cobertura vegetal se retomó la carta de uso del suelo del INEGI para los años 2014 y 2018. Por medio de la clasificación, cuantificación y representación cartográfica, se identificaron diez distintos tipos de usos de suelo y vegetación las cuales son: 1) Agricultura de riego, 2) agricultura de temporal, 3) asentamientos humanos, 4) bosque de pino, 5) bosque de encino, 6) bosque de oyamel, 7) bosque pino- encino, 8) bosque mesófilo de montaña, 9) pastizal inducido y 10) agricultura de riego.

En la figura 38, se observa que en el año 2014 se identificaron cuatro rangos de cobertura vegetal los cuales son los siguientes: 1) 0 – 0.01, 2) 0.01 – 0.027, 3) 0.027 – 0.188 y 4) 0.188 – 0.25

1) 0 – 0.01 cuerpos de agua y vegetación, de 2) 0.01 – 0.027 agricultura de riego, pastizal inducido, bosque mesófilo de montaña y asentamientos humanos. 3) 0.027 – 0.188 bosque de pino – encino, bosque de encino, bosque de pino. 4) 0.188 – 0.25 corresponde al bosque de oyamel y agricultura de temporal. Dichos valores indican la capacidad de retención del suelo que tienen las diferentes coberturas vegetales. Entre más se acerque su valor a cero³, indica que el suelo en el parque tiene una mayor cobertura vegetal que le permite protegerse de la lluvia y así disminuir el efecto de la erosión hídrica. Las mayores coberturas y protección de suelo se observan en los ecosistemas de bosque de pino, agricultura de temporal y bosque de pino – encino, localizándose al noreste, noroeste, sureste y suroeste.

³El valor cero indica mayor cobertura vegetal y el valor uno indica nula cobertura vegetal.

Figura 38. Cobertura vegetal (Factor C) en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014



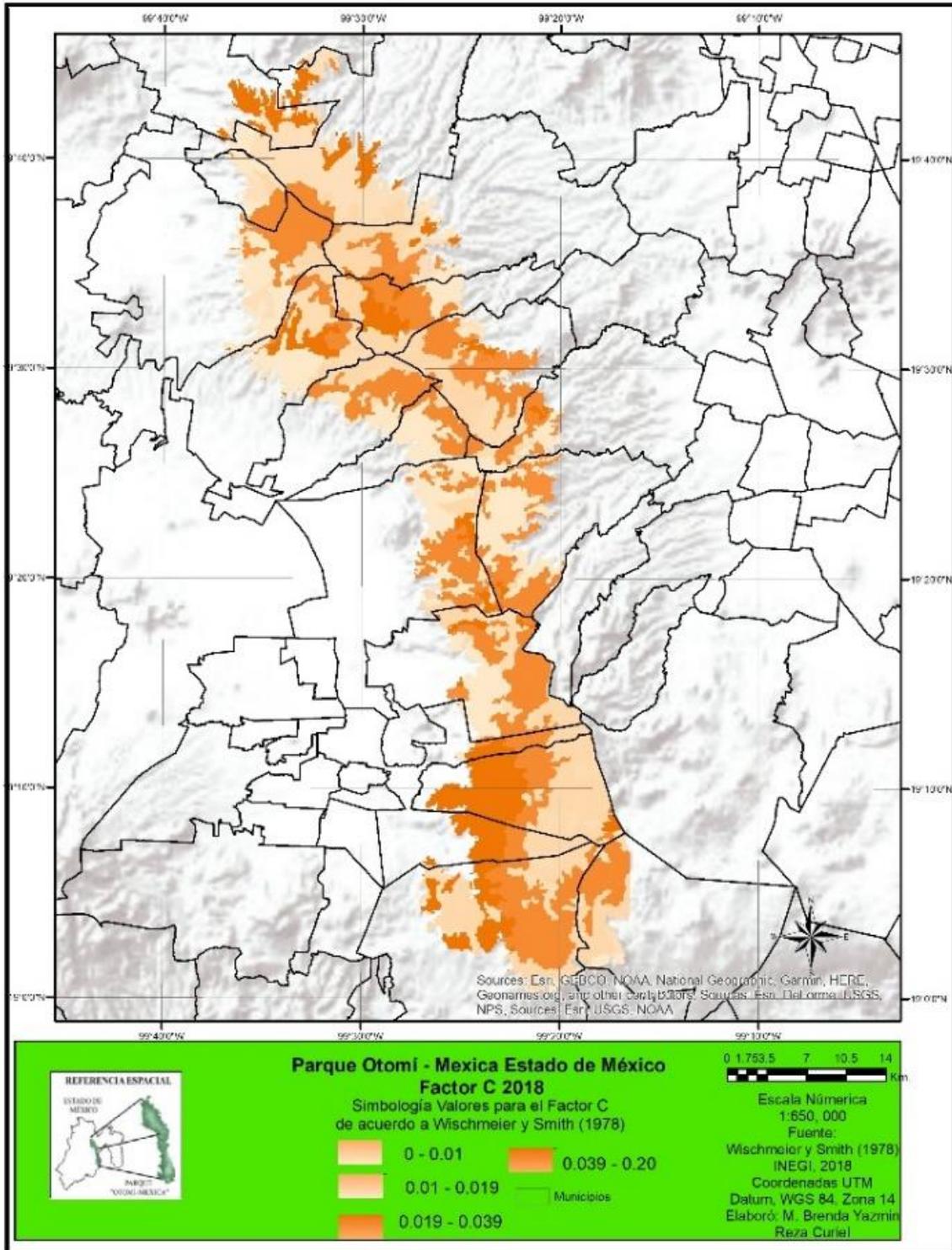
Fuente: Elaboración propia con base en (Wischmeier Walter & Smith Dwight, 1978 e INEGI 2014)

En la figura 39, se observa que en el año 2018 se identificaron cuatro rangos: 1) 0 – 0.01, 2) 0.01 – 0.019, 3) 0.019 – 0.039 y 4) 0.039 – 0.20.

1) 0 – 0.01 cuerpos de agua y vegetación. 2) 0.01 – 0.019 agricultura de riego, pastizal inducido, bosque mesófilo de montaña y asentamientos humanos. 3) 0.019 – 0.039 bosque de pino – encino, bosque de encino, bosque de pino. 4) 0.039 – 0.20 bosque de oyamel y agricultura de temporal. Dichos valores indican la capacidad de retención del suelo que tienen las diferentes coberturas vegetales. Entre más se acerque su valor a cero⁴, indica que el suelo en el parque tiene una mayor cobertura vegetal que le permite protegerse de la lluvia y así disminuir el efecto de la erosión hídrica. Las mayores coberturas y protección de suelo se observan en los ecosistemas de bosque de pino – encino, bosque de pino y agricultura de temporal, localizándose al noreste, noroeste, sureste y suroeste.

⁴El valor cero indica mayor cobertura vegetal y el valor uno indica nula cobertura vegetal.

Figura 39. Cobertura vegetal (Factor C) en el Parque Otomí - Mexica del Estado de México 2018



Fuente: Elaboración propia con base en (Wischmeier Walter & Smith Dwight, 1978 E INEGI 2018)

3.5.5 Erosión del suelo en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014.

Una vez obtenidos los diferentes factores R erosividad de lluvia, K erosionabilidad del suelo, LS longitud de la pendiente y pendiente media del terreno y C cobertura vegetal, correspondientes a la Ecuación RUSLE. En formato raster para cada factor se multiplicaron los valores mediante la herramienta Map Algebra en Arcgis.

Posteriormente se clasificaron cinco rangos diferentes de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2019).

De acuerdo con la figura 40, el primer rango (0 – 2 ton. de suelo erosionado por hectárea) representa la nula existencia de erosión del suelo, los ecosistemas que la presentan son; bosque de pino, agricultura de temporal y bosque de pino – encino que se localizan en la zona norte, sur y centro abarcando casi toda el área de estudio, los principales factores para que exista nula erosión en estas zonas es debido a que existen menores pendientes lo que genera mayor desarrollo y protección del suelo y en estas zonas existen menores precipitaciones, lo que propicia a ser menos erosivo, y por tanto mayor retención de suelo.

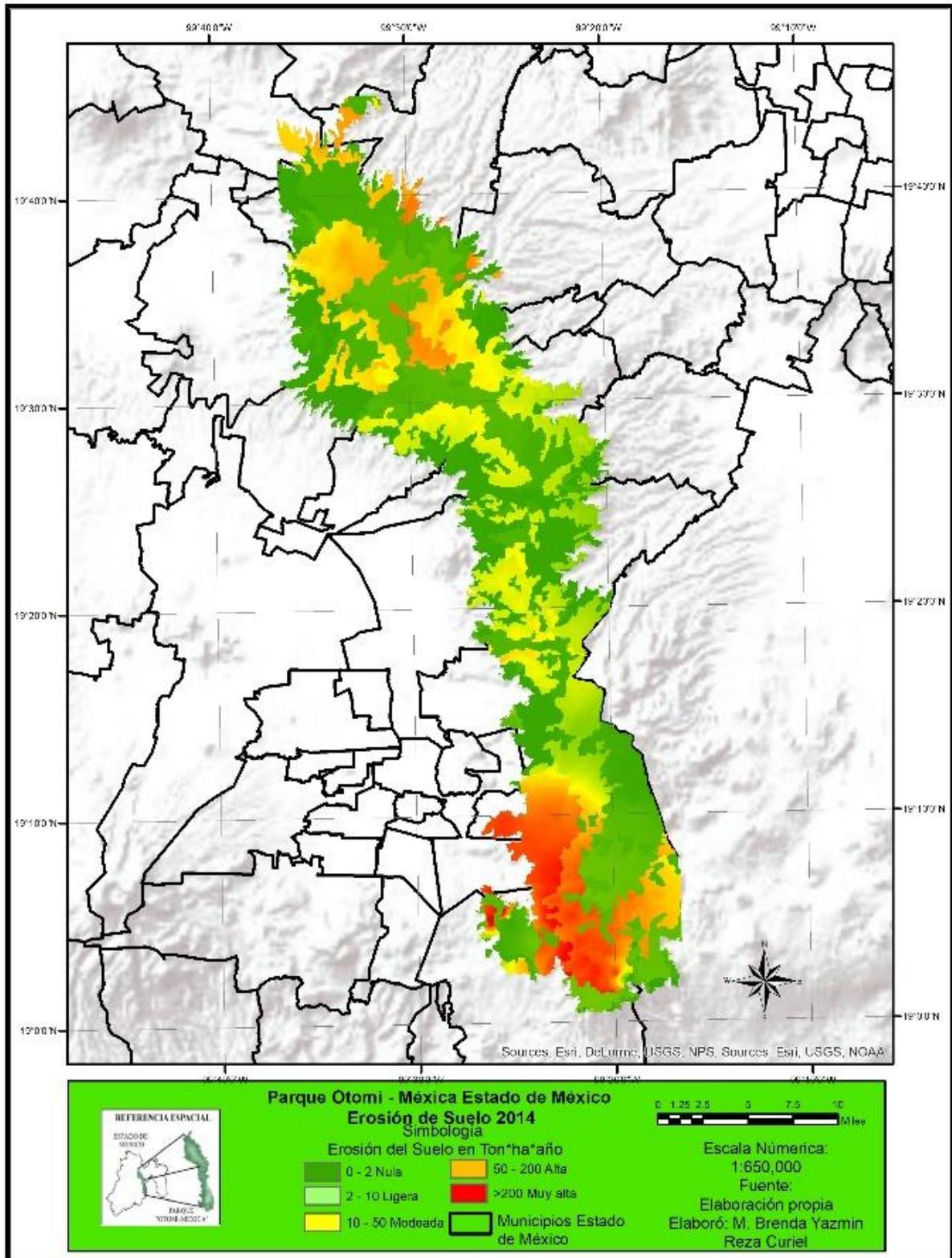
El segundo rango (2 – 10 ton. ha⁻¹) representa una erosión ligera, los ecosistemas afectados son; bosque de pino, agricultura de temporal y bosque de pino – encino; que se localizan con menor frecuencia en las zonas norte, centro y sureste de la zona de estudio, donde terminan los valles fluviales. El tercer rango (10 – 50 ton. ha⁻¹) representa la erosión moderada, que se localiza en la parte norte, centro y en menor proporción al sur, esta se observa en zonas donde comienzan a desarrollarse las altiplanicies.

El cuarto rango (50 – 200 ton. ha⁻¹) muestra erosión alta; los ecosistemas que la presentan son el bosque de encino, bosque de oyamel y bosque de encino – pino, que se localizan al norte, sureste y suroeste, teniendo como patrón similar al factor

R, erosividad de la lluvia y el factor LS longitud de la pendiente y pendiente media del terreno, donde destacan las mayores altitudes y pendientes.

El quinto rango (>200 ton. ha-1) muestra erosión muy alta; los ecosistemas con mayor erosión son el bosque de oyamel, bosque de encino y la agricultura de temporal, que se localizan en la parte norte, sureste y suroeste del área de estudio, donde también se presentan las mayores pendientes de la zona de estudio; y son las zonas con menor retención de suelo.

Figura 40. Erosión del suelo en el Parque Otomí - Mexica del Estado de México 2014



Fuente: Elaboración propia, 2014

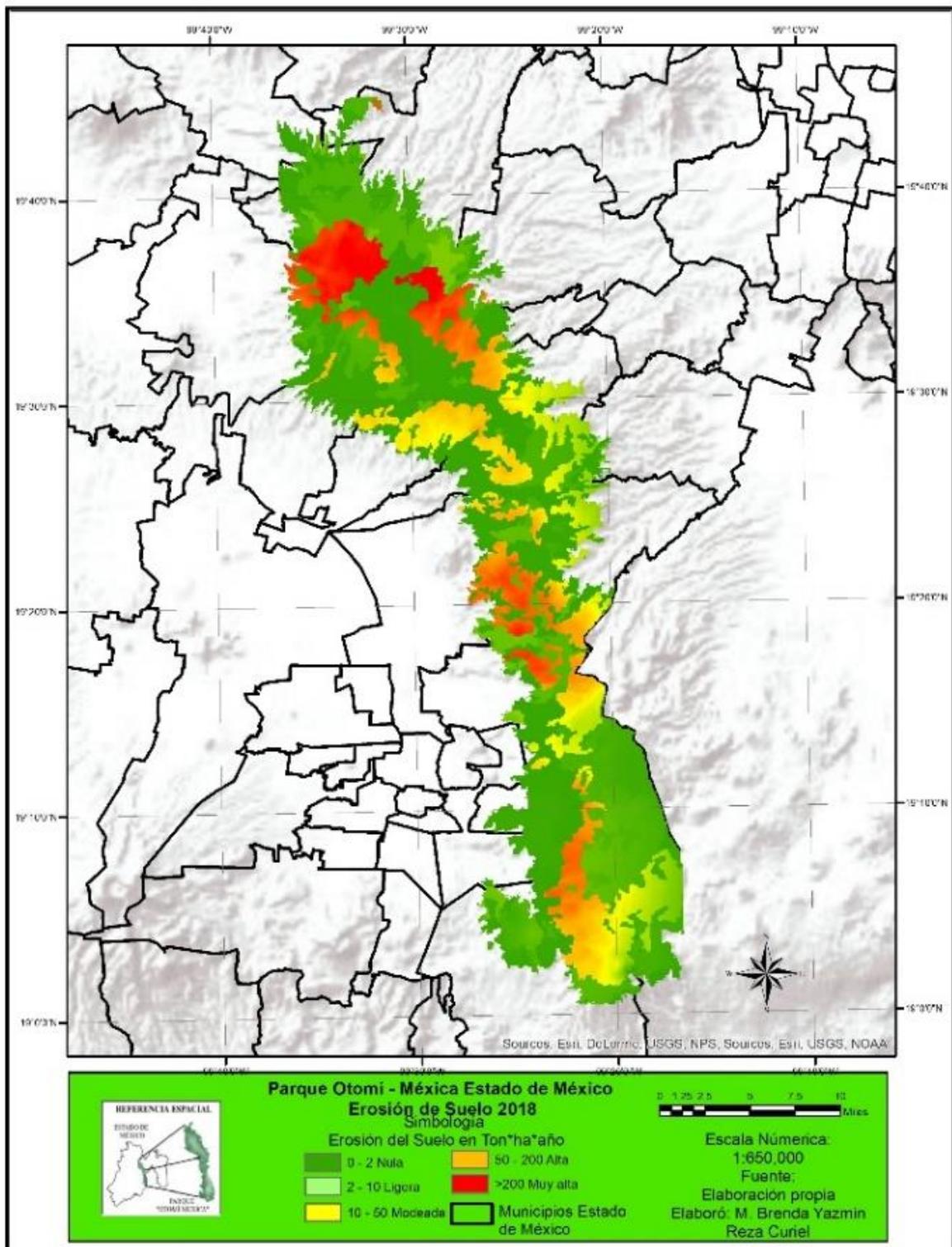
3.5.6 Erosión del suelo en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2018

De acuerdo con la figura 41, el primer rango (0 – 2 toneladas de suelo erosionado por hectárea) representa la nula existencia de erosión del suelo, que se localiza en las zonas norte, sur y centro abarcando casi toda el área de estudio, los principales factores para que exista nula erosión en estas zonas es debido a que existen menores pendientes, lo que genera mayor desarrollo y protección del suelo, así mismo en estas zonas se presentan menores precipitaciones, lo que propicia a que sean menos erosivos. Estas son las zonas con mayor capacidad de retención de suelo porque contiene gran cantidad de agua por estar constituidos de un alto porcentaje de arcillas.

El segundo rango (2 – 10 ton. ha⁻¹) representa la erosión ligera; los ecosistemas que la presentan son el bosque de pino – encino, bosque de pino y agricultura de temporal, y se localizan con menor frecuencia en las zonas noreste y sureste del área de estudio, donde terminan los valles fluviales. El tercer rango (10 – 50 ton. ha⁻¹) representa la erosión moderada, los ecosistemas afectados son el bosque de oyamel y la agricultura de temporal; se localizan en las zonas noreste, noroeste y sureste, donde comienzan a desarrollarse las altiplanicies.

El cuarto rango (50 – 200 ton. ha⁻¹) muestra la erosión alta; el ecosistema más afectado es el bosque de oyamel, que se localiza al suroeste, centro y noroeste; y presenta como patrón similar al factor R, erosividad de la lluvia y el factor LS longitud de la pendiente y pendiente media del terreno; donde destacan las mayores altitudes y pendientes. Por último, el quinto rango (>200 ton. ha⁻¹) representa la erosión muy alta, los ecosistemas con mayor erosión son; agricultura de temporal, bosque de oyamel y bosque de encino, los cuales se localizan al norte y centro del área de estudio, en este rango hay mayores pendientes, su comportamiento también se debe al tipo de suelo en el área de estudio andosol húmico, andosol mólico y feozem lúvico, los cuales presentan mayor susceptibilidad a sufrir erosión por la menor capacidad de retención de suelo.

Figura 41. Erosión del suelo en el Parque Otomí - Mexica Estado de México 2018

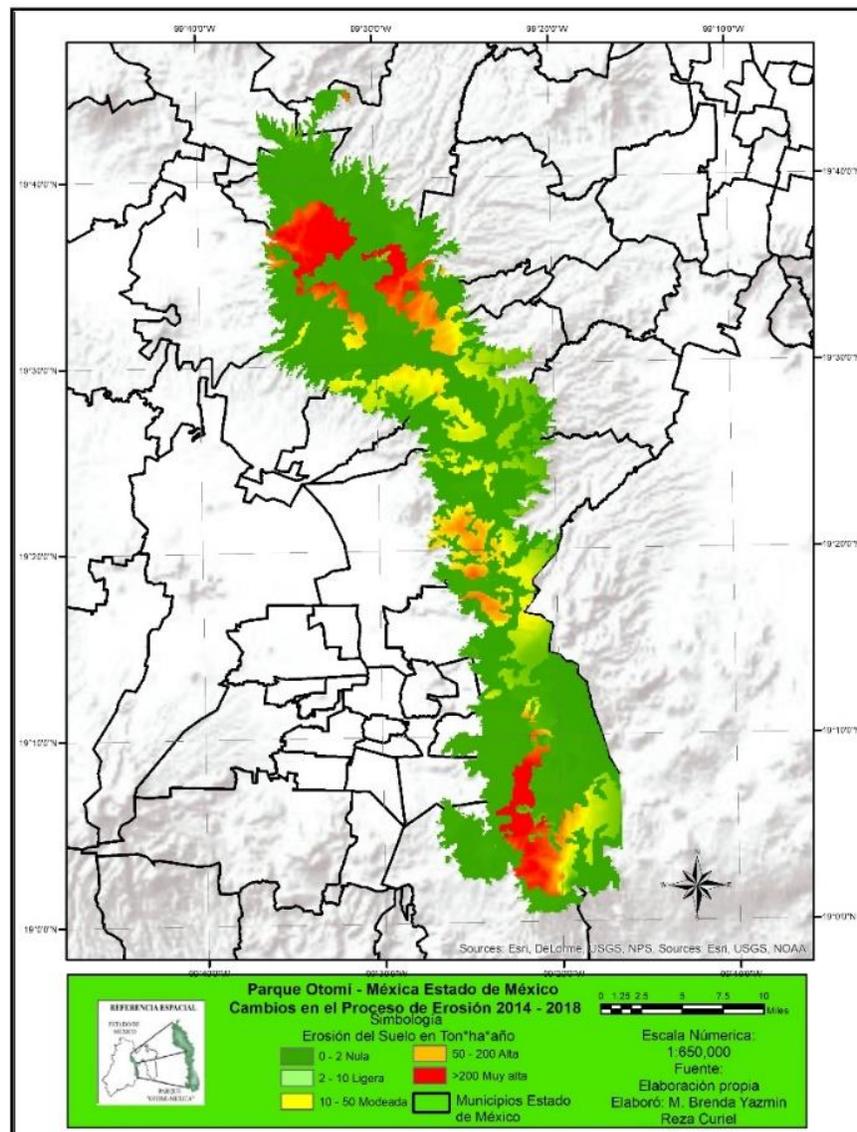


Fuente: Elaboración propia, 2018

3.5.7 Cambios en el proceso de erosión en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014 y 2018.

Como se visualiza en la figura 42, los cambios en el proceso de erosión en el periodo, para el área de estudio, se presentan con mayor intensidad en las zonas norte, sur y centro; al norte pasa de moderada a muy alta y aumenta dos rangos, en el sur el cambio fue de muy alta a alta y disminuye un rango; en el centro fue de moderada a alta y aumenta un rango.

Figura 42. Cambios en el proceso de erosión en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 y 2018



Fuente: Elaboración propia, 2014 – 2018

3.5.8 Validación de cambios en el proceso de erosión en el parque otomí – mexicana, estado de México.

En la tabla 29, se muestran los datos obtenidos de diferentes autores con la finalidad de verificar que la metodología que se ocupó cuenta con características ambientales y morfológicas que coinciden en el clima, temperatura, precipitación, altitud y pendiente, los datos de los diferentes autores están dentro de mismo rango que el área de estudio.

Tabla 29. Características ambientales y morfológicas de diferentes autores

Características ambientales y morfológicas	Area de estudio Parque Otomí Mexica	Flores I. (2016)	COLPOS (1991)	Vargas Lomelín J. (2015)
Clima	-Templado Subhúmedo C (w2) (w) -Semifrío Subhúmedo C (E) (w2) (w) Frio	- A Tropical lluvioso - C templado lluvioso	-Templado subhúmedo C (w2) (w) -Semifrío subhúmedo C (E) (w2) (w)	-Templado subhúmedo Cw2
Temperatura	12°C a 20°C	15°C a 28°C	18° y 22° C	12° y 18° con un régimen de lluvias durante el verano
Precipitación	600 a 1,200mm	-----	400 a 1,375 mm	600 a 1,200mm
Altitud	Menor de 3,300 msnm	1,500 a 3,000 msnm	1,500 a 2600 msnm	1,500 a 3,000 msnm
Pendiente	22° a 43°	22° a 48°	22° a 43°	20° a 45°

Fuente: elaboración propia con base en Flores I. (2016); COLPOS (1991) y Vargas Lomelín J. (2015)

En la tabla 30, se muestra el factor C en base a diferentes autores, para la verificación de la metodología ocupada, en la cual Wischmeier y Smith (1978) y Flores (2016) coinciden con los valores proporcionados al área de estudio en los siguientes ecosistemas: bosque de pino – encino, pastizal inducido, bosque de pino, bosque de encino, bosque de coníferas, agricultura de temporal, cuerpos de agua, agricultura de riego y bosque mesófilo de montaña. Sin embargo, para COLPOS (1991) sólo coincide con bosque de pino y en todos los ecosistemas no coinciden.

Tabla 30. Factor C con base en diferentes autores

Factor C	Area de estudio Parque Otomí Mexico	Wischmeier y Smith (1978)	Flores I. (2016)	COLPOS (1991)
Bosque de pino - encino	0.0200	0.0200	0.0200	0.0040
Pastizal inducido	0.027	0.027	0.027	0.2600
Bosque de pino	0.0400	0.0400	0.0400	0.0400
Bosque de encino	0.1880	0.1880	0.1880	0.0040
Bosque de conífera	0.2000	0.2000	0.2000	-----
Agricultura de temporal	0.2500	0.2500	0.2500	0.3900
Cuerpo de agua	0.0010	0.0010	0.0010	0
Agricultura de riego	0.0040	0.0040	0.0040	0.2016
Bosque mesófilo de montaña	0.002	0.002	0.002	0.0040
Bosque de Oyamel	-----	-----	-----	0.0040

Fuente: Elaboración propia con base en Flores I. (2016); COLPOS (1991) y Vargas L. (2015)

En la tabla, 31 se muestra el factor K con diferentes autores, para la verificación de la metodología ocupada en la cual coinciden en la materia orgánica y textura.

Tabla 31. Factor K con base en diferentes autores

Factor K	Materia Orgánica	Area de estudio Parque Otomí Mexica	Wischmeier y Smith (1978)	Flores I. (2016)	COLPOS (1991)
		Textura	Textura	Textura	Textura
Andosol (Ócrico)	Alta (3)	Media (0.040)	Media (0.040)	-----	Media 0.040
Andosol (Húmico)	Baja (1)	Media (0.020)	Media (0.020)	-----	Media 0.020
Andosol (Mólico)	Baja (1)	Media (0.020)	Media (0.020)	-----	Media 0.020
Leptosol	Alta (3)	Media (0.079)	Media (0.079)	-----	-----
Cambisol (Crómico)	Alta (3)	Media (0.040)	Media (0.040)	Media 0.04	Media 0.040
Cambisol (Étrico)	Alta (3)	Media (0.040)	Media (0.040)	Media 0.04	Media 0.040
Feozem (Lúvico)	Baja (1)	Media (0.020)	Media (0.020)	Media 0.02	-----
Luvisol (Crómico)	Alta (3)	Media (0.040)	Media (0.040)	Media 0.04	Media 0.040
Vertisol	Alta (3)	Media (0.040)	Media (0.040)	Media 0.04	-----

Fuente: Elaboración propia, con base en Wischmeier y Smith (1978); Flores I. (2016) y COLPOS (1991)

3.5.9 Discusión sobre el servicio ecosistémico retención de suelos, basado en los cambios en el proceso de erosión en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 - 2018.

Los ecosistemas con mayores cambios en el proceso de erosión tanto para el año 2014 y 2018 fueron: bosque de oyamel, bosque de encino y agricultura de temporal, que se localizan en zonas con menor retención de suelo, esto es que a medida que aumenta longitud de la pendiente y pendiente media del terreno, aumenta significativamente el grado de erosión. Las áreas más afectadas se localizaron geográficamente por medio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el software Arc Map ^{10.4} con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo RUSLE lo cual, demostró la utilidad de dicha tecnología para el análisis, evaluación y representación cartográfica de la distribución espacial de la erosión. Los resultados demuestran una visión global a gran escala de las áreas con probabilidad de erosión y en contraparte a la mayor retención del suelo en el Parque Otomí Mexica lo que permite tomar decisiones para las políticas de

conservación y desarrollo sustentable del recurso suelo, para enfrentar la problemática del deterioro ambiental, así como conservar sus funciones principales como son producción agrícola, reserva genética, componente básico para la estabilidad de los ecosistemas. Entendiendo que el desarrollo sustentable es una función de crecimiento económico, equidad y sustentabilidad ambiental, filtración, amortiguación y transformación de diversas sustancias, lo que confiere al suelo un papel primordial en la lucha contra la contaminación ambiental.

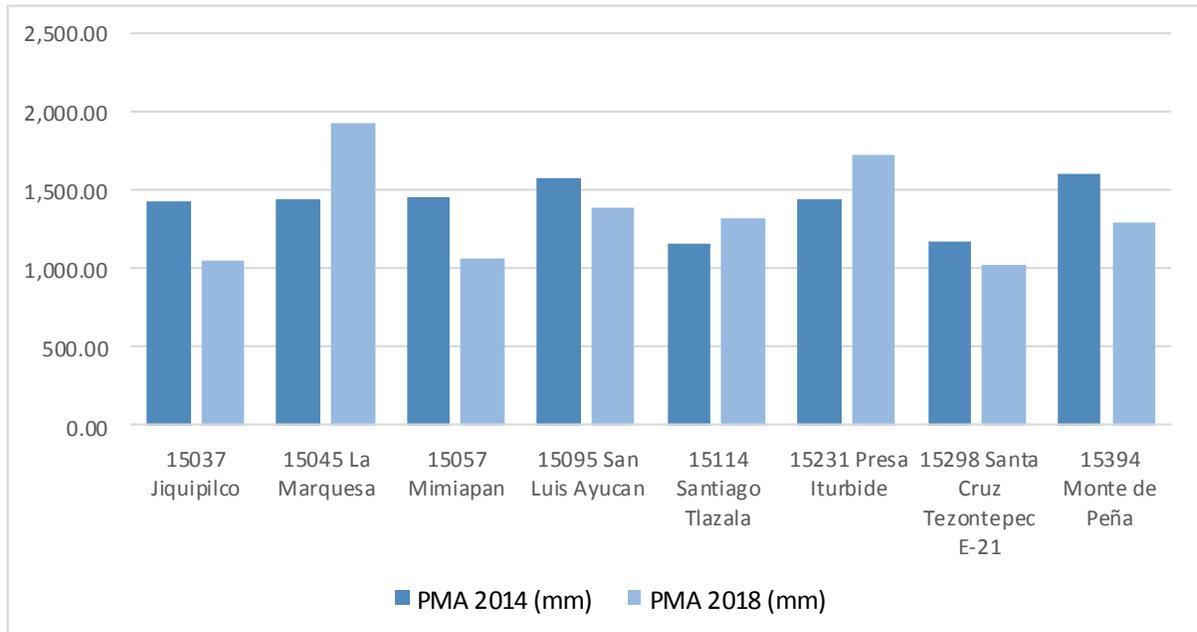
3.6 Recarga de Acuíferos en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 – 2018.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos sobre la recarga del acuífero del Parque Otomí Mexica, para los años 2014 y 2018.

3.6.1 Estimación de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica 2014 y 2018

Para dicha investigación se recopilaron datos de precipitación del parque las cuales se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio de la página del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para el año 2014 se obtuvieron las siguientes precipitaciones: Jiquipilco 1,423.40 mm.; La Marquesa 1,447.80 mm.; Mimiapan 1,461.80 mm.; San Luis Ayucan 1,583.70 mm.; Santiago Tlazala 1,153.70 mm.; Presa Iturbide 1,438.60 mm.; Santa Cruz Tezontepec 1,175.30 mm.; Monte de Peña 1,603.90 mm.; mientras que para el año 2018 las precipitaciones son las siguientes: Jiquipilco 1,045.90 mm.; La Marquesa 1,932.00 mm.; Mimiapan 1,068.80 mm.; San Luis Ayucan 1,390.00 mm.; Santiago Tlazala 1,315.90 mm.; Presa Iturbide 1,728.00 mm.; Santa Cruz Tezontepec 1,020.70 mm.; Monte de Peña 1,297.50 mm. ver (gráfica, 11)

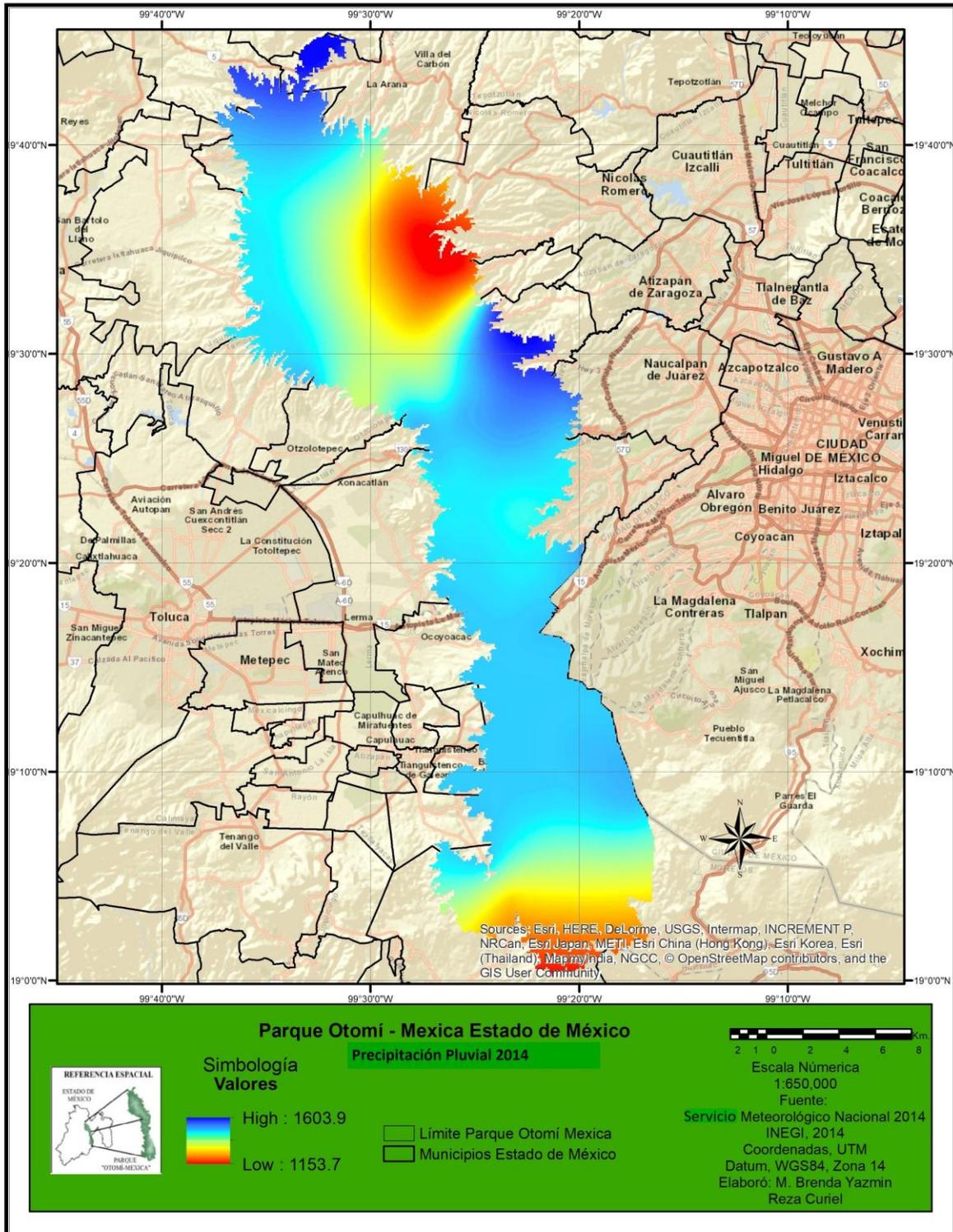
Gráfica 11. Precipitación Media Anual (PMA) en el Parque Otomí – Mexico, Estado de México 2014 – 2018.



Fuente: elaboración propia con base en información del (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2019)

En la figura 43, para el año 2014, indica las áreas homogéneas de precipitación en el parque. Las mayores precipitaciones se localizan en los municipios Villa del Carbón, Jilotzingo y Naucalpan de Juárez ubicados al noroeste y centro del parque. Las menores precipitaciones se localizan en el municipio de Nicolás Romero, Isidro Fabela ubicados al noreste y en el municipio de Ocuilan ubicados en el extremo sur de la zona estudiada.

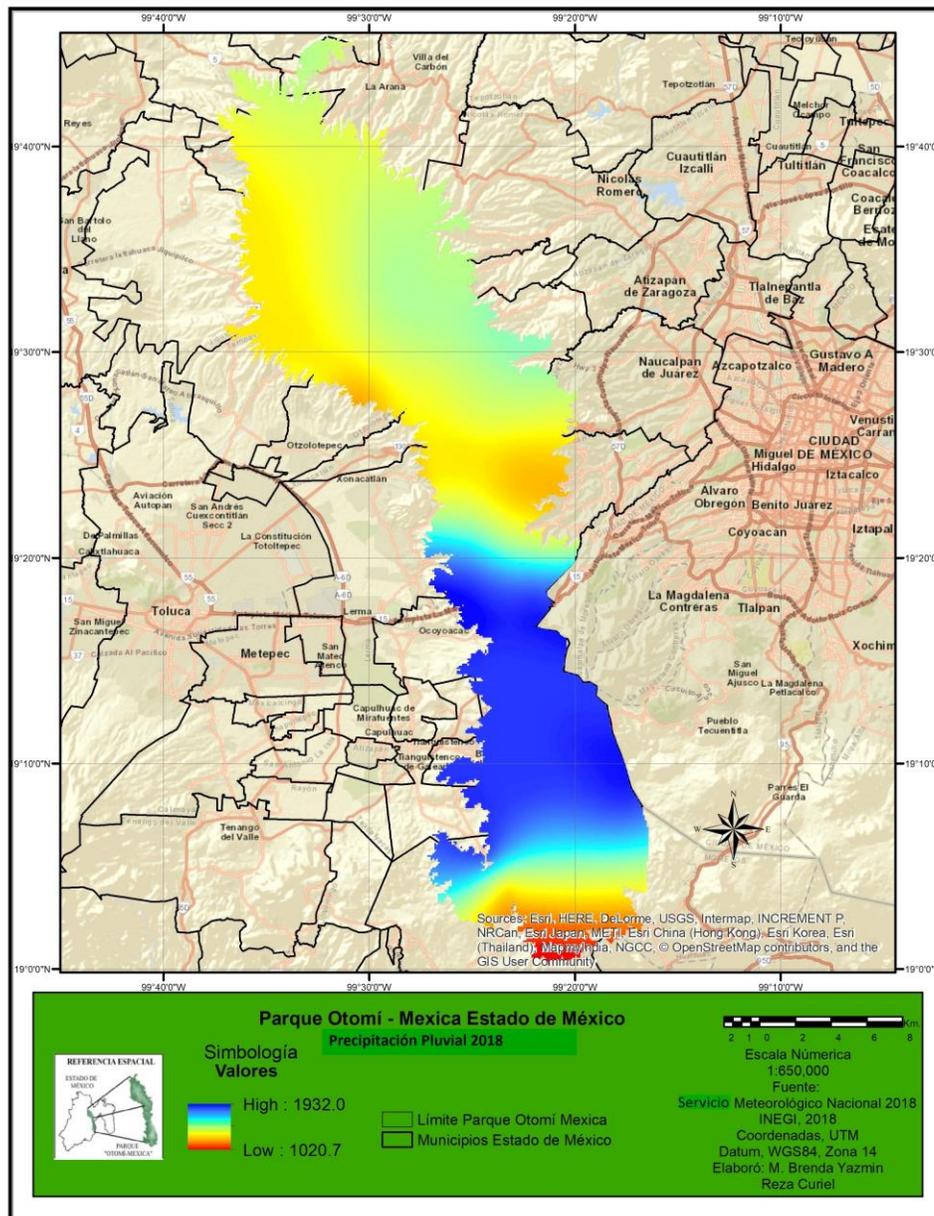
Figura 43. Precipitación Pluvial del Parque Otomí – Mexca Estado de México 2014



Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2014) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2014)

En la figura 44 se observa para el año 2018, las áreas homogéneas de precipitación en el parque. Las mayores precipitaciones se presentaron en los municipios Ocoyoacac, Tianguistenco y Xalatlaco que se localizan en la parte media y hacia el sur de la zona estudiada. Las menores precipitaciones se localizan en el municipio de Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque.

Figura 44. Precipitación Pluvial del Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018

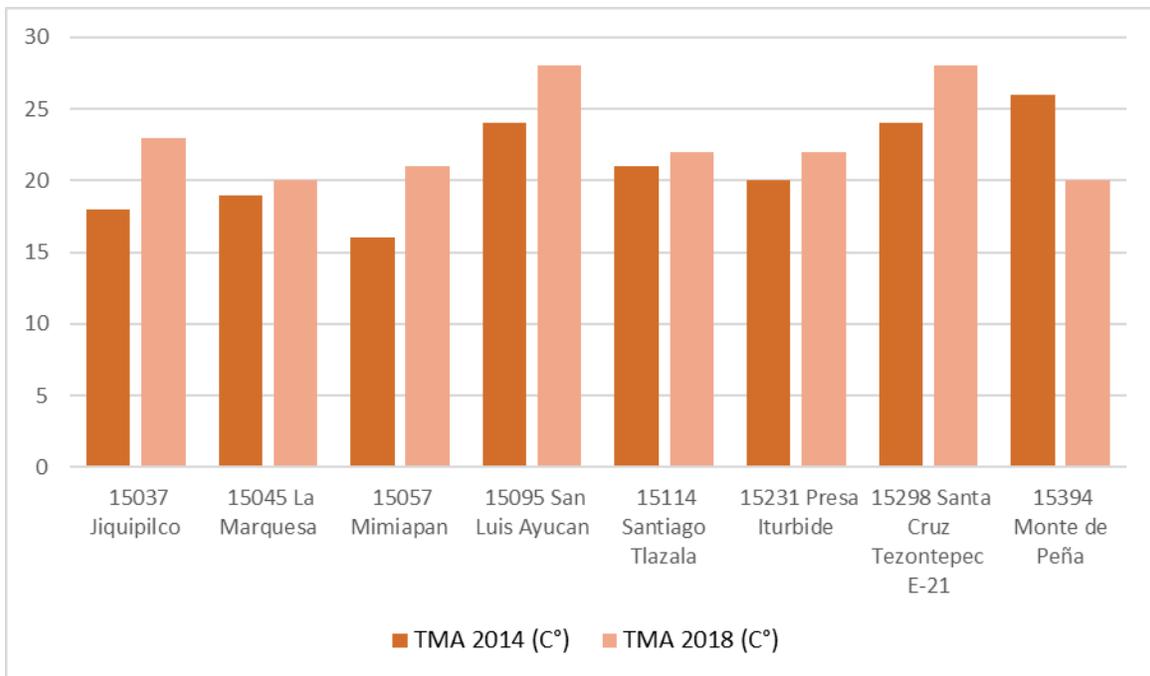


Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2018) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2018)

3.6.2 Estimación de la Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018

Los datos de temperatura del parque se obtuvieron de la página de Servicio Meteorológico Nacional (SMN), de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio para el año 2014 la temperatura fue la siguiente: Jiquipilco 18°C; La Marquesa 19 °C; Mimiapan 16°C; San Luis Ayucan 24 °C; Santiago Tlazala 21°C; Presa Iturbide 20°C; Santa Cruz Tezontepec 24°C; Monte de Peña 26 °C, para el año 2018 las temperaturas fueron las siguientes: Jiquipilco 23°C; La Marquesa 20 °C; Mimiapan 21°C; San Luis Ayucan 28 °C; Santiago Tlazala 22°C; Presa Iturbide 22°C; Santa Cruz Tezontepec 28°C; Monte de Peña 20 °C. Ver (Tabla, 12)

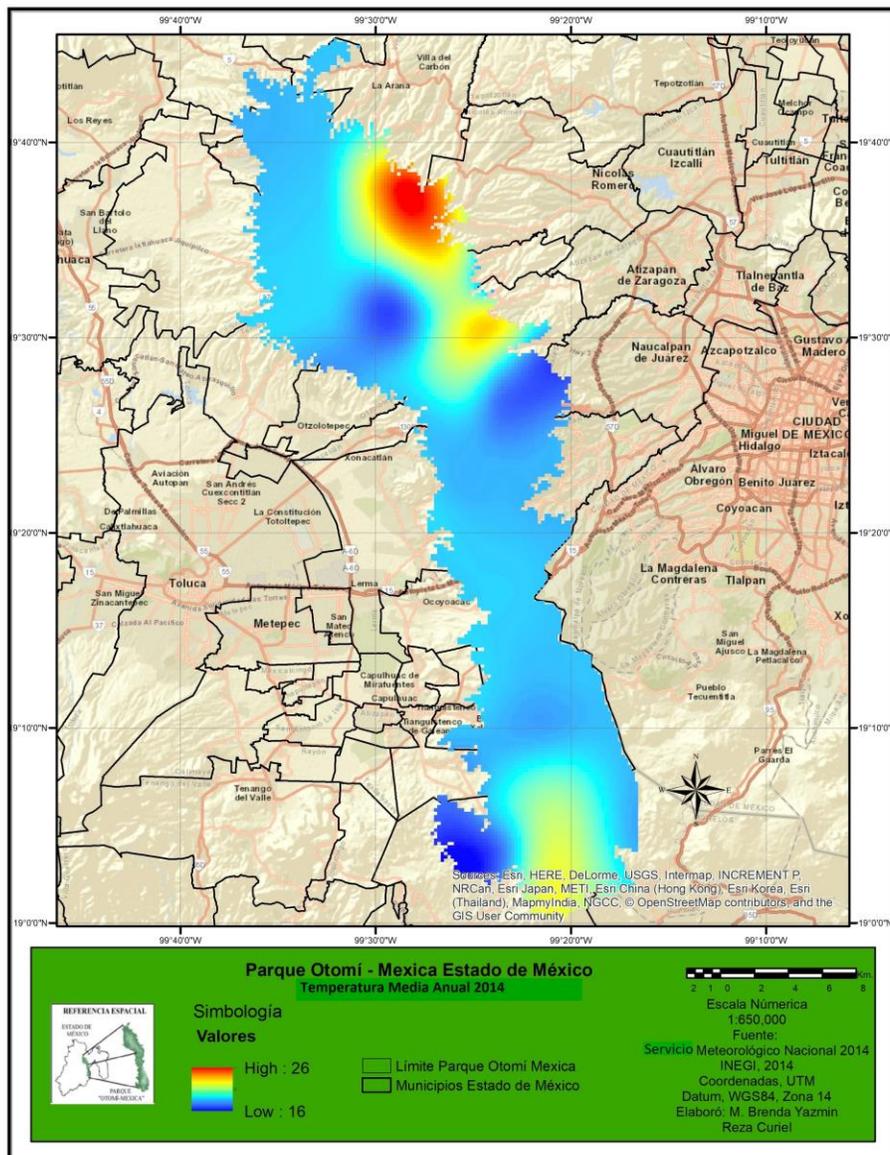
Tabla 12. Temperatura Media Anual (TMA) en el Parque Otomí – Mexica, Estado de México 2014 – 2018.



Fuente: elaboración propia con base en información del (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2019).

En la figura 45, se observa para el año 2014, las áreas homogéneas con las mismas temperaturas, los municipios que obtuvieron mayores Temperatura Media Anual fueron Nicolás Romero y Villa del Carbón localizándose al noreste del parque, los municipios con menor Temperatura Media Anual Oztolotepec y Naucalpan de Juárez que se localizan al noroeste y centro del parque, mientras que al suroeste se localiza el municipio de Ocuilan.

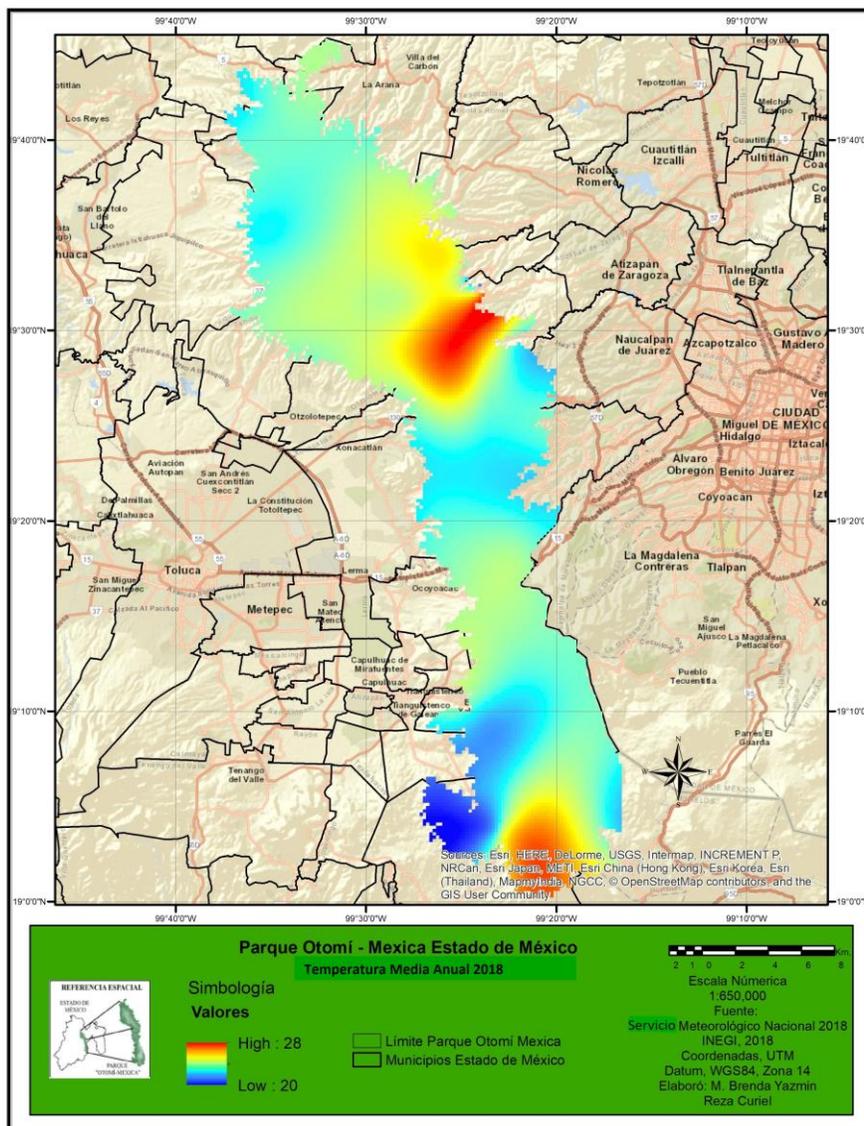
Figura 45. Temperatura Media Anual Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014



Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2014) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2014)

En la figura 46, se observa para el año 2018, los municipios con mayores Temperatura Media Anual se localizan en Jilotzingo⁵ ubicado al noreste del parque y Ocuilan ubicado en el extremo sur del parque, mientras que los municipios con menor Temperatura Media Anual son Ocuilan y Tianguistenco ubicado al suroeste del parque.

Figura 46. Temperatura Media Anual Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018



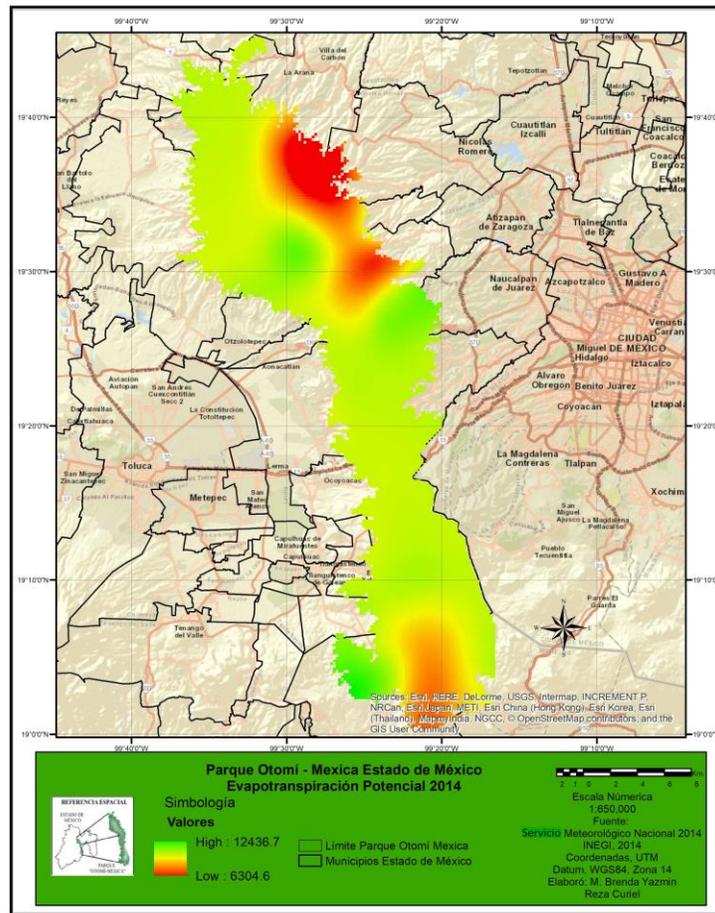
Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2018) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2018)

⁵ De los municipios Jilotzingo, Ocuilan y Tianguistenco sólo ocupan una porción de su territorio dentro del área de estudio.

3.6.3 Estimación de evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018

En la figura 47, para el año 2014 se observa mayor evapotranspiración en los municipios Oztolotepec⁶, Naucalpan de Juárez que se localizan al noroeste y centro del parque y el municipio de Ocuilan ubicado al suroeste del parque. La menor evapotranspiración se localiza en los municipios Villa del Carbón, Nicolas Romero, Isidro Fabela, Jilotzingo ubicados al noreste del parque y el municipio de Ocuilan ubicado al sureste del parque.

Figura 47. Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2014

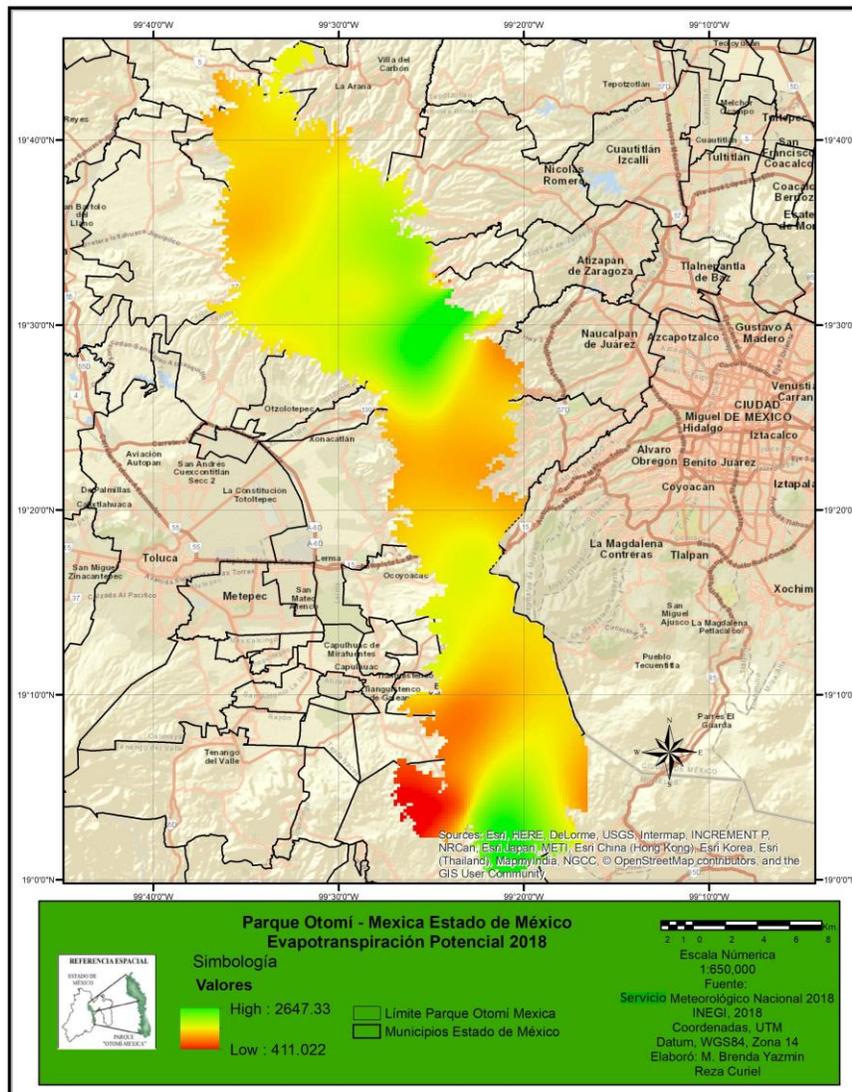


Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2014) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2014)

⁶ De los municipios Oztolotepec, Naucalpan de Juárez, Ocuilan, Villa del Carbón, Nicolas Romero, Isidro Fabela, Jilotzingo sólo ocupan una porción de su territorio dentro del área de estudio.

En la figura 48, para el año 2018, se observa mayor evapotranspiración en el municipio de Ocuilan⁷ ubicado al suroeste del parque. La menor evapotranspiración se localiza en los municipios de Jilotzingo e Isidro Fabela ubicados al noreste y Ocuilan ubicado al sureste del parque.

Figura 48. Evapotranspiración. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018



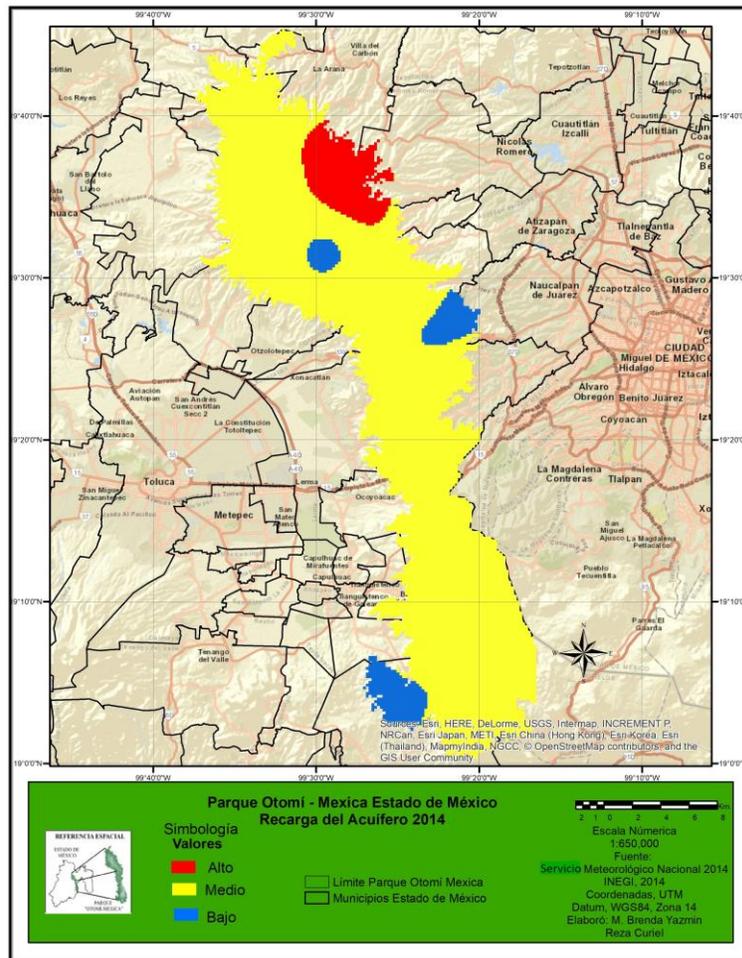
Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2018) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2018)

⁷ De los municipios Ocuilan, Jilotzingo e Isidro Fabela sólo ocupan una porción de su territorio dentro del área de estudio.

3.6.4 Estimación de recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica del Estado de México 2014 y 2018.

En la figura 49, para el año 2014 la mayor recarga del acuífero se localiza en los municipios Villa del Carbón y Nicolás Romero ubicados al suroeste del parque. La menor recarga del acuífero se localiza en los municipios de Ocuilan ubicado al extremo sur, Naucalpan de Juárez e Isidro Fabela ubicados al noreste del parque, predominando la recarga media en el parque, dicho comportamiento se debe a los fenómenos climatológicos analizados por estación meteorológica.

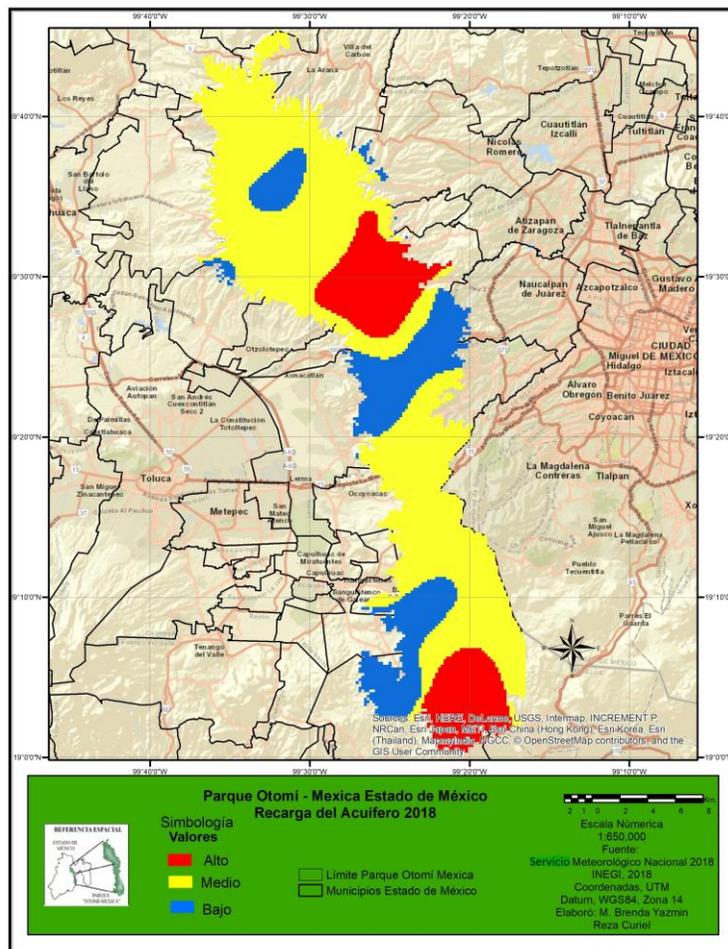
Figura 49. Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica 2014



Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2014) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2014)

En la figura 50, para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localizó en el municipio de Ocuilan ubicado al extremo sur del parque, además de los municipios Jilotzingo e Isidro Fabela. La menor recarga del acuífero se localizó en los siguientes municipios; Jiquipilco ubicado al noreste del parque, Lerma y Naucalpan de Juárez ubicado en el centro del parque, Xalatlaco, Tianguistenco y Ocuilan ubicados al suroeste del parque, con una recarga del acuífero media en los siguientes municipios; Morelos, Villa del Carbón, Nicolás Romero, Temoaya, Oztolotepec, Xonacatlán, Isidro Fabela ubicados al norte del área de estudio, Lerma, Huixquilucan, Ocoyoacac, Tianguistenco, Xalatlaco y Ocuilan ubicados al sur del parque.

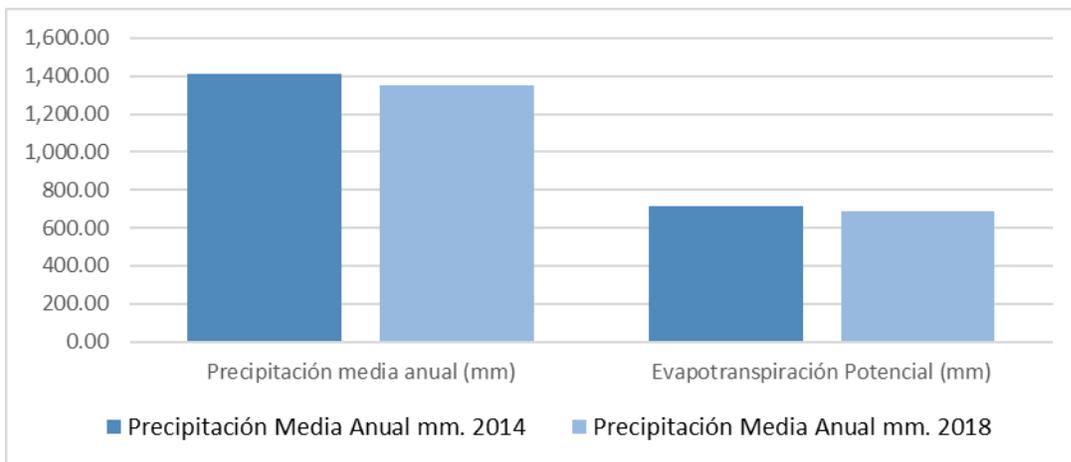
Figura 50. Recarga del acuífero. Parque Otomí – Mexica Estado de México 2018



Fuente: Elaboración propia con base en el (Servicio Meteorológico Nacional SMN, 2018) e (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, 2018)

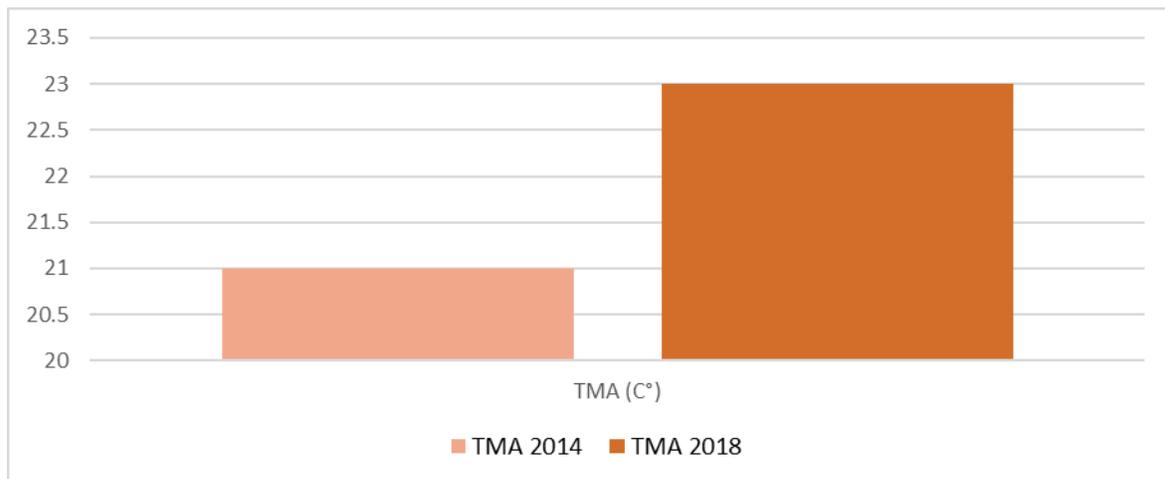
Analizando estadísticamente el cálculo del balance hídrico en el Parque Otomí Mexica para los años 2014 y 2018 la precipitación media anual, para el año 2014 fue de 1,410.97 mm. mientras que para el 2018 fue de 1,349.85 mm. Existe una disminución en la precipitación media anual de 61.12 mm/año, la evapotranspiración potencial para el año 2014 fue de 715.98 mm. y para el año 2018 fue de 686.42 mm. existiendo una disminución en la evapotranspiración de 29.56 mm/año. La temperatura para el año 2014 fue de 21°C y para el año 2018 fue de 23°C con una disminución de 2°C, ver (gráfica 13 y 14)

Gráfica 13. Precipitación Media Anual y Evapotranspiración Potencial del Parque Otomí Mexica.



Fuente: Elaboración propia con base en Servicio Meteorológico Nacional 2014 y 2018.

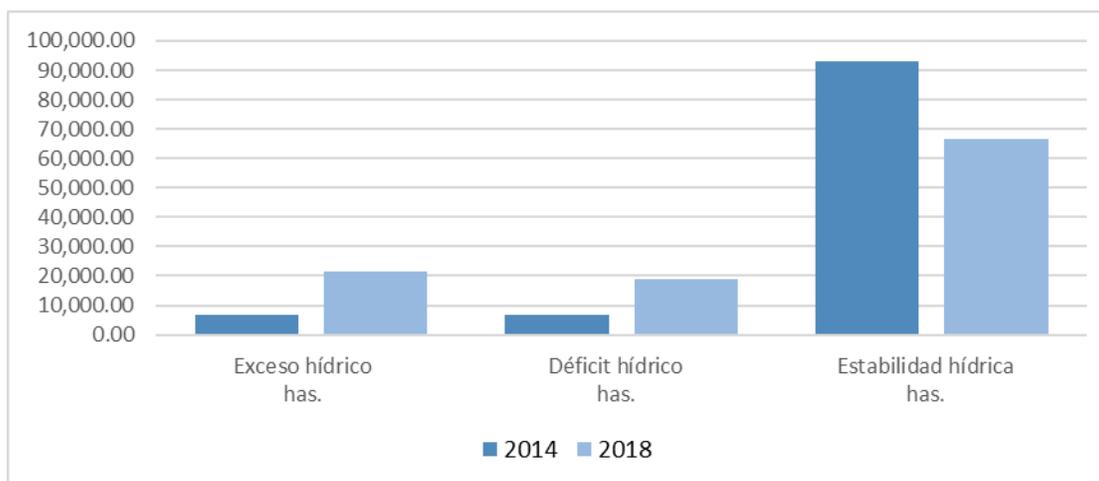
Gráfica 14. Temperatura Media Anual del Parque Otomí Mexica



Fuente: Elaboración propia con base en Servicio Meteorológico Nacional 2014 y 2018.

Analizando geoespacialmente el balance hídrico para los años 2014 y 2018. El exceso hídrico para el año 2014 fue de 6,766.89 has. y para el año 2018 fue de 21, 531.68 has. Se observa que aumentó 14,764.79 has. lo que corresponde al 13.84 % del área. El déficit hídrico para el año 2014 fue de 6,894.59 has. y para el año 2018 fue de 18, 742.08 has. Se observa que aumentó 11,847.49 has. lo que corresponde al 11.1 % de la superficie del parque. La estabilidad hídrica para el año 2014 fue de 93,046.98 has. y para el año 2018 fue de 66,421.96 has. Se observa que disminuyó 26,625.02 has. lo que corresponde al 24.94 % del área. Por tanto, para el año 2018 se observa mayor exceso hídrico y mayor déficit hídrico y para el año 2014 mayor estabilidad hídrica, ver (gráfica, 15).

Tabla 15. Balance hídrico del Parque Otomí Mexica



Fuente: elaboración propia con base en Sistema Metrológico Nacional 2014 y 2018.

Discusión sobre el servicio ecosistémico recarga de acuíferos

La recarga del acuífero en el Parque es de vital importancia para la preservación del Área Natural Protegida y para la calidad de vida de la población de las 166 localidades (15 de ellas urbanas) al interior del ANP; y las ubicadas en su zona de influencia. El proceso de recarga se genera a partir de la infiltración y escorrentía superficial, esto es la cantidad de agua que entra en la zona saturada y que pasa a formar parte de las reservas subterráneas; lo que favorece el potencial de servicios ecosistémicos del Parque. Estos procesos se ven afectados por los fenómenos meteorológicos que se presentaron durante el período estudiado.

El Parque Otomí Mexica para el periodo de estudio 2014 – 2018 intervinieron los siguientes fenómenos meteorológicos: para el año 2014 el ciclón Dolly, con una precipitación de 884 mm. anuales; para el año 2015 los ciclones Carlos y Patricia, con una precipitación de 858.5 mm. En el año 2016 los ciclones fueron Danielle y Earl, los cuales generaron una precipitación anual de 915 mm. En el año 2017 los ciclones Beatriz y Franklin, contribuyeron con una precipitación de 865.3 mm.

Entre otros fenómenos climatológicos, el año 2014 se caracterizó por ser neutral sin presencia de El Niño y La Niña, sin embargo, en verano se presentó una canícula débil (con disminución de lluvia) del 0 al 10 % que tuvo una duración de uno a dos meses en porciones del Estado de México.

De enero a marzo del 2015 se formó El Niño con intensidad débil. El Niño incrementó su intensidad pasando a ser moderado el 15 de junio y fuerte a partir del 1 de septiembre del 2015. En verano se presentó una canícula moderada del 11 al 15 % la cual se prolongó hasta por tres meses en pequeñas porciones del Estado de México.

El año 2016 se considera como el más cálido, registrando que El Niño finalizó en la primavera y dio lugar a otro fenómeno meteorológico denominado La Niña débil a finales del año. En verano (junio – agosto 2016) se presentaron anomalías de Radiación Saliente de Onda Larga (OLR) que gradualmente se fueron desplazando hacia el norte del país en los meses de julio y agosto por las lluvias

asociadas al huracán de Norteamérica. En la Península de Baja California y sobre la región del Golfo de México persistieron anomalías positivas de OLR.

Para el año 2017 de enero a junio las condiciones del Estatus del Niño Oscilación del Sur (ENOS) fueron neutrales, es decir, sin condiciones de El Niño y La Niña a lo largo del pacífico ecuatorial. Durante el mes de octubre los valores de la temperatura de la superficie del mar (TSM) comenzaron a desarrollar condiciones de la Niña débil en el Pacífico Ecuatorial; en tanto que las condiciones atmosféricas fueron favorables para La Niña, con vientos alisios intensos y mayor actividad convectiva en el Pacífico Occidental; mientras que en el Pacífico Oriental la actividad convectiva y las lluvias estuvieron por debajo de lo normal. En verano (junio-agosto 2017) se presentaron huracanes que se mantuvieron cerca de las costas mexicanas; y se observaron anomalías negativas de la radiación saliente de onda larga (OLR) sobre los estados del sur del país, en la vertiente del Pacífico y en la Península de Yucatán debido al paso de ondas tropicales en el mes de junio.

Para el año 2018, en los primeros meses se presentaron condiciones de La Niña en el Pacífico Ecuatorial. A partir de mediados de abril se transitó a condiciones neutrales, es decir, sin condiciones de El Niño o la Niña, que se mantuvieron de abril hasta diciembre. Sin embargo, en verano (junio – agosto 2018), sobre el noroeste de México se observaron anomalías negativas de la radiación saliente de onda larga (OLR) asociadas a nubosidad y precipitaciones características del huracán de Norteamérica. En los estados del noreste, centro y sur de México se presentó la canícula con lluvias por debajo del promedio y temperaturas por arriba del promedio en estas regiones. En México, el trimestre se caracterizó con lluvias por arriba del promedio en la mayor parte del territorio nacional asociada a la actividad ciclónica, principalmente del Pacífico Oriental, y en menor medida, por el inicio de la temporada de sistemas frontales.

Debido a su ubicación geográfica con coordenadas geográficas extremas siguientes: 18° 59' 59.57" - 19° 45' 19.34" de latitud norte y 99° 20' 21.75" - 99° 32' 01.41" de longitud oeste; la precipitación y temperatura en el área de estudio

están influenciados por los ciclones antes mencionados; y de igual manera alcanzan a llegar rachas de fenómenos como lo son El Niño y La Niña, así como otros fenómenos climatológicos.

Debido a las condiciones meteorológicas, para el año 2014 la zona de mayor recarga del acuífero se localizó en las áreas con mayores altitudes del parque, donde se registró mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración; mientras que para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localizó en áreas altas y bajas de la zona de estudio registrando en estas zonas mayor precipitación, temperatura y evapotranspiración, (mapas 7 y 8). En estas áreas presentaron usos del suelo con agricultura de humedad y bosque de pino – encino.

Dentro de los hallazgos más significativos se identifica que la metodología aplicada es pertinente y consistente con los trabajos de: Aparicio, 2009; FIRCO, 2002; Llerena, 2003 y SARH-C, 1982.

Se cumplió el objetivo de calcular la recarga del acuífero en el Parque Otomí – Mexica para los años 2014 y 2018, desde un enfoque de servicios ecosistémicos; lo que permitió identificar las zonas con mayor y menor recarga del acuífero.

La recarga del acuífero permitió estudiar el comportamiento de los procesos hidrológicos y la afectación que se produjo para el periodo de estudio 2014 - 2018 en el rendimiento de agua, localizando las áreas secas y húmedas del parque; por lo que se concluye que durante las estaciones de estiaje se produce déficit de agua en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril; mientras que los meses restantes favorecen la demanda de la evapotranspiración, siendo junio el mes con mayor precipitación en el parque.

Las condiciones que influyeron en el Parque Otomí Mexica fueron las siguientes:

Componente: agua. Alteración del ciclo geohidrológico por represas y retención de los escurrimientos durante la época de lluvias, disminución de la infiltración y recarga de acuíferos por pérdida de cubierta vegetal.

Componente: suelo. Alteración del sustrato edáfico por construcciones, compactación del sustrato edáfico por tránsito de vehículos y maquinaria,

disminución de la permeabilidad del suelo por pérdida de vegetación, ausencia de técnicas y acciones para recuperar suelos erosionados.

Componente: vegetación. Eliminación de la cubierta vegetal propia del ecosistema, presencia de animales domésticos (presión sobre la vegetación), inadecuado manejo de la vegetación y afectación a la vegetación nativa por reforestación con especies exóticas.

Componente: social. Riesgos hidrometeorológicos, ambientales y socio-organizativos, ausencia de cultura ambiental en los sectores poblacionales y apertura de espacios para agricultura.

Con base en los resultados obtenidos se recomienda implementar en la zona de estudio actividades de conservación y reforestación para que la evapotranspiración aumente y haya una mayor recarga del acuífero.

3.7 Modelación de escenarios de servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica 1998 - 2025.

A continuación, se presentan los resultados de la modelación de escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos de regulación; captura de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos, del Parque Otomí – Mexica por medio del método estadístico y prospectivo.

3.7.1 Modelación de escenarios de Captura de Carbono (ton) en los ecosistemas forestales en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).

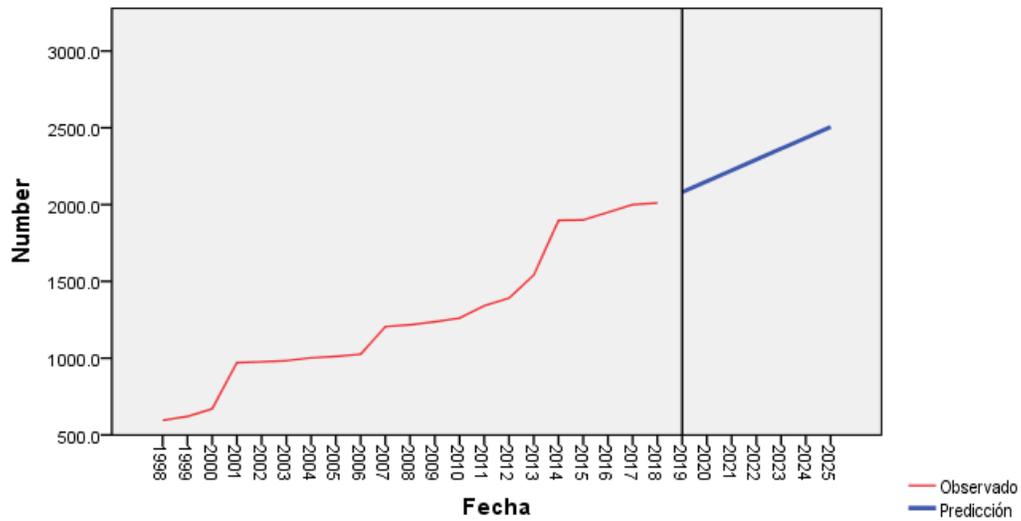
Se presentan los resultados de las siguientes tablas y gráficas con la modelación de escenarios futuros de la captura de carbono 1998 – 2025. En la gráfica 1 se observa la modelación del escenario de captura de carbono (ton) del Bosque de Encino (*Quercus*); en los próximos 4 años se espera que siga aumentando la captura de carbono (ton) del Bosque de Encino (*Quercus*) de manera constante, con un R cuadrado de 0.948, ver (tabla 32 y gráfica16).

Tabla 32. Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Encino (*Quercus*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim			Percentil					
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.900	.	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900
R cuadrado	.948	.	.948	.948	.948	.948	.948	.948	.948	.948	.948

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 16. Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Encino (*Quercus*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

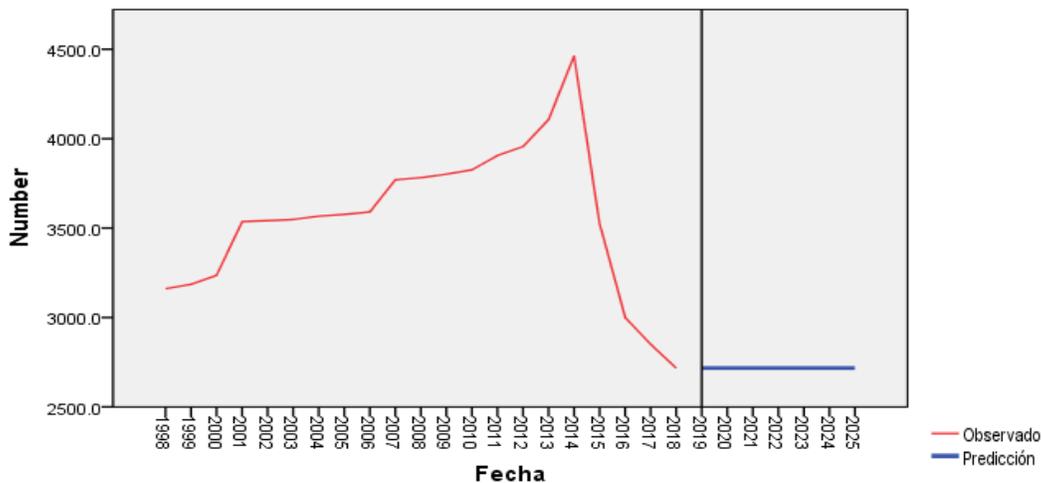
En la gráfica 17 se observa la modelación del escenario de captura de carbono (ton) del Bosque Mixto (Encino - Pino); en la cual disminuyo y refleja que va a ir decreciendo la captura de carbono (ton) del Bosque Mixto (Encino - Pino) de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.890, ver (tabla 33).

Tabla 33. Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque Mixto (Encino - Pino) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Media	SE	Mínimo	Máximo			Percentil					
				o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.870	.	.870	.870	.870	.870	.870	.870	.870	.870	.870	.870
R cuadrado	.890	.	.890	.890	.890	.890	.890	.890	.890	.890	.890	.890

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 17. Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque Mixto (Encino - Pino) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base con base en el Programa Mexicano del Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

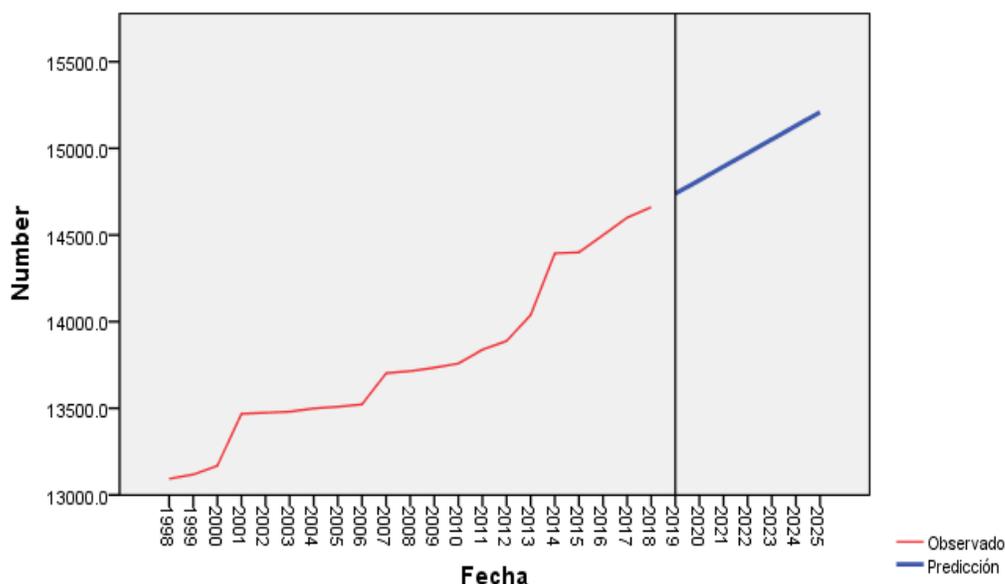
En la gráfica 18 se observa la modelación del escenario de captura de carbono (ton) del Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*); en los próximos 4 años se espera que siga aumentando la captura de carbono (ton) del Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) de manera constante, con un R cuadrado de 0.954, ver (tabla, 34).

Tabla 34. Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Máxim										
	Media	SE	Minimo	o	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.900	.	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900
R cuadrado	.954	.	.954	.954	.954	.954	.954	.954	.954	.954	.954

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 18. Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Programa Mexicano del Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

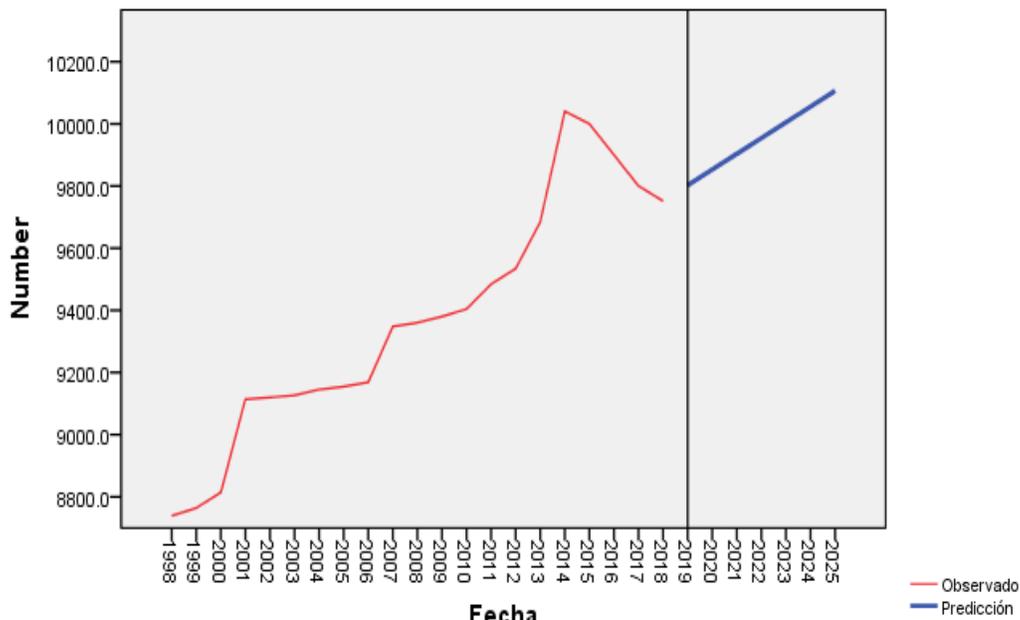
En la gráfica 19, se observa la modelación del escenario de captura de carbono (ton) del Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*); en los próximos 4 años se espera que siga aumentando la captura de carbono (ton) del Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.900, ver (tabla, 35).

Tabla 35. Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Percentil										
	Media	SE	Mínimo	Máximo	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.900	.	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900
R cuadrado	.900	.	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900	.900

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 19. Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Programa Mexicano del Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

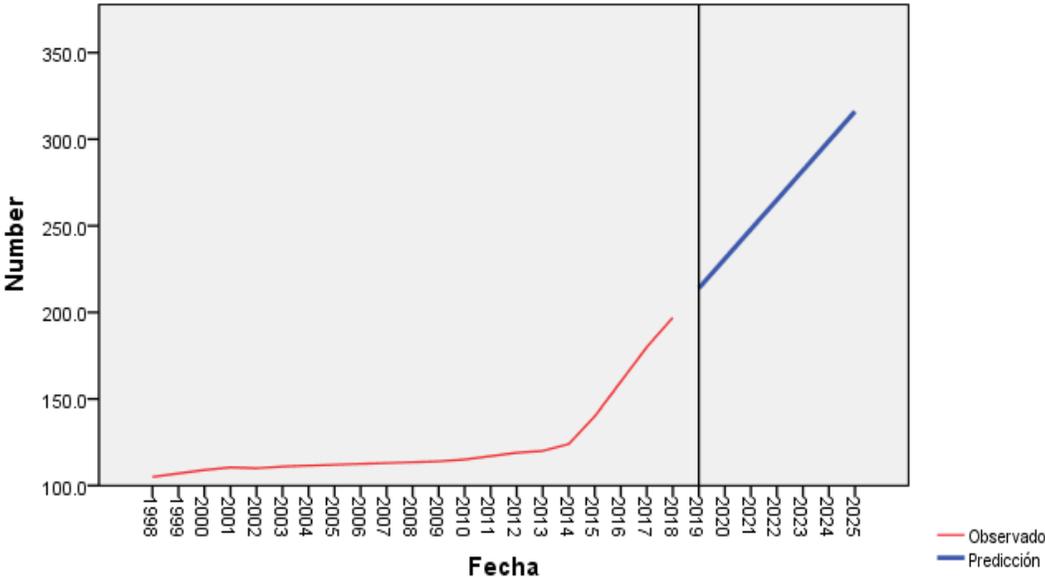
En la gráfica 20, se observa la modelación del escenario de captura de carbono (ton) del Bosque mesófilo de montaña en los próximos 4 años se espera que siga aumentando la captura de carbono (ton) del Bosque mesófilo de montaña de manera constante, con un R cuadrado de 0.985, ver (tabla, 36).

Tabla 36. Ajuste del modelo del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque mesófilo de montaña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste				Máxim	Percentil							
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.901	.	.901	.901	.901	.901	.901	.901	.901	.901	.901	.901
R cuadrado	.985	.	.985	.985	.985	.985	.985	.985	.985	.985	.985	.985

Fuente: elaboración propia con base en el Programa Nacional de Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 20. Modelación del escenario de Captura de Carbono (toneladas) en el Bosque mesófilo de montaña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Programa Mexicano del Carbono (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

3.7.2 Modelación de escenarios de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).

Factor R Erosividad de Lluvia.

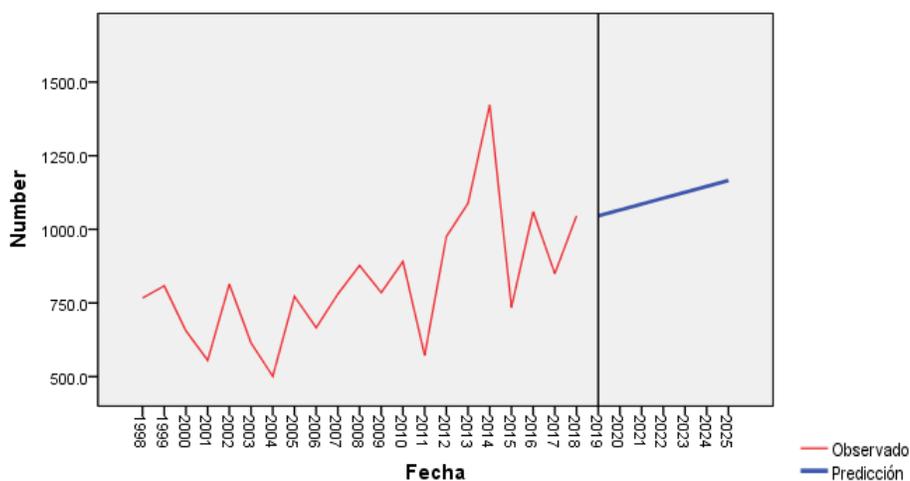
En la gráfica 21, se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica con clave 15037 Jiquipilco; en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica con clave 15037 Jiquipilco de manera constante, con un R cuadrado de 0.910, ver (Tabla, 37).

Tabla 37. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Jiquipilco en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Percentil										
	Media	SE	Mínimo	Máximo	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.800	.	.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800	.800
R cuadrado	.910	.	.910	.910	.910	.910	.910	.910	.910	.910	.910

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 21. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Jiquipilco en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

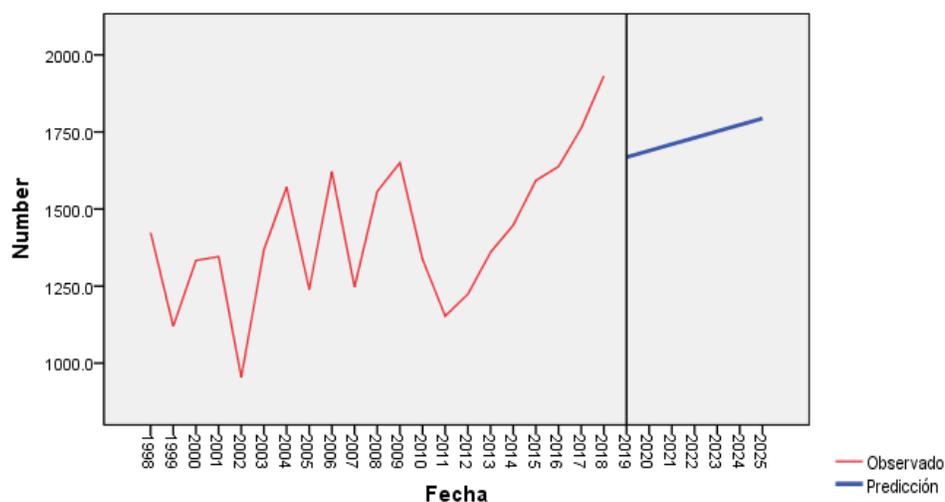
En la gráfica 22 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15045 La Marquesa en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor R de la estación meteorológica con clave 15045 La Marquesa de manera constante, con un R cuadrado de 0.852, ver (tabla, 38).

Tabla 38. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica La Marquesa en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Media	SE	Mínim		Percentil							
			o	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.715	.	.715	.715	.715	.715	.715	.715	.715	.715	.715	.715
R cuadrado	.852	.	.852	.852	.852	.852	.852	.852	.852	.852	.852	.852

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 22. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica La Marquesa en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

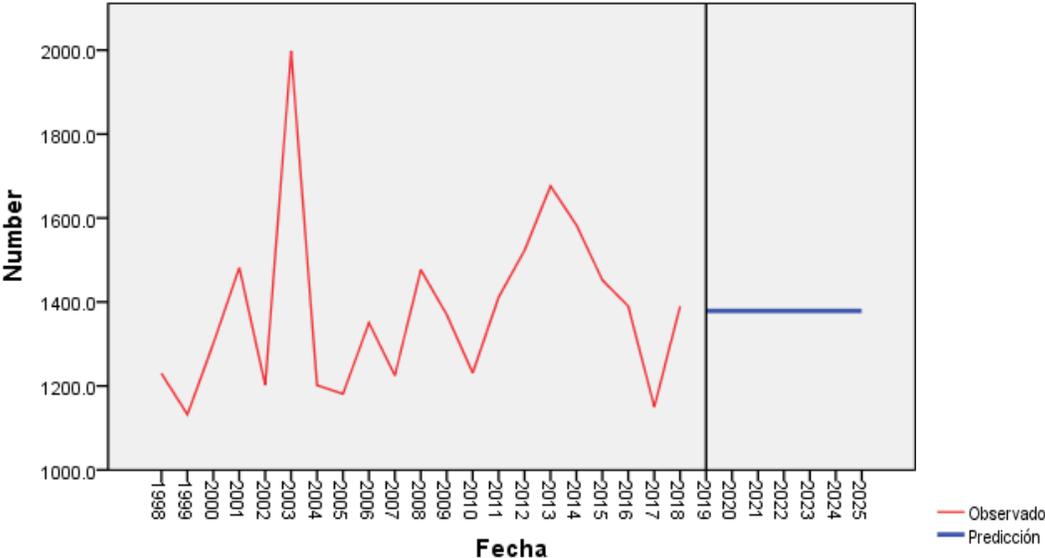
En la gráfica 23 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15095 San Luis Ayucan, en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15095 San Luis Ayucan de manera constante, con un R cuadrado de 0.789, ver (Tabla 39).

Tabla 39. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica San Luis Ayucan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.701	.	.701	.701	.701	.701	.701	.701	.701	.701	.701	
R cuadrado	.789	.	.789	.789	.789	.789	.789	.789	.789	.789	.789	

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 23. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica San Luis Ayucan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

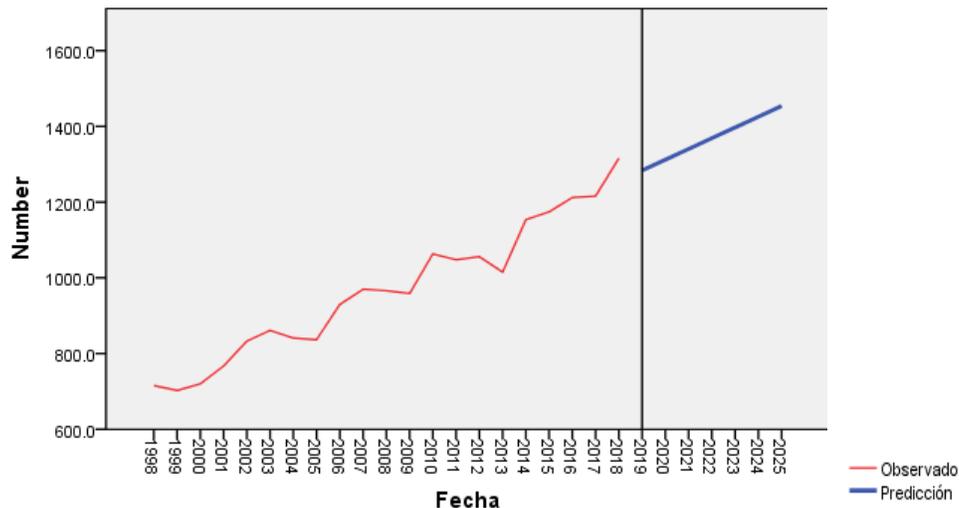
En la gráfica 24 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15114 Santiago Tlazala, Isidro Fabela; en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15114 Santiago Tlazala, Isidro Fabela de manera constante, con un R cuadrado de 0.958, ver (tabla 40).

Tabla 40. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santiago Tlazala, Isidro Fabela en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Percentil											
	Media	SE	Mínimo	Máximo	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.754	.	.754	.754	.754	.754	.754	.754	.754	.754	.754	.754
R cuadrado	.958	.	.958	.958	.958	.958	.958	.958	.958	.958	.958	.958

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 24. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santiago Tlazala, Isidro Fabela en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

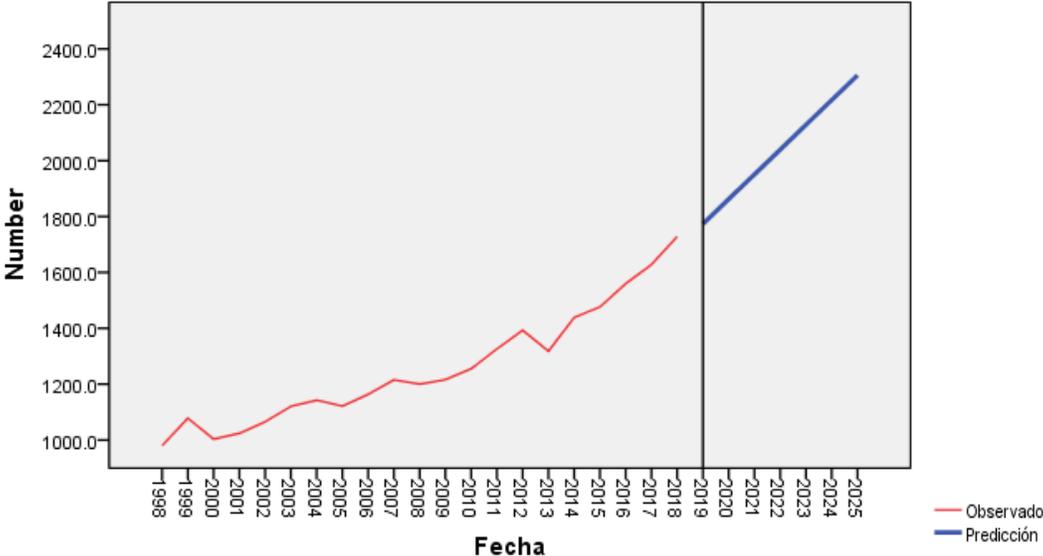
En la gráfica 25 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15231 Presa Iturbide; en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15231 Presa Iturbide de manera constante, con un R cuadrado de 0.955, ver (tabla 41).

Tabla 41. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Presa Iturbide en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Media	SE	Máxim					Percentil				
			Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.723	.	.723	.723	.723	.723	.723	.723	.723	.723	.723	.723
R cuadrado	.955	.	.955	.955	.955	.955	.955	.955	.955	.955	.955	.955

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 25. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Presa Iturbide en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

En la gráfica 26 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15298 Santa Cruz Ocuilan; la cual refleja que disminuirá el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15298 Santa Cruz Ocuilan de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.748, ver (tabla, 42).

Tabla 42. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santa Cruz Ocuilan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil			
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.657	.	.657	.657	.657	.657	.657	.657	.657	.657	.657
R cuadrado	.748	.	.748	.748	.748	.748	.748	.748	.748	.748	.748

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 26. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Santa Cruz Ocuilan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

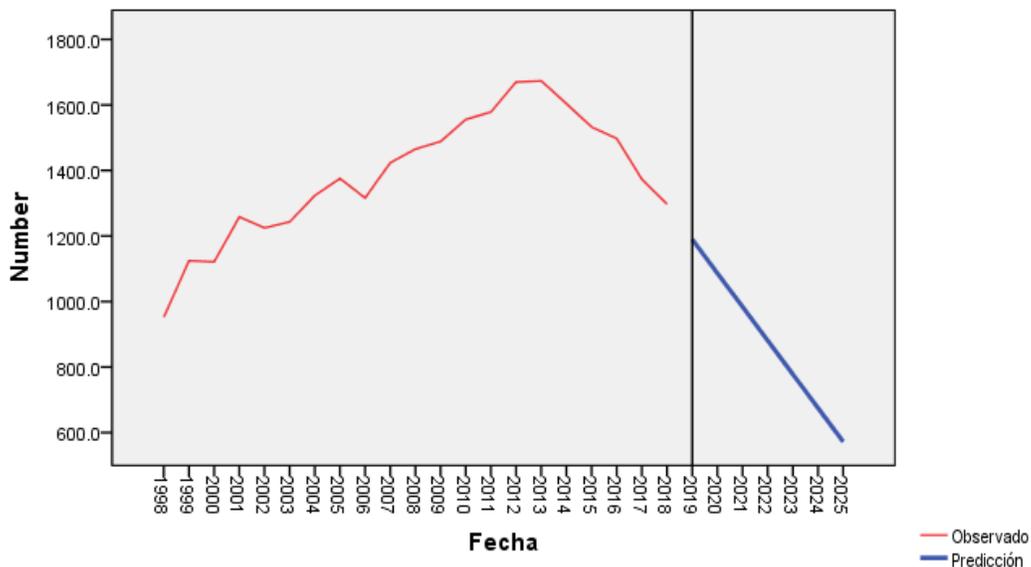
En la gráfica 27 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15394 Monte de Peña; la cual refleja que disminuirá el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15394 Monte de Peña de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.889, ver (tabla, 43).

Tabla 43. Ajuste del modelo Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Monte de Peña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.542	.	.542	.542	.542	.542	.542	.542	.542	.542	.542	.542
R cuadrado	.889	.	.889	.889	.889	.889	.889	.889	.889	.889	.889	.889

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 27. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Monte de Peña en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

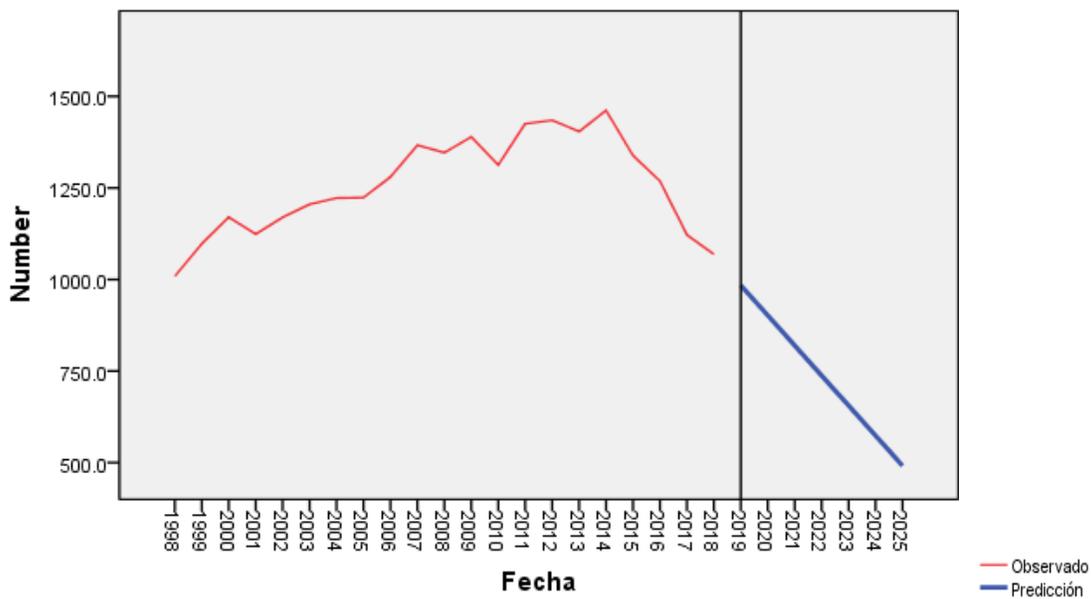
En la gráfica 28 se observa la modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15057 Mimiapan; la cual refleja que disminuirá el Factor R erosividad de lluvia, de la estación meteorológica con clave 15057 Mimiapan de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.735, ver (tabla 44).

Tabla 44. Ajuste del modelo del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Mimiapan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máximo					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.491	.	.491	.491	.491	.491	.491	.491	.491	.491	.491	.491
R cuadrado	.735	.	.735	.735	.735	.735	.735	.735	.735	.735	.735	.735

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 28. Modelación del escenario del Factor R erosividad de lluvia de la estación meteorológica Mimiapan en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Factor C. Cobertura vegetal.

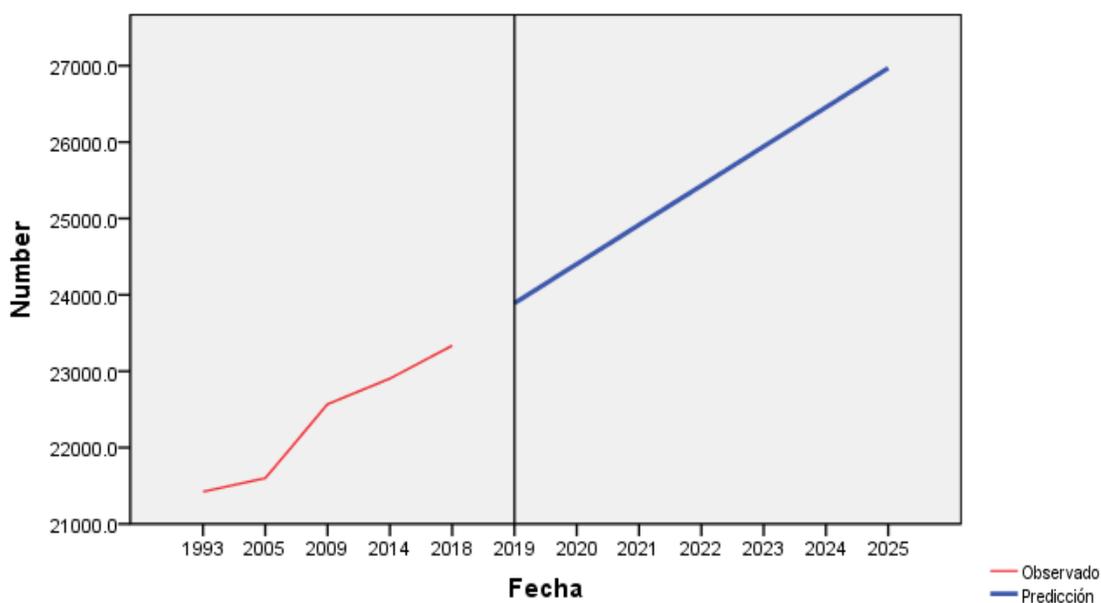
En la gráfica 29 se observa la modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*); en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) de manera constante, con un R cuadrado de 0.937, ver (tabla 45).

Tabla 45. Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1998 - 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil			
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95
R cuadrado estacionaria	.904	.	.904	.904	.904	.904	.904	.904	.904	.904	.904
R cuadrado	.937	.	.937	.937	.937	.937	.937	.937	.937	.937	.937

Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 29. Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1993 - 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

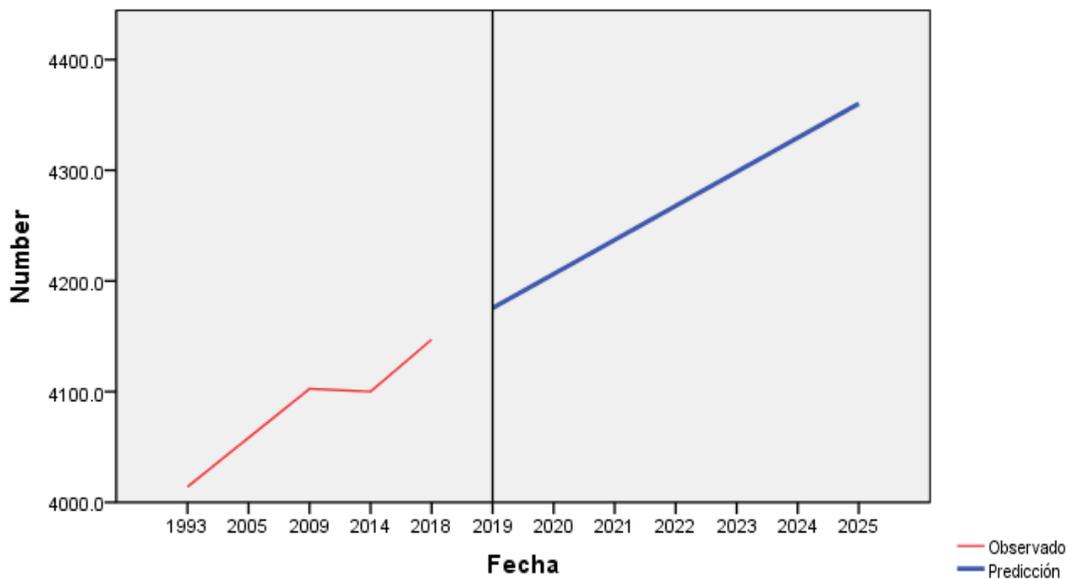
En la gráfica 30 se observa la modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (*Quercus*); en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (*Quercus*) de manera constante, con un R cuadrado de 0.907, ver (tabla 46).

Tabla 46. Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (*Quercus*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1993 – 2025)

Estadístico de ajuste			Minim	Máxim	Percentil							
	Media	SE	o	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.827	.	.827	.827	.827	.827	.827	.827	.827	.827	.827	.827
R cuadrado	.907	.	.907	.907	.907	.907	.907	.907	.907	.907	.907	.907

Fuente: elaboración propia con base las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 30. Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Encino (*Quercus*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

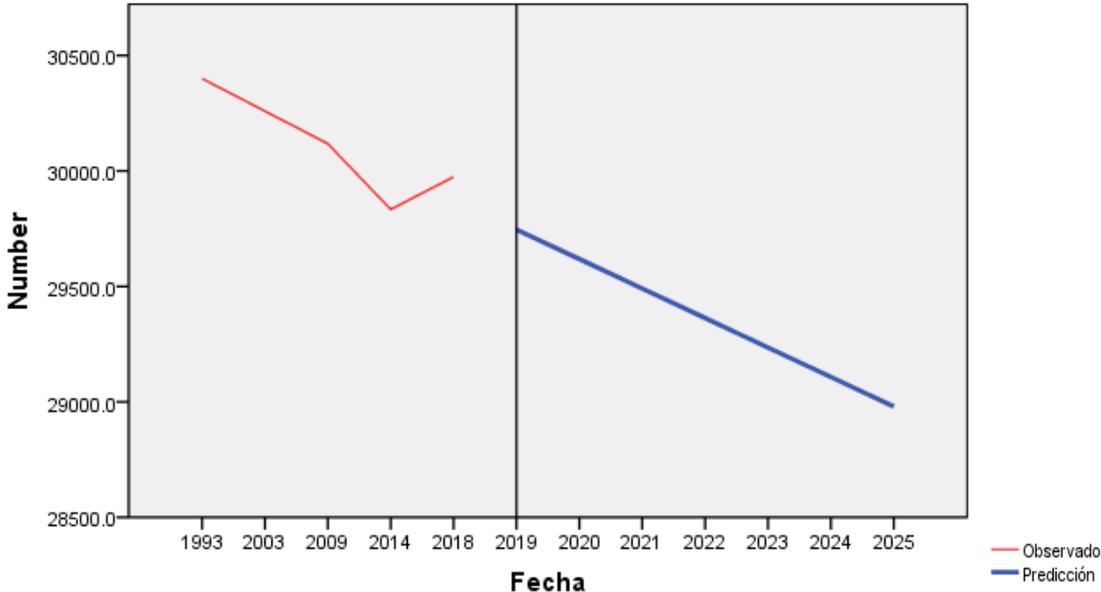
En la gráfica 31 se observa la modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*); en los próximos 4 años refleja que disminuirá el Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) de manera constante, con un R cuadrado de 0.730, ver (tabla 47).

Tabla 47. Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.695	.	.695	.695	.695	.695	.695	.695	.695	.695	.695	
R cuadrado	.730	.	.730	.730	.730	.730	.730	.730	.730	.730	.730	

Fuente: elaboración propia con base las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 31. Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1993 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

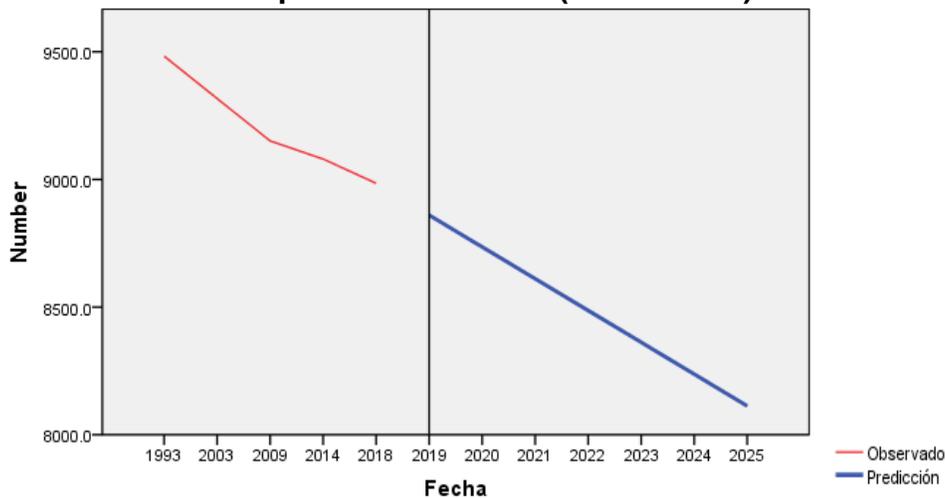
En la gráfica 32 se observa la modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino; en los próximos 4 años refleja que disminuirá el Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino de manera constante, con un R cuadrado de 0.879, ver (tabla 48).

Tabla 48. Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste	Media	SE	Mínim		Percentil							
			o	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.602	.	.602	.602	.602	.602	.602	.602	.602	.602	.602	.602
R cuadrado	.879	.	.879	.879	.879	.879	.879	.879	.879	.879	.879	.879

Fuente: elaboración propia con base las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 32. Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque de Pino - Encino de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1993 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

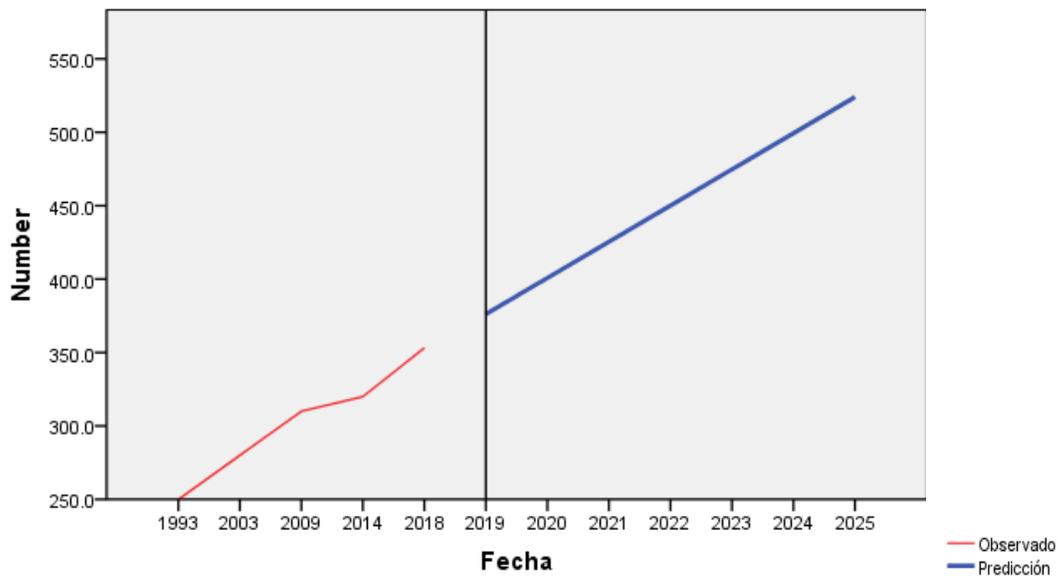
En la gráfica 33 se observa la modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña; en los próximos 4 años se espera que siga aumentando el Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña de manera constante, con un R cuadrado de 0.969, ver (tabla 49).

Tabla 49. Ajuste del modelo del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1998 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.820	.	.820	.820	.820	.820	.820	.820	.820	.820	.820	
R cuadrado	.969	.	.969	.969	.969	.969	.969	.969	.969	.969	.969	

Fuente: elaboración propia con base las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 33. Modelación del escenario del Factor C Cobertura Vegetal de Bosque mesófilo de montaña de la serie II a la serie VI (INEGI, 1993 - 2014) en el Parque Otomí Mexica. (1993 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

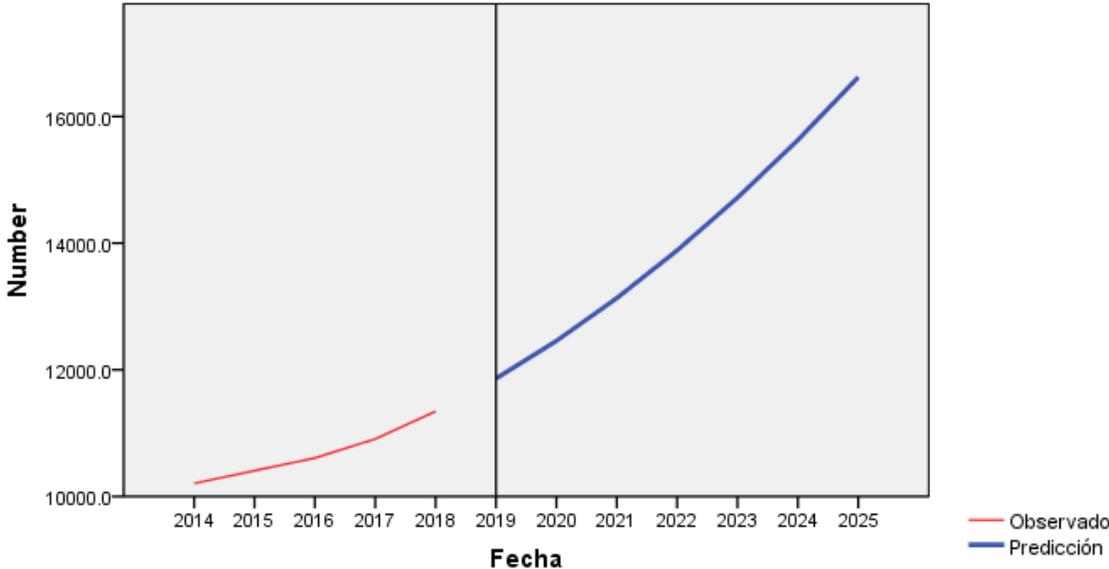
En la gráfica 34 se observa la modelación del escenario de la Erosión Potencial que corresponde a **Factor R** erosividad de lluvia, **Factor C** Cobertura Vegetal, **Factor LS** longitud de la pendiente y pendiente media del terreno y **Factor K** Erosionabilidad del suelo, la cual indica que la Erosión Potencial aumentará constantemente para los próximos 4 años, con un R cuadrado de 0.963, ver (tabla 50).

Tabla 50. Ajuste del modelo del escenario de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste				Máxim	Percentil							
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.812	.	.812	.812	.812	.812	.812	.812	.812	.812	.812	.812
R cuadrado	.963	.	.963	.963	.963	.963	.963	.963	.963	.963	.963	.963

Fuente: elaboración propia con base las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 34. Modelación del escenario de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en las series II, III, IV, V y VI de (INEGI 1993 - 2014) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

3.7.3 Modelación de escenarios de Recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 – 2025).

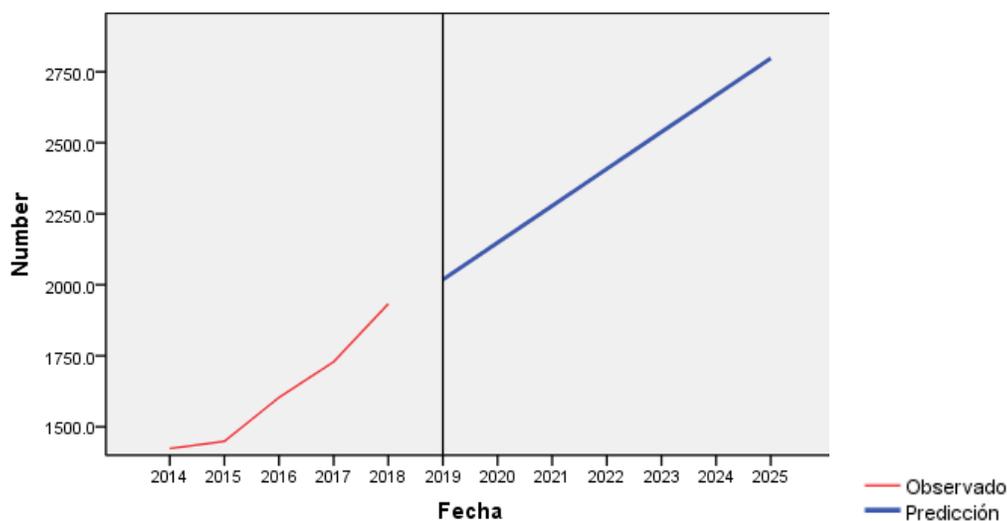
En la gráfica 35 se observa la modelación del escenario de Precipitación Pluvial; en los próximos 4 años se espera que sigan aumentando las Precipitación Pluvial de manera constante, con un R cuadrado de 0.931, ver (tabla 51).

Tabla 51. Ajuste del modelo del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste			Máxim					Percentil				
	Media	SE	Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.655	.	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655	.655	
R cuadrado	.931	.	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931	.931	

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 35. Modelación del escenario de Precipitación Pluvial en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

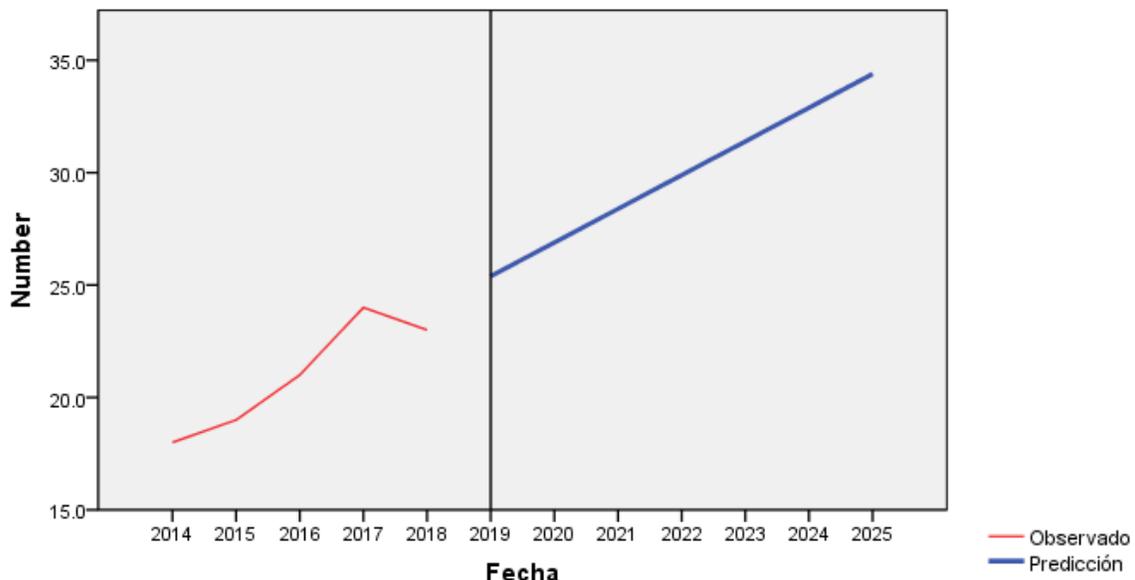
En la gráfica 36 se observa la modelación del escenario de Temperatura Media Anual; en los próximos 4 años se espera que sigan aumentando las Temperatura Media Anual de manera constante, con un R cuadrado de 0.805, ver (tabla 52).

Tabla 52. Ajuste del modelo del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste			Mínim		Percentil							
	Media	SE	o	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.710	.	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710	.710
R cuadrado	.805	.	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805	.805

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 36. Modelación del escenario de Temperatura Media Anual en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

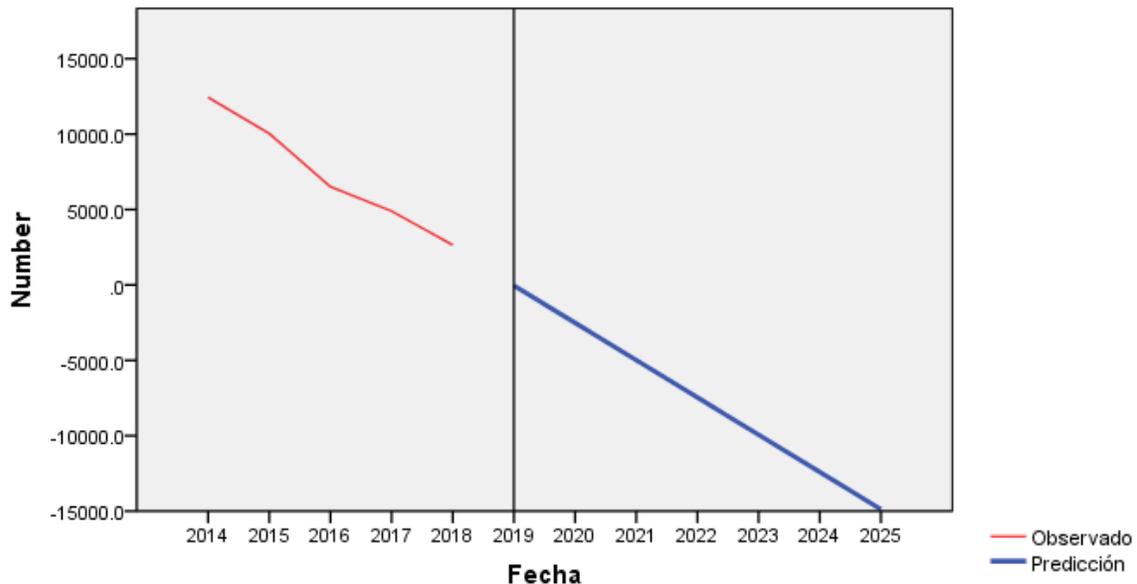
En la gráfica 37 se observa la modelación del escenario de Evapotranspiración; la cual refleja que disminuirá la evapotranspiración de manera constante en los siguientes 4 años, con un R cuadrado de 0.979, ver (tabla 53).

Tabla 53. Ajuste del modelo del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)

Estadístico de ajuste	Media	SE	Máxim					Percentil				
			Mínimo	o	5	10	25	50	75	90	95	
R cuadrado estacionaria	.761	.	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761	.761
R cuadrado	.979	.	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979	.979

Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Gráfica 37. Modelación del escenario de Evapotranspiración en el Parque Otomí Mexica. (2014 – 2025)



Fuente: elaboración propia con base en el Servicio Meteorológico Nacional SMN (1998 – 2018) y software Paquete Estadístico para Ciencias Sociales; Statistical Package for the Social Sciences SPSS, (2018)

Discusión sobre la modelación de escenarios de Captura de Carbono (ton), Erosión Potencial y Recarga del acuífero.

La modelación de escenarios de Captura de Carbono (ton) en los ecosistemas forestales en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).

El escenario que prevalece en la captura de carbono es tendencial óptimo en los ecosistemas de Bosque de encino (*Quercus*), Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*), Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*) y Bosque mesófilo de montaña, en ellos se observa aumento de la captura de carbono para los próximos 4 años. Sin embargo, en el Bosque Mixto (*Encino – Pino*), su tendencia disminuirá para los próximos 4 años.

Modelación de Escenarios de Erosión Potencial en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025).

Para el **Factor R** erosividad de lluvia, las estaciones meteorológicas con clave; 15037 Jiquipilco; 15045 La Marquesa; 15114 Santiago Tlazala; 15231 Presa Iturbide, indican tendencia óptima para los próximos 4 años se espera que aumenten de manera constante. Sin embargo, la estación con clave 15095 San Luis Ayucan se mantiene estable para los próximos 4 años. Finalmente, las estaciones con clave; 15298 Santa Cruz Ocuilan; 15394 Monte de Peña y 15057 Mimiapan se observa una tendencia al decremento para los próximos 4 años.

En cuanto al **Factor C** cobertura vegetal, su periodo de estudio fue de 1993 a 2014 por el acceso a los datos, el escenario que prevalece tendencial óptimo son las siguientes; Bosque de Pino (*Pinus hartwegii*); Bosque de Encino (*Quercus*) y Bosque mesófilo de montaña. Mientras que la tendencia al decremento se observa en las coberturas vegetales de; Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) y Bosque de Pino – Encino.

Finalmente, el **Factor R** erosividad de lluvia, **Factor C** Cobertura Vegetal, **Factor LS longitud** de la pendiente y pendiente media del terreno y **Factor K** Erosionabilidad del suelo, indican que la modelación del escenario de la Erosión

Potencial para los próximos 4 años se espera que siga aumentando de manera constante.

***Los Factores LS** longitud de la pendiente y pendiente media del terreno y **Factor K** Erosionabilidad del suelo no se modelaron individualmente porque no se observan cambios.

Modelación de escenarios de Recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 – 2025).

Debido a la obtención de información este escenario se redujo el periodo de estudio. El escenario que prevalece en las Precipitación Pluvial y Temperatura Media Anual es tendencial óptimo el cual indica que aumentará para los próximos 4 años. Mientras que la tendencia de la evapotranspiración indica que disminuirá para los próximos 4 años.

3.8 Propuesta teórico- metodológico para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación en Áreas Naturales Protegidas.

La última etapa de esta tesis es la reflexión sobre la propuesta teórico-metodológica establecida para la investigación doctoral. Las variables analizadas son nominales, ordinales, dependientes, estadísticas e independientes. Esto permitió la construcción de la propuesta teórico- metodológico para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación en áreas naturales protegidas.

3.8.1 Componentes Teóricos de la Propuesta

La propuesta teórica está integrada a partir de las siguientes premisas teóricas como se muestra en la figura 51.

Figura 51. Selección de los componentes teóricos de la propuesta



Fuente: Elaboración propia con base en Gutiérrez *et al.*, (2012 y 2013) y Serrano, (2008).

3.8.1.1 Postura filosófica del estoicismo para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación

Esta postura filosófica fue útil para la propuesta porque se fundamenta en buscar la felicidad interior el cual se divide en tres partes esenciales la primera es la lógica entendida como la epistemología estoica, la física que comprende la cosmología para saber la estructura del universo y la ética para saber cómo es el comportamiento humano.

Flores (2016) confirma que la naturaleza se rige por dos principios la primera es la causa que es la razón y la materia está dispuesta a cualquier mutación,

La filosofía, para los estoicos, en general, era en primera instancia una necesidad, una forma de vida, que no persigue utilidad alguna. Con la aparición de "la filosofía estoica" en la historia ya no se busca solamente la verdad, sino más bien, un repertorio de nuevas convicciones que le ayuden a un buen vivir suyo, ejercicio esencial es la búsqueda de la "felicidad", (Parra, 2000)

El hombre, para los estoicos debe conocer todo aquello que le permita conseguir la felicidad, primordialmente la felicidad interior, y no el goce de las cosas externas, (Parra, 2000)

Tradicionalmente los estoicos dividían la filosofía en tres partes, según nos informa Diógenes Laercio: en la física como a la ética y la lógica. Así lo dividió por primera vez Zenón de Citio en su obra el racionio, (Flores, 2016)

La explicación de cada división se explica a continuación: bajo el título de lógica, los estoicos estudian la estructura del lenguaje, incluida la teoría de los significados, la gramática y la comunicación; dentro del objeto de estudio de la lógica, incluía la teoría del conocimiento, por lo que se debe entender también por lógica, la epistemología estoica, (Flores, 2016)

La física comprende la cosmología, los tipos de entidades existentes, la estructura causal del universo, pasando por sus principios y elementos.

Finalmente, la ética explica el estudio de las pasiones y causas del comportamiento humano.

Los estoicos confirman que en la naturaleza existen dos principios que dan origen a los seres vivos las cuales son; la causa y la materia. La materia yace inerte, dispuesta a cualquier mutación, la cual estaría inactiva si nadie lo moviese; en cambio la causa, que es la razón, conforma la materia, la cual la transforma en el sentido que quiere, (Flores, 2016)

3.8.1.2 Escuela del pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales aplicado a los Servicios Ecosistémicos

La escuela del pensamiento ecológico fue útil para la propuesta porque se rige bajo el desarrollo sustentable el cual consiste en la administración eficiente y responsable de los recursos naturales con la finalidad de preservar el equilibrio ecológico para futuras generaciones.

La cual considera la parte ambiental que es el desarrollo sustentable, su primer hito fue la Conferencia de Estocolmo, cuya declaración contiene los principios básicos del desarrollo sustentable: el crecimiento económico, la innovación tecnológica, la transferencia de tecnología del Norte al Sur, mejor manejo de recursos naturales, la reducción de la tasa de crecimiento de la población mundial, la cooperación internacional y la elaboración de las leyes ambientales (UNCHE, 1972 en Tetreault, 2008). Además, la conferencia de Estocolmo dio lugar al Programa de las Naciones Unidas para la Protección del Medio Ambiente (PNUMA), cuyo propósito es el de coordinar programas ambientales entre el sistema de las Naciones Unidas y promover una cooperación internacional sobre cuestiones ambientales, (Tetreault, 2008)

3.8.1.3 Desarrollo Sustentable

El desarrollo sustentable contribuye a esta propuesta porque consiste en la administración eficiente y responsable de los recursos naturales para preservar el equilibrio ecológico dentro del área de estudio.

El desarrollo sustentable es una propuesta que integra tres dimensiones a) económica; b) ambiental y c) social, postura que constituye el esfuerzo inicial por construir una visión integral sobre los problemas más afanosos del cómo pensar el desarrollo, recuperando las aportaciones de las teorías del desarrollo como campo

de estudio de las ciencias económicas hasta la etapa actual de la construcción holística y multidisciplinaria que se propone dentro del marco de estudio del desarrollo sustentable y las nuevas ciencias del conocimiento (Ciencias Ambientales) (Gutiérrez, 2007).

El desarrollo sustentable tiene su aparición en las perspectivas discursivas de las teorías del desarrollo, dentro de las cuales trata de reestructurar su campo del conocimiento a partir de un cambio cualitativo en la cadena de trascendencia que articula el crecimiento económico, la equidad social y la conservación ecológica. Si bien, las teorías del desarrollo aparecen en el campo de estudio de las ciencias económicas (teoría o escuela neoclásica⁶ y teoría o escuela estructuralista), después de la segunda guerra mundial, centra sus objetivos en las transformaciones de las estructuras económicas de las sociedades emergentes o países subdesarrollados, con la finalidad de lograr un acontecer económico, social y cultural; posturas que en su momento dejaron de lado la conservación ambiental de los recursos naturales (Treillet, 2005; Gutiérrez, 2007 y Aroche, 2013).

3.8.1.4 Los Servicios Ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental

Los servicios ecosistémicos como agentes de resiliencia socioambiental constituyeron una parte fundamental para la propuesta porque se aplicó para la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico como se describe a continuación.

“En la actualidad, el abordaje de la resiliencia desde el ámbito biológico ha aumentado, debido a la búsqueda de mecanismos de adaptación al entorno por parte de las personas. En este sentido la resiliencia socioambiental se entiende como la capacidad de un objeto o sistema biológico de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico Tilman *et al.*, (2006). De acuerdo con Allison y Martiny (2008) a medida que aumenta la diversidad biológica, un ecosistema puede ser resiliente. Dichos autores proponen que la biodiversidad amortigua las variaciones ambientales, ya que las especies tienen distinta capacidad de crecimiento ante diferentes condiciones climáticas; por ejemplo, algunas plantas resistirían

condiciones de sequía y dominarían años secos, otras por el contrario aprovecharían la abundancia de humedad”.

3.8.1.5 Las Ciencias Ambientales como disciplina integradora

Las Ciencias Ambientales son fundamentales para esta propuesta para prevenir impactos de las actividades humanas, toda vez que el Parque Otomí Mexica actúa como muro de contención para la contaminación del medio ambiente.

Las Ciencias Ambientales como disciplinada integradora. Según (Bocco, 2010) menciona una definición de trabajo, el autor propone de manera simple que las Ciencias Ambientales tienen por objeto el estudio del ambiente y de nuestro rol (como sociedad) en él. Analiza las interacciones entre los componentes físicos, químicos y biológicos del ambiente, aunque más específicamente el impacto de la actividad humana sobre el mismo, así como los efectos en los organismos.

3.8.1.6 Teoría de Sistemas Complejos para el análisis de los Servicios Ecosistémicos

La Teoría de Sistemas Complejos fue útil para esta propuesta porque tiene su base en la epistemología en el trabajo interdisciplinario en la cual se fundamentan los Servicios Ecosistémicos.

Se trata, en primera instancia, de una metodología de trabajo interdisciplinario, pero es, al mismo tiempo, un marco conceptual que fundamenta, sobre bases epistemológicas, el trabajo interdisciplinario, García, (2006).

Ningún sistema está dado en el punto de partida de la investigación. El sistema no está definido, pero es definible. Una definición adecuada sólo puede surgir en el transcurso de la propia investigación y para cada caso particular. La información anterior no constituye una proposición metodológica, aunque las implicaciones metodológicas son obvias. Su fundamentación es estrictamente epistemológica. En efecto, la afirmación allí contenida es antiempirista, en tanto niega que las características del sistema estén dadas y sean accesibles a la experiencia directa de cualquier "observador neutro". (García, 2006).

3.8.1.7 Teoría de la Ecología Cultural

Esta teoría contribuye a la propuesta porque analiza el uso que da la sociedad a las especies y como lo incorpora a la cultura, las tradiciones, ritos y costumbres.

La ecología cultural es una orientación teórico-metodológica que surge dentro de los estudios y teorías antropológicas durante la década de los años cincuenta bajo la corriente filosófica del Neoevolucionismo y cuyo fundador es Julian H. Steward (1955), quien evolucionó el pensamiento sobre las adaptaciones sociales al medio natural, y es así como propone una serie metodológica encargada de investigar los cambios sociales sobre las adaptaciones, mediante los procesos tecnológicos y culturales (Ruiz y Castañeda, 2007).

3.8.1.8 Prospectiva de los Servicios Ecosistémicos

La prospectiva de los Servicios Ecosistémicos fueron útiles en la propuesta porque se analizaron los escenarios futuros de los Servicios Ecosistémicos de regulación de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero para plantear alternativas de solución a futuras investigaciones.

La prospección se realiza desde el pasado, pasando por el presente para llegar a un futuro. La prospectiva es el análisis del estado futuro el cual puede ser corto (5 a 10 años), medio (15 a 20 años) y largo plazo (30 a 50 años). Depende el territorio de estudio; ya que existen diferentes escalas: estatal, regional, local. Dicha investigación aplicará un estudio estatal. El escenario que se ocupará para dicha investigación es el estratégico deseable y posible (imagen objetivo). Gutiérrez, (2013).

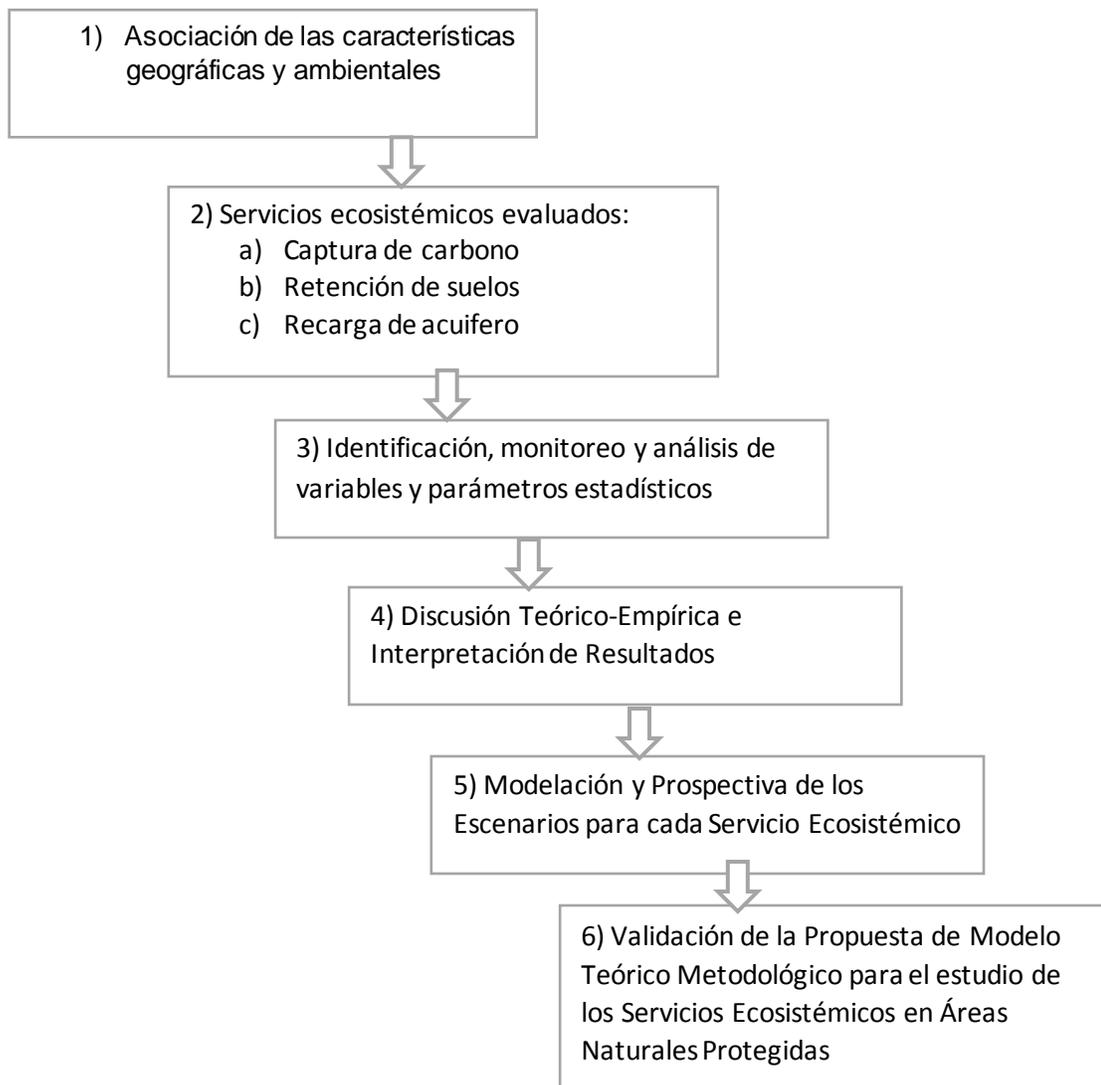
La Prospectiva es una actuación crítica y creativa, caracterizada por plantear opciones o alternativas de solución a los problemas suscitados por una situación.

Un Modelo es la representación de la realidad del territorio. Modelar es desarrollar una descripción lo más exacta posible de un sistema y de las actividades llevadas a cabo en él. También la caracterización y el diagnóstico son modelos. En la fase del modelado se determina un destino para las UGAs. Existen tres tipos de propuestas: Generales, Programáticas y Estratégicas.

3.8.2 Componentes Metodológicos de la Propuesta

La Selección y diseño de los componentes metodológicos de la propuesta está integrada a partir de diferentes metodologías como se muestra en las premisas metodológicas (figura, 52). El método que se aplicó incluye: clasificar - tipificar, cuantificar – fotointerpretar y ubicar espacialmente cada servicio ecosistémico.

Figura 52. Selección y diseño de los componentes metodológicos de la propuesta



Fuente: elaboración propia con base en Gutiérrez *et al.*, (2012 y 2013) y Serrano, (2008).

3.8.2.1 Asociación de las características geográficas y ambientales

Se estableció la asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica con base en los principios y el método cartográfico, se validaron los resultados de los mapas de uso de suelo a través de matrices de confusión, aplicados por Camacho, (2019) para obtener el índice de confiabilidad de intervalos de confianza para cada ecosistema.

3.8.2.2 Servicios ecosistémicos evaluados

En este apartado se identifican los servicios ecosistémicos evaluado bajo las siguientes metodologías:

a) Se evaluó el servicio ecosistémico de captura de carbono, se aplicó el índice de Morfín *et al.*, (2015) posteriormente se hizo una comparación del carbono almacenado con diferentes autores bajo las características ambientales y morfológicas, se finalizó con la validación “in situ” de las condiciones ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí Mexica.

b) Se evaluó el servicio ecosistémico de retención del suelo, se retomó la metodología de Vargas, (2015) el cual utilizó el RUSLE Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año, obteniendo el factor R erosividad de la lluvia en mm/ha.año., factor k erosionabilidad el suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha.h), factor L longitud del terreno (adimensional), factor S pendiente del terreno (adimensional) y factor C cobertura y manejo de la vegetación (adimensional). Lo que nos dio como resultado la retención de suelo en el Parque Otomí Mexica para los años 2014 – 2018.

c) Se evaluó el servicio ecosistémico de recarga del acuífero se aplicó el método empleado fue de Llerena (2003), utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo comprendido 2014 – 2018. Las etapas metodológicas empleadas incluyen 1) Estimación de Precipitación Pluvial, 2) Temperatura Media Anual, 3) volumen evapotranspirado y 4) evapotranspiración anual real.

3.8.2.3 Identificación, monitoreo y análisis de variables y parámetros estadísticos

Se identifican cada una de las variables de los servicios ecosistémicos.

a) Se estableció una asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica: 1) Identificación de los usos del suelo presentes en el Parque Otomí Mexica, 2) Procesamiento de imágenes de satélite 2014 y 2018 para la preclasificación. 3) Identificación de los tipos de vegetación presentes en el parque Otomí Mexica. 4) Identificación de los ecosistemas presentes en el Parque Otomí Mexica. 5) Diseño de muestreo, Evaluación de sitios de verificación, Análisis de los datos. 6) Producto: mapa de localización; uso de suelo; vegetación; hidrología; geología; clima; tipo de suelo e identificación de ecosistemas.

b) Se integró la caracterización y cuantificación para la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: almacenamiento de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos, del Parque Otomí - Mexica. 1) Servicio Ecosistémico de Almacenamiento de Carbono. 1.1) Clasificación y tipificación de los ecosistemas presentes en el parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema mediante foto interpretación cartográfica. 1.2) Delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema. 1.3) Cálculo de la cantidad de carbono capturado en cada ecosistema, a partir de la superficie de cada ecosistema y la captura de carbono calculado por Morfín R. et al., (2015). 1.4) Producto: mapa de captura de carbono. 2) Servicio Ecosistémico de Retención de suelo. 2.1) Factor R erosividad de la lluvia, 2.2) Factor k erosionabilidad del suelo, 2.3) Factor LS Longitud de pendiente y pendiente media del terreno y 2.4) Factor C cobertura vegetal. 2.5) Producto: mapa de Retención de Suelo. 3) Servicio ecosistémico recarga del acuífero. 3.1) $P = \text{Precipitación}$, $P = \text{Precipitación media anual}$, $AP = \text{Área del parque}$, y $ET = \text{Volumen evapotranspirado}$, $AP = \text{Área del parque}$ y $ETR = \text{Evapotranspiración anual real}$. 3.4) $ETR = \text{Evapotranspiración anual real}$, $P = \text{Precipitación anual}$, $L = \text{Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación}$.

c) Modelar escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos. 4.1) Variables. 4.2) Elementos dependientes. 4.3) Cambios estructurales predeterminados 4.4) Servicios Ecosistémicos futuros 4.5) Elementos constantes de los ecosistemas.

3.8.2.4 *Discusión Teórico - Empírica e Interpretación de Resultados*

En este apartado se lleva a cabo la discusión con base en diferentes autores en la cual se analizó como está integrado el área de estudio

3.8.2.5 *Modelación y Prospectiva de los Escenarios para cada Servicio Ecosistémico*

La siguiente investigación se realizó en el software SPSS Statistical Package for Social Sciences Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales, el análisis de las series temporales de cada servicio ecosistémico de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero fue prever los valores futuros de la serie. En el cual se explica en el apartado de resultados si aumentarán o disminuirán los servicios ecosistémicos y en qué medida lo harán.

El modelo debe cumplir ciertos criterios: *Que la r^2 se acerque a "1", que no sean números negativos y que no tienda a "0"

3.8.2.6 *Propuesta Teórico Metodológica para el estudio de los Servicios Ecosistémicos en Áreas Naturales Protegidas (SEANP)*

En la tabla 56, se observa la validación de la propuesta de modelo teórico metodológico para el estudio de SEANP en el cual se elaboró y validó la propuesta teórico - metodológica para el estudio de Servicios Ecosistémicos en Áreas Naturales Protegidas, como se muestra a continuación:

Tabla 54. Propuesta Teórico Metodológica para el estudio de SEANP

Propuesta metodológica	Variables y parámetros analizadas	Fundamento teórico	Fundamento metodológico
1.1) Se estabilizó la asociación de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica.	Variables -Tipos de características presente en el parque Otomí – Mexica. -Área Superficial de las características presente en el Parque Otomí – Mexica. -Tendencia espacial de distribución de las características presente en el Parque Otomí – Mexica.	Postura filosófica: -Estoicismo: El curso de la vida está determinada por las leyes de la naturaleza que se repiten cíclicamente, Zenón de Citio (a. IV a.C-II d.C.); Parra, (2000).	Construcción del marco teórico del Parque Otomí Mexica

	<p>Parámetro estadístico</p> <p>-% de las áreas totales</p> <p>-% de las áreas totales</p> <p>-Tipo</p>		
<p>1.2) Se identificaron los usos del suelo presentes en el Parque Otomí Mexica</p>	<p>Variabes</p> <p>-Tipos de uso de suelo.</p> <p>-Área Superficial de del uso de suelo.</p> <p>-Se asoció la tendencia espacial de distribución del uso de suelo.</p> <p>Parámetro estadístico</p> <p>-% de las áreas totales</p> <p>-% de las áreas totales</p>	<p>Escuela del pensamiento:</p> <p>-Escuela del pensamiento ecológico: se divide en ambiental y desarrollo sustentable, la cual se justifica en los principios básicos como es el crecimiento económico, la innovación tecnológica y el manejo de los recursos naturales.</p> <p>Se divide en:</p> <p>A) Desarrollo sustentable:</p> <p>Consiste en la administración eficiente y responsable de los recursos naturales para preservar el equilibrio ecológico, Foladori, (2002); Gutiérrez, (2008) y Tetreault, (2008)</p> <p>B) Agenda 21 & agenda 2030: el trabajo de la agenda es lograr los objetivos planteados en los niveles: económico, social, ambiental y el enfoque de equidad, los cuales se basan en las agendas locales para la internacionalización y tránsito hacia la agenda 2030 para fortalecer las estrategias territoriales.</p>	<p>Análisis especial de la distribución de cada Servicio Ecosistémico estudiado</p>

<p>1.3) Se integraron los tipos de vegetación presentes en el parque Otomí Mexica.</p>	<p>Variabes</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cualitativo: tipo o clase vegetación. -Área Superficial del tipo de vegetación. -Tendencia espacial de distribución del tipo de vegetación. <p>Parámetro estadístico</p> <ul style="list-style-type: none"> -% de las áreas totales -% de las áreas totales -Cualitativo: tipo o clase 	<p>-Teoría de la Ecología Cultural: Se refiere al uso que da la sociedad a las especies y como lo incorpora a la cultura, las tradiciones, ritos y costumbres, Julian H. Steward (1955)</p>	<p>Delimitación y caracterización geográfica del área de estudio con base en la elaboración de la cartografía</p>
<p>1.4) Se estabilizaron los ecosistemas presentes en el parque Otomí Mexica.</p>	<p>Variabes</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cualitativo: tipo o clase de ecosistema. -Área Superficial del tipo del ecosistema. -Tendencia espacial de distribución del tipo del ecosistema. <p>Parámetro estadístico</p> <ul style="list-style-type: none"> -% del área total -% del área total -Cualitativo: tipo o clase 	<p>-Teoría de Sistemas Complejos:</p> <p>Está constituido por elementos heterogéneos en interacción y de ahí su denominación de complejos, García, (1981); (2000); (2006) y Rodríguez, (2018).</p>	<p>Delimitación y caracterización geográfica del área de estudio con base en la elaboración de la cartografía.</p>
<p>3)Se integró la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución del Almacenamiento de Carbono</p>	<p>Variabes</p> <ul style="list-style-type: none"> -Tipos de Almacenamiento de Carbono. -Área Superficial de Almacenamiento de Carbono. -Tendencia espacial de distribución del Almacenamiento de Carbono. <p>Parámetro estadístico</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cualitativo: tipo o clase 	<p>Disciplina:</p> <p>-Ciencias Ambientales: Es una disciplina científica cuyo principal objetivo es buscar y conocer las relaciones que mantiene el ser humano consigo mismo y con la naturaleza, Jaksin, (1997); Chiras, (2006); RCFA, (2007); Bocco, (2010) y García,</p>	<p>Construcción del marco teórico del Parque Otomí Mexica.</p>

	-Ecuación Lineal. -Cualitativo: tipo o clase	(2019).	
4) Se Integró la caracterización y cuantificación de la tendencia espacial de distribución de la Retención de suelo	Variabes Factor R erosividad de lluvia Factor K erosionabilidad del suelo Factor C Cobertura vegetal Factor LS Longitud de la pendiente y pendiente media del terreno Parámetro estadístico -Ecuación Lineal -RUSLE -Cualitativo:	Servicios Ecosistémicos. Son la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad, Costanza et. al. (1997); De Groot et al. (2002); MEA (2005)	Análisis especial de la distribución de cada Servicio Ecosistémico, 1) Captura de carbon 2) Retención de suelo 3) Recarga del acuífero
5) Se modelaron los escenarios futuros de los servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica.	Variabes Tipos de Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Área Superficial de los Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Tendencia espacial de distribución de los Ecosistemas en Sistemas de información Geográfica para análisis retrospectivo y prospectivo. Parámetro estadístico Cualitativo: tipo o clase	Prospectiva de los Servicios Ecosistémicos. La prospección se realiza desde el pasado, pasando por el presente para llegar a un futuro, Kahn (1967); Heijden (1996); Porter (1985); Godet (1992); Wack (1985); Chermack (2003) y Gutiérrez (2013)	Análisis estadístico de la distribución de cada Servicio Ecosistémico, 1) Captura de carbon 2) Retención de suelo 3) Recarga del acuífero

Fuente: Elaboración propia (2022)

3.9 Discusión General

La postura filosófica estoica se logró mediante la división lógica, física y ética, las cuales integradas logran una contemplación del fenómeno social, con la que se obtiene la explicación del comportamiento humano.

Las disciplinas científicas abordadas en esta investigación son las ciencias ambientales (Jaksin, 1997; Chiras, 2006; RCFA, 2007; Bocco, 2010); y la teoría de sistemas complejos (García, 2006 y Rodríguez, 2018), las cuales se integraron adecuadamente a la postura filosófica del estoicismo, con lo que se eludieron interpretaciones subjetivas evitando prenociones.

La escuela del pensamiento empleada en la investigación es la ecológica que se enfoca en el desarrollo sustentable basada en (Foladori, 2002; Gutiérrez, 2008 y Tetreault, 2008), la cual se sustenta en los principios básicos del crecimiento económico, la innovación tecnológica y el manejo de los recursos naturales.

El fundamento legal y normativo relacionado con el ambiente para el estudio del área es la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en el artículo 4° constitucional y Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable, artículo 27 constitucional. Tienen sus bases jurídicas en el Libro Segundo: Del Equilibrio Ecológico, la Protección al Ambiente y Fomento al Desarrollo Sostenible, establecido en el Código para la Biodiversidad del Estado de México. El cual fue publicado en la Gaceta del Estado de México el día 13 de mayo de 2005.

El sustento teórico para Hernández (2008) señala el estado pasado y actual del conocimiento del problema de estudio, el cual agrega valor a la literatura existente generando certeza y validez científica en el campo de las Ciencias Sociales. En la presente investigación dicha postura permitió la interpretación de la evaluación de la distribución espacial de los servicios ecosistémicos en el área de estudio.

El enfoque de las Ciencias Ambientales (Chiras, 2006; RCFA, 2007; Bocco, 2010, García, 2019; Gonzáles 2016) favoreció el estudio de los servicios eco sistémicos de

regulación de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero para analizar los problemas ambientales que vive la sociedad con la naturaleza.

La Teoría de Sistemas Complejos (García, 2006 y Rodríguez, 2018) sustentó la definición y la articulación sistémica y explícita de las interrelaciones entre los componentes de los sistemas que componen al área de estudio.

La prospectiva de los Servicios Ecosistémicos (Kahn en 1967; Porter, 1985; Wack, 1985; Godet, 1992; Schwartz, 2003; Conway, 2004; Bradfield *et al.*, 2005 y Gutiérrez, 2013), fundamentó el análisis de estudio de los escenarios tendenciales pasando por el pasado y por el presente para llegar al futuro de cada fenómeno estudiado.

Se tomó en cuenta la agenda territorial, la cual tiene sus bases en la participación de los actores sociales y en el diálogo institucional entre todos los niveles, su propósito es el logro de los objetivos planteados tanto en el nivel económico, como en el social, ambiental y el enfoque de equidad, los cuales se desprenden de agendas locales para la internacionalización y tránsito hacia la agenda 2030 (CEPAL, 2015) para fortalecer las estrategias territoriales.

La importancia de los servicios ecosistémicos para la resiliencia socioambiental está basado en la capacidad de resistir un impacto y permanecer en estado de equilibrio dinámico. Esto es que Según Allison y Martiny (2008) “a medida que aumenta la diversidad biológica, un ecosistema puede ser resiliente”. Dichos autores proponen que la biodiversidad amortigua las variaciones ambientales, ya que las especies tienen distinta capacidad de crecimiento ante diferentes condiciones climáticas; por ejemplo, algunas plantas resistirían condiciones de sequía y dominarían años secos, otras por el contrario aprovecharían la abundancia de humedad.

En cuanto a los resultados obtenidos acerca del índice de almacenamiento de carbono, se realizó una comparación de metodologías empleadas por diferentes autores, para cada ecosistema. Esto es, que para el bosque mixto pino – encino el índice de almacenamiento de carbono se comportó de la siguiente manera: en el área de estudio de esta investigación comparándolo con Morfín R. *et al.*, (2015) el

índice es el mismo, mientras que para Aguirre y Jiménez (2007) hay una diferencia de 0.094 ton/ha

En cuanto a las características ambientales y morfológicas las cuales son: grosor promedio, altura de los árboles, clima, precipitación, temperatura, altitud y pendiente comparándolos con nuestra área de estudio los resultados son similares, sin embargo, en la metodología de Morfín R. *et al.*, (2015) no hay datos del grosor promedio y pendiente en todos los ecosistemas estudiados.

Para el bosque de encino el índice de almacenamiento de carbono comparando nuestra área de estudio con Morfín R. *et al.*, (2015) y Figueroa *et al.*, (2010) el índice es el mismo, sin embargo, hay una diferencia de 0.0117 ton/ha en la metodología de Aguirre y Jiménez (2007), en cuanto a las características ambientales y morfológicas como son: grosor promedio, altura de los árboles, clima, precipitación, temperatura, altitud y pendiente comparándolos con el área estudiada en esta tesis los resultados son similares.

Para el bosque de oyamel el índice de almacenamiento de carbono en el área estudiada comparándolo con Morfín R. *et al.*, (2015) y Jiménez E., (2013) son iguales, sin embargo, hay una diferencia de 0.0087 ton/ha para Avedaño *et al.*, (2009).

Finalmente, para el bosque de pino el índice de almacenamiento de carbono en nuestra área de estudio, comparándolo con Morfín R. *et al.*, (2015) y Jiménez E., (2013) son iguales, sin embargo, para Galeana *et al.*, (2013). hay una diferencia de 0.005 ton/ha Para la verificación de datos se empleó una validación “*in situ*” en el área de estudio.

Los resultados de cambios en el proceso de erosión indican que, al aumentar la longitud de pendiente y la pendiente media del terreno, aumenta el grado de erosión de suelo, por tanto, para el año 2014 y 2018 los ecosistemas con mayor erosión fueron: el bosque de oyamel, bosque de encino y agricultura de temporal, que se localizan en zonas con menor retención de suelo. Los cambios en el proceso de erosión fueron analizados, evaluados y representados cartográficamente mediante

los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales indicaron la distribución espacial de la erosión.

Las metodologías retomadas para los cambios en el proceso de erosión se fundamentaron en COLPOS (1991), Vargas Lomelín J. (2015) y Flores I. (2016) comparándolas con el área de estudio, quienes destacan que las características ambientales y morfológicas que coinciden tanto en el clima, temperatura, precipitación, altitud y pendiente, por tanto, factores considerados para nuestra área de estudio.

En cuanto a los resultados obtenidos para la recarga del acuífero, se vieron afectados por una variedad de ciclones, los cuales fueron los siguientes: en el año 2014 Dolly, (CONAGUA, 2014) para el año 2015 Carlos, (CONAGUA, 2015) para el año 2016 Danielle y Earl, (CONAGUA, 2016) para el año 2017 Beatriz y Franklin, (CONAGUA, 2017) los cuales en promedio contribuyeron con una precipitación de 880.7mm.

Otros fenómenos presentados en el periodo de estudio fueron: el niño en el año 2015, posteriormente en el año 2016 se registró como uno de los más cálidos, finalizando El Niño en primavera y dando paso al evento La Niña débil a finales del año. Para el año 2017 el registro fue neutral, es decir, sin condiciones de El Niño y La Niña a lo largo del pacífico ecuatorial. En verano (junio-agosto 2017) se registraron huracanes cerca de las costas mexicanas (CONAGUA, 2015; 2016; 2017).

Para el año 2018 en verano (junio – agosto), se registraron anomalías negativas sobre el noreste de México localizando radiación saliente de onda larga (OLR) asociadas a nubosidad y precipitaciones características del huracán de Norteamérica. Se presentó la canícula con lluvias por debajo del promedio y temperaturas por arriba del promedio en el noreste, centro y sur de México (CONAGUA, 2018). Todos estos afectaron los resultados obtenidos en el cálculo de la recarga del acuífero.

Posteriormente los resultados de modelación de escenarios se realizaron mediante una comparación de la metodología empleada por, Kahn, (1967); Heijden, (1996) y Porter, (1985). La modelación se comportó de la siguiente manera 1) Modelación de escenarios de captura de carbono (ton) en los ecosistemas forestales en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025). Se observa que la captura de carbono muestra una tendencia al aumento en los ecosistemas de Bosque de encino (*Quercus*), Bosque Mixto (*Encino – Pino*), Bosque de Oyamel (*Abies Religiosa*) y Bosque mesófilo de montaña, por lo que se prevé un aumento de la captura de carbono para los próximos 4 años en estos ecosistemas. Sin embargo, en el Bosque de Pino (*Pinus*) su tendencia se mantiene estable para los próximos 4 años. Kahn (1967) emplea el método cualitativo, mientras que Heijden, (1996) emplea el método estructurado para el desarrollo de escenarios y Porter (1985) permite prever cómo será el mundo en el futuro, dichas metodologías fueron aplicadas en esta investigación.

2) Modelación de escenarios de la erosión potencial en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025). Se realizó una comparación de metodologías empleadas por, Godet (1992) y Wack (1985). El área de estudio en la que fue aplicada la metodología RUSLE se analizó cada factor, esto es: Factor R (erosividad de lluvia), Factor C (cobertura vegetal), Factor LS (longitud de la pendiente y pendiente media del terreno) y Factor K (erosionabilidad del suelo), los cuales indican que la modelación del escenario de la Erosión Potencial para los próximos 4 años se espera que siga aumentando de manera constante. Godet (1992) analiza el uso de la perspectiva para el diseño de escenarios y Wack (1985) analiza los escenarios bajo una estructura robusta, complementados con un análisis numérico, dichas metodologías fueron aplicadas en esta investigación.

3) Modelación de escenario para la recarga del acuífero en el Parque Otomí Mexica (2014 – 2025): se realizó mediante una comparación de metodologías empleadas por Chermack (2003) y Gutiérrez (2013). En el área de estudio las Precipitación Pluvial e Temperatura Media Anual muestran una tendencia al incremento para los próximos 4 años. Mientras que la tendencia para la evapotranspiración indica decremento para los próximos 4 años. Chermack (2003) hace una comparación teórica para la

construcción de escenarios y prueba de escenarios, mientras que para Gutiérrez (2013) su metodología se basa en partir del pasado, pasando por el presente para llegar al futuro, se concluye que dichas metodologías coinciden con lo aplicado en esta investigación.

Finalmente se elaboró y validó la propuesta teórica - metodológica para el estudio de los Servicios Ecosistémicos de regulación en Áreas Naturales Protegidas, bajo la postura filosófica del estoicismo (Parra; 2000 y Flores 2016), la escuela del pensamiento de (Tetreault, 2008), las disciplinas que lo integra Ciencias ambientales de (RCFA, 2007; Bocco; 2010, Chiras; 2006, García; 2019) la teoría de Sistemas Complejos de (García, 2006; Rodríguez, 2018) y la prospectiva de los servicios ecosistémicos de (Godet, 1992; Peter Schwartz, 2003; Iver B. Neumann y Erik F. Verland, 2004; Bradfield *et al.*, 2005; Vergara, 2010 y Gutiérrez, 2013).

Fue posible construir un modelo teórico fundamentado con una metodología que integró tanto los componentes teóricos como los componentes metodológicos por medio del método cartográfico aplicando la fotointerpretación de mapas de identificación de los ecosistemas presentes en el parque, mapas de uso de suelo a través de matrices de confusión, mapas de los servicios ecosistémicos de retención de suelo y captura del acuífero. Cada mapa utilizó los siguientes métodos: clasificación - tipificación, cuantificación – fotointerpretación, ubicación espacial.

También se elaboraron gráficas para representar el índice de captura de carbono por ecosistema y gráficas para representar la modelación de escenarios futuros de cada servicio ecosistémico en el cual se aplicó el método estadístico.

Con todo lo anterior se logró un sustento ambiental, económico, cultural, alimentario y de ocio para los grupos humanos que habitan en el Área Natural Protegida del Parque Otomí – Mexica.

CONCLUSIONES

La postura filosófica abordada contribuyó al objetivo de estudio, en el cual se logró el análisis de conocimiento de las características geográficas y ambientales presentes en el Parque Otomí Mexica. La escuela del pensamiento que hizo aportaciones a los Servicios Ecosistémicos de regulación fue la escuela ecológica la cual se fundamenta en el desarrollo sustentable. Las disciplinas científicas abordadas en la investigación fueron las Ciencias Ambientales y la Teoría de Sistemas Complejos, las cuales permitieron el análisis teórico para la interpretación adecuada bajo las aportaciones de diferentes autores. La prospectiva de los servicios ecosistémicos contribuyó en la prospección de escenarios futuros para plantear alternativas de solución a los problemas ambientales de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero.

Una aportación de esta investigación fue la actualización del cambio de uso de suelo en el Parque Otomí Mexica a través de matrices de confusión, basadas en las aplicadas por Camacho (2019) para obtener el índice de confiabilidad de intervalos de confianza para cada ecosistema.

Se considera una aportación la representación cartográfica de los servicios ecosistémicos a partir de la caracterización y cuantificación geográfica para la distribución espacial del servicio ecosistémico de regulación captura de carbono para lo cual se aplicó el índice de Morfín *et al.*, (2015). Posteriormente se hizo una comparación basada en diferentes autores del carbono almacenado bajo las características ambientales y morfológicas de cada estudio; se finalizó con la validación “in situ” de las condiciones ambientales y morfológicas de los ecosistemas forestales del Parque Otomí Mexica.

Se realizó la representación cartográfica de la erosión potencial, para lo que se retomó la metodología de Vargas (2015) quien utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE), para determinar la pérdida de suelo en toneladas por hectárea al año.

Se logró la representación cartográfica de la recarga del acuífero por medio del método empleado por Llerena (2003), utilizando información de variables

climáticas de temperatura y precipitación del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo comprendido 2014 – 2018; y se confirmó la importancia que tiene el Parque Otomí Mexica como zona de recarga del acuífero y regulación de ecosistemas.

Posteriormente se realizó la modelación de escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos, en la que se aplicó el modelo propuesto por Porter, para la captura de carbono, erosión potencial y recarga del acuífero, representados cartográficamente para varios periodos de tiempo, cabe mencionar que el periodo de modelación comprendido para la captura de carbono y la erosión potencial fue de 1998 – 2025 y el periodo de modelación para la recarga del acuífero fue del 2014 al 2025.

Para concluir se espera que la propuesta metodológica para la evaluación y modelación de servicios ecosistémicos en el Parque Otomí Mexica del Estado de México, sea útil para otras investigaciones sobre la captura de carbono, erosión potencial, recarga del acuífero y modelación de escenarios, para la prevención de problemas ambientales en Áreas Naturales Protegidas con el fin de obtener mayor calidad de vida de la población y aprovechamiento de los recursos naturales en estas áreas.

RECOMENDACIONES

La investigación se fundamentó bajo diferentes etapas y enfoques, la metodología contribuyó a verificar los objetivos propuestos, asimismo las aplicaciones de diferentes técnicas de investigación dieron como resultado la obtención de información; se recomienda realizar estudios sobre diferentes servicios ecosistémicos utilizando los métodos geográfico, cartográfico mediante SIG, comparativo entre diversos periodos de tiempo, con validación estadística y verificación en campo: tal como se aplicaron en este estudio. Es importante también la aplicación de la modelación de escenarios futuros mediante el método prospectivo.

En los resultados del servicio ecosistémico de captura de carbono, se destacó la importancia de representar la tendencia de distribución espacial y cuantificación del servicio ecosistémico, para así identificar en qué posición geográfica se requiere de mayor atención; se recomienda aplicar técnicas de conservación forestal en las zonas problemáticas identificadas y monitorear los niveles de captura de carbono en ellas.

Para el servicio ecosistémico de erosión potencial se representó la tendencia de distribución espacial y se determinó la cuantificación de pérdida de suelo; así mismo se identificaron las zonas con mayor pérdida de suelo; por lo que se recomienda aplicar técnicas de conservación de suelos y monitorear los niveles de retención del suelo en diferentes momentos.

Respecto al servicio ecosistémico de recarga de acuíferos, se representó la tendencia de distribución espacial y cuantificación de la recarga y se identificaron las zonas de recarga; se recomienda conservar las zonas con recarga actual importante, así como aplicar técnicas para aumentar la recarga en zonas con potencial.

Durante la modelación de escenarios futuros para los servicios ecosistémicos de captura de carbono, retención de suelo y recarga del acuífero se obtuvieron las tendencias para cada servicio; y se recomienda que en futuros estudios se

contrasten resultados calculado con las tendencias modeladas, con el fin de validar las metodologías de prospección.

Se recomienda finalmente aplicar en otros estudios la propuesta teórica metodológica con la que se logró fundamentar cada una de las etapas estudiadas en esta investigación.

Productos de Investigación

En este apartado se muestran los productos de investigación, los cuales son capítulos de libro y artículos elaborados en los años, 2020, 2021 y 2022

4.1 Servicios Ecosistémicos en el parque Otomí – Mexica. Una propuesta metodológica.

Capítulo de libro publicado en RETESyG UAEM. 2020

Ordenación territorial: una revisión desde los objetivos del desarrollo sostenible

Servicios ecosistémicos en el parque Otomí– Mexica. Una propuesta metodológica

Brenda Yazmín Reza Curiel¹

Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo¹

Luis Miguel Espinosa Rodríguez¹

José Isabel Juan Pérez²

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo elaborar una propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas, la cual es una zona que interactúa de forma dinámica con los ecosistemas que se presentan en este territorio y en la que los servicios o beneficios que los habitantes obtienen de los ecosistemas incluyen los servicios de provisión de alimentos; los de regulación como son, almacenamiento de carbono y retención de suelo, los cuales modulan las condiciones del medio ambiente y las actividades productivas.

Los servicios ecosistémicos en el Parque Otomí - Mexica han sido perturbados en diferentes grados y en grandes superficies remplazados por zonas urbanas, agrícolas, praderas y bosques secundarios y plantaciones forestales nuevas, ya sea con especies nativas o introducidas, lo que genera vulnerabilidad social y biofísica debido a la disminución en la capacidad de producción de los servicios ecosistémicos.

El estudio se llevará a cabo mediante las siguientes etapas metodológicas: 1) Establecer una asociación de las características geográficas y ambientales presentes, usos del suelo, tipos de vegetación y ecosistemas del área de estudio; 2) Integrar la caracterización y cuantificación para la distribución espacial de los servicios ecosistémicos de regulación: almacenamiento de carbono, retención de suelo y recarga de acuíferos; 3) Modelar escenarios a futuro de los servicios ecosistémicos; y 4) Elaborar una propuesta teórico- metodológica para el estudio de los servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas.

¹ Universidad Autónoma del Estado de México.

brenda_reza@hotmail.com; jggc1321@yahoo.com.mx; geo_luismiguel@hotmail.com; lujpi582602@gmail.com

² Centro de Investigación Multidisciplinaria en Educación, Universidad Autónoma del Estado de México.

4.2 Almacenamiento de Carbono en los Ecosistemas Presentes en El Parque Otomí-Mexica. Análisis Espacial de Tendencia y Distribución 2014 – 2018.

Capítulo de libro publicado en la Editorial Thompson Reuters. Septiembre 2021.

Capítulo 4

Almacenamiento de carbono en los ecosistemas presentes en el Parque Otomí-Mexica. Análisis espacial de tendencia y distribución 2014 - 2018

Brenda Yazmin Reza Curiel

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

Luis Miguel Espinosa Rodríguez

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

José Isabel Juan Pérez

Centro de Investigación Multidisciplinaria en Educación

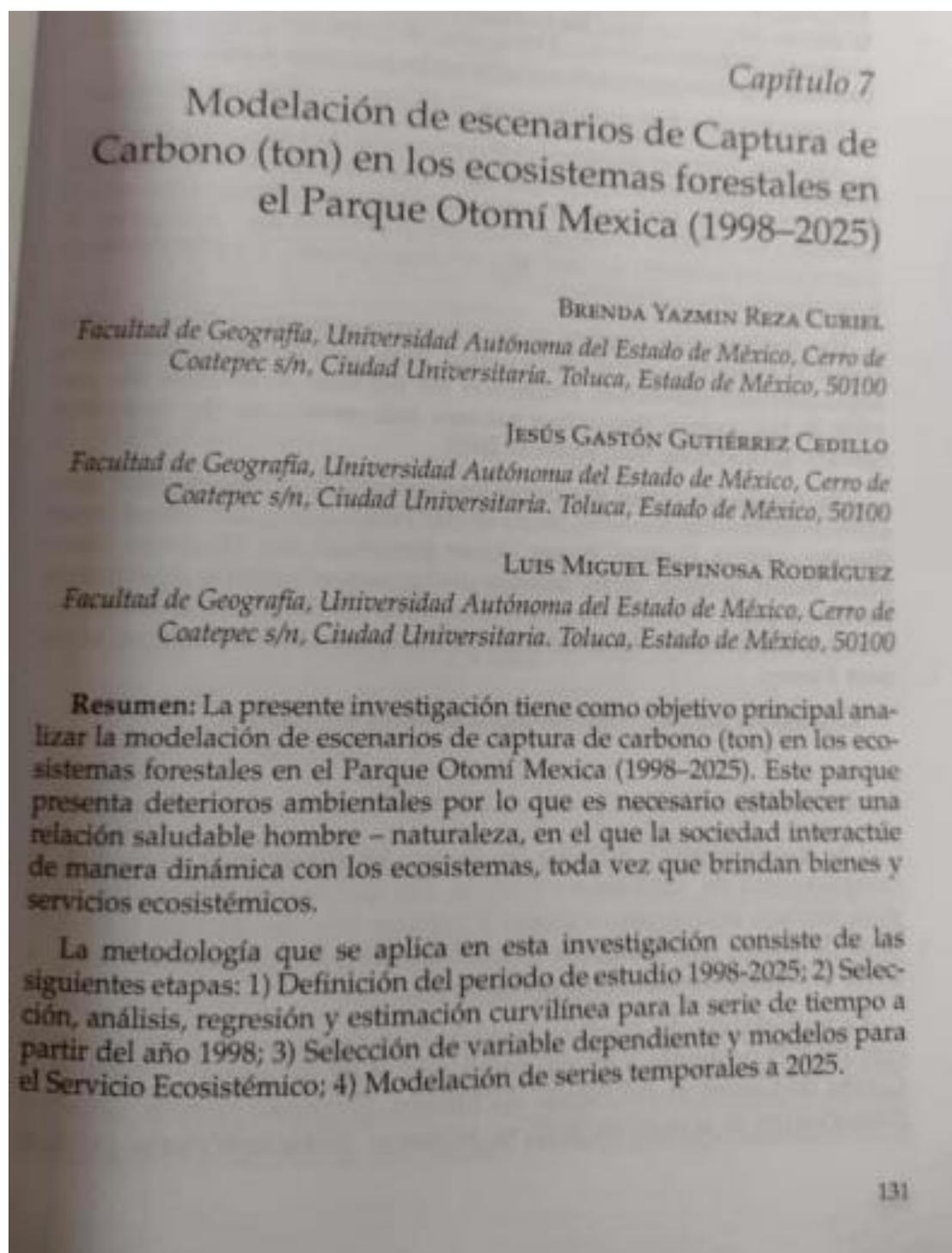
Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal realizar un análisis acerca de la tendencia de distribución espacial y cuantificación del servicio ecosistémico de regulación almacenamiento de carbono, mediante la aplicación de índices de captura de carbono, en el Parque Otomí – Mexica del Estado de México 2014 – 2018. Este Parque presenta deterioros ambientales por lo que es necesario establecer una relación saludable hombre – naturaleza, en el que la sociedad interactúe de manera dinámica con los ecosistemas, toda vez que brindan bienes y servicios ecosistémicos.

La metodología que se aplica en esta investigación consiste de las siguientes etapas: 1) clasificación y tipificación de los ecosistemas presentes en el Parque y cuantificación del área ocupada por cada ecosistema, mediante fotointerpretación cartográfica; 2) delimitación y ubicación espacial de cada tipo de ecosistema; 3) cálculo del índice de carbono capturado en cada ecosistema, a partir de la superficie de cada ecosistema. Esto permitió representar la tendencia de distribución espacial y cuantificación del servicio ecosistémico almacenamiento de carbono.

4.3. Modelación de escenarios de Captura de Carbono (ton) en los ecosistemas forestales en el Parque Otomí Mexica (1998 – 2025)

Capítulo de libro publicado en la Editorial Thompson Reuters. Agosto 2022.



4.3 Cambios en el proceso de erosión. El Parque Otomí – Mexica, Estado de México (2014 – 2018).

Artículo publicado en la revista de Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia. Febrero de 2022.

Papeles de Geografía

2021, 67 pp. 27-44

DOI: <https://doi.org/10.6018/geografia.473741>

ISSN: 1989-4627

CAMBIOS EN EL PROCESO DE EROSIÓN. EL PARQUE OTOMÍ –MEXICA, ESTADO DE MÉXICO (2014 Y 2018)

Brenda Yazmin Reza Curiel¹, Jesús Gastón Gutiérrez Cedillo¹, Luis Miguel Espinosa Rodríguez¹, José Isabel Juan Pérez²
Universidad Autónoma del Estado de México

RESUMEN

El Parque Otomí – Mexica es un área natural protegida con importantes impactos sobre la cobertura vegetal, que causan erosión del suelo. Este estudio analiza la retención del suelo por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (RUSLE). La metodología consta de la cuantificación y localización de los siguientes procesos: 1) Erosividad de la lluvia (Factor R), los datos se obtuvieron de ocho estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de estudio; 2) Erosionabilidad del suelo (Factor K), se obtuvo la información de cartas edafológicas del INEGI 2014 – 2018; 3) Longitud y pendiente del terreno (Factor LS), se representaron las curvas de nivel a partir de la carta topográfica E14A-48 del INEGI; 4) Cobertura vegetal (Factor C) se realizó 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.

Palabras clave: Ecuación Universal de Pérdida de Suelo; erosión ambiental; retención del suelo; área natural protegida; cobertura vegetal.

CHANGES IN EROSION PROCESS. THE OTOMÍ – MEXICA PARK, STATE OF MEXICO (2014 AND 2018)

ABSTRACT

The Otomí - Mexica Park is a protected natural area with significant impacts over the vegetation cover, causing soil erosion. This study analyzes soil retention through the Universal Soil Loss Equation (RUSLE). The methodology consists of the quantification and location of the following processes: 1) Erosivity of the rain (Factor R), the data were obtained from eight meteorological stations located within the study area; 2) Erosionability of the soil (K Factor), the information was obtained from edaphological charts of the INEGI 2014 - 2018; 3) Length and slope of the terrain (Factor LS), the contour lines were represented from the topographic chart E14A-48 of the INEGI; 4) Vegetation cover (Factor C), classification, quantification and cartographic representation of the vegetal cover was carried out for the years 2014 and 2018 based on the INEGI land use charter. The results show that, in the areas with less slope length, less precipitation, less erodible soil type and greater vegetal cover, erosion is lower; on the contrary, in the areas with a greater length of slope, greater precipitation, more erodible soil type and less vegetal cover, there is a higher level of erosion.

Keywords: Universal Soil Loss Equation RUSLE; environmental erosion; soil retention; Protected Natural Area; plant cover.

¹Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México C.P. 50100. E-mail. brenda_reza@hotmail.com

² Centro de Investigación Multidisciplinaria en Educación, Universidad Autónoma del Estado de México. Corregidor Gutiérrez 209, Barrio de la Merced C.P. 50080. E-mail. jupi582602@gmail.com

Fecha de recepción: 19 de marzo de 2021. Fecha de aceptación: 09 de abril de 2021

Papeles de Geografía, 67 (2021), 27-44

4.5 Recarga de Acuíferos en el Parque Otomí Mexica Estado de México (2014-2018). Un Análisis Espacio Temporal del Servicio Ecosistémico.

Artículo aceptado, próximo a publicar en el mes de diciembre de 2022 en la revista Geosig.

RECARGA DE ACUÍFEROS EN EL PARQUE OTOMÍ MEXICA ESTADO DE MÉXICO (2014-2018). UN ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo calcular la recarga del acuífero en el Parque Otomí – Mexica Estado de México para los años 2014 y 2018, desde un enfoque de servicios ecosistémicos. El método fue aplicado con variables climáticas de temperatura y precipitación del Sistema Meteorológico Nacional: Las etapas metodológicas fueron: 1) Cálculo del volumen anual de la precipitación, con registros medios anuales de precipitación y temperatura; 2) Estimación del escurrimiento superficial con el método del escurrimiento medio; 3) Cálculo del volumen de recarga neta potencial; 4) Estimación del volumen de evapotranspiración. Los resultados para el año 2014, muestran las zonas con mayor recarga del acuífero que se localizan en las altitudes mayores con mayor precipitación; para el año 2018 la mayor recarga del acuífero se localiza en las zonas altas con bosque de pino – encino y las zonas bajas con agricultura de humedad.

Palabras clave: escurrimiento superficial; evapotranspiración; precipitación; recarga del acuífero; servicios ecosistémicos; temperatura.

ABSTRACT

The objective of this research is to calculate the aquifer recharge in the Otomí-Mexica Park for the years 2014 and 2018, from an ecosystem services approach. The method was applied with climatic variables of temperature and precipitation of the National Meteorological System: The methodological stages were: 1) Calculation of the annual volume of precipitation, with mean annual records of precipitation and temperature; 2) Estimation of surface runoff with the mean runoff method; 3) Calculation of the potential net recharge volume; 4) Estimation of the evapotranspiration volume. The results for 2014 show the areas with the highest recharge of the aquifer that are located at the higher altitudes with the highest rainfall; For the year 2018, the greatest recharge of the aquifer is located in the high areas with pine-oak forest and the low areas with moisture agriculture.

Keywords: aquifer recharge; ecosystem services; evapotranspiration; precipitation; surface runoff; temperature.

BIBLIOGRAFÍA

- Allison, S. y Martiny, J. (2008). Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the national academy of sciences*. USA.
- Aguirre, O., J. Jiménez, (2007). Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Memorias del VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales*.
- Aparicio F. J. (2009). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México.
- Avedaño H.; Acosta M.; Carrillo A.; Etchevers B. (2009) “Estimación de biomasa y carbono en un bosque de abies religiosa” *Revista fitotecnia mexicana* (No. 3) < http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000300011> (15-08-2020)
- Bertalanffy, L. (1950). An Outline of General Systems Theory. *British Journal for the Philosophy of Science*, 1, 139.-164.
- Bradfield, R., Wrightb, G., Burta, G., Cairns, G., Heijden, V. D., & K. (2005). The origins and evolution of scenario techniques in long range business planning. *Futures*, 37 (1), 795–812.
- Bocco, G. (2010). Geografía y Ciencias ambientales: ¿campos disciplinarios conexos o redundancia epistémica? *Investigación ambiental* 2(2). Pp. 25-31. México.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., (1997). “Root biomass allocation in the world’s upland forests”. *Oecologia* 111, 1–11.
- Camacho S. (2019) “Alcance descriptivo de los cambios de cobertura y uso de suelo. El caso de la porción surponiente del Estado de México (1989 – 2009). Universidad de Quintana Roo, México.
- Caro y Torres (2015) “Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas” Grupo de investigación GIGAS, Instituto de Ciencias Ambientales de la Orinoquia Colombiana, Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia.
- Card, H. D. (1982) Using Known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 48 (3), 431-439.
- Castro M.; Magdaleno G.; Cruz S.; Reynoso S.; López B. (2016) “Balance hídrico de la cuenca Pijijiapan en Chiapas, México” *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXXVII, No. 2, p.18-28.

Colegio de Posgraduados. COLPOS. (1991). Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. DF, México: SARH.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SEDEMA). (2016). La biodiversidad en la Ciudad de México. CONABIO/SEDEMA. México.

CONABIO (2019) “¿Qué es un ecosistema?” consultado: 12 de octubre de 2019 en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/quees>

CONABIO (2019) “Tipos de vegetación” consultado 23 de octubre de 2019 en: http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ006_3a_parte.pdf

Costanza, R.; D'arge, R.; De Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.; Paruelo, J.; Raskin, R.; Sutton, P. y Van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.

Chapin, F.; Matson, P. y Mooney, H. (2002). Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer, New York. 215p.

Chermack, T. (2005) Studying scenario planning: Theory, research suggestions, and hypotheses. *Technological Forecasting & Social Change*, 72 (1), 59-73.

Chiras, R. (2006). Ciencias Ambientales. En: Plan de estudios de la Licenciatura en Ciencias Ambientales. Escuela Nacional de Estudios Superiores UNAM, Campus Morelia.

Daily, G. (1997). Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington DC. 412p

De Groot (2002), A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*.

Diógenes Laercio (1985), *Vidas de los más ilustres filósofos griegos*, Orbis, Barcelona, Vol II, p.67-68.

Dixon, R.K., S. Brown, R.A. Houghton, A.M. Solomon, M.C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.

Eastman, R. (2012) IDRISI Selva. Guía para SIG y Procesamiento de imágenes. Manual versión 17. Argentina Clark Labs.

EcoCiencia. (2009). Programa de Conservación y Manejo del Parque Estatal Otomí-Mexica del Estado de México, Toluca Estado de México, México. Gobierno del Estado de México.

Ehrlich, P.; Ehrlich, A. y Holdren. (1978). *Ecoscience: population, resources, environment*. W.H. Freeman and Company, San Francisco. 1051p.

Ehrlich, P. y Mooney, H. (1983). Extinction, substitution and ecosystem services. *BioSciences*, 33(4): 248-254.

Farfán y Orozco (2007) "Caracterización biofísica y social del centro ceremonial Otomí – Mexica, Estado de México" Facultad de Planeación Urbana y Regional de la Universidad Autónoma de Estado de México, Toluca.

FAO (1980). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma: FAO.

FAO. (2006). Guía para la interpretación edafológica. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>

FAO, (2019), "Servicios ecosistémicos y biodiversidad" consultado en: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>

Figuroa, C., G. Ángeles, A. Velazquez y H. de los Santos. (2010). Estimación de la biomasa en un Bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham en Zacualtupán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1 (1): 105-112.

Flombaum, P. y Sala, O. (2011). Efecto de la biodiversidad sobre el funcionamiento de los ecosistemas. En: Simonetti, J. y Dirzo, R. (ed.). *Conservación biológica: perspectivas desde América Latina*. Editorial Universitaria, Chile. 49-59pp.

Flores C. (2016) "La búsqueda de unidad frente a la multiplicidad pasional en los pensamientos estoicos y de soren Kierkegaard" Tesis de Maestría en filosofía de la Universidad Iberoamericana Ciudad de México.

Flores, J.S. (1971). Estudio de la vegetación del cerro "El Vigía" de la Estación de Biología Tropical "Los Tuxtlas", Veracruz. Tesis Profesional (Biólogo), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 66 p.

Flores I. (2016) "Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo" UNAM Facultad de Ingeniería Cd. De México.

Galeana P.; Ordoñez D; Corona R. (2013). "Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México". *Revista Madera y bosques* (No. 22) < http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712013000100005#t1> (29 –10-2020)

García (2006) "Sistemas Complejos, conceptos métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria" gedisa, Barcelona.

García, Almeida y Ávila, (2016) "Estimación de almacenamiento de carbono y la percepción social de los Servicios ecosistémicos que brinda el bosque de *Abies religiosa* de la cuenca presa Guadalupe, Estado de México" Universidad de Quintana Roo, Cozumel, México.

García (2019) “Gestión comunitaria de los huertos familiares en el sur del Estado de México. Conocimiento campesino y tradición agroecológica” Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales, UAEMex, Toluca, México.

GEM. Gobierno del Estado de México. (1980). Decreto del Área Natural Protegida Parque Ecológico, Turístico y Recreativo Zempoala-La Bufa denominado Parque Otomí-Mexica del Estado de México, Toluca Estado de México, México. Gobierno del Estado de México.

Godet, M. (1996). Creating the future: The use and misuse of scenarios. Long Range Planning, 29 (2), 164- 171.

Gutiérrez (2013) “La investigación geográfica fundamentos, métodos e instrumentos” Editorial Dunken, Buenos Aires, Argentina.

Gutiérrez, C, J.G; Aguilera G, L.I.; González E., C.E; Juan P. J. I. (2012). Evaluación de la sustentabilidad posterior a una intervención agroecológica en el Subtrópico del Altiplano Central de México. Universidad Autónoma del Estado de Yucatán. Yucatán, México. Tropical and Subtropical Agroecosystems. Vol. 15, núm. 1, pp. 15-24.

Gutiérrez, J. (2013). La Investigación Geográfica: Fundamentos, Métodos e Instrumentos. En Prensa.

Hernández (2008) “Metodología de la Investigación” McGrawHill Education Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2002). “Uso de suelo y vegetación, Serie III en México”. Consultado el 23 de diciembre de 2019 en: https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Ausv_serie3_gcs INEGI, México.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2014). “Uso de suelo y vegetación, Serie IV en México”. https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aserieiv_rt_final

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2015). “División política” consultado 29 de septiembre de 2020 en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2017). “Cartas geológicas”. Consultado el 23 de junio de 2020 en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842675>.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2018). “Uso de suelo y vegetación, Serie VI en México”. Consultado el 13 enero de 2020 en: <https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Ausosueveg16>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2020) “Climatología” consultado el 24 de octubre de 2020 en: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>

Jaksin, F. (1997) Ecología, ecologistas y ciencias ambientales. Revista Chilena de Historia Natural 70: 177-180. Chile.

Jiménez E. (2013). “Ecuaciones Alométricas para Estimación de Biomasa Aérea en *Prosopis laevigata* Willd. y *Pinus pinceana* Gordon”. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 35 p.

Juan P.; Camacho S.; Magallanes M.; Juárez T.; Pozas C.; Pérez S.; Villegas M.; García L.; Vilchis O. (2017) “Análisis socioespacial, geográfico, ambiental y ecológico del Parque Otomí – Mexica Estado de México” (CEPANAF) del Gobierno del Estado de México y del Colegio de Ciencias Geográficas del Estado de México, A. C.

Kahn, H. (1967) The year 200, a framework for speculation on the next thirty-three years. The Hudson Institute. Washington.

Leopold, L. B., F. E. Clarke, B. B. Hanshaw, and J. E. Balsley. (1950). A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington, D.C.

Llerena C. (2003). “Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua. Conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú”. Arequipa, Perú, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina, disponible en: <https://docplayer.es/38310600-Servicios-ambientales-de-las-cuencas-y-produccion-de-agua-conceptos-valoracion-experiencias-y-sus-posibilidades-de-aplicacion-en-el-peru.html>

Mas, J., 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.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystem and human well-being: biodiversity synthesis. World Resources Institute, Washington DC.

Miranda y Hernández-X. (1963) “Capítulo III Clasificación y nomenclatura de la vegetación en México” consultado 23 de marzo de 2020 en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/421/cap3.html>

Morfín R. *et al.*, (2015) “Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México” Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México

Nahuehual, L. y Núñez, D. (2011). Servicios ecosistémicos: contribución y desafíos para la conservación de la biodiversidad. En: Simonetti, J. y Dirzo, R. (ed.). Conservación biológica: perspectivas desde América Latina. Editorial Universitaria, Chile. 175-193pp.

ONU Organización de las Naciones Unidas (2022) “15 Vida de ecosistemas terrestres” consultado 20 de marzo de 2020 en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>

Red Colombiana de Formación Ambiental RCFA (2007) “Las ciencias ambientales una nueva área del conocimiento. Consultado el 27 de diciembre de 2019 en: https://redcolombianafa.org/wp-content/uploads/2019/08/Libro_Ciencias_Ambientales.pdf

Rzedowski, J. (1978) Vegetación de México. México. Limusa.

SEMARNAT (2019) “Biodiversidad, México y su diversidad biológica” consultado el 30 de noviembre de 2019 en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap4.html#tema1>

Servicio Geológico Nacional (1997) “Cartas impresas disponibles” consultado 24 de marzo de 2019 en: <https://www.sgm.gob.mx/CartasDisponibles/>

Servicio Metrológico Nacional (2014) “Resúmenes mensuales de temperatura y lluvia” consultado el 23 de marzo de 2021 en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

Serrano Barquín, R. (2008). “Hacia un modelo teórico-metodológico para el desarrollo, la sostenibilidad y el turismo”. Revista Economía, sociedad y territorio. Vol. VIII, no. 26. México.

Wischmeier Walter & Smith Dwight, (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. Disponible en: <http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

Tilman, D.; Reich, P. y Knops, J. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature*, 441:629-632.

Tetreault, D. (2008). Escuelas de pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales. *Estudios sociales*, Vol. 16, Núm. 32. junio-diciembre 2008, pp. 227-263.

Vargas L. (2015) Estimación de la erosión hídrica actual y potencial de la subcuenca de Sayula, Jalisco, México Universidad de Guadalajara, Zapopan, Jalisco pp.25 – 37.

Vergara S. et al. (2010) “La planeación por escenarios: Revisión de conceptos y propuestas metodológicas Prospect”. Vol 8, No. 2

Villegas; Gutiérrez; Gómez y Espinosa (2018) “Diagnóstico integral del territorio del Parque Otomí – Mexica del Estado de México” Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México.

Villegas (2020) “Manejo sustentable en áreas naturales protegidas, el caso del parque Otomí-Mexica del Estado de México. Aproximación teórica y metodológica desde las ciencias ambientales” tesis de doctorado. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca de Lerdo, México.

Parra (2000) “La filosofía y el sabio estoico: examen de la virtud” Universidad del Bío, Chillán Chile.

Porter, M. (1985) “Competitive advantage: creating and sustaining superior performance”. The free Press, New York.

Programa Nacional de Carbono “Bases de datos” consultado 25 de junio de 2021 en: http://pmcarbono.org/pmc/bases_datos/index.php