



CENTRO DE ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS, URBANOS Y AMBIENTALES

**VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA ANTE EL CAMBIO
CLIMÁTICO Y CAMBIO DE USO DE SUELO A NIVEL DE CUENCA EN
LA PERIFERIA URBANA.**

CASO CDMX, 1999–2039

Tesis presentada por

ALEJANDRA PEDRAZA GAMA

Para optar por el grado de

MAESTRA EN ESTUDIOS URBANOS

Directora de tesis:

DRA. MARÍA PEREVOCHTCHIKOVA

Lector:

DR. JOSÉ MAURICIO GALEANA PIZAÑA

CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2021

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Perevochtchikova que desde el día que la conocí estuvo al pendiente de mí, orientándome, animándome e incluyéndome en el proyecto como la excelente asesora, académica, profesora y persona que es. A mi lector de tesis el Dr. Mauricio Pizaña por sus asesorías en temas complejos de SIG y por su gran calidad humana. Estoy segura de que he sido bendecida con los mejores asesores pues siempre me sentí escuchada, respetada y validada no sólo como estudiante sino como los seres humanos sentipensantes que somos. Soy. Lo cual en el mundo académico y en general en la vida se valora y aprecia enormemente.

Agradezco al proyecto 290832 “*Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds* (TRASSE)”, ANR-CONACyT, del cual forma parte la presente tesis. A todo el equipo del proyecto “TRASSE” por su gentileza, compañerismo y atención en compartirme información referente a sus investigaciones que fueron parte esencial para que el desarrollo de esta tesis fuera posible. A la M. Paula Barral por su amabilidad en brindarme asesoría e información en mi primer acercamiento con el protocolo ECOSER. Al Colegio de México y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por proporcionarme las herramientas académicas, culturales y económicas para poderme desarrollar como estudiante de Maestría en Estudios Urbanos desde mi formación Ingenieril Ambiental. Comprender a las ciudades como este espacio híbrido urbano-natural fue toda una revelación desde una perspectiva social y lo aprendido fue gracias a esta gran institución junto con mis grandes profesores y excelentes compañeros.

Quiero agradecer con todo el cariño del mundo a mis amigos Betty, Dani Bec y Velázquez, Martha, Roger y Carlitos por ser y estar.

A Andrés por adoptarme desde un inicio en lo que después sería nuestro efímero pero bello hogar entre gatitos, risas y muchísimo cariño en la Ciudad de México. Sin su apoyo incondicional seguro no hubiera sobrevivido al propedéutico ni al primer semestre de maestría.

A Nicole por su apapacho siempre y a todas las personas bellas con las que coincidí en el salón de clases y fuera de el con quienes compartí momentos chulos, rudos, divertidos y *yoguis* durante el lapso estudiantil *colmeca* incluso en su modo virtual. Todo pesó menos a su lado aún en la distancia. Gracias a todos ustedes mis amigos, mi familia elegida por coincidir conmigo y hacerme sentir de las personas más amadas y afortunadas.

A mi madre Margarita por todo el apoyo sororo que ha permitido que ambas podamos seguir creciendo académica y personalmente en estos tiempos de pandemia. A mi hermane Kei por ser la persona más comprensiva del mundo conmigo, mi vida no sería tan divertida, autocompasiva y bonita sin elle. A David y Mariana por darme todas las porras y apoyo del mundo a su manera tan peculiar recordándome lo capaz que soy cuando todo parece gris. A mis increíbles abuelos Magdalena, Rigoberta y Santiago por su infinito cariño y por consentirme tanto. A Jez por su apoyo y por ser un gran amigo/papá postizo.

Considero que la colectividad y la empatía nos pueden hacer más fuertes ante cualquier adversidad y ojalá que en esta hoja se quede como registro de lo afortunada que me siento por concluir esta etapa. Sin el amor, comprensión y cariño de las personas aquí mencionadas sencillamente el trauma del encierro en un presente tan incierto y con un futuro con miras ambientales tan desalentadoras me hacían imposible concentrarme por consumir lo que sea.

En fin, escribo todo esto para recordarme en un futuro que no estoy sola...

Estoy sobre hombros de gigantes.

De corazón, infinitas gracias a todos. ♡

-Ale

*“Escribo esto en tinta azul para recordar
que todas las palabras, no solamente algunas,
están escritas en agua.”*

-Anónimo

RESUMEN

Dentro de los servicios ecosistémicos (SE) que provee la naturaleza; los llamados Servicios Ecosistémicos Hídricos (SEH) de provisión se relacionan con el consumo de agua para las poblaciones mientras que los de regulación están relacionados con el ciclo hidrológico a nivel de cuenca y su capacidad para almacenar o proporcionar agua. Un cambio radical en los usos de suelo y vegetación o variaciones en la temperatura o precipitación (ocasionados por el cambio climático) interfieren directamente en las condiciones hidrológicas poniendo en riesgo los SEH. Así mismo, las periferias urbanas se caracterizan por ofrecer grandes contribuciones como proveedores de SE como los SEH a las ciudades donde interactúan elementos ecológicos (subsistema natural) y sociales (subsistema social) que son interdependientes y co-evolucionan en el tiempo como sistemas dinámicos y adaptativos urbanos–naturales, por tanto, estas pueden ser estudiadas como sistemas socioecológicos (SSE). En este sentido, la relación entre los SEH y las periferias urbanas radica precisamente en la constante presión en el cambio de uso de suelo (CUS) al de tipo urbano y en que tales no se encuentran exentos ni aislados de los efectos ocasionados por el cambio climático (CC). La vulnerabilidad socioecológica (VSE), por su parte, reconoce la interdependencia de los subsistemas ambiental y social ante los escenarios de presión de CC y CUS; así como sus consecuencias para las poblaciones locales y los sectores implicados. El objetivo principal de la presente investigación constó en la determinación de la VSE de la periferia urbana de la Ciudad de México desde el marco teórico de SSE como proveedor de SEH de regulación y provisión. La metodología aplicada fue mediante la adecuación del protocolo ECOSER al SSE de la zona de estudio en 4 microcuencas en Suelo de Conservación de la Ciudad de México. ECOSER fue de utilidad para la integración de información de la zona de estudio en relación con el subsistema ambiental a nivel de microcuenca que incluyó un modelo de precipitación 2021-2040, *BCC-CSM2-MR*; *SSP 1-2.6* (en relación con CC) y 2 escenarios 2039 de CUS: tendencial (bajo las tendencias usuales de cambio de coberturas terrestres y usos de suelo) y restrictivo (proyección que consideró los instrumentos de PPA como áreas donde no podía haber cambio en sus coberturas). En cuanto el subsistema social se consideraron factores económicos, institucionales y sociales relacionados con las PPA de conservación forestal aplicados en la zona de estudio. Se concluyó una alta VSE en los periodos de análisis reflejo de la desventaja del subsistema social y el subsistema ambiental que forma el SSE de periferia urbana de la Ciudad de México debido a las desigualdades sobre la gestión de los recursos hídricos y los factores de presión de CUS y CC sobre los SEH que brindan las microcuencas no sólo a nivel local, sino regional. El escenario restrictivo en comparación con el escenario tendencial en un futuro cercano 2039 para la zona de estudio indica que las PPA contribuyen a la reducción de la VSE en relación con los SEH de provisión y regulación como medidas de adaptación ante el CC y CUS.

ABSTRACT

The ecosystem services (ES) provided by nature the Hydrological Ecosystem Services (HES) of provision are related to the consumption of water for the populations while those of regulation are related to the hydrological cycle at the basin level and its capacity to store or provide water. A radical change in land and vegetation uses or variations in temperature or precipitation (caused by climate change) directly interfere with hydrological conditions, putting the HES at risk. Furthermore, urban peripheries are characterized by offering great contributions as providers of ES and HES to cities where ecological (natural subsystem) and social (social subsystem) elements interact with each other, are interdependent and co-evolve over time as urban dynamic and adaptive systems. Therefore, HES and urban peripheries can be both studied as socio-ecological systems (SES). In this sense, the relationship between the SEH and the urban peripheries lies precisely on the constant pressure in the change of land use (LULC) to the urban type. In addition, SEH and urban peripheries are not both exempt and isolated from the effects of climate change (CC). On the other hand, Socio-Ecological Vulnerability (SEV) recognizes the interdependence between the environmental and social subsystems affected by pressure scenarios of CC and LULC; as well as its consequences for local populations and the sectors involved. The main objective of this research was to determine the SEV of the urban periphery of Mexico City from the theoretical framework of SSE as a provider of regulation and provision HES. The applied methodology was an adaptation of the ECOSER protocol for the SES of the study area in 4 micro-basins in Conservation Soil of Mexico City. The ECOSER protocol was useful for integrating information from the studied area in relation to the environmental subsystem at the micro-basin level, which included a 2021-2040 precipitation model, BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6 (in relation to CC) and 2 LULC 2039 scenarios: trend (the usual trends of change in land cover and land uses) and restrictive (projection that considered PPA instruments as areas where there could be no change in their coverage). Regarding the social subsystem, economic, institutional, and social factors related to the forest conservation PPA applied in the study area were considered. A high VSE was concluded in the analyzed periods reflecting the disadvantage of the social subsystem and the environmental subsystem that forms the SES of the urban periphery of Mexico City due to inequalities in the management of water resources and the pressure factors of LULC and CC on the SEH that the micro-basins provide not merely at local level but also at regional level. The restrictive scenario compared to the trend scenario 2039 indicates PPA contribute to the reduction of the VSE in relation to the provision and regulation SEH as adaptation measures to the CC and LULC.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	11
1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	16
1.1 Sistemas socioecológicos	16
1.2 Sistemas socioecológicos vinculados a servicios ecosistémicos hídricos de provisión y regulación	17
1.2.1 Escenarios de cambio climático y afectación a servicios ecosistémicos hídricos....	17
1.3 La periferia urbana como un sistema socioecológico vulnerable.....	18
1.4 Aproximaciones metodológicas en la determinación de la Vulnerabilidad Socioecológica en relación con Servicios Ecosistémicos Hídricos de provisión y regulación ..	19
1.4.1 Introducción a ECOSER	22
2 CASO DE ESTUDIO	26
2.1 Periferia urbana de la CDMX como proveedor de servicios ecosistémicos hídricos.....	26
2.1.1 Contexto de las comunidades que habitan el Suelo de Conservación de la Ciudad de México y políticas públicas ambientales	27
2.1.2 Cambio de uso de suelo y cambio climático en la zona de estudio	28
3 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA.....	30
3.1 ECOSER para el mapeo de SEH y VSE ante cambio climático	30
3.2 Metodología y resultados de análisis de los módulos de ECOSER aplicado en el área de estudio.....	35
3.2.1 Módulo 1 de ECOSER: De funciones ecosistémicas a estimación de beneficios ...	35
3.2.2 Estimación de funciones ecosistémicas.....	35
3.2.3 Servicios ecosistémicos hídricos de provisión y regulación en Suelo de Conservación.....	46
3.2.4 Beneficios de los Servicios Ecosistémicos Hídricos a la población local.....	49
3.3 Módulo 2 de ECOSER: Exposición, Sensibilidad, Capacidad Adaptativa e Inequidad del SSE de Periferia Urbana	52
3.3.1 Cálculo de exposición	52
3.3.2 Cálculo de sensibilidad.....	52
3.3.3 Cálculo de capacidad adaptativa	54
3.3.4 Cálculo de inequidad.....	62
4 INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIECOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	64

4.1	Funciones ecosistémicas y beneficios de los SEH en el área de estudio.....	64
4.1.1	Almacenamiento de carbono en biomasa.....	64
4.1.2	Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal.....	65
4.1.3	Protección de acuíferos por cobertura vegetal	66
4.1.4	Servicios Ecosistémicos Hídricos de Provisión y Regulación y sus beneficios al área de estudio.....	67
4.2	Componentes de la VSE en el área de estudio	77
4.2.1	Exposición.....	77
4.2.2	Sensibilidad	78
4.2.3	Capacidad adaptativa.....	79
4.2.4	Coefficiente de inequidad.....	81
4.3	Vulnerabilidad Socioecológica de la zona de estudio	82
	CONCLUSIONES	84
	REFERENCIAS	87
	ANEXOS.....	100

Índice de figuras

Figura 1.1.	Vulnerabilidad Socioecológica (Fuente: elaboración propia)	17
Figura 1.2.	VSE del SSE de periferia urbana en relación con los SEH a nivel de cuenca y microcuenca (Fuente: elaboración propia con información de Zulaica, 2010; Espinosa, 2011; Henao, 2013; Fischer et al., 2015; Hernández, 2016 y Geneletti et al., 2017).....	19
Figura 1.3.	Diagrama de flujos del protocolo ECOSER para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y estimación de la vulnerabilidad socioecológica (Fuente: Tomado de Laterra et al., 2015).....	23
Figura 1.4.	Contribución de los servicios ecosistémicos al bienestar humano (Fuente: elaboración propia con información de MEA (2005) y Laterra et al., (2015)	24
Figura 2.1.	Localización del área de estudio en Suelo de Conservación de la Ciudad de México, acuíferos, subdivisión por cuencas y microcuencas (Fuente: elaboración propia con información de Datos Abiertos CDMX, 2020).	27
Figura 3.1.	Esquema metodológico para la obtención de la vulnerabilidad socioecológica de la periferia suroeste de la Ciudad de México.	31
Figura 3.2.	Tipo de infiltración y edafología en la zona de estudio para la determinación del grupo hidrológico (Fuente: elaboración propia con información de Centro GEO, 2021).....	37
Figura 3.3.	Usos de suelo en la zona de estudio, 2019 (fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021)	39

Figura 3.4. Valores de número de curva de las cuatro microcuencas 1999-2039 (Fuente: elaboración propia).....	40
Figura 3.5. Estaciones climatológicas consideradas para la interpolación con el método Kriging, 1979-1998 y 1999-2017 (Fuente: elaboración propia con información de SMN, 2021).....	42
Figura 3.6. Modelo de precipitación (mm) 2021-2040, BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6 en la zona de estudio para proyección de cambio climático (fuente: elaboración propia con información de <i>worldclim.org</i>).....	42
Figura 3.7. Comparación de emisiones de CO ₂ según escenarios climáticos SSP y RCP, periodo 1980-2100 (Fuente: Hausfather, 2020)	43
Figura 3.8. Topografía en la zona de estudio y población en la zona de estudio (fuente: elaboración propia información de INEGI, 2021 y SEDUVI, 2010)	51
Figura 3.9. Registro total anual de los montos de los programas con esquemas de pago en las delegaciones que competen al área de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021).....	57
Figura 3.10. Polígonos con las áreas destinadas a la conservación de acuerdo con los programas de ANP, PSA y REC (Fuente: elaboración propia con información de PAOT, 2005; Perevochtchikova, 2016 y CONANP, 2021)	59
Figura 3.11. Superficie forestal para la estimación del factor social mediante brigadas forestales en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021)	61
Figura 4.1. Mapas normalizados de la función ecosistémica “almacenamiento de carbono en biomasa” de las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia con información de Galeana et al. (s.f.))	64
Figura 4.2. Mapa normalizado de la función ecosistémica “retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)	65
Figura 4.3. Mapa normalizado de la función ecosistémica “protección de acuíferos por cobertura vegetal” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia).....	66
Figura 4.4. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “consumo doméstico de agua” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia).....	68
Figura 4.5. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “uso potencial de agua para agricultura y riego” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)	69
Figura 4.6. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de regulación “calidad del agua” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)	70
Figura 4.7. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de regulación “caudal disponible en manantiales y arroyos” en las 4 microcuencas, (Fuente: elaboración propia)	71
Figura 4.8. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico “regulación climática” en las 4 microcuencas, (Fuente: elaboración propia)	72
Figura 4.9. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de regulación “amortiguación de inundaciones” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)	73
Figura 4.10. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “erosión hídrica y sedimentación” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)	74
Figura 4.11. Mapas de beneficios de los SEH de provisión y regulación en el área de estudio (Fuente: elaboración propia)	76

Figura 4.12. Resultados sobre la exposición en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX (Fuente: elaboración propia)	77
Figura 4.13. Resultados de sensibilidad en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX (Fuente: elaboración propia)	78
Figura 4.14. Resultados sobre el factor económico, institucional, social e hídrico del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX usados en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia)	80
Figura 4.15. Resultado de la capacidad adaptativa del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX usado en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia).....	81
Figura 4.16. Mapa del coeficiente de inequidad en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).	81
Figura 4.17. Resultados sobre la VSE del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia)	83

Índice de cuadros

Cuadro 1.1 Ventajas y desventajas de herramientas para la evaluación de SEH en relación con VSE (Fuente: elaboración propia con información de Ochoa, 2015; Valdés et al., 2017; Mancera, 2019 y autores de las herramientas)	21
Cuadro 3.1 Resumen de variables, su descripción y periodo/año para el cálculo de la VSE en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con información de Laterra et al., 2015)	33
Cuadro 3.2 Escalas relativas para el modelado con la herramienta ECOSER (Fuente: elaboración propia con información de Laterra et al., 2015).....	34
Cuadro 3.3 Grupos hidrológicos del suelo (fuente: elaboración propia con información de SCS, 1964, en Bradbury et al, 2000).....	38
Cuadro 3.4 Valores de Número de curva de acuerdo con la descripción de usos de suelo y grupo hidrológico (fuente: elaboración propia, adaptación de Bradbury et al., 2000).....	39
Cuadro 3.5 Insumos e información base para la obtención de la función ecosistémica “retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” (Fuente: elaboración propia).....	44
Cuadro 3.6 Insumos e información base para la obtención de la función ecosistémica “protección de acuíferos por cobertura vegetal” (Fuente: elaboración propia)	46
Cuadro 3.7 Valores del factor Pi asignado a cada cobertura (Fuente: Elaboración propia con información de Barral, 2017)	46
Cuadro 3.8 Matriz de integración de FE a SEH a nivel local del área de estudio realizado en 2021 aplicado en los años de análisis 1999-2039 (Fuente: elaboración propia)	48
Cuadro 3.9 Matriz de integración de FE a SEH a nivel regional de la CDMX	48

Cuadro 3.10 Matriz de relación entre SEH y bienestar humano del SSE de la periferia urbana de la Ciudad de México (fuente: elaboración propia).....	54
Cuadro 3.11 Programas de conservación forestal en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)	56
Cuadro 3.12 Categorías de acuerdo con los valores mínimos y máximos de los subsidios registrados entre 2001-2018 (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)..	57
Cuadro 3.13 Categoría del factor económico en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)	57
Cuadro 3.14 Categoría del factor institucional en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia)	59
Cuadro 3.15 Superficie forestal para la estimación del factor social a partir del número de brigadas en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021 y Santiago, 2019)	60

Índice de ecuaciones

<i>Ecuación 1</i>	32
<i>Ecuación 2</i>	33
<i>Ecuación 3</i>	45
<i>Ecuación 4</i>	48
<i>Ecuación 5</i>	50
<i>Ecuación 6</i>	51
<i>Ecuación 7</i>	52
<i>Ecuación 8</i>	53
<i>Ecuación 9</i>	55
<i>Ecuación 10</i>	62
<i>Ecuación 11</i>	63

INTRODUCCIÓN

Dentro de las definiciones de urbanización se indica que éste es un proceso territorial y socioeconómico que induce en una transformación radical la cobertura y uso de suelo que implica la concentración de la población y actividades económicas ya sean productivas, industriales, turísticas o comerciales en ciudades (Weber y Puissant 2003). Actualmente, alrededor del 55% de la población mundial vive en ciudades con una tendencia al incremento siendo que, para el año 2050 la población urbana aumentará hasta un 13% (ONU, 2018) y según la muestra global representativa de ciudades, las tendencias de urbanización también indican que el consumo de suelo para la urbanización está superando el crecimiento de la población urbana (ONU-HABITAT, 2016). Por su parte, la dinámica de crecimiento poblacional y de urbanización en América Latina tiende a producir ciudades que sufren de desigualdades económicas, gentrificación e insostenibilidad ambiental (Smolka y Mullahy, 2007) propiciando la redistribución espacial de la población entre el campo, la ciudad (P. da Cunha & Vignoli, 2009) y en este espacio intermedio (rural/urbano) conocido como periferia urbana.

La situación en México no es distinta y de permanecer el patrón territorial expansivo que caracteriza a las ciudades mexicanas en las próximas décadas, buena parte de su crecimiento demográfico será urbano concentrándose en él aproximadamente 83.2% de la población nacional (ONU-HABITAT, 2017) con una marcada tendencia de hallarse la población más pobre en las periferias urbanas (Aguilar et al., 2016). Ahora bien, tales desigualdades económicas dejan a este gran sector en situación de riesgo frente al cambio climático (Molina, 2014) debido a que este modifica los riesgos ambientales alterando las probabilidades de desastres que condicionan las posibilidades de adaptación (Colegio de México, 2018) en donde la restauración y conservación de los ecosistemas tienen un aspecto clave para asegurar el bienestar de la sociedad ante estos escenarios (Locatelli & Kanninen, 2010).

Así mismo, es la periferia urbana la que se caracteriza por ofrecer grandes contribuciones como proveedor de *servicios ecosistémicos* a las ciudades (cita de Haase et al., 2012; Depietri et al., 2013; Baró et al., 2014; Larondelle et al., 2014 en Calderón, 2020) los cuales se clasifican en *servicios de provisión, regulación, cultural y de soporte* (MEA, 2005). Dentro de estos servicios ecosistémicos que provee la naturaleza, el agua es uno de los recursos naturales más importantes y en las últimas décadas la humanidad ha cobrado conciencia sobre la fragilidad de los recursos hídricos en términos de calidad y seguridad (cita de Gleick, 1993; Postel, 1997 en von Medeazza, 2006) debido a que el agua se relaciona directamente con la calidad de vida de la población humana y es determinante para el funcionamiento del sistema económico (Cruz et al., 2015). Por lo tanto, los llamados *Servicios Ecosistémicos Hídricos* (SEH) de *provisión* se relacionan con el consumo de agua para las poblaciones (De Groot et al., 2002; Nieto et al., 2017) mientras que los de *regulación* están relacionados con el ciclo hidrológico a nivel de cuenca y su capacidad para almacenar o proporcionar agua (Jódar et al., 2019; Arellano, et al, 2018). Es de recalcar que un cambio radical en los usos de suelo y vegetación interfiere directamente en las condiciones hidrológicas (Mo, et al., 2020; Mendoza, et al., 2002) poniendo en riesgo a los SEH de provisión y regulación. En este sentido, existe una fuerte relación entre los SEH y las periferias urbanas

precisamente por la constante presión en el cambio de uso de suelo al de tipo urbano (Cortés, 2015; Aguilar et al., 2016) y en que ambos no se encuentran exentos ni aislados de los efectos ocasionados por el cambio climático debido a las variaciones en la temperatura y precipitación que se pueden traducir en inundaciones, calor extremo, deslizamiento de tierras o escasez de agua (IPCC, 2007).

Debido a que la periferia urbana es aquel territorio en donde interactúan elementos ecológicos y sociales que son interdependientes y co-evolucionan en el tiempo como un sistema dinámico y adaptativo urbano–natural, este puede ser estudiado desde la perspectiva de “sistema complejo” (Glaser, 2012; Montes et al., 2015) o como un *sistema socioecológico* que cuenta con sus propios procesos transformativos bajo factores de presión y cambio tanto externos como internos –cambio de uso de suelo y cambio climático– que inciden directa e indirectamente en su *vulnerabilidad*¹ (Sterk, et al., 2017; Spyra et al., 2020). En la literatura actual existen estudios para determinar la *vulnerabilidad social o ambiental* de un sistema urbano o ecológico, respectivamente (Espinosa, 2011; Henao, 2013; Peredo et al., 2016; Reyna et al., 2018) pero son muy pocos los estudios con un enfoque multi e interdisciplinar entre estos conceptos (Reyna et al., 2018; Peredo et al., 2016; Sterk et al., 2017). Por su parte, la *vulnerabilidad socioecológica* se caracteriza por incorporar la dimensión ecológica con la dimensión social de un sistema y reconoce su interdependencia, así como la complejidad de sus dinámicas y procesos desde acercamientos metodológicos cualitativos-mixtos (Reyna et al., 2018; Peredo et al., 2016; Sterk et al., 2017; Montalba et al., 2013) y cuantitativos mediante el uso de sistemas de información geográfica (Jullian et al., 2018; Larterra, et al., 2015; Mancera, 2019). Los análisis relacionados con la vulnerabilidad socioecológica en casos de estudio de periferias urbanas ante el cambio climático son escasos desde una perspectiva integral que incorpore componentes ecológicos y socioeconómicos –que igualmente– consideren las tres dimensiones sobre los estudios de *vulnerabilidad al cambio climático* de acuerdo con Musseta et al., (2017): *sensibilidad* a condiciones riesgosas, la *exposición* de los sistemas [tanto sociales como ambientales] a los fenómenos climáticos y la *capacidad adaptativa* para afrontar los impactos que afectan en este caso, al socioecosistema. La ausencia de dicha perspectiva integral radica ya sea en la escasa información sobre los procesos naturales en el área de estudio (Sandeep y Martínez, 2019) o por centrarse en las estrategias de adaptación y *resiliencia* como la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y mantener sus funciones, así como la de renovarse y reorganizarse (Balvanera et al., 2017) desde un enfoque cualitativo sin integrar aspectos fundamentales del funcionamiento del sistema biofísico (Ricci, 2019; Quiroz et al., 2020) o también para efectos de este trabajo lo que se denominará como *subsistema natural*. Por su parte, en las investigaciones relacionadas con los SEH en periferias urbanas desde una perspectiva socioecológica ocurre una situación similar aunado a que el estado del subsistema natural que influye en los SEH a nivel de cuenca son los que adquieren protagonismo en comparación con el *subsistema social* (Caro et al., 2015; Jujnovsky et al., 2017).

¹ Comprendido este término de acuerdo con la definición de *vulnerable* y *vulnerabilidad* del Diccionario del Español de México como una condición de fragilidad o posibilidad de sufrir un daño.

En suma, dada la importancia de los SEH y la amenaza que estos padecen ante el cambio climático y cambio de uso de suelo como se pudo dar cuenta a lo largo de la presente introducción, este resulta en una problemática que actualmente se encuentra en la agenda política ambiental global y por supuesto, en América Latina y en México en la que se reconoce la vulnerabilidad de los ecosistemas y sus consecuencias para las poblaciones locales y los sectores implicados (Locatelli & Kanninen, 2010; Jujnovsky et al., 2017). Bajo tal contexto, una de las medidas de preservación ante el cambio de uso de suelo empleadas en la Ciudad de México debido a la deforestación y expansión urbana/agrícola fue la declaración en el año 2000 de territorio no urbanizado como *Suelo de Conservación* (SC) en donde a su vez, se aplican instrumentos de política pública ambiental como el de Pago por Servicios Ambientales (PSA) (Perevochtchikova, 2016) debido a la relevante contribución de servicios ecosistémicos que es captada por la capital mexicana por este territorio debido a sus características de vegetación natural y aporte a la recarga del acuífero local (PAOT, 2005) donde se estima que por cada hectárea que se urbaniza del SC, la recarga del acuífero se ve reducida en aproximadamente 2.5 millones de litros de agua al año (Ávila et al., 2017). Así mismo, en el año 2000 el SC representaba el 58% del territorio de la Ciudad de México (Pérez et al., 2011) y para el año 2016 el SC se redujo en un 8% (SEDEMA, 2016). Por lo tanto, los servicios ecosistémicos que provee el SC se ven amenazados ante la pérdida de suelo forestal y escenarios de cambio climático que se prevén por el IPCC (2019) al año 2039. La importancia en la evaluación de la vulnerabilidad socioecológica de la periferia urbana de la Ciudad de México desde el marco teórico de sistemas socioecológicos radica en que este provee SEH de regulación y provisión esenciales para la ciudad y el bienestar humano por tanto, la presente investigación es un esfuerzo por integrar el subsistema ambiental a nivel de microcuenca por la naturaleza de los SEH y el subsistema social a través de los instrumentos de política ambiental forestal que actualmente se aplican en la zona de estudio frente a las condiciones de cambio climático y cambio de uso de suelo en el corto plazo.

Por lo que se formulan las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el estado de vulnerabilidad socioecológica (VSE) actual y proyectado a 2039 de la periferia urbana de la CDMX a escala de cuenca en el contexto de cambio climático (CC) y cambio de uso de suelo (CUS)?
- ¿Cuál sería la influencia de los instrumentos de política pública ambiental (como medidas de adaptación al cambio climático) en el estado proyectado de VSE?

La hipótesis en este sentido propone que:

- El estado de VSE proyectado en la zona de estudio a 2039 sería menos favorable en comparación con el estado actual, dada la influencia directa de CC y CUS en los SEH de provisión y regulación.
- El estado proyectado de VSE puede mejorar al considerar la aplicación de los instrumentos de políticas públicas ambientales de tipo Pago por Servicios Ambientales (PSA) como herramientas de adaptación ante el CC y CUS.

De esta forma, el objetivo central del trabajo de investigación plantea:

Determinar el estado de la vulnerabilidad socioecológica de la periferia urbana a nivel de cuenca actual y proyectado a 2039 en el contexto de cambio climático y cambio de uso de suelo en relación con los servicios ecosistémicos hídricos de provisión y regulación en 4 microcuencas en Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

Los objetivos específicos:

- Determinar el estado proyectado de la vulnerabilidad socioecológica en el contexto de cambio climático (a 2039) y modelo tendencial de cambio de uso de suelo.
- Determinar la influencia de la preservación de los instrumentos de política pública ambiental como medidas de adaptación ante cambio climático en el estado proyectado de la vulnerabilidad socioecológica.

Para dar respuesta a las interrogantes planteadas y al cumplimiento de los objetivos, la presente investigación propone estudiar la vulnerabilidad socioecológica relacionada con los SEH en 4 microcuencas que subyacen en la periferia suroeste de la Ciudad de México en el contexto de CC y CUS en los periodos 1999-2019 y 2019-2039 mediante el uso del protocolo colaborativo ECOSER. La presente tesis se divide en 5 secciones. El capítulo uno se centra en el desarrollo del marco teórico conceptual de *Sistemas Socioecológicos* (SSE) que proporciona los conceptos y principios de análisis para comprender a las periferias urbanas como un ente en el que converge el subsistema ambiental y social vinculado a SEH de provisión y regulación en el contexto de CC y CUS. Posteriormente, se describe como estos factores influyen en la VSE del SSE y se proporciona un análisis bibliográfico con las aproximaciones metodológicas actuales que sirvieron como base para la selección de ECOSER como una herramienta pertinente en la determinación de la VSE de las 4 microcuencas de estudio. El segundo capítulo brinda la ubicación, antecedentes e información socioecológica de la zona de estudio como proveedora de SEH. El capítulo tres se encuentra dividido en dos secciones² que dan cuenta de la metodología empleada en la determinación de la VSE de acuerdo con el protocolo ECOSER en la zona de estudio; el primero indica el procedimiento realizado para la evaluación de los SEH a partir de las características biofísicas de las microcuencas de análisis y el segundo subcapítulo metodológico describe los criterios establecidos para el cálculo de la sensibilidad, exposición, capacidad adaptativa e inequidad del socioecosistema en donde se consideraron las políticas públicas ambientales de conservación forestal como herramientas de capacidad adaptativa ante el CC y CUS. La unión de la información obtenida en estas dos secciones converge en un último cálculo el cual se describe en el capítulo cuatro presentando los resultados de la VSE de los dos periodos de evaluación 1999-2019 y 2019-

² Debido a que el mismo protocolo ECOSER se encuentra dividido en dos módulos como se describe el subcapítulo 1.5.1 del presente documento.

2039; así mismo, se incluye la discusión sobre los principales aportes e inconvenientes durante la realización de esta investigación. En el quinto y último capítulo se brindan las conclusiones.

1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1 Sistemas socioecológicos

El concepto de *sistemas socioecológicos* (SSE) surgió en los años 90 para aludir a sistemas caracterizados por cambios discontinuos próximos a sus valores críticos en sus umbrales y el efecto de su *resiliencia*. Por tanto, el término de SSE parte de un nuevo paradigma que entiende que la actividad humana existe en un sistema de interacciones complejas de interdependencia entre los distintos componentes o variables sociales y ecológicos (Ostrom, 2009, Binder et al., 2013, Fischer et al., 2015; Caro, et al., 2015). Dentro de los beneficios que ofrecen los SSE se encuentran los *servicios ecosistémicos* (SE) los cuales contribuyen a hacer la vida no sólo físicamente posible sino también “digna de ser vivida” (Costanza et al., 2007; Daily, 1997; Quétier et al., 2007) ya que los SE son las interacciones socioecológicas de dependencia hombre-naturaleza, que contribuyen al bienestar de las personas y a las economías locales y nacionales dado que regulan la productividad, estabilidad y sobre todo la salud de los seres vivos que habitan en un socioecosistema (Delgado, 2019; Zegarra, 2017) los cuales son clasificados en cuatro tipos: i) *Provisión* ya sea de agua, energía y alimentos; ii) *Regulación* de los ciclos biogeoquímicos, ciclos de carbono e hídrico; iii) *Culturales* en el sentido estético, de recreación o espiritual; y de iv) *Soporte* que son necesarios para la existencia de los otros SE (MEA, 2005).

De modo que el enfoque de SSE permite visualizar aquellos componentes que se encuentran estrechamente relacionados y con una fuerte codependencia en un –espacio determinado– cuya vulnerabilidad en este contexto, está determinada por su capacidad para anticiparse, resistir y recobrase de un evento específico (Espinosa, 2011; Henao, 2013). Es decir que, al analizar la *vulnerabilidad socioecológica* (Figura 1.1) se está considerando la *exposición* del SSE ante eventos potencialmente catastróficos que tienen una frecuencia, duración y magnitud que suceden en el entorno biogeofísico en su *subsistema natural* que, a su vez influyen directamente en sus SE y en su población. La *sensibilidad* del SSE mide cómo las condiciones socioecológicas existentes les permiten a los individuos o a las comunidades humanas absorber cambios generados por fenómenos catastróficos, esta sensibilidad también es conocida como *vulnerabilidad social* la cual puede variar independientemente de la existencia del fenómeno de riesgo por las características socioeconómicas y políticas de la población (Pizarro, 2001) en la que su *capacidad adaptativa* hace más eficiente la gestión del riesgo al asignar recursos a las poblaciones, localidades, regiones o países que lo requieren (Balvanera et al., 2017; Musseta et al., 2017) y que involucran decisiones políticas. El tema de la conservación del ambiente adopta gran importancia debido a la acelerada expansión urbana hacia los espacios periféricos de gran valor ambiental (Rojo et al., 2018). Las políticas públicas ambientales están orientadas a la internalización de externalidades negativas asociadas al daño ambiental por lo que se encuentran orientados a incentivar la conservación del subsistema natural (Blandón et al., 2017) de forma que asegure su capacidad para producir servicios ecosistémicos a través del tiempo y su influencia en la vulnerabilidad socioecológica del SSE.

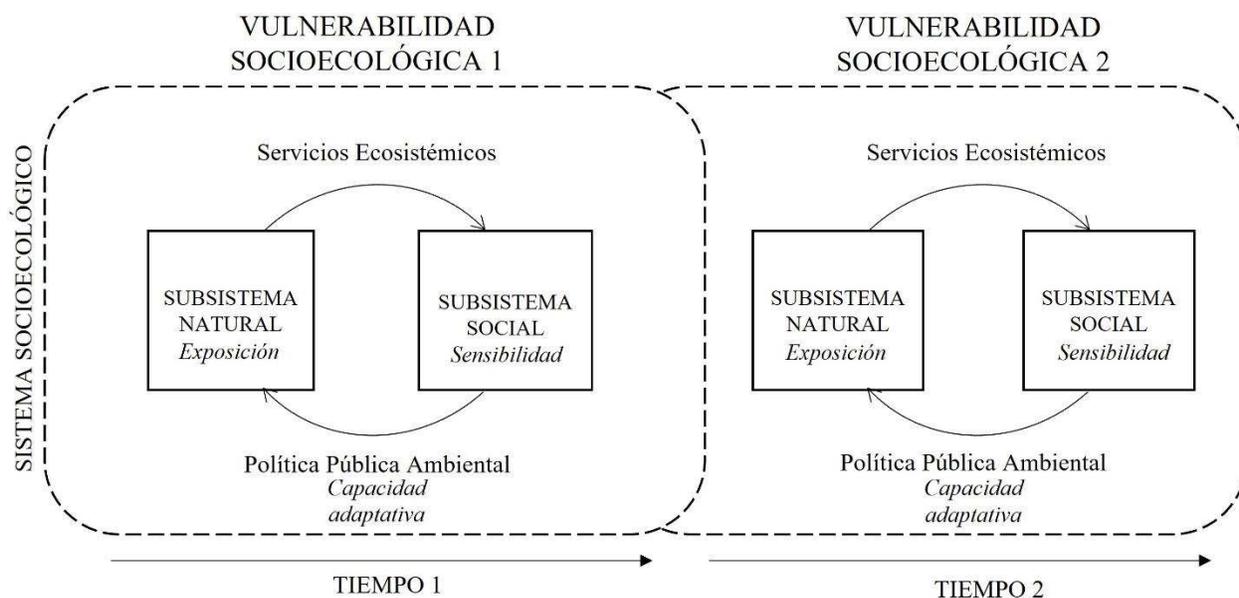


Figura 1.1. Vulnerabilidad Socioecológica (Fuente: elaboración propia)

1.2 Sistemas socioecológicos vinculados a servicios ecosistémicos hídricos de provisión y regulación

Al referirnos a –espacios determinados– dentro del entendimiento de los vínculos que componen un SSE como un sistema dinámico con distintos componentes sociales, políticos, culturales económicos y ambientales en relación con los SEH, las cuencas hidrográficas en este sentido, son unidades territoriales de análisis y subsistemas naturales que dan cuenta de las interacciones humano–naturaleza y de su impacto en los cuerpos de agua así como los beneficios captados por la sociedad (Paolini, 2014; Burgos y Bocco, 2014) dado que permiten establecer medidas de planificación y manejo de los recursos naturales vinculados al uso de la tierra con impactos relacionados con el ciclo hidrológico y la capacidad de infiltración del agua (Betancur et al., 2016) que pueden ser medibles a corto y mediano plazo (Tobar, 2010). Por tanto, los SSE a nivel de cuenca en relación con los SEH comprenden la regulación de flujos de agua dado que establecen una relación entre el uso del suelo y el potencial para su aprovechamiento donde un cambio radical en estos interfiere directamente en las condiciones hidrológicas (Mo, et al., 2020; Mendoza, et al., 2002) poniendo en riesgo a los SEH de provisión y regulación (Arellano et al, 2018; Dourojeanni et al., 2002) aunado al contexto de cambio climático como un factor de cambio adicional en las cuencas hidrográficas.

1.2.1 Escenarios de cambio climático y afectación a servicios ecosistémicos hídricos

La creciente degradación ecológica y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son la causa principal del cambio climático y sus implicaciones (IPCC, 2007). La Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define el Cambio Climático (CC)

como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables (Díaz, 2012). El CC sin lugar a duda es otro factor de cambio que influyen en un SSE a nivel de cuenca en relación con los SEH pues incide en el régimen de precipitación, temperatura ya sea mediante la reducción de la humedad del suelo o de la escorrentía total en cuencas (Jódar et al., 2019; Martínez, et al., 2018).

Si no se aumenta –y mantiene– de forma urgente la ambición en materia de adaptación para reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero desde ahora a corto plazo (2039) el calentamiento global superará los 1,5 °C en los próximos decenios ocasionando la pérdida irreversible de los ecosistemas más frágiles y una crisis tras otra afectarán a las personas y sociedades más vulnerables (IPCC, 2019). En México por su parte, se observa igualmente un patrón de incremento en la temperatura promedio del país de 0.72°C en el último decenio lo cual confirma la alta vulnerabilidad de México ante el CC (Martínez y Patiño, 2012) y aunque los cambios esperados en el escurrimiento superficial debido al CC no han sido cuantificados en todo el país (IMTA, 2010) de acuerdo con información de Martínez y Patiño (2012) se esperan, por ejemplo, disminuciones en el escurrimiento de la cuenca del río Conchos (ubicada en el estado de Chihuahua) de alrededor de 21% para 2050 y de 25% para 2100. Otro estudio publicado en el *Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático* señalan decrementos máximos esperados en el escurrimiento superficial en la cuenca Lerma-Chapala (que comprende los estados de México, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y Querétaro) de 17 y 21% para el 2030 y 2050 respectivamente, y de 19 y 13% en los mismos años en la cuenca Río Grijalva (al sureste de México que subyace en los estados de Chiapas y Tabasco) (IMTA, 2010), incidiendo directamente en la provisión y regulación de los SEH de México.

1.3 La periferia urbana como un sistema socioecológico vulnerable

La periferia urbana comprendida como SSE resulta relevante para el bienestar de los habitantes (Calderón, 2020) por jugar un papel importante en la provisión y regulación de servicios ecosistémicos no sólo a la ciudad (Pérez et al., 2016), sino a su periferia misma (Soto et al, 2018); dado que permite visualizar los flujos de los SEH y actividades asociadas para establecer estrategias de adaptación a corto, mediano y largo plazo (Spyra et al., 2020). En la **Figura 1.2** se muestra un esquema que representa la VSE en periferias urbanas como SSE a nivel de cuenca y microcuenca. El SSE se ve afectado por la dinámica urbana, cuya funcionalidad y protección va ligada con la conservación de la cubierta vegetal y uso de suelo que asegura la infiltración, la recarga y la disponibilidad de agua que cuenta con sus propios procesos transformativos. En este sentido, el SSE de periferia urbana está en constante *exposición* ante cambios de uso de suelo y cambio climático que inciden directa e indirectamente en su *vulnerabilidad socioecológica* (Spyra et al., 2020; Sterk, et al., 2017) por una parte alterando la función reguladora de los flujos de agua ejercida por los bosques que condiciona la disponibilidad de los recursos hídricos en las cuencas y microcuencas (subsistema natural) (Calder et. al., 2007) y por otra, influyendo en la *sensibilidad*

del SSE, es decir en la población (subsistema social) por sus características de marginación, heterogeneidad territorial y social dadas sus condiciones rurales y de decaimiento en la disponibilidad o el acceso de los recursos naturales. Por último, en cuanto a la *capacidad adaptativa*, los actores sociales que conforman y habitan la periferia urbana utilizan instrumentos jurídicos, económicos, políticos y sociales para el control y conservación a favor de los SEH (Aguilar et al., 2016). En este sentido, las políticas públicas ambientales de conservación forestal están ligadas con la provisión y regulación de los SEH debido a la influencia de los bosques con el cambio climático y el cambio de uso de suelo.

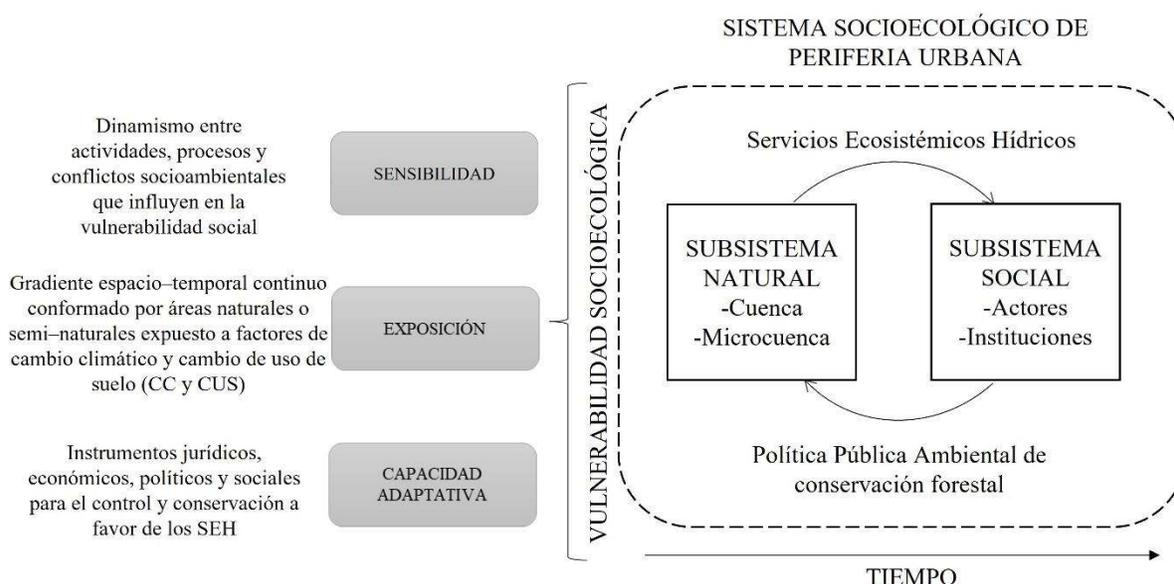


Figura 1.2. VSE del SSE de periferia urbana en relación con los SEH a nivel de cuenca y microcuenca (Fuente: elaboración propia con información de Zulaica, 2010; Espinosa, 2011; Henao, 2013; Fischer et al., 2015; Hernández, 2016 y Geneletti et al., 2017)

1.4 Aproximaciones metodológicas en la determinación de la Vulnerabilidad Socioecológica en relación con Servicios Ecosistémicos Hídricos de provisión y regulación

El análisis de la VSE de acuerdo con la revisión de literatura se ha desarrollado desde diferentes enfoques: cualitativos-mixtos (Montalba et al., 2013; Peredo et al., 2016; Sterk et al., 2017; Reyna et al., 2018) o como cuantitativos (Laterra et al., 2015; Jullian et al., 2018; Mancera, 2019) cuya principal diferencia radica en que el segundo permite dentro de sus aproximaciones metodológicas la delimitación territorial mediante herramientas espacio-temporales y que las aproximaciones cuantitativas *per se* enfocan su análisis en el mapeo de SE a nivel de cuenca (Jullian et al., 2018; Mancera, 2019). Actualmente los estudios cualitativos-mixtos han permitido la evaluación de arrecifes de coral y ecosistemas costeros ante cambio climático (Reyna et al., 2018) o en agroecología (Peredo, et. al, 2016) con el esquema metodológico propuesto por REDAGRES

(Altieri, 2011 y 2013; Altieri y Nicholls, 2013) la cual es una herramienta que permite la sistematización de experiencias de agricultores que han enfrentado de manera exitosa la variabilidad en las condiciones climatológicas; o incluso desde la perspectiva de *resiliencia socioecológica* que se diferencia de la vulnerabilidad en que la resiliencia pretende estimar el grado de adaptabilidad de un sistema desde su organización, aprendizaje y adaptación (Sterk et al., 2017). Mientras que autores como Montalba et al., (2013) analizan la interrelación entre los riesgos ambientales generados por el cambio climático y la capacidad de los sistemas agrícolas para resistir perturbaciones en los recursos hídricos desde un enfoque de resiliencia socioecológica ante condiciones de escasez mediante el uso del Índice Holístico de Riesgo (IHR) propuesto según citan por Barrera et al., (2011). Tal metodología se basa en mediciones cualitativas con un posterior análisis estadístico de capacidad de respuesta ante una amenaza (Barrera et al., 2011) en tal caso, de presión a los recursos hídricos. Así mismo, dentro de la búsqueda de literatura fue complicado encontrar publicaciones que estudiaran la VSE en relación con los SEH, salvo por un enfoque de vulnerabilidad del recurso hídrico con respecto a actividades agrícolas (Espinosa et al., 2011) o una recopilación completa que muestra gran variedad de estudios de caso sobre SEH (Lattera et al., 2013) sin embargo, el concepto de VSE en relación con los estudios citados, no es mencionado.

Por otro lado, dentro de los métodos cuantitativos estudios como el de Jullian et al., (2018) analizan los cambios en SEH de regulación bajo un escenario de cambio de uso de suelo a escala de cuencas en Chile, cuya metodología se basó en el método de Número de Curva aplicado mediante el Módulo 1 del protocolo ECOSER de mapeo de VSE (Lattera et al., 2015) para estimar la capacidad de regulación hídrica desde las precipitaciones, considerando el tipo de vegetación y suelo; sin embargo no se llega a estudiar la VSE. Dentro de la línea de análisis cuantitativos en relación a SEH Mancera (2019), Valdés et al., (2017) y Ochoa (2015) mencionan que los modelos más utilizados para su análisis son: SWAT (Soil Water Assessment Tool), InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), ARIES (Inteligencia Artificial para el Modelado de Servicios Ecosistémicos), SolVES (Social Values of Ecosystem Services) y ECOSER (Protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socioecológica para el ordenamiento territorial) siendo este último el único con un enfoque específico para la evaluación de la VSE. Si bien, de acuerdo con los objetivos de la presente investigación y bajo el contexto de pandemia dentro de las aproximaciones metodológicas de acuerdo con la revisión de literatura que mejor se ajustan a las necesidades de este trabajo, se concluyó que la modelación de SEH que considere cambio climático y cambio de uso de suelo sería lo idóneo; sin embargo, como se puede observar en el *Cuadro 1.1* no todos los modelos consideran la VSE dentro de su análisis a excepción del protocolo ECOSER. Por lo tanto, este último fue seleccionado como la aproximación metodológica a desarrollar en el caso de estudio de la periferia urbana de la Ciudad de México.

Cuadro 1.1 Ventajas y desventajas de herramientas para la evaluación de SEH en relación con VSE (Fuente: elaboración propia con información de Ochoa, 2015; Valdés et al., 2017; Mancera, 2019 y autores de las herramientas)

Herramienta	Características	Ventajas	Desventajas
<p align="center">ARIES Bagstad, K.J., Villa, F., Johnson, G.W., and Voigt, B. (2011) https://aries.integratedmodelling.org/</p>	<p>Herramienta basada en tecnologías Web, desarrollada en la Universidad de Vermont, EEUU, tiene como objetivo fundamental ofrecer un soporte inteligente para la evaluación y valoración de SE, facilitando y mejorando la toma de decisiones ambientales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Usa una metodología para cuantificar los SE, la cual reconoce la complejidad inherente a estos procesos. • Proporciona modelos suficientemente sencillos para que sean abordables, es escala amplia de orden general y aplicables a diferentes niveles de detalle según la disponibilidad de datos 	<ul style="list-style-type: none"> • Contempla a nivel social únicamente evaluaciones socioeconómicas. • No contempla Vulnerabilidad Socioecológica
<p align="center">ECOSER Lattera, P., Manson, R., & Barrantes, G. (2013) http://www.eco-ser.com.ar/</p>	<p>Desarrollado en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, el CONICET y otras instituciones. Esta herramienta es desarrollada como soporte para la toma de decisiones sobre uso de la tierra en el marco de procesos de ordenamiento territorial rural. Se compone de dos etapas o módulos para la evaluación de la Vulnerabilidad Socioecológica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Está fundamentada en un protocolo o conjunto de procedimientos que permiten evaluar y mapear SE y estimar la Vulnerabilidad Socioecológica frente a la pérdida de estos, • Considera la cuantificación y representación espacial del flujo de los servicios. • Pondera valor social. 	<ul style="list-style-type: none"> • Al ser una herramienta relativamente reciente, son los investigadores los que delimitan sus variables debido a su carácter colaborativo. • Si bien no es una desventaja per se, la caracterización del sitio requiere identificar lo mejor posible las características tanto físicas como sociales de los sistemas a estudiar.
<p align="center">InVEST Tallis EH, Ricketts T, Guerry A, Wood S, Sharp R, Chaplin-kramer R, et al., (2013) https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest</p>	<p>Conjunto de herramientas que se ejecutan de manera independiente, las cuales son desarrolladas para trabajar sobre la suite de ArcGIS, y permiten el mapeo y valoración de diversos SE, proporcionando como insumo fundamental la espacialización de flujos, beneficios y análisis de compromisos bajo múltiples escenarios simulados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona la misma cantidad de modelos para analizar ambientes marinos y terrestres, y están soportados en funciones de producción de servicios, dependiendo de la estructura y los procesos de los ecosistemas. 	<ul style="list-style-type: none"> • No contempla Vulnerabilidad Socioecológica. • Simpleza de algunos de los modelos a nivel de variables involucradas, la dificultad para obtener datos espaciales utilizados en los modelos en escenarios locales, modelos muy generales sin tener en cuenta aspectos de geomorfología propias de regiones específicas y la ausencia de algunas variables claves a nivel de aguas superficiales y subterráneas.
<p align="center">SoLVES Sherrouse, B.C., Clement, J.M., Semmens, D.J., (2011) https://www.usgs.gov/centers/geoscience/social-values-ecosystem-services-solves</p>	<p>Herramienta desarrollada por el USGS <i>Rocky Mountain Geographic Science Center & Colorado State University</i>, constituida para la valoración social de SE, la cual permite efectuar una estimación complementaria a la evaluación económica y resalta la información primaria obtenida a partir de grupos de interés</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite alojarse y desarrollar modelaciones con ArcGIS. • La aplicación permite evaluar, mapear y cuantificar el valor social percibido de los SE, a través de un índice de valor no monetario • Se alimenta fundamentalmente de datos recolectados mediante encuestas a diferentes actores sociales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aunque no es una desventaja como tal, los productos obtenidos con esta herramienta son mapas e información estadística sobre diferentes valores sociales. • En relación con VSE puede ser un aporte complementario muy relevante sobre información espacial desde la visión de los actores sociales.
<p align="center">SWAT Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., & King, K.W. (2002) https://swat.tamu.edu/</p>	<p>Es una herramienta de libre distribución que permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el impacto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas en cuencas con variedad en suelos y usos de tierra.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta de manera clara los diferentes datos espaciales ya que es una extensión de la herramienta Arc-GIS luego es posible visualizar y modificar los datos. • Es uso de HRU ayuda a mantener una buena resolución en datos y resultados. Se pueden utilizar este programa tanto para estudio de avenidas máximas como para estudios estacionales. • Esta herramienta realiza homogenización y relleno de datos meteorológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No contempla Vulnerabilidad Socioecológica. • No considera factores sociales, se basa únicamente en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. • Trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) obtenidas de la relación existente entre los diferentes tipos de suelo con la cobertura y el uso de este.

1.4.1 Introducción a ECOSER

El protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socioecológica, ECOSER surge de la necesidad del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Argentina de contar con herramientas cuantitativas en la evaluación de la provisión de SE en 2006 a partir del proyecto “Valorización de los bienes y servicios ambientales para caracterizar vulnerabilidad en áreas ecológicas críticas” con la finalidad de apoyar la aplicación de estrategias de ordenamiento territorial (Laterra et al., 2015). Posteriormente, el protocolo ECOSER fue estandarizándose hasta llegar a ser actualmente una herramienta que consiste en un conjunto de procedimientos espaciales orientados tanto al soporte de la toma de decisiones sobre uso del suelo, como a la investigación en integración disciplinaria y colaboración científica en torno a los flujos de funciones ecosistémicas (FE) también llamados “servicios ecosistémicos intermedios” que son los atributos y procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen al automantenimiento de los ecosistemas y que dan soporte al flujo de los SE. Así mismo, ECOSER permite observar la “captura por la sociedad” de los SE y de la VSE bajo distintos escenarios ante la pérdida de estos (Laterra et al., 2015).

El protocolo se compone de dos etapas o módulos de evaluación (*Figura 1.3*). El módulo 1 se refiere a la cuantificación e integración de los componentes del SE mediante tres pasos principales que consideran: 1) la evaluación de las FE y/o paisajes (en caso de SE culturales); 2) la evaluación del SE a partir de la o las FE que los soportan (considerando que generalmente un SE es resultado de la interacción de diversas FE); y 3) la evaluación de los beneficios a partir de los SE que son capturados tanto por beneficiarios directos como indirectos (Laterra et al., 2015). En esta primera etapa del modelo se combina información biofísica georeferenciada del área de estudio en formato ráster en donde cada píxel cuenta con información local (p.e. usos de suelo, topografía, clima) utilizando como soporte un sistema de información geográfica (SIG) en donde los valores de las FE se integran mediante combinaciones lineales para el cálculo de la provisión de cada uno de los SE de interés (Laterra et al., 2009). Esta primera etapa del protocolo es la aproximación metodológica más estudiada y utilizada actualmente en América Latina. Tales son los casos de estudio de Laterra et al., (2009) mediante una valoración relativa y mapeo de SE provistos por pastizales en la cuenca de la laguna costera Mar Chiquita, Argentina; Oddi (2010) realiza en su tesis de maestría una valoración de SE en humedales y analiza su vulnerabilidad ante alteraciones ambientales en la Región del Inferior del Río Paraná, Argentina; Teruya et al., (2017) evalúan la provisión de SE de dos ecosistemas en la cuenca Arroyo Grande en Mendoza, Argentina mediante la identificación y ponderación de cuatro FE; Valdés et al., (2017) realizan una simulación de SE de estabilidad de laderas y su impacto en los procesos de gestión del territorio en la microcuenca La Presidenta, ubicada en el suroriente de la Cuenca del Valle del Aburra, Colombia y entre otros estudios de carácter similar desarrollados en Ecuador y Chile (Portanza, 2017; Jullian et al., 2018). En la página oficial de ECOSER (<http://www.eco-ser.com.ar/>) se ofrecen los modelos desarrollados por los fundadores y colaboradores del protocolo para la evaluación y mapeo de FE y SE disponibles como *toolboxes* compatibles con ArcGIS y QGis.

El módulo 2 (*Figura 1.3*) por su parte, se encuentra vinculado al módulo 1 y se compone de 3 elementos principales: 1) *la exposición* que busca comprender cómo el sistema cambiaría de un escenario actual

a uno futuro, producto de la presión provocada por cambios en el ecosistema o por causas antropogénicas en el uso de suelo a escala regional o local; 2) *la sensibilidad* del SE a cambios que pueden afectar su provisión a los beneficiarios indirectos y directos del servicio y 3) *la capacidad adaptativa* como el grado en que un SSE puede moderar los daños potenciales para hacer frente a las reducciones o pérdidas en el flujo de determinado SE mediante factores institucionales, económicos y sociales/culturales (Latterra et al., 2015); así mismo en esta etapa se considera un *coeficiente de inequidad* orientando a reflejar las asimetrías en la capacidad adaptativa frente a la pérdida o reducción de SE.

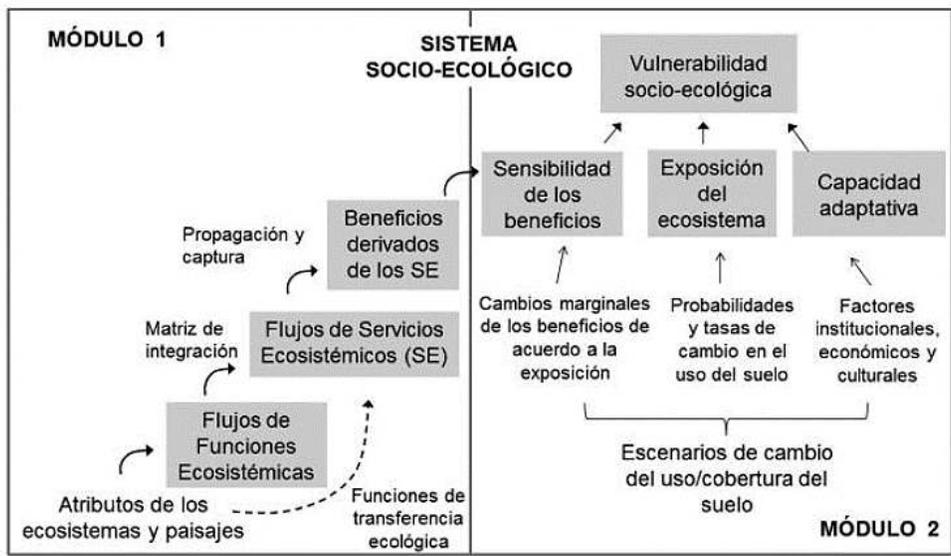


Figura 1.3. Diagrama de flujos del protocolo ECOSER para la evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y estimación de la vulnerabilidad socioecológica (Fuente: Tomado de Latterra et al., 2015).

Cabe mencionar que la evaluación de la VSE en el Módulo 2 de ECOSER parte de los lineamientos establecidos en el programa de las Naciones Unidas “Evaluación de Ecosistemas del Milenio” (MEA) publicado en 2001 (Latterra et al., 2015) el cual consistió en determinar en qué medida los cambios en los SE han afectado el bienestar humano y de qué manera los cambios en los ecosistemas pueden afectar a las personas en las próximas décadas de tal manera que, se pudiera evaluar qué tipos de respuestas pueden adoptarse a escala local, nacional y global, con el fin de mejorar el manejo de los ecosistemas, y con ello, contribuir al bienestar humano y a su vez, una disminución de la pobreza. En este sentido, los autores de ECOSER argumentan que la VSE en el Módulo 2 no sólo se relaciona con la magnitud de los beneficios que pueden perderse en escenarios de cambio de uso de suelo sino también se considera dentro de la sensibilidad de la VSE la importancia social que le atribuyen los mismos usuarios a cada SE con base en las relaciones o “vínculos” establecidos en el marco conceptual de MEA (2005) (Figura 1.4) entre los SE y el bienestar humano. Tales vínculos se reflejan en el cálculo de sensibilidad (Si) dentro del Módulo 2, al cual se le asigna un valor ordinal según las relaciones representadas por el

ancho de las flechas (intensidad del vínculo entre SE –ya sea de provisión, regulación o cultural– y el bienestar humano) y el color de éstas (potencial de mediación por factores económicos) (*Figura 1.4*).

La *intensidad del vínculo* entre cada SE y el bienestar puede comprenderse como los distintos componentes de bienestar humano que aportan diferentes SE, como seguridad, salud, buenas relaciones sociales, etc; (Laterra et al., 2015) y este se expresa mediante los tres anchos posibles de flecha de menor a mayor una valoración ordinal (1, 2 ó 3). Mientras que el *potencial de mediación por medio de factores socioeconómicos* se refiere en términos generales a las posibilidades de sustitución ante la pérdida o agotamiento de un SE. Tales posibilidades se expresan mediante colores de más claro a más oscuro con valores ordinales. Por último, las posibilidades de sustitución dependerán de las condiciones económicas, sociales y culturales de la o las poblaciones en cuestión.

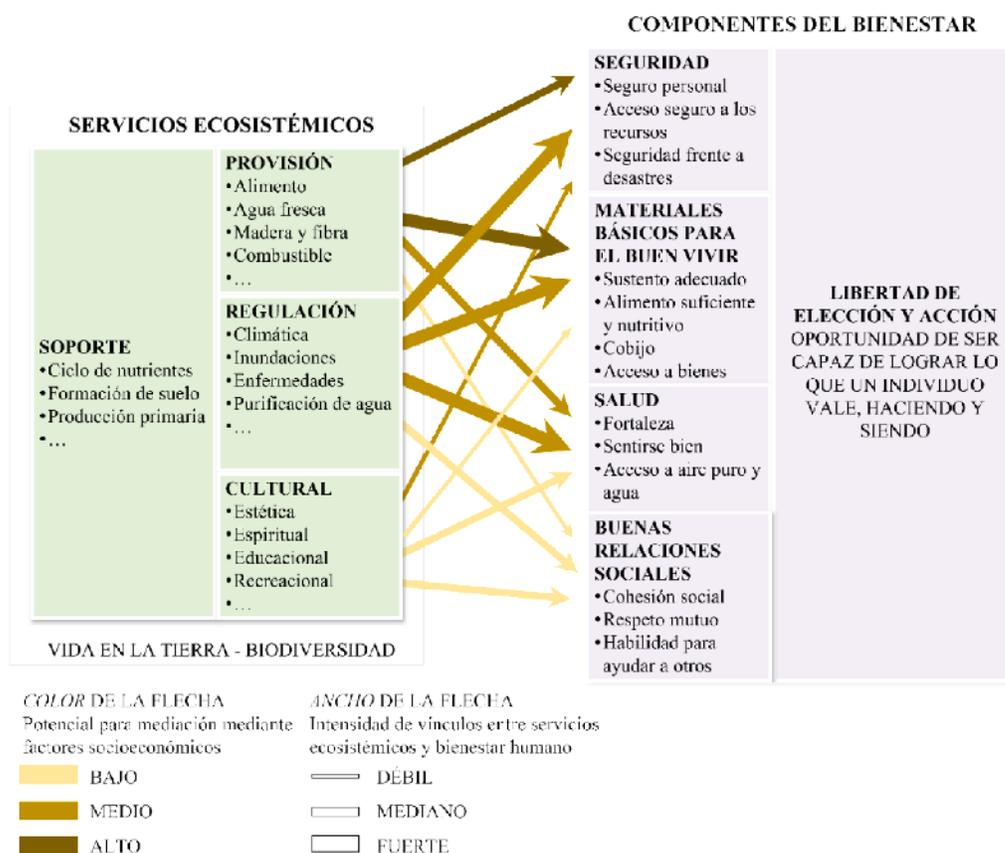


Figura 1.4. Contribución de los servicios ecosistémicos al bienestar humano (Fuente: elaboración propia con información de MEA (2005) y Laterra et al., (2015))

El desarrollo y aplicación del Módulo 2 ha sido poco explorado actualmente debido a que contempla criterios de los atributos del subsistema social (económicos, sociales, institucionales, etc.) mediante ponderaciones que quedan a criterio del analista para su cuantificación y conversión en formato ráster para el mapeo de la VSE dentro del modelado, aunado a la información necesaria que represente la capacidad instalada en los gobiernos, la sociedad y/o variables económicas/tecnológicas en relación con las SE de análisis en el área de estudio que pueden significar un gran reto. Sin embargo,

hay un ejemplo de aplicación del protocolo con especial énfasis en el Módulo 2 en Ancud, Chile donde se estima la VSE frente a la pérdida del SE de provisión de agua limpia en Laterra et al., (2015).

En suma, debido a la naturaleza colaborativa de ECOSER el modelado, los índices, las funciones de los módulos, temporalidades y sus apartados subyacentes pueden ser adecuados a diferentes zonas de estudio. La gran utilidad del protocolo radica en que ofrece la posibilidad de brindar propuestas de variables complementarias o alternativas de acuerdo con las necesidades para cada SSE; en este sentido, la presente tesis es otro ejemplo de adaptación y aplicación de ambos módulos del protocolo para la evaluación de la VSE en 4 microcuencas en SC de la CDMX a partir del mapeo de 7 SEH de provisión y regulación (*Anexo 8*). Por ejemplo, fue en el Módulo 1 como se describirá a detalle en el apartado metodológico donde se incluyó en el cálculo de una de las proyecciones de las FE a 2039 el modelo de precipitación 2021-2040, *BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6 (worldclim.org)* como parte del análisis que considerara cambio climático en las 4 microcuencas de estudio; así mismo se realizó una encuesta a investigadores expertos del SC específicamente para la realización de la matriz de integración de FE a SEH. En el Módulo 2 en el cálculo de la capacidad adaptativa se buscó integrar cuantitativamente en los *factores institucional, social y económico* la situación actual de las políticas públicas ambientales de conservación forestal específicamente del caso del SC y se propuso la integración del *factor hídrico* el cual, fue un pequeño esfuerzo por intentar reflejar la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos en la periferia urbana de la CDMX.

2 CASO DE ESTUDIO

2.1 Periferia urbana de la CDMX como proveedor de servicios ecosistémicos hídricos

La capital del país, la Ciudad de México (CDMX) abarca un área de aproximadamente 148 mil hectáreas (ha) con una población cercana a 9 millones de habitantes, lo que hace que sea la ciudad más densamente poblada de México (Calderón, 2020). La CDMX se encuentra administrativamente dividida en dos categorías de uso de suelo: la *zona urbana* que corresponde al área de construcción e infraestructura urbana y la *zona de conservación*, una categoría propuesta en 1987 de “protección natural” que ocupa actualmente alrededor de 58% de la superficie total de la ciudad (Calderón, 2020) (**Figura 2.1**). En el año 2000 la zona de conservación se define oficialmente como “Suelo de Conservación” (SC) cuya finalidad es la protección de los recursos naturales y los SE de alto valor ambiental, productivo y cultural como el suministro de agua, producción de oxígeno, disminución de los niveles de contaminación, importante reservorio de biodiversidad, regulación del clima a nivel local, retención de suelo y agua, producción agropecuaria, servicios escénicos, recreativos/culturales, entre otros (PAOT, 2012 en Perevochtchikova et al., 2014). Por lo tanto, es la periferia urbana de la CDMX la que ofrece dentro de su diversidad de SE, los SEH de provisión y regulación (Perevochtchikova, 2016; Zabala et al., 2017 en Perevochtchikova y Rojo, 2020). Por una parte, los SEH de provisión se refieren a la captura del agua de los flujos superficiales (Gaspari et al., 2015) en donde la importancia de la parte suroeste (compuesta por 4 microcuencas y zona de estudio de la presente investigación indicadas en la **Figura 2.1**) radica en que poseen la mayor parte de arroyos y manantiales de los cuales de estos su flujo es captado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), como la Saucedá, El Potrero Chico, y otros con flujo no captado, como el de Agua Grande, del cual se cargan pipas que distribuyen agua al interior de las comunidades en SC cuya calidad físico-química del agua resulta excelente de acuerdo con los parámetros promedio anuales observados en 2015-2017 (Perevochtchikova et al., 2016 en Perevochtchikova y Rojo, 2020: 130). Mientras que los SEH de regulación en la zona de estudio se refieren a la infiltración del agua subterránea cuya relevancia dentro del subsistema ambiental e hidrológica en términos de la recarga anual representa alrededor de 279 Hm³/año (8.85 m³/s) (Martínez et al., 2015) debido a la alta capacidad de infiltración del territorio no sólo a escala local, sino regional que contribuye a la preservación de las fuentes de abastecimiento de dos terceras partes de agua potable para la Ciudad de México (Zabala et al., 2017 en Perevochtchikova y Rojo, 2020: 130).

Dentro del contexto de los límites administrativos sobre los recursos hídricos del SC se puede definir que las 4 microcuencas de estudio del cual formó parte la presente tesis fueron seleccionadas con base en el proyecto “*Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds, TRASSE- ANR-CONACyT*” que se muestran en la **Figura 2.1**: Magdalena, Eslava, San Buenaventura y El Zorrillo. Tales corresponden al 23.65% de superficie con respecto al total del SC (Morales, 2021). Así mismo, pertenecen al acuífero actualmente sobreexplotado denominado Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CONAGUA, 2020) y subyacen sobre tres regiones hidrológicas: Pánuco (RH26), Balsas (RH18) y Lerma-Santiago (RH12) y sobre las

Cuencas Río Grande de Amacuzac (RH18), Río Lerma-Toluca (RH26) y Río Moctezuma (RH12) (*Figura 2.1*).

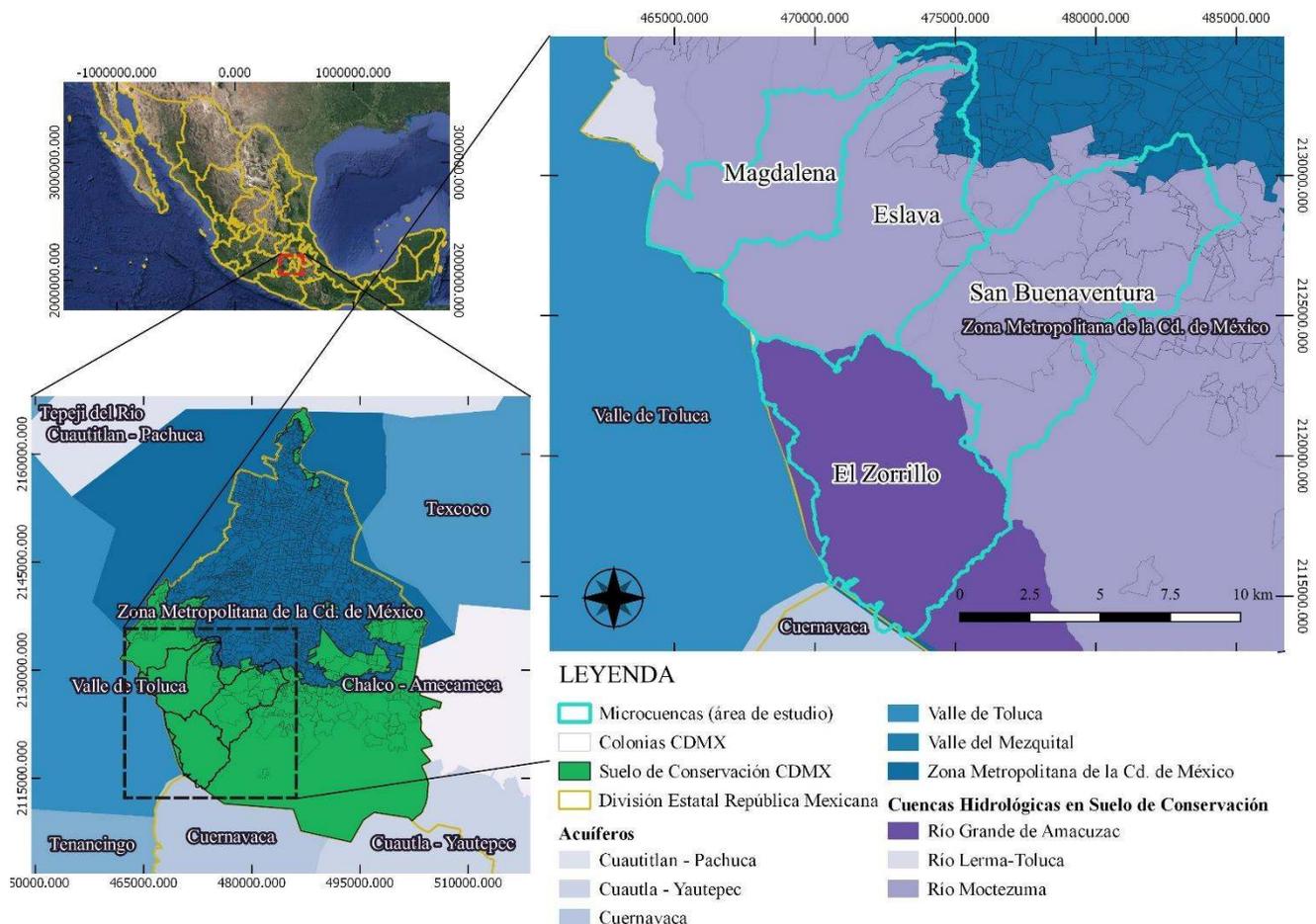


Figura 2.1. Localización del área de estudio en Suelo de Conservación de la Ciudad de México, acuíferos, subdivisión por cuencas y microcuencas (Fuente: elaboración propia con información de Datos Abiertos CDMX, 2020).

2.1.1 Contexto de las comunidades que habitan el Suelo de Conservación de la Ciudad de México y políticas públicas ambientales

En el SC se localizan alrededor de 34 mil ha de propiedad social, y aproximadamente otras 27 mil ha correspondientes a seis poblados con procedimientos agrarios en trámite que, en conjunto conforman aproximadamente 67% del territorio de SC, en el cual habitan 2.2 millones de personas; de éstos, son 700,000 pobladores que habitan 44 núcleos agrarios (comunidades y ejidos) que representan el 8% de la población total de la Ciudad de México y que en términos de propiedad colectiva de la tierra constituye un 90% del SC (CONAFOR, 2012; Perevochtchikova, 2016 en Gómez, 2021). Por tal motivo, la participación de los comuneros y ejidatarios, propietarios de la tierra en SC es indispensable para el cumplimiento de cualquier iniciativa de conservación

ambiental, que se ajuste a las necesidades y características específicas de cada núcleo agrario cuyas estructuras de toma de decisión se acuerdan mediante Asambleas Generales entre ejidatarios que poseen derechos de propiedad para la aplicación y desarrollo en beneficio de sus territorios mediante políticas públicas ambientales (PPA) para el manejo de recursos de uso común, como los recursos forestales (Gómez, 2021:151).

En el área de estudio, así como en el SC existen programas de conservación como es el caso de Pago por Servicios Ambientales Hídricos (PSAH) y que fue diseñado para proveer incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales para apoyar con prácticas de conservación (CONANP, 2010; Morales, 2021), y con ello evitar el cambio de uso de suelo en sus predios con la finalidad de preservar los beneficios ambientales que éstos brindan (Gómez, 2021). Así mismo también existe el esquema de Fondos Concurrentes, mecanismo local de pago por servicios ambientales (PSA), que también como los PSAH, este programa impulsado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), brinda un financiamiento que se destina a la realización de actividades de manejo sustentable con la finalidad de mantener y preservar la provisión de los SE (CONANP, 2010).

En este sentido, se reconoce la labor de los propietarios y habitantes de la zona de estudio para alcanzar los objetivos de conservación ambiental de modo que, las transferencias gubernamentales más las iniciativas locales de turismo de naturaleza fueron fundamentales para incentivar acciones directas de conservación y restauración forestal en el territorio que al mismo tiempo representan para los pobladores ingresos adicionales para diversificar sus medios de vida sin el deterioro de los recursos naturales (Gómez, 2021:7).

2.1.2 Cambio de uso de suelo y cambio climático en la zona de estudio

Las amenazas que padece el SC en la periferia urbana de la CDMX son cambios en sus usos de suelo (CUS) por situaciones de invasión por asentamientos irregulares, eliminación de vegetación natural para establecer cultivos agrícolas o uso urbano, tala clandestina, incendios o contaminación por residuos sólidos urbanos (Rojo et al., 2018) con 350 hectáreas por año y una tasa de deforestación estimada en 239 hectáreas por año (Ávila, 2012) aunado a que el CUS en la CDMX puede causar una pérdida en la recarga del acuífero por 7 m³ por día, equivalentes a 250 litros de recarga anual por cada metro cuadrado del SC (SACMEX, 2012).

Por otro lado, como factor de presión externa al SSE de la periferia urbana de la CDMX se considera el cambio climático (CC) (Díaz et al., 2009). Los escenarios de CC ponen en evidencia el aumento de temperatura y la disminución de precipitación con diferentes horizontes (de corto, mediano o largo plazo) (Álvarez et al., 2019) que en forma directa influyen en el cambio de los SEH. Así mismo, en los escenarios de CC y de CUS hay tendencias de presentarse anomalías en la temperatura y precipitación para la CDMX en el corto plazo al año 2039 (Salazar, 2014), basados en las proyecciones climáticas de cuatro escenarios de trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP) planteados por el IPCC y las proyecciones de CUS (Morales, 2021).

Del estado de la VSE de la periferia urbana de la CDMX actual y proyectada a corto plazo, por tanto, dependería de su capacidad adaptativa y de respuesta ante CUS y CC. En el Programa de Acción Climática de la ciudad se proponen medidas de mitigación y adaptación al CC, como su enfoque en el diseño e instrumentación de acciones que faciliten la organización social, la disposición de medios técnicos (PAOT, 2014). En específico, sobre las medidas de adaptación a mediano plazo se propone establecer mecanismos de compensación económica por la conservación de SEH a escala local como es el caso de Pago por Servicios Ambientales (PSA). El cual, provee incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales para apoyar las prácticas de conservación (CONANP, 2010), y con ello evitar el posible CUS en beneficio de los SEH. También, a escala local de la CDMX se han desarrollado diversos instrumentos de PPA en favor de la conservación de los SE (incluyendo los SEH), como “Áreas Comunitarias de Conservación Ecológica” (ACCE) y “Reservas Ecológicas Comunitarias” (REC), incluidos actualmente en el programa Alteptl (CONANP, 2010).

3 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA

3.1 ECOSER para el mapeo de SEH y VSE ante cambio climático

La metodología que se presenta a continuación es producto de la adaptación del protocolo ECOSER para la evaluación de la Vulnerabilidad socio-ecológica (VSE) de los SEH de provisión y regulación de la periferia suroeste de la CDMX. En este capítulo se explicará con detalle la metodología aplicada y la información necesaria para la cuantificación de las FE, SEH y otras variables del SSE que se consideraron para el caso de estudio.

Cabe resaltar que parte sustancial de la información utilizada en el presente capítulo surgió a partir de trabajos realizados por investigadores del proyecto *Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds* (TRASSE³) cuyo objetivo principal consiste en operacionalizar y comprender el cambio en la sustentabilidad socioecológica y vulnerabilidad de sistemas urbano-rurales en cuencas bajo el contexto de cambio climático; por lo tanto; tal especificidad permitió obtener un panorama amplio del sistema socioecológico periurbano de 4 microcuencas en Suelo de Conservación. Esta metodología fue pensada para integrar de la manera más coherente posible la información que TRASSE ha recabado durante cuatro años de trabajo interdisciplinario en relación a las FE hídricas y los SEH; así como los beneficios que son captados a escala local y regional mediante el uso del protocolo ECOSER. El proceso de modelado de los procesos biofísicos, la exposición al CUS y la integración de las capacidades adaptativas ante el CC que competen a los SEH del SSE de 4 microcuencas en la CDMX permitieron obtener un panorama sobre su VSE en dos periodos: 1999-2019 (estado actual) y 2019-2039 (proyectado a corto plazo).

En la *Figura 3.1* se muestra un esquema general de la metodología empleada para la obtención de la VSE. Como se puede observar, se analizó en un primer momento la información necesaria y pertinente en relación con los SEH de la zona de estudio para el llenado de las herramientas (*toolboxes*) en QGis (versión 3.10.12 con GRASS 7.8.4) para los dos módulos de ECOSER (indicados en la Figura 1.3).

³ <https://www.trasse-project.org/>

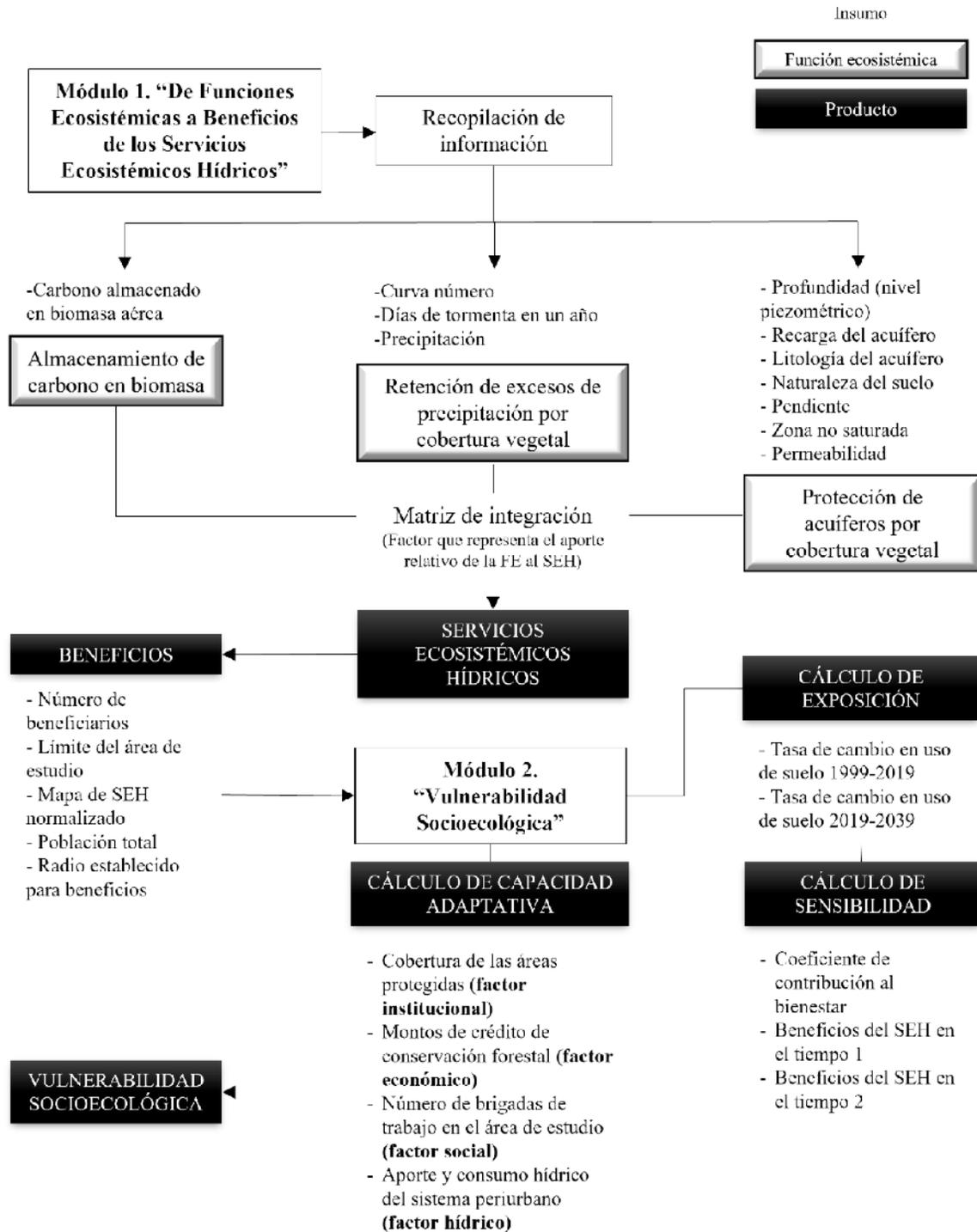


Figura 3.1. Esquema metodológico para la obtención de la vulnerabilidad socioecológica de la periferia suroeste de la Ciudad de México (fuente: elaboración propia)

El módulo 1 constó de 3 pasos: 1) La determinación de las *funciones ecosistémicas* que presentan las 4 microcuencas; 2) la estimación del *factor de aporte relativo* de cada función

ecosistémica que permitió cuantificar la provisión relativa de los SEH; y, 3) el cálculo aproximado de *beneficios* que aporta cada SEH.

Por su parte, el módulo 2 constó de 5 etapas: 1) el cálculo de exposición mediante la estimación de las tasas de CUS de los periodos 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo); 2) la estimación del coeficiente de inequidad de acceso a los servicios hídricos y el índice de desarrollo humano; 3) el cálculo de sensibilidad que considera los cambios en los beneficios en el tiempo 1 y tiempo 2; 4) el cálculo de la capacidad adaptativa del SSE periurbano que considera factores sociales, económicos e institucionales con los que cuenta el sistema bajo el contexto de cambio climático; y por último, 5) la integración de los datos anteriores para la estimación de la vulnerabilidad socioecológica en los periodos 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (ver subcapítulo 4.3 de resultados) cuyo resumen de variables empleadas y su periodo para la obtención de la VSE de la periferia urbana de la Ciudad de México de acuerdo con la *Ecuación 1* para el cálculo de VSE se presenta en el *Cuadro 3.1*.

$$VSE_{ij} = (a_i * E) * [I \left((b_i * S_{ij}) - (c_i * C_i^{(cb_i)}) \right)]$$

Ecuación 1

Donde:

E = la exposición al cambio de cobertura y uso de suelo

S = la sensibilidad a la pérdida del beneficio derivado del SE i en el píxel j

C = el conjunto de capacidades del SSE para adaptarse a los cambios en los beneficios asociados al SE i.

I = coeficiente de inequidad que expresa la relación entre la inequidad y la vulnerabilidad

cbi = coeficiente de contribución del SE i al bienestar

ai, bi y ci = coeficientes que reflejan la situación inicial del SSE⁴.

⁴ En el caso del coeficiente ai, por ejemplo, debe reflejar si el sistema ha venido sufriendo progresivamente presiones sobre cierto uso de suelo previo del período analizado, o bien estos cambios se comienzan a manifestar sólo en el período. Por su parte, en el caso del coeficiente bi, se trata de representar si ya existe escasez en SEH previo al período de análisis, o bien abundancia, o un delicado equilibrio entre oferta y demanda. Por último, en el caso del coeficiente ci, se busca expresar si ya existen capacidades adaptativas movilizadas que puedan hacer frente a eventuales problemas de escasez, o bien el sistema social se encuentra desorganizado o vulnerable por eventos anteriores al período analizado.

Cuadro 3.1 Resumen de variables, su descripción y periodo/año para el cálculo de la VSE en la zona de estudio
(Fuente: elaboración propia con información de Laterra et al., 2015)

Variable	Descripción del mapa o coeficiente	Periodo o año
Exposición (Ver subcapítulo 3.3.1)	Cambio de cobertura y uso de suelo	1999-2019
		2019-2039 (tendencial)
		2019-2039 (restrictivo)
Sensibilidad (Ver subcapítulo 3.3.3)	Cambio en los beneficios brindados por los SEH en consecuencia de un cambio de escenarios	1999-2019
		2019-2039 (tendencial)
		2019-2039 (restrictivo)
Capacidad adaptativa (Ver subcapítulo 3.3.4)	Promedio que representa el factor económico, institucional, social e hídrico del SSE	2019*
Inequidad (Ver subcapítulo 3.3.2)	Indicador que contempla el Índice de Desarrollo Humano y la distribución del recurso hídrico por tandeo en las alcaldías que competen a la zona de estudio	2019*

Las fuentes de información y desarrollo metodológico para el modelado de cada *toolbox* se detallan en los apartados siguientes. Cabe mencionar que todas las capas ráster utilizadas en la descripción de cada sección se manejaron en proyección plana (metros) WGS 84 Zona 14, con dimensiones 21084 x 21169 y tamaño de píxel 30. Igualmente, todos los mapas que se generaron fueron *normalizados*⁵ mediante el método de *scaling* (

Ecuación 2) con el uso de la calculadora ráster en Qgis 3.10 basado en los criterios de ECOSER en el *Cuadro 3.2*.

$$X_{normalizado} = \frac{(X_i - X_{min})}{(X_{máx} - X_{min})}$$

Ecuación 2

Donde:

$X_{normalizado}$ = Escala de valores de 0 a 1

X_i = Representa la capa ráster a normalizar

X_{min} = Valor mínimo en la capa ráster a normalizar

$X_{máx}$ = Valor máximo en la capa ráster a normalizar

⁵ Normalizar en este caso, significa comprimir o extender los valores del ráster en cuestión para que estén en el rango definido en el cuadro 3.2 “Escala relativa para el modelado con la herramienta ECOSER”

Es importante resaltar que para la interpretación de los mapas siguientes se entiende que los valores más bajos representan un menor aporte de factor, coeficiente, beneficio, FE o SEH, según sea el caso y, por el contrario, valores máximos de cada escala indican mayor aporte.

Cuadro 3.2 Escalas relativas para el modelado con la herramienta ECOSER
(Fuente: elaboración propia con información de Laterra et al., 2015)

MAPA / FACTOR / COEFICIENTE	ESCALA	NOTAS
FUNCIONES ECOSISTÉMICAS	0 – 100	-
COEFICIENTE DE APORTE RELATIVO DE FUNCIONES A SEH	0 – 1	-
SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS (SEH)	0 – 100	-
CAPTURA DE BENEFICIOS	0 – 1	-
BENEFICIOS	0 – 100	-
EXPOSICIÓN	0 – 1	-
SENSIBILIDAD	0 – 100	En algunos casos el mapa final de sensibilidad puede alcanzar valores >100 o incluso valores negativos
CAPACIDADES ADAPTATIVAS	0 – 50	Todos los mapas de factores se llevan a una escala de 0 – 50 para posteriormente promediarse. En el cálculo final estos se suman y multiplican por el coeficiente ci
COEFICIENTE DE INEQUIDAD	1 – 2	-
COEFICIENTE DE CONTRIBUCIÓN DEL SEH AL BIENESTAR	0 – 0.5	-
FACTOR DE CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO LOCAL	1, 2 ó 3	-
COEFICIENTES DE SITUACIÓN INICIAL DEL SSE	0.76 y 1.31	-
VULNERABILIDAD SOCIECOLÓGICA	0 - 100	En algunos casos el mapa final de VSE puede alcanzar valores >100 o incluso valores negativos. Para una interpretación más sencilla puede relativizarse nuevamente en rangos de 0 - 100

3.2 Metodología y resultados de análisis de los módulos de ECOSER aplicado en el área de estudio

3.2.1 Módulo 1 de ECOSER: De funciones ecosistémicas a estimación de beneficios

Desde una perspectiva antropocentrista, los ecosistemas son comprendidos como capital natural; es decir como aquellos sistemas con integridad ecológica que tienen los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas, directa o indirectamente (Groot et al., año, en Camacho et al., 2012). Sin embargo, la existencia de los servicios ecosistémicos está sujeta a que previamente se den las condiciones ecológicas necesarias para su generación. En este sentido, de acuerdo con Larterra et al., (2015), las funciones ecosistémicas (FE), también llamadas “servicios ecosistémicos intermedios” (Fisher et al., 2009), son los atributos y procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen al auto-mantenimiento de los ecosistemas y que soportan el flujo de los SE.

En la presente investigación se estudian de manera específica los SEH de provisión y regulación; por lo que de ocho modelos disponibles para la estimación de FE por ECOSER, fueron seleccionadas: 1) *almacenamiento de carbono en biomasa*; 2) *retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal* y 3) *protección de acuíferos por cobertura vegetal*. El criterio de selección se basó principalmente en la influencia de las FE en la regulación de flujos hídricos, así como de agua subterránea influenciadas por la cobertura vegetal y propiedades físicas del suelo (Chen et al., 2010, en Jullian et al., 2018).

3.2.2 Estimación de funciones ecosistémicas

3.2.2.1 Almacenamiento de carbono en biomasa

El carbono es un componente básico y fundamental para la vida debido a su presencia en la atmósfera, la cubierta vegetal, en la materia orgánica, en los combustibles fósiles, en las rocas y también en los océanos (McVay y Rice, 2002m en López et al., 2016).

Durante la última mitad del siglo XX la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera terrestre ha tenido un aumento significativo que contribuye con casi 1/6 de las emisiones de CO₂ mundial por procesos de la deforestación y degradación ambiental (López et al., 2016). Esto es debido a que los árboles están compuestos en un 50% de carbono y al perderlos, el carbono almacenado regresa a la atmósfera (Percy et al., 2003; Álamo, 2007, en López et al., 2016).

Por lo tanto, se comprende que los bosques constituyen un valioso almacén de carbono porque son fuentes de mitigación ante el cambio climático debido a la reducción natural de los gases de efecto invernadero (GEI) y, en particular, de CO₂ (Ordoñez et al., 2015; Galeana et al., 2013). De lo contrario, la presencia de los GEI afecta directamente al ser humano y a las actividades económicas por las modificaciones de temperatura y precipitación (Galeana et al., 2013; Bárcena et al., 2020), específicamente, provocando la seguridad alimentaria a causa de las perturbaciones en los cultivos y afectación de personas en situación de pobreza (Gallardo, 2012).

El insumo de la FE de *almacenamiento de carbono en la biomasa aérea* (ACOB) fue el único elemento que no se calculó directamente con la *toolbox* que propone ECOSER. Los rásters de ACOB en toneladas de carbono por hectárea (tonC/ha) para el año 2019 y una proyección a 2039 fueron calculados por el Dr. Mauricio Galeana Pizaña del CentroGeo a partir de la información dasométrica resultante de dos campañas de muestreo realizados por la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial del Distrito Federal (PAOT) y por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), cuyo intervalo de muestreo fue del 2008 al 2010. Para la estimación del carbono por árbol se aplicaron ecuaciones de biomasa de acuerdo con la especie, género o bioma, en función de la disponibilidad de estas y la diversidad de las especies en el área de estudio. Posteriormente, mediante la metodología propuesta por Smelko y Merganic (2008), se consideró un estimador de media de razones o estimador puntual por hectárea, donde el numerador corresponde al total del carbono obtenido durante el muestreo y el denominador hace referencia a la superficie muestreada. Una vez realizado esto se seleccionaron de manera aleatoria, el 50% de los sitios para calibrar y el otro 50% para verificar el modelo de *regression-kriging*⁶ y cabe mencionar que no fue posible obtener la capa correspondiente al año 1999 por falta de información. Por último, los datos de ACOB 2019 y 2039 fueron normalizados a una escala de 1 a 100 (valores adimensionales) para el cálculo de los SEH (ver subcapítulo 3.2.3) y la posterior modelación e integración de los *beneficios ecosistémicos* en la zona de estudio (ver subcapítulo 3.2.4).

3.2.2.2 Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal

El clima y la topografía son considerados factores de primer orden en el control de las condiciones hidrológicas y de su influencia en el ciclo hidrológico (Sørensen et al., 2006 en Barral, 2017). La cuantificación de los diferentes componentes que integran el ciclo hidrológico y la definición de la interrelación que existe entre ellos es compleja, dada la variación tanto temporal como espacial de los procesos y una forma de acatar este aspecto es simplificarlo, aplicando el concepto de sistemas complejos mediante la intercepción de la lluvia, la evapotranspiración y el almacenamiento del agua en el suelo (Córdova et al., 2015). Así mismo los ecosistemas terrestres amortiguan las inundaciones de manera significativa en las partes medias y bajas de las cuencas (Jobbágy et al., 2008; Jobbágy, 2011; en Barral, 2017) por lo que la *función ecosistémica de retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal* como base de los SEH de regulación se define como la lluvia interceptada por el ecosistema en un año (Barral, 2017). Los insumos geoespaciales necesarios para el cálculo de esta FE son: 1) valores de Número de Curva, 2) precipitación y 3) número de tormentas⁷ por año. A continuación, se describe la metodología desarrollada para la obtención de cada insumo:

⁶ Método de Regression-Kriging (RK) es una técnica de interpolación híbrida que emplea la combinación de métodos de regresión lineal con Kriging ordinario sobre los residuales de la regresión (Hengl et al., 2003).

⁷ De acuerdo con Barral, 2017, Doctora en Ciencias Agrarias y autora del “*Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos*” del protocolo ECOSER se considera que más de 50 mm de lluvia en 24 horas es una tormenta que conlleva a inundaciones.

1. **El Número de Curva (CN)**, indica un índice empírico cuyo objetivo es estimar la proporción de la precipitación que será retenida, evapotranspirada y la que se convertirá en escorrentía superficial, condicionada por el vínculo entre el suelo y la vegetación (Jullian et al., 2018). El método CN fue desarrollado en 1969 por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS por sus siglas en inglés) perteneciente al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Villarroya et al., 2018). Para la generación de las capas ráster con el valor de CN en la zona de estudio se utilizaron los siguientes insumos:

1.1 Capa con el tipo hidrológico del suelo. El método de CN distingue cuatro tipos de suelos de acuerdo con su capacidad de infiltración y edafología. La infiltración en el SC se presenta en: Alta (>250 mm/hr), Media (170-250 mm/hr) y Baja (<170 mm/hr) (**Figura 3.2**) (PAOT, 1982 en CentroGeo, 2021). En un primer paso con la información de infiltración de la zona de estudio y la clasificación de Bradbury et al., (2000) (**Cuadro 3.3**) se asignó la categoría “A” a las 4 microcuencas del SC. Posteriormente se realizó un ajuste de acuerdo con el tipo de suelo en la zona de estudio (Bradbury, et., al, 2000, Woldesenbet, et. al., 2020) siendo el tipo de suelo andosol el más predominante (**Figura 3.2**) asignándole la categoría B a aquellas áreas con este tipo de suelo⁸ y categoría A para el resto de las zonas.

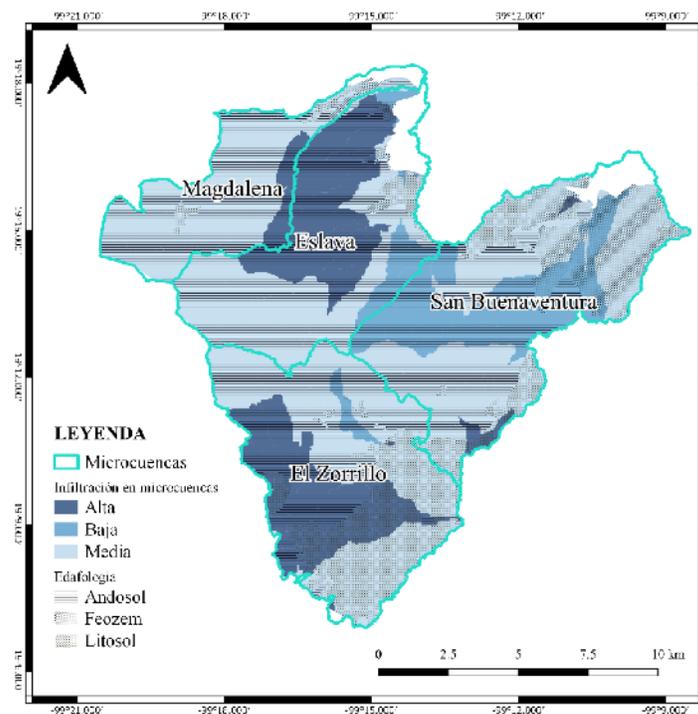


Figura 3.2. Tipo de infiltración y edafología en la zona de estudio para la determinación del grupo hidrológico
(Fuente: elaboración propia con información de PAOT, 1982 en CentroGEO, 2021)

⁸ De acuerdo con el estudio de Woldesenbet et al., (2020) se asigna la categoría B como grupo hidrológico para el tipo de suelo andosol.

Cuadro 3.3 Grupos hidrológicos del suelo (fuente: elaboración propia con información de SCS, 1964, en Bradbury et al, 2000)

Grupo hidrológico	Infiltración	Características
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/hr
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/hr
C	Lenta	Capacidad de infiltración 37-13 mm/hr
D	Muy lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/hr

1.2 Capa de coberturas que representa el uso/cobertura del suelo (LULC, land use land cover). En la **Figura 3.3** se muestran las coberturas utilizadas en los modelos con los usos de suelo/ vegetación del año 1999, 2019 y 2 escenarios 2039 tendencial (tend) y restrictivo (rest) en las 4 microcuencas proporcionados por Morales (2021) como parte del proyecto TRASSE en su tesis de maestría. Tales escenarios prospectivos al año 2039 se elaboraron mediante el método de redes neuronales⁹ y cadenas de Markov¹⁰ a partir de la dinámica de cambio de coberturas de uso de suelo y vegetación entre los años 1993-2019 a través de métodos de clasificación de imágenes de satélite del sensor Landsat en la zona de estudio (Morales, 2021). El escenario tendencial se realizó bajo las tendencias usuales de cambio de coberturas terrestres y usos de suelo (CCUS) con respecto a la superficie del año 2019; mientras que el escenario restrictivo es la proyección de CCUS donde se incluyó un índice que consideró los instrumentos de PPA como ANP, fondos concurrentes y PSA como áreas donde no podía haber cambio en sus coberturas (Morales, 2021).

Posteriormente, una vez establecido el grupo hidrológico, se procedió con la **asignación del valor de CN** en la zona de estudio de acuerdo con Bradbury et al. (2000) y las condiciones de cobertura del suelo (**Cuadro 3.4**) para los años 1999, 2019 y 2039 (tend y rest). Cabe mencionar que los valores de CN son adimensionales cuyo intervalo es de 0 a 100. Valores altos significan un mayor escurrimiento (con poca infiltración, pendientes elevadas) y valores bajos de CN refieren a altas tasas de infiltración (con poco escurrimiento superficial y erosión hídrica baja) (Barral, 2017). En la **Figura 3.4** se muestra los resultados de CN de 1999, 2019 y 2039 (tend y rest) para las 4 microcuencas.

⁹ En los últimos años el enfoque de redes neuronales artificiales (RNA) ha cobrado relevancia y es utilizado en temas de clasificación de imágenes satelitales y modelación de escenarios prospectivos (López, 2019 en Morales, 2021:21).

¹⁰ Modelo teórico considerado como un proceso estocástico temporal de tiempo discreto, es decir son procesos de corta memoria en que sólo se registra el último estado visitado para predecir el estado próximo en términos matemáticos; tal modelo ha cobrado relevancia en disciplinas como la geografía para la modelación de cambios de uso de suelo (González y Pérez de Vargas, 2009; Lara 2014; Jiménez, 2019 en Morales, 2021:32).

Cuadro 3.4 Valores de Número de curva de acuerdo con la descripción de usos de suelo y grupo hidrológico
(fuente: elaboración propia, adaptación de Bradbury et al., 2000)

Descripción de uso de suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Urbano construido	49	69	79	84
Agricultura	59	74	82	86
Bosque	45	66	77	83
Pastizal	68	79	86	89

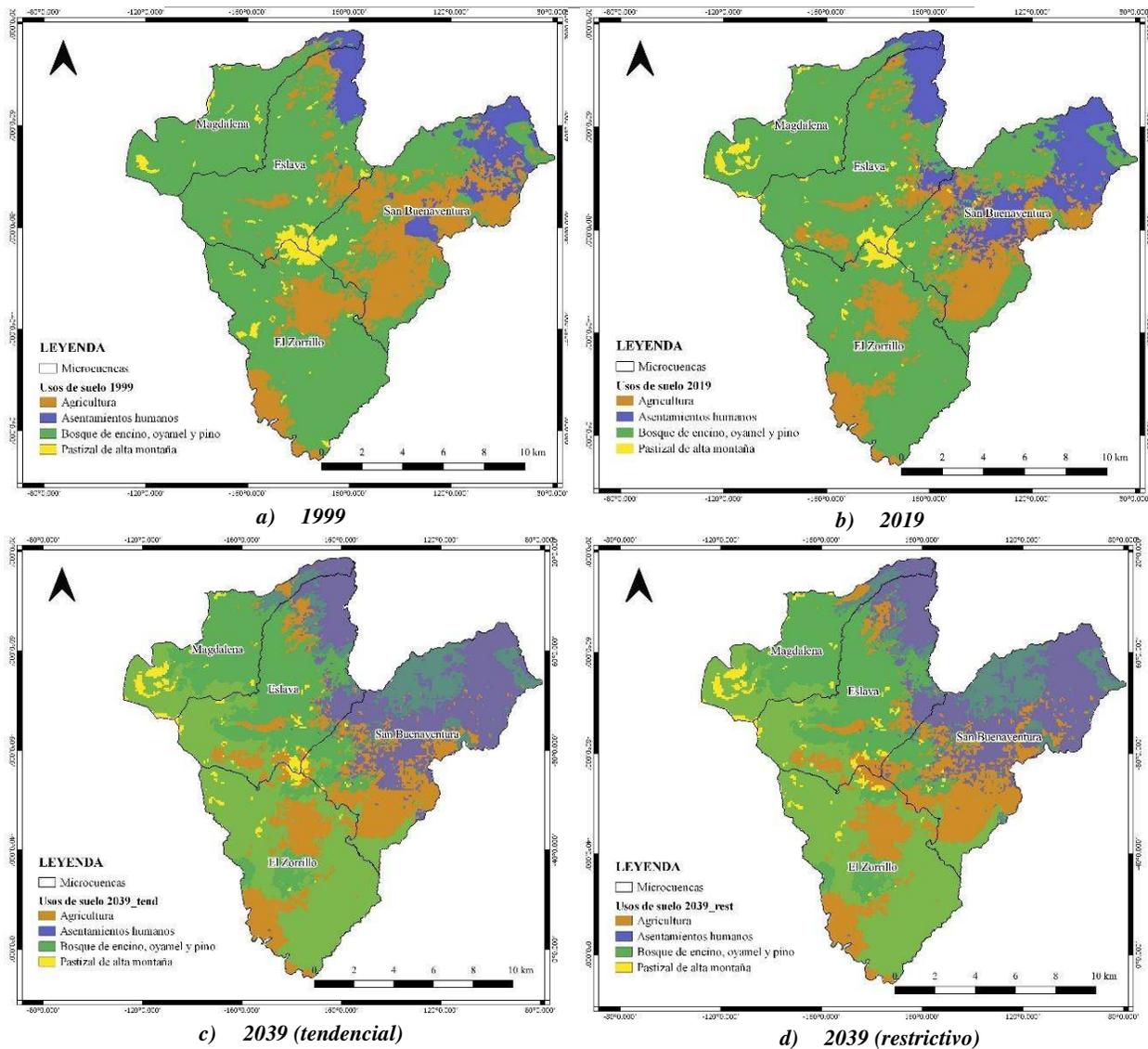


Figura 3.3. Usos de suelo en la zona de estudio, 2019 (fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021)

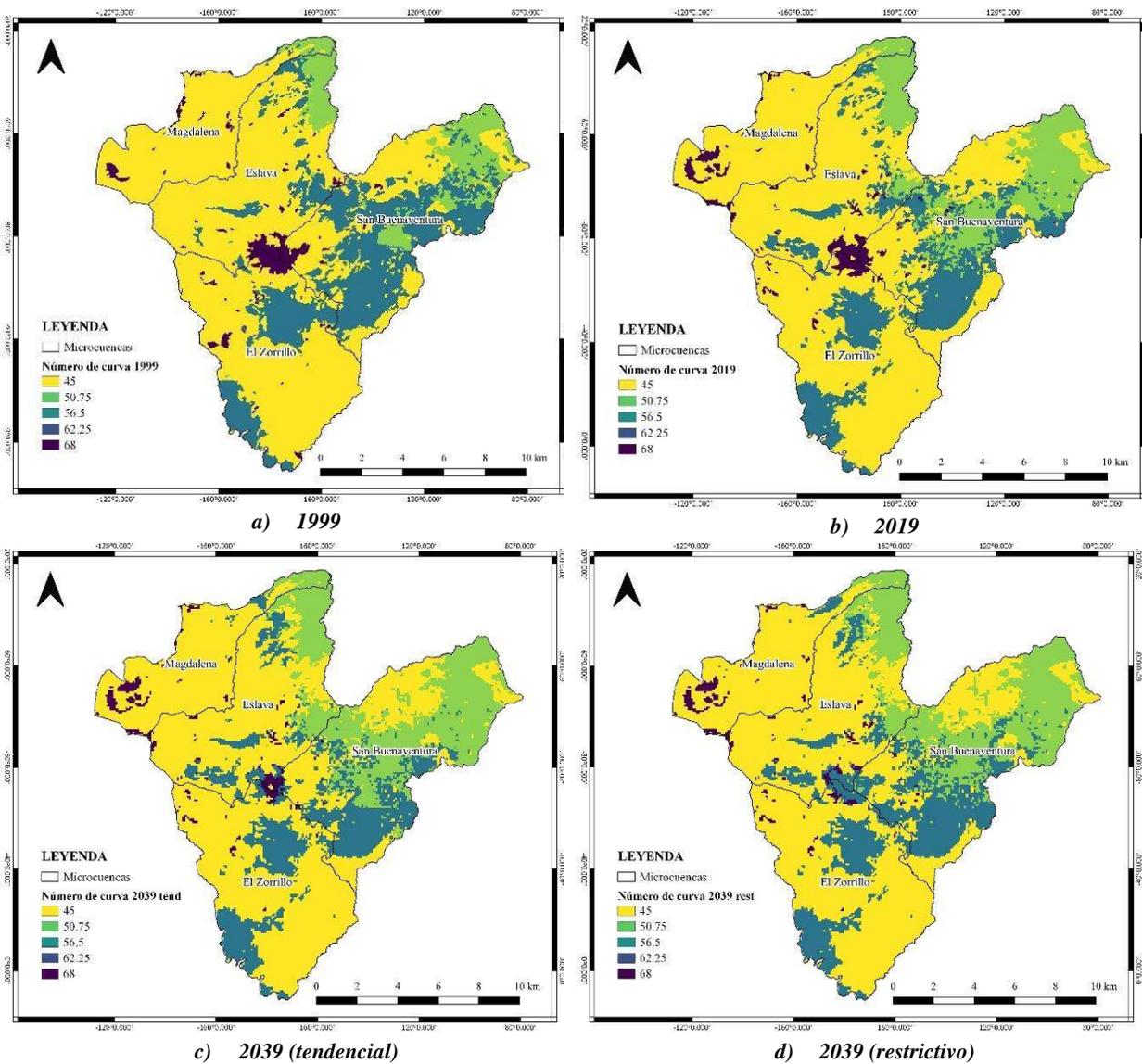


Figura 3.4. Valores de número de curva de las cuatro microcuencas 1999-2039 (Fuente: elaboración propia)

2. **Precipitación:** Para la generación de las capas ráster de precipitación de los años 1999 y 2019, se realizó minería de datos con información de 81 estaciones climatológicas de los Estados de México, Ciudad de México y Morelos (SMN, 2021) por su cercanía y área de influencia con las 4 microcuencas del SC. El análisis de precipitación se realizó en dos periodos: 1979-1998 y 1999-2017, este último periodo se extendió a 2017 ya que no se contaba con información más reciente (años 2018 y 2019). En la **Figura 3.5** se presentan las estaciones climatológicas que contaban con más del 70% de información anual en ambos periodos (**Anexo 1**, p.100 y **Anexo 2**, p.101). En el primer periodo 1979-1998, 25 estaciones fueron seleccionadas por una

representatividad de 90% del total de datos de precipitación anual. Por su parte, el segundo periodo 1999-2017, sólo 22 estaciones fueron candidatas al representar un 85% de la información total anual de precipitación ajustándose a una distribución normal. Ante la ausencia de información de algunas estaciones climatológicas, es importante hacer mención que aunque la precipitación es uno de los elementos del clima más difícil de medir con exactitud debido a las diversas condiciones en que se presenta este proceso, este conlleva a un margen de error en sus estimaciones; sin embargo, cuando se promedian los datos de varias estaciones en un área el resultado obtenido se concluye como aceptable estadísticamente (Linsley et al., 1977; Guevara, 1987; Cuadrat, 1997, en Guerra et al., 2006). En este sentido, la técnica estadística de estimación consiste en estudiar con base en datos existentes la continuidad espacial de las variables y determinar su función de correlación espacial (semivariograma) (Guerra et al., 2006). Un estimador frecuentemente utilizado como método geoestadístico en el análisis de precipitación es el método *Kriging*, cuyo objetivo es encontrar la mejor estimación posible a partir de la información disponible (Cuador, 2005, en Guerra et al., 2006). Tal método se utilizó para la generación de las capas ráster para la interpolación de los dos periodos 1979-1998 y 1999-2017 en la zona de estudio.

En la proyección a futuro 2039 que considerara cambio climático se utilizó el modelo de precipitación 2021-2040, *BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6* en la zona de estudio (**Figura 3.6**) de la plataforma *WorldClim* sitio web que reúne conjuntos de datos climáticos a nivel mundial. Tales modelos climatológicos se realizan bajo criterios que consideran el nivel de concentraciones de GEI, aerosoles, entre otras fuentes de emisión de contaminantes; y supuestos socioeconómicos denominados “Trayectorias Socioeconómicas Compartidas” (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*). La selección del modelo *BCC-CSM2-MR* fue bajo el criterio de que su elección no variaría significativamente en los resultados de acuerdo con otros modelos (Herrera et al., 2021). En cuanto al *SSP1-2.6*, éste se eligió bajo la premisa de un escenario “optimista” que representa actualmente un panorama con declive en las emisiones de CO₂ en comparación con los escenarios *SSP2-4.5* y *SSP4-6.0*, así como en comparación con los antiguos escenarios desarrollados de *RCPs* (*Representative Concentration Pathways*) (Hausfather, 2020) (**Figura 3.7**).

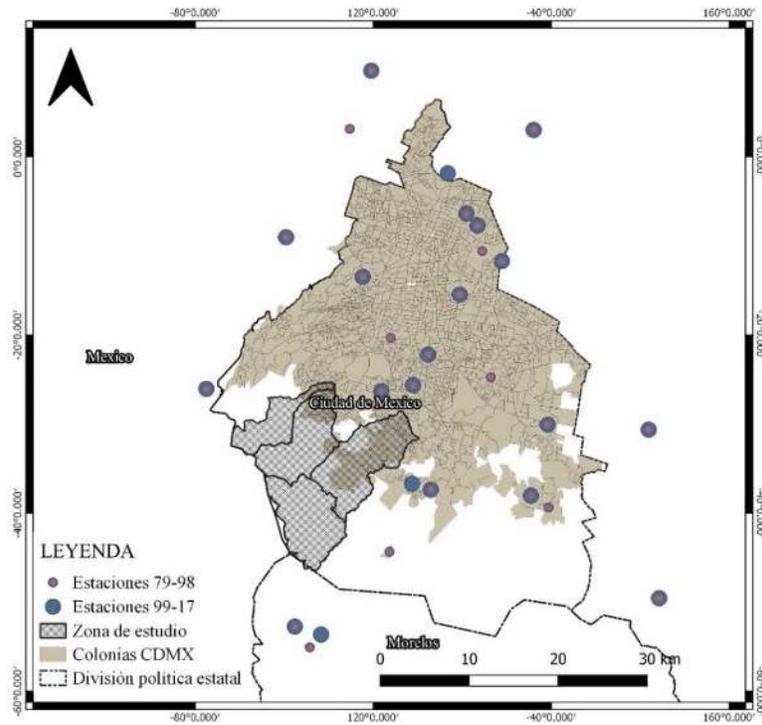


Figura 3.5. Estaciones climatológicas consideradas para la interpolación con el método Kriging, 1979-1998 y 1999-2017 (Fuente: elaboración propia con información de SMN, 2021)

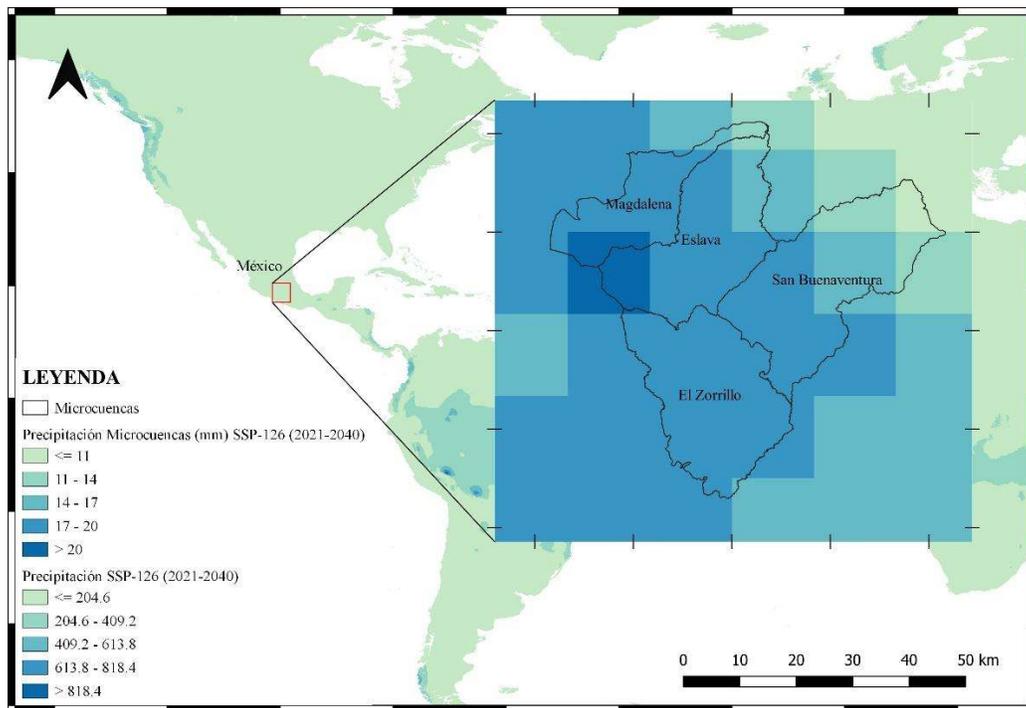


Figura 3.6. Modelo de precipitación (mm) 2021-2040, BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6 en la zona de estudio para proyección de cambio climático (fuente: elaboración propia con información de WorldClim.org)

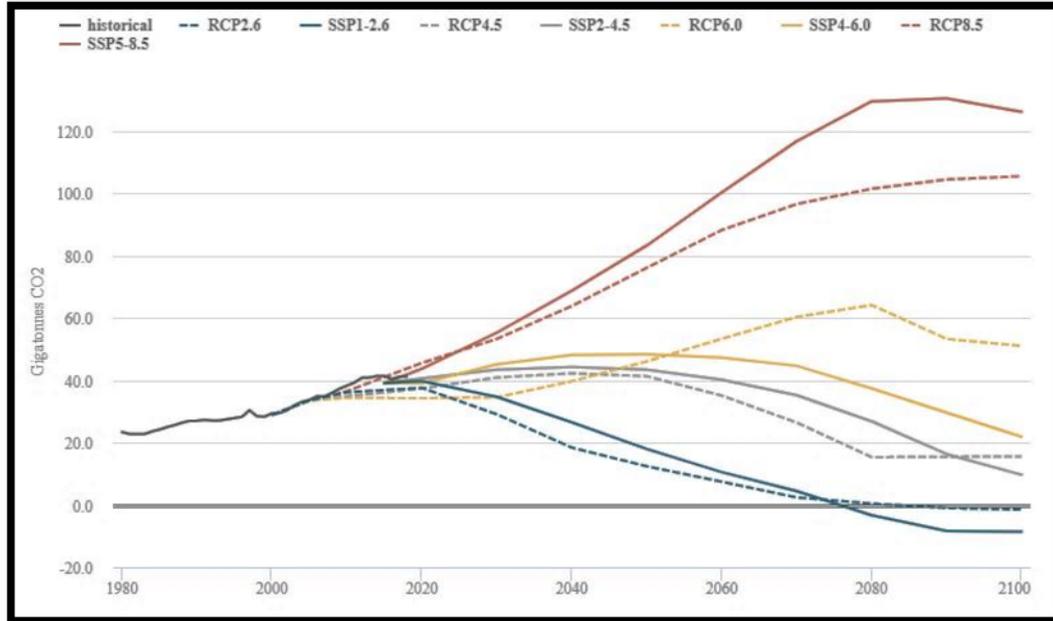


Figura 3.7. Comparación de emisiones de CO₂ según escenarios climáticos SSP y RCP, periodo 1980-2100 (Fuente: Hausfather, 2020)

3) Número de tormentas por año. Se asignó el valor de “1” con el fin de evaluar la capacidad del SSE ante una sola tormenta en particular¹¹.

Por último, con la herramienta proporcionada por ECOSER se integraron los insumos solicitados por el protocolo (**Cuadro 3.5**) para la obtención de la FE *retención de excesos de precipitación* (REP). Las capas obtenidas de REP 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo) fueron normalizadas en una escala de 1 a 100 (valores adimensionales) para el cálculo de los SEH (ver subcapítulo 3.2.3) y la posterior modelación e integración de los *beneficios ecosistémicos* en la zona de estudio (ver subcapítulo 3.2.4).

¹¹ Elección que se basa en la metodología de Villaroya et al. (2018).

Cuadro 3.5 Insumos e información base para la obtención de la función ecosistémica “retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” (Fuente: elaboración propia)

Insumo ECOSER	Información base	Referencia
1) Valores de Número de Curva	Grupo hidrológico y características	Bradbury, et., al, 2000
	Infiltración	Zonas de Alto Valor Ecosistémico por infiltración de agua en Suelo de Conservación, 2010 (CentroGEO, 2021)
	Tipo de suelo	Edafología del Suelo de Conservación CDMX, PAOT, 1982 (CentroGEO, 2021)
	Usos de suelo: 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo)	“Dinámicas perirurbanas prospectivas del cambio de coberturas del SSE del SC de la CDMX” (Morales, 2021)
2) Precipitación	Precipitación media anual periodo 1979-1999	Estaciones climatológicas (SMN, 2021)
	Precipitación media anual 1999-2017 ¹²	Estaciones climatológicas (SMN, 2021)
	Proyección de precipitación media anual 2021-2040	Proyección de precipitación: BCC-CSM2-MR13; SSP 1-2.6, (WorldClim.org)
3) Número de tormentas por año	Se asignó el valor de “1” con el fin de evaluar la capacidad del SSE ante una sola tormenta en particular.	Barral, 2017; Villarroya et al., 2018

3.2.2.3 Protección de acuíferos por cobertura vegetal

El agua subterránea es un recurso natural muy valioso y un componente esencial del ciclo hidrológico y el reservorio principal de agua dulce disponible a nivel planetario (Hatch, 2017). De acuerdo con Foster (1987), el impacto a las aguas subterráneas puede ser físico y químico. En el primer caso se pueden producir efectos barrera, impermeabilización de zonas de recarga o modificación de los flujos; para el segundo se producirán cambios en la calidad del agua por procesos naturales o por vertidos de productos potencialmente contaminantes (Foster, 1987).

Al respecto de la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación, esta puede definirse como “una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectados negativamente por un contaminante externo” (AUGE, 2004). De acuerdo con Laterra et al., (2012, en Barral, 2017:24):

“aquellas zonas donde el acuífero es muy vulnerable a la contaminación, determinados tipos de cobertura vegetal (ej. bosques o pastizales) pueden ejercer un rol importante de protección. Si bien no existen estudios locales sobre la dependencia de la calidad de agua sobre la cobertura vegetal (excepto para algunos nutrientes, Costa et al., 2002), puede asumirse que la relevancia de los ecosistemas en la

¹² Debido a la ausencia de información de la precipitación media anual del año 2019, se optó por tomar hasta el año con datos disponibles.

¹³ Las estimaciones de temperatura, máxima temperatura y precipitación son procesados por 9 modelos climáticos globales (GMSs): BCC-CSM2-MR, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, CanESM5, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L, MIROC6, MRI-ESM2-0, y por 4 Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) 1-2.6, 2-4.5, 4-6.0 and 5-8.5.

protección de la calidad del agua subterránea en un píxel depende del riesgo intrínseco del acuífero a ser contaminado.”

Aunado a lo anterior, el grado de vulnerabilidad puede ser expresado mediante índices. Entre los más utilizados se encuentra GOD (Foster, 1987) por sus siglas en inglés *groundwater confinement* (grado de confinamiento hidráulico), *overlying strata* (litología), and *depth to groundwater* (nivel piezométrico) y DRASTIC (Aller et al., 1987), siendo este último el método utilizado por ECOSER para la determinación de la *FE Protección de acuíferos por cobertura vegetal (PAC)* (*Ecuación 3*). DRASTIC es un método de uso muy difundido, tanto para la evaluación cualitativa, como para el mapeo de los SEH y se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, donde 1 indica la mínima vulnerabilidad y el 10 la máxima vulnerabilidad del acuífero. De acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC: **D** (*depth* – profundidad del nivel piezométrico), **R** (*recharge* - recarga neta), **A** (*aquifer* – litología del acuífero), **S** (*soil* – tipo de suelo), **T** (*topography* – topografía o pendiente del terreno), **I** (*impact* - litología de la zona no saturada) y **C** (*hydraulic conductivity* – conductividad hidráulica del acuífero o permeabilidad) (AUGE, 2004).

$$PAC_i = 1 - (ID_{rel_i} * P_i)$$

Ecuación 3

Donde:

PAC_i= La protección de acuíferos por cobertura en el píxel i

ID_{rel}_i= El índice DRASTIC relativizado¹⁴

P_i= Factor que refleja el rol de protección de la cobertura vegetal en el píxel i según el desarrollo de actividades productivas

Los insumos necesarios para la determinación de la *FE PAC* se describen en el **Cuadro 3.6** que fueron convertidos a formato ráster de acuerdo con el rango de valores del índice DRASTIC (**Anexo 3**, p. 102). Así mismo, dentro de la misma herramienta ECOSER de PAC se presenta una matriz de reclasificación para la obtención del factor P_i, que refleja el rol de protección de la cobertura vegetal en el píxel i en función del nivel de insumos necesarios para el desarrollo de la actividad productiva (Barral, 2017). Es decir que, el factor P_i (valores de 0 a 1) asume que un ecosistema más complejo (en términos de su funcionamiento y estructura) requiere menos insumos para llevar a cabo una actividad productiva. Cuando el factor es cercano a 1 indica que el ecosistema requiere mayor cantidad de insumos (agroquímicos, por ejemplo) para el desarrollo de las actividades; por lo tanto, si la cobertura vegetal se encuentra en píxeles muy vulnerables no ejerce ningún tipo de protección. Mientras que si el factor es cercano a 0 implica que la cobertura no requiere de insumos (potenciales contaminantes) y ejerce una fuerte protección al acuífero (Barral, 2017:27). Por tanto, la reclasificación de acuerdo con los usos de suelo en la zona de estudio se realizó como se establece en el **Cuadro 3.7** para la determinación del factor P_i.

¹⁴ Los resultados del modelo DRASTIC toman valores de 23-226, de acuerdo con el protocolo ECOSER estos deben relativizarse a valores de 0-1

Cuadro 3.6 Insumos e información base para la obtención de la función ecosistémica “protección de acuíferos por cobertura vegetal” (Fuente: elaboración propia)

Insumo	Información base	Referencia
1) Cobertura (LULC)	Usos de suelo 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo)	“Dinámicas perirurbanas prospectivas del cambio de coberturas del SSE del SC de la CDMX” (Morales, 2021)
	Profundidad del nivel piezométrico 1999 y 2019	Registro de datos piezométricos por pozo de observación. Red piezométrica (CONAGUA, 2020)
	Recarga del acuífero	Modelo hidrológico del Suelo de Conservación de la Ciudad de México (Montaño, 2020)
2) DRASTIC relativizado	Litología del acuífero	Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000, (SGM, 2017)
	Tipo de suelo	Edafología del Suelo de Conservación CDMX, PAOT, 1982 (Centro GEO, 2021)
	Pendiente del terreno	Continuo de Elevación Mexicano, CEM 3.0 (INEGI, 2013)
	Litología de la zona no saturada	Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000, (SGM, 2017)
	Permeabilidad	Zonas de Alto Valor Ecosistémico por infiltración de agua en Suelo de Conservación, 2010 (Centro GEO, 2021)

Cuadro 3.7 Valores del factor Pi asignado a cada cobertura (Fuente: Elaboración propia con información de Barral, 2017)

Cobertura	Factor Pi
Cultivo	0.95
Pastura y pastizales	0.30
Forestaciones	0.10
Humedales	No corresponde
Bajos inundables	No corresponde
Dunas	No corresponde
Urbano y periurbano	No corresponde

Las capas obtenidas de PAC 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo) fueron normalizadas en una escala de 1 a 100 (valores adimensionales) para el cálculo de los SEH (ver subcapítulo 3.2.3) y la posterior modelación e integración de los *beneficios ecosistémicos* en la zona de estudio (ver subcapítulo 3.2.4).

3.2.3 Servicios ecosistémicos hídricos de provisión y regulación en Suelo de Conservación

En el modelo conceptual adaptado en ECOSER las FE (como se dio cuenta en el capítulo metodológico de la presente tesis) se integran en SE, cuya provisión relativa se obtiene a partir de

la integración a escala de píxel de los mapas normalizados de FE que se generen mediante el uso de matrices que reflejan el nivel de aporte de las FE (bajo o máximo) a los SE (Lattera et al., 2012).

Debido a la naturaleza del presente estudio las FE de la zona de estudio *almacenamiento de carbono en biomasa* (ACOB), *retención de excesos de precipitación* (REP) y *protección de acuíferos por cobertura vegetal* (PAC) aportan diferentes condiciones biofísicas al SSE de la periferia urbana de la Ciudad de México que contribuyen en una *provisión relativa* de los SEH. Si bien, ECOSER ofrece diferentes matrices de integración de FE y SE, estas fueron realizadas para distintas ecorregiones de Argentina, Chile y Uruguay (Lattera et al., 2012) para efectos de esta investigación, se realizó una Matriz de Integración de FE relacionadas con los SEH de provisión y regulación del área de estudio mediante la aplicación de una encuesta estructurada (**Anexo 7**) en línea a 19 investigadores y tomadores de decisiones a nivel político y local que han colaborado o trabajado en temas hídricos o socioecológicos en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

El perfil de los encuestados fue interdisciplinario e intersectorial (biólogos, geógrafos, agrónomos o a fines a las ciencias ambientales) pertenecientes a diferentes instituciones gubernamentales y públicas, como la UNAM (36%), El Colegio de México (31%), CentroGeo (10%), y otros, como la Universidad de Chapingo, Universidad Iberoamericana y SEDEMA (23%). Los años de experiencia de los encuestados en temas hídricos o socioecológicos en el Suelo de Conservación de la CDMX fueron de “1 año o menos” (5%), “2-3 años” (50%) a 4 años o más (45%).

El primer acercamiento metodológico en esta etapa para la estimación de los SEH que proporcionan los FE del SSE se basó **en la identificación y propuesta de los siguientes servicios ecosistémicos hídricos de provisión:** 1) *Consumo doméstico de agua*, 2) *Uso potencial de agua para agricultura y riego*; y **de regulación:** 3) *Caudal disponible en manantiales y arroyos*, 4) *Regulación climática*, 5) *Amortiguación de inundaciones*, 6) *Calidad del agua* y 7) *Erosión hídrica y sedimentación*. Posteriormente, se les solicitó a los encuestados que asignaran de acuerdo con su conocimiento el nivel de relevancia de las FE (ACOB, REP y PAC) con cada SEH propuesto en una escala de “Poco relevante (1)”, “Relevante (2)” y “Muy relevante (3)” a escala local y regional¹⁵.

Una vez analizadas las respuestas a nivel local sobre las 3 FE ACOB, REP y PAC en relación con los SEH (**Anexo 4**, p. 103; **Anexo 5**, p. 103 y **Anexo 6**, p. 104, respectivamente) se determinó el factor numérico cuyo valor representa el aporte relativo de la FE al SEH el cual se presenta en **Cuadro 3.8**. Los valores son de 0 (aporte mínimo) a 1 (aporte máximo). Los factores resultantes se presentan en las matrices de integración de FE a SEH del área de periferia urbana de la CDMX a escala local y regional. La finalidad de las matrices radica en integrar los mapas de FE para la obtención de la provisión relativa de cada tipo de SEH (**Ecuación 4**). Es decir que, cada elemento

¹⁵ Para efectos de la presente investigación se entiende que “escala local” hace referencia a la zona suroeste del Suelo de Conservación de la Ciudad de México dentro de las alcaldías Magdalena Contreras y Tlalpan; referente a las comunidades Magdalena Atlitlic; San Nicolás Totolapan; San Andrés Totoltepec; San Miguel; Santo Tomás Ajusco y Magdalena Petlacalco y “Escala regional” a la Ciudad de México en general.

de la matriz se calcula como la combinación lineal del flujo (sumatoria) de cada FE ponderado por su aporte relativo, (factor numérico, “bj” que se muestran en el **Cuadro 3.8**) de acuerdo con cada SEH.

$$SEH_1 = \sum (bj * FE)$$

Ecuación 4

Donde:

SEH₁= Provisión relativa del servicio ecosistémico hídrico en cuestión

bj= Factor numérico que representa el aporte relativo de cada FE al SEH en cuestión

FE= Funciones ecosistémicas ACOB, REP y PAC (ver subcapítulo 3.2.2)

Cuadro 3.8 Matriz de integración de FE a SEH a nivel local del área de estudio realizado en 2021 aplicado en los años de análisis 1999-2039 (Fuente: elaboración propia)

FUNCIÓN ECOSISTÉMICA	SERVICIO ECOSISTÉMICO HÍDRICO						
	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
Almacenamiento orgánico en biomasa	0.61	0.84	0.68	0.95	0.74	0.75	0.75
Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal	0.81	0.75	0.91	0.70	1.00	0.65	0.89
Protección de acuíferos por cobertura vegetal	0.88	0.70	0.96	0.72	0.67	1.00	0.91

Cuadro 3.9 Matriz de integración de FE a SEH a nivel regional de la CDMX (Fuente: elaboración propia)

FUNCIÓN ECOSISTÉMICA	SERVICIO ECOSISTÉMICO HÍDRICO						
	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
Almacenamiento orgánico en biomasa	0.58	0.88	0.42	0.97	0.79	0.67	0.48
Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal	0.84	0.54	0.89	0.76	0.84	0.71	0.42
Protección de acuíferos por cobertura vegetal	0.92	0.76	0.92	0.67	0.52	1.00	0.37

Con la metodología descrita, por tanto, se obtuvieron 7 capas de SEH correspondientes a los SEH de provisión y regulación por cada año de análisis 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo) de: 1) *Consumo doméstico de agua*, 2) *Uso potencial de agua para agricultura y riego*; 3) *Caudal disponible en manantiales y arroyos*, 4) *Regulación climática*, 5) *Amortiguación de inundaciones*, 6) *Calidad del agua* y 7) *Erosión hídrica y sedimentación* dando un total de 21 capas ráster que posteriormente fueron de utilidad para cálculo de beneficios de SEH a la población local (ver subcapítulo 3.2.4).

3.2.4 Beneficios de los Servicios Ecosistémicos Hídricos a la población local

Como cita Caro et al. (2015:), la MEA en su definición de los SE precisa que estos “son los beneficios directos e indirectos que la humanidad recibe de la biodiversidad”. En este estudio se hace un análisis sobre los conceptos de los SE en donde varios autores —en lo que respecta al entendimiento de *los beneficios* como elemento central— argumentan que “los servicios de los ecosistemas no son los beneficios humanos obtenidos de los ecosistemas, son los componentes ecológicos directamente consumidos o disfrutados para producir bienestar humano”; o “la generalización del flujo de materiales, energía e información del capital natural que se combina con el capital humano o manufacturado para el bien humano”; o “como aquel resultado de una función de las interacciones complejas entre éstas y su entorno abiótico, al uso y aprovechamiento de estos patrones complejos y a las diversas percepciones de los beneficiarios” (Boyd et al., 2007; Constanza et al., 1997; Fisher et al., 2009 en Caro et al., 2015).

Así mismo, la representación del rango temporal y espacial de la provisión de los SE dentro de los sistemas socioecológicos permite diferenciar entre los tipos de beneficiarios [indirectos o directos] y la posibilidad de influir en las decisiones relacionadas con el manejo, uso y aprovechamiento de los SE (Jorda et al., 2017, en Cerón et al., 2019). En este sentido, los autores de ECOSER, bajo el marco conceptual de MEA (2005), definen los beneficios como “la fracción del flujo de SE que es capturado o transformado para el bienestar de la población local”. Tales beneficios pueden representar una oferta distinta según la propagación espacial de los SE, su acceso, la cantidad de este o si son beneficiarios directos o indirectos quienes los reciben (Lattera et al., 2012).

El cálculo de los beneficios (*Ecuación 5*) de acuerdo con el protocolo ECOSER se realizó para cada SE considerando sólo a los beneficiarios directos. En este caso se obtuvieron los beneficios de los SEH de los años 1999, 2019 y 2039 con el procedimiento explicado en la sección anterior para las comunidades que radican en las 4 microcuencas. La propuesta de ECOSER asume que “un beneficiario tendrá más posibilidad de capturar un SE cuanto más cerca esté del área de provisión de este, por lo tanto, la *captura* se estima mediante el siguiente índice (Lattera et al., 2012).

$$CapB = \frac{\text{distribución de la población}}{PT}$$

Ecuación 5

Donde:

CapB= Se refiere a la captura de beneficios de los servicios ecosistémicos

Distribución de la población= Se refiere a la interpolación dentro del área de estudio

PT= Población total dentro de la zona de estudio

Donde distribución de la población es una interpolación de los beneficiarios hacia toda el área de estudio en el que se emplea el método de interpolación de distancia inversa, IDW; es decir a todo el territorio de análisis. Desafortunadamente la información sobre el número de población de las comunidades que habitan en el Suelo de Conservación y específicamente en el área de estudio presentaron discrepancias entre dos fuentes de información que se consultaron 1) el Censo de Población de INEGI (2021), y 2) la base de datos de consumo de agua que incluía información sobre la población por parte de SEDUVI, 2010 en la zona de estudio. La primer fuente fue descartada para el análisis de la captura de beneficios debido a que, aunque los datos de población reportados por INEGI (2021) fueron normalizados para la interpolación, los 118 puntos (referentes a localidades urbanas y rurales) dentro de los polígonos de las 4 microcuencas de estudio en la periferia del SC, mostró que el 83.3% de ellos se encuentran en un rango entre 1 – 822 habitantes, el 11.1% entre 822 – 37,282 y el 5.6% representa únicamente a la alcaldía de la Magdalena Contreras con 246,428 habitantes (**Figura 3.8**). En contraste, la segunda fuente consultada fueron los datos de población en la base de datos de consumo de agua (SEDUVI, 2010) y así mismo, la fuente utilizada para el análisis sobre la captura de beneficios puesto que presenta un comportamiento de distribución poblacional más normalizado con respecto a la fuente de INEGI (**Figura 3.8**). Por lo tanto, se comprende que hay cierto nivel de incertidumbre con respecto a los resultados en la captura de beneficios dadas las fuentes de información sobre el número de población en la zona de estudio.

Por último, en cuanto a la estimación de la captura de beneficios, la distribución poblacional fue dividida entre el total de habitantes dentro del área de las 4 microcuencas de estudio (n= 250,616). Así mismo, es de mencionar que los SEH de regulación generalmente presentarán una propagación direccional¹⁶ al estar determinados por la topografía de la zona de estudio, (**Figura 3.8**) (Latterra et al., 2012) que, al tratarse de recursos hídricos por gravedad, descienden en dirección de la pendiente.

¹⁶ De acuerdo con los 4 patrones de propagación espacial de los SE identificados por Fisher et al., 2009 en Latterra et al., 2012: *Sin propagación*: el SE se genera y se captura en el mismo sitio. *Propagación omnidireccional*: el SE se genera en determinado sitio y se propaga sin sesgo direccional, la captura puede ocurrir en cualquier sitio. *Propagación direccional*: el SE se genera en un área y se propaga con una dirección generalmente determinada por la topografía.

Posteriormente, los beneficios fueron calculados para los 7 SEH (*Ecuación 6*) y por año de análisis 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo)¹⁷ en donde se asumió la misma captura en dichos años mediante la siguiente ecuación modificada de SE a SEH en Larterra et al., 2015:

$$\text{Beneficio} = \text{SEH} * \text{capB}$$

Ecuación 6

Donde:

Beneficio = Se refiere a los beneficios de los servicios ecosistémicos hídricos

SEH = Mapas normalizados de los servicios ecosistémicos hídricos

capB= Capa de captura de beneficios previamente calculada en la ecuación 5

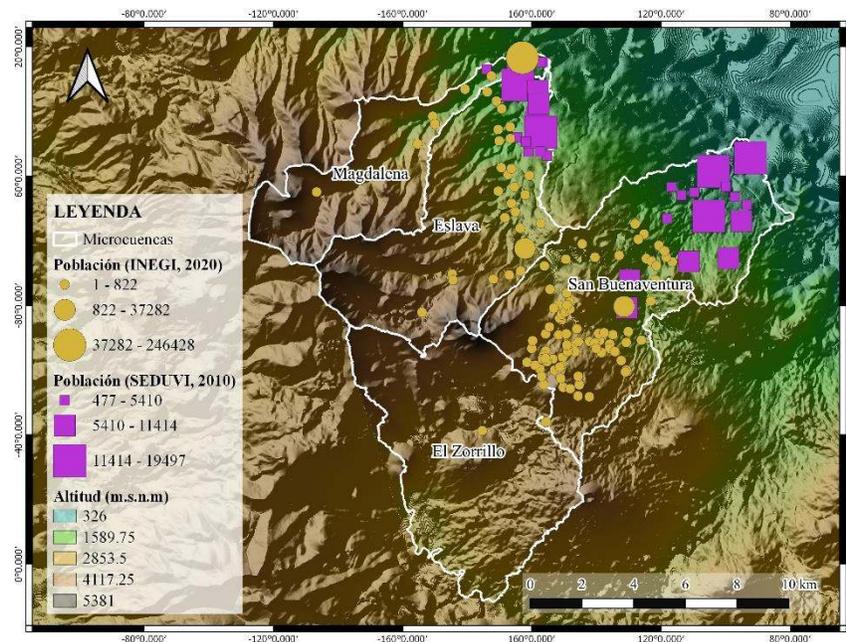


Figura 3.8. Topografía en la zona de estudio y población en la zona de estudio (fuente: elaboración propia información de INEGI, 2021 y SEDUVI, 2010)

¹⁷ En futuras modificaciones a la presente metodología se planea obtener una estimación poblacional para los años 1999 y 2039.

3.3 Módulo 2 de ECOSER: Exposición, Sensibilidad, Capacidad Adaptativa e Inequidad del SSE de Periferia Urbana

3.3.1 Cálculo de exposición

La exposición se refiere a eventos catastróficos que tienen una frecuencia, duración y magnitud; suceden en un contexto biogeofísico dado en una población con una capacidad de mitigación definida (Balvanera et al., 2017).

Debido a que la vulnerabilidad se analiza con base en dos momentos: un escenario actual y un escenario proyectado de acuerdo con los datos de Morales (2021) sobre cambio de coberturas terrestres y usos de suelo (CCUS) (ver subcapítulo 3.2.2.2; sección 1.2). El escenario tendencial hace referencia a las tendencias usuales de CCUS con respecto a la superficie del año 2019; mientras que el escenario restrictivo es la proyección de CCUS que considera los instrumentos de PPA (ANP, fondos concurrentes y PSA) como áreas donde no podía haber cambio en sus coberturas (Morales, 2021). En este sentido, para el cálculo de la exposición fue necesario comprender cómo el SSE cambiaría de un escenario actual a uno futuro 2039 (Lattera et al., 2015). ECOSER propone para el cálculo de exposición considerar que estos cambios son producto de la presión provocada por los factores naturales y antrópicos reflejados en el uso del suelo a escala regional o local, mediante el análisis de las tendencias (Lattera et al., 2015). Por lo tanto, en esta sección se aplicó el cálculo de la tasa de CCUS de Morales (2021) en los periodos 1999-2019, 2019-2039 (con escenario tendencial) y 2019-2039 (con escenario restrictivo).

La ecuación utilizada para el cálculo de la tasa anual de cambio fue la siguiente:

$$Tasa\ de\ cambio = \left(\left(\left(\frac{S2}{S1} \right) \left(\frac{1}{t} \right) \right) * 100 \right) - 100$$

Ecuación 7

Donde:

Tasa de cambio: Tasa anual de cambio de usos de suelo

S1= Usos de suelo en el tiempo inicial (superficie m²)

S2 =Usos de suelo en el tiempo final (superficie m²)

t = Tiempo transcurrido entre fechas (años)

3.3.2 Cálculo de sensibilidad

De acuerdo con Balvanera et al. (2017), la sensibilidad mide cómo las condiciones socioecológicas existentes les permiten a los individuos o a las comunidades absorber cambios generados por eventos catastróficos; por lo que el concepto de sensibilidad se acerca a lo que se conoce como vulnerabilidad social. En el caso del protocolo ECOSER, en el cálculo de sensibilidad se consideran dos grupos de personas: los beneficiarios directos¹⁸ y los beneficiarios indirectos¹⁹

¹⁸ Los que capturan los beneficios de forma directa sin mediar circuitos económicos (i.e., consumo local), (Lattera et al., 2015).

¹⁹ Mediante circuitos económicos capturan una fracción de valor proveniente de los SE, (Lattera et al., 2015).

de los SE, ya que ambos grupos contribuyen en la generación de redes y cadenas de valor que se manifiestan en el desarrollo local de casa SSE (Laterra et al., 2015).

Dentro de la *Ecuación 8* que ofrece ECOSER para la determinación de la sensibilidad se plantea comprender cuál es el cambio marginal en los *beneficios* como consecuencia del cambio de escenarios entre un tiempo determinado y otro; que así mismo considere la relación entre el vínculo de los SE con el bienestar humano (Laterra et al., 2015).

$$S_i = cb_i * (B_{1i} - B_{2i}) * W_i$$

Ecuación 8

Donde:

S_i = La sensibilidad del sistema socioecológico

cb_i = Medida adimensional dentro del rango de 0 – 0.5 que expresa el valor ordinal del vínculo entre un SE y el bienestar humano.

B_{1i} = Beneficio del SE en el tiempo 1

B_{2i} = Beneficio del SE en el tiempo 2

W_i = Factor dentro del rango 1 – 3 que representa la contribución de un SE al desarrollo local a través de los beneficiarios indirectos. Un valor bajo (1) representa una cadena de valor de amplitud baja donde se articulan un bajo número de actores y sectores, i.e. productos forestales no maderables. El valor medio (2) representa una cadena de valor de amplitud media con una menor articulación en el número de actores y sectores, i.e. provisión de madera y mercado de leña. El valor alto (3) representa una cadena de valor amplia con muchos actores involucrados, i.e. oportunidades de recreación y turismo o provisión de agua.

Para el caso de estudio del SSE de la periferia urbana de la Ciudad de México los valores ordinales propuestos de los vínculos entre un SEH y el bienestar humano se observan en el **Cuadro 3.10**. El criterio de selección de los valores ordinales se basó en la características y numeración asignada por la MEA (2005) sobre los SE de provisión y regulación. En el caso del factor de contribución al desarrollo local (W_i), se asignó el valor numérico de 3 por la naturaleza misma de los SEH de provisión y regulación que generan una cadena de valor amplia que articula a varios actores y sectores en la Ciudad de México. Por último, los periodos de tiempo establecidos para la estimación de la sensibilidad fueron los beneficios de los SEH entre 1999 – 2019, 2019 – 2039 (tendencial) y 2019 – 2039 (restrictivo) y se obtuvo un promedio de los mapas de sensibilidad de los 7 SEH para obtener un mapa de la sensibilidad general del SSE de la zona de estudio.

Cuadro 3.10 Matriz de relación entre SEH y bienestar humano del SSE de la periferia urbana de la Ciudad de México (fuente: elaboración propia)

Servicio Ecosistémico Hídrico	Intensidad del vínculo entre el SE y el bienestar humano					Promedio normalizado (0 - 0.5)
	Seguridad	Materiales Básicos	Salud	Buenas relaciones sociales	Promedio	
Consumo doméstico	3	3	3	1	2.5	0.4
Uso potencial de agua para agricultura/riego	3	3	1	1	2	0.3
Caudal disponible	3	3	3	2	2.75	0.5
Regulación climática	3	3	3	1	2.5	0.4
Amortiguación de inundaciones	3	3	3	1	2.5	0.4
Calidad del agua	3	3	3	2	2.75	0.5
Erosión hídrica y sedimentación	3	2	1	1	1.75	0.3

3.3.3 Cálculo de capacidad adaptativa

Dentro del contexto de ECOSER el cálculo de la capacidad adaptativa se propone mediante una serie de componentes que dan cuenta de la habilidad del SSE para sostener su identidad. En este sentido, de acuerdo con Castillo et al., (2015) dentro de un sistema socioecológico la parte del subsistema social está conformado por comportamientos e ideas que incluyen a las instituciones políticas, económicas, sociales y a la tecnología. Así mismo, las ideas incluyen los valores, conocimiento, ideología, espiritualidad, artes y cultura hacia el sistema socioecológico. De acuerdo con los autores del protocolo, tales componentes dan estructura y son funciones esenciales que pueden hacer frente a distintas alteraciones del SSE; para ello dentro del protocolo ECOSER en el cálculo de la capacidad adaptativa son agrupados los elementos del subsistema social en tres factores: *factor económico*, *factor institucional* y el *factor social* (Latterra et al., 2015); la adaptación del protocolo ECOSER para la zona de estudio en cuanto a la capacidad adaptativa incluyó un cuarto factor, denominado *hídrico (Ecuación 9)* el cual como se describirá en su apartado metodológico buscó reflejar la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos en la periferia urbana de la CDMX. Cada factor se maneja en una escala de 0 – 50; para el cálculo final se suman y se promedian entre el número de factores.

$$CA_i = (Feco + Finst + Fsoc + (Fhid))$$

Ecuación 9

Donde:

CA_i = La capacidad adaptativa del SSE.

Feco = Representa la capacidad económica del SSE de sustituir o remplazar el SE afectado.

Finst = Representa la capacidad instalada en los gobiernos para la conservación, adaptación y mitigación de los impactos en el SSE mediante leyes, políticas, planes, programas o proyectos.

Fsoc = Representa el nivel de organización social que permite enfrentar, aminorar o prevenir los posibles daños que se presenten en el SSE.

Fhid = Propuesta para la zona de estudio que buscó representar la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos entre la periferia urbana y la Ciudad de México.

A continuación, se describe la información considerada para la estimación de la capacidad adaptativa del SSE de periferia urbana de la Ciudad de México que considera las políticas públicas ambientales en el SC para la conservación de los recursos forestales y la metodología para el desarrollo de cada factor tanto económico, institucional, social e hídrico en la zona de estudio.

3.3.3.1 Factor económico

En el caso de estudio de la periferia urbana de la Ciudad de México para el factor económico fueron considerados los ingresos que reciben las delegaciones de Tlalpan, La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos (sobre las que subyacen las 4 microcuencas de estudio) por parte de los programas federales y estatales que buscan incentivar la conservación ambiental en las zonas forestales del país y específicamente en la subsistencia del Suelo de Conservación. Si bien, los servicios ecosistémicos hídricos se consideran servicios insustituibles por su naturaleza, el fin de este factor económico radica en garantizar la recarga de agua en las partes altas de las cuencas hidrográficas y al mismo tiempo contribuir al mejoramiento en la calidad de vida de las personas mediante el esquema de pago directamente a los propietarios de bosques (los cuales en su mayoría son de comunidades y ejidos); así mismo, con esta modalidad “*se busca combatir la problemática — aunque compleja — de la deforestación y la pobreza rural en estos territorios*” (Perevochtchikova, 2017:).

La información de referencia sobre los programas tal como el de *Pago por Servicios Ambientales* (PSA), *Bono de Carbono Forestal CDMX*, de *Compensación Ambiental*, etc., que competen a la zona de estudio, así como las dependencias gubernamentales que los financian (*Cuadro 3.11*) así como su base de datos proporcionada por Moreno y Perevochtchikova (2021) como parte de su investigación sobre *Gobernanza ambiental adaptativa en el SC de la CDMX* en relación con el proyecto TRASSE y la zona de estudio.

Cuadro 3.11 Programas de conservación forestal en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)

PROGRAMA	DEPENDENCIA
Bonos de Carbono Forestal CDMX	Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)
Compensación ambiental	Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
Mecanismos específicos para prevención, control y combate de contingencias ambientales causadas por plagas e incendios forestales	Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
Programa de Retribución por la Conservación de Servicios Ambientales PRCSA	Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)
Programa de Fondos de Apoyo para la Conservación y Restauración de los Ecosistemas a través de la Participación Social PROFACE	Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)
PRONAFOR	Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
Proyecto piloto	Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)
PSA	Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)
PSAZC	Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA)

El registro total anual (2001 – 2018) de los montos de los programas con esquemas de pago se presentan en la *Figura 3.9.* de las delegaciones Tlalpan, La Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos que subyacen en las 4 microcuencas de estudio. La delegación de Tlalpan es la que mayor cantidad de subsidios recibe cada año debido a su gran extensión territorial denominada de conservación. Por ejemplo, en 2018 el monto total recibido de los programas mediante esquema de pago fue de \$37,921,198.99 MXN) seguido por la delegación de la Magdalena Contreras (\$14,733,673.14 MXN), Cuajimalpa de Morelos (\$14,733,673.14 MXN) y Álvaro Obregón (\$3,155,689.6 MXN).

Aunado a lo anterior, la asignación del factor económico se basó en los montos totales registrados entre el periodo 2001-2018 dentro del área de estudio donde se tomó como referencia el monto total mínimo de pago (\$0.0 MXN en 2003 y 2005 para las delegaciones Álvaro Obregón y Cuajimalpa de Morelos, respectivamente) y el monto de pago total máximo recibido (\$51,610,479.08 MXN en 2017 para la delegación Tlalpan). Los valores fueron agrupados en categorías ordinales de 1 a 5, siendo “1” el rango de menores ingresos por año y la categoría “5” el rango que representó el mayor aporte económico en el periodo (*Cuadro 3.12*). Los montos de subsidios de las delegaciones mencionadas del año 2018 fueron clasificados de acuerdo con las categorías asignadas. Por último, los valores ordinales fueron multiplicados por 10 para el manejo de valores en formato ráster de acuerdo con la escala del protocolo ECOSER de los factores que componen la capacidad adaptativa (escala 0 – 50) (*Cuadro 3.13*).

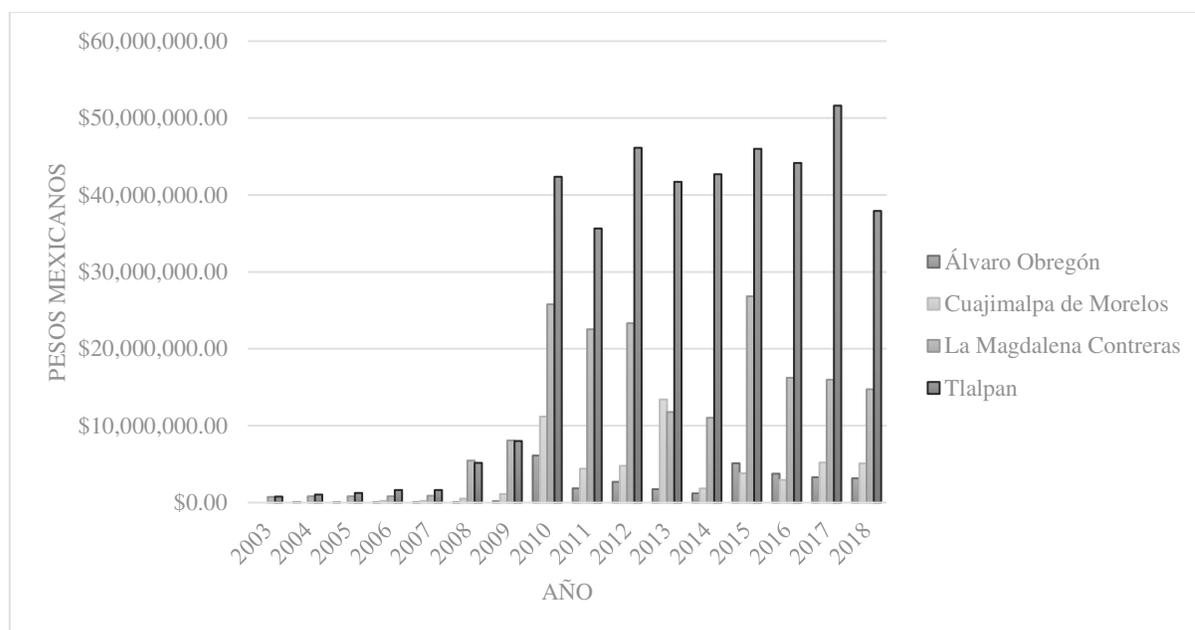


Figura 3.9. Registro total anual de los montos de los programas con esquemas de pago en las delegaciones que competen al área de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)

Cuadro 3.12 Categorías de acuerdo con los valores mínimos y máximos de los subsidios registrados entre 2001-2018 (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)

Categoría	Valor min	Valor máx
1	\$ -	\$ 10,322,095.82
2	\$ 10,322,095.72	\$ 20,644,191.63
3	\$ 20,644,191.53	\$ 30,966,287.45
4	\$ 30,966,287.35	\$ 41,288,383.26
5	\$ 41,288,383.16	\$ 51,610,479.08

Cuadro 3.13 Categoría del factor económico en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Moreno y Perevochtchikova, 2021)

Delegación	Subsidio total 2018	Categoría	Categoría ECOSER
Álvaro Obregón	\$ 3,155,689.60	1	10
Cuajimalpa de Morelos	\$ 5,089,795.08	1	10
La Magdalena Contreras	\$ 14,733,673.14	2	20
Tlalpan	\$ 37,921,198.99	4	40

3.3.3.2 Factor institucional

El factor institucional de acuerdo con el protocolo ECOSER, “representa la capacidad instalada en los gobiernos para la conservación, adaptación y mitigación de los impactos en el SSE mediante leyes, políticas, planes, programas o proyectos” (Latterra et al., 2015:33). En el caso de estudio de la periferia urbana de la Ciudad de México, es la conservación de la cobertura forestal en porciones representativas la que promueve las condiciones para la adaptabilidad del sistema a largo plazo ante el cambio climático mediante la reducción de sus efectos negativos sobre la provisión y regulación de los SEH (Perevochtchikova et al., 2010; CONAFOR, 2010). Aunado a lo anterior, el factor institucional que se consideró para la presente investigación se relaciona con el compromiso gubernamental en el ámbito terrestre hacia áreas denominadas protegidas y de conservación en la zona de estudio; si bien, en el factor económico se consideraron los subsidios, en este caso, el factor institucional considera el porcentaje de suelo protegido dentro del área de las 4 microcuencas de estudio.

La metodología consistió en la unión de la información espacial de los polígonos pertenecientes a los programas de conservación en la zona de estudio como son:

- 1) *Áreas Naturales Protegidas (ANP)*, programa de carácter federal que administra la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, (CONANP, 2021);
- 2) *Pago por Servicios Ambientales (PSA)*, creado como un incentivo económico en 2003 por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) con la finalidad de compensar a los dueños de terrenos forestales por los costos de conservación “renunciando a menudo a otras formas de uso de suelo económicamente más atractivas” (Perevochtchikova, 2016);
- 3) *Reserva Ecológica Comunitaria (REC)*, son las ANP que le competen a la Ciudad de México “establecidas por pueblos, comunidades y ejidos en terrenos de su propiedad destinadas a la preservación, protección y restauración de la biodiversidad y del equilibrio ecológico, sin que se modifique el régimen de propiedad” (PAOT, 2005).

Aunado a lo anterior, se calculó el área total protegida y de conservación dentro de las 4 microcuencas, es decir que de 206.62 Km² que es la extensión que abarcan los polígonos de las microcuencas de estudio, 119.33 Km² o el 57.75% están destinadas a la conservación (**Figura 3.10**). Posteriormente se estableció una categoría ordinal que representara el nivel de cobertura como un indicador de la capacidad adaptativa del sistema respetando la escala ECOSER (**Cuadro 3.14**), en donde la conservación de porciones representativas y en este caso de cobertura forestal, promueven las condiciones de adaptación a largo plazo ante el cambio climático reduciendo sus efectos negativos en la provisión y regulación de los SEH.

Cuadro 3.14 Categoría del factor institucional en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia)

Categoría de cobertura	Porcentaje de cobertura (%)	Valor ECOSER
Nula	0 – 25	12.5
Baja	26 – 50	25
Media	51 – 75	37.5
Alta	76 – 100	50

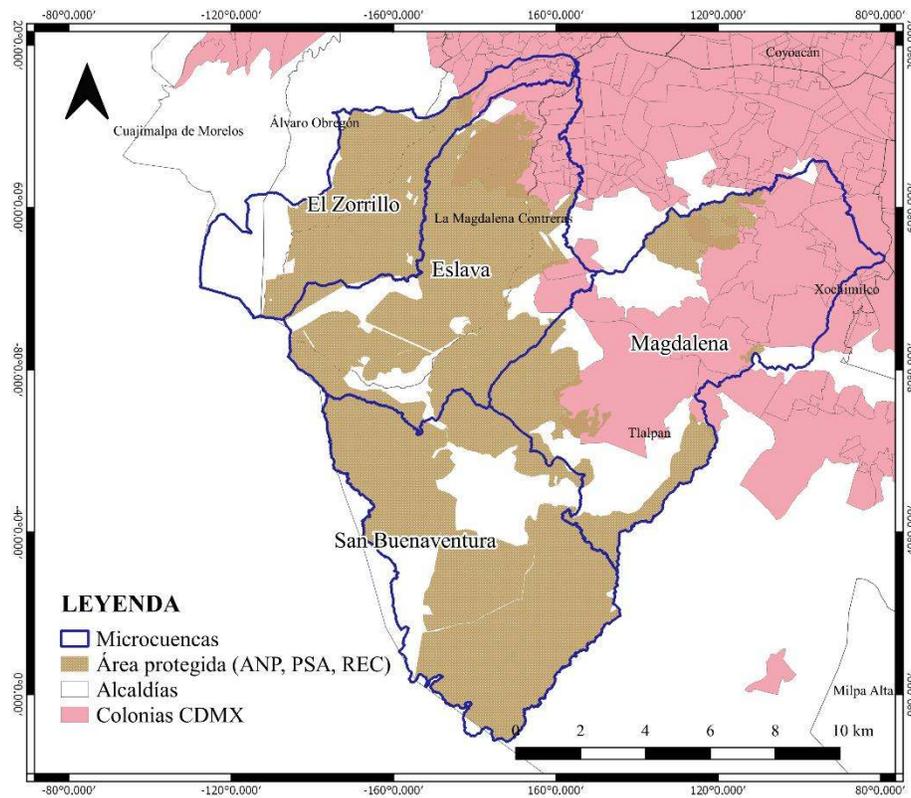


Figura 3.10. Polígonos con las áreas destinadas a la conservación de acuerdo con los programas de ANP, PSA y REC (Fuente: elaboración propia con información de PAOT, 2005; Perevochtchikova, 2016 y CONANP, 2021)

3.3.3.3 Factor social

De acuerdo con Laterra et al., 2015:33, el factor social hace referencia al “nivel de organización social que permite enfrentar, aminorar o prevenir los posibles daños que se presenten en el sistema socioecológico producto de cambios en la provisión de SE”. En el caso de estudio de la Ciudad de México, específicamente en el Suelo de Conservación parte de las responsabilidades que son

adquiridas por las comunidades al estar inscritas en los programas de incentivos y subsidios gubernamentales de carácter ambiental, es la constitución de brigadas de trabajo aprobadas por una Asamblea General²⁰ para la realización de labores que incluyen el monitoreo del patrimonio natural y cultural, saneamiento y conservación de los recursos naturales (combate de incendios o reforestación) (Santiago, 2019:109).

“La participación de estos núcleos agrarios [En SC de la CDMX] en los programas gubernamentales de conservación ambiental obedece a un interés genuino por conservar sus territorios naturales. Esto se debe al arraigo cultural que le tienen a la naturaleza, la cual es percibida como fuente divina de recursos y servicios ecosistémicos, a la que se le debe respetar y cuidar (M. Reyes, comunicación personal, 11/03/2019 en Santiago, 2019).”

Con lo anterior descrito, la metodología para la definición de los valores que constituirían el factor social del presente trabajo se basó en la estimación del número de brigadas de trabajo “permitidas” en la superficie que compete a las 4 microcuencas. De acuerdo con Santiago (2019), según los lineamientos del programa Altepetl en sus reglas de operación se indica que se autoriza una brigada (compuesta por hasta 10 participantes y jefe de cuadrilla) por cada 500 hectáreas de superficie forestal. Por lo tanto, de la capa de usos de suelo del año 2019 (**Figura 3.11**) (Morales, 2021) se determinó la superficie forestal y el número aproximado de brigadas que corresponderían a cada microcuenca el cual se resume en el **Cuadro 3.15**.

Cuadro 3.15 Superficie forestal para la estimación del factor social a partir del número de brigadas en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021 y Santiago, 2019)

Microcuenca	Superficie total (Ha)	Superficie forestal (Ha) 2019	No. brigadas aprox.	Valor ECOSER
San Buenaventura	6578.65	2550.32	5	28
El Zorrillo	5776.92	4411.00	9	50
Eslava	5251.62	3732.42	7	39
Magdalena	3054.85	2670.87	5	28
Total	20662.04	13364.63	26	-

²⁰ Máxima autoridad en cada comunidad y ejido. Está conformada por comuneros y/o ejidatarios titulares para la toma de decisiones sobre aspectos relevantes a su comunidad o ejido (Perevochtchikova, 2016; Rojo Negrete, 2018 en Santiago, 2019).

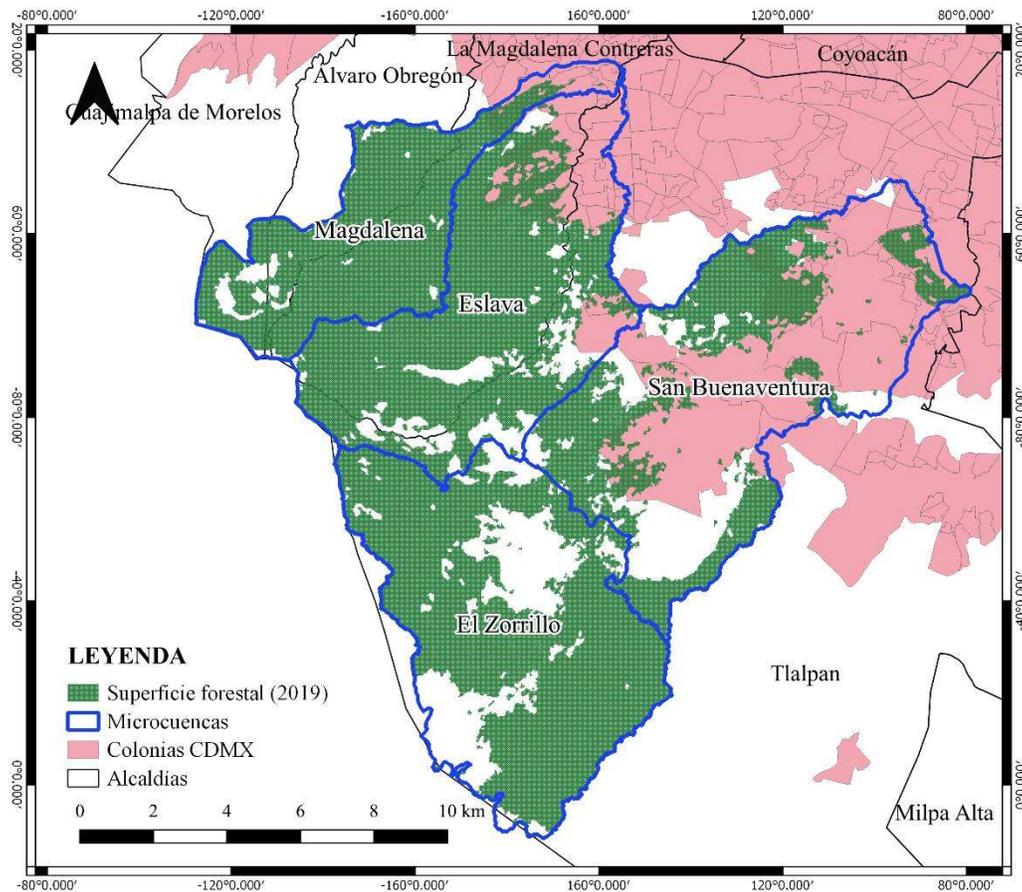


Figura 3.11. Superficie forestal para la estimación del factor social mediante brigadas forestales en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia con datos de Morales, 2021)

3.3.3.4 Factor hídrico

El desarrollo de las sociedades no implica que su cercanía, disponibilidad o abundancia con el agua se relacione directamente con el bienestar social, ya que en su repartición las condiciones de infraestructura, capacidad de gestión de los organismos encargados, las condiciones políticas y económicas, son relevantes (Ramos y Perevochtchikova, 2020; Solís, 2010; Rolland y Vega, 2010). En este sentido, la situación del uso del agua en la Ciudad de México indica que sus fuentes y áreas de abastecimiento en comparación con las zonas de consumo no son las mismas, particularmente en las alcaldías donde se ubica el Suelo de Conservación. De acuerdo con Ramos y Perevochtchikova (2020) sobre su análisis de cinco sistemas de abasto de agua en la CDMX (Sur, Oriente, Centro, Poniente/Manantiales y Norte) dan cuenta de la cantidad de agua que se utiliza y proporciona por las alcaldías que conforman tales sistemas de abasto y en su trabajo se reconoce la importancia del Sistema Sur (Milpa Alta, Tláhuac y Xochimilco) como un área que aporta grandes caudales de agua, pero cuyo consumo es el más bajo de la ciudad.

Aunado a lo anterior, en la presente investigación se buscó incluir un factor que describiera la situación actual de la periferia urbana de la Ciudad de México el cual es desigual pues si bien, es el SC el que mayor aporte de SEH brinda a la ciudad la población que radica en la periferia padece de desabasto de agua y vulnerabilidad social lo cual resulta ser una limitante para la capacidad adaptativa del SSE. Por tanto, para representar tal situación al factor hídrico en las 4 microcuencas de estudio se les asignó el valor de 10 (respetando la escala de relevancia de ECOSER). Asumiendo que de haber una distribución equitativa entre áreas de abastecimiento y zonas de consumo el valor ECOSER asignado sería 50 y una distribución mayor de agua en las zonas de abastecimiento en comparación con las de consumo también representaría una situación desigual para la población regional por lo tanto el valor asignado sería 10.

3.3.4 Cálculo de inequidad

Desde la visión urbana, la inequidad en los SEH se refleja en la diferencia de acceso a una mejor infraestructura (Solís, 2010) y la calidad de los servicios, marcada por una deficiencia en la periferia de la CDMX (Ramos, 2020); donde la distribución, accesibilidad y calidad de los servicios están fuertemente correlacionados con los niveles de vulnerabilidad (Cardoso, 2017).

El tema de la gestión del agua en la Ciudad de México ha sido ampliamente estudiado (Izazola, 2001; Ortega, 2009; Perevochtchikova, 2015; Romero, 2018; Ramos et al., 2021; Ramos y Perevochtchikova, 2020), donde la infraestructura y los factores socio-administrativos tienen una gran influencia en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento, relacionada con factores ambientales (Escolero et al., 2016) y sociales (Solís, 2010). De acuerdo con Laterra et al. (2015) hay una mayor probabilidad de daño bajo distribuciones asimétricas cuando se combinan valores de exposición y sensibilidad altos junto con un nivel bajo de capacidad adaptativa.

Por lo tanto, dentro de la metodología de ECOSER se incluye el cálculo del “coeficiente de inequidad (I)” (

Ecuación 11) el cual incrementa el valor de la VSE a medida que aumenta la inequidad en las capacidades de adaptación basándose en la distribución de ingresos de la población estudiada mediante el coeficiente de Gini (Laterra et al., 2015).

$$I = 1 + G$$

Ecuación 10

Donde:

I = Coeficiente de inequidad

G = coeficiente de Gini

Por otra parte, dentro del cálculo del coeficiente de inequidad se buscó un aporte integral que fuera más allá del aumento o disminución de los ingresos económicos de la población, dando cuenta de las desigualdades que también se viven en el acceso al agua en las delegaciones de la zona de estudio. Por una parte, se consideró el Índice de Desarrollo Humano (IDH) para el cálculo del coeficiente de inequidad. En este sentido, el concepto de *Desarrollo Humano* comprende un entorno en que las personas puedan llevar adelante una vida productiva y creativa de acuerdo con sus necesidades e intereses (PUND, 2019). El IDH se creó para hacer hincapié en que la ampliación de las oportunidades de las personas debería ser el criterio más importante para evaluar los resultados en materia de desarrollo. El crecimiento económico es un medio que contribuye a ese proceso, pero no es un objetivo en sí mismo. El IDH mide el progreso conseguido por un país en tres dimensiones básicas del desarrollo humano: disfrutar de una vida larga y saludable, acceso a educación y nivel de vida digno (Informe Nacional de Desarrollo Humano, 2021:1).

Por tal motivo, los IDH reportados en el *Informe de Desarrollo Municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local* de las delegaciones Xochimilco, Tlalpan, La Magdalena Contreras y A. Obregón fueron considerados para el cálculo de coeficiente inequidad. Tal informe parte de la Agenda 2030 y de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que reconocen el carácter multidimensional del desarrollo con una perspectiva local (PNUD, 2019).

Así mismo, se consideró también en la ecuación aquellas colonias dentro de la zona de estudio que cuentan con suministro intermitente de agua (tandeo “T”, valor numérico de 1) y aquellas que no (valor numérico de 0) con información de la Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2019). Tales valores numéricos fueron considerados así con la finalidad de respetar los valores base del coeficiente de inequidad de ECOSER que originalmente propone el uso del coeficiente de Gini dentro del rango 0 (máxima equidad) y 1 (máxima inequidad).

Por tanto, la adaptación del índice de inequidad para efectos de la presente investigación se presenta en la

Ecuación 11 y aunque considera de una manera muy somera el acceso a los servicios hídricos en la periferia urbana; de acuerdo con Revollo et al., (2019) en la Ciudad de México las viviendas con menor acceso al agua potable son las que mayores niveles de pobreza presentan, por tanto, esta adaptación pretende reflejar un punto de partida en el contexto del SSE de la Ciudad de México en temas de pobreza y agua que influyen directamente en la capacidad adaptativa del SSE de periferia urbana.

$$I = 1 + \frac{(1 - IDH)}{2} + 0.5(T)$$

Ecuación 11

Donde:

I = Coeficiente de inequidad

IDH = Índice de desarrollo humano

T = Colonias de la Ciudad de México en SC que cuentan con el servicio de tandeo

4 INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIECOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el capítulo tres de la presente investigación se dio cuenta de la metodología empleada para la obtención de los SEH, sus beneficios al SSE y las variables que integran la VSE (*Ecuación 8*) del SSE de periferia urbana de 4 microcuencas en Suelo de Conservación de la Ciudad de México.

4.1 Funciones ecosistémicas y beneficios de los SEH en el área de estudio

A continuación, se presentan los mapas resultantes del módulo 1 sobre la estimación de las funciones ecosistémicas en el SSE en relación con los SEH de la zona de estudio.

4.1.1 Almacenamiento de carbono en biomasa

En la *Figura 4.1* se presentan los mapas normalizados en un rango de 0 a 100 de la FE Almacenamiento de carbono en biomasa, ACOB, de los años 2019 y 2039. Donde 0 es el menor aporte de la FE y 100 es su máximo aporte. Como se puede observar hay una disminución considerable de la FE entre ambos periodos siendo que, en el año 2019 el aporte de ACOB se encuentra entre los rangos de 40-80 principalmente por las microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo mientras que la proyección al año 2039 se encuentra principalmente entre el rango 20-60. En cuanto a los valores menores a 20 en color café en ambos periodos, indican usos de suelo diferentes al forestal en la zona de estudio, por lo tanto, hay ausencia de almacenamiento de carbono.

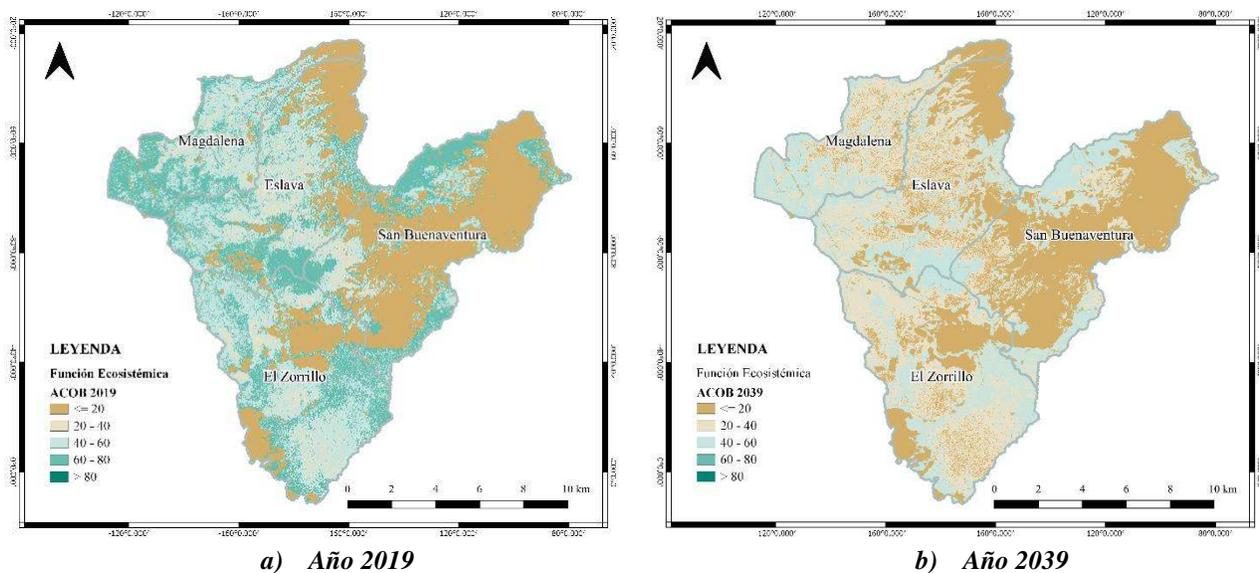


Figura 4.1. Mapas normalizados de la función ecosistémica “almacenamiento de carbono en biomasa” de las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia con información de Galeana et al. (s.f.))

4.1.2 Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal

De acuerdo con los resultados de la FE *Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal*, REP, elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio que se presentan en la **Figura 4.2**, este cumple un rol muy importante en la zona de estudio al hallarse en los 3 años de análisis (1999, 2019, 2039 tanto tendencial como restrictivo) principalmente dentro del rango 100 del aporte de la FE en la mayor parte del área de estudio en todos los años de análisis, concentrándose en las microcuencas Magdalena y Eslava. Así mismo, puede observarse una disminución en el aporte de la FE en el año 2019 en las microcuencas San Buenaventura y El Zorrillo debido a la pérdida de cobertura vegetal. Misma situación ocurre en las proyecciones al año 2039 pero con una mayor pérdida de FE en la microcuenca San Buenaventura en el escenario tendencial en comparación con el escenario restrictivo.

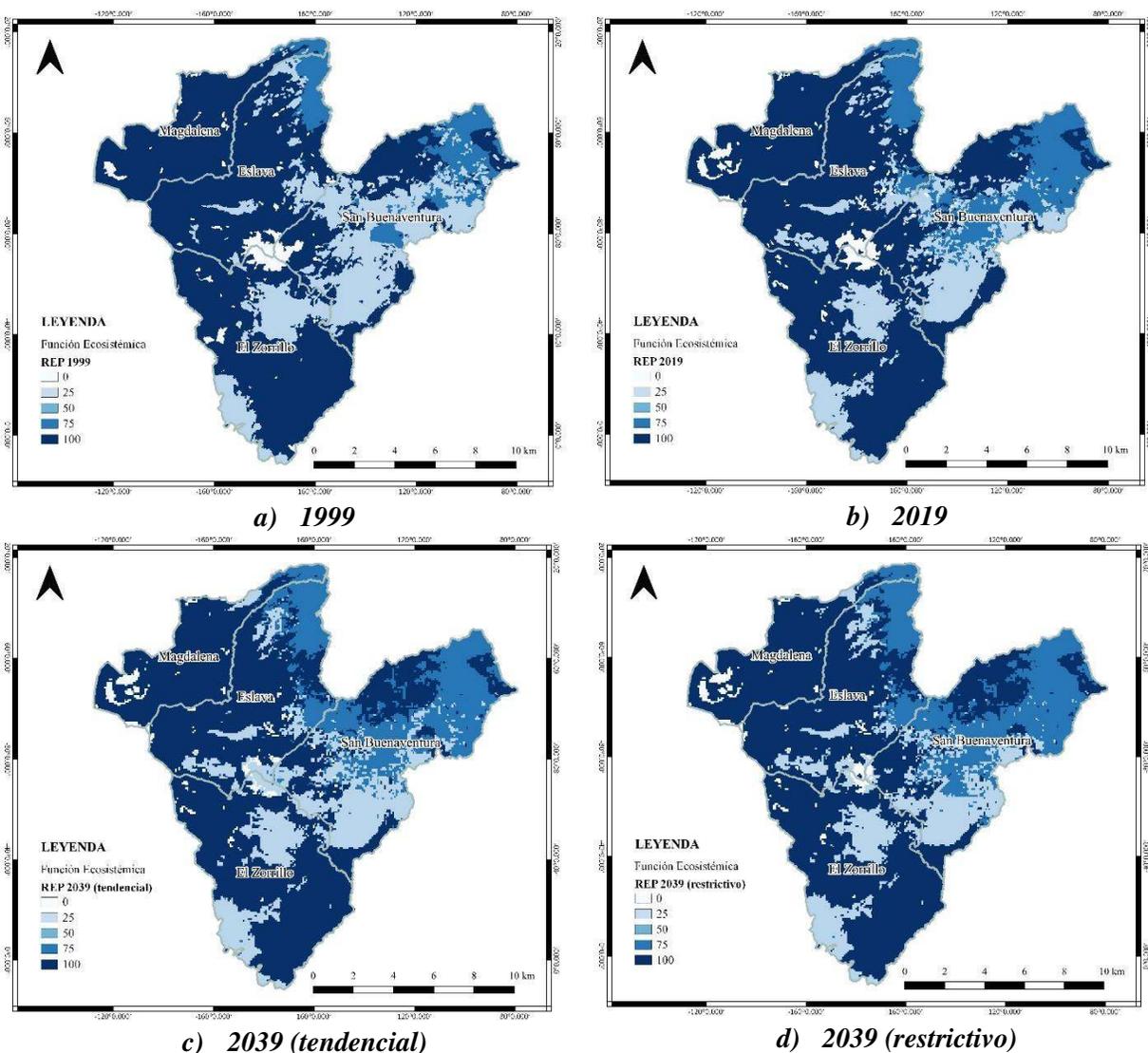


Figura 4.2. Mapa normalizado de la función ecosistémica “retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

4.1.3 Protección de acuíferos por cobertura vegetal

Los resultados sobre el aporte de la FE *Protección de acuíferos por cobertura vegetal*, PAC, elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio se pueden observar en la **Figura 4.3**. Tales indican valores principalmente mayores a 75 en las microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo, es decir que al igual que la FE de REP, la cobertura vegetal en estas zonas contribuye en suma a los mayores aportes de la FE en cuestión en la periferia urbana en los 3 años de análisis. Por su parte, también se observa en los mapas siguientes una reducción en su aporte entre el año 2019 y 2039 pero con una conservación mayor de los aportes de PAC en la proyección a 2039 bajo las condiciones restrictivas en la parte central del área de estudio en comparación con la proyección tendencial.

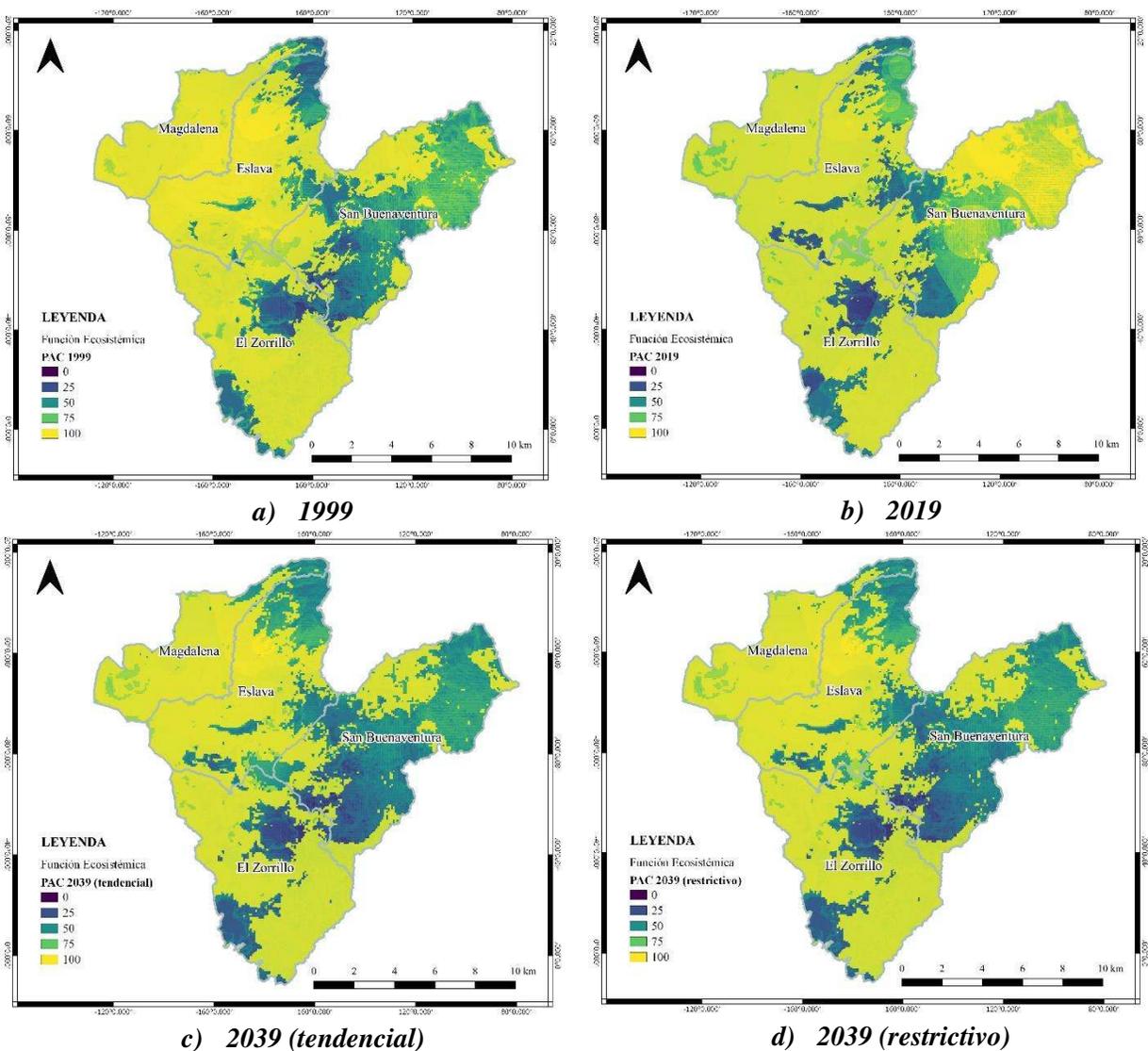


Figura 4.3. Mapa normalizado de la función ecosistémica “protección de acuíferos por cobertura vegetal” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

4.1.4 Servicios Ecosistémicos Hídricos de Provisión y Regulación y sus beneficios al área de estudio

En las **figuras 4.4 a 4.10** se presentan los mapas con la captura de lo SEH de provisión de acuerdo con el aporte relativo de las 3 Funciones Ecosistémicas ACOB, REP y PAC con respecto a los valores de la matriz de integración de FE a SEH del área de periferia urbana de la CDMX a escala local de provisión: 1) Consumo doméstico de agua, 2) Uso potencial de agua para agricultura y riego; y de regulación: 3) Caudal disponible en manantiales y arroyos, 4) Regulación climática, 5) Amortiguación de inundaciones, 6) Calidad del agua y 7) Erosión hídrica y sedimentación (ver subcapítulo 3.2.3) de los años 1999, 2019 y 2039 (tendencial y restrictivo) elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio. Los resultados que a continuación se presentan sobre la provisión de los SEH en la zona de estudio de los años 2039, tanto tendencial como restrictivo consideran el modelo de precipitación 2021-2040, *BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6* (*worldclim.org*); es decir que ambos escenarios 2039 no sólo consideraron cambio de uso de suelo en el modelo sino también cambio climático en las 4 microcuencas de estudio y su aporte de SEH (ver subcapítulo 3.2.2.2).

Como se puede observar en la **Figura 4.4** los resultados de los mapas normalizados del SEH de provisión “consumo doméstico de agua” en las 4 microcuencas, el mayor aporte de este servicio se observa en el año 1999 en las microcuencas El Zorrillo, Eslava y Magdalena en comparación con el año 2019 que sufrió una disminución en el aporte de este servicio, pero aún con valores significativos (50-75) en las microcuencas Magdalena y Eslava mientras que, en la microcuenca El Zorrillo se observa una disminución en el aporte del SEH en la parte sur. Así mismo, de los escenarios 2039, el escenario restrictivo indica una mayor conservación en el aporte del SEH en el área de estudio en comparación con el escenario tendencial, principalmente en las microcuencas Magdalena y Eslava. Con respecto a la microcuenca San Buenaventura sus principales usos de suelo son asentamientos humanos y agricultura (ver subcapítulo 3.2.2.2, **Figura 3.3**), por tal razón se observa un menor aporte del SEH en comparación con las áreas con mayor aporte del SEH cuya vegetación son bosques de encino, oyamel y pino (Morales, 2021).

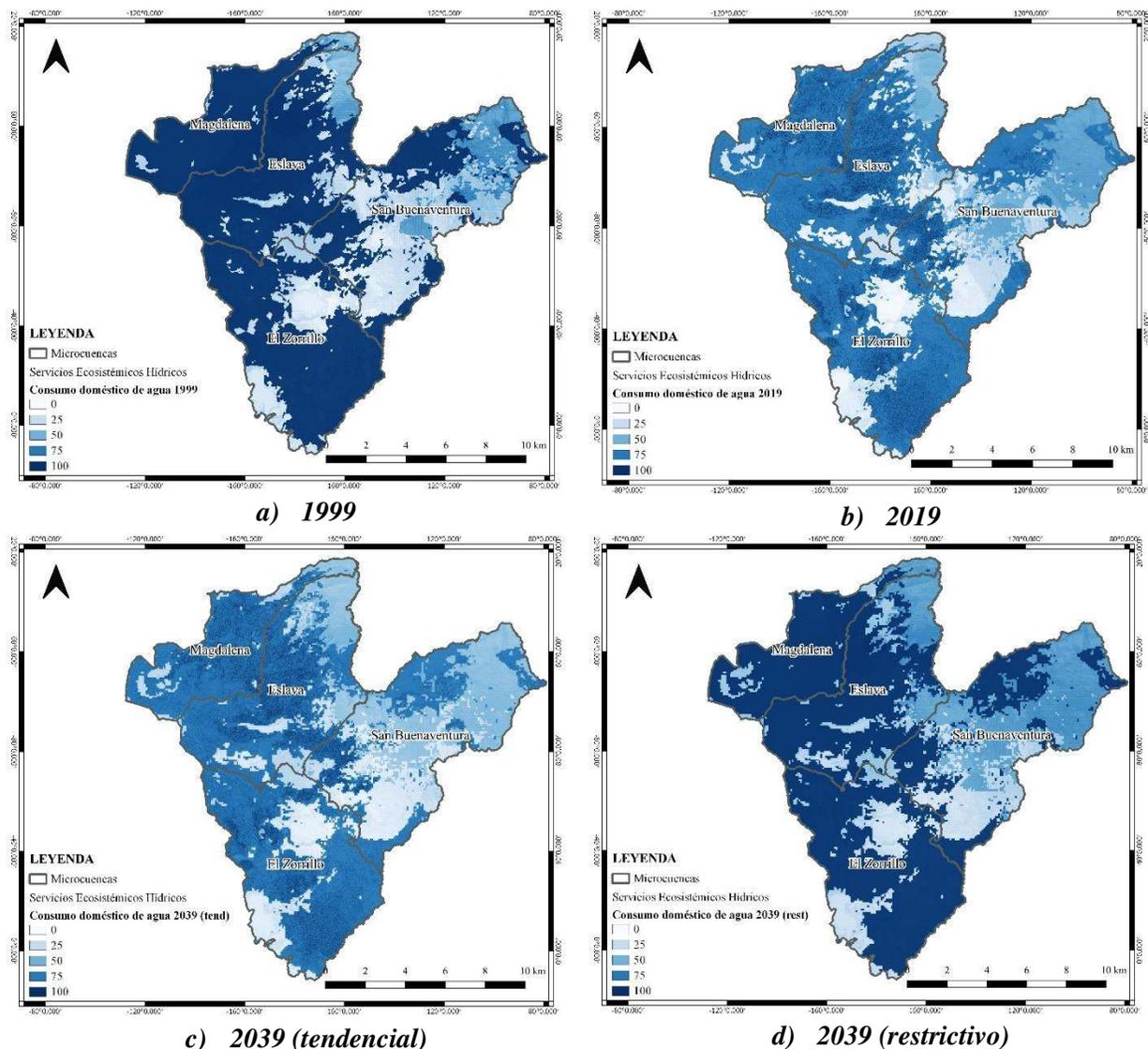


Figura 4.4. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “consumo doméstico de agua” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

En la *Figura 4.5* se muestran los resultados de los mapas normalizados elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio del SEH de provisión “uso potencial para agricultura y riego” en las 4 microcuencas, al igual que el SEH de “consumo doméstico de agua” el mayor aporte de este servicio se observa en el año 1999 en las microcuencas El Zorrillo, Eslava y Magdalena en comparación con el año 2019. También, de los escenarios 2039, el escenario restrictivo que considera los instrumentos de PPA (ANP, fondos concurrentes y PSA) indica una mayor conservación en el aporte del SEH en el área de estudio en comparación con el escenario tendencial, principalmente en las microcuencas Magdalena y Eslava.

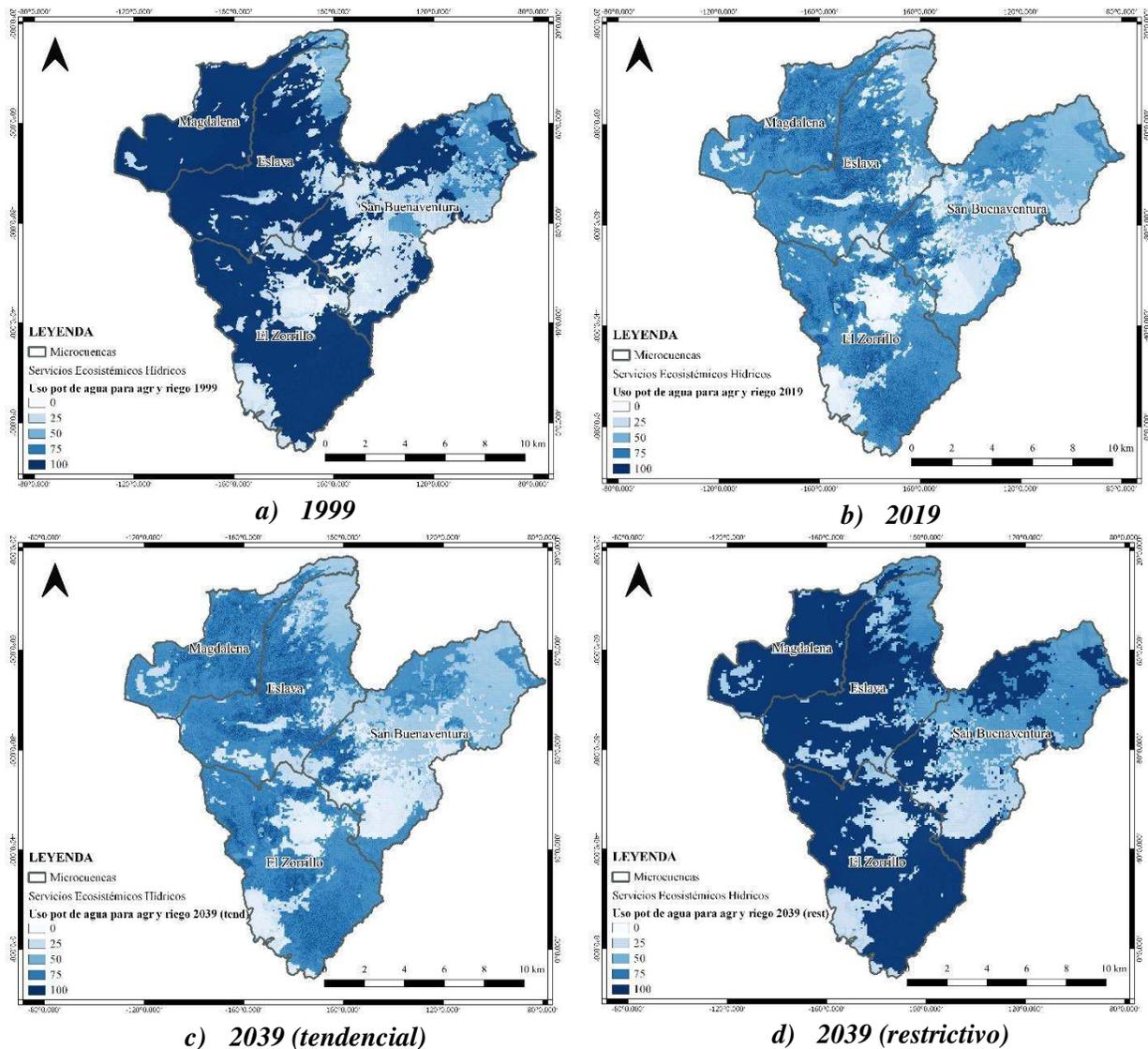


Figura 4.5. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “uso potencial de agua para agricultura y riego” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

Los mapas normalizados elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio del SEH de regulación “calidad del agua” en las 4 microcuencas, En la presentan un mayor aporte en el año 1999 en las microcuencas El Zorrillo, Eslava y Magdalena en comparación con el año 2019 (Figura 4.6). Con respecto a los escenarios 2039, el escenario restrictivo indica una mayor conservación en el aporte del SEH en el área de estudio en comparación con el escenario tendencial, principalmente en las microcuencas Magdalena y Eslava. Este SEH de regulación se relaciona fuertemente con los usos de suelo, por tal razón se observa un menor aporte del SEH en la microcuenca San Buenaventura y la zona central de la microcuenca El Zorrillo en todos los años de estudio.

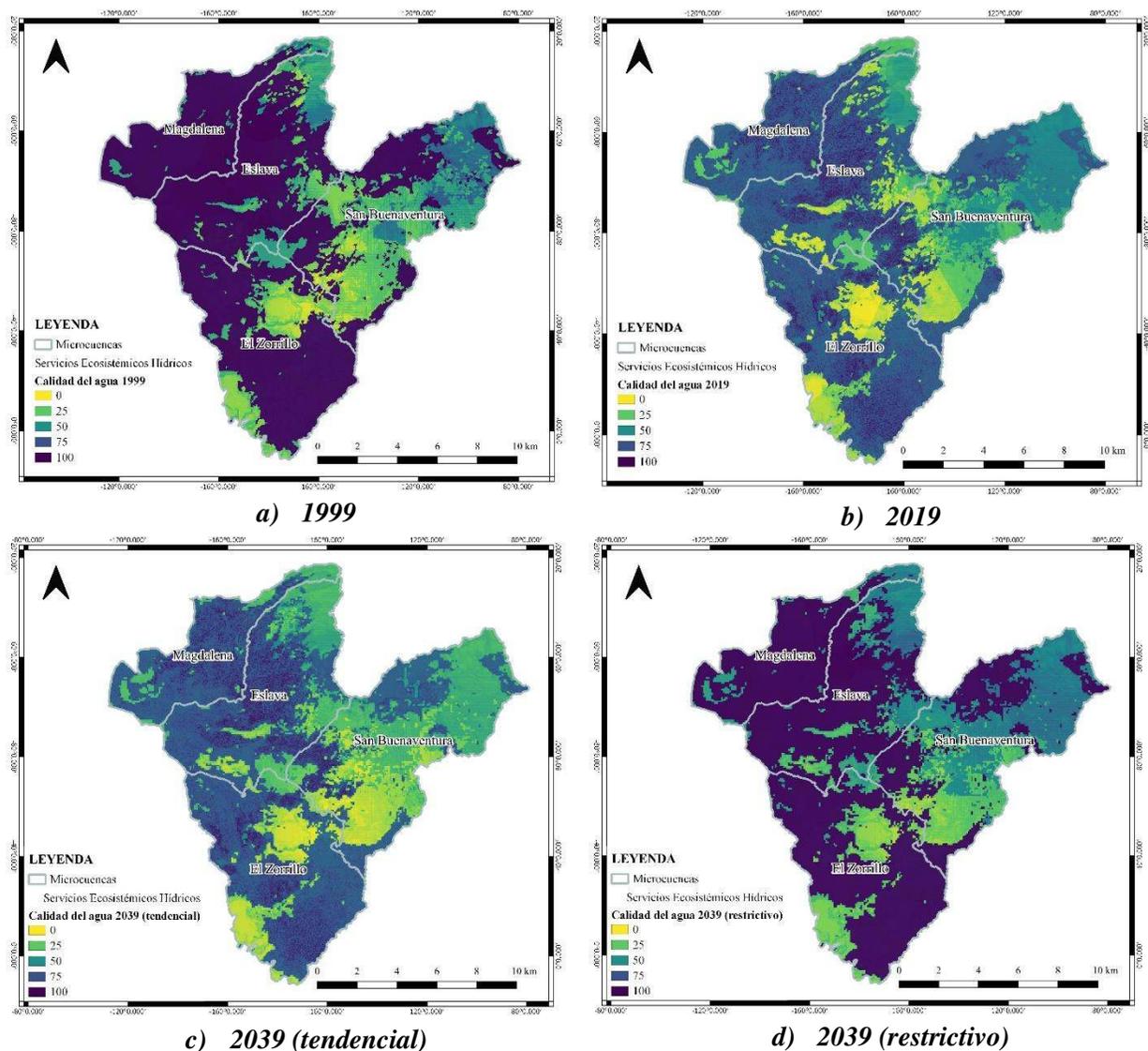


Figura 4.6. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de regulación “calidad del agua” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

En la **Figura 4.7** se presentan los mapas normalizados elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio del SEH de regulación “caudal disponible en manantiales y arroyos” cuyo mayor aporte en los 3 años de estudio se observa en las microcuencas El Zorrillo, Eslava y Magdalena. Así mismo, se observa una disminución en el aporte del SEH entre el año 1999 y 2019 en las microcuencas principales mencionadas. Con respecto a los escenarios 2039, el escenario tendencial muestra un deceso en el aporte del SEH de caudal disponible en manantiales y arroyos en comparación con el año 2019. Por su parte, el escenario restrictivo indica una conservación del SEH aún bajo condiciones de cambio climático en comparación con el año 2019 y el escenario tendencial.

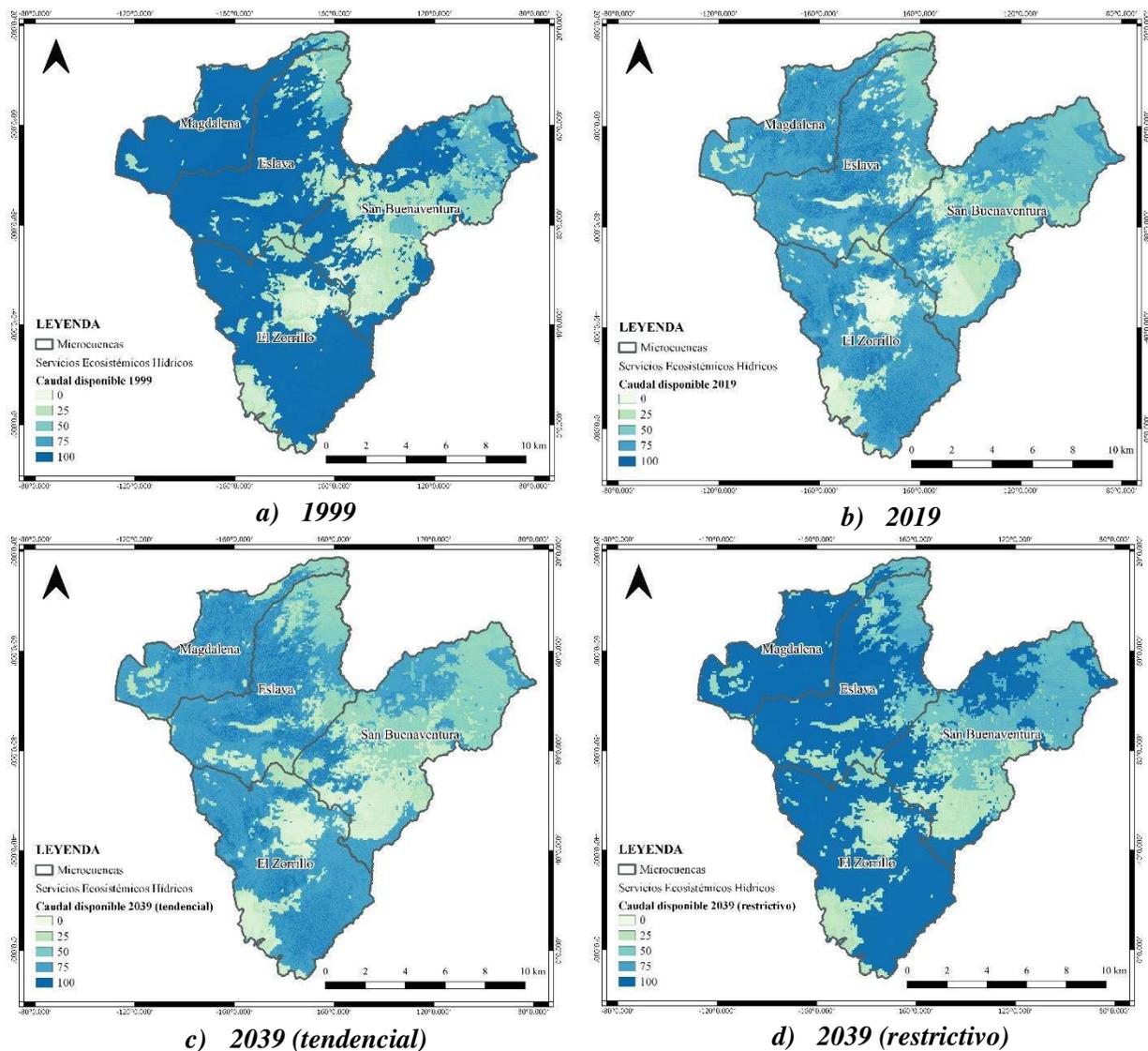


Figura 4.7. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de regulación “caudal disponible en manantiales y arroyos” en las 4 microcuencas, (Fuente: elaboración propia)

Los resultados sobre el aporte del SEH de “regulación climática” se presentan en la **Figura 4.8**, los mapas normalizados elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio indican una pérdida del servicio entre 1999 y 2019 en las 4 microcuencas de estudio. En cuanto a los escenarios 2039 que consideran el modelo de cambio climático la relación en específico con el SEH de regulación climática indica que el escenario restrictivo muestra una ventaja para la conservación del aporte de este servicio en las microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo en comparación con el escenario tendencial. Es decir, las PPA contribuyen en suma de acuerdo con los resultados del modelo, a la capacidad adaptativa del SSE ante el cambio climático.

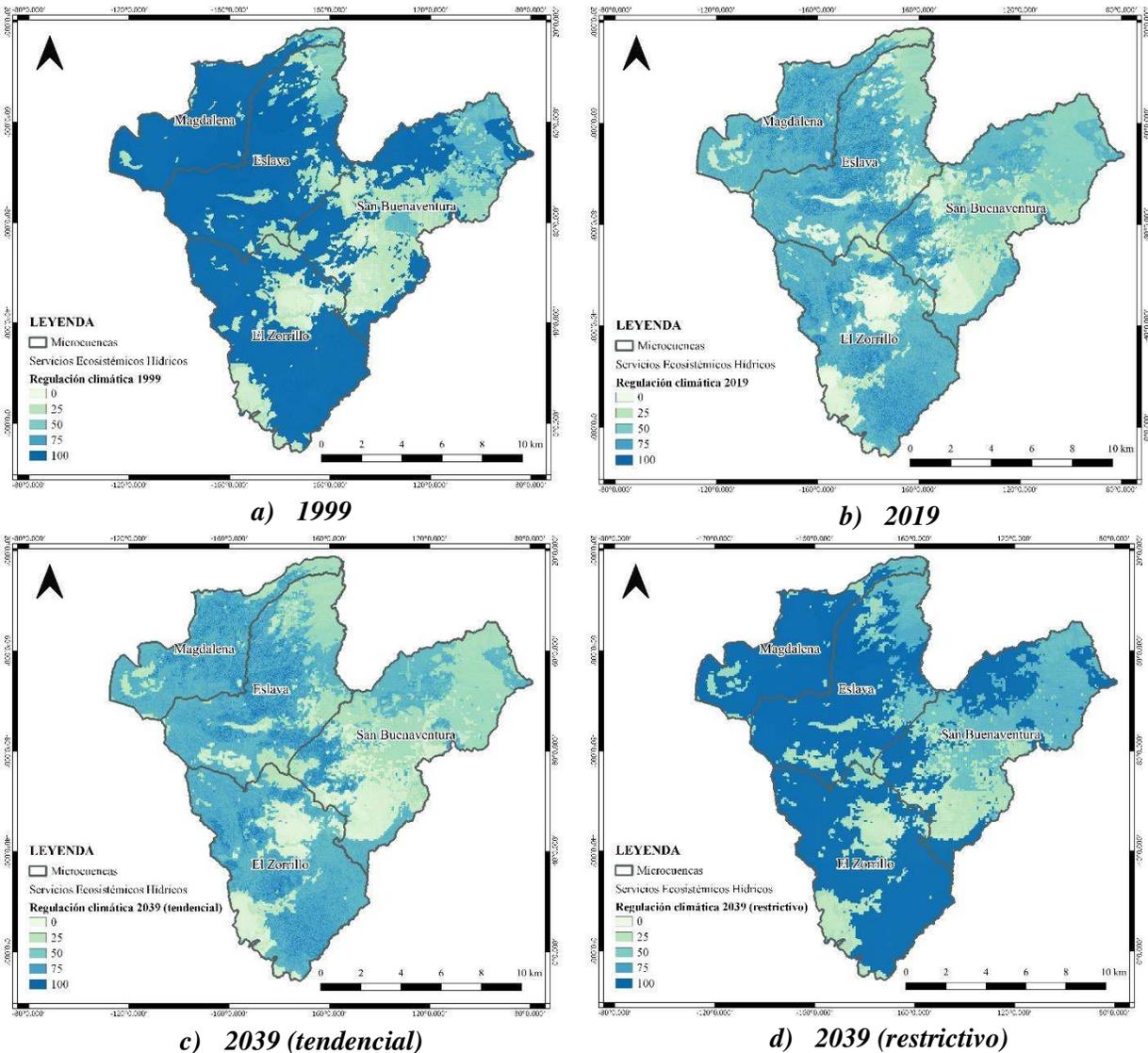


Figura 4.8. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico “regulación climática” en las 4 microcuencas, (Fuente: elaboración propia)

En la **Figura 4.9** se muestran los resultados de los mapas normalizados elaborados mediante el protocolo ECOSER y su interpretación para la zona de estudio sobre el aporte del SEH de regulación “amortiguación de inundaciones”. De acuerdo con las zonas donde se encuentran los mayores aportes de este SEH se hayan en zonas donde la vegetación es forestal en el área de estudio, las zonas en color rojo en los mapas se caracterizan por ser áreas con usos de suelo dedicado a la agricultura. Así mismo, se observa una disminución en el aporte del SEH entre 1999 a 2019, mientras que el escenario 2039 restrictivo muestra una mayor conservación del servicio en comparación con el escenario tendencial principalmente en las microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo.

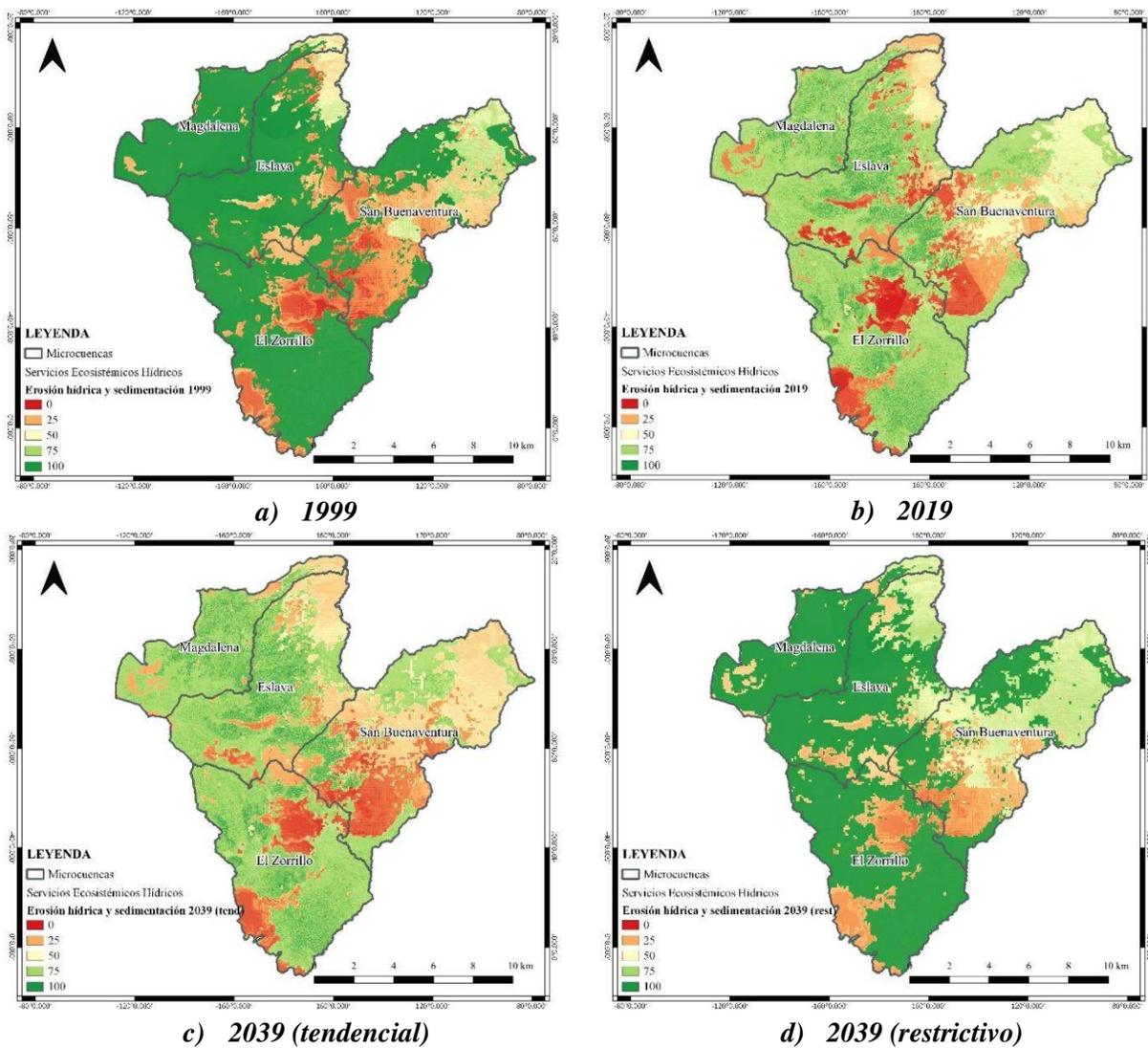


Figura 4.10. Mapa normalizado del servicio ecosistémico hídrico de provisión “erosión hídrica y sedimentación” en las 4 microcuencas (Fuente: elaboración propia)

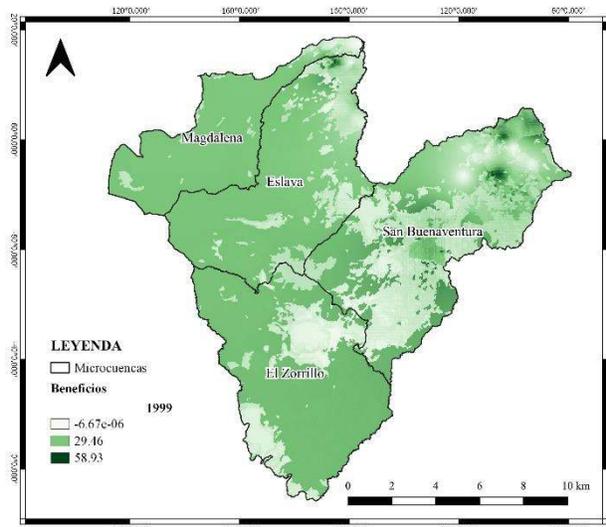
4.1.4.1 Captura de beneficios en el área de estudio

Debido a la similitud de los resultados en el aporte relativo de los SEH, en la **Figura 4.11** se muestra el promedio de los mapas de SEH de provisión y regulación sobre la captura de beneficios por la población en el área de estudio. Los mapas sin normalizar indican que las comunidades de La Magdalena Contreras en la zona noroeste de la microcuenca la Magdalena, San Nicolás al noroeste de la microcuenca Eslava y las comunidades San Andrés Totoltepec y San Pedro Mártir al noroeste de la microcuenca San Buenaventura quienes por su número de población reciben la mayor captura de los beneficios de los SEH de provisión y regulación de acuerdo con la metodología de ECOSER. Así mismo, las áreas forestales también indican recepción de beneficios aún con la ausencia de población habitando el área, lo cual podría explicarse en el uso del mismo bosque como proveedor

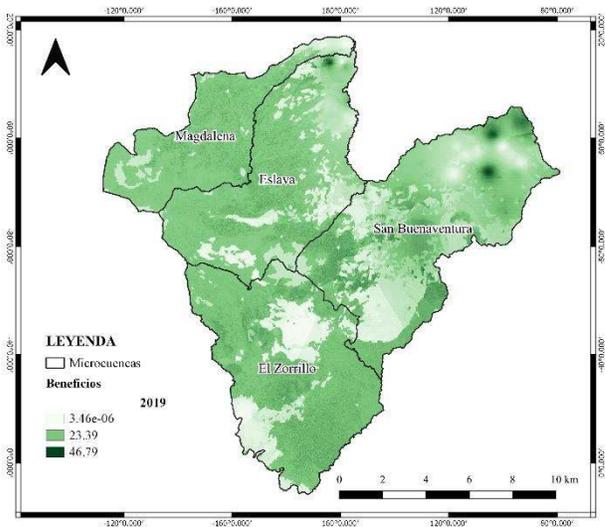
de SEH que contribuyen al bienestar de las comunidades, es decir la presencia de los recursos forestales es relevante para la continua captura de tales servicios.

Se observa un aumento en la captura de beneficios en la microcuenca San Buenaventura en 2019 en comparación con 1999, lo cual se debe al crecimiento poblacional. Sin embargo, en cuestión numérica la captura en 1999 en tales áreas que corresponden a las comunidades San Andrés Totoltepec y San Pedro Mártir al noroeste de la microcuenca San Buenaventura presentó valores de 58.93 en comparación con 2019 que presentó una captura de beneficios de 46.76. Así mismo, se observa una disminución en la captura de beneficios de los SEH de provisión y regulación en la parte sur de la microcuenca El Zorrillo entre 1999 y 2019.

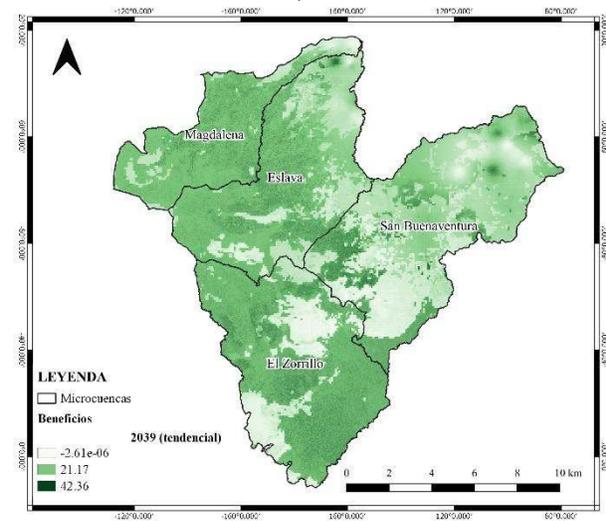
En cuanto a los escenarios 2039, si bien se observa una tonalidad de colores verde más acentuado en el escenario tendencial, los valores numéricos indican que los valores de captura de beneficios son menores en comparación con el escenario restrictivo. Por lo tanto, se concluye que si bien, la población crecería con el escenario tendencial ésta captaría los beneficios de los SEH y visualmente “la captura de beneficios crece” pero su captura en el escenario tendencial (42.36) es menor en comparación con el escenario restrictivo (58.85); es decir, que al haber pérdida de cobertura vegetal los beneficios son menores. En otras palabras, el modelo de ECOSER en este punto considera a la población y esta capturaría los mayores beneficios de los SEH en 2039 ante escenarios de cambio climático y cambio de uso de suelo en la zona de estudio en el escenario restrictivo.



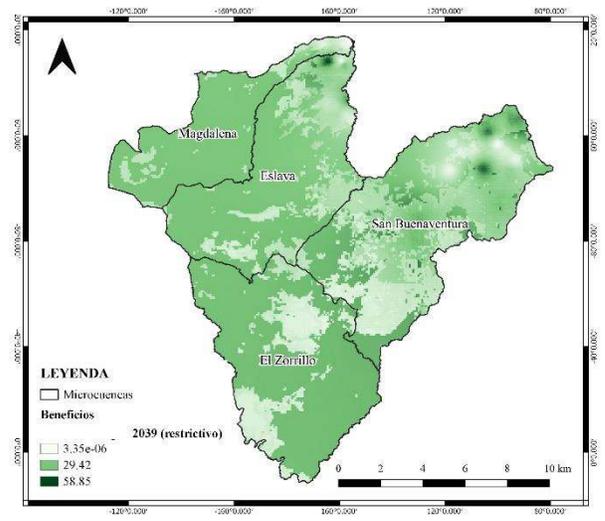
a) 1999



b) 2019



c) 2039 (tendencial)



d) 2039 (restrictivo)

Figura 4.11. Mapas de beneficios de los SEH de provisión y regulación en el área de estudio (Fuente: elaboración propia)

4.2 Componentes de la VSE en el área de estudio

A continuación, se muestran los mapas resultantes de los componentes de exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y el coeficiente de inequidad de la VSE en las 4 microcuencas de estudio (ver subcapítulo 3.3) de tres periodos: 1999-2019, 2019-2039 (escenario tendencial) y 2019-2039 (escenario restrictivo) el cual considera los instrumentos de PPA (ANP, fondos concurrentes y PSA).

4.2.1 Exposición

Como se puede observar en la *Figura 4.12* los mayores cambios de usos de suelo se presentaron en la microcuenca San Buenaventura principalmente en la zona sur y central entre el periodo 1999-2019. Así mismo, el cálculo de exposición considera que estos cambios son producto de la presión provocada por factores naturales y antrópicos reflejados en el uso del suelo en este caso a escala regional y local, por tanto, el escenario restrictivo indica una ligera menor exposición, valor de 0, en la zona central de la zona de estudio en comparación con el escenario tendencial.

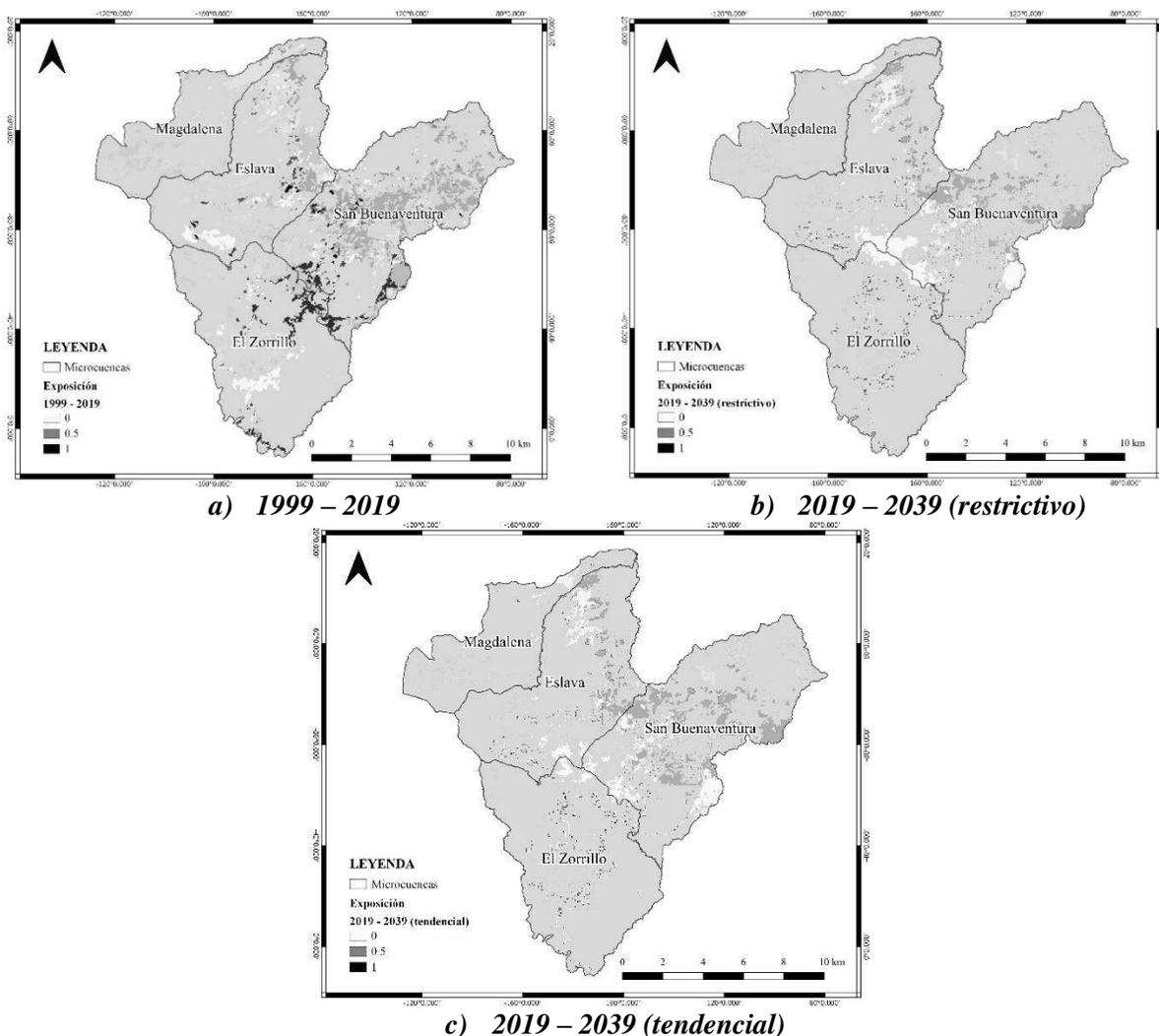


Figura 4.12. Resultados sobre la exposición en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX (Fuente: elaboración propia)

4.2.2 Sensibilidad

De acuerdo con los mapas sobre la sensibilidad del SSE en la zona de estudio (*Figura 4.13*), el periodo 1999-2019 indica una alta sensibilidad de las comunidades para absorber cambios generados por el cambio de uso de suelo. Con respecto a los escenarios 2039 se observa una baja sensibilidad ante el cambio climático y cambio de uso de suelo bajo el esquema restrictivo en comparación con el escenario tendencial. La sensibilidad considera los cambios en los beneficios de los SEH y al observarse una disminución en estos beneficios a la población (ver subcapítulo 4.1.4.1) la relación entre el vínculo de los SEH con el bienestar humano se ve afectado. En este sentido, los resultados demuestran que los instrumentos de PPA contribuyen a la disminución de la vulnerabilidad social de las comunidades locales.

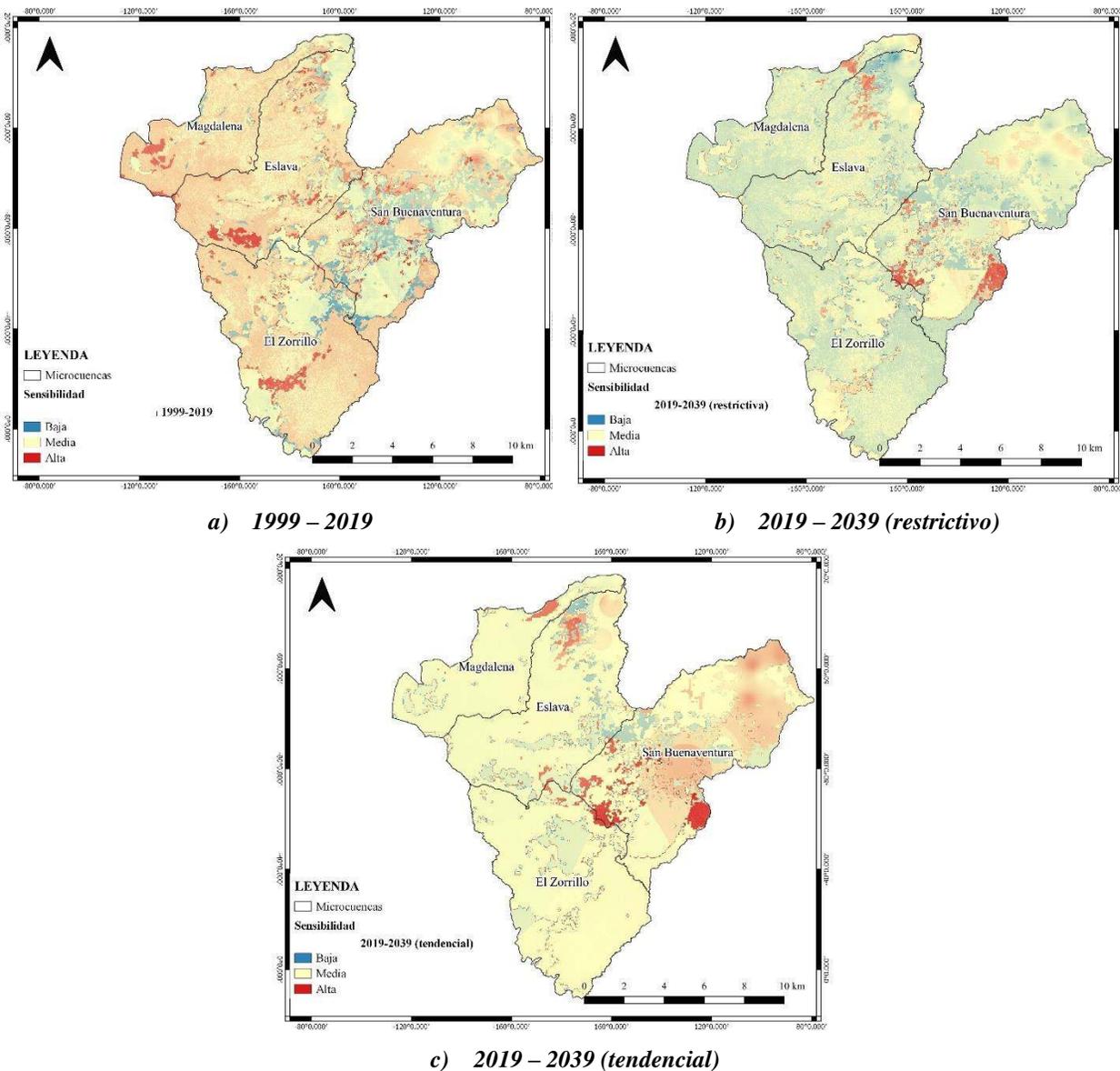


Figura 4.13. Resultados de sensibilidad en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX (Fuente: elaboración propia)

4.2.3 Capacidad adaptativa

El resultado final de la capacidad adaptativa del SSE (*Figura 4.15*) se obtuvo a partir de los mapas del subsistema social del SSE de periferia urbana en cuatro factores: factor económico, factor institucional, factor social y la adaptación del protocolo ECOSER para la zona de estudio en cuanto a la capacidad adaptativa incluyó el factor hídrico (*Figura 4.14*) que buscó reflejar la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos a la población en la periferia urbana de la CDMX (ver subcapítulo 3.3.3).

Los resultados de los factores del subsistema social del SSE en la *Figura 4.14* indican que la capacidad económica del SSE (a) es mayor en las microcuencas San Buenaventura y El Zorrillo debido a que subyacen en la delegación Tlalpan que es la que mayor cantidad de subsidios reciben de los programas de PPA con esquemas. Mientras que las microcuencas Eslava y Magdalena tienen una menor capacidad económica ya que las delegaciones a las que pertenecen (Álvaro Obregón, Cuajimalpa de Morelos y La Magdalena Contreras) son las que menos subsidios reciben en comparación con los montos anuales que la delegación Tlalpan recibe de acuerdo con los datos analizados. El factor institucional del SSE (b) representa un mayor aporte en las microcuencas El Zorrillo, Eslava y Magdalena debido a que es donde se encuentra la mayor parte de cobertura forestal denominadas protegidas y de conservación a diferencia de la microcuenca San Buenaventura que sus principales usos de suelo son agricultura y urbano. El factor social en el SSE (c) representa el nivel de organización social de las comunidades que al estar inscritas en los programas de incentivos y subsidios gubernamentales éstas constituyen brigadas de trabajo para la realización de labores que incluyen el monitoreo del patrimonio natural y cultural, saneamiento y conservación de los recursos naturales en el SSE (ver subcapítulo 3.3.3.3). En este sentido, la microcuenca El Zorrillo es la que mayor capacidad social cuenta de acuerdo con la metodología empleada, seguida por la microcuenca Eslava; Magdalena y San Buenaventura. En cuanto a la propuesta del factor hídrico (d) que representa la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos a la población del SSE en las 4 microcuencas de estudio, como se puede observar el valor de 10 en toda el área de estudio refleja la vulnerabilidad social debido a el desabasto de agua y la condición de periferia urbana que por sí misma representa una limitante para la capacidad adaptativa del SSE al encontrarse vulnerable a los efectos de cambio climático y cambio de uso de suelo.

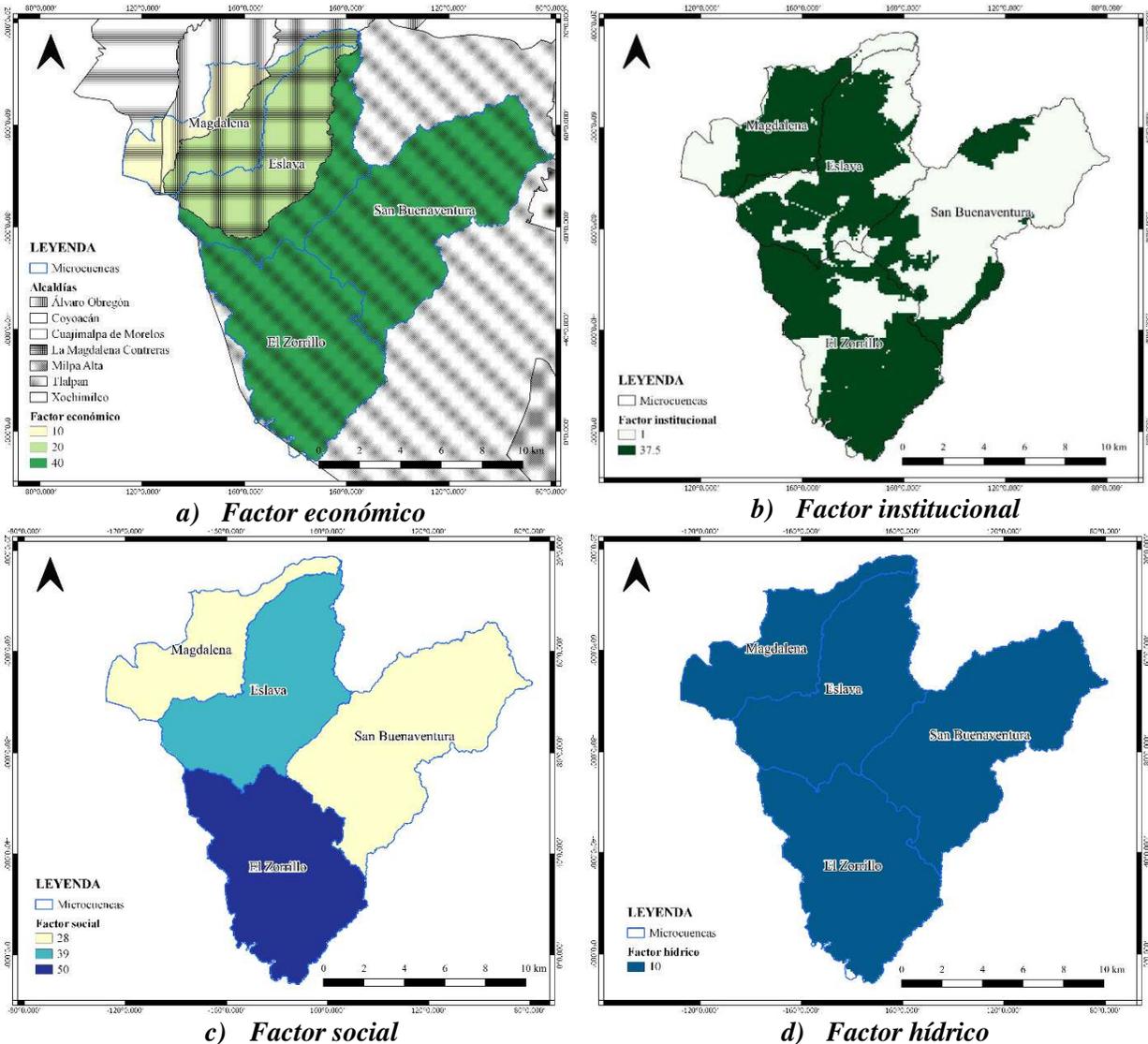


Figura 4.14. Resultados sobre el factor económico, institucional, social e hídrico del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX usados en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia)

La capacidad adaptativa del SSE que fue utilizada para el cálculo de la VSE en los tres periodos de análisis 1999-2019, 2019-2039 (escenario tendencial) y 2019-2039 (escenario restrictivo) se presentan en la **Figura 4.15**. De acuerdo con los resultados, las microcuencas con menor capacidad adaptativa son Magdalena, Eslava y San Buenaventura mientras que la microcuenca El Zorrillo es la que mayor capacidad adaptativa presenta. En este sentido, la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos entre periferia urbana y ciudad aunado con los factores de CUS y CC son factores que desequilibran los factores económico, institucional y social donde radica la fragilidad del SSE de periferia urbana en la provisión y regulación de los SEH.

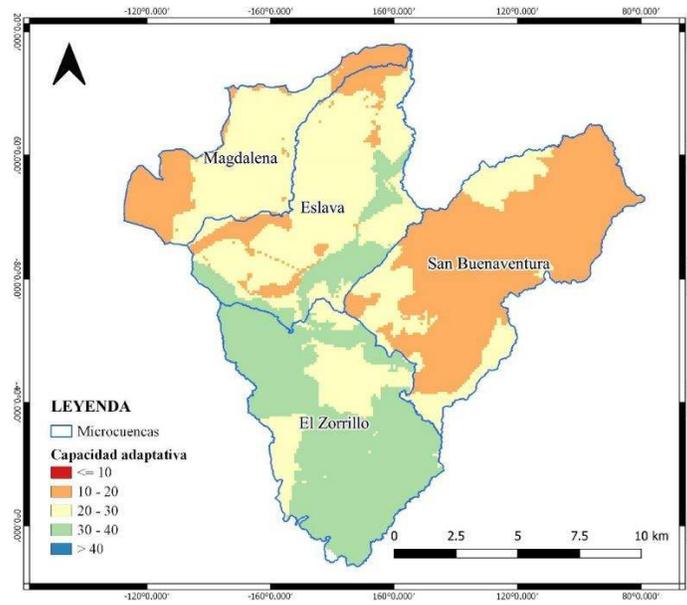


Figura 4.15. Resultado de la capacidad adaptativa del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX usado en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia)

4.2.4 Coeficiente de inequidad

Como se puede observar en la **Figura 4.16** gran parte del área de la zona de estudio refleja un coeficiente de inequidad entre 1.34 y 1.6; por su parte, las colonias en azul representan aquellas que pertenecen a las delegaciones Tlalpan cuyo IDH es de 0.842 según el *Informe de Desarrollo Municipal 2010-2015* y la delegación de la Magdalena Contreras cuenta con un IDH de 0.815. Sin embargo, el coeficiente de inequidad de la zona de estudio en gran parte de su área refleja valores menores a 1.6, reflejando de las distribuciones asimétricas en las fuentes de abastecimiento, infraestructura y los factores socio-administrativos en temas de gestión del agua en el SSE.

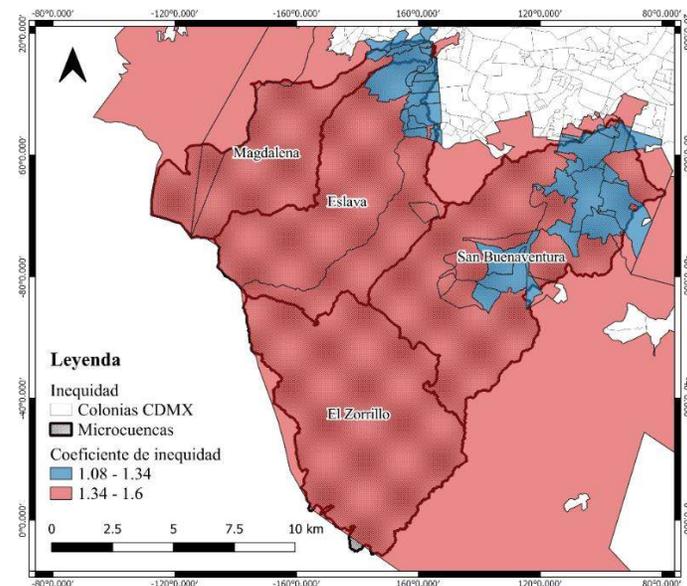
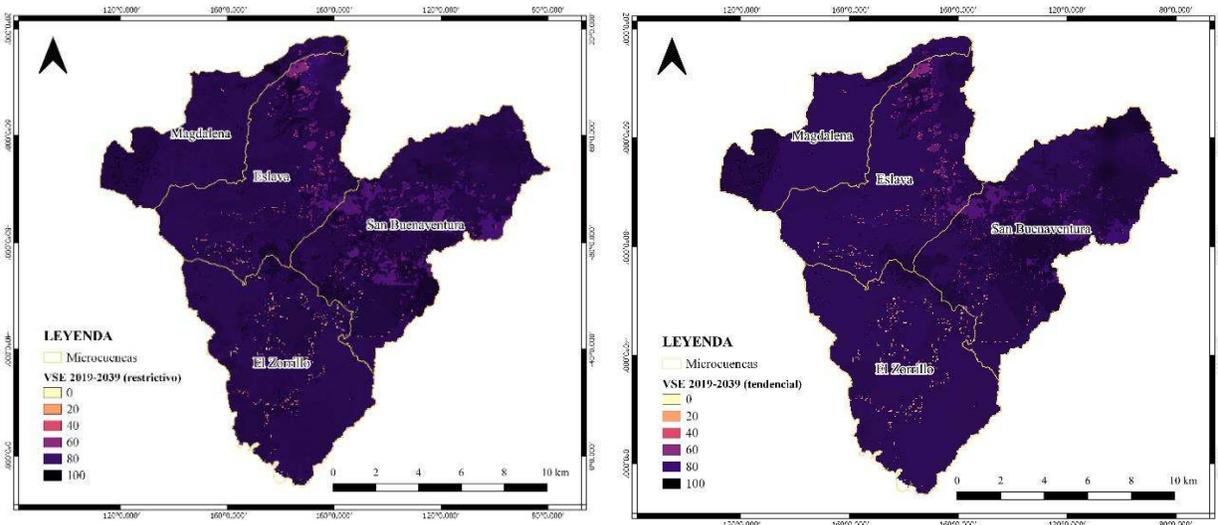


Figura 4.16. Mapa del coeficiente de inequidad en la zona de estudio (Fuente: elaboración propia).

4.3 Vulnerabilidad Socioecológica de la zona de estudio

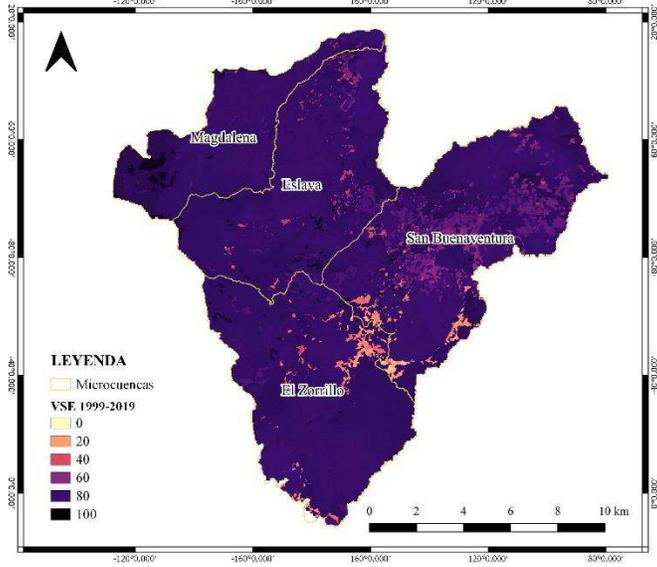
Los resultados finales de la VSE se obtuvieron a partir de la integración de variables que componen al SSE (ver subcapítulo 3.1, *Ecuación 1* y *Cuadro 3.1*), se presentan en la *Figura 4.17*. Como se puede observar, en el periodo de análisis 1999-2019 hay una VSE mayor a 80 en las 4 microcuencas de estudio con pequeñas áreas poco vulnerables en la parte sureste de la zona de estudio. En cuanto a los escenarios 2039 que consideran cambio climático y cambio de uso de suelo, el escenario restrictivo que considera los instrumentos de PPA presenta una ligera ventaja sobre el escenario tendencial especialmente en la microcuenca San Buenaventura.

La alta VSE en los tres periodos de análisis es reflejo de la desventaja del subsistema social y el subsistema ambiental que formal el SSE de periferia urbana de la Ciudad de México. Ya que los resultados reflejan las desigualdades sobre la gestión de los recursos hídricos y los factores de presión como lo son el cambio de uso de suelo y el cambio climático sobre los SEH que brindan las microcuencas no sólo a nivel local, sino regional. En este sentido, aunque es poca la primacía entre el escenario restrictivo en comparación con el escenario tendencial en un futuro cercano 2039 para la zona de estudio, de acuerdo con esta investigación las PPA en este caso de conservación forestal contribuyen a reducir la VSE en relación con los SEH de provisión y regulación ya que contribuyen como medidas de adaptación ante el CC y CUS.



a) 2019 – 2039 (restrictivo)

b) 2019 – 2039 (tendencial)



c) 1999 – 2019

Figura 4.17. Resultados sobre la VSE del SSE de periferia urbana en SC de la CDMX en los periodos de análisis 1999-2019 y 2019-2039 (tendencial y restrictivo) (Fuente: elaboración propia)

CONCLUSIONES

El objetivo central de la presente investigación fue determinar el estado de la VSE de la periferia urbana a nivel de cuenca actual (2019) y proyectado a 2039 en el contexto de cambio climático y cambio de uso de suelo en relación con los SEH de provisión y regulación en 4 microcuencas del proyecto “*Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds, TRASSE-ANR-CONACyT*” en Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Para responder tal, el acercamiento metodológico empleado fue mediante el uso del protocolo colaborativo ECOSER que surge en un contexto desde el sur global y que reconoce las características de inequidad en América Latina; por tanto, el protocolo contribuyó en la adaptación de variables que componen el subsistema ambiental y subsistema social de la zona de estudio en relación con la provisión de SEH de provisión y regulación.

Tales adaptaciones incluyeron en el cálculo de una de las proyecciones de las FE, “Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” del año 2039, el modelo de precipitación 2021-2040, *BCC-CSM2-MR; SSP 1-2.6* como factor de presión de cambio climático en las 4 microcuencas de estudio. Así mismo, se consideraron 2 escenarios de cambio de uso de suelo en 2039: restrictivo y tendencial. El escenario tendencial se realizó como parte de otra investigación de tesis (Morales, 2021) en la misma zona de estudio bajo las tendencias usuales de cambio de coberturas terrestres y usos de suelo (CCUS) con respecto a la superficie del año 2019; mientras que el escenario restrictivo es la proyección de CCUS donde se incluyó un índice que consideró los instrumentos de PPA como ANP, fondos concurrentes y PSA como áreas donde no podía haber cambio en sus coberturas (Morales, 2021). Tales escenarios prospectivos se elaboraron mediante el método de redes neuronales y cadenas de Markov a partir de la dinámica de cambio de coberturas de uso de suelo y vegetación entre los años 1993-2019 a través de métodos de clasificación de imágenes de satélite del sensor Landsat en la zona de estudio (Morales, 2021).

Los resultados de los SEH de provisión y regulación de la zona de estudio requirieron la elaboración previa de una encuesta a expertos en el SC para la elaboración de la matriz de integración de FE a SEH de la zona de estudio. De manera general dadas las características de la zona de estudio y la selección de las FE de acuerdo con su influencia a los SEH y en la poca variabilidad de los valores en los aportes relativos en la matriz de integración en la periferia urbana de la Ciudad de México en el año 1999 presentaron aportes de 100 en la mayor parte de las áreas de las microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo mientras que la microcuenca San Buenaventura presentó valores de aporte de SEH entre 25 y 75 debido a que en estas zonas se concentran los usos de suelo urbano y de agricultura. Así mismo, se observa una reducción en el aporte de todos los SEH de provisión y regulación entre 1999 a 2019 debido a la pérdida de cobertura forestal, pero aún con un registro significativo en las 3 microcuencas Magdalena, Eslava y El Zorrillo con un aporte de 75. Por último, puede apreciarse una conservación en el aporte de SEH de provisión y regulación en las proyecciones a 2039 bajo el escenario restrictivo en comparación con el escenario tendencial. Lo cual confirma una de las hipótesis planteadas al inicio del presente documento en el que se confirma que los escenarios 2039 son menos favorables en

comparación con el estado actual 2019, dada la influencia directa de CC y CUS en los SEH de provisión y regulación. Cabe mencionar que la información sobre el aporte de SEH sirvió como base para el cálculo de beneficios capturados por la población local sobre los SEH que posteriormente sirvieron para el cálculo de la VSE. Los resultados sobre la captura de beneficios concluyeron que si bien, la población crecería con el escenario tendencial ésta captaría los beneficios de los SEH y visualmente “la captura de beneficios crecería” pero su captura en el escenario tendencial es menor en comparación con el escenario restrictivo, es decir, que al haber pérdida de cobertura vegetal ante escenarios de cambio climático los beneficios son menores para la población local y los instrumentos de PPA contribuyen a conservar dichos beneficios que son parte del bienestar humano.

En cuanto a la caracterización del subsistema social este fue posible con el mismo uso del protocolo ECOSER la integración de trabajos de investigación realizados directamente en la zona de estudio como parte del proyecto TRASSE en materia económica, ambiental y social. Tales datos e información fueron incluidos dentro de la medida de lo posible, respetando ciertas características del protocolo ECOSER en la capacidad adaptativa del SSE para determinar la influencia de los instrumentos de PPA como medidas de adaptación al cambio climático en el estado proyectado de VSE a través de los factores económico, institucional y social que se consideraron en el modelo como parte de los objetivos secundarios de la presente investigación. Así mismo, se incluyó un cuarto factor que buscó reflejar la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos en la periferia urbana de la CDMX.

Los resultados finales de la VSE en los tres periodos de análisis 1999-2019, 2019-2039 (escenario tendencial) y 2019-2039 (escenario restrictivo) reflejan una alta VSE en las 4 microcuencas de análisis lo cual refleja las desigualdades sobre la gestión de los recursos hídricos hacia la población y los factores de exposición de cambio de uso de suelo y cambio climático que afectan los SEH que brindan las microcuencas no sólo a nivel local, sino regional. Sin embargo, el escenario 2039 restrictivo mostró una reducción, aunque ligera en la VSE en comparación con el escenario tendencial, por lo tanto, de acuerdo con los resultados de esta investigación se confirma la segunda hipótesis planteada sobre las PPA de conservación forestal las cuales contribuyen como medidas de adaptación ante el CC y CUS a reducir la VSE en relación con los SEH de provisión y regulación.

El acercamiento metodológico con el protocolo ECOSER resultó útil para la integración de información de diferentes disciplinas y resultados de investigación referente al área de estudio. Una de las limitantes para llegar a obtener los presentes resultados es la falta de información disponible como inversiones de política pública (Moreno y Perevochtchikova, 2021); es decir el desarrollo de esta tesis no hubiera sido posible sin el aporte colectivo de carácter multidisciplinario de información del subsistema ambiental y el subsistema social de parte del proyecto TRASSE en la zona de estudio que por un periodo de alrededor de 5 años desde diferentes aristas ha recabado datos del SSE. Sin embargo, otra limitante dentro del mismo protocolo es que hubo mucha más información relacionada con las 4 microcuencas que no fue incluida por cuestiones de tiempo para

plantearlas como variables que se pudieran ajustar al modelo y, al contexto de pandemia en la que se desarrolló la presente tesis que restringió las visitas de campo o posibilidades como la aplicación de encuestas, acercamiento directo con la población local, etc. Aun así, el aporte de esta investigación incluyó dentro del protocolo ECOSER escenarios de cambio de uso de suelo tendenciales y restrictivos (Morales, 2021) y un modelo de precipitación de cambio climático. También se consideró la opinión experta de investigadores que han trabajado específicamente en SC y conscientes del valor ambiental y social que este territorio representa a nivel regional y local, su conocimiento sobre la zona contribuyó en suma en la elaboración de la matriz de integración de FE a SEH de manera específica.

Finalmente, con base en los resultados la utilidad de este trabajo radicaría en la contribución para la toma de decisiones en PPA; pues se observó en la capacidad adaptativa que la implementación de instrumentos de conservación forestal influye de manera positiva en la disminución de la VSE del SSE. Así mismo, la periferia urbana de la Ciudad de México se ve afectada por la desigualdad en la distribución de los recursos hídricos que a su vez se relaciona con la vulnerabilidad social, en este sentido ante un contexto de presiones más fuertes como lo son cambio de uso de suelo y cambio climático para SSE de periferia urbana, las PPA indican ser herramientas adecuadas de adaptación ante tales escenarios de VSE no del todo optimistas.

REFERENCIAS

- Aguilar, A. G., & López, F. M. (2016). *Espacios de pobreza en la periferia urbana y suburbios interiores de la Ciudad de México: Las desventajas acumuladas*. EURE (Santiago), 42(125), 5-29.
- Altieri, M.A. (2011). *Hacia una metodología para la identificación, diagnóstico y sistematización de sistemas agrícolas resilientes a eventos climáticos extremos*. Documento de trabajo. Disponible en: REDAGRES (ed.) SOCLA.
- Altieri, M.A.; Nicholls, C.I. (2013). *Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas*. Revista Agroecología, 8 (1), 7-20
- Álvarez-Bravo, A., Salazar-García, S., Ruiz-Corral, J. A., & Medina-García, G. (2017). *Escenarios de cómo el cambio climático modificará las zonas productoras de aguacate 'Hass' en Michoacán*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 8(SPE19), 4035-4048.
- Arauz-Vásquez, K. (2018). *Contribución de los sistemas agroforestales a la sostenibilidad del servicio ecosistémico hídrico en las cuencas de Costa Rica*. Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo, 1(1), 78-84.
- Arellano Monterrosas, José Luis L., & Ruiz Meza, Laura Elena. (2018). *Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas*. Investigaciones geográficas, (95).
- AUGE, M. (2004). *Vulnerabilidad de acuíferos*. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n.4, p.85-103, 2004. Universidad de Buenos Aires
- Ávila Sánchez, H. (2009). *Periurbanización y espacios rurales en la periferia de las ciudades*. Estudios agrarios, 15(41), 93–123.
- Ávila, F.A., Correa, L.A., Peralta, S.O., Melchor, M. (2017). *Recarga artificial del acuífero en el cerro de la Estrella, Iztapalapa, Ciudad de México*. En Escolero, O., Guitérrez, C., Mendoza, Y., (Eds.), Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica. 1era edición. 978 p. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- Ávila-Foucat, V. Sophie. (2012). *Diversificación productiva en el suelo de conservación de la ciudad de México: Caso San Nicolás Totolapan*. Estudios sociales (Hermosillo, Son.), 20(40), 355-375.
- Balvanera, P., Astier, M., Gurri, F. D., & Zermeño-Hernández, I. (2017). *Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas socioecológicos en México*. Revista mexicana de biodiversidad, 88, 141-149.
- Bárcena Ibarra, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* Libros de la CEPAL, N° 160 (LC/PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020

- Barral, M. P. (2017). *Tutorial para el mapeo de funciones ecosistémicas y servicios ecosistémicos. Módulo 1 - Versión 2.1*. Obtenido de: <http://eco-ser.com.ar/>
- Beaud, S. (2018) “*El uso de la entrevista en las ciencias sociales. En defensa de la “entrevista etnográfica”*”, *Revista Colombiana de Antropología*, 54(1): 175-218.
- Betancur Vargas, T., Bocanegra, E., Custodio, E., Manzano, M., & Cardoso da Silva, G. (2016). *Estado y factores de cambio de los servicios ecosistémicos de aprovisionamiento en humedales relacionados con aguas subterráneas en Iberoamérica y España*. *Biota Colombiana*, 17(1), pp. 106-119.
- Blandón, F. C. C., & Cuesta, L. H. (2017). *La evaluación y seguimiento de las políticas ambientales: una etapa en el olvido*. *Advocatus*, (29), 87-104.
- Bobadilla, Mariana, Espejel Carbajal, Martha Ileana, Lara Valencia, Francisco, Álvarez Borrego, Saul, Ávila Foucat, Sophie, & Fermán Almada, José Luis. (2013). *Esquema de evaluación para instrumentos de política ambiental*. *Política y cultura*, (40), 99–122.
- Bradbury, K. R., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M. P., & Potter, K. W. (2000). *Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates*. [DNR-150]. Consultado en: <http://digital.library.wisc.edu/1711.dl/EcoNatRes.BradburyRefine>
- Burgos, A., & Bocco, G. (2014). *La gestión del agua y el aporte de la geografía al enfoque de cuencas hidrográficas en México*. *Gestión pública y social del agua en México*, México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Págs, 21-33.
- Calder, I., Hofer, T., Vermont, S., & Warren, P. (2007). *Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua*. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, (229), 3-10.
- Calderón, J. A. E. (2020). *Visiones desiguales sobre la conservación en la periferia urbana: ganadores y perdedores del suelo de conservación en la Ciudad de México*. *Sociedad y Ambiente*, (23), 1-29.
- Camacho-Valdez, Vera.; Ruiz-Luna, Arturo (2012). *Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos*. *Revista Bio Ciencias*, 1(4).
- Caro-Borrero, A.; Carmona-Jiménez; J., González-Martínez T.; Mazari-Hiriart M. (2015) “*Hydrological evaluation of a peri-urban stream and its impact on ecosystem services potential*.” *Global Ecology and Conservation* 3. 628-644.
- Caro-Caro, C. I., & Torres-Mora, M. A. (2015). *Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: aplicación en agroecosistemas*. *Orinoquia*, 19(2), 237-252.
- Centro Geo. (2021). *Servicios de información geoespacial: Edafología del Suelo de Conservación CDMX, PAOT, 1982*. Consultado en la plataforma GeoWeb IDEGeo: https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aedafologia_gw84

- Centro Geo. (2021). *Zonas de Alto Valor Ecosistémico por infiltración de agua en Suelo de Conservación, 2010*. Consultado en la plataforma GeoWeb IDEGeo: https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode:zaves_sc_inf_final/layer_info_metadata
- Colegio de México. (2018). *Desigualdades en México, 2018*. El Colegio de México, Red de Estudios sobre Desigualdades. 1ra Edición, 120 pp.
- CONAFOR. (2010). *Servicios Ambientales y Mitigación del Cambio Climático, Avances 2010*. Coordinación General de Producción y Productividad. Folleto. Agosto 2010. CONAFOR.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Registro de datos piezométricos por pozo de observación: Mapa que muestra la ubicación de las redes y pozos piezométricos. Hidrógrafos de pozos de CONAGUA*. Consulta en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Registro de datos piezométricos por pozo de observación: Mapa que muestra la ubicación de las redes y pozos piezométricos. Hidrógrafos de pozos de CONAGUA*. Consulta en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas>
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas), (2010). *Pago por servicios ambientales en Áreas Naturales Protegidas*. CONANP. México. 9 p
- CONANP. (2021). *Áreas Naturales Protegidas decretadas. Gobierno de México*. Recuperado el 28 de agosto de 2021 de http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm
- Córdova, J., & Rodríguez, I. (2015). *El ciclo hidrológico y su significación ecológica. Agua en Venezuela: Una riqueza escasa*, Edición Primera, Capítulo 2, 79-101.
- Cortés, J. J. S. (2015). *El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable*. Paradigma económico, 7(1), 127-149.
- Cruz, A. C. P., & Martínez, P. C. C. (2015). *El recurso agua en el entorno de las ciudades sustentables*. Cultura Científica y Tecnológica, (31).
- Da Cunha, J. M. P., & Vignoli, J. R. (2009). *Crecimiento urbano y movilidad en América Latina*. Revista Latinoamericana de Población, 3(4), 27-64.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). *A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services*. Ecological Economics, 41(3), 393-408.
- Delgado, L. E., Tironi-Silva, A., & Marín, V. H. (2019). *Sistemas socioecológicos y servicios ecosistémicos: modelos conceptuales para el humedal del Río Cruces (Valdivia, Chile)*. Naturaleza en sociedad: Una mirada a la dimensión humana de la conservación de la biodiversidad. Editorial Ocho Libros, Santiago, 177-205.

- Díaz Cordero, G. (2012). *El cambio climático. Ciencia y sociedad*. Ciencia y Sociedad, vol. 32, No. 2, p. 227-240. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. Santo Domingo, República Dominicana
- Dourojeanni, A., Jouravlev, A., & Chávez, G. (2002). *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. CEPAL.
- Durán Gil, C. A. (2017). *Análisis espacial de las condiciones de vulnerabilidad social, económica, física y ambiental en el territorio colombiano*. Perspectiva Geográfica, 22(1), 11-32. doi: 10.19053/01233769.5956
- Enríquez Cabascango, C. L. (2017). *Valoración de los servicios ecosistémicos hídricos en el área de influencia del proyecto multipropósito Piñán–Tumbabiro asociado al proyecto Yachay* (Tesis de grado).
- Escolero, O., Kralisch, S., Martínez, S. E., & Perevochtchikova, M. (2016). *Diagnóstico y análisis de los factores que influyen en la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable a la Ciudad de México, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 68(3), 409-427.
- Espinosa, J., Uribe, H., Arumi, J., Rivera, D., Stem, A. (2011). *Vulnerabilidad del recurso hídrico respecto a actividades agrícolas en diferentes subcuencas del Río Limarí*. Gestión Ambiental, 22, 9–26.
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2019). *Leyes, Decretos, Reglamentos, Acuerdos, Circulares, Convocatorias de Procedimiento de Licitación, Avisos de Fallo, Resoluciones emitidas en procedimiento de acción de inconstitucionalidad o de controversias constitucionales; así como todos aquellos documentos que por disposición legal sea obligatoria su publicación, emanados de los Órganos de Gobierno de la Ciudad de México*. Consultado en: <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/index.php/gaceta>
- Gaceta Oficial del Distrito Federal (1980). *Decreto de Programa General de Ordenamiento Ecológico del Distrito Federal*. Publicado el 1 de agosto de 2000. Obtenido de: <http://www.cms.sedema.cdmx.gob.mx>
- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., & Corona-Romero, N. (2013). *Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México*. Madera y bosques, 19(1), 53-69.
- Galicia, L., García, R. A., Gómez-Mendoza, L., & Ramírez, M. I. (2007). *Cambio de uso del suelo y degradación ambiental*. Ciencia, 58(4), 50-59.
- Gallardo, M. (2012). *Pobreza y cambio climático: un análisis de equilibrio general para Honduras*. Buenos Aires: CLACSO.
- Geneletti, D., La Rosa, D., Spyra, M., & Cortinovis, C. (2017). *A review of approaches and challenges for sustainable planning in urban peripheries*. Landscape and Urban Planning, 165, 231–243. doi:10.1016/j.landurbplan.2017.01.013

- Glaser, E. 2012. *Triumph of the City: How Our Best Invention Makes Us Richer, Smarter, Greener, Healthier, and Happier*. New York: Penguin Press
- Gómez Sántiz, F. (2021). *Medios de vida sustentable en el Sistema Socio-ecológico de cuatro microcuencas del Suelo de Conservación, Ciudad de México: modelación conceptual basada en Dinámica de Sistemas* (Tesis de doctorado). Colegio de México, Ciudad de México.
- Grêt-Regamey, A., Altwegg, J., Sirén, E. A., van Strien, M. J., & Weibel, B. (2017). *Integrating ecosystem services into spatial planning—A spatial decision support tool*. *Landscape and Urban Planning*, 165, 206–219. doi:10.1016/j.landurbplan.2016.05.003
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). *Global change and the ecology of cities*. *Science*, 319(5864), 756–760. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1150195>
- Guerra, F.; Gómez, H.; González, J.; Zambrano, Z. (2006). *Uso actual de métodos y técnicas para el estudio de la precipitación incluyendo plataformas SIG*. *Geoenseñanza*, vol. 11, núm. 1, enero-junio, pp. 97-106
- Gutierrez, H., Lee, G. O., Corozo Angulo, B., Dimka, J., Eisenberg, J. N. S., Trostle, J. A., & Hardin, R. (2020). *Perceptions of Local Vulnerability and the Relative Importance of Climate Change in Rural Ecuador*. *Human Ecology*. doi:10.1007/s10745-020-00165-1.
- Hatch Kuri, G. (2017). Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En Ch. Denzin, F. Taboada y R. Pacheco-Vega (eds.), *El estado del agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 149-170). Ciudad de México: Fundación Friedrich Ebert Stiftung-Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica.
- Hausfather, Z. (2020). *CMIP6: the next generation of climate models explained*. Carbon Brief: clear on climate. Artículo en línea consultado en: <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
- Henoa, A. (2013). *Propuesta metodológica de medición de la resiliencia Agroecológica en sistemas socio-ecológicos: un estudio de caso en los andes colombianos*.
- Hengl, T., Heuvelink, G., Stein, A., (2003), *Comparison of Kriging with external drift and regression-kriging*. Technical note, ITC.
- Hernández, M. S. (2016). *El periurbano, un espacio estratégico de oportunidad*. *Biblio 3W: Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, (21), 15.
- Herrera, D.A.; Mendez-Tejeda, R.; Centella-Artola, A.; Martínez-Castro, D.; Ault, T.; Delanoy, R. (2021). *Projected Hydroclimate Changes on Hispaniola Island through the 21st Century in CMIP6 Models*. *Atmosphere*. 12, 6. <https://dx.doi.org/10.3390/atmos12010006>
- Hiernaux, D., & Lindón, A. (2004). *La periferia: voz y sentido en los estudios urbanos*. *Papeles de población*, 10(42), 101-123.

- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). (2010). Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático. p. 161. Jiutepec, México.
- INEGI. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Consulta en: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Informe Nacional de Desarrollo Humano. Guatemala. Consultado en: <https://desarrollohumano.org.gt/desarrollo-humano/calculo-de-idh/> el
- IPCC 2007, Summary for Policymakers, in Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 17
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- IPCC. 2019. Calentamiento global de 1.5 °C. Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza. Consultado en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- Izazola, H. (2001). Agua y sustentabilidad en la Ciudad de México. Estudios Demográficos y Urbanos, 47, 285-320. El Colegio de México.
- Jódar-Abellán, A., Pla, C., & Valdes-Abellan, J. (2019). Los modelos hidrológicos como sistemas de soporte en la toma de decisiones. Evolución histórica. Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante. Alicante.
- Jujnovsky, J., Ramos, A., Caro-Borrero, Á., Mazari-Hiriart, M., Maass, M., & Almeida-Leñero, L. (2017). Water assessment in a peri-urban watershed in Mexico City: A focus on an ecosystem services approach. Ecosystem services, 24, 91-100.
- Jullian, Cristobal, Nahuelhual, Laura, Mazzorana, Bruno, & Aguayo, Mauricio. (2018). Evaluación del servicio ecosistémico de regulación hídrica ante escenarios de conservación de vegetación nativa y expansión de plantaciones forestales en el centro-sur de Chile. Bosque (Valdivia), 39(2), 277-289.
- Laterra, P., Manson, R., & Barrantes, G. (2013). Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y El Caribe. A. Lara (Ed.). América, SA.

- Laterra, P., P. Barral, A. Carmona, L. Nahuelhual. (2015) ECOSER: protocolo colaborativo de evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos y vulnerabilidad socio-ecológica para el ordenamiento territorial. Versión 2. <http://eco-ser.com.ar/>
- Laterra, Pedro, Orúe, M. Eugenia, Zelaya, Daniela K., Booman, Gisel, Cabria, Fabián. 2009. Jerarquización y mapeo de pastizales según su provisión de servicios ecosistémicos. En: Pillar, V.D; Müller, S.C.; Castilhos, Z.M. & Jacques, A.V.A. (Eds.) Campos Sulinos. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasilia, pp. 128-136.
- Locatelli, B., & Kanninen, M. (2010). Servicios ecosistémicos y adaptación al cambio climático. En Martínez-Alonso, C., Locatelli, B., Vignola, R., & Imbach, P. (Eds). Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Libro de actas del Seminario Internacional sobre Adaptación al Cambio Climático: el Rol de los Servicios Ecosistémicos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Cartago, Costa Rica. 11-20 p.
- López Vazquez, V. H. (2015). Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano.
- López-Moreno J,I Zabalza, S Vicente-Serrano, J Revuelto, M Gilaberte, C Azorin-Molina, E Morán-Tejeda, J García-Ruiz, C Tague. 2014. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment* 493: 1222-1231
- López-Reyes, Liliana Y., Domínguez-Domínguez, Marivel, Martínez-Zurimendi, Pablo, Zavala-Cruz, Joel, Gómez-Guerrero, Armando, & Posada-Cruz, Saúl. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis* Müell. Arg.) de diferentes edades. *Madera y bosques*, 22(3), 49-60.
- Mancera Sanabria, J. (2019). Aporte de la geomática en el mapeo de servicios ecosistémicos para la regulación hídrica en la microcuenca del río Murca, Colombia. Bogotá : Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 2019.
- Martínez, P. F., & Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20.
- Martínez–Austria, P. F., & Patiño–Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5–20.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press. Washington, DC.
- Mendoza, Manuel, Bocco, Gerardo, López Granados, Erna, & Bravo, Miguel. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49), 92–117.

- Mo, G., Zhang, Y., Huang, Y., Mo, C., & Yang, Q. (2020). Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan basin. *Journal of Earth System Science*, 129(1). doi:10.1007/s12040-020-01458-1
- Molina, M. (2014). Expansión urbana y cambio climático. *Ciencia-Academia Mexicana de Ciencias*, 65(4), 10-13.
- Montalba, R., García, M., Altieri, M., Fonseca, F., & Vieli, L. (2013). Utilización del Índice Holístico de Riesgo (IHR) como medida de resiliencia socioecológica a condiciones de escasez de recursos hídricos. Aplicación en comunidades campesinas e indígenas de la Araucanía, Chile. *Agroecología*, 8(1), 63–70.
- Montaño, J.C. (2020). Modelo hidrológico del Suelo de Conservación de la Ciudad de México. Tesis. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México; 109 p.
- Montes, C., & Gutiérrez, M. D. (2015). Ciudades resilientes en el antropoceno: mito o realidad. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales (CyTET)*, 47(183), 9–22.
- Montico, A., Zapperi, P. A., Zilio, M. I., & Gil, V. (2019). Identificación de servicios ecosistémicos urbanos en la ciudad de Bahía Blanca y su aplicación al análisis de la seguridad hídrica. *Revista Estudios Ambientales–Environmental Studies Journal*, 7(1), 56–78.
- Morales Martínez, G. M. (2021). *Dinámicas periurbanas prospectivas del cambio de coberturas del sistema socio-ecológico del suelo de conservación de la Ciudad de México* (Tesis de maestría). CentroGeo, Ciudad de México.
- Moreno-Unda A.A. y Perevochtchikova, M. 2021. Diagnóstico de inversiones en programas de conservación ambiental en la Ciudad de México, 2000-2018. *Revista Madera y Bosque*, INECOL (aceptado).
- Mussetta, P., Barrientos, M. J., Acevedo Mejía, E. C., Turbay Ceballos, S. M., & Ocampo Lopez, O. L. (2017). Vulnerabilidad al cambio climático: Dificultades en el uso de indicadores en dos cuencas de Colombia y Argentina. *EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*. No. 36, enero- abril, 2017, pp. 119-147. ISSN: 1139-5737, DOI/ empiria.36.2017.17862
- Nieto, M., Cardona, L. F., & Agudelo, C. (2017). Servicios ecosistémicos, provisión y regulación hídrica en los páramos. *Hojas de ruta*.
- Oddi, J., 2010. Valoración de las funciones de los humedales y análisis de su vulnerabilidad ante las alteraciones ambientales: Adaptación y aplicación del Protocolo ECOSER en la Región del Delta Inferior del Río Paraná, 121 p. Tesis de Maestría en Gestión del Agua, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Veterinaria, Buenos Aires, Argentina.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2016). *Respondiendo a las principales tendencias urbanas*. ONU Habitat. Recuperado el 07 de septiembre de 2021 de <https://onuhabitat.org.mx/index.php/respondiendo-a-las-principales-tendencias-urbanas>

- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2017). *Tendencias del desarrollo urbano en México*. ONU Habitat. Recuperado el 07 de septiembre de 2021 de <https://onuhabitat.org.mx/index.php/tendencias-del-desarrollo-urbano-en-mexico>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2018). *Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo*. Naciones Unidas. Recuperado el 07 de septiembre de 2021 de <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Ordóñez Díaz, J. A. B., Rivera Vázquez, R., Tapia Medina, M. E., & Ahedo Hernández, L. R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(32), 7-16.
- Ortega Font, N. M. (2009). La crisis hídrica de la ciudad de México: Dimensiones y alternativas. *Tiempo, Laberinto*, 16-21.
- P. da Cunha, J. M., & Rodríguez Vignoli, J. (2009). Crecimiento urbano y movilidad en América Latina. *Revista Latinoamericana De Población*, 3(4-5), 27-64. <https://doi.org/10.31406/relap2009.v3.i1.n4-5.1>
- Paolini Ruiz, J. I. (2014). Una propuesta metodológica para la modelación y prospección de la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas en la Guayana Venezolana. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña
- PAOT. (2005). Acuerdo por el que se expide el programa de retribución por la conservación de servicios ambientales en reservas ecológicas comunitarias. Administración pública del Distrito Federal. Jefatura de Gobierno. Consultado en: <https://paot.org.mx/centro/programas/pretribucion.pdf?b=po>
- PAOT. (2014). Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020 (PACCM). Consultado en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164914/PACCM-2014-2020completo.pdf>
- Peredo Parada, S., Vela Campoy, M., & Jiménez Gómez, A. (2016). Determinación de los niveles de resiliencia/vulnerabilidad en iniciativas de agroecología urbana en el suroeste andaluz. *Idesia (Arica)*, 34(2), 5-13.
- Perevochtchikova M., A. Vázquez. (2010). Impacto del programa de pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH) en Suelo de Conservación del D.F., México. Centro de Estudios Demográficos Urbanos y Ambientales, El Colegio de México.
- Perevochtchikova, M. (2015). Agua y ciudad: el abasto de agua potable en la Ciudad de México. En: Schteingart, M., & Piréz, P. (eds.). *Dos grandes metrópolis latinoamericanas: Ciudad de México y Buenos Aires. Una perspectiva comparativa*. 239-260. Ciudad de México, México: El Colegio de México.
- Perevochtchikova, M. (2016). Estudio de los efectos del programa de pago por servicios ambientales.: Experiencia en Ajusco, México. El Colegio de Mexico AC.

- Perevochtchikova, M., & Colorado, V. M. T. (2014). Análisis comparativo de dos instrumentos de conservación ambiental aplicados en el Suelo de Conservación del Distrito Federal. *Sociedad y Ambiente*, 1(3), 3-25.
- Perevochtchikova, M., & Vazquez Beltran, A. (2012). The federal program of payment for hydrological environmental services as an alternative instrument for integrated water resources management in Mexico City. *The Open Geography Journal*, 5(1).
- Perevochtchikova, María; Aponte Hernandez, Nidya; Zamudio-Santos, Verhonica Y Sandoval-Romero, Gabriel Eduardo. (2016). Monitoreo comunitario participativo de la calidad del agua: caso Ajusco, México. *Tecnol. cienc. agua [online]*, vol.7, n.6, pp.5-23.
- Pérez–Campuzano, E., Avila–Foucat, V. S., & Perevochtchikova, M. (2016). Environmental policies in the peri–urban area of Mexico City: The perceived effects of three environmental programs. *Cities*, 50, 129–136. doi:10.1016/j.cities.2015.08.013
- Pérez–Miranda, R., Valdez Lazalde, J. R., Moreno Sánchez, F., González Hernández, A., & Valdez Hernández, J. I. (2011). Predicción espacial de cambios del uso de suelo en Texcoco, Estado de México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 2(5), 59–72.
- Pizarro Hofer, R. (2001). *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Cepal. Publicación de las Naciones Unidas
- Portalanza, D., Barral, MP., Villa-Cox, G., Estafanous, S., Herrera, P., Durigon, A., Ferraz, S. 2019. Mapping ecosystem services in a rural landscape dominated by cacao crop: A case study for Los Rios province, Ecuador. *Ecological Indicators* 107 105593. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105593>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD. (2019). Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local.
- QGIS. Equipo de Desarrollo (2021). Sistema de Información Geográfica QGIS. Proyecto de Fundación Geoespacial de código abierto. <https://qgis.org/es/site/index.html>
- Quétier, Fabien; Tapella, Esteban; Conti, Georgina; Cáceres, Daniel; Díaz, Sandra (2007). Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta ecológica*, (84-85), 17-26.
- Quiroz-Ibarra, A., Torres-Lima, P., & Conway-Gómez, K. (2020). Community Adaptive Capacity in Peri-Urban Natural Protected Areas: A Case Study Near Mexico City. *Sustainability*, 12(11), 4416.
- Ramos, A., Perevochtchikova, M., & Chang, H. (2021). Análisis socio-espacial de la demanda doméstica de agua en la Ciudad de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 59-110.
- Ramos, A.; Perevochtchikova, M. (2020). Hacia la gestión integrada del agua urbana en la Ciudad de México: análisis espacial del abasto y uso del agua (2008-2013)

- Ramos, G. C. D. (2014). Ciudad, agua y cambio climático: una aproximación desde el metabolismo urbano. *Medio ambiente y urbanización*, 80(1), 95-123.
- Revollo-Fernández, Daniel A., Rodríguez-Tapia, Lilia, & Morales-Novelo, Jorge A.. (2019). Impacto de los subsidios al agua en los hogares pobres de la Ciudad de México. *Gestión y política pública*, 28(1), 39-67. <https://dx.doi.org/10.29265/gypp.v28i1.542>
- Reyna-Fabián, M., Espinoza, A., Seingier, G., Ortiz-Lozano, L., & Espejel, I. (2018). De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático. *Sociedad y ambiente*, (17), 59-92.
- Ricci, L. (2019). Peri-Urban Livelihood and Adaptive Capacity: Urban Development in Dar Es Salaam. *Consilience*, (21), 121-139. Retrieved September 7, 2021, from <https://www.jstor.org/stable/26775087>
- Rodríguez Sánchez, Edna Patricia, Mora Santiago, Elizabeth, Quiroz Guevara, Ana Lizbet, Cruz Cabrera, Salma Viridiana, Peña-Becerril, Juan Carlos, & Olvera-Sule, Daniel Alejandro. (2019). Aproximación a la valoración de los servicios ecosistémicos del bosque de Capulálpam de Méndez, Oaxaca, como herramienta para su conservación. *Acta universitaria*, 29, e2002.
- Royo, Iskra Alejandra, Castro, Balam, & Perevochtchikova, M. (2018). Análisis de disfuncionalidad institucional de programas de política pública ambiental en la Ciudad de México, 2000-2012. *Gestión y política pública*, 27(1), 211-236.
- Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Eure (Santiago)*, 31(94), 97-117.
- Romero, L. (2018). ¿Privatización del agua en la Ciudad de México?. V CONGRESO de la Red de Investigadores Sociales sobre el Agua. El Colegio de San Luis San Luis Potosí, SLP, México. Consulta en; <https://redissa.files.wordpress.com/2018/04/c2bfprivatizacic3b3n-del-agua-en-la-ciudadde-mc3a9xico.pdf>
- SACMEX (2012). Programa de Gestión Integral de los Recursos Hídricos. Visión 20 años. Sistema de Aguas de la Ciudad de México, p. 137.
- Salazar Vargas, M. (2014). Vulnerabilidad social a la disminución del suministro hídrico en el Distrito Federal (Tesis de maestría). El Colegio de la Frontera. p. 255. Tijuana, Baja California.
- Sandeep Balagangadharan M.; Martinez, J. (2019) Socio-Ecological Resilience of Peri-Urban Coastal Areas Climate Change and its Impact on Urban Peripheries of Mumbai. Report prepared in the BReUCom (Building Resilient Urban Communities)
- Santiago Romero, R. J. (2019). *Valoración Económica de la Coproducción de Servicios Ecosistémicos Forestales en el suroeste del Suelo de Conservación de la CDMX, mediante el método de experimento de elección* (Tesis de maestría). Colegio de México, Ciudad de México.
- SEMARNAT-INECC (2012). Adaptación al cambio climático en México: visión, elementos y criterios para la toma de decisiones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático–Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, México, D.F., Pág. 24 y 131

Servicio Meteorológico Nacional. (2021). Información Estadística Climatológica. Consultado en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2017). Cartografía Geológica de la República Mexicana escala 1:250,000. Consulta en: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>

Shkaruba, A., Kireyeu, V., & Likhacheva, O. (2017). Rural–urban peripheries under socioeconomic transitions: Changing planning contexts, lasting legacies, and growing pressure. *Landscape and Urban Planning*, 165, 244–255. doi:10.1016/j.landurbplan.2016.05.006

Smolka, M., & Mullahy, L. (2007). *Perspectivas urbanas: Temas críticos en políticas de suelo en América Latina*. Lincoln Institute of Land Policy, 393 pp.

Solís Escobar, A. (2010). *La desigualdad en la distribución del agua en la delegación Milpa Alta, México, Distrito Federal: algunos factores explicativos* (Master's thesis, México: FLACSO México).

Soto-Montes-de-Oca, G., & Alfie-Cohen, M. (2018). Impact of climate change in Mexican peri-urban areas with risk of drought. *Journal of Arid Environments*. doi:10.1016/j.jaridenv.2018.10.006

Spyra, M., La Rosa, D., Zasada, I., Sylla, M., & Shkaruba, A. (2020). Governance of ecosystem services trade-offs in peri-urban landscapes. *Land Use Policy*, 95, 104617. doi:10.1016/j.landusepol.2020.104617

Sterk, M., van de Leemput, I. A., & Peeters, E. T. (2017). How to conceptualize and operationalize resilience in socio-ecological systems?. *Current opinion in environmental sustainability*, 28, 108–113.

Tobar, J. (2010). *Apoyo a la rehabilitación productiva y el manejo sostenible de microcuencas en municipios de Ahuachapán a consecuencia de la tormenta Stan y la erupción del volcán Ilamatepec*.

UN-WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2009. *Climate change and water: a world water assessment programme*. Special report by the United Nations World Water Assessment Programme

Villarroya, J. P., Farias, H. D., & Amarilla, M. E. (2018). Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante SIG y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo. *Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA* ISSN N° 1853-7871

- von Medeazza, G. M. (2006). Flujos de agua, flujos de poder. La aportación de Erik Swyngedouw al debate sobre los recursos hídricos en Latinoamérica y en el Estado español. *Documents d'anàlisi geogràfica*, (47), 129-139.
- WEBER, C. & PUISSANT, A. Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area. *Remote Sensing of Environment*, 2003, N° 86, p. 341-352.
- Woldesenbet, A. B., Wudmatas, S. D., Denboba, M. A., & Gebremariam, A. G. (2020). Hydrologic soil group based curve number matrix modeling for Enset-Based land use system in Meki River Watershed, Western Lake Ziway Sub-Basin, Central Rift Valley of Ethiopia. *International Journal of Environmental Systems Research*, Springer Open.
- Zegarra Ayma, Y. J. (2017). Valoración económica del servicio ecosistémico hídrico de la laguna Rontoccocha, provincia de Abancay, región Apurímac en el periodo 2015–2016.
- Zulaica, L. (2010). Metodología para la determinación de sistemas ambientales en sectores periurbanos. Mar del Plata–Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(2), 269–293.

ANEXOS

Anexo 1. Información de estaciones climatológicas para el análisis de precipitación 1979-1998 (Fuente: elaboración propia con información de SMN, 2021)

Estación	Nombre	Estado	Municipio	Situación	Organismo	Latitud	Longitud	Altitud
9001	AEROPUERTO (OBS)	DISTRITO FEDERAL	VENUSTIANO CARRANZA	SUSPENDIDA	CONAGUA-SMN	19.439	-99.074	2596
9010	COLONIA AMERICA	DISTRITO FEDERAL	MIGUEL HIDALGO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.413	-99.202	2271
9014	COLONIA SANTA URSULA COAPA	DISTRITO FEDERAL	COYOACAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.303	-99.148	2256
9020	DESVIACION ALTA AL PEDREGAL	DISTRITO FEDERAL	TLALPAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.297	-99.182	2296
9022	EL GUARDA	DISTRITO FEDERAL	TLALPAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.134	-99.173	2990
9029	GRAN CANAL KM. 06+250	DISTRITO FEDERAL	GUSTAVO A. MADERO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.477	-99.091	2239
9032	MILPA ALTA	DISTRITO FEDERAL	MILPA ALTA	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.191	-99.022	2420
9036	PLAYA CALETA 454 COLONIA MARTE	DISTRITO FEDERAL	IZTACALCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.395	-99.098	2235
9041	SAN FRANCISCO TLALNEPANTLA	DISTRITO FEDERAL	XOCHIMILCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.197	-99.129	2620
9043	SAN JUAN DE ARAGON	DISTRITO FEDERAL	GUSTAVO A. MADERO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.465	-99.079	2240
9045	SANTA ANA TLACOTENCO	DISTRITO FEDERAL	MILPA ALTA	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.179	-99.003	2595
9051	TLAHUAC	DISTRITO FEDERAL	TLAHUAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.263	-99.004	2240
9068	PUENTE LA LLAVE	DISTRITO FEDERAL	CUAUHTEMOC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.429	-99.053	2234
9070	CAMPO EXPERIMENTAL COYOACAN	DISTRITO FEDERAL	COYOACAN	SUSPENDIDA	CONAGUA-SMN	19.351	-99.172	2260
9071	COLONIA EDUCACION	DISTRITO FEDERAL	COYOACAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.334	-99.132	2250
15020	CHALCO -SAN LUCAS-	MEXICO	CHALCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.258	-98.896	2240
15039	JUCHITEPEC	MEXICO	JUCHITEPEC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.087	-98.885	2543
15041	GRAN CANAL KM 27+250	MEXICO	ECATEPEC DE MORELOS	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.562	-99.019	2236
15045	LA MARQUESA	MEXICO	OCOYOACAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.299	-99.369	2230
15047	LAS ARBOLEDAS	MEXICO	TLALNEPANTLA DE BAZ	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.563	-99.216	2270
15077	PRESA TOTOLICA	MEXICO	NAUCALPAN DE JUAREZ	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.453	-99.284	2385
15092	SAN JUAN IXHUATEPEC	MEXICO	TLALNEPANTLA DE BAZ			19.311	-99.065	2235
15098	SAN MARTIN OBISPO	MEXICO	CUAUTITLAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.622	-99.193	2255
17022	TRES CUMBRES	MORELOS	HUITZILAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.037	-99.258	2639
17047	HUITZILAC	MORELOS	HUITZILAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.058	-99.274	2801

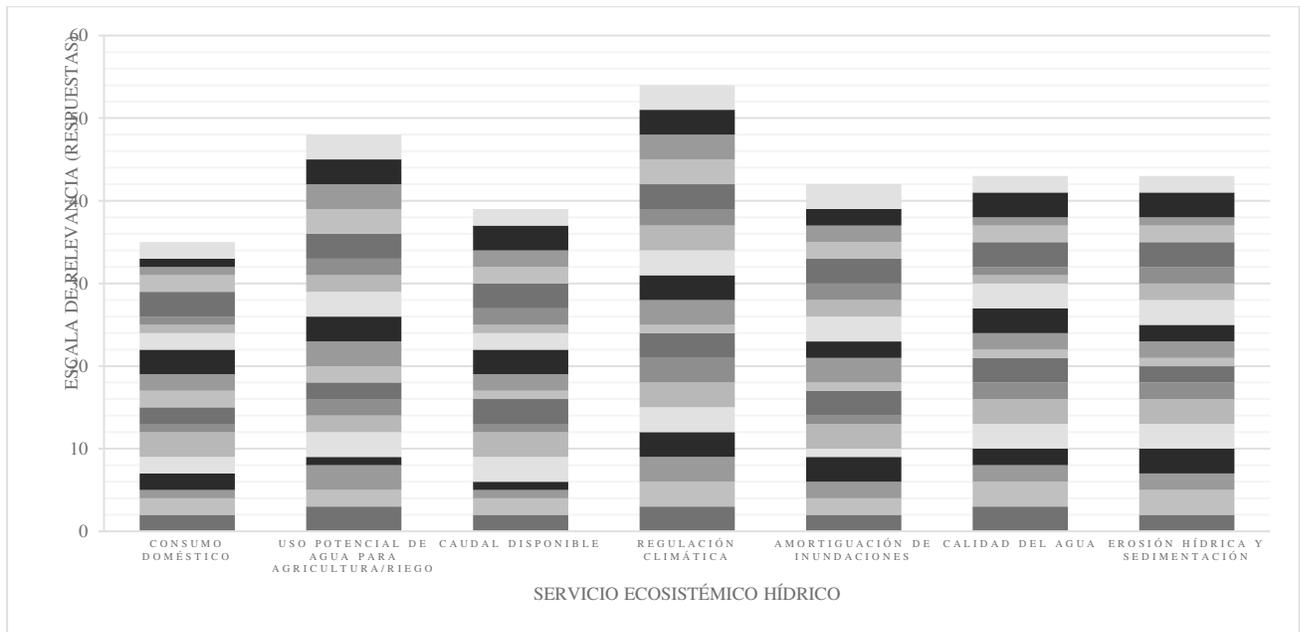
Anexo 2. Información de estaciones climatológicas para el análisis de precipitación 1999-2017 (Fuente: elaboración propia con información de SMN, 2021)

Estación	Nombre	Estado	Municipio	Situación	Organismo	Latitud	Longitud	Altitud
9004	CALVARIO 61	DISTRITO FEDERAL	TLALPAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.203	-99.149	2726
9010	COLONIA AMERICA	DISTRITO FEDERAL	MIGUEL HIDALGO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.413	-99.202	2271
9014	COLONIA SANTA URSULA COAPA	DISTRITO FEDERAL	COYOACAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.303	-99.148	2256
9020	DESVIACION ALTA AL PEDREGAL	DISTRITO FEDERAL	TLALPAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.297	-99.182	2296
9029	GRAN CANAL KM. 06+250	DISTRITO FEDERAL	GUSTAVO A. MADERO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.477	-99.091	2239
9032	MILPA ALTA	DISTRITO FEDERAL	MILPA ALTA	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.191	-99.022	2420
9036	PLAYA CALETA 454 COLONIA MARTE	DISTRITO FEDERAL	IZTACALCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.395	-99.098	2235
9041	SAN FRANCISCO TLALNEPANTLA	DISTRITO FEDERAL	XOCHIMILCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.197	-99.129	2620
9043	SAN JUAN DE ARAGON	DISTRITO FEDERAL	GUSTAVO A. MADERO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.465	-99.079	2240
9051	TLAHUAC	DISTRITO FEDERAL	TLAHUAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.263	-99.004	2240
9068	PUENTE LA LLAVE	DISTRITO FEDERAL	CUAUHTEMOC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.429	-99.053	2234
9071	COLONIA EDUCACION	DISTRITO FEDERAL	COYOACAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.334	-99.132	2250
15020	CHALCO -SAN LUCAS-	MEXICO	CHALCO	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.258	-98.896	2240
15039	JUCHITEPEC	MEXICO	JUCHITEPEC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.087	-98.885	2543
15041	GRAN CANAL KM 27+250	MEXICO	ECATEPEC DE MORELOS	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.562	-99.019	2236
15045	LA MARQUESA	MEXICO	OCOYOACAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.299	-99.369	2230
15077	PRESA TOTOLICA	MEXICO	NAUCALPAN DE JUAREZ	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.453	-99.284	2385
15098	SAN MARTIN OBISPO	MEXICO	CUAUTITLAN	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.622	-99.193	2255
15137	AMEALCO	MEXICO	TLALNEPANTLA DE BAZ	OPERANDO	CONAGUA	19.518	-99.111	2240
17047	HUITZILAC	MORELOS	HUITZILAC	OPERANDO	CONAGUA-DGE	19.058	-99.274	2801
17093	TRES MARIAS	MORELOS	HUITZILAC	OPERANDO	CONAGUA	19.05	-99.246	2827

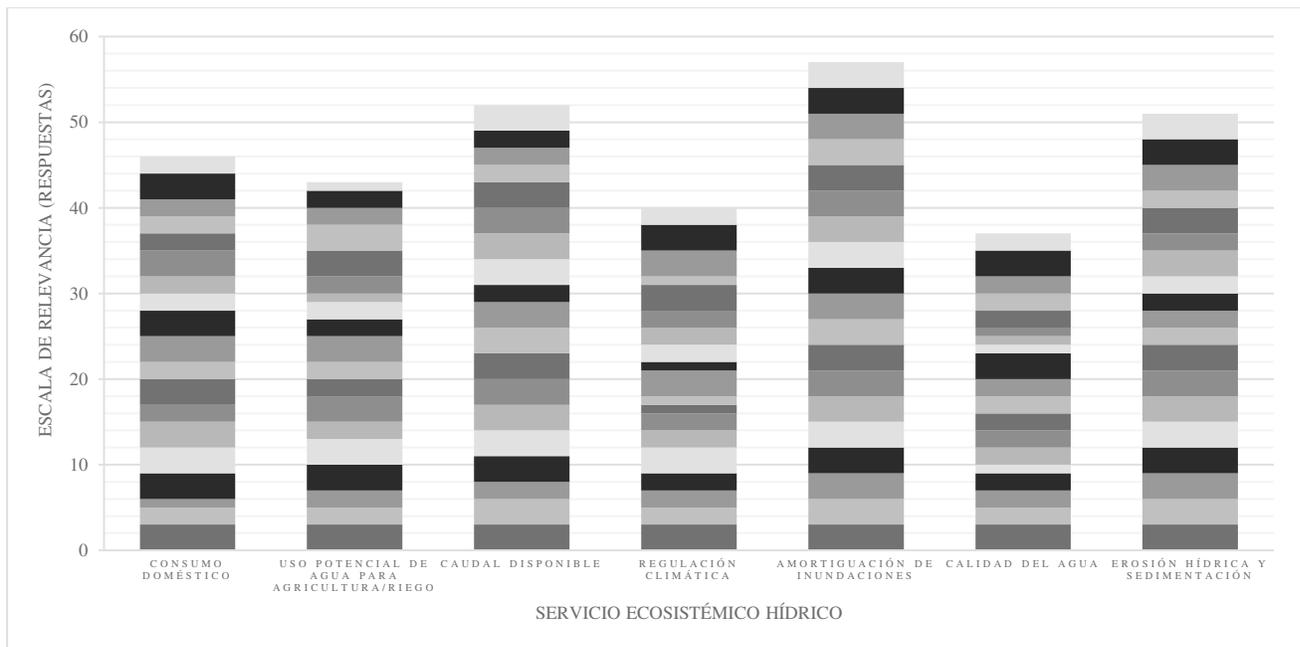
Anexo 3. Rango de parámetros del índice DRASTIC

Parámetro D		Parámetro S		Parámetro T		Parámetro C	
Rango (m)	Valor	Descripción	Valor	Rango (%)	Valor	Rango (m/día)	Valor
<1.5	10	Arcilla no expansiva y agregada	1	0-2	10	<4	1
1.5-5	9	Suelo orgánico	2	2-6	9	4-12	2
5-10	7	Marga arcillosa	3	6-12	5	12-28	4
10-20	5	Marga limosa	4	12-18	3	28-40	6
20-30	2	Marga	5	>18	1	40-80	8
>30	1	Marga arenosa	6			>80	10
Parámetro R		Arcilla expansiva y/o agregada	7	Parámetro A			
Rango (mm)	Valor	Descripción	Valor			Descripción	Valor
0-50	1	Turba	8			Arcillas, margas, limos	2
50-100	3	Arena	9			Ígneas/metamórficas	3
100-180	6	Grava	10			Ígneas/metamórficas/alteradas	4
180-255	8	Delgado o ausente	10			Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	6
>255	9					Areniscas masivas	6
Parámetro I						Calizas masivas	6
Descripción		Valor				Arenas, gravas y conglomerados	8
Arcilla, limo, margas		1				Volcánicas	9
Esquistos, pizarras		3				Calizas carstificadas	10
Calizas		6					
Areniscas		6					
Alternancia de calizas, areniscas y arcillas		6					
Arenas y gravas con contenido de arcilla		6					
Metamórficas, ígneas		4					
Arenas y gravas		8					
Volcánicas		9					
Calizas carstificadas		10					

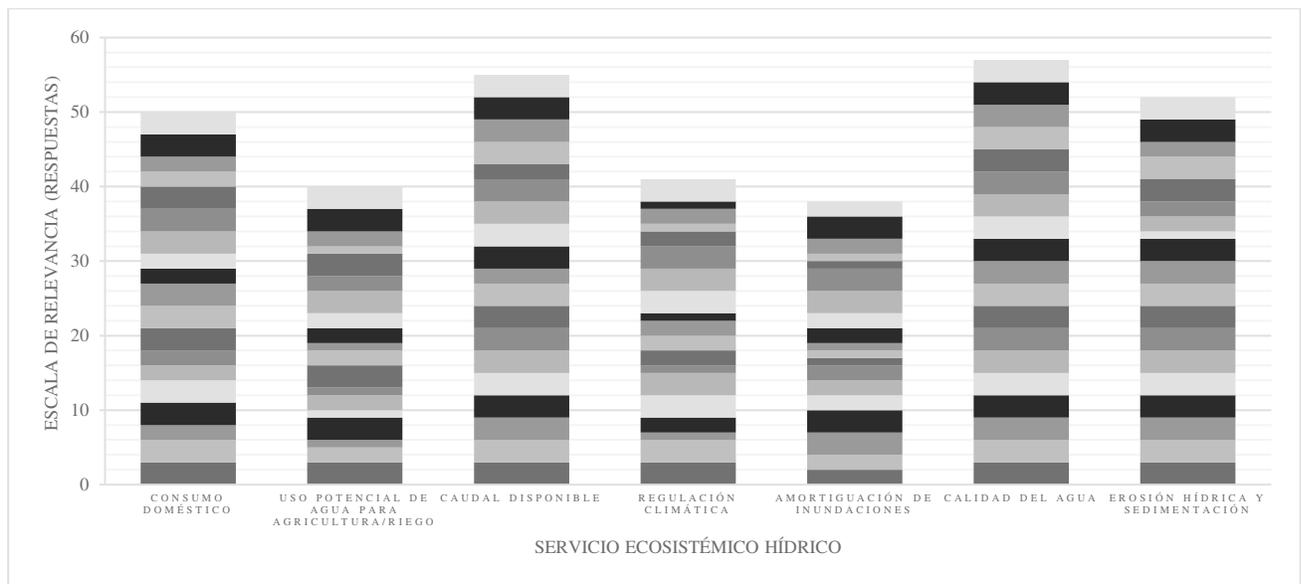
Anexo 4. Resultados de la encuesta sobre la escala de relevancia a nivel local en relación con los SEH de provisión y regulación con la función ecosistémica “almacenamiento de carbono en biomasa” en la zona de estudio



Anexo 5. Resultados de la encuesta sobre la escala de relevancia a nivel local en relación con los SEH de provisión y regulación con la función ecosistémica “retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal” en la zona de estudio



Anexo 6. Resultados de la encuesta sobre la escala de relevancia a nivel local en relación con los SEH de provisión y regulación con la función ecosistémica “protección de acuíferos por cobertura vegetal” en la zona de estudio



EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS EN SUELO DE CONSERVACIÓN DE LA CDMX

La finalidad de la presente encuesta es recopilar el conocimiento de investigadores que hayan colaborado o trabajado en temas hídricos en el Suelo de Conservación de la Ciudad de México; a razón de ser parte relevante en la elaboración de la Matriz de Integración de Funciones Ecosistémicas a Servicios Ecosistémicos Hídricos de Provisión y Regulación; para la estimación de beneficios mediante la aplicación del protocolo ECOSER (<http://www.eco-ser.com.ar>) en México.

Lo anterior es parte de la metodología para la elaboración de tesis de maestría: "Vulnerabilidad socioecológica ante el cambio climático y cambio de uso de suelo a nivel de cuenca en la periferia urbana. Caso CDMX, 1999–2039" de Alejandra Pedraza Gama. Estudiante de Maestría en Estudios Urbanos. Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales. Colegio de México.

*En la sección 3: "Evaluación de los FE a escala local y regional" se ofrece un resumen de algunos conceptos importantes a considerar (su lectura no requiere más de 5 minutos).

**En la 4ta y última sección se muestran únicamente dos matrices para evaluación y sus respectivas instrucciones.

***¡Muchas gracias por su participación! (Este cuestionario no dura más de 10 minutos)

***Dudas o más información; favor de contactarse con:

Alejandra Pedraza Gama (apedraza@colmex.mx)

* Required

Información Académica

1. Formación profesional *

2. Institución a la que pertenece *

3. Años de experiencia en temas hídricos o socio-ecológicos en Suelo de Conservación de la CDMX

Mark only one oval.

- 1 año o menos
- 2-3 años
- 4 años o más

CONCEPTOS IMPORTANTES A CONSIDERAR:

1. Funciones ecosistémicas (FE): También llamadas "servicios ecosistémicos intermedios". Atributos y procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen al automantenimiento de los ecosistemas y que soportan el flujo de servicios ecosistémicos. 1*
2. Servicios ecosistémicos (SE): Los aspectos de los ecosistemas utilizados activa o pasivamente para producir bienestar humano. En el contexto de ECOSER, representan el conjunto de funciones ecosistémicas capaces de transformar el capital natural en beneficios potenciales para los individuos y sociedades humanas. 1*
3. Servicios Ecosistémicos Hídricos (SEH) de provisión y regulación: Los servicios ecosistémicos hídricos (SEH) de provisión se relacionan con el consumo de agua (potable en hogares, y también por agricultura e industria); mientras que los SEH de regulación están estrechamente relacionados con el ciclo hidrológico y capacidad de infiltración del agua. 2*; 3*
4. Flujo de SE: También conocido como provisión u oferta de SE. Es la cantidad de un SE, generada por unidad de tiempo y espacio a partir del capital natural de los ecosistemas. Corresponde a lo que en la literatura inglesa normalmente se denomina supply. 1*
5. Flujo de SEH: Provisión u oferta de los SEH. Cantidad de SEH por unidad de tiempo y espacio.
6. Captura de SE: El flujo de SE efectivamente utilizado para el beneficio de individuos, grupos sociales o la sociedad en su conjunto. El proceso de captura normalmente exige la intervención de capital social y económico. 1*
7. Captura de SEH: El flujo de SEH utilizado para el beneficio de individuos, grupos sociales o la sociedad en su conjunto.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES ECOSISTÉMICAS A CONSIDERAR EN ESTE TRABAJO:

1. Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo: En la superficie terrestre, el suelo es el principal reservorio de Carbono; el cual, se reconoce como un componente determinante de la calidad del suelo debido a que cumple funciones como fuente y almacén de nutrientes, además de participar en la estabilización de la estructura del suelo y el almacenamiento de agua. 4*; 5*
2. Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal: Esta función ecosistémica se define como la lluvia de tormenta interceptada por el ecosistema en un año. La circulación de agua se da mediante las precipitaciones en "flujos evaporativos" que retornan a la atmósfera y "flujos líquidos" que alimentan cuerpos superficiales y subterráneos de agua. 1*
3. Protección de acuíferos por cobertura forestal: La función ecosistémica de protección de acuíferos asume que cada cobertura vegetal presenta una determinada capacidad de protección a la contaminación (en función del nivel de agroquímicos que requiera para el desarrollo de actividades productivas). 1*

Referencias:

1. Larterra, P., Manson, R., & Barrantes, G. (2013). Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y El Caribe. A. Lara (Ed.). América, SA.
2. Nieto, M., Cardona, L. F., & Agudelo, C. (2017). Servicios ecosistémicos, provisión y regulación hídrica en los páramos. Hojas de ruta.
3. De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. . (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408.
4. Galicia, Leopoldo, Gamboa Cáceres, Ana María, Cram, Silke, Chávez Vergara, Bruno, Peña Ramírez, Víctor, Saynes, Vinisa, & Siebe, Christina. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 1-29.
5. Karlen, D. L. and S. S. Andrews. 2000. The soil quality concept: A tool for evaluating sustainability. pp. 15-26. In: S. Elmholt, B. Stenberg, A. Gronlund, and V. Nuutinen (eds.). *Soil Stresses, Quality and Care*. DIAS report, 38. Danish Institute for Agricultural Sciences. Tjele, Dinamarca.

NOTA IMPORTANTE: ESCALA LOCAL Y REGIONAL

Para efectos de la presente investigación se entiende como:

ESCALA LOCAL a la zona suroeste del Suelo de Conservación de la Ciudad de México dentro de las alcaldías Magdalena Contreras y Tlalpan; referente a las comunidades Magdalena Atlitlic; San Nicolas Totolapan; San Andrés Totoltepec; SAN Miguel; Santo Tomás Ajusco y Magdalena Petlacalco.

ESCALA REGIONAL a la Ciudad de México en general.

PONDERACIÓN DE MATRICES

FUNCIONES ECOSISTÉMICAS A SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS. ESCALA LOCAL

4. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel LOCAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hídrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
1. LOCAL FE. Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel LOCAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hídrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
2. LOCAL FE. Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel LOCAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hídrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
3. LOCAL FE. Protección de acuíferos por cobertura vegetal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

FUNCIONES ECOSISTÉMICAS A SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS. ESCALA REGIONAL

7. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel REGIONAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hídrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
1. REGIONAL FE. Almacenamiento de carbono orgánico en el suelo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

8. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel REGIONAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hídrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
2. REGIONAL							
FE. Retención de excesos de precipitación por cobertura vegetal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9. De acuerdo con su conocimiento asigne UN ÚNICO NIVEL DE RELEVANCIA (ya sea "Muy relevante", "Relevante" o "Poco relevante") a nivel REGIONAL de la Función Ecosistémica (filas) en relación con el Servicio Ecosistémico Hidrico (columnas) que se presenta. *Favor de hacer caso omiso de las filas entre FE y SEH

Check all that apply.

	Consumo doméstico de agua	Uso potencial de agua para agricultura/riego	Caudal disponible en manantiales y arroyos	Regulación climática	Amortiguación de inundaciones	Calidad del agua	Erosión hídrica y sedimentación
3. REGIONAL FE. Protección de acuíferos por cobertura vegetal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Poco relevante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

MUCHAS GRACIAS POR SU PARTICIPACIÓN

This content is neither created nor endorsed by Google.

Google Forms



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación



Balcarce, 24 de noviembre de 2021

ALEJANDRA PEDRAZA GAMA
S/D

Por la presente los integrantes del equipo de ECOSER queremos manifestar nuestro más sincero agradecimiento por el aporte realizado al protocolo a través de los productos generados en su tesis para optar el título de Magister titulada: "VULNERABILIDAD SOCIOECOLÓGICA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO DE USO DE SUELO A NIVEL DE CUENCA EN LA PERIFERIA URBANA. CASO CDMX, 1999–2039".

Saludos cordiales,

Dra. María Paula Barral

Integrante del equipo de ECOSER



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación