



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y
CONSERVACIÓN**

TESIS

**ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA SOCIO-
ECOLÓGICO DE LA ZONA SUR DE LA SIERRA
MADRE ORIENTAL, MÉXICO**

**Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias**

PRESENTA

OMAR LARIOS LOZANO

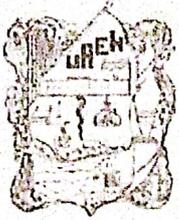
Director

Dr. Numa Pompilio Pavón Hernández

Codirectora

Dra. Jessica Bravo Cadena

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, febrero de 2024



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
 Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
 Área Académica de Biología

Mineral de la Reforma, Hgo., a 14 de febrero de 2024

Número de control: ICBI-AAB/088/2024
 Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado "Estado actual del sistema socio-ecológico de la Zona Sur de la Sierra Madre Oriental, México", realizado por el sustentante Omar Laríos Lozano con número de cuenta 263903 perteneciente al programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

El Comité Tutorial

Dr. Numa P. Pavón Hernández
 Vocal

Dr. Arturo Sánchez González
 Presidente



Dra. Jessica Bravo Cadena
 Secretario



Dra. María Teresa Pulido Silva
 Suplente

LFRP/CIAF

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5
 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma,
 Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono +52 (771) 71 720 00 ext. 6640, 6642
 Fax 2112
 aab_icbi@uaeh.edu.mx



DEDICATORIA

A la Tierra...

Dos años atrás tenía una idea de lo que sería culminar mi tesis de grado, creía que bastaba con elegir un interesante tema, obtener la excelencia en mis materias y ofrecer un buen artículo de investigación. Después de vivir como un estudiante de posgrado tengo claras dos cosas, 1) mi perspectiva del pasado era banal, 2) me quedo con una sensación de insatisfacción, encuentro un gran potencial en la presente, sin embargo, su trascendencia ya no solo depende de mí. No hay intención en estas líneas de arruinar el esfuerzo de años, simplemente es un pensamiento que creo conveniente dejar aquí.

Esta tesis está dedicada a la Tierra, porque básicamente es la razón de todo lo que amó y porque de momento es todo lo que puedo hacer por ella. Tengo la esperanza de que la vida y la circunstancias me permitan continuar este camino, o que, en su defecto, esta tesis sirva como herramienta de aprendizaje pues considero su contenido, valioso.

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT por la beca otorgada que hizo posible la presente tesis.

A mi comité tutorial por sus cuestionamientos y comentarios para mejorar mi trabajo.

Al Dr. Numa Pavón por acceder a dirigir la presente. Las relaciones académicas no siempre son fáciles y según mi experiencia es complicado encontrar un guía que te deje crecer en el proceso y usted fue ese guía. Por sobre todo le agradezco permitirme equivocarme y en el proceso redirigirme con su sabiduría.

Yokebed, José Fabio y Alexis. Amigos este viaje juntos fue divertido. Fue, es y será mágico, reír, llorar, frustrarnos y resurgir juntos.

Elizabeth y Yael. Gracias por sus años de amistad y por siempre alentarme en mis mejores y peores momentos, son mis mejores amigos y agradezco a la vida por ello.

A mis padres, Natalia y Bernardo por su amor, comprensión y apoyo. Gracias por alentarme siempre.

A mis tíos Victoria y Fernando. Gracias ser un gran soporte y por estar a mi lado.

A mi persona. La vida es muy rara, frustrante y compleja. Gracias por no darte por vencido.

CONTENIDO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| I. RESUMEN..... | 4 |
| II. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| III. ANTECEDENTES..... | 7 |
| IV. JUSTIFICACIÓN..... | 11 |
| V. OBJETIVOS | 12 |
| V.1 General..... | 12 |
| V.2 Particulares..... | 12 |
| VI. MÉTODO..... | 13 |
| VI.1 Área de estudio..... | 13 |
| VI.2 Delimitación espacial y caracterización del sistema socio-ecológico..... | 14 |
| VI.3 Contexto ambiental | 15 |
| VI.3.1. Clima | 15 |
| VI.3.2. Usos del suelo y vegetación | 16 |
| VI.3.3. Diversidad Biológica | 16 |
| VI.4 Contexto político y socioeconómico | 17 |
| VI.4.1. Organización política y social | 17 |
| VI.4.2. Características de la población..... | 18 |
| VI.4.3. Actividades económicas | 18 |
| VI.4.4. Servicios sociales | 18 |
| VI.4.5. Identidad cultural | 19 |
| VI.5 Medición de la condición socio-ecológica..... | 21 |
| VI.5.1. Índice del Estado Socio-ecológico | 21 |
| VI.5.2. Generación de la base de datos | 27 |
| VI.5.3. Representación espacial del SESI..... | 28 |
| VI.5.4. Análisis de correlación espacial..... | 28 |
| VI.6 Análisis estadísticos..... | 30 |
| VI.6.1. Correlaciones no paramétricas | 30 |
| VI.6.2. Modelo Lineal Generalizado | 30 |
| VI.6.3. Análisis de Componentes Principales..... | 31 |
| VI.7 Dinámica de sistemas..... | 31 |
| VI.7.1 Construcción de los modelos dinámicos..... | 32 |
| VI.7.2 Generación del modelo dinámico conceptual para el SSE-ZSSMO..... | 34 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| VII. RESULTADOS | 36 |
| VII.1. Condición Socio-Ecológica del SSE-ZSMMO..... | 36 |
| VII.1.1 Autocorrelación espacial de los valores del SESI | 39 |
| VII.1.2. Correlaciones entre indicadores | 41 |
| VII.1.3. Modelo lineal generalizado | 41 |
| VII.1.4. Análisis de ordenamiento por Componentes Principales | 43 |
| VII.2 Modelo dinámico del sistema socio-ecológico..... | 44 |
| VIII. DISCUSIÓN..... | 47 |
| VIII.1 Medición del estado del sistema socio-ecológico | 47 |
| VIII.2. Modelo dinámico de la ZSSMO..... | 56 |
| IX. CONCLUSIONES | 57 |
| X. LITERATURA CITADA | 58 |
| XI. APÉNDICES..... | 80 |

GLOSARIO

| | |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| ACP | Análisis de Componentes Principales |
| APH | Acceso a Agua Potable |
| ARI | Índice de resiliencia en agroecosistémica |
| CENAPRED | Centro Nacional de Prevención de Desastres |
| CONABIO | Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad |
| CONEVAL | Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social |
| CS | Centros de Salud |
| DS | Dinámica de Sistemas |
| Ej | Ejidatarios |
| EyCA | Ejidos y Comunidades Agrarias |
| GA | Gobernanza Administrativa |
| GE | Gobernanza Económica |
| GLM | General Linear Model |
| GP | Gobernanza Política |
| GSS | Gasto en Servicios Sociales |
| H-IVSE | Relación Hombre-Índice del Valor de los Servicios Ecosistémicos |
| IANP | Índice de Áreas Naturales Protegidas |
| IBG | Índice de Buena Gobernanza |
| IBH | Index Baltic Health |
| ICTR | Índice de Ciclones Tropicales |
| ID | Índice Delictivo |
| IDES | Índice de Deslaves |
| IDH | Índice de Desarrollo Humano |
| IDHS | Índice de Desarrollo Humano Sostenible |
| IDP | Índice de Densidad Poblacional |
| IG | Integridad de Gobernanza |
| IINU | Índice de Inundaciones |
| IIP | Índice de Incidencia de la Pobreza |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística y Geografía |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISEQ | Índice de Sequías |
| IVSE | Índice del Valor de los Servicios Ecosistémicos |
| MD | Modelo Dinámico |
| MEA | Millennium Ecosystem Assessment |
| NENMS | Número de Escuelas de Nivel Medio Superior |
| NEP | Número de Escuelas Primaria |
| NEPS | Numero de Escuelas Secundaria |
| NIAP | Número de Iniciativas Aprobadas por los cabildos |
| NSC | Numero de sesión de los cabildos |
| OHI | Ocean Health Index |
| ONG | Organizaciones NO Gubernamentales |
| PNUD | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo |
| PPAR | Porcentaje de la población con acceso al servicio de recolección de residuos |
| PRR | Personal de servicios de recolección de residuos |
| PSE | Presiones Socio-Ecológicas |
| PSS | Personal Sanitario |
| RAPP | Relación de alumnos por profesor en primaria |
| RAPS | Relación de alumnos por profesor en secundaria |
| RI | Razón de Ingreso |
| RRPD | Residuos Recolectados por Día |
| RSE | Resiliencia Socio-Ecológica |
| SA | Servicios Ambientales |
| SESI | Social-Ecological Status Index |
| SSE | Sistema Socio-Ecológico |
| TIR | Total de Ingresos Recaudados |
| TPEA | Tasa d Población Económicamente Activa |
| TPV | Tasa de Participación Votante |
| TRF | Total de Recursos Financieros |
| UE | Unidades Económicas |

| | |
|----------------|------------------------------------------------|
| V-VESVI | Índice del cambio en los Servicios Ambientales |
| ZSSMO | Zona Sur de la Sierra Madre Oriental |

I. RESUMEN

Los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) estudian las interrelaciones entre los componentes sociales y ambientales, para conocer su estructura y dinámica. El uso de índices ha resultado útil para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de esta naturaleza, ya que generan información de referencia sobre su condición actual y para el desarrollo de una política integral que apoye su gestión. Para evaluar la condición socio-ecológica de la Zona Sur de la Sierra Madre Oriental, se emplearon dos aproximaciones metodológicas; el marco de análisis del SESI como un índice compuesto de múltiples indicadores socioambientales, y la dinámica de sistemas para el reconocimiento de su estructura y principales factores de cambio. Para la estimación del SESI se empleó información socioambiental de 28 municipios al interior de la zona de estudio. Los valores del SESI oscilaron entre -0.244 y 0.361 . Los municipios de Eloxochitlán y Xochicoatlán presentaron la mejor condición debido a su mayor resiliencia en comparación al resto de municipios. Los municipios de Huehuetla, Huazalingo y Pisaflores presentaron los valores del SESI más bajos, debido a sus valores altos de presiones socio-ecológicas. La condición de la zona obedece a distintas causas asociadas a la capacidad de los municipios ante la problemática socioambiental, como la deforestación por las actividades productivas agravadas por la falta de planeación paisajística, la falta de capacidades de la población rural sobre todo la población indígena. Estos factores han moldeado la dinámica del sistema socio-ecológico, con resiliencia baja y el aumento de la vulnerabilidad ante impactos naturales y antrópicos, que se evidencian en la dinámica del sistema. Es imperante mejorar la condición socio-ecológica a partir de estrategias que atiendan la disparidad financiera entre municipios destinada al gasto público, al desarrollo humano y atender los efectos negativos sobre los ecosistemas naturales y los servicios ambientales.

II. INTRODUCCIÓN

Un sistema socio-ecológico (SSE) se define como una estructura compleja con dos principales componentes, el social y el ecológico (Folke, 2006; Raskin, 2008). El componente social incluye las formas de organización humana, sus valores éticos, conocimiento, ideología e identidad cultural, así como también las instituciones políticas, económicas y sociales. Mientras que el componente ecológico incluye a los ecosistemas, los componentes del suelo, los procesos biológicos, climáticos, hidrológicos y fisicoquímicos (Raskin, 2006; Estoque y Murayama, 2014).

Las características que definen a un SSE subyacen en las interacciones entre sus componentes. Las interacciones dan paso a sistemas complejos y dinámicos (Liu *et al.*, 2007). El funcionamiento de los SSE está condicionado por dinámicas no lineales, sucesos impredecibles y umbrales de cambio (Folke *et al.*, 2002). Las interacciones generan bucles de retroalimentación y expresan propiedades emergentes que rigen procesos de transformación, autoorganización y adaptación (Folke *et al.*, 2005; Abram y Dyke, 2018). Además, los SSE son estructuras anidadas (Berkes, 2003), es decir, los SSE de escala local están dentro de SSE de escala regional y global. En cada escala, el SSE es autónomo, sin embargo, se relacionan entre sí y se retroalimentan (Raskin, 2006).

La concepción de los SSE se planteó como un nuevo paradigma ante los progresivos problemas socioambientales. Los SSE reconocen la necesidad del trabajo multidisciplinario, desde un enfoque holístico, para encaminar el desarrollo humano sostenible y la conservación de los recursos naturales (Ostrom, 2009; Binder *et al.*, 2013). El marco conceptual de los SSE (Ostrom, 2009), ha dado pie a la creación de índices como herramientas para generar información sobre la condición de distintos SSE alrededor del mundo, por ejemplo, el índice del estatus socio-ecológico SESI (Estoque y Murayama, 2014), el índice de salud del Báltico IBH (Blenckner *et al.*, 2021) y el índice de Satoyama (Natori y Hino, 2021). El marco teórico del SSE ha incluido la dinámica de sistemas (DS) (Forrester, 1961), para generar modelos que expliquen la estructura de los sistemas reales (Crookes *et al.*, 2013; Abadi *et al.*, 2015; Tiller *et al.*, 2016). La DS identifica los mecanismos responsables de generar estabilidad o inestabilidad y la evolución de la dominancia de tales mecanismos en el tiempo (Abram y Dyke, 2018).

Los métodos para el estudio de los SSE utilizan el enfoque de la resiliencia socio-ecológica, esta propiedad es intrínseca a todo sistema complejo, refleja la capacidad de los SSE para asimilar las presiones socioambientales, mantener sus funciones y brindar

oportunidades de experimentar nuevas rutas de cambio (Folke, 2006); por lo que presta especial atención en la identificación de las fuentes de presión externas e internas y cómo afectan la dinámica de los SSE (Anderies *et al.*, 2004).

La información resultante de la DS y el uso de índices pueden influir en el desarrollo de políticas públicas (Ortega *et al.*, 2014), y en el reconocimiento de los actores sociales o institucionales clave en la toma de decisiones para la gestión de los SSE (Berkes, 2007; Ostrom, 2009). Es así que estudios de caso alrededor del mundo enfatizan la importancia del enfoque socio-ecológico para el desarrollo socioeconómico, la gestión de los recursos naturales y la atención de las presiones ambientales (Baños-González *et al.*, 2016; Estoque y Murayama, 2017; Noble *et al.*, 2021; Gonzales-Redin *et al.*, 2019).

En México, el número de estudios sobre SSE ha aumentado desde principios de la década pasada (Balvanera *et al.*, 2017). Se ha probado su impacto en el análisis de la resiliencia de los ecosistemas costeros (Ávila y Espejel, 2020), en el estudio del cambio climático y la migración (Escalante y Basurto, 2014) y en la conservación basada en comunidades (Lazos-Chavero *et al.* 2016; Crouzeilles *et al.*, 2020). Sin embargo, su conceptualización es poco clara en los instrumentos de política pública (Challenger *et al.*, 2014) y se requiere de un mejor entendimiento de su aplicación por parte de los actores políticos (Challenger *et al.*, 2018).

Como estudio de caso, esta investigación aborda parte de la zona sur de la Sierra Madre Oriental, que en adelante será referida como ZSSMO. El área está integrada por 28 municipios, de los cuales 22 pertenecen al estado de Hidalgo y seis al estado de Veracruz. Este territorio es importante desde el punto de vista biológico ya que posee alta biodiversidad (CONABIO y SEMARNATH, 2021), es generadora de servicios ecosistémicos (Monterroso-Rivas *et al.*, 2010; CONAFOR, 2011a), y con una amplia gama de actividades productivas (Gual y Rendón, 2014; Lorenzo *et al.*, 2019). Sin embargo, en los últimos 50 años la degradación de sus recursos naturales se ha acelerado (Lorenzo *et al.*, 2019). Además, la población humana en la zona está altamente marginada, en condición de pobreza, con carencias sociales y con sistemas de gobernanza débiles (CONEVAL, 2020).

La degradación socio-ecológica de la zona subyace a factores políticos, demográficos, tecnológicos y culturales (Lorenzo *et al.*, 2019). Los principales modos de explotación de los recursos, que además han propiciado la transformación y pérdida de la cobertura vegetal, son las actividades agrícolas, ganaderas y el aumento del crecimiento urbano (Ortega y Castillo, 1996). Este panorama obliga a los gobiernos, instituciones y

organizaciones sociales a transitar hacia el trabajo colaborativo para atender su problemática.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la condición socio-ecológica de la ZSSMO y la estructura que determina su dinámica. Para la evaluación se emplearon dos aproximaciones metodológicas. La primera fue la medición de la condición socio-ecológica mediante el uso del SESI (Estoque y Murayama, 2014). Un índice compuesto de múltiples indicadores de resiliencia o factores de presión a partir de atributos sociales y ecológicos. El otro enfoque fue la dinámica de sistemas para reconocer la estructura del sistema, la identificación de sus componentes e interacciones. Cabe señalar que este estudio se circunscribe a la caracterización del SSE referido, sin embargo, podría ser empleado en adelante como herramienta para conectar las decisiones políticas para la gestión de los recursos y la elaboración de planes de manejo y conservación de la biodiversidad.

III. ANTECEDENTES

Con el comienzo de la era de la gran ciencia (Big science) durante el siglo XX (Capshew y Rader, 1992), el desarrollo del conocimiento científico en sus distintas áreas condujo cambios de paradigma que impactarían en las dinámicas sociopolíticas de las sociedades humanas y sus relaciones con el entorno. Por ejemplo, el estudio de la complejidad de los procesos naturales (Wellington, 1952; Fujita, 1954; MacArthur, 1955, Holling, 1961), el desarrollo humano, las bases de sus modelos económicos y las interacciones con los ecosistemas (Edmonson, 1961; De Vries, 1994; Berg, 1992; Crafts, 1996; Griffin y Khan, 1992), dieron paso al desarrollo de la teoría de los sistemas y la teoría de la complejidad (Begun, 1994; Berkes *et al.*, 2003), las cuales contribuyeron al entendimiento de las dinámicas sociales y ecológicas como sistemas complejos y del papel de las sociedades humanas en torno a los problemas ambientales.

La dinámica de sistemas propuesta por Forrester (1961) y el desarrollo del concepto de la resiliencia por Holling (1973), sirvieron como catalizadores del marco conceptual de los sistemas socio-ecológicos, enfatizando la importancia de reconocer las fuentes de origen de las relaciones de los sistemas complejos (Holland, 1992). En el caso de los sistemas socio-ecológicos incentivaron el desarrollo de marcos de análisis enfocados a estimar los umbrales de cambio en los sistemas naturales derivados de las presiones

antropogénicas y sus consecuencias a largo plazo para los ecosistemas y para las poblaciones humanas (Holling, 1978; Holling, 1992).

Los impactos de la crisis socioambiental tales como la pérdida de cobertura forestal, y el cambio climático, derivados de la actividad económica mundial y el pobre desempeño de los sistemas de gobernanza, comenzaron a ser estudiados con mayor interés a partir de la década de 1990 y evidenciaron otros problemas menos entendidos como la pérdida de identidad cultural (Gowdy, 1994), la falta de capacidades institucionales y la marginación social (Ostrom, 1990). Tales problemáticas adquirieron mayor relevancia a la luz del desarrollo de la ciencia de la sostenibilidad, que reconoció la importancia de la participación social y del trabajo colaborativo en la generación de estrategias para el desarrollo sostenible de las poblaciones humanas y la gestión de la disponibilidad-demanda de recursos naturales (Godland, 1995; Raskin *et al.*, 1996; Polski y Ostrom, 1999), lo que contribuyó a la generación de iniciativas de alcance internacional tales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible para la atención de los crecientes desafíos.

Hacia finales de la década del 1990 se consolidó la teoría de los sistemas socio-ecológicos y la integración de las partes (Holling, 1998). Esta base conceptual se empleó para el desarrollo del marco de análisis de los sistemas socio-ecológicos (Berkes y Folke, 1994). En este marco, se propuso que los subsistemas social y ecológico tienen la misma importancia ya que los SSE son el resultado de la conjugación de ambas dimensiones y su dinámica está condicionada por sus interacciones. El marco conceptual de los SSE se planteó desde una visión holística, donde consecuencias como la pérdida de los ecosistemas o las desigualdades sociales resultan de la acción de múltiples factores tales como, los modos de vida de las poblaciones humanas, la disponibilidad de los recursos, los modelos socioeconómicos y los sistemas de gobernanza y reconoce que la continuidad de en el tiempo de los SSE dependen de la atención de cada una de sus partes (Ostrom (2009).

En la búsqueda por mejorar la comprensión de los SSE, surgieron distintos conceptos para abordar su estudio. Scholz y Binder (2004) los llamaron sistema hombre-ambiente, para incluir todos los sistemas ecológicos y tecnológicos relevantes para el hombre o que son afectados por él. Janssen y Ostrom (2006) los definieron como sistema complejos y adaptativos, con componentes sociales y biofísicos que interactúan en múltiples escalas espaciales y temporales. Raskin, (2008) los llamó sistemas ecológico-humano, con dos grandes dominios, el humano y los ecosistemas. Ostrom (2009), los redefinió como, múltiples subsistemas y variables internas que se integran en múltiples niveles, en un sistema anidado; interactúan y se afectan entre sí.

A la par del desarrollo conceptual, se abordaron cuestiones pragmáticas en la búsqueda de la comprensión de los SSE en el mundo real. Se han realizado trabajos enfocados en la caracterización de los factores causantes de perturbación ligados a los procesos de adaptación, transformación (Carpenter, 2001; Walker *et al.*, 2004) y en la resiliencia como medida de los umbrales de cambio y las capacidades de los SSE para afrontar los factores de perturbación entendida como la capacidad de resiliencia de los SSE (Folke, 2006, Speranza *et al.*, 2014). Por ejemplo, las prácticas tradicionales asociadas al uso de los recursos, ligadas a una identidad cultural (Colding *et al.* 2003; Ndayizeye *et al.*, 2020) con distintos estudios de caso alrededor del mundo (MEA, 2005; Berkes, 2004, 2007; Ostrom, 2009) se ocuparon en identificar las condiciones bajo las cuales los SSE podría considerarse sistemas complejos resilientes.

Como apoyo al enfoque práctico, comenzaron a emplearse algunos indicadores para cuantificar distintos atributos de los SSE (Estoque y Murayama 2014, 2017). Por ejemplo, el Índice de Desarrollo Humano (IDH; PNUD, 1990), un indicador del avance de los países en materia de salud, educación e ingresos (PNUD, 2022). El IDHS una modificación del IDH convencional para medir las emisiones per cápita de cada país (Togtokh, 2011). El índice de sostenibilidad propuesto para medir las actividades sociales, presiones ambientales y las condiciones del entorno (Azar *et al.*, 1996; Quiroga-Martínez, 2007).

Sin embargo, por sí solos los indicadores no reflejaban las condiciones de los SSE, por lo que se incorporaron dentro de índices más generales basados en marcos conceptuales como el de Ostrom (2009). Surgieron propuestas como el índice de vulnerabilidad, una medida compuesta por indicadores sociales, ecológicos, de salud física y mental, fue empleado para evaluar la vulnerabilidad de la comunidad de Awajún en la Amazonía peruana (Tallman, 2016). El SESI que ya se ha empleado en mediciones a nivel de país (Estoque y Murayama, 2014), global (Estoque y Murayama, 2017) y local (Kurniawan, *et al.*, 2019). El Índice de Salud Báltico (BHI), propuesto para evaluar el grado de presión antropogénica y la efectividad de las políticas de gestión del Mar Báltico, del cual toma su nombre (Blenckner *et al.*, 2021). Recientemente el Índice de resiliencia en agroecosistémica (ARI), fue propuesto para evaluar las amenazas biofísicas y socioeconómicas que operan en la cuenca del Río Grande en los andes colombianos (Suárez-Pardo *et al.*, 2022).

En el contexto mexicano, el enfoque de los sistemas socio-ecológicos se ha estudiado desde sus aspectos conceptuales hasta su aplicación en distintos estudios de

caso (Balvanera *et al.*, 2017; Maass, 2018). Calderón-Contreras (2017), presentó un compendio con estudios de caso en donde se abordaron distintos tópicos, como el manejo tradicional de los recursos naturales en comunidades del centro del país (Pérez-Alcántara *et al.*, 2017). La importancia de áreas naturales protegidas para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Monsalvo *et al.*, 2017). Además, en el estudio de los procesos de deterioro por actividades antrópicas de los recursos hídricos en áreas conurbadas de la ciudad de México (Almeida *et al.*, 2017).

Otros ejemplos de la aplicación del enfoque socio-ecológico son, el trabajo de Cervantes y colaboradores (2014) en una comunidad del estado de Guerrero, donde se llevaron a cabo estrategias de rehabilitación de sus áreas naturales y su sistema de gobernanza local. En los sistemas costeros del pacífico sur, en el estado de Oaxaca y el norte de la península de Yucatán, se realizaron mediciones de la afectación de las actividades turísticas, petrolera y pesquera sobre su resiliencia (Ávila y Espejel, 2020).

Al norte del país en el estado de Sonora, De la Torre-Valdez (2019) estudio la subcuenca baja del Río Sonora e identificó las fuentes de perturbación más importantes y elaboró una propuesta para el desarrollo de mecanismos de gestión y rehabilitación. Para la zona centro-este de México se realizó un modelo del balance hídrico sobre la disponibilidad-demanda de agua de los sectores socioeconómicos bajo escenarios de cambio climático para predecir tendencias futuras (Bravo-Cadena *et al.*, 2021).

Por otro lado, se han realizado avances en materia de políticas públicas. Se ha estudiado la posición de los actores políticos, quienes respaldan el enfoque de los sistemas socio-ecológicos para conducir gestión ambiental y el desarrollo sostenible, aunque aún falta madurar el entendimiento sobre su aplicación (Challenger *et al.*, 2018). Algunos intentos de propuestas para la gestión ambiental han revelado la falta de capacidad de acción de los gobiernos (Challenger *et al.* 2014; Lugo y de la Cruz, 2018). Por último, en el ámbito institucional se han desarrollado métodos para el monitoreo de los programas sociales alineados al desarrollo sostenible (CONEVAL, 2014). Se han generado instrumentos en materia de cambio climático para la toma de decisiones en la planeación y desarrollo social (INECC, 2018). También se han generado sinergias institucionales y creado áreas de estudio transdisciplinarias dedicadas al estudio de la resiliencia de los ecosistemas en el contexto de la sustentabilidad y el cambio global.

IV. JUSTIFICACIÓN

La pérdida de la biodiversidad, los servicios ecosistémicos, la degradación generalizada de los ecosistemas y las alteraciones climáticas a nivel local, son efectos ligados a la mala gestión de los recursos, planificación urbana y el modelo económico no sostenible (IPCC, 2021). Lo anterior ha tenido consecuencias negativas en la reducción de la seguridad alimentaria, la salud, el bienestar humano y el crecimiento de la brecha de desigualdad social (Ortega *et al.*, 2014).

En este trabajo se analiza la condición socio-ecológica y la dinámica del sistema de la ZSSMO que sufre un importante proceso de degradación generalizado, erosión cultural (Bravo-Cadena y Pavón, 2018), marginación social, emigración (CONEVAL, 2020), pérdida de sus ecosistemas naturales (Lorenzo *et al.*, 2019) y cambios ambientales exacerbados por el cambio climático (Ponce-Reyes *et al.*, 2013). Sin embargo, existen áreas importantes para la conservación de los servicios ecosistémicos y la biodiversidad (CONABIO, 2021), así como de importancia cultural por la presencia de las comunidades indígenas que son fundamentales para sostener y aumentar la resiliencia del sistema socio-ecológico. Por tanto, los resultados de este trabajo pueden contribuir a la generación de estrategias para el aprovechamiento de los recursos naturales y el impulso del desarrollo humano sostenible que se ajusten a las realidades que viven los distintos actores y las condiciones del entorno.

V. OBJETIVOS

V.1 General

Evaluar el estado actual y estructura del Sistema Socio-Ecológico de la zona sur de la Sierra Madre Oriental, para la generación de una línea de información base sobre su dinámica de funcionamiento y los principales impulsores encargados de disminuir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia.

V.2 Particulares

- 1) Generar un diagnóstico de los componentes del SSE mediante el uso de indicadores que miden sus atributos sociales, de gobernanza, ambientales y los factores de presión socioambiental.
- 2) Elaborar representaciones espaciales del diagnóstico de los indicadores socioambientales mediante el uso de sistemas de información geográfica.
- 3) Identificar los indicadores de cambio que más impactan en el estado del SSE.
- 4) Analizar las interrelaciones entre indicadores sociales y ecológicos a partir de un modelo dinámico para representar la estructura del SSE.

VI. MÉTODO

VI.1 Área de estudio

La ZSSMO se localiza entre los estados de Hidalgo y Veracruz, integra una superficie de 787,996 ha; se ubica entre las coordenadas UTM 534191, 2291336 (Figura 1). Limita al norte con los estados de San Luis Potosí y Querétaro y al sur con el estado de Puebla. Las topofomas dominantes del relieve son, sierra, lomerío, meseta, llanura, valles intermontanos y cañones; ocupa un rango altitudinal de 100 m a ~ 3000 msnm (INEGI, 1992; Sánchez-Rojas y Bravo-Cadena, 2017).

El sistema socio-ecológico se extiende en un segmento de la subprovincia Carso Huasteco, que forma parte de la provincia Sierra Madre Oriental. En Hidalgo, esta área ocupa la porción noreste y centro-este de la entidad; parte de la Huasteca Hidalguense, Sierra Alta, Sierra Otomí-Tepehua, Valle de Tulancingo y Valle del Mezquital norte. Comprende los municipios de Agua Blanca de Iturbide, Calnali, Chapulhuacán, Eloxochitlán, Huazalingo, Huehuetla, Jacala de Ledezma, Juárez Hidalgo, La Misión, Lolotla, Metztlán, Molango de Escamilla, San Agustín Metzquititlán, San Bartolo Tutotepec, Tenango de Doria, Tepehuacán de Guerrero, Tianguistengo, Tlahuiltepa, Tlanchinol, Xochicoatlán y Zacualtipán de Ángeles. En Veracruz abarca parte de la región Huasteca Veracruzana, comprende los municipios de Huayacocotla, Iamatlán, Tlachichilco, Texcatepec, Zacualpan y Zontecomatlán de López y Fuentes.

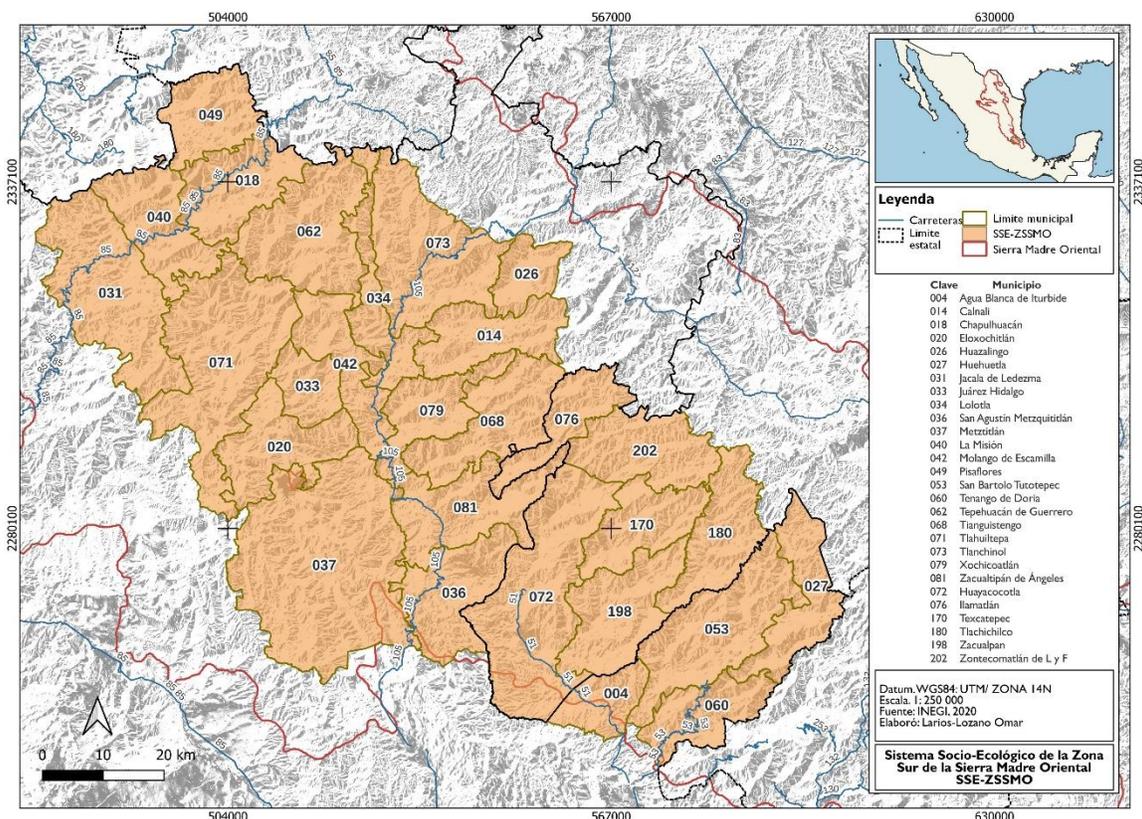


Figura 1. Ubicación del Sistema Socio-Ecológico de la ZSSMO. Fuente INEGI (2021b). Las superficies por municipio pueden consultarse en el Apéndice 1. Elaboración propia.

VI.2 Caracterización del sistema socio-ecológico

Se generó la cartografía del SSE empleando el programa QGIS, V., 3.16.11 de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo, 2021). Se integraron datos vectoriales de la delimitación estatal y municipal (INEGI, 2020b), usos del suelo y vegetación serie VII (INEGI, 2021b), clima (CONABIO, 1998), cobertura forestal (INEGI, 2021b), densidad poblacional (INEGI, 2020a), presencia de población indígena (INEGI, 2010) tenencia de la tierra (RAN, 2016), Áreas Naturales Protegidas (ANP; CONABIO, 2020) y peligros biofísicos (CENAPRED, 2015); escala de 1: 250 000. Para el caso específico de los usos del suelo y vegetación se realizó una reclasificación para generar una lectura adecuada de los mismos.

VI.3 Contexto ambiental

VI.3.1. Clima

La ubicación y condiciones orográficas del sistema son los principales factores que influyen en la distribución de los climas conocidos (Sánchez-Rojas y Bravo-Cadena, 2017). Con base en la clasificación de CONABIO (1998), en la zona se distribuyen 25 tipos de clima (Figura 2; valores de referencia para precipitación y temperatura en la Tabla 2, ver en Apéndice 2). Dominan los climas cálidos y semicálidos del grupo A, seguidos de los climas templados húmedos y subhúmedos del grupo C que distinguen a los municipios ubicados a mayor altitud. En menor medida están presentes los climas áridos, semiáridos y semifríos

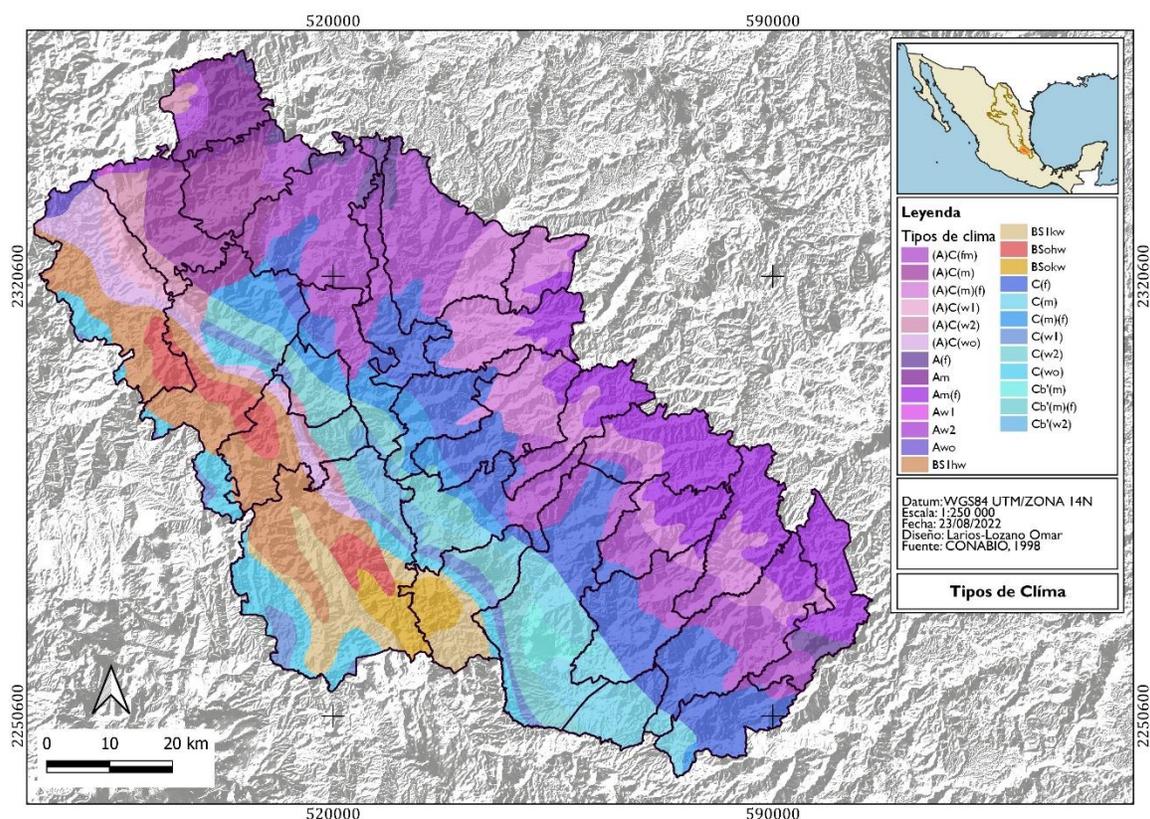


Figura 2. Distribución de los tipos de climas en el SSE ZSSMO. Fuente. CONABIO (1998). Mapa: WGS84/ZONA 14N UTM, escala 1: 250 000. Elaboración propia.

VI.3.2. Usos del suelo y vegetación

En la ZSSMO se reconocen 14 clases de usos de suelo y tipos de vegetación (INEGI, 2021b; Figura 3). Se destacan áreas para uso agrícola de distinta modalidad, asentamientos humanos, pastizal cultivado o inducido, cuerpos de agua, áreas con vegetación nativa primaria y secundaria de tipo arbóreo, arbustivo y/o herbácea, los cuales se describen en la Tabla 3 (Ver Apéndice 3).

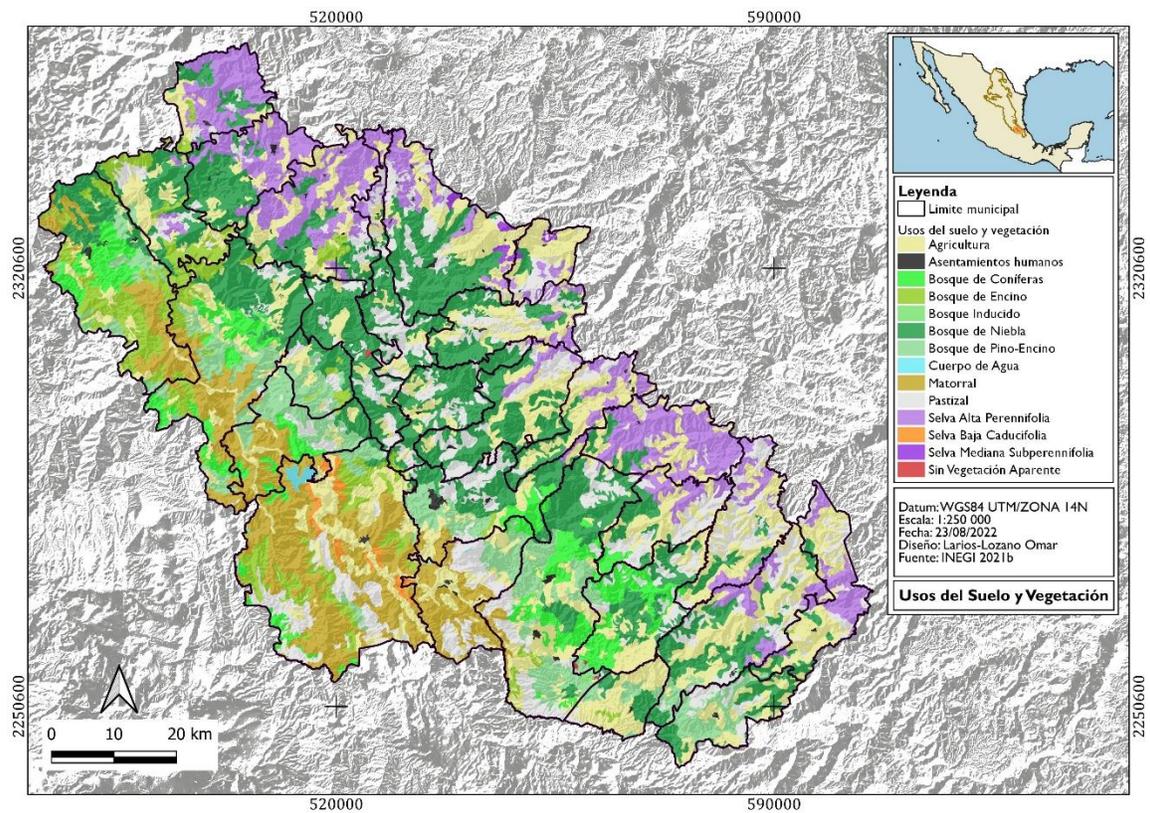


Figura 3. Distribución de los usos del suelo y tipos de vegetación identificados para la ZSSMO. Fuente: INEGI, (2021b). Serie VII. Mapa: WGS84/ ZONA 14N UTM, escala 1: 250 000. Elaboración propia.

VI.3.3. Diversidad Biológica

El área de estudio se reconoce como una zona de alta diversidad biológica. La flora vascular ha sido mejor estudiada en el bosque de niebla, los bosques de encino, bosques de coníferas, el bosque de pino-encino (CONABIO y SEMARNATH, 2021) y los matorrales (CONANP, 2003). En cuanto a la fauna, el bosque de niebla alberga la mayor diversidad de aves y mamíferos (CONABIO y SEMARNATH, 2021), seguido de los bosques de coníferas

y bosques de encino (Larios-Lozano *et al.*, 2017; CONABIO y SEMARNATH, 2021) y los matorrales (CONANP, 2003; Ortiz-Pulido *et al.*, 2010; Valencia-Herverth *et al.*, 2011; Rojas-Martínez *et al.*, 2017). Para los reptiles se ha descrito mayor diversidad para los bosques de coníferas, bosque de encino y bosque mixto (aunque estos son datos a nivel estatal, por lo que posiblemente para los bosques del sistema la riqueza sea menor), seguidos del bosque de niebla (CONABIO y SEMARNATH, 2021) y matorral (Valdez-Rentería *et al.*, 2018). Los artrópodos y hongos han sido poco estudiados, el mayor número de ellos se han descrito en el bosque de niebla (CONABIO y SEMARNATH, 2021).

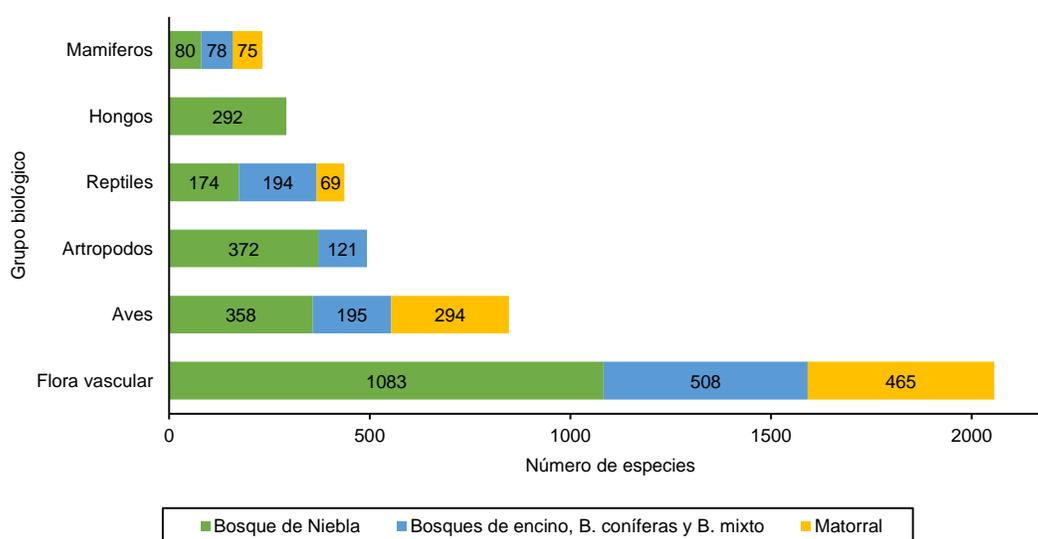


Figura 4. Riqueza de especies descrita por grupo biológico y tipo de vegetación al interior de la ZSSMO. Elaboración propia.

VI.4 Contexto político y socioeconómico

VI.4.1. Organización política y social

Según el proceso electoral 2020 y 2021, en la región gobiernan ocho partidos políticos (IEE, 2020; OPLE, 2021). En cuanto a la tenencia de la tierra, la superficie ejidal es de 175,492.6142 ha, la superficie comunal es de 123,837.9217 ha; la gestión está a cargo de 52,875 ejidatarios, el resto del territorio es de propiedad privada y/o pública (INEGI, 2016). En la zona se encuentran activas 84 Organizaciones No Gubernamentales (ONG) (SIRFOSC, 2021) (ver Tabla 4 en Apéndice 4).

VI.4.2. Características de la población

La población total del SSE asciende a 433,845 habitantes (INEGI, 2020a). Zacualtipán de Ángeles con el 8.7 % y Tlanchinol con el 8.6 % son los municipios con mayor población. El índice de marginación (IM) va de medio a muy alto, salvo para los municipios de Zacualtipán, San Agustín Metzquititlán, Molango y Xochicoatlán con IM bajo (INEGI, 2020a). Entre el 50 % y el 73% de la población mayor a 15 años cuenta con escolaridad básica terminada. La tasa de población económicamente activa se encuentra por arriba del 80 %; sin embargo, la condición de pobreza sobrepasa el 50 %, alcanzando porcentajes por arriba del 90% en los municipios de Ilimatlán y Texcatepec (CONEVAL, 2020). (ver Tabla 5 en Apéndice 5).

VI.4.3. Actividades económicas

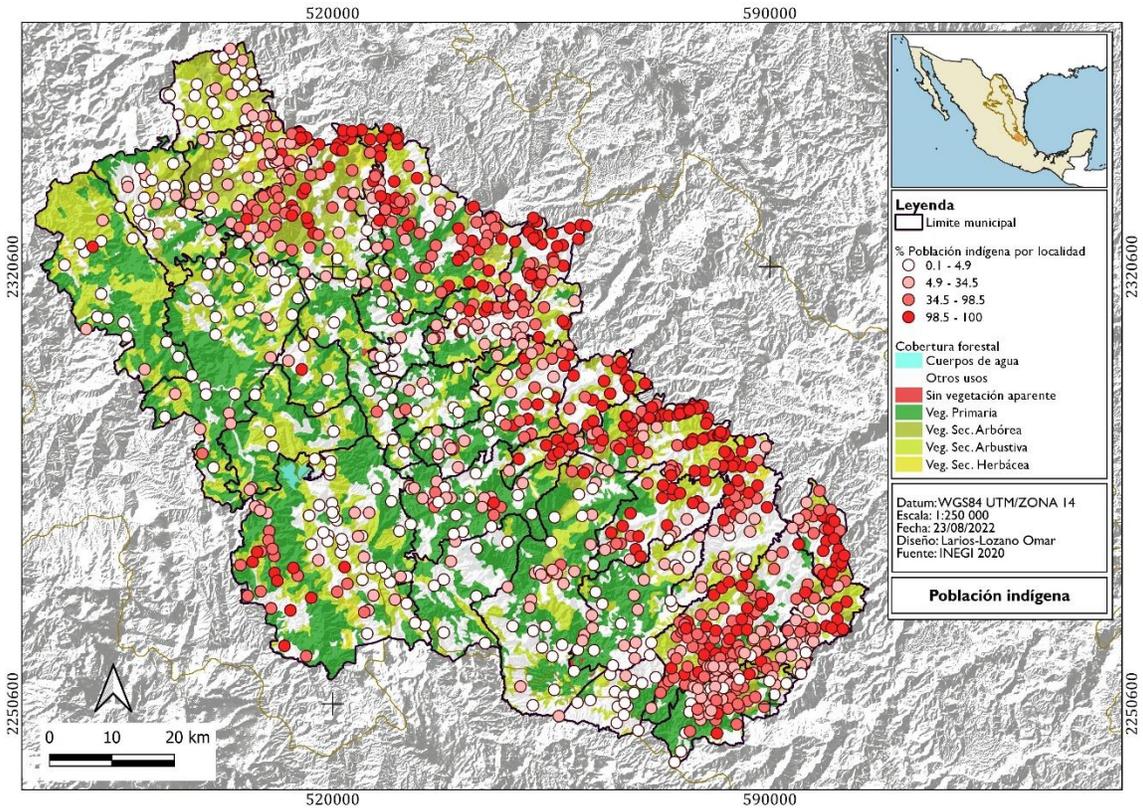
La matriz económica se conforma de 9,861 unidades económicas (UE), distribuidas en 352 actividades, siendo la principal el comercio al menudeo destinado a cubrir necesidades como la canasta básica, medicamentos y otros servicios destinados al hogar. El mayor número de UE se encuentran en el municipio de Zacualtipán (2,096) (INEGI, 2021a) (ver Figura 5 en Apéndice 6).

VI.4.4. Servicios sociales

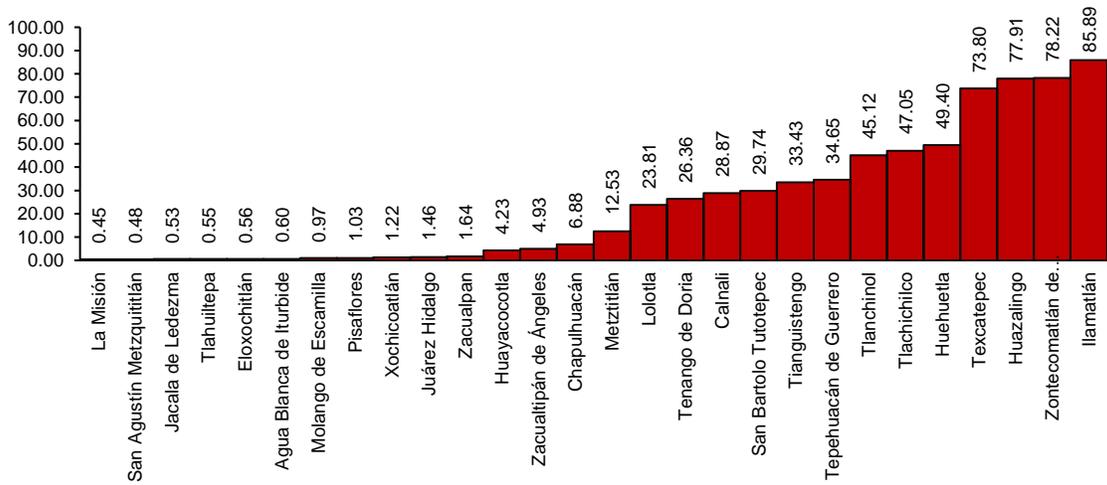
En la zona hay un promedio de 2.5 centros de educación primaria por cada 1000 habitantes. Se encuentran con 436 unidades de salud (DGIS, 2021), en promedio 0.90 unidades de salud por cada 1,000 habitantes. El acceso al agua potable dentro de la vivienda varía entre un 60 % (San Agustín Metzquititlán y Zacualtipán de Ángeles) y el 10 % (Ilimatlán y Zontecomatlán) (INEGI, 2020a). Los municipios más poblados generan en promedio 20,000 kg de basura por día, en comparación con Eloxochitlán y Huazalingo, que en promedio generan 350 y 580 kg de basura diarios. En cuanto al porcentaje de la población con acceso al servicio de recolección de residuos, solo los municipios de Calnali y la Misión alcanzaron el 100%. No se cuenta con información disponible para los municipios con mayor población (INEGI, 2019).

VI.4.5. Identidad cultural

El 24 % de la población total pertenece a algún grupo indígena (Náhuatl, Otomíes, Tepehuas y Totonaca). Tlanchinol, Ilimatlán, y Zontecomatlán, concentran el mayor porcentaje (34.9 %) (Figura 6). Conservan un diverso contacto lingüístico, por su cercanía, existen zonas en donde se habla más de una lengua, además, conservan costumbres y tradiciones similares (Guerrero, 2012). Los modos de vida de la población indígena fueron influenciados durante el periodo colonial, conservan rituales y tradiciones que amalgamaron las cosmovisiones locales y la influencia del sistema colonial (Ballesteros, 1997). La época de siembra es acompañada con rituales religiosos, por ejemplo, se colocan veladoras bendecidas en sus parcelas y casas, presentan ofrendas de flores y realizan ciclos de misas y oración (Cruz-Hernández *et al.*, 2020). Mantienen un vasto conocimiento tradicional sobre el uso de plantas medicinales. En Huehuetla y zonas adyacentes, 51 padecimientos son tratados con poco más de 19 plantas medicinales (López-Gutiérrez *et al.*, 2014). En otro estudio se describen hasta 274 especies de uso medicinal (Villavicencio y Pérez-Escandón, 2010). Más recientemente, Gómez Aíza y colaboradores (2016) elaboraron un catálogo de 84 especies de plantas medicinales.



A



B

Figura 6 Población indígena. Figura A) distribución de la población indígena por localidad al interior de la ZSSMO, la Figura B) indica el porcentaje de población indígena por municipio.

VI.5 Medición de la condición socio-ecológica

Para la medición de la condición socio-ecológica se han generado marcos de análisis que emplean índices compuestos como herramienta de estimación (Brousicche *et al.*, 2020), que a su vez se basan en marcos conceptuales propuestos para la comprensión de la complejidad de los SSE (Anderies *et al.*, 2004; Ostrom, 2009). Los marcos conceptuales definen qué son los SSE, describen sus elementos y cómo funciona (estructura), las fuentes de resiliencia y presión. Los marcos de análisis basados en índices retoman los aspectos conceptuales para incorporar indicadores de las dimensiones social y ambiental que sean útiles para estimar si un SSE mantiene una condición deseable o no. En este estudio se pone a prueba la utilidad de un marco de análisis que emplea un índice compuesto por indicadores socioambientales diseñado para medir la condición socio-ecológica.

VI.5.1. Índice del Estado Socio-ecológico

El *Índice del Estado Social-Ecológico* (SESI por sus siglas en inglés) fue propuesto por Estoque y Murayama (2014). Consta de dos componentes, la resiliencia socio-ecológica (RSE) y la presión socio-ecológica (PSE) (Figura 7). La RSE se mide a partir de aspectos sociales, institucionales y ecológicos. Se define como la integridad global del sistema en su capacidad para afrontar las presiones humano-naturales, al tiempo que mantiene, organiza y desarrolla sus funciones. La PSE se define como las fuerzas combinadas de los factores de estrés y las perturbaciones naturales y antrópicas, se mide considerando la vulnerabilidad (sensibilidad y la exposición a los riesgos geofísicos) y las presiones ambientales de origen antrópico. Tanto la RSE y PSE constan de tres subcomponentes, y a su vez, cada subcomponente está conformado por uno o más indicadores. El SESI es una medida neutra, no favorece ningún componente, lo que evita asumir *a priori* la importancia de sus componentes. El SESI se calcula como el residual de sus componentes:

Ecuación 1

$$SESI = R_{SE} - P_{SE}$$

Ecuación 1. Donde SESI, RSE y PSE son el índice de estado social-ecológico, la resiliencia social-ecológica y la presión social-ecológica de cada municipio, respectivamente.

En el SESI, sus componentes y subcomponentes reciben igual ponderación. Los valores del SESI oscilan entre -1 (que será el estado menos deseable) y 1 (el estado deseable). Cuanto mayor sean los valores de la resiliencia, o sea, más cercanos a 1, mayor será la integridad y capacidad del sistema para reorganizarse y mantener sus funciones a pesar de los disturbios. En contraste para la presión socio-ecológica, cuanto mayor sea el valor obtenido, más cercano a 1, mayores serán los niveles de tensión y las perturbaciones dentro del SSE. La lista de indicadores puede consultarse en la Tabla 6 (ver el Apéndice 7). El análisis se realizó a escala municipal. Para cada municipio se obtuvo un valor del SESI y de sus componentes correspondientes. Lo anterior debido a que la mayoría de la información de los indicadores se encuentra solo a nivel municipal.

En las Tablas 7 y 8 se indican en detalle los indicadores que integran a cada uno de los subcomponentes de la RSE y la PSE. Cabe señalar que en este estudio el subcomponente integridad de gobernanza se estimó mediante el Índice de buena Gobernanza (IBG), sin embargo, este es un indicador compuesto para el que no existe información, por lo que el IBG se construyó a partir del marco conceptual propuesto por Virola *et al.*, (2016), el cual se detalla en la sección VI.5.1.1. Tanto la RSE como las PSE se calcularon mediante la siguiente fórmula.

Ecuación 2

$$C_1 = \frac{1}{N} \sum S_{1,2,\dots,n}$$

Donde C1 es el valor del componente 1; S es el valor del subcomponente 1, 2, ...n; N es el número de subcomponentes.

El valor de los subcomponentes (salvo el componente sensibilidad a los peligros biofísicos) se emplea la siguiente ecuación.

Ecuación 3

$$S_1 = \frac{1}{N} \sum I_{1,2,\dots,n}$$

Donde S1 es el valor del subcomponente 1; I es el valor del indicador 1, 2, ...n; y N es el número de indicadores.

Para el caso de la sensibilidad a los peligros biofísicos se emplea la siguiente medida ponderada.

Ecuación 4

$$SZ = \alpha PDI + \beta PAI$$

Donde SZ (SPB) es la sensibilidad de cada municipio a los peligros biofísicos; α es el peso relativo de PDI (índice de densidad de población) y β es el peso relativo de PAI (índice de Áreas Naturales Protegidas).

Para la sensibilidad los pesos se ajustaron siguiendo a Yusuf y Francisco (2010), estos autores proponen ponderaciones de 0.7 para la densidad poblacional y 0.3 para las áreas naturales protegidas. La ponderación de estos indicadores en particular se debe a que el crecimiento poblacional y su dinámica son los principales detonantes de las modificaciones en los ecosistemas (Ávila y Espejel, 2020). Por tanto, la sensibilidad de las sociedades humanas es reflejo de la sensibilidad de los SSE. Las áreas naturales protegidas son el instrumento más importante para la conservación de la biodiversidad, sin embargo, su éxito es mayormente contextual (Geldmann *et al.*, 2019).

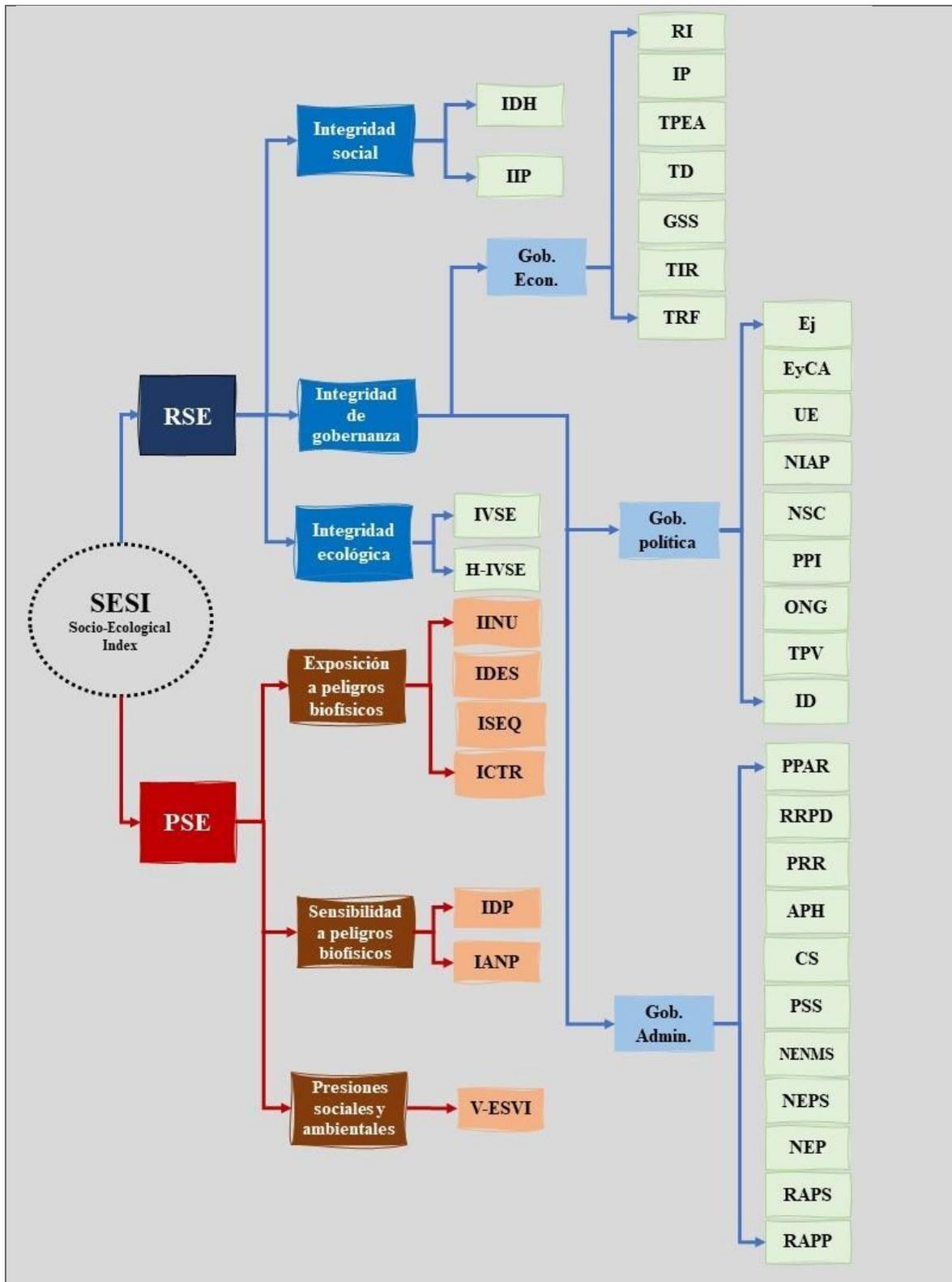


Figura 7. Marco de análisis del Índice Social-Ecológico (SESI) y sus componentes. Adaptado de Estoque y Murayama (2014). Los acrónimos señalan los indicadores utilizados (vea Tablas 7 y 8 o Apéndice 7).

Tabla 7. Componente Resiliencia sociológica (RSE), Se indican los subcomponentes que integran la resiliencia y los indicadores y las fuentes de consulta.

| Resiliencia Socio-ecológica (RSE) | | | Fuente |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Subcomponente | Indicador | | |
| Integridad social | IDH (índice de Desarrollo Humano). | Mide el desarrollo humano de cada municipio y el estado de sus capacidades para implementar políticas públicas a través de programas y proyectos públicos, se compone de tres variables: educación, ingreso y salud. Los valores por municipio se tomaron del informe de desarrollo humano municipal para el periodo 2010-2015. | PNUD, 2019 |
| | IIP (índice de Incidencia de la Pobreza). | Mide la incidencia de la pobreza en la población, una condición marcada por las dimensiones de la etnia, la edad, la discapacidad, el género, entre otras. Se considera en pobreza a la población con algún tipo de carencia social y de ingresos. Los valores se tomaron del informe de indicadores de la pobreza municipal para el periodo 2010-2015. | CONEVAL, 2020 |
| Integridad de gobernanza | IBG (Índice de Buena Gobernanza). | Ver sección VI.5.1.1 para más detalles | |
| Integridad Ecológica | IVSE (Índice del Valor de los Servicios Ecosistémicos). | Mide el valor de los servicios ecosistémicos de forma monetaria y puede emplearse como un indicador del impacto ambiental por parte de la población. El valor estimado en millones de pesos se tomó del programa de pago de servicios ecosistémicos. | CONAFOR, 2021 |
| | H-IVSE (Índice de la relación sociedades Humanas-Servicios Ecosistémicos). | Mide el beneficio de los servicios ecosistémicos desde el punto de vista monetario recibido por habitante/municipio. Para obtenerlo se dividió el monto de los servicios ecosistémicos entre el número de habitantes por municipio. | INEGI, 2020a; CONAFOR, 2021 |
| | ICF (Índice de Cobertura Forestal). | Mide el porcentaje de cobertura forestal actual. Se obtiene dividiendo el área con cobertura forestal entre la superficie total del municipio. Para calcular el área con cobertura forestal se realizó un análisis espacial con ayuda del programa QGIS V.3.16.11 (OSGeo, 2021) y empleando los datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie VII. Las categorías de usos y tipos de vegetación se recategorizaron como se indica en la Figura 3. Posteriormente las áreas se calcularon según la nueva nomenclatura. | INEGI, 2021b |

Tabla 8. Componente Presiones socio-ecológicas (PSE), Se indican los subcomponentes que integran la PSE y los indicadores y las fuentes de consulta. * La ponderación de estos indicadores en particular se realizó siguiendo a Yusuf y Francisco (2010).

| Presiones socio-ecológicas (PSE) | | | Fuente |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Subcomponente | Indicador | | |
| Exposición a Peligros Biofísicos | ISEQ (índice de Peligro por Sequías) IINU (índice de Peligro por Inundaciones) ICTR (índice de Peligros por Ciclones Tropicales) IDES (índice de Peligro por Deslaves) | Los ciclones tropicales, deslaves, inundaciones y sequías fueron los principales peligros biofísicos identificados para el sistema. Para conocer su incidencia por municipio se proyectaron de manera espacial con ayuda del programa QGIS V.3.16.11 (OSGeo, 2021). Se usaron los recursos vectoriales disponibles en el Centro Nacional de Prevención de Desastres para ciclones tropicales, inundaciones y sequías (CENAPRED, 2015) y para deslaves, los datos disponibles en el atlas de vulnerabilidad al cambio climático (INECC, 2018). Los valores de la exposición por peligro se tomaron de la base de datos que incluyen la información vectorial. La categorización (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) según fue el caso, se realizó mediante la función de rupturas naturales (Jenks) en la interfaz de QGIS que genera clases de | CENAPRED, 2015, INECC, 2018 |

| | | | |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| | | exposición a partir de la similitud natural de los datos y maximiza las diferencias entre las clases. | |
| Sensibilidad a los Peligros Biofísicos | *IDP (Índice de Densidad Poblacional). | Mide la densidad de la población, la cual se obtiene dividiendo el número de habitantes por municipio entre su superficie, esta última se estimó con ayuda del programa QGIS v 3.16, a partir de los datos vectoriales de división municipal. Este indicador recibió una ponderación de 0.70 | INEGI, 2020a, INEGI 2020b |
| | *IANP (Índice de Áreas Naturales Protegidas). | Mide el porcentaje de superficie que se incluye dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP). Se obtiene dividiendo la superficie bajo alguna categoría de protección entre la superficie del municipio. El porcentaje de superficie protegida por municipio se calculó empleando el programa QGIS v 3.16., se usaron los datos vectoriales de las ANP decretadas en el área de estudio (CONABIO, 2020 y 2021). Este indicador recibió una ponderación de 0.30. | CONABIO, 2020; CONABIO, 2021 |
| Presiones ambientales | CDSE (Cambio en la disponibilidad de Servicios Ecosistémicos). | Mide los cambios espacio-temporales de la transformación y pérdidas de la cobertura vegetal original derivados de factores antrópicos como la urbanización, en donde a priori, se consideran, (1) el crecimiento de la población (por migración); (2) el crecimiento de la población (por nacimiento); (3) las oportunidades socioeconómicas, (4) el establecimiento de escuelas; por la parte ambiental factores como, 5) un clima fresco y favorable, como los principales factores de transformación (Estoque y Murayama, 2013). Los datos de pérdida de cobertura forestal por municipio se tomaron de Bravo-Cadena (2019; datos no publicados), quien para su análisis empleó el modelo de cambio de la cobertura forestal global realizado por Hansen et al. (2013). | Bravo-Cadena, 2019; Hansen <i>et al.</i> , 2013 |

VI.5.1.1. Marco de análisis para la estimación de la Integridad de Gobernanza

La integridad de gobernanza no cuenta con un valor previamente estimado o método estándar para su medición, por ello en este trabajo se hizo uso del marco propuesto por Virola y colaboradores (2016). Para comprender su cálculo, primero se definen dos conceptos importantes, la gobernanza y la buena gobernanza.

La gobernanza es la forma en que se ejerce el poder en la gestión de los recursos económicos y sociales, el aparato gubernamental es un agente de dirección con las capacidades para desarrollar un gobierno interdependiente entre organismos gubernamentales, organizaciones privadas y civiles (Pérez, 2014). Mientras que la buena gobernanza es la eficiencia, transparencia, rendición de cuentas, participación de la sociedad civil y estado de derecho, cuyo rasgo distintivo es el fortalecimiento de las instituciones para atender los problemas de la sociedad. A medida que los gobiernos sean más eficientes tendrán la determinación de utilizar los recursos a favor del desarrollo económico y social.

La IG se estimó mediante el Índice de Buena Gobernanza (IBG), el cálculo de este índice se realizó siguiendo a Virola y Colaboradores (2016). El IBG se descompone en tres áreas; gobernanza económica, política y administrativa (Apéndice 8), y está integrado por

27 indicadores en total; cada área por uno o más indicadores. No todos los indicadores empleados en el marco de análisis del IBG resultaron relevantes para la ZSSMO, por ello se reemplazaron algunos indicadores en función de, a) la información disponible, b) redundancia y c) información que explicara de mejor manera alguna categoría de gobernanza. Se incorporaron algunos indicadores como *proxys* de la dimensión ambiental y la dinámica política local, como sugieren Vizeu y colaboradores (2020). La lista completa de indicadores puede consultarse en el Apéndice 7. El IBG se calculó empleando la siguiente ecuación

Ecuación 5

$$IBG = \frac{GE + GP + GA}{3}$$

Donde, GE es el índice de Gobernanza Económica, GA es el índice de gobernanza administrativa, GP es el índice de Gobernanza Política.

VI.5.2. Generación de la base de datos

La base de datos se compone de información para 39 indicadores socioambientales. 32 indicadores corresponden al componente RSE y siete al componente PSE. Cada indicador se describió a nivel municipal. Los indicadores recibieron dos tipos de tratamiento. 1) para el cálculo del SESI, los valores originales de los indicadores se estandarizaron a valores entre 0 – 1, el índice se interpretó empleando esa escala de valores. La estandarización de los datos se realizó tomando en cuenta la relación positiva o negativa de un indicador con su componente respectivo (RSE o PSE; ecuación 6), 2) los indicadores se conservaron en su formato original para realizar análisis exploratorios para apoyar la explicación sobre la clasificación de la condición socio-ecológica.

Ecuación 6

$$x_{(+)} = \frac{orig - min}{max - min}$$

$$x_{(-)} = \frac{max - orig}{max - min}$$

En donde: x es el valor estandarizado, orig = valor original, y el intervalo (max – min) del indicador

VI.5.3. Representación espacial del SESI

La cartografía del SESI se realizó con ayuda del programa QGIS V., 3.16.11 (OSGeo, 2021). Para ello se emplearon los datos vectoriales de la delimitación de la ZSSMO previamente generados (ver sección V.2). La información de los valores del SESI se integró como una capa de datos (formato txt.). Para la categorización del SESI se empleó la función de rupturas naturales, lo que generó clases en función de la similitud natural de los datos y maximizó las diferencias entre las clases. La clasificación se ajustó a ocho clases con lo que se maximizaron las diferencias en el valor del SESI de los municipios. Con base en lo anterior se obtuvieron tres mapas distintos, uno para la RSE, otro para PSE y un último para el SESI.

VI.5.4. Análisis de correlación espacial

Para determinar si la condición socio-ecológica de la ZSSMO presentó patrones espaciales, se llevó a cabo un análisis de autocorrelación espacial (AE) empleando el Índice de Moran local (Ecuación 7), el cual es una variación del Índice de Moran Global (Ecuación 8), que permite identificar la localización de conglomerados espaciales, para este caso, a partir de los valores del SESI.

La autocorrelación espacial es la concentración o dispersión de los valores de una variable en un mapa, refleja el grado en que objetos o actividades son similares entre unidades de análisis próximas (Goodchild, 1987). El índice de Moran local ofrece una medida sintetizada de la intensidad de la autocorrelación de unidades espaciales. El Índice de Moran local presenta valores entre -1 y +1, en donde, cuanto más cercano a 1 sea el valor de indicador, mayor será la autocorrelación espacial.

Ecuación 7

$$I_i = \frac{z_i}{m_2} \sum_{j=i}^n w_{ij} z_j$$

Donde m_2 es la varianza. Las observaciones z son las desviaciones de la media, y w es la ponderación geográfica entre la unidad espacial i y la unidad espacial j , n es igual al número total de unidades espaciales

Ecuación 8

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_i Z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n Z_i^2}$$

En dónde, Z , es la desviación de un atributo/variable de una unidad espacial i desde su media ($X_i - \bar{x}$); W_{ij} es la ponderación geográfica entre la unidad espacial i y la unidad espacial j , n es igual al número total de unidades espaciales y S_0 es una constante para todas las unidades espaciales

El análisis de autocorrelación se llevó a cabo empleando el programa GeoDa V. 1.20.0.20. Se utilizó el peso espacial tipo reina “Queen” de orden 2 (criterio de vecindad por continuidad); peso de distancia, distancia euclidiana. La representación cartográfica de la AE se obtuvo mediante el método LISA (*Local Index of Espatial Asociation*; Anselin, 1995), el cual descompone el índice de Moran en categorías, verifica en cuánto contribuye cada unidad espacial a la formación del valor general del I de Moran mediante un valor de significancia. El método de LISA clasifica los valores del I. de Moran según su dispersión en un plano bidimensional dividido en cuatro cuadrantes. (Figura 9), como sigue: **Alto-alto**, unidades espaciales con valores superiores a la media que, a su vez, también cuentan con vecinos con valores altos; **bajo-bajo**, la situación inversa (La concentración de valores extremos de una variable se conocen también como zonas calientes/frías (hot spots/cold spots, respectivamente); **bajo-alto**, unidades espaciales con valores bajos (inferiores a la media) con vecinos que registran valores altos; **alto-bajo**, el escenario opuesto.

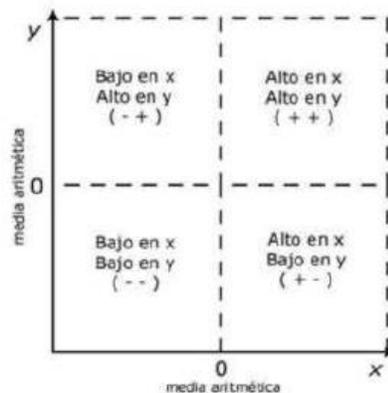


Figura 9. Gráfico de dispersión de Moran (tomado de Celemín, 2009). Conformado por dos ejes de coordenadas ortogonales, en cada uno de los cuales se sitúa una variable y cada observación se representa mediante un punto en el espacio de relación. El estudio de la nube de puntos formada permite encontrar las características de la relación entre las dos variables. Al trabajar con datos estandarizados el centro de cada eje toma valor cero (0) y el espacio de relación queda dividido en cuatro cuadrantes en los que se relacionan valores positivos y negativos de cada variable.

VI.6 Análisis estadísticos

VI.6.1. Correlaciones no paramétricas

Las correlaciones se emplearon para apoyar la elección de los indicadores para los análisis exploratorios descritos más adelante. Como primer paso se probó la normalidad de los datos con el apoyo del programa Past V. 4. 04 empleando las funciones *Normality Test* y *Normal Probability Plot*. Para los indicadores que no se ajustaron a una distribución normal, se probó un proceso de normalización mediante las funciones *Box Cox* y *log*. No todos los indicadores pudieron ser normalizados, por consiguiente, se empleó la correlación no paramétrica de Spearman (r_s). La correlación de Spearman (r_s) se calcula como:

Ecuación 9

$$r_s = 1 - [6 \sum d_i^2 / (n^3 - n)]$$

Donde, d_i = diferencia entre rangos de X y Y

Los valores de la correlación de *Sperman* oscilan entre -1 y 1, si el coeficiente de correlación es cercano a 1, será positiva, si se acerca a -1 será negativa. Las correlaciones fueron significativas si el valor de probabilidad fue menor a 0.05., en ese caso los indicadores se descartaron.

VI.6.2. Modelo Lineal Generalizado

El modelo lineal generalizado (GLM) se obtuvo a partir de la selección de 27 indicadores, los cuales no presentaron correlaciones significativas entre sí según las correlaciones no paramétricas (r_s , $p > 0.05$). Para la obtención del GLM se usó el programa SYSTAT versión 12 (Systat Software Inc.). La variable de respuesta fue el valor del SESI, los 27 indicadores seleccionados fueron las variables explicativas del modelo. Se emplearon en su formato estandarizado (valores entre 0 – 1) para comparar el tamaño del efecto de las variables explicativas sobre la variable de respuesta. Las variables seleccionadas en el modelo tuvieron tolerancia de 0.05 y un intervalo de confianza del 95%; la estimación se llevó a cabo empleando la función “*stepwise*”. Para la selección del mejor modelo se consideraron tres criterios, 1) parsimonia, 2) el modelo con el mejor ajuste, es decir con valores de correlación altos (R^2) considerando que los valores cercanos a 1

significan un mejor ajuste, y 3) empleando el criterio de Akaike (AIC), para el cual el modelo con el menor valor de AIC se consideró el mejor.

VI.6.3. Análisis de Componentes Principales

Para el Análisis de Componentes Principales (ACP) se emplearon los 27 indicadores usados en la obtención del GLM, los indicadores se emplearon en su formato original, posteriormente se estandarizaron empleando con la siguiente ecuación:

Ecuación 10

$$(x - \text{promedio})/\text{desvest}$$

Donde x es valor del indicador 1, 2, ...,n, y desvest es la desviación estándar.

Como paso siguiente se obtuvo el coeficiente de correlación de la normalidad por indicador con ayuda del programa Past V. 4. 04 empleando la función *Normal Probability Plot*, esta herramienta determina si un conjunto de datos sigue o no una distribución normal hipotética. A continuación, fueron seleccionados aquellos indicadores con el coeficiente de correlación mayor a 0.90. El ACP se realizó con ayuda del programa R Studio V. 2022.02.03, empleando la función *FactoMiner*. Esta función genera nuevos componentes ordenados en términos de su importancia expresada en porcentaje y ofrece una representación espacial de la dispersión de los datos a partir de los componentes principales que explicaron el mayor porcentaje de varianza del conjunto de datos. Por último, se empleó la función *Factoextra* para agrupar a los municipios según su relación con los distintos indicadores.

VI.7 Dinámica de sistemas

La DS ha destacado por ser un método útil para el estudio del comportamiento de sistemas complejos mediante la construcción de modelos de simulación que permitan reconocer las relaciones entre la estructura del sistema y su comportamiento (Forrester, 1961; Aracil y Gordillo, 1997).

La DS permite analizar las relaciones entre los distintos componentes de los sistemas complejos basándose en el pensamiento causal no lineal (Abadi, 2015). A partir de esta premisa, se construyen modelos cualitativos que representan las relaciones causa-

efecto entre los elementos del sistema y, si las relaciones entre componentes son positivas o negativas, además, ofrecen una noción objetiva de los fenómenos que determinan el comportamiento de los sistemas complejos del mundo real (Abram y Dyke, 2018). Posteriormente se generan modelos cuantitativos, mediante simulaciones numéricas se examina los futuros potenciales del comportamiento de los sistemas complejos, por ejemplo, cómo cambian las tasas espaciotemporales de uso de la tierra y la cubierta vegetal relacionadas con las vías de desarrollo económico (Proswitz *et al.*, 2021).

La DS rompe con el pensamiento lineal, en donde el planteamiento de un problema supone una acción que conduce a un resultado esperado. La percepción objetiva de este planteamiento es que un problema conduce acciones que generan un resultado con múltiples propiedades emergentes, más problemas y acciones, no hay principio ni fin, cada acción/cambio en la naturaleza de los sistemas complejos se inscribe en una red de bucles de realimentación (Forrester, 2009). Los modelos dinámicos emplean estas relaciones circulares para generar distintos escenarios de cambio futuros, los cuales pueden dar seguimiento a las tendencias observadas o mediante supuestos, generar escenarios alternativos (Baños-González *et al.*, 2015).

En el campo de los sistemas socio-ecológicos la DS se ha empleado en el estudio de los procesos biofísicos (Yang *et al.*, 2020) y para la toma de decisiones en el ámbito de la gobernanza y la problemática socioambiental (Li *et al.*, 2021). Por ejemplo, para examinar las interacciones y retroalimentación entre los sistemas biofísicos y económicos enfocándose en las repercusiones a largo plazo de las políticas económicas que permiten la explotación de los recursos (Abadi *et al.*, 2015), y en la modelación participativa de las partes interesadas para el reconocimiento de los elementos o herramientas clave para la gestión de sus recursos (Thanh *et al.*, 2021).

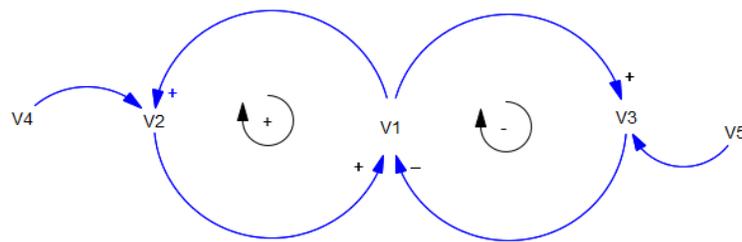
VI.7.1 Construcción de los modelos dinámicos

La construcción de los modelos dinámicos se basa en una serie sucesiva de pasos necesarios para representar apropiadamente los componentes más importantes del sistema y sus relaciones causales. En general, el proceso de modelado y simulación puede resumirse como sigue: (1) definición de los objetivos de la simulación, (2) determinación de los límites del sistema, (3) diseño de una estructura gráfica del sistema con interfaz de usuario, (4) desarrollo de diagramas stock-flujo, (5) formulación del modelo matemático, (6) calibración y validación del modelo, y (7) aplicación del modelo (Wei *et al.*, 2012). Sin

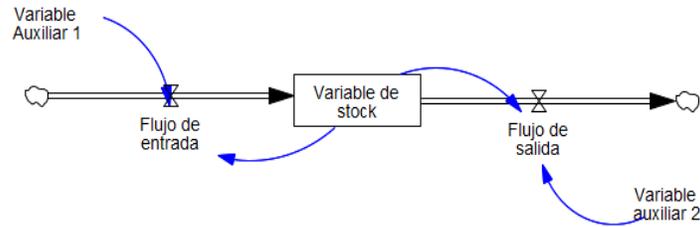
embargo, según sea el caso, es posible encontrar otras aproximaciones que resumen el número de pasos a seguir (Baños-González *et al.*, 2016; Proswitz *et al.*, 2021).

Los pasos 1 a 3 corresponden al diagrama de bucle causal (modelo cualitativo) en el cual se han conceptualizado todas las relaciones encontradas entre los elementos del sistema. El modelo se valida a partir de la opinión de expertos, las partes interesadas y la literatura disponible (Arias-Gaviria *et al.*, 2021). En el diagrama causal las interacciones, bucles de retroalimentaciones y la polaridad de las interacciones (positiva o negativa) se indican como se muestra en la Figura 10A. Las retroalimentaciones positivas generan comportamientos de refuerzo en las interacciones, están asociados al crecimiento exponencial o al colapso, mientras que las retroalimentaciones negativas generan un comportamiento de equilibrio asociado a tendencias oscilatorias o de amortiguamiento (Bueno, 2012).

Los pasos 5 a 6 corresponden al diagrama de flujo o diagrama de Forrester (Figura 10B). Este diagrama es una traducción del modelo cualitativo, en el que se formula modelo matemático. El diagrama de Forrester consta de variables de “*stock*” (existencias; también llamadas variables de nivel), flujos de entrada y salida y variables auxiliares (Boateng *et al.*, 2022). Los stocks y flujos funcionan como elementos que representan a los componentes de los sistemas dinámicos y la dirección de las interacciones y las variables auxiliares se emplean para establecer las métricas de interés relacionadas con la variable de nivel (Abram y Dyke, 2018).



A) Diagrama de bucle de causal con retroalimentaciones.



B) Diagrama de flujo o de Forrester.

Figura 10. Esquemas básicos de los modelos dinámicos. La Figura A) representa un diagrama de bucle causal que indica sus realimentaciones ya la polaridad de los bucles de retroalimentación. La Figura B) representa el diagrama de Forrester o flujo, sobre el cual se trabajan los modelos cuantitativos.

VI.7.2 Generación del modelo dinámico conceptual para el SSE-ZSSMO

Para la construcción del modelo dinámico se usó el programa Vensim PLE (Ventana Systems Inc., 2006), este es un paquete potente e intuitivo que representa sistemas potencialmente complejos mediante modelos que producen resultados expresados en esquemas o diagramas de flujo (Abram y Dyke, 2018). Para a ZSSMO se generó un modelo cualitativo siguiendo a Wei *et al.* (2012) (pasos 1 a 3 del proceso de modelación). La selección de los componentes representativos del sistema se realizó a partir de distintos estudios realizados en el sistema entre los años 2015 y 2021 (ver Apéndice 11) y de la información empleada en el marco de análisis del SESI. Para la generación de un modelo coherente, se prestó especial atención en abarcar todos los subsistemas que conforman un SSE, el sistema de recursos, las unidades de los recursos, los usuarios y el sistema de gobernanza (Ostrom, 2009).

En el diagrama causal las interacciones entre componentes se indicaron con flechas. Las flechas indican la dirección de las interacciones. La base de las flechas corresponde a algún componente que causa o afecta a otro componente del sistema. La punta de la flecha indica a los componentes afectados. Los signos (-) y (+) indican la polaridad de las interacciones. El signo positivo se empleó para indicar comportamientos de refuerzo en las interacciones, están asociados al crecimiento exponencial o al colapso. El signo negativo indica comportamientos de equilibrio asociados a tendencias oscilatorias o de amortiguamiento (Bueno, 2012). Las direcciones de las interacciones se definieron a partir de los estudios seleccionados del Apéndice 11. Por ejemplo, las actividades productivas, urbanización y tala clandestina fueron considerados impulsores de cambio que

causan la deforestación, en el diagrama causal, la interacción parte de impulsores (base de la flecha) en dirección a la deforestación (punta de la flecha).

Dado que mediante el proceso anteriormente descrito es posible obtener n número de modelos que puedan representar la dinámica del SSE. La selección del modelo presentado se decidió considerando que se representaron los elementos más importantes y sus interacciones, que describen adecuadamente la dinámica del sistema. Por otro lado, la configuración del modelo seleccionado permitirá posteriormente avanzar en la generación de un modelo cuantitativo, mediante el cual se puedan obtener escenarios predictivos.

VII. RESULTADOS

VII.1. Condición Socio-Ecológica del SSE-ZSMO

Los valores de la condición socio-ecológica de la ZSSMO oscilaron entre -0.244 y 0.361, con un valor promedio de 0.063. Respecto a los componentes del SESI, la resiliencia socio-ecológica (RSE) osciló entre 0.152 y 0.599, con un valor promedio de 0.388. La presión socio-ecológicas (PSE) fluctuó entre 0.177 y 0.630 con un valor promedio de 0.325. Los valores por componentes y subcomponentes pueden consultarse en la Tabla 8, la clasificación en el Apéndice 9 y la descripción espacial por subcomponente en las Figuras 11 a 16 del Apéndice 10; los valores del SESI en la Figura 17.

Los municipios con el SESI más altos fueron Eloxochitlán (0.361), Xochicoatlán (0.359) y San Agustín Metzquititlán (0.295). Los municipios con SESI más bajos fueron Huehuetla (-0.244), Huazalingo (-0.226) y Pisaflores (-0.217). La RSE fue más alta para los municipios de Zacualtipán (0.599), Xochicoatlán (0.585) y Eloxochitlán (0.569). En contraste, la RSE más bajas para Texcatepec (0.152), Iamatlán (0.160) y Tlachichilco (0.236). La PSE fue más alta para los municipios de Pisaflores (0.630), Huehuetla (0.571) y Huazalingo (0.494). En contraste, la PSE fue más baja para Juárez Hidalgo (0.177), Eloxochitlán (0.208) y Tlahuiltepa (0.217).

La condición socio-ecológica de los municipios respondió a distintas causas. Para Eloxochitlán que obtuvo el SESI más alto, sus puntos fuertes fueron, su alta integridad ecológica (0.685), baja sensibilidad (0.112) y menores cambios en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (0.004). Los puntos fuertes de Xochicoatlán fueron su alta integridad ecológica (0.630) e integridad social (0.717), relativamente baja sensibilidad (0.156) y poco cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (0.010). Para San Agustín Metzquititlán, sus puntos fuertes fueron, su alta integridad social (0.887), baja exposición a peligros biofísicos (0.356) y bajo cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (0.003).

Para los municipios ubicados al final de la clasificación del SESI, Pisaflores presentó un alto cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos, alta sensibilidad (0.486), también se observaron valores bajos de integridad social (0.369). Huazalingo presentó la integridad ecológica más baja (0), además, presentó una alta sensibilidad (0.585). Huehuetla, el municipio con el valor del SESI más bajo, presentó una baja integridad

ecológica (0.085), una relativamente baja integridad social (0.373), valores altos en exposición a peligros biofísicos (0.766), alta sensibilidad (0.520) y fue el cuarto municipio con los mayores cambios en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (0.427).

Tabla 8. Valores del SESI sus componentes y subcomponentes para los 28 municipios de la ZSSMO.

| Municipio | Integridad Social | Integridad de Gobernanza | Integridad Ecológica | RSE | Exposición a peligros biofísicos | Sensibilidad a Peligros biofísicos | Cambio en la disponibilidad Servicios ecosistémicos | PSE | SESI |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------|--------|
| Eloxochitlán | 0.613 | 0.408 | 0.685 | 0.569 | 0.507 | 0.112 | 0.004 | 0.208 | 0.361 |
| Xochicoatlán | 0.717 | 0.409 | 0.630 | 0.585 | 0.513 | 0.156 | 0.010 | 0.226 | 0.359 |
| San Agustín Metzquitlán | 0.887 | 0.370 | 0.298 | 0.518 | 0.356 | 0.312 | 0.003 | 0.224 | 0.295 |
| Tianguiestengo | 0.450 | 0.434 | 0.516 | 0.466 | 0.391 | 0.234 | 0.033 | 0.219 | 0.247 |
| Molango de Escamilla | 0.806 | 0.309 | 0.330 | 0.482 | 0.555 | 0.258 | 0.022 | 0.278 | 0.203 |
| Juárez Hidalgo | 0.499 | 0.358 | 0.264 | 0.374 | 0.433 | 0.083 | 0.014 | 0.177 | 0.197 |
| Zacualtipán de Angeles | 1.000 | 0.388 | 0.411 | 0.599 | 0.494 | 0.722 | 0.038 | 0.418 | 0.182 |
| Tlanchinol | 0.375 | 0.607 | 0.639 | 0.540 | 0.522 | 0.463 | 0.129 | 0.371 | 0.169 |
| Tlahuiltepa | 0.411 | 0.426 | 0.296 | 0.378 | 0.555 | 0.034 | 0.062 | 0.217 | 0.161 |
| Metztitlán | 0.680 | 0.377 | 0.415 | 0.490 | 0.692 | 0.384 | 0.000 | 0.359 | 0.132 |
| Jacala de Ledezma | 0.593 | 0.399 | 0.333 | 0.442 | 0.801 | 0.126 | 0.015 | 0.314 | 0.128 |
| La Misión | 0.365 | 0.396 | 0.208 | 0.323 | 0.441 | 0.171 | 0.040 | 0.217 | 0.106 |
| Calnali | 0.559 | 0.442 | 0.128 | 0.377 | 0.478 | 0.357 | 0.037 | 0.291 | 0.086 |
| Lolotla | 0.589 | 0.379 | 0.135 | 0.368 | 0.612 | 0.231 | 0.032 | 0.292 | 0.076 |
| Huayacocotla | 0.488 | 0.516 | 0.333 | 0.446 | 0.316 | 0.168 | 0.635 | 0.373 | 0.073 |
| Agua Blanca de Iturbide | 0.605 | 0.345 | 0.061 | 0.337 | 0.410 | 0.407 | 0.007 | 0.275 | 0.062 |
| Chapulhuacán | 0.434 | 0.459 | 0.281 | 0.391 | 0.495 | 0.478 | 0.080 | 0.351 | 0.040 |
| San Bartolo Tutotepec | 0.368 | 0.546 | 0.119 | 0.344 | 0.713 | 0.210 | 0.035 | 0.320 | 0.025 |
| Zacualpan | 0.261 | 0.382 | 0.188 | 0.277 | 0.288 | 0.081 | 0.389 | 0.253 | 0.024 |
| Tenango de Doria | 0.534 | 0.435 | 0.170 | 0.380 | 0.592 | 0.479 | 0.006 | 0.359 | 0.021 |
| Tepehuacán de Guerrero | 0.279 | 0.582 | 0.214 | 0.358 | 0.515 | 0.429 | 0.141 | 0.362 | -0.004 |
| Zontecomatlán de López y Fuentes | 0.163 | 0.418 | 0.232 | 0.271 | 0.187 | 0.269 | 0.408 | 0.288 | -0.017 |
| Ilamatlán | 0.014 | 0.368 | 0.098 | 0.160 | 0.337 | 0.408 | 0.032 | 0.259 | -0.099 |
| Texcatepec | 0.000 | 0.358 | 0.099 | 0.152 | 0.418 | 0.242 | 0.324 | 0.328 | -0.176 |
| Tlachichilco | 0.291 | 0.382 | 0.035 | 0.236 | 0.588 | 0.203 | 0.475 | 0.422 | -0.186 |
| Pisaflores | 0.369 | 0.418 | 0.455 | 0.414 | 0.405 | 0.486 | 1.000 | 0.630 | -0.217 |
| Huazalingo | 0.392 | 0.412 | 0.000 | 0.268 | 0.523 | 0.585 | 0.372 | 0.494 | -0.226 |
| Huehuetla | 0.373 | 0.524 | 0.085 | 0.327 | 0.766 | 0.520 | 0.427 | 0.571 | -0.244 |

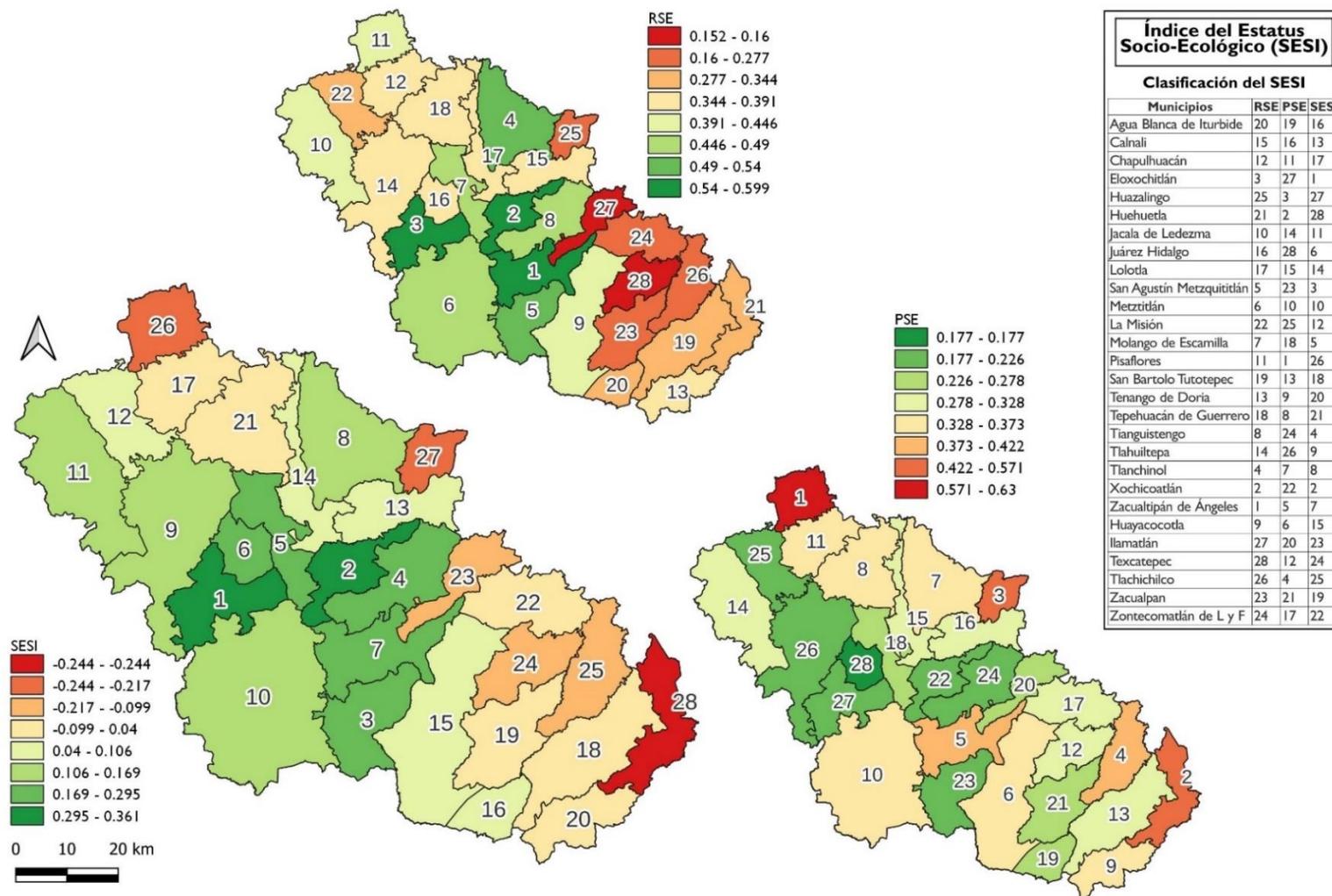


Figura 17. Representación espacial del SESI y sus componentes, la Resiliencia Socio-Ecológica – RES y Presiones Socio-Ecológicas – PSE. Los números al interior de los polígonos municipales indican la posición que ocupan dentro de la clasificación del SESI y sus componentes, donde el municipio con el valor más alto ocupa la posición 1 y el municipio con el valor más bajo ocupa la posición 28 como se indica en la tabla superior derecha.

VII.1.1 Autocorrelación espacial de los valores del SESI

Se registró correlación espacial en los valores del SESI ($IM = 0.165$) y el componente RSE ($IM = 0.114$). El componente PSE no exhibe una correlación espacial significativa ($IM = -0.002$) (Figura 18). En cuanto a los conglomerados espaciales, para el SESI, en la categoría alto-alto se agruparon Metztlán, Molango de Escamilla, Eloxochitlán, Xochicoatlán, Lolotla, Juárez Hidalgo y San Agustín Metzquitlán; en la categoría bajo-alto, Tepehuacán de Guerrero y Huazalingo; en la categoría bajo-bajo, San Bartolo Tutotepec, Tenango de Doria y Tlachichilco. Para el componente RSE en la categoría alto-alto, se agruparon Metztlán, Eloxochitlán, Xochicoatlán y Molango de escamilla, en bajo-alto, Lolotla y Tepehuacán de Guerrero, y bajo-bajo, Tlachichilco, Texcatepec, San Bartolo Tutotepec y Tenango de Doria (Figura 19).

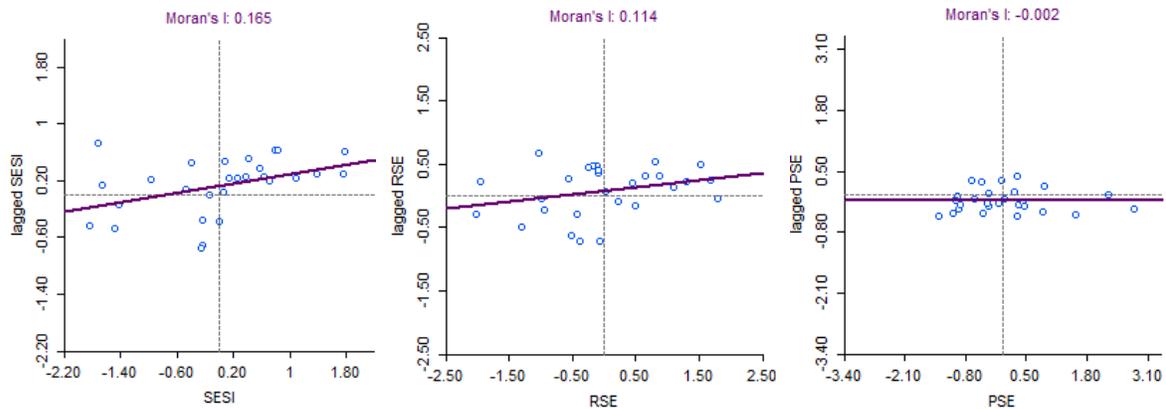


Figura 18. Gráfico de dispersión del I de Moran para el SESI, la RSE y PSE. Se observa la correlación de las unidades según su ubicación en el plano. Los puntos representan a los municipios del sistema, los más próximos a la línea de tendencia presentan autocorrelación espacial

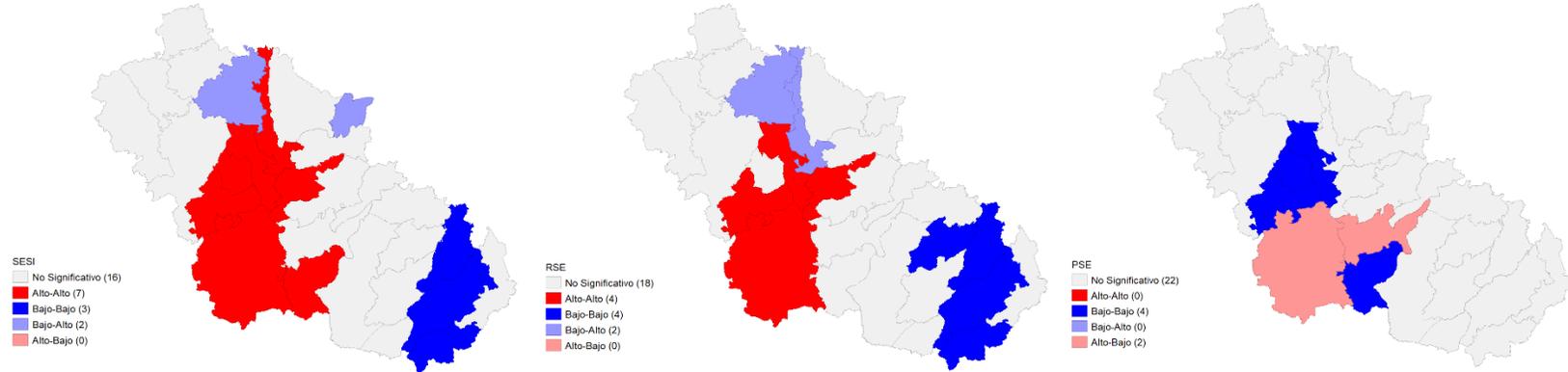


Figura 19. Agrupamiento de los municipios según el I de Moran para la condición socio-ecológica de la ZSSMO. Los municipios en rojo (Alto-alto) presentan una correlación espacial positiva con valores por arriba del promedio (Hot spots). Los municipios en azul (Bajo-bajo) presentan una correlación espacial negativa con valores por debajo del promedio. (Cold spots). Los municipios en violeta (Bajo-alto) no presentan patrón espacial claro. Los municipios en la categoría No significativa son unidades sin ningún tipo de relación con sus áreas vecinas.

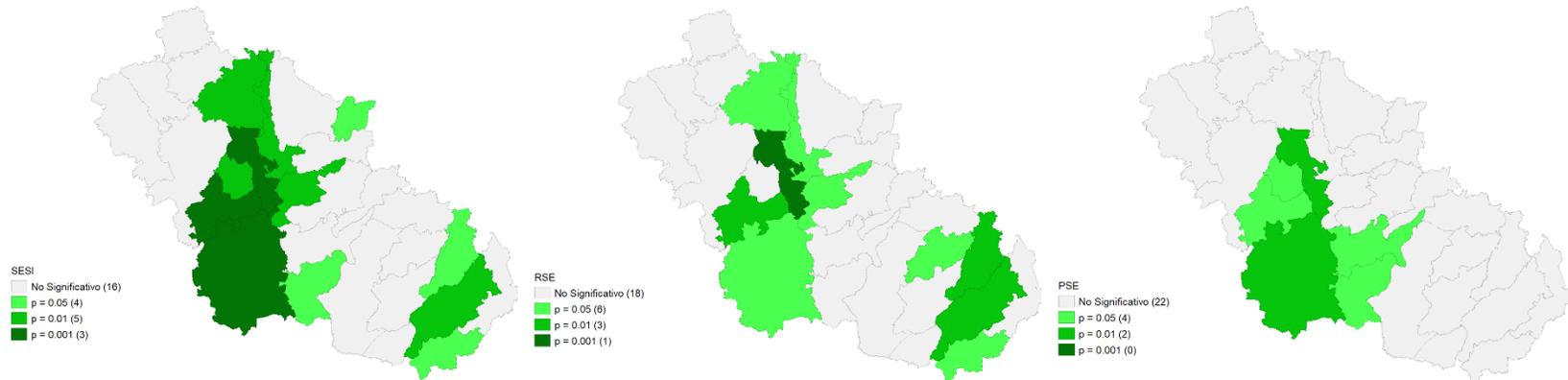


Figura 20. Prueba de significancia del análisis de autocorrelación espacial. Todas las zonas en de tonalidades verdes presentan valores de autocorrelación significativa.

VII.1.2. Correlaciones entre indicadores

Con base en análisis no paramétrico de Spearman (r_s), se encontraron doce correlaciones significativas entre indicadores empleados para la evaluación del SESI (Tabla 10). Indicadores como el índice de Desarrollo Humano (IDH), el índice de Incidencia de la Pobreza (IIP), los Recursos Financieros Totales (TRF), así como el Gasto en Servicios Sociales (GSS) se correlacionaron con más de un indicador por lo que fueron descartados para la generación del modelo lineal generalizado y el análisis de componentes principales.

Tabla 10. Correlaciones significativas entre los indicadores. El Coeficiente correlación de Spearman (r_s ; presenta un rango de valores de -1 a +1, en donde mientras más cercano sea a un u otro extremo, mayor es la correlación). El valor de $p < 0.05$ indica que las correlaciones fueron significativas. Los acrónimos o siglas pueden consultarse en la Tabla 7 y 8 y el Apéndice 7

| Correlaciones | Cf (r_s) | p |
|---------------|--------------|------------|
| IDH-IIP | -0.89294 | 1.31E-07 |
| IIP-TRF | 0.69458 | 0.032117 |
| TRF-TIR | 0.72085 | 0.011793 |
| TRF-GSS | 0.69075 | 0.03685 |
| TIR-GSS | 0.84455 | 1.25E-05 |
| EJ Y CA | 0.76121 | 0.0019947 |
| APH-IDH | 0.78697 | 0.00053048 |
| APH-IIP | -0.71921 | 0.012596 |
| DES-RAPS | -0.69294 | 0.034075 |
| DES-NES | 0.71542 | 0.014639 |
| H-IVSE-IVSE | 0.95158 | 6.06E-12 |

VII.1.3. Modelo lineal generalizado

El GLM se integró por seis indicadores con el mayor efecto sobre la clasificación municipal del SESI, para cada caso el efecto de los indicadores sobre el estatus socio-ecológico fue significativo ($p < 0.05$) (Tabla 11). Con base en los criterios de selección se determinó que el modelo presentado fue el de mejor ajuste respecto a los valores de clasificación del SESI. El modelo presentó valores muy bajos de AIC, así mismo, presentó un valor de correlación alto con la variable de respuesta (SESI) (ver Tablas 12 y 13). Se encontró que el índice del cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (V-IVSE) es el indicador con mayor efecto sobre la clasificación, además con un efecto negativo (su coeficiente de correlación fue de -0.372).

Tabla 11. Modelo resultante del GLM, con las variables con mayor efecto sobre la clasificación del SESI

| Regression Coefficients $B = (X'X)^{-1}X'Y$ | | | | | | | |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------|----------------|------------------|-----------|--------|---------|
| Effect | | Coefficient | Standard Error | Std. Coefficient | Tolerance | t | p-value |
| PPI | Porcentaje de población indígena | -0.179 | 0.035 | -0.429 | 0.465 | -5.159 | 0 |
| ONG | ONG | -0.123 | 0.047 | -0.21 | 0.494 | -2.605 | 0.016 |
| NIAC | Iniciativas aprobadas por los cabildos | 0.292 | 0.05 | 0.508 | 0.421 | 5.824 | 0 |
| PSS | Personal sanitario | 0.283 | 0.031 | 0.624 | 0.675 | 9.058 | 0 |
| IVSE | índice del valor de los servicios ecosistémicos | 0.357 | 0.043 | 0.524 | 0.814 | 8.34 | 0 |
| V-IVSE | Cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos | -0.372 | 0.042 | -0.619 | 0.652 | -8.819 | 0 |

Tabla 12. Valores del criterio de Akaike

| Information Criteria | |
|----------------------|---------|
| AIC | -77.668 |
| AIC (Corrected) | -72.068 |
| Schwarz's BIC | -68.343 |

Tabla13. Valores de correlación del modelo con la variable de respuesta SESI

| Dependent Variable | SESI |
|-----------------------------|-------|
| N | 28 |
| Multiple R | 0.964 |
| Squared Multiple R | 0.929 |
| Adjusted Squared Multiple R | 0.913 |
| Standard Error of Estimate | 0.053 |

VII.1.4. Análisis de ordenamiento por Componentes Principales

El análisis de ordenamiento por componentes principales indicó que de los trece componentes considerados los dos primeros presentan un efecto mayor sobre la clasificación municipal del SESI, en conjunto explicaron 63.5 % de la varianza y se alcanzó hasta 72.3 % con un tercer componente, sin embargo, su efecto fue (8.8 %) (Tabla 14). El resto de los componentes presentó porcentaje de varianza inferior a 6 %.

Tabla 14. Porcentaje de varianza explicada para los tres primeros componentes principales. Dim 1, Dim 2 y Dim 3 son equivalentes a Componente 1, Componente 2 y Componente 3.

| Eigenvalues | Dim.1 | Dim.2 | Dim.3 |
|----------------------|--------|--------|--------|
| Variance | 4.722 | 3.528 | 1.147 |
| % of var. | 36.326 | 27.136 | 8.826 |
| Cumulative % of var. | 36.326 | 63.462 | 72.288 |

En cuanto al agrupamiento de los municipios, se integraron tres grupos bien definidos a partir de las correlaciones entre los indicadores y los componentes 1 y 2. En todos los casos presentaron un valor de correlación mayor a 0.60 indicado por el círculo de correlaciones, por lo que mantienen un efecto relativamente alto sobre la dinámica municipal. (Figura 21).

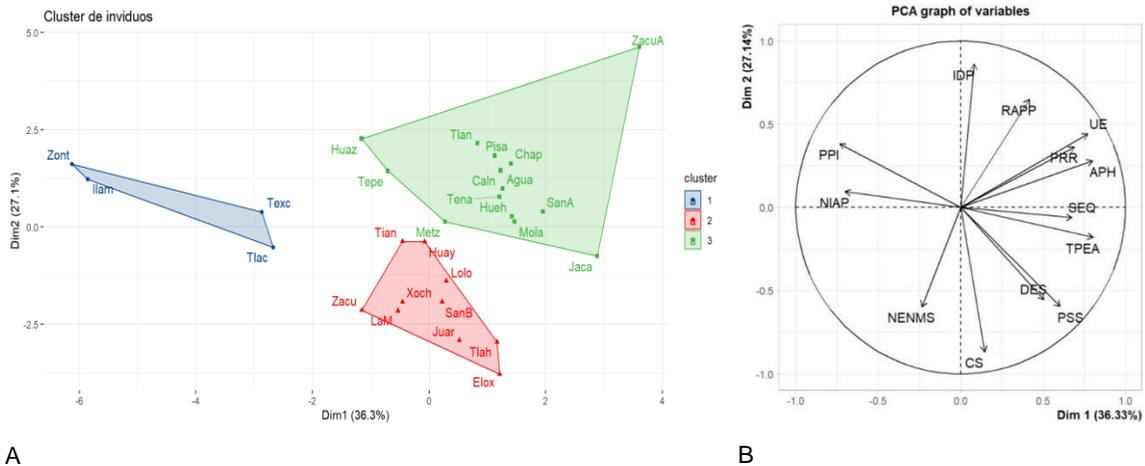


Figura 21. Agrupamiento de los municipios según los componentes 1 y 2. Figura A agrupamiento de los municipios según sus similitudes. Figura B indicadores más importantes para el agrupamiento de los municipios. El grupo 1^a, se conformó según su IDP, RAPP, UE, PRR, APH; el grupo 2^a se conformó según las SEQ, TPEA, DES, PSS, CS y NENMS; y el grupo 3^a se conformó según NIAP y PPI.

VII.2 Modelo dinámico del sistema socio-ecológico

El modelo dinámico cualitativo de la ZSSMO se presenta en la Figura 22. Está integrado por tres subsistemas: 1) el subsistema población, 2) el subsistema de recursos, 3) el subsistema gobernanza. En el modelo se integran los elementos previamente descritos para el marco del SESI. Además, se integraron otros elementos que se retoman de la literatura los cuales pueden consultarse en el Apéndice 11, en conjunto las fuentes de información consultadas validaron el modelo cualitativo presentado. Se hace una distinción entre los elementos e interacciones ligados a la RSE y los ligados a la PSE.

Relaciones causales de la RSE

La gobernanza, los servicios ecosistémicos y el desarrollo humano presentaron una relación positiva con la RSE, ya que en términos generales la RSE fue mayor que la PSE según el marco de análisis del SESI. Las principales estrategias de desarrollo económico de la región, la economía basada en el mercado y las economías familiares tuvieron relación positiva con la gobernanza porque contribuyeron al ingreso de la población. Particularmente, la economía de mercado contribuye a la generación de recursos para la inversión en servicios públicos, sin embargo, la gobernanza tiene una relación negativa con el desarrollo humano porque en la región hay falta de cobertura de los servicios básicos (salud, educación, gestión de residuos y acceso al agua potable dentro de los hogares), y a su vez el desarrollo humano se relaciona negativamente con la población indígena, porque es la población con mayores carencias sociales.

La valoración de los servicios ecosistémicos mantiene una relación positiva con la disponibilidad hídrica ya que en la región están presentes ecosistemas como el bosque de niebla, principal proveedor de los servicios hidrológicos. Los instrumentos de conservación como el PSA y las ANP presentan una relación positiva con los SE, sin embargo, la efectividad de ambas estrategias para la conservación de los SE no es clara.

La economía de mercado y los servicios públicos se relacionaron de manera positiva con el desarrollo humano, sin embargo, el IDH mantiene una relación negativa con la población indígena, debido a la alta marginación social. Se encontró que el desarrollo humano puede ser impulsado por estrategias de desarrollo sustentable como las economías familiares, el turismo y la producción de bienes culturales. Sin embargo, existe

poca promoción de estas estrategias por lo que se relacionan de manera negativa con el desarrollo humano.

Relaciones causales de la PSE

La deforestación y los principales peligros biofísicos (sequías, deslaves e inundaciones) se relacionaron positivamente con la PSE. La economía de mercado es un elemento cuya influencia es contrastante, si bien contribuye al desarrollo humano, también afecta negativamente al sistema por distintas vías. Se relaciona de manera positiva con las estrategias de desarrollo económico (agricultura, ganadería y minería) porque incentiva su expansión, sin embargo, el aumento de las actividades productivas impulsa la deforestación. La deforestación pone en riesgo a los ecosistemas que se encargan de proveer este recurso y las actividades productivas afectan la capacidad de carga de los mantos acuíferos.

La economía de mercado se relaciona positivamente con la marginación social y la emigración. El aumento de las actividades productivas ha contribuido a la desarticulación de las economías familiares acrecentando las desigualdades sociales y obligando a la población a diversificar sus fuentes de ingreso, motivando la emigración. La migración se relaciona de manera positiva con la aculturación y a su vez la aculturación se relaciona negativamente con la preservación de los usos y conocimientos tradicionales ya que el abandono del territorio por parte de las generaciones más jóvenes corta la transferencia de conocimientos generacionales. El conocimiento tradicional no ha sido integrado apropiadamente dentro de las estrategias de desarrollo sustentable por lo que mantienen una relación negativa. Por último, el cambio climático se relaciona de manera positiva con los peligros biofísicos ya que exacerba su incidencia, además, afecta el desarrollo de las actividades económicas debido a que afecta la disponibilidad de los servicios ecosistémicos, por lo que las sequías se relacionan negativamente con la disponibilidad de los recursos hídricos.

VIII. DISCUSIÓN

VIII.1 Medición del estado del sistema socio-ecológico

El SESI es una herramienta ampliamente aplicable para la evaluación de la condición de los sistemas socio-ecológicos, su uso permite estimar el efecto de las perturbaciones y la capacidad de resiliencia de los SSE, por lo tanto, es un punto de referencia clave con el que comparar escenarios futuros cuando se apliquen estrategias de gestión o se sigan tendencias actuales, y, por tanto, fundamentar una política integral. Aunque el SESI exhibe algunas similitudes con el Índice de salud de los océanos (OHI), (Halpern *et al.*, 2012; Blenckner *et al.*, 2021) o el Índice de Vulnerabilidad (IoV) (Tallman, 2016), el SESI es un índice que puede emplearse en distintos contextos y escalas espaciales (Estoque y Murayama, 2014; Estoque y Murayama, 2017; Kurniawan *et al.*, 2019). El índice incorpora conjuntos de indicadores de distintas dimensiones del sistema socio-ecológico, a saber, integridad social, ecológica y de gobernanza, así como los de exposición y sensibilidad a peligros biofísicos y presiones antrópicas.

En general los índices ofrecen información que puede emplearse para informar las decisiones sobre la gestión de los SSE (Brousmiche *et al.*, 2020). Sin embargo, el análisis a escala local permite obtener mejores mediciones, mediante el uso de conjuntos de datos más específicos, lo que revela la condición de unidades de análisis más pequeñas, que a menudo no se captan en mediciones a mayores escalas, lo que es útil para una mejor y más rápida orientación para la gestión de los SSE (Halpern *et al.*, 2012). La fácil interpretación de índices como el SESI, debido a su componente espacial, permite ubicar los contrastes en la condición socio-ecológica que es útil para dirigir la toma de decisiones (Estoque y Murayama, 2017).

A escala local se reportó que la ZSSMO tiene condición socio ecológica baja. Los valores del SESI estimados oscilaron entre -0.244 y 0.361. Este resultado contrasta con lo reportado en la evaluación global (Estoque y Murayama, 2017). Los países con los valores del SESI más altos son Australia (SESI= 0.569), Canadá (SESI= 0.498) y Suecia (SESI= 0.485). El desarrollo socioeconómico de estos países los sitúa en posiciones favorables para afrontar los retos derivados de las presiones sociales y ambientales. Aunque México se ubicó dentro de los 20 países con el SESI más alto, su territorio comprende mayormente zonas rurales donde prevalece la marginación y el bajo desarrollo humano (PNUD, 2022),

por lo que su capacidad de resiliencia para afrontar retos mayores debido a las presiones socioambientales es menor. La condición socio-ecológica disminuye aún más en las zonas donde la población indígena es significativa. Con posibles excepciones, los indígenas han sufrido el mayor rezago social y económico (Hernández y Ayala-Guzmán, 2022), esto explica, al menos en parte, el bajo SESI dentro de los municipios de la ZSSMO. Solo los municipios de Eloxochitlán y Xochicoatlán tuvieron valores por encima del SESI del país. En estos municipios se destacan por una relativa alta resiliencia.

Los factores que inciden sobre la condición socio-ecológica son espacialmente discretos y las vías por las que se alcanzan los valores en el índice son distintas, dependientes de la escala espacial y la dinámica de los SSE, por tanto, los valores del SESI son una medida de referencia y no la condición en sí misma. Por ejemplo, el cambio climático y la deforestación son los principales factores de presión en los SSE (Gonzales-Redin *et al.*, 2019). Sin embargo, en zonas del sureste asiático donde se han reportado resultados del SESI similares a los del presente estudio, se ha demostrado como el aumento del nivel del mar, terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas (Estoque y Murayama, 2014) y las actividades turísticas (Kurniawan *et al.*, 2019) son determinantes de los SSE. En contraste para la ZSSMO a la deforestación se suma la falta de agua y la basura, incluso, en algunos municipios la exposición a sequías y deslaves (Pérez, 2017) producen valores mayores de presiones socioambientales en comparación con el resto. La contextualización de los valores del índice contribuye a estimar la importancia de los impulsores de cambio relevantes para cada SSE.

La pérdida de servicios ecosistémicos debido a la deforestación es un problema grave en la ZSSMO (Lejía *et al.*, 2021). Este fenómeno está impactando en la capacidad de obtener agua (Pérez, 2017; Castelán-Lorenzo y Navarrete-Gonzales, 2022). Es sorprendente que los municipios con mayor población indígena sean los que menor porcentaje de área forestal tienen ya que la marginación social que viven estos grupos ha erosionado las prácticas de aprovechamiento tradicionales incrementando la deforestación (Serrano *et al.*, 2016), como se observa en los resultados de los indicadores de integridad y cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (Apéndice 12). La cobertura forestal por bosques, selvas y matorrales permiten considerar la adaptación basada en ecosistemas (Reid *et al.*, 2019). Este tipo de adaptación incrementa la resiliencia ante fenómenos ambientales como el cambio climático (Ariza-Montobbio y Cuvi, 2020).

Por otro lado, la resiliencia implica la suma de la integridad social, ecológica y de gobernanza (Estoque y Murayama, 2014), los cuales son componentes relacionados con

las políticas que se dictan desde los tres órdenes de gobierno (federal, estatal y municipal), así como por los presupuestos que se otorgan y las características del entorno natural. En particular la gobernanza en la ZSSMO es deficiente. Hay escasa participación civil para la toma de decisiones y limitado número de acuerdos de los cabildos y escasa cobertura de los servicios públicos.

La participación civil y en particular la participación indígena es un aspecto clave para el desarrollo social ya que involucran conocimientos y capacidades heredados y que son esenciales para adaptarse, mitigar y minimizar las amenazas del cambio climático (Sahoo *et al.*, 2022). Comunidades indígenas de la India y el suroeste de China destacan el papel de sus sistemas alimentarios en la resistencia al cambio climático, la nutrición, la sostenibilidad, así como las amenazas de las políticas agrícolas, de desarrollo y de conservación (Swiderska *et al.*, 2022). Incluso se han motivado acuerdos para mejorar la cohesión social de los grupos indígenas en esta región y generado alianzas para el uso de sus conocimientos y cosmovisiones para la generación de estrategias que aumenten la resiliencia al cambio climático y minimicen el impacto de la marginación (Swiderska *et al.*, 2022; FAO, 2021; Nursey-Bray *et al.*, 2022).

En Latinoamérica la escasa vinculación entre las comunidades y las instituciones han exacerbado la marginación y la falta de protección de sus territorios, incluso desconociendo la posesión tradicional de sus tierras (Sahoo *et al.*, 2022). En regiones de la amazonia brasileña se ha incentivado la promoción de leyes en favor de la industria minera (Villén-Pérez *et al.*, 2022). En otros países de la región, la inseguridad en la tenencia de la tierra agrava los conflictos sociales, la contaminación y el escaso crecimiento económico y social (Raderschall *et al.*, 2020). Por lo que conseguir mejorar la gobernanza de las comunidades rurales e indígenas en Latinoamérica es vital para aumentar el progreso social, la protección del territorio y con ello contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Sahoo *et al.*, 2022).

Una descripción más específica de las características de los SSE a escala local puede ayudar comprender mejor su dinámica, por ejemplo, para la ZSSMO los valores del SESI no se distribuyen aleatoriamente, se correlacionan espacialmente ($I \text{ Moran} = 0.165$). Los municipios correlacionados positivamente presentaron características sociales y ecológicas favorables como la baja incidencia de pobreza y el desarrollo humano superior al resto de los municipios, así como porcentajes relativamente altos de cobertura forestal y presencia de áreas naturales protegidas. La conectividad es un factor muy importante ya que tiene relación con un mejor acceso a los servicios sociales, empleo e insumos y

productos de primera necesidad (Vargas-Espíndola *et al.*, 2020). En localidades rurales de la India los planes de desarrollo de infraestructuras de comunicación particularmente carreteras impulsan las actividades económicas (Chaurey y Le, 2022), similar a lo reportado en zonas rurales en China (Fan *et al.*, 2002). Para la ZSSMO esto explica en parte los mejores resultados de integridad social para los municipios más resilientes. La carretera federal 105 facilita el acceso a los principales centros económicos ubicados en Metztlán y Zacualtipán, donde se encuentran los principales centros de comercio y de trabajo, sobre todo de la industria manufacturera (INEGI, 2021a). Cabe señalar que Zacualtipán no se correlaciona espacialmente debido a que sus valores de integridad social y sensibilidad fueron muy superiores al resto de los municipios del área. Por otro lado, Salgado (2015) señala una correlación entre el acceso a las carreteras y la reducción de la pobreza. Sin embargo, Gachassin *et al.* (2010) destacan que este escenario es favorable en las zonas donde se desarrollan actividades no agrícolas.

Los municipios espacialmente correlacionados negativamente se caracterizaron por deficiencias en integridad social e integridad ecológica. Sobre todo, los municipios pertenecientes a la Sierra Otomí-Tepehua y la Huasteca veracruzana, ya que presentan un desarrollo humano desigual (Guzmán *et al.*, 2021). Además, permea la falta de empleo bien remunerado y la migración (Miranda, 2022), hay rezago educativo, deficiente cobertura de los servicios de salud y de su matriz económica y falta de cohesión social (CONEVAL, 2020). En estos municipios persiste la falta de conectividad lo que dificulta la atención para las comunidades más alejadas de las cabeceras municipales (Medina-Pérez *et al.*, 2023), distintas comunidades de estas regiones presentan dificultades para trasladarse a las cabeceras municipales u otros sitios con mejores servicios. También han perdido un importante porcentaje de su cobertura forestal (Bravo-Cadena, 2019). En suma, hay una alta incidencia de peligros biofísicos y escasos instrumentos de conservación.

La condición socio-ecológica de la ZSSMO se circunscribe dentro de una dinámica nacional compleja, los municipios de la ZSSMO presentan un bajo progreso social (Guzmán *et al.*, 2021). Estos resultados parten de una falta de capacidad de diagnóstico para que los municipios implementen o corrijan las iniciativas de gestión y programas de desarrollo (PNUD, 2019), y se exacerban por la falta de relaciones transversales entre las instituciones y la población (McGinnis y Ostrom, 2014). Además, no se aborda apropiadamente la complejidad del espacio, las unidades de análisis no son espacios homogéneos (Estoque y Murayama, 2017).

Por lo tanto, para la gestión de los SSE se deben contemplar las capacidades y limitaciones del sistema (Folke *et al.*, 2002). Los agrupamientos de los municipios obtenidos mediante el ACP indicaron que los municipios del grupo 1a necesitan robustecer su matriz de unidades económicas, mejorar las condiciones de empleo, servicios de salud y agua entubada en sus hogares. El grupo 2a, presenta falta actividad de los cabildos y propuesta de iniciativas para la atención de zonas vulnerables a peligros como los deslaves. En el grupo 3a, son notorias las deficiencias en el número de unidades de salud y de instituciones de educación medio superior, y la incidencia de las sequías.

Los resultados del Modelo Lineal Generalizado revelaron un conjunto de indicadores clave que se discuten a continuación y que podrían contribuir al aumento de la resiliencia, si se atienden apropiadamente:

Índice del Cambio en la Disponibilidad de los Servicios Ecosistémico. La deforestación es el principal factor de riesgo en la ZSSMO a consecuencia de las actividades productivas y la construcción de caminos (CONABIO, 2010; Lorenzo *et al.* 2019). Los efectos asociados como la pérdida de la biodiversidad, la contaminación del suelo y de los cuerpos de agua (CONABIO SEMARNATH, 2021), han contribuido con la degradación de los servicios ecosistémicos (Monterroso-Rivas *et al.*, 2016). Sin embargo, la deforestación presenta un trasfondo complejo ya que la agricultura y ganadería son las principales actividades de subsistencia de la población a pequeña escala (Bravo-Cadena, 2019). Esto sucede en otras regiones del país (Ellis *et al.*, 2020; Guzmán-Rosas, 2023), es decir, los modos de vida de las comunidades rurales dependen de los recursos de sus bosques (Romo, 2019), por lo que la sobreexplotación de sus recursos ha contribuido a que la marginación y el rezago social presenten una relación positiva con la deforestación (Leija-Loredo *et al.*, 2018; Ellis *et al.*, 2021). Las predicciones futuras señalan el impacto de la deforestación sobre las actividades productivas y la disponibilidad de los recursos hídricos (Ponce-Reyes *et al.*, 2013) y riesgos para la seguridad alimentaria (IPCC, 2021). Por ello son necesarias estrategias enfocadas a la reestructuración de las actividades productivas por un aprovechamiento sostenible y restauración de los ecosistemas de la región (Bravo-Cadena, 2019).

Índice de Valoración de los servicios ecosistémicos. La importancia de los servicios ambientales se mide desde el punto de vista económico (Kaiser *et al.*, 2023). En México, el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA) es el principal estímulo para fomentar su conservación y reducir la conversión de la cobertura forestal. Sin embargo, su alcance es limitado (Chagoya e Iglesias-Gutiérrez, 2009; CONAFOR, 2011b). Para la ZSSMO se

han descrito algunas áreas de importancia para los servicios hidrológicos y de biodiversidad las cuales son beneficiadas por el PSA (CONABIO, 2010). Sin embargo, las áreas de importancia cultural (Bravo-Cadena y Pavón, 2018) y sumideros de carbono (Leija *et al.*, 2018) no han sido valorados en el PSA. Tampoco han sido consideradas las estrategias alternativas de subsistencia de la población mediante las que obtienen insumos de primera necesidad como la leña, alimentos y medicina tradicional (Oropeza y Hernández, 2022).

Las limitaciones del PSA subyacen a procesos complejos y recursos gubernamentales insuficientes (Galicia *et al.*, 2018), falta de permanencia a largo plazo y repartición del beneficio poco equitativo (Izquierdo-Tort *et al.*, 2022), por lo que el costo de oportunidad de la tierra es mayor al monto ofrecido por el PSA (Chagoya e Iglesias-Gutiérrez, 2009). Además, los servicios ecosistémicos no se captan plenamente en los mercados comerciales y se les da menor importancia en las decisiones políticas (Constanza *et al.*, 1997).

Debido a las limitaciones del PSA, Bravo-Cadena y Pavón (2018) proponen una valoración integral (intrínseco, biológico e instrumental) de los servicios ecosistémicos y la incorporación de estímulos monetarios y no monetarios que motiven su conservación. Dicha transición requiere del conocimiento de la mayor cantidad de servicios ambientales que se generan en los SSE (Constanza, 1997) y de su valoración económica para estimar los costos de su pérdida por del cambio de uso de suelo y para apoyar políticas de planeación paisajística (Athukorala *et al.*, 2021; Kaiser *et al.*, 2023). Además de lo anterior es fundamental el reconocimiento del valor intrínseco-utilitario para las comunidades que dependen directamente de los servicios de aprovisionamiento de sus bosques (Chakraborty *et al.*, 2019). El PSA debería replantear su operatividad a partir de la identificación de áreas prioritarias e incorporar medios para medir el impacto del programa (Segura-Millan y Perez-Verdin, 2023). Los municipios deberían adoptar otras iniciativas para conservar los bosques, tales como REDD+, tal como se sugieren Leija y colaboradores (2021). La REDD+ ayudaría a la generación de estrategias de desarrollo sostenible a través de actividades económicas alternativas basadas en usos y conocimientos tradicionales de la población (Corbera y Schroeder, 2011).

Número de iniciativas presentadas por los cabildos. Las iniciativas presentadas, discutidas y aprobadas por los cabildos difirieron entre los municipios de la ZSSMO. En Jacala de Ledezma no presentaron o discutieron iniciativas en contraste con Xochicoatlán o San Bartolo Tutotepec donde para el mismo periodo aprobaron más de 45 iniciativas (INEGI, 2019). Se debe considerar que la información no está siempre disponible. Sin

embargo, las iniciativas de los cabildos no implican resultados exitosos y reflejan la disparidad entre municipios, los cuales carecen de capacidades fundamentales (PNUD, 2019). Los municipios fallan desde su capacidad de diagnóstico hasta su capacidad para generar y gestionar políticas estratégicas para atender las distintas áreas de la gobernanza. Es decir, incluso, las iniciativas aprobadas no garantizan una mejora para el SSE. Estas limitaciones presentan un trasfondo complejo y subyacente a los arreglos institucionales, intereses políticos, falta de conocimiento y corrupción (García y Carrasquel, 2020).

El problema no solo radica en el número de iniciativas, también en la propuesta de iniciativas poco informadas. En los planes de desarrollo municipales se plantean estrategias contradictorias, por ejemplo, incrementar el alcance de las actividades productivas sin contar con instrumentos de planificación territorial, limitar o desconocer el potencial cultural y por tanto posibilidades de desarrollo económico alternativas, o propiamente una carencia de metas en relación con la conservación de los servicios ambientales. Además, se carece de información sobre el éxito de estas propuestas. Como se señala en PNUD (2019), el planteamiento de iniciativas debe considerar cuatro áreas clave, 1) arreglos institucionales, 2) liderazgo, 3) conocimiento y 4) rendición de cuentas. Es decir, generar información sobre las capacidades actuales de los municipios que sustenten las propuestas de iniciativas y determinar las instancias para su cumplimiento (sinergias entre los gobiernos, agencias nacionales e internacionales y ONGs y actores clave de las comunidades) (Mensah, 2019).

Número de personal sanitario. El sistema de salud mexicano prioriza a la población con empleo formal. Mediante el seguro social se atiende al 50% de la población, el resto se atiende mediante el instituto de salud provisional. En las zonas indígenas, el instituto de salud provisional atiende al 70.6 % de la población, 11 % el seguro social y para 15.1 % no hay ninguna cobertura de salud (de León-Martínez *et al.*, 2020). Los servicios de salud en las zonas indígenas han sido históricamente limitados y se ha afectado la calidad de vida de la población (Hernández y Ayala-Guzmán, 2022; Bautista y Muñoz, 2022).

En el caso de la ZSSMO, los municipios de Eloxochitlán y San Agustín Metzquitlán tuvieron la tasa del personal de salud más alta, por arriba del promedio nacional (2.2 médicos por cada 1000 habitantes; OCDE, 2016). En el resto de los municipios la tasa es inferior y lejos del promedio internacional de 3.4 médicos por cada mil habitantes (OECD, 2017). Los servicios de salud se enfocan en la atención de primer nivel (preventivo y padecimientos no graves) y los médicos pasantes a menudo se encargan de atender toda la gama de enfermedades (Carlson y Lorenzo, 2022). El grado de marginación y la falta de cobertura y calidad de los servicios médicos se correlacionan (Roldan *et al.*, 2017), por ello

la población indígena presenta altas tasas de morbilidad, discapacidad y mortalidad temprana (Argoty-Pantoja *et al.*, 2021). La discriminación y estigmatización que sufren los indígenas se asocia a un mayor riesgo de depresión, un fenómeno muy poco conocido (Olko *et al.*, 2023).

Roldan *et al.* (2017) sugieren estudiar las carencias en los servicios de salud a nivel de microescala, distinguiendo entre la población indígena y la no indígena, ya que la población indígena es la más desconectada de los servicios de salud y a menudo las problemáticas locales no pueden ser captadas en contextos generales.

Organizaciones No Gubernamentales. En la ZSSMO tienen presencia 84 ONGs, destacando aquellas cuya actividad principal es el apoyo para el desarrollo de los pueblos y las comunidades indígenas, las relacionadas al apoyo en el aprovechamiento y conservación de los recursos naturales y la promoción del desarrollo sustentable en zonas urbanas y rurales (SIRFOSC, 2021). El impacto que tienen estas organizaciones no es claro y se reconoce que su desempeño es bajo debido a la falta de capacidades (recursos humanos y económicos limitados) (Indesol, 2010). Sin embargo, son importantes en los distintos ámbitos la gobernanza (Pacheco y Franzoni, 2016). Las OSC pueden generar y fortalecer vínculos que contribuyan al desarrollo de las comunidades entre actores locales e instituciones gubernamentales y privadas (Pulido y Cuevas-Cardona, 2013).

Algunos estudios en zonas indígenas de México señalan que las OSC impactan positivamente. La Xuajin *Me'phaa* A.C., ha impulsado la restauración de huertos familiares de la comunidad *Me'phaa* en el estado de Guerrero, contribuyendo a la seguridad alimentaria (Salcedo y Ceccon, 2020) y la soberanía del pueblo *Me'phaa* mediante el fortalecimiento de sistemas de gobernanza participativa (Galicia-Gallardo *et al.*, 2019). La GeoConservación A. C., ha contribuido al manejo de recursos forestales, esfuerzos de conservación y obtención de beneficios socioeconómicos para la comunidad Chinanteca, Oaxaca: enfocados en la participación de esquemas de PSA (Rodríguez-Robayo *et al.*, 2019). Es clave impulsar la participación de las OSC de la ZSSMO, y aumentar sus capacidades y fortalecer alianzas con los gobiernos municipales y estatales. Las OSC son organismos generadores de información gracias al contacto directo con la población y sus problemáticas, además de sus actividades como gestores de programas de desarrollo en las distintas áreas de la gobernanza.

Densidad de Población Indígena. El 24 % de la población del sistema pertenece a alguno de los grupos indígenas (INEGI, 2020a). Esta población es importante porque sus formas de vida y ontologías políticas están asociadas al sentido de pertenencia sobre sus

territorios (Dow, 2005). Se consideran actores clave para la conservación de la biodiversidad y la cultura (Oropeza y Hernández, 2022).

La coexistencia de distintos grupos indígenas en la ZSSMO (p. e. grupos Otomíes, Tepehuas, Náhuatl y Totonacas) ha incentivado diversos grados de bilingüismo y multilingüismo (Guerrero, 2012). Son grupos con saberes y tradiciones compartidas (Heiraz, 2012; Carrillo-Silvano *et al.*, 2020) y sistemas político-religioso basado en un gobierno comunal (Miranda, 2022). Han creado, compartido, reproducido y apropiado saberes agroecológicos, para manejar sus tierras (Torres Castro *et al.*, 2022). Cultivos como el maíz tiene un significado simbólico a través del cual la gente crea un fuerte vínculo con la tierra (Diédhiou *et al.*, 2022). Los huertos familiares proveen de alimentos y medicina cacerera, fundamentales para la seguridad alimentaria, además de beneficios económicos y culturales (Santana *et al.*, 2015), que consecuentemente ha contribuido a la conservación de la biodiversidad local.

Las comunidades indígenas son altamente resilientes (Ford, 2022). Sin embargo, la comunidad indígena de la ZSSMO enfrenta distintas limitantes como discriminación, racismo (Miranda, 2022), carencias sociales (CONEVAL, 2020), segregación debida a la falta de apoyo a sus economías locales lo que motiva la migración (Wies *et al.*, 2022). La migración, además, ha contribuido a la pérdida de los saberes tradicionales y el abandono de sus tierras (Leyva *et al.*, 2021), al aumento de la erosión cultural (Torres Castro *et al.*, 2022), y pérdida de resiliencia (García *et al.*, 2020). Las instituciones han reducido su condición a la de una población a la que “hay que cuidar”, limitando sus capacidades de desarrollo y exacerbando su vulnerabilidad (Oropeza y Hernández, 2022). Sin embargo, es posible replantear las estrategias de desarrollo a partir de las realidades e intereses de la comunidad indígena y no solo desde la perspectiva gubernamental (Franquesa-Soler *et al.*, 2022).

Debido al complejo contexto en el que se desarrollan las comunidades indígenas, los municipios necesitan puntualizar en sus problemáticas (Roldan *et al.*, 2017), sistematizar los saberes tradicionales del manejo de la tierra, con base en la identificación de conocimientos, actitudes y prácticas por género y edad (Torres Castro *et al.*, 2022). Por otro lado, es importante promover las prácticas que contribuyan con la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad (Santana *et al.*, 2015) y la promoción de empresas rurales sostenibles para aumentar el valor de los productos agrícolas, asegurar un ingreso económico sólido e impactar en la mitigación de la emigración y contribuir con el mantenimiento del conocimiento tradicional (Leyva *et al.*, 2021). Todas las estrategias

deberían seguir una colaboración transversal, con las comunidades indígenas y sus sistemas de gestión como eje central y el soporte de las instancias gubernamentales y ONGs.

VIII.2. Modelo dinámico de la ZSSMO

El modelo cualitativo reveló dinámicas propiciadas por impulsores ligados a la deforestación. No todos los impulsores del cambio actúan con la misma intensidad al interior de los municipios. En contraste con las actividades agrícolas que están bien extendidas en todo el sistema (INEGI, 2021b), la urbanización es más extendida en municipios como Zacualtipán o Metztlán (INEGI, 2020a). En Calnali, Eloxochitlán, Juárez Hidalgo, Lolotla, Tepehuacán de Guerrero, Tlahuiltepa, Tlanchinol, Xochicoatlán y Zacualtipán la principal causa de la deforestación es la apertura de potreros y agricultura de temporal (Lorenzo *et al.*, 2019). En la zona Otomí-Tepehua, además de la deforestación, se suman las actividades mineras y tala ilegal, las cuales son fuente de conflictos sociales sin una clara estrategia de solución (Oropeza y Hernández, 2022).

Los impulsores identificados han afectado de manera negativa a los ecosistemas naturales de la región, disminuyendo su extensión e impactado directamente sobre la biodiversidad (CONABIO y SEMARNATH, 2021) y los servicios ecosistémicos. En estos últimos se destacan los recursos hídricos, para los cuales se espera que el aumento de la temperatura y la variación de la precipitación provoquen la disminución en la disponibilidad en las próximas décadas (Monterroso-Rivas *et al.*, 2016). Castelán-Lorenzo y Navarrete-González (2022) identificaron disminuciones en la precipitación, aumentos de temperatura y cambios en la condensación de humedad a nivel local que anticipan los escenarios futuros y la necesidad de medidas urgentes.

El sistema de gobernanza opera de manera deficiente, persiste una falta de cohesión institucional-social (Gallardo Arias, 2010). Al respecto se hace énfasis en que los mecanismos que podrían mitigar los efectos negativos de los impulsores del cambio sólo surgen con la existencia de la buena gobernanza, con el apoyo de las comunidades locales y una adecuada evaluación de las necesidades sociales y la valoración de los servicios ambientales (Berkes, 2007).

Las capacidades locales son limitadas sobre todo para las comunidades indígenas (Oropeza y Hernández, 2022). La migración y la pérdida de saberes aumentan la erosión cultural (García y Carrasquel, 2020). En general, no existe un vínculo de cooperación entre

las comunidades y las instituciones, lo que tendría que replantearse. Desde el estado se han promovido políticas en materia de desarrollo sustentable, como la producción de bienes culturales. García y Carrasquel (2020), señalaron que no existe un entendimiento adecuado sobre la cosmovisión de estas comunidades, ya que la propuesta se basa en la producción artesanal condicionada a normas operativas institucionales y no sobre las necesidades de la población.

El modelo dinámico generado para la ZSSMO reconoce de manera explícita los componentes más importantes y las fuerzas impulsoras del cambio en la condición socio-ecológica. Este panorama holístico proporciona una mejor comprensión del sistema y la identificación de puntos que puedan funcionar para las alternativas políticas. El conjunto de indicadores descritos en el Modelo Lineal Generalizado podría aportar información de utilidad en su gestión.

IX. CONCLUSIONES

Para analizar la condición socio-ecológica de los municipios en la ZSSMO, se emplearon dos aproximaciones metodológicas, el marco del SESI y la dinámica de sistemas. En la búsqueda de mejorar la efectividad de los índices como el SESI se ha generado un debate en torno a la cantidad de dimensiones adecuadas para medir apropiadamente la condición de los SSE. Sin embargo, la información disponible a nivel municipal permitió generar un modelo robusto sobre la condición de los municipios de la ZSSMO. En este estudio se incorporaron al SESI indicadores que abordan la gobernanza ambiental relacionados a la gestión de los residuos sólidos. Además, se incluyeron indicadores relacionados con las actividades económicas y tenencia de la tierra.

Mediante la dinámica de sistemas fue posible generar la estructura del sistema socio-ecológico y presentar un modelo cualitativo con las interacciones y retroalimentaciones. Este modelo fue validado mediante la literatura disponible, sin embargo, hace falta incorporar otras formas de validación como la opinión de expertos y la perspectiva de actores locales clave. Estos actores ofrecerían una perspectiva más amplia mediante información que posiblemente no esté publicada y/o puntualicen sobre los datos disponibles en la literatura.

X. LITERATURA CITADA

- Abadi, L. S. K., Shamsai, A., y Goharnejad, H. (2015). An analysis of the sustainability of basin water resources using Vensim model. *KSCE Journal of civil engineering*, 19, 1941-1949. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0570-7>
- Abram, J. J. y Dyke, J. G. (2018). Structural Loop Analysis of Complex Ecological Systems. *Ecological Economics*, 154, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.011>
- Alcántara, O. y Luna, I. (2001). Análisis florístico de dos áreas con bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, México: Eloxochitlán y Tlahuelompa. *Acta Botánica Mexicana*, 54, 51-87.
- Almeida, L., Arroyo-Crivelli, G. Centeno-Barba, K., Aguilar-Zamora, V., Arizpe, N. y Ramos, A. (2017). El monitoreo participativo herramienta para el estudio de los socioecosistemas, un ejemplo en la cuenca del río Magdalena, Ciudad de México, en R. Calderón-Contreras (Ed.), *Los Sistemas Socioecológicos y su resiliencia, casos de estudio*, (pp. 69-84). Universidad Autónoma Metropolitana, Gedisa editorial, Ciudad de México.
- Anderies, J. M., Janssen, M. A., y Ostrom, E. (2004). A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and society*, 9, 18.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Aracil, J., y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas* (p. 20). Madrid: Alianza editorial.
- Argoty-Pantoja, A. D., Robles-Rivera, K., Rivera-Paredes, B., y Salmerón, J. (2021). COVID-19 fatality in Mexico's indigenous populations. *Public health*, 193, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2021.01.023>
- Arias-Gaviria, J., Suarez, C. F., Marrero-Trujillo, V., Villegas-Palacio, C., y Arango-Aramburo, S. (2021). Drivers and effects of deforestation in Colombia: a systems thinking approach. *Regional Environmental Change*, 21, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01822-x>
- Ariza-Montobbio, P., y Cuvi, N. (2020). Ecosystem-based adaptation in Ecuador: good practices for adaptive co-management. *Ambiente & Sociedade*, 23, e03152. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20180315r2vu2020L4AO>
- Athukorala, D., Estoque, R. C., Murayama, Y., y Matsushita, B. (2021). Ecosystem services monitoring in the Muthurajawela Marsh and Negombo lagoon, Sri Lanka, for sustainable landscape planning. *Sustainability*, 13(20), 11463. <https://doi.org/10.3390/su132011463>
- Ávila, S. y Espejel, I. (2020). Resiliencia de socioecosistemas costeros. Universidad Nacional Autónoma de México. 174 p.

- Azar, C., Holberg, J. y Lindgren, K. (1996). Socio-ecological indicators for sustainability. *Ecological Economics*, 18, 89-112. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(96\)00028-6](https://doi.org/10.1016/0921-8009(96)00028-6)
- Ballesteros, B. M. (1997). Otomíes y Nahuas en las doctrinas agustinas de la Sierra Alta durante el siglo XVI. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle*, 03, 15-23.
- Balvanera, P., Astier, M., Gurri, F. D., y Zermeño-Hernández, I. (2017). Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas socioecológicos en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88, 141-149. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.005>
- Baños-González, I., Martínez-Fernández, J. y Esteve-Selma, M. Á. (2015). Dynamic integration of sustainability indicators in insular socio-ecological systems. *Ecological Modelling*, 306, 130-144. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.014>
- Baños-González, I., Martínez-Fernández, J., y Esteve-Selma, M. A. (2016). Using dynamic sustainability indicators to assess environmental policy measures in Biosphere Reserves. *Ecological Indicators*, 67, 565-576. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.021>
- Bautista, J. D. y Muñoz, V. A. M. (2022). Servicios públicos de salud en las huastecas hidalguense y potosina, México: un derecho humano en entredicho en la coyuntura del Covid 19. *Ciencia Huasteca Boletín Científico de la Escuela Superior de Huejutla*, 10, 1-14. <https://doi.org/10.29057/esh.v10i19.8109>
- Begun, J. W. (1994). Chaos and complexity: Frontiers of organization science. *Journal of Management Inquiry*, 03, 329-335. <https://doi.org/10.1177/105649269434006>
- Berg, M. (1992). Rehabilitating the industrial revolution. *The Economic History Review*, 45, 24-50
- Berkes, F. (2004). Rethinking community-based conservation. *Conservation Biology*, 18, 621-63. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00077.x>
- Berkes, F. (2007). Community-based conservation in a globalized world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 15188-15193. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702098104>
- Berkes, F. y Folke, C. (1994). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. En, F. Berkes y C. Folke (Eds.). *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience* (pp. 01-26). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Berkes, F., Colding, J. y Folke, C. (2003). *Navigating socio-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 388 p.
- Binder, C. R., Hinkel, J., Bots, P. W. G. y Pahl-Wostl, C. (2013). Comparison of Frameworks for Analyzing Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 18, 26. <https://www.jstor.org/stable/26269404>

- Blenckner, T., Möllmann, C., Lowndes, J. S., Griffiths, J. R., Campbell, E., De Cervo, A., Belgrano, A., Boström, B., Fleming, V., Frazier, M., Neuenfeldt, S., Niiranen, S., Nilsson, N., Ojaveer, H., Olsson, J., Palmlov, C. S., Quaas, M., Rickels, W., Sobek, A., Viitasalo, M., Wikström, S. A. y Halpern, B. S. (2021). The Baltic Health Index (BHI): Assessing the social–ecological status of the Baltic Sea. *People and Nature*, 03, 359-375. <https://doi.org/10.1002/pan3.10178>
- Boateng, P., Omotayo, T., Osunsanmi, T., y Ekundayo, D. (2022). Socio-ecological risks management dynamic simulation in megaproject development of the Edinburgh Tram Network. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, (ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2022-0076>
- Bravo-Cadena, J. (2019). Consecuencias del cambio ambiental sobre los servicios ecosistémicos, en el corredor ecológico de la Sierra Madre Oriental, México. [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Bravo-Cadena, J. y Pavón, N. P. (2018). Valoración de los servicios ecosistémicos: diferentes lenguajes para la conservación en un área prioritaria. *Revista Biológico-Agropecuaria*, 06, 78-88. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v6i2.Especial.260>
- Bravo-Cadena, J., Pavón, N. P., Balvanera, P., Sánchez-Rojas, G. y Razo-Zarate, R. (2021). Water Availability–demand Balance under climate change Scenarios in an overpopulated region of Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 01-14. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041846>
- Brousset, D., Occelli, F., Genin, M., Cuny, D., Deram, A., y Lanier, C. (2020). Spatialized composite indices to evaluate environmental health inequalities: Meeting the challenge of selecting relevant variables. *Ecological Indicators*, 111, 106023. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106023>
- Bueno, N. P. (2012). Assessing the resilience of small socio-ecological systems based on the dominant polarity of their feedback structure. *System Dynamics Review*, 28, 351-360. <https://doi.org/10.1002/sdr.1476>
- Calderón-Contreras, R. (2017). Los Sistemas Socio-ecológicos y su Resiliencia: Casos de Estudio. Universidad Autónoma Metropolitana, Gedisa editorial, 121 p.
- Capshew, J. H. y Rader, K. A. (1992). Big science: Price to the present. *Osiris*, 7, 2-25. <https://doi.org/10.1086/368703>
- Carlson, R. A. C., y Lorenzo, G. G. R. (2022). El cuidado de enfermería comunitaria en zonas marginadas. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud*

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 10(20), 27-31.
<https://doi.org/10.29057/icsa.v10i20.8231>

- Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M. y Abel, N. (2001). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystem*, 04, 765–781. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>
- Carrillo-Silvano, J. A., de Guadalupe Vázquez, L. y Onofre, J. E. (2020). Culinary diagnosis of traditional cuisine in the state of Hidalgo. *Journal of Administrative Science*, 2(3), 18-26. <https://doi.org/10.29057/jas.v2i3.4963>
- Castelán-Lorenzo, C. L., y Navarrete-González, M. (2022). Cambio climático y afectaciones en la franja de condensación del bosque de niebla en la Sierra Otomí-Tepehua, Hidalgo. *Current Topics in Agronomic Science*, 2(2), 23-29. <https://doi.org/10.5154/r.ctasci.2022.04.01a>
- Ceja-Romero, J., Mendoza-Ruiz, A., López-Ferrari, A. N., Espejo-Serna, A., Pérez-García, B., y García-Cruz, J. (2010). Las epífitas vasculares del estado de Hidalgo, México: diversidad y distribución. *Acta Botánica Mexicana*, 93, 1-39.
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial: Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18 (1), 11-31.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2015). Datos abiertos. Disponible en <https://datos.gob.mx/busca/dataset/centro-nacional-de-prevencion-de-desastres>
- Cervantes, V., Gama, J. E., Roldán, I. E. y Hernández, G. (2014). Bases para Implementar Estrategias de Restauración: El Sistema Socio-Ecológico San Nicolás Zoyatlán (Guerrero, México). *Terra Latinoamericana*, 32, 143-159.
- Chagoya, J. L. e Iglesias-Gutiérrez, L. (2009). Esquema de pago por servicios ambientales de la Comisión Nacional Forestal, México. En Turrialba (Ed.). Buenas prácticas para la adaptación al cambio climático (pp. 189-202). CATIE, Costa Rica.
- Chakraborty, S., Avtar, R., Raj, R., y Thu Minh, H. V. (2019). Village level provisioning ecosystem services and their values to local communities in the peri-urban areas of Manila, The Philippines. *Land*, 8(12), 177. <https://doi.org/10.3390/land8120177>
- Challenger, A., Bocco, G., Equihua, M., Lazos Chavero, E. y Maass, M. (2014). La aplicación del concepto del sistema socio-ecológico: alcances, posibilidades y limitaciones en la gestión ambiental de México. *Investigación Ambiental*, 06, 01-21.
- Challenger, A., Córdova, A., Lazos, E., Equihua, M. y Maass, M. (2018). La opinión experta evalúa la política ambiental mexicana: Hacia la gestión de socio-ecosistemas. *Gestión y Política pública*, 27, 431-473.

- Chaurey, R., y Le, D. T. (2022). Infrastructure maintenance and rural economic activity: Evidence from India. *Journal of Public Economics*, 214, 104725. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2022.104725>
- Colding, J., Folke, C. y Elmqvist, T. (2003). Social institutions in ecosystemy management and biodiversity conservation. *Tropical Ecology*, 44, 25-41.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2010). El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. México D.F. 197 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad). (2020). Áreas Naturales Protegidas estatales, municipales, ejidales y privadas de México. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>.
- CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad). (2021). Áreas Naturales Protegidas federales de México, 2021. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/anpnov17gw.html>.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad) y SEMARNATH (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales de Hidalgo). (2021). La biodiversidad en Hidalgo: Estudio de caso. Ciudad de México, 470 p.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad). (1998). Climas, escala 1: 000 000. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2011a). Servicios Ambientales y Cambio Climático. SEMARNAT. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/5/2290Servicios%20Ambientales%20y%20Cambio%20Clim%C3%A1tico.pdf>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2011b). El programa de pago por servicios ambientales. SEMARNAT. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/2308Programa%20de%20Pago%20por%20Servicios%20Ambientales.pdf>
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2021). Resultados de la Convocatoria Nacional para la Solicitud y Asignación de Apoyos del Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021 Componente IV. Servicios Ambientales, Concepto SA.1 Pago por Servicios Ambientales, Modalidad SA1.1. Servicios Ambientales
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). (2003). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, México, D. F.

- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social) (2020). Informe de pobreza y evaluación 2020: Hidalgo. Disponible en: https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_de_pobreza_y_evaluacion_2020_Documentos/Informe_Hidalgo_2020.pdf
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). (2014). Metodología para la aprobación de indicadores de los programas sociales. México, D.F.
- Corbera, E., y Schroeder, H. (2011). Governing and implementing REDD+. *Environmental Science & Policy*, 14(2), 89-99. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.11.002>
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. v., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. y Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Crafts, N. F. R. (1996). The human development index: some historical comparisons (pp. 01-16). London School Economics, London.
- Crookes, D. J., Blignaut, J. N., De Wit, M. P., Esler, K. J., Le Maitre, D. C., Milton, S. J., Mitchell, S. A., Cloete, J., de Abreu, P., Fourie H., Gull, K., Marx, D., Mugido, W., Ndhlovu, T., Nowell, M., Pauw, M., y Rebelo, A. (2013). System dynamic modelling to assess economic viability and risk trade-offs for ecological restoration in South Africa. *Journal of Environmental Management*, 120, 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.001>
- Crouzeilles, R., Maurenza, D., Prieto, P. V., Barros, F. S. M., Jakovac, C., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Brancalion, P. H. S., Ceccon, E., Adams, C., Lazos-Chavero, E., Monteiro, L., Junqueira, A. B., Strassburg, B. B. N., y Guariguata, M. R. (2020). Associations between socio-environmental factors and landscape-scale biodiversity recovery in naturally regenerating tropical and subtropical forests. *Conservation Letters*, 14, 01-09. <https://doi.org/10.1111/conl.12768>
- Cruz-Hernández, S., Torres-Carral, G. A., Cruz-León, A., Salcedo-Baca, I. y Victorino-Ramírez, L. (2020). Saberes tradicionales locales y el cambio climático global. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 08, 1917-1928. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.2748>
- De la Torre-Valdez, H. C. y Moreno-Vázquez, J. L. (2019). Resiliencia del Sistema Socio Ecológico en la región subcuenca baja Río Sonora. *Estudios Sociales*, 29, 02-36. <https://doi.org/10.24836/es.v29i53.698>
- de León-Martínez, L. D., Palacios-Ramírez, A., Rodríguez-Aguilar, M., y Flores-Ramírez, R. (2020). Critical review of social, environmental and health risk factors in the Mexican indigenous

- population and their capacity to respond to the COVID-19. *Science of The Total Environment*, 733, 139357. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139357>
- De Vries, J. (1994). The Industrial Revolution and the Industrious Revolution. *The Journal of Economic History*, 54, 249-270. <https://doi.org/10.1017/S0022050700014467>
- DGIS (Dirección General de Información de Salud). (2021). Catálogo CLUES. Disponible en: http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/intercambio/clues_gobmx.html
- Diédhiou, I., Ramírez-Tobias, H. M., Fortanelli-Martinez, J., y Flores-Ramírez, R. (2022). Maize intercropping in the traditional “Milpa” system. Physiological, morphological, and agronomical parameters under induced warming: Evidence of related effect of climate change in San Luis Potosí (Mexico). *Life*, 12(10), 1589. <https://doi.org/10.3390/life12101589>
- Dow, W. J. (2005). Chapter 11: The Sierra Náhñu (Otomí). In Alan R. Sandstrom and E. Hugo García Valencia (Eds). *Native Peoples of the Gulf Coast of Mexico* (pp. 231 to 254). Tucson: University of Arizona Press.
- Edmondson, W. T. (1961). Changes in Lake Washington following an increase in the nutrient income. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 14, 167-175. <https://doi.org/10.1080/03680770.1959.11899264>
- Ellis, E. A., Navarro Martínez, A., García Ortega, M., Hernández Gómez, I. U., y Chacón Castillo, D. (2020). Forest cover dynamics in the Selva Maya of Central and Southern Quintana Roo, Mexico: deforestation or degradation? *Journal of Land Use Science*, 15(1), 25-51. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2020.1732489>
- Ellis, E. A., Navarro-Martínez, A., y García-Ortega, M. (2021). Drivers of forest cover transitions in the Selva Maya, Mexico: Integrating regional and community scales for landscape assessment. *Land Degradation & Development*, 32(10), 3122-3141. <https://doi.org/10.1002/ldr.3972>
- Escalante, R. y Basurto, S. (2014). Resiliencia de un sistema socio-ecológico. *Revista Virtual Redesma*, 07, 25-36.
- Estoque R. C. y Murayama, Y. (2017). A worldwide country-based assessment of social ecological status (c. 2010) using the social-ecological status index. *Ecological Indicators*, 72, 605-614. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.047>
- Estoque, R. C. y Murayama, Y. (2013). Landscape pattern and ecosystem service value changes: Implications for environmental sustainability planning for the rapidly urbanizing summer capital of the Philippines. *Landscape and Urban Planning*, 116, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.04.008>

- Estoque, R. C., Murayama, Y. (2014). Social–ecological status index: A preliminary study of its structural composition and application. *Ecological indicators*, 43, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.031>
- Fan, S., Zhang, L., y Zhang, X. (2002). Growth, inequality, and poverty in rural China: The role of public investments. International Food Policy Research Institute. Washington, DC. 72 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2021). The White/Wiphala Paper on Indigenous Peoples' food systems. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L. y Holling, C. S. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformations. *Journal of the Human Environment*, 31, 437-440. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.5.437>
- Folke, C., Hahn, T. y Olsson, P. (2005). Adaptive governance of social ecological systems. *Annual Review of Environmental and Resources*, 30, 441-473. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>
- Ford, J. D., King, N., Galappaththi, E. K., Pearce, T., McDowell, G., y Harper, S. L. (2020). The resilience of indigenous peoples to environmental change. *One Earth*, 2(6), 532-543. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.014>
- Forrester J. W. (1961). Industrial dynamics. Massachusetts Institute of Technology Press, Massachusetts. 459 p.
- Forrester, J. W. (2009). Some basic concepts in system dynamics. *Sloan School of Management*, 1-17.
- Franquesa-Soler, M., Jorge Sales, L., y Silva-Silva Rivera, E. (2022). Participatory action research for primate conservation: A critical analysis of a nonformal education program in Southern Mexico. *American Journal of Primatology*, 85(5), e23450. <https://doi.org/10.1002/ajp.23450>
- Fujita, H. (1954). An Interpretation of the changes in type of the population density effect upon the oviposition rate. *Ecology*, 35,253-257. <https://doi.org/10.2307/1931125>
- Gachassin, M., Najman, B., y Raballand, G. (2010). The impact of roads on poverty reduction: a case study of Cameroon. World Bank Policy Research Working Paper, (5209). Gachassin, Marie Castaing and Najman, Boris and Raballand, Gael, The Impact of Roads on Poverty Reduction: A Case Study of Cameroon (February 1, 2010). World Bank Policy Research Working Paper No. 5209, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1559726>

- Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., Guerra, V., Pérez-Campuzano, E. y Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443>
- Galicia-Gallardo, A. P., González-Esquivel, C. E., Castillo, A., Monroy-Sánchez, A. B., y Ceccon, E. (2019). Organic hibiscus (*Hibiscus sabdariffa*), social capital and sustainability in an indigenous Non-Governmental Organization from La Montaña, Guerrero, Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 43(10), 1106-1123. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1539694>
- Gallardo Arias, P. (2010). Vínculos sociales, conflictos y equilibrio entre los otomíes de San Bartolo Tutotepec, Hidalgo. *Itinerarios*, 2, 9-34.
- García, M. A. V. y Carrasquel, E. S. (2020). La cultura como política pública para el desarrollo de las comunidades indígenas en el estado de Hidalgo, México. Retos y avances. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, 25(50), 75-103.
- Geldmann, J., Manica, A., Burgess, N. D., Coad, L., y Balmford, A. (2019). A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 23209-23215. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908221116>
- Gonzalez-Redin, J., Gordon, I. J., Hill, R., Polhill, J. G. y Dawson, T. P. (2019). Exploring sustainable land use in forested tropical social-ecological systems: A case-study in the Wet Tropics. *Journal of Environmental Management*, 231, 940-952. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.079>
- Goodchild, M. F. (1987). A spatial analytical perspective on geographical information systems. *International journal of geographical information system*, 1 (4), 327-334. <https://doi.org/10.1080/02693798708927820>
- Goodland, R. (1995). The concept of environmental sustainability. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 26, 01-24. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000245>
- Gómez Aíza, A., Gómez Aíza, L., Pulido M. T., Sánchez Vázquez, S., Avendaño Gómez, A. y Ramírez Pérez, B. A. (2016). Catálogo de plantas medicinales y otros usos de la Sierra Otomí-Tepehua, Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Consejo Nacional para la Ciencia y la Tecnología. 368 p.

- Gowdy, J. M. (1994). The social context of natural capital: The social limits to sustainable development. *International Journal of Social Economics*, 21, 43-55. <https://doi.org/10.1108/03068299410065412>
- Salgado G. N. N. (2015). Does Transportation Infrastructure Reduce Poverty? Evidence from the Free Federal Trunk Highway System in Mexico. [Master Thesis]. Lund University School of Economics and Management.
- Griffin, K. y Khan, A. P. (1992). Globalization and the developing world: an essay on the international dimensions of development in the post-cold war era. Human Development Report Office (HDRO), United Nations Development Programme (UNDP). <https://ssrn.com/abstract=2294619>
- Gual, M., y Rendón, A. (2014). Bosques Mesófilos de Montaña de México: diversidad, ecología y manejo. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. DF.
- Guerrero G., A. (2012). Diversidad lingüística de Hidalgo. En L., Baez C., G. Garret R., D. Pérez G., B. Moreno A., U. J. Fierro A. y M. G. Hernández G. (Eds), Los pueblos indígenas de Hidalgo, atlas etnogeográfico (pp. 33-45). Gobierno del estado de Hidalgo, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Guzmán M., K., Gonzáles G, A. E. y Medina R, R. (2021). Índice de Progreso Social, México, 2015-2021: Cifras por entidad federativa. INCAE, CLADS, México, ¿cómo vamos? 142 p.
- Guzmán-Rosas, S. C. (2023). Strategies Used by Rural Indigenous Populations to Cope with Energy Poverty, in San Luis Potosí, Mexico. *Energies*, 16(11), 4479. <https://doi.org/10.3390/en16114479>
- Halpern, B. S., Longo, C., Hardy, D., McLeod, K. L., Samhuri, J. F., Katona, S. K., y Zeller, D. (2012). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488, 615-620. <https://doi.org/10.1038/nature11397>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V. y Moore, R. (2013). High-Resolution Global Maps of 21 st-century Forest Cover Change. *Science*, 342, 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Heiraz R., C. G. (2012). Diversidad lingüística de Hidalgo. En L., Baez C., G. Garret R., D. Pérez G., B. Moreno A., U. J. Fierro A. y M. G. Hernández G. (Eds), Los pueblos indígenas de Hidalgo, atlas etnogeográfico (pp. 34-39). Gobierno del estado de Hidalgo, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Hernández, L. O., y Ayala-Guzmán, C. I. (2022). Change and continuity in health inequities related to skin color in Mexico. *Social Medicine*, 15(1), 32-41.
- Hernández-Ramos, J., Hernández-Ramos, A., García-Magaña, J. J., García-Cuevas, X., García-Espinoza, G. G., Muñoz-Flores, H. J. y Olvera-Delgadillo E. H. (2016). Sistema compatible

- de ahusamiento-volumen comercial para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. en Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 08, 59-70.
- Holland, J. H. (1992). Complex Adaptive Systems. *Daedalus*, 121, 17-30. <https://www.jstor.org/stable/20025416>
- Holling, C. S. (1961). Principles of insect predation. *Annual Review of Entomology*, 06, 163-182. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.06.010161.001115>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematic*, 04, 01-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Holling, C. S. (1978). Adaptive environmental assessment and management. International Institute for Applied Systems Analysis. Alden press, Oxford. London, 377 p.
- Holling, C. S. (1992). Cross-Scale Morphology, Geometry, and Dynamics of Ecosystems. *Ecological Monographs*, 62, 447-502. <https://doi.org/10.2307/2937313>
- Holling, C.S. (1998). Two cultures of ecology. *Conservation Ecology*, 2, 4. <https://www.jstor.org/stable/26271675>
- IEE (Instituto Estatal Electoral de Hidalgo) (2020). Resultados del proceso electoral local Hidalgo 2019-2020: Participación municipal. Disponible en: <http://www.ieehidalgo.org.mx/index.php/j-content/proceso-electoral-2019-2020>
- Indesol (Instituto Nacional de Desarrollo Social). (2010). Midiendo las capacidades institucionales de las OSC del estado de Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo, México. 90 p.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2018). Vulnerabilidades definidas en el Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC). Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/vulnerabilidades-definidas-en-el-atlas-de-vulnerabilidad-al-cambio-climatico-anvcc>.
- INEGI (2016). Actualización del Marco Censal Agropecuario 2016. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/amca/2016/>
- INEGI (2019). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). Censo de Población y Vivienda, 2010. Indicadores. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020a). Censo de Población y Vivienda, 2020. Indicadores. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ag=13&ti=7#>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020b). División política municipal, escala 1:250000.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2021a). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2021b). Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1992). Síntesis Geografía del estado de Hidalgo. Consultado 26/02/2020, disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825220945>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. En Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press. 41 p.
- Izquierdo-Tort, S., Corbera, E., Martin, A., Lillo, J. C., y Dupras, J. (2022). Contradictory distributive principles and land tenure govern benefit-sharing of payments for ecosystem services (PES) in Chiapas, Mexico. *Environmental Research Letters*, 17(5), 055009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6686>
- Janssen, M. A. y Ostrom, E. (2006). Governing social-ecological systems. *Handbook of Computational Economics*, 02, 1465-1509. [https://doi.org/10.1016/S1574-0021\(05\)02030-7](https://doi.org/10.1016/S1574-0021(05)02030-7)
- Kaiser, J., Krueger, T., y Haase, D. (2023). Global patterns of collective payments for ecosystem services and their degrees of commodification. *Ecological Economics*, 209, 107816. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107816>
- Kurniawan, F., Adrianto, L., Bengen, D. G. y Prasetyo, L. B. (2019). The social-ecological status of small islands: An evaluation of island tourism destination management in Indonesia. *Tourism Management Perspectives*, 31, 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2019.04.004>
- Larios-Lozano, O., Valencia-Herverth, J., Bravo-Cadena, J., Guzmán-Arias, E., y Ortiz-Pulido, R. (2017). Aves del Parque Nacional Los Mármoles, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88(4), 944-959. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.020>
- Lazos-Chavero, E., Zinda, J., Bennett-Curry, A., Balvanera, P., Bloomfield, G., Lindell, C., y Negra, N. (2016). Stakeholders and tropical reforestation: challenges, tar-offs, and strategies in dynamic environments. *Biotropica*, 48, 900-914. <https://doi.org/10.1111/btp.12391>
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., y Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la

- Deforestación y Degradación). *Revista Cartográfica*, (102), 43-68.
<https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>
- Leija-Loredo, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., Rodríguez-Laguna, R., y Ángeles-Pérez, G. (2018). Land cover change and carbon stores in a tropical montane cloud forest in the Sierra Madre Oriental, Mexico. *Journal of Mountain Science*, 15(10), 2136-2147.
<https://doi.org/10.1007/s11629-018-4937-y>
- Leyva, D., De la Torre, M., y Coronado, Y. I. (2021). Sustainability of the agricultural systems of indigenous people in Hidalgo, Mexico. *Sustainability*, 13(14), 8075.
<https://doi.org/10.3390/su13148075>
- Li, F., Wang, R., Lu, S., Shao, M., Ding, J., y Sun, Q. (2021). Spatiotemporal simulation of green space by considering socioeconomic impacts based on A SD-CA model. *Forests*, 12, 202.
<https://doi.org/10.3390/f12020202>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., y Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317, 1513-1516. <https://doi.org/10.1126/science.1144004>
- López-Gutiérrez, B. N., Pérez-Escandón, B. E., y Villavicencio-Nieto, M. A. (2014). Aprovechamiento sostenible y conservación de plantas medicinales en cantarranas, Huehuetla, Hidalgo, México, como un medio para mejorar la calidad de vida en la comunidad. *Botanical Sciences*, 92, 389-404.
- Lorenzo, J., Duch, J., Perez, E. y Monterroso, A. I. (2019). Land-use change in the Sierra Alta of Hidalgo in the period 1976-2011. *Revista de geografía agrícola*, 63, 64-85.
<https://doi.org/10.5154/r.rga.2018.63.01>
- Lugo, B. y de la Cruz, E. (2018). Políticas ambientales en Hidalgo, México: un primer acercamiento. *Revista Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas*, 08, 95-104.
- Luna, I., Ocegueda, S. y Alcántara, O. (1994). Florística y notas biogeográficas del bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Anales del Instituto de Biología*, 01, 31-62.
- Maass, M. (2018). Los sistemas socio-ecológicos (SSE) desde el enfoque socio-ecosistémico (SES), en V. S. Ávila Foucat, y M. Perevochtchikova (Eds.), *Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México*, (pp. 19-66). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas, Ciudad de México.
- MacArthur, R. (1955). Fluctuations of Animal Populations and a Measure of Community Stability. *Ecology*, 36, 533-536. <https://doi.org/10.2307/1929601>

- Manetta, A., Hernández, L. A. L., y Avilés, T. S. (2018). La (in) capacidad de respuesta al ODS número 6 en los municipios de la zona Otomí-Tepehua (Hidalgo, México). *Revista Internacional de Derecho Ambiental e Políticas Públicas*, 9, 159-173. <https://doi.org/10.18468/planetaamazonia.2017n9.p159-173>
- Mayorga, R., Luna, I. y Alcántara, O. (1998). Florística del bosque mesófilo de montaña de Molocotlán, Molango-Xochicoatlán, Hidalgo, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 63, 101-119. <https://doi.org/10.17129/botsci.1571>
- McGinnis, M. D. y Ostrom, E. (2014). Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 19 (2), 30. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-06387-190230>
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). Ecosystems and human well-being. World Resources Institute. Island Press, Washington, DC. 137 p.
- Medina-Pérez, P. C., Tapia-Fernández, H. J., y Castillo-Martínez, A. (2023). Vulnerability and environmental risk in the Sierra Otomí Tepehua (Hidalgo, México): implications in the rural-indigenous scope. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 49, 139-161. <https://doi.org/10.18172/cig.5393>
- Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: *Literature Review. Cogent Social Sciences*, 5(1), 1653531. <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>
- Miranda J., V. (2022). Nahuatl discourses and political speeches as ways to negotiate the racial monolingual ideology of the mexican state in Hidalgo, Mexico. [Doctoral Dissertations. 2556.]. University of Massachusetts Amherst.
- Monsalvo, C. B., Endara, A. R., Nava, E. G. y Zarco, M. M. (2017). Análisis del sistema socioecológico nevado de Toluca: una aproximación multimetodológica, en R. Calderón-Contreras (Ed.), *Los Sistemas Socioecológicos y su resiliencia, casos de estudio*, (pp. 69-84). Universidad Autónoma Metropolitana, Gedisa editorial, Ciudad de México.
- Monterroso-Rivas, A. I., Gómez J. D., Velázquez, Y. y Tinoco, J. Al. (2010). Cambio climático: posibles modificaciones en el balance hídrico de un área con bosque Mesófilo de montaña en Hidalgo. En Monterroso, A. I. (ed.). *Métodos Contemporáneos en el Manejo de Recursos Naturales* (pp. 153-162). Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Natori, Y. y Hino, A. (2021) Global identification and mapping of socio ecological production landscapes with the Satoyama Index. *PLoS ONE*. 16, e0256327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256327>

- Ndayizeye, G., Imani, G., Nkengurutse, J., Irampagarikiye, R., Ndiokubwayo, N., Niyongabo, F. y Cuni-Sanchez, A. (2020). Ecosystem services from mountain forests: Local communities' views in Kibira National Park, Burundi. *Ecosystem Services*, 45, 101171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101171>
- Noble, M. M., Harasti, D., Pittock, J., y Doran, B. (2021). Using GIS fuzzy-set modelling to integrate social-ecological data to support overall resilience in marine protected area spatial planning: A case study. *Ocean & Coastal Management*, 212, 105745. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105745>
- Nurse-Bray, M., Palmer, R., Chischilly, A. M., Rist, P., y Yin, L. (2022). Old Ways for New Days: Indigenous Survival and Agency in Climate Changed Times. Springer Nature. Switzerland. 131 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-97826-6>
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). (2016). Estudios de la OCDE sobre los sistemas de salud de México: Resumen ejecutivo, diagnóstico y recomendaciones. Disponible en: <https://www.oecd.org/health/health-systems/OECD-Reviews-of-Health-Systems-Mexico-2016-Assessment-and-recommendations-Spanish.pdf>
- OECD (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico) (2017). Health at a Glance 2017: OECD Indicators. Disponible en: <https://www.oecd.org/mexico/Health-at-a-Glance-2017-Key-Findings-MEXICO-in-Spanish.pdf>
- Olko, J., Galbarczyk, A., Maryniak, J., Krzych-Miłkowska, K., Tepec, H. I., de la Cruz, E., Dexter-Sobkowiak, E. y Jasienska, G. (2023). The spiral of disadvantage: Ethnolinguistic discrimination, acculturative stress and health in Nahua indigenous communities in Mexico. *American Journal of Biological Anthropology*, 181, 364-378. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24745>
- OPLÉ (Organismo Público Local Electoral). (2021). Proceso electoral Veracruz 2020-2021: Sistema de cómputos municipales
- Oropeza, O. A. C. y Hernández, E. D. (2022). De la sustentabilidad normativa a la sustentabilidad práctica: la naturaleza y el territorio en el pueblo Tepehua, Hidalgo. *Cuadernos del Sur*, 27, 06-24.
- Ortega, F., y Castillo, G. (1996). El bosque mesófilo de montaña y su importancia forestal. *Ciencias*, 43, 32-39.
- Ortega, T., Mastrangelo, M. E., Villarroel, D., Piaz, A., Vallejos, M., Sáenz, J. E., Gallego, F., Franquesa, M., Calzada, L., Espinosa, N., Fiestas, J., Gill, L. R., González, Z., Luna, B. M., Martínez-Peralta, C. M., Ochoa, O., Pérez, L., Sala, J. E., Sánchez-Rose, I., Weeks, M., Ávila, D., García-Reyes, I. B., Carmona, A., Castro, F., Ferrer, C. S., Frank, M. E., López,

- G., Núñez, M., Taboada, R., Benet, D., Venegas, Y., Balvanera, P., Mwampamba, T. H., Lazos, E., Noellemeyer, E. y Maass, M. (2014). Estudios transdisciplinarios en socio-ecosistemas: reflexiones teóricas y su aplicación en contextos latinoamericanos. *Investigación Ambiental*, 06, 109-122.
- Ortiz-Pulido, R., Bravo-Cadena, J., Martínez-García, V., Reyes, D., Mendiola-González, M. y Sánchez, G. (2010). Avifauna de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81, 373–391.
- OSGeo (Open-Source Geospatial Foundation) (2021). QGIS Desktop, V. 3.16.11. Disponible en: <https://qgis.org/es/site/>
- Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press, Cambridge, 280 p.
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of socio-ecological system. *Science*, 325, 419-422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Pacheco G., E. y Franzoni L, J. (2016). *Actividad e iniciativa de las organizaciones de la sociedad civil: Situación actual y prospectiva 2030*. El Colegio de México, Indesol, México. 164 p.
- Pérez, R. (2014). *Administración Pública y Gobernanza: Indicadores de desempeño gubernamental*. En M. Ramos. y V. Aguilera (eds.). *Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook*, (pp. 64-79) ECORFAN. Valle de Santiago, Guanajuato.
- Pérez, S. G. C (2017). Climate and Climate Change in Hidalgo, Mexico. *International Journal of Recent Engineering Research and Development*, 02(06), 01-07.
- Pérez-Alcántara, B. D., Canales-Vega, M. R. y Calderón-Contreras, R. (2017). La relación hombre-medio en un sistema socio-ecológico del sur del Estado de México, en R. Calderón-Contreras (Ed.), *Los Sistemas Socioecológicos y su resiliencia, casos de estudio*, (pp. 69-84). Universidad Autónoma Metropolitana, Gedisa editorial, Ciudad de México.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) (2019). *Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010–2015: Transformando México desde lo local*. Disponible en: <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo library/poverty/informe-de-desarrollo-humano-municipal-2010-2015--transformando-.html>
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (1990). *Desarrollo humano, informe 1990*. Colombia: Tercer Mundo Editores, S.A.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2022). *Desarrollo humano*. México. Disponible en:

https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/ourwork/povertyreduction/in_depth/desarrollo-humano.html

- POEH (Periódico Oficial del Estado de Hidalgo) (2023). Plan Estatal del Desarrollo 2022-2028. Gobierno del Estado de Hidalgo. Consultado 20/01/2023. Disponible en: https://periodico.hidalgo.gob.mx/?page_id=65186
- Polski, M. M. y Ostrom, E. (1999). An Institutional framework for policy analysis and design. Department of Political Science, Indiana University.
- Ponce-Reyes, R., Nicholson, E., Baxter, P. W., Fuller, R. A., y Possingham, H. (2013). Extinction risk in cloud forest fragments under climate change and habitat loss. *Diversity and Distributions*, 19, 518-529. <https://doi.org/10.1111/ddi.12064>
- Proswitz, K.; Edward, M.C.; Evers, M.; Mombo, F.; Mpwaga, A.; Näschen, K.; Sesabo, J. y Höllermann, B. (2021). Complex Socio-Ecological Systems: Translating Narratives into Future Land Use and Land Cover Scenarios in the Kilombero Catchment, Tanzania. *Sustainability*, 13, 6552. <https://doi.org/10.3390/su13126552>
- Pulido, M. T., y Cuevas-Cardona, C. (2013). Cactus nurseries and conservation in a Biosphere Reserve in Mexico. *Ethnobiology Letters*, 4, 96-104. <https://www.jstor.org/stable/26423568>
- Quiroga-Martínez, R. (2007). Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: Avances y perspectivas para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Naciones Unidas.
- Raderschall, L., Krawchenko, y Leblanc. (2020). Leading practices for resource benefit sharing and development for and with Indigenous communities. OECD regional development papers. Disponible en: <https://doi.org/10.1787/177906e7-en>
- RAN (Registro Agrario Nacional) (2016). Perimetrales de los núcleos agrarios certificados - Formato SHAPE. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado--formato-shape>
- Raskin, P. D. (2006). World Lines Pathways, Pivots, and the Global Future. Tellus Institute. 24 p.
- Raskin, P. D. (2008). World lines: A framework for exploring global pathways. *Ecological Economics*, 65, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.01.021>
- Raskin, P. D., Chadwick, M., Jackson, T. y Leach, G. (1996). The sustainability transition beyond conventional development. Stockholm Environment Institute. Stockholm, Sweden. 79 p.
- Reid, H., Jones, X. H., Porras, I., Hicks, C., Wicander, S., Seddon, N., Kapos, V., Wicander, S. y Roe, D. (2019). ¿Es eficaz la adaptación basada en ecosistemas? Percepciones y lecciones aprendidas en trece sitios de proyectos. Informe de investigación del IIED. Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED), Londres. 123 p.

- Rodríguez-Laguna, R., Palacios-Romero, A., Razo-Zárate, R., Delgado-Corral, S. M. y Goche-Telles, R. (2021). Ciclo del carbono en un bosque con aprovechamiento forestal en Zacualtipán, Hidalgo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 04, p3090. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.598
- Rodríguez-Robayo, K. J., Perevochtchikova, M., Ávila-Foucat, S., y De la Mora De la Mora, G. (2020). Influence of local context variables on the outcomes of payments for ecosystem services. Evidence from San Antonio del Barrio, Oaxaca, Mexico. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2839-2860. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00321-8>
- Rojas-Martínez, A. E., Aguilar-López, M., Castillo, J. M., Cornejo-Latorre, C. y Noguera-Cobos, O. (2017). Los mamíferos del estado de Hidalgo. En A. Ramírez-Bautista, A. Sánchez-González, G. Sánchez-Rojas y C. Cuevas-Cardona (Eds.) Biodiversidad de estado de Hidalgo (pp. 559-576). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, México.
- Roldan, J. A., Alvarez, M. A., Carrasco, M., Guarneros, N., Ledesma, J. A., Cuchillo-Hilario, M., y Chávez, A. (2017). Marginalization and health service coverage among Indigenous, rural, and urban populations: A public health problem in Mexico. *Rural and Remote Health*, 17(4), 1-10. <https://doi.org/10.22605/RRH3948>
- Romo, A. G. (2019). Café y pobreza en los productores Otomí-Tepehua: crisis del desarrollo rural frente al neoliberalismo. *Cimexus*, 13(2), 27-42.
- Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. 1ra. Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 328-339.
- Sahoo, G., Wani, A. M., Swamy, S. L., Mishra, A., y Mane, S. P. (2022). Indigenous people activities on ecosystems and sustainable development-a paradigm shift. In Uday Chatterjee, Anil Kashyap, Mark Everard, Gopal Krishna Panda y Dinabandhu Mahata (Eds) Indigenous People and Nature (pp. 3-27). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91603-5.00023-3>
- Salcedo, C. A., y Ceccon, E. (2020). Socioecological benefits of a community-based restoration of traditional home gardens in Guerrero, Mexico. *Etnobiología*, 18(3), 94-112.
- Sánchez-González, A., Álvarez, E. y Tejero-Diez, J. D. (2010). Richness and distribution patterns of Ferns and Lycopods in Los Marmoles National Park, Hidalgo, Mexico. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 137, 373-379. <https://doi.org/10.3159/10-RA-002.1>
- Sánchez-Rojas, G., y Bravo-Cadena, J. (2017). Medio físico del estado de Hidalgo. En Ramírez-Bautista, A., A. Sánchez-González, G. Sánchez-Rojas y C. Cuevas-Cardona (Eds.).

- Biodiversidad del estado de Hidalgo (pp. 29-42). Tomo I. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Pachuca de Soto, Hidalgo, México.
- Santana, M. R., Navarrete, D., y Mateo, J. (2015). Riqueza de especies en huertos caseros de tres municipios de la región Otomí Tepehua, Hidalgo, México. *Sistemas agroforestales*. En F. Montagnini, E. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola y B. Eibl (Eds), *Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (pp. 405-422). CATIE, Costa Rica.
- Scholz, R. W. y Binder, C. R. (2004). *Principles of Human-Environment Systems (HES) Research. International Congress on Environmental Modelling and Software*, 116.
- SEFIPLAN (Secretaría de Finanzas y Planeación) (2019). Plan Veracruzano de Desarrollo 2019-2024. Gobierno del Estado de Veracruz. Disponible en: <http://www.veracruz.gob.mx/finanzas/planeacion/plan-veracruzano-de-desarrollo-pvd-2019-2024/>
- Segura-Millán, K. y Perez-Verdin, G. (2023). The effect of payments for ecosystem services on forest cover, land use, and capacity building in northern Mexico. *Trees, Forests and People*, 12, 100387. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100387>
- SEN (Sistema Educativo Nacional) (2021). Principales cifras Ciclo escolar 2020-2021. Consultado: 06/02/22. Disponible en: <https://www.planeacion.sep.gob.mx/principalescifras/>.
- Serrano, T., Galindo, E. y Hernández, T. (2016). Milpa or Forest. Development Crunch in the Most Marginalized Communities in the State of Hidalgo (Mexico). *Journal of Water Resource and Protection*, 8(02), 201. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82016>
- SIRFOSC (Sistema de Información del Registro Federal de las OSC). (2021). Directorio de las Organizaciones de la Sociedad Civil. Disponible en: <http://www.corresponsabilidad.gob.mx/>
- Speranza, I. C., Wiesmann, U. y Rist, S. (2014). An indicator framework for assessing livelihood resilience in the context of social–ecological dynamics. *Global Environmental Change*, 28, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.005>
- SSH (Secretaría de Salud Hidalgo) (2015). Atlas de riesgo por desastres de salud. Disponible en: <https://atlas.ssh.gob.mx>
- Suárez-Islas, A., Capulín-Grande, J. y Mateo-Sánchez, J. J. (2020). Performance of *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez, a valuable timber tree, in a coffee plantation in Hidalgo, Mexico. *Bois et Forêts des Tropiques*, 344, 47-57. <https://doi.org/10.19182/bft2020.344.a31899>
- Suárez-Pardo, A., Villegas-Palacios, C., y Berrouet, L. (2022). Resilience in Agroecosystems: An Index Based on a Socioecological Systems Approach. *Weather, Climate, and Society*, 14, 425-438. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-21-0023.1>

- Swiderska, K., Argumedo, A., Wekesa, C., Ndalilo, L., Song, Y., Rastogi, A., y Ryan, P. (2022). Indigenous Peoples' Food Systems and Biocultural Heritage: Addressing Indigenous Priorities Using Decolonial and Interdisciplinary Research Approaches. *Sustainability*, 14(18), 11311. <https://doi.org/10.3390/su141811311>
- Tallis, H. M. y Kareiva, P. (2006). Shaping global environmental decisions using socio-ecological models. *Trends in Ecology and Evolution*, 21, 562-568. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.07.009>
- Tallman, P. S. (2016). The Index of Vulnerability: An anthropological method linking social-ecological system to mental and physical health outcomes. *Social Science and Medicine*, 162, 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2016.06.016>
- Thanh, H. T., Tschakert, P., y Hipsey, M. R. (2021). Examining fishery common-pool resource problems in the largest lagoon of Southeast Asia through a participatory systems approach. *Socio-Ecological Practice Research*, 3, 131-152. <https://doi.org/10.1007/s42532-021-00085-4>
- Tiller, R., De Kok, J. L., Vermeiren, K., Richards, R., Ardelan, M. V., y Bailey, J. (2016). Stakeholder perceptions of links between environmental changes to their socio-ecological system and their adaptive capacity in the region of Troms, Norway. *Frontiers in Marine Science*, 3, 267. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00267>
- Togtokh, C. (2011). Time to stop celebrating the polluters. *Nature*, 479: 269. <https://doi.org/10.1038/479269a>
- Torres Castro, N., González Santiago, M. V., Sámano Rentería, M. A. (2022). Knowledge of the Nahua peasant families on the agroecological management of the coffee plantation and the milpa of arroyo seco, Xilitla, SLP. *Textual*, (79), 193-227. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2022.79.08>
- Turner II, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A. y Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100, 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Uranga-Valencia, L. P., De los Santos-Posadas, H. M., Valdez-Lazalde, J. R., López-Upton, J. y Navarro-Garza, H. (2015). Volumen total y ahusamiento para *Pinus patula* schiede ex schltld. et cham. en tres condiciones de bosque. *Agrociencias*, 49, 787-801.
- Valdez-Rentería, S. Y., Fernández-Badillo L., Olvera-Olvera, C. R., Sánchez-Martínez. G. y Goyenechea, I. (2018). Listado actualizado de la herpetofauna de la Reserva de la Biosfera

- Barranca de Metztlán, Hidalgo, México. *Áreas Naturales Protegidas Scripta*, 04, 29-48. <https://doi.org/10.18242/anpscripta.2018.04.04.02.0002>
- Valencia-Herverth, J., Valencia-Herverth, R., Mendiola-González, M. E., Sánchez-Cabrera, M. y Martínez-Morales, M. A. (2011). Registros nuevos y sobresalientes para el estado de Hidalgo, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 27, 843–861.
- Vargas-Espíndola, Z., Muñoz-Rodríguez, M., Santoyo-Cortés, H., y Aguilar-Gallegos, N. (2020). Territorios rurales funcionales: una aplicación para el análisis de la pobreza rural en México. *Cuadernos Geográficos*, 59(3), 264-282. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i3.11304>
- Villavicencio-Nieto, M. A. y Pérez-Escandón, B. (2010). Vegetación e inventario de la flora útil de la Huasteca y la zona Otomí-Tepehua de Hidalgo. *Ciencia Universitaria*, 01, 23-32.
- Villén-Pérez, S., Anaya-Valenzuela, L., da Cruz, D. C., y Fearnside, P. M. (2022). Mining threatens isolated indigenous peoples in the Brazilian Amazon. *Global Environmental Change*, 72, 102398. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102398>
- Virola, R. A., Agtarap, K. F. S., Villanueva, P. C. y Villaruel, M. L. C. (2016). The 2016 elections and the good governance index: performance, promises, or political dynasties? Philippines Statistics Authority. 20 p.
- Vizeu, M., Rojas, L., Chamness, S. y Ponce, A. (2020). Indicadores de Gobernanza Ambiental para América Latina y el Caribe: Una evaluación de la gobernanza ambiental en la práctica en Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Jamaica, Perú, República Dominicana y Uruguay. Banco Interamericano de Desarrollo y World Justice Project. 68 p.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. y Kinzig, A. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 09, 5. <https://www.jstor.org/stable/26267673>
- Wei, S., Yang, H., Song, J., Abbaspour, K. C., y Xu, Z. (2012). System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *European Journal of Operational Research*, 221, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.014>
- Wellington, W. G. (1952). Air-mass climatology of Ontario North of Lake Huron and Lake Superior before outbreaks of the spruce budworm, *Choristoneura fumiferana* (Clems.) and the forest tent Caterpillar, *Malacosoma disstria* HBN. (Lepidoptera: Tortricidae, Lasiocampidae). *Canadian Journal of Zoology*, 30, 114-127. <https://doi.org/10.1139/z52-010>
- Wies, G., Navarrete-Segueda, A., Ceccon, E., Larsen, J., y Martinez-Ramos, M. (2022). What drives management decisions and grain yield variability in Mesoamerican maize cropping

systems? Evidence from small-scale farmers in southern Mexico. *Agricultural Systems*, 198, 103370. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103370>

Yang, H., Huang, J., y Liu, D. (2020). Linking climate change and socioeconomic development to urban land use simulation: Analysis of their concurrent effects on carbon storage. *Applied Geography*, 115, 102135. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.102135>

Yusuf, A. A. y Francisco, H. (2010). Hotspots! Mapping Climate Change Vulnerability in Southeast Asia. Economy and Environment Program for Southeast Asia, Singapore.

XI. APÉNDICES

Apéndice 1

Tabla 1. Municipios que integran la ZSSMO. Se indica su superficie en ha. Fuente INEGI (2021b).

| Estado | Clave Municipio | Municipio | Superficie (ha) |
|----------|-----------------|----------------------------------|-----------------|
| Hidalgo | 004 | Agua Blanca de Iturbide | 12001.91 |
| Hidalgo | 014 | Calnali | 21101.014 |
| Hidalgo | 018 | Chapulhuacán | 23163.247 |
| Hidalgo | 020 | Eloxochitlán | 23953.868 |
| Veracruz | 072 | Huayacocotla | 52226.775 |
| Hidalgo | 026 | Huazalingo | 10745.599 |
| Hidalgo | 027 | Huehuetla | 21391.804 |
| Veracruz | 076 | Ilamatlán | 15533.399 |
| Hidalgo | 031 | Jacala de Ledezma | 44098.594 |
| Hidalgo | 033 | Juárez Hidalgo | 11079.03 |
| Hidalgo | 040 | La Misión | 23278.656 |
| Hidalgo | 034 | Lolotla | 17720.87 |
| Hidalgo | 037 | Metztitlán | 79690.966 |
| Hidalgo | 042 | Molango de Escamilla | 19826.586 |
| Hidalgo | 049 | Pisaflores | 18807.653 |
| Hidalgo | 036 | San Agustín Metzquititlán | 24572.337 |
| Hidalgo | 053 | San Bartolo Tutotepec | 35939.863 |
| Hidalgo | 060 | Tenango de Doria | 17663.193 |
| Hidalgo | 062 | Tepehuacán de Guerrero | 34734.481 |
| Veracruz | 170 | Texcatepec | 19524.927 |
| Hidalgo | 068 | Tianguistengo | 26568.035 |
| Veracruz | 180 | Tlachichilco | 22574.568 |
| Hidalgo | 071 | Tlahuiltepa | 53159.849 |
| Hidalgo | 073 | Tlanchinol | 39211.139 |
| Hidalgo | 079 | Xochicoatlán | 17684.3 |
| Veracruz | 198 | Zacualpan | 26374.901 |
| Hidalgo | 081 | Zacualtípán de Ángeles | 27269.2 |
| Veracruz | 202 | Zontecomatlán de López y Fuentes | 24212.453 |

Apéndice 2

Tabla 2. Tipos de clima: Valores de la temperatura y precipitación. Fuente. CONABIO (1998)

| Clima | Descripción | Temperatura | Precipitación | |
|------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| (A)C(fm) | Semicálido húmedo del grupo C | Media anual >18°C. Mes más frío < 18°C, mes más caliente > 22°C. | Verano-invierno invierno <18% | mes más seco > a 40 mm |
| (A)C(m) | | | Verano invierno 5 % y 10.2 % | anual >500 mm, mes más seco >40 mm |
| (A)C(m)(f) | | | | mes más seco <40 mm |
| (A)C(w1) | | | | |
| (A)C(w2) | | | | |
| (A)C(wo) | | | | |
| A(f) | Cálido húmedo | Media anual >22°C. Mes más frío mayor de 18°C. | Verano-invierno invierno <18% | mes más seco > 40 mm |
| Am | | | Verano invierno 5 % y 10.2 % | mes más seco <60 mm |
| Am(f) | | | | mes más seco <60 mm |
| Aw1 | | | | mes más seco 0 y 60 mm |
| Aw2 | | | | |
| Awo | | | | |
| BS1hw | Semiárido, semicálido | Media anual >18°C. Mes más frío < 18°C, mes más caliente >22°C. | Verano invierno 5 % y 10.2 % | |
| BS1kw | Semiárido, templado | Media anual 12°C - 18°C. Mes más frío entre -3°C y 18°C, mes más caliente <22°C. | | |
| BSohw | Árido, semicálido | Media anual 18°C - 22°C. Mes más frío < 18°C, mes más caliente >22°C. | | |
| BSokw | Árido, templado | Media anual 12°C - 18°C. Mes más frío entre -3°C y 18°C. | | |

| | | | | |
|-----------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| C(f) | Templado, húmedo | Media anual entre 12°C y 18°C. Mes más frío entre -3°C y 18°C, mes más caliente bajo 22°C. | Todo el año invierno >18% | mes más seco >40 mm |
| C(m) | | | Verano invierno 5 % y 10.2 % | |
| C(m)(f) | | | | |
| C(w1) | | | | |
| C(w2) | Templado, subhúmedo | | Media anual 5°C - 12°C. Mes más frío -3°C - 18°C, mes más caliente < 22°C. | |
| C(wo) | | | | |
| Cb'(m) | Semifrío, húmedo | | | |
| Cb'(m)(f) | | | | |
| Cb'(w2) | Semifrío, subhúmedo | | | |

Apéndice 3

Tabla 3. Superficie (ha) ocupada según los distintos usos de suelo y vegetación al interior de la ZSSMO. Fuente: INEGI, (2021b). Serie VII.

| Uso del Suelo y Vegetación | | Cobertura Ha |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Agricultura | Se reconocen siete modalidades de esta actividad. La de mayor extensión es la agricultura de temporal. Es la principal actividad económica y también la principal fuente de degradación en el SSE (Lorenzo <i>et al.</i> , 2019). Los cultivos principales son maíz y frijol, también frutos como arándano, plátano y durazno (CONABIO, 2010). | 175884.793 |
| Asentamientos humanos | | 3231.586 |
| Bosque cultivado/ Inducido | En este tipo de vegetación el bosque original ha sido manipulado para mantener o implantar zonas boscosas con características particulares (árboles jóvenes, sanos y vigorosos, resistentes a las condiciones climáticas y altamente productivos). Algunos municipios con actividad silvícola en la región son Metztlán con plantaciones de <i>Pinus greggii</i> (Hernández-Ramos <i>et al.</i> , 2016), Zacualpan y Zacualtán de Ángeles con aprovechamiento de <i>Pinus patula</i> (Uranga-Valencia <i>et al.</i> , 2015; Rodríguez-Laguna <i>et al.</i> , 2021), Tenango de Doria con plantaciones de <i>Dalbergia palo-escrito</i> (Suárez-Islas <i>et al.</i> , 2020). | 507.823 |
| Bosque de coníferas | El bosque de <i>Pinus</i> se desarrolla en un rango altitudinal que va de los 1500 a los 3000 m snm (Rzedowski, 1978). Está constituido por especies como <i>P. cembroides</i> , <i>P. greggii</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. patula</i> y <i>P. pseudostrobus</i> (Sánchez-González <i>et al.</i> , 2010). B. de <i>Juniperus</i> . Se distribuye en un rango altitudinal entre 1,650 y 1,920 m, está dominado en el estrato arbóreo por <i>Juniperus flaccida</i> , que alcanza una altura promedio de 12 m, otros elementos arbóreos asociados son <i>Quercus polymorpha</i> y <i>Q. castanea</i> (CONANP, 2003). | 41543.141 |
| Bosque de Encino | Se distribuye en un rango altitudinal de entre 1500 y 3000 m. Está constituido principalmente por especies como <i>Quercus crassifolia</i> , <i>Q. laeta</i> , <i>Q. mexicana</i> y <i>Q. affinis</i> (Sánchez-González <i>et al.</i> , 2010). | 42132.249 |
| Bosque de niebla | Se distribuye en un gradiente altitudinal que va de los 400 a 2876 m snm, con relieve muy accidentado y preferencia por pendientes muy pronunciadas y cañadas con poca incidencia del viento e insolación (Rzedowski, 2006). Se reconoce bosques dominados por especies de los géneros <i>Liquidambar</i> y <i>Quercus</i> ; <i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Quercus sosoria</i> , <i>Q. furfuracea</i> , <i>Q. lancifolia</i> , <i>Q. calophylla</i> , <i>Q. acutifolia</i> , <i>Q. trinitatis</i> , <i>Q. acatenangensis</i> , <i>Q. xalapensis</i> , <i>Q. germana</i> , <i>Clethra mexicana</i> , <i>Meliosma alba</i> , <i>Carpinus caroliniana</i> , <i>Nyssa sylvatica</i> , <i>Ostrya virginiana</i> , <i>Alnus acumiata</i> , <i>Crataegus pubescens</i> , <i>Symphlocos jurgensenii</i> , <i>Prunus samydoides</i> y <i>Phoebe sp.</i> , <i>Fagus mexicana</i> y otros géneros, <i>Magnolia</i> , <i>Sambucus</i> , <i>Turpinia</i> , <i>Eugenia</i> , <i>Weinmannia</i> , <i>Clethra</i> , <i>Cyathea</i> , <i>Leucothoe</i> y <i>Ocotea</i> (Rzedowski (2006) r). También asociaciones de <i>Pinus greggii</i> , <i>P. patula</i> , <i>Quercus seemannii</i> , <i>Q. sapotifolia</i> , <i>Q. sartorii</i> y <i>Podocarpus matudae</i> (Luna <i>et al.</i> , 1994). Asociaciones de <i>Magnolia schiedeana</i> , <i>Meliosma alba</i> , <i>Persea americana</i> , <i>Quercus acutifolia</i> y <i>Tilia americana</i> (Alcántara y Luna, 2001); y asociaciones de <i>Liquidambar styraciflua</i> y <i>Quercus affinis</i> mezclados con especies como <i>Q. seemannii</i> , <i>Q. sartorii</i> , <i>Pinus patula</i> , <i>P. greggii</i> (Mayorga <i>et al.</i> , 1998). | 175774.842 |

| | | |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Bosque Mixto | La similitud en las demandas ecológicas entre los B. de <i>Pinus</i> y B. de <i>Quercus</i> da como resultado que estos tipos de vegetación ocupan nichos similares, formando asociaciones que, dependiendo de la dominancia serán de pino-encino o encino-pino (Rzedowski, 1978). | 56951.776 |
| Cuerpos de agua | | 1137.898 |
| Matorral | El Matorral xerófilo es un conjunto de comunidades vegetales dominadas por plantas arbustivas; se desarrolla en un gradiente altitudinal entre los 1,000 y 1,820 m. Dominan especies como <i>Cephalocereus senilis</i> , <i>Isolatocereus dumortieri</i> , <i>Cylindropuntia imbricata</i> , asociadas a <i>Prosopis laevigata</i> , <i>Yucca filifera</i> , <i>Myrtillocactus geometrizans</i> , <i>Eysenhardtia polystachya</i> , <i>Senna polyantha</i> , <i>Karwinskia humboldtiana</i> , <i>Montanoa tomentosa</i> ssp. <i>xanthiifolia</i> , <i>Malacomeles denticulata</i> y <i>Quercus laeta</i> . El Matorral submontano se encuentra a una altitud de 1,600 a 1, 800 m. Dominan especies como, <i>Mimosa</i> sp., <i>Senna wislizeni</i> , <i>Krameria cytisoides</i> , <i>Neopringlea integrifolia</i> , <i>Ipomoea</i> sp. y <i>Cnidoscolus rostratus</i> , así como individuos del género <i>Yucca</i> . | 71613.73 |
| Pastizal cultivado/ Inducido | La transformación de la cobertura vegetal original en pastizal se ha destinado para las actividades pecuarias del SSE. Si bien se considera que las condiciones del terreno no son idóneas, esta actividad ha aumentado considerablemente en los últimos años, sobresale el establecimiento de potreros para la producción ganadera (Lorenzo <i>et al.</i> , 2019). | 104121.748 |
| Selva baja Caducifolia | Se desarrolla en altitudes entre los 1,100 y 1,500 m. Los árboles son de baja altura (8 a 12 m), se caracterizan por que durante un período de seis a siete meses permanecen sin hojas. Dominan especies arbóreas como, <i>Bursera morelensis</i> , <i>Prosopis laevigata</i> , <i>Pseudosmodium andrieuxii</i> y <i>Senegalia subangulata</i> ; asociados a cactáceas del género <i>Opuntia</i> , <i>Myrtillocactus geometrizans</i> , <i>Cephalocereus senilis</i> , <i>Isolatocereus dumortieri</i> . | 3588.487 |
| Selva Alta Perennifolia y Selva Mediana Subperennifolia | Se desarrolla en altitudes que van de los 0 m a los 1000 m, con afinidad por los climas cálidos de humedad relativamente alta y con lluvias durante gran parte del año. Se desarrolla en altitudes que van de los 200 a los 600 m, la cubierta vegetal estaba dominada por especies arbóreas como <i>Licaria capitata</i> , <i>Brosimum alicastrum</i> y <i>Dendropanax arboreum</i> (Rzedowski, 1978). Sin embargo, dentro del SSE, la vegetación primaria ha sido degradada a vegetación secundaria y se considera que actualmente no existen remanentes de vegetación primaria de SAP (Ceja-Romero, 2010). | 1620.612 |
| Sin vegetación aparente | | 85762.344 |

Apéndice 4

Tabla 4. Configuración del panorama sociopolítico del sistema socio-ecológico de la ZSSMO. Fuente IEE, (2020); OPLE, (2021), INEGI (2016)

| Municipio | Partido gobernante | Ejidatarios | Superficie ejidal ha | Comunidades agrarias ha | Propiedad privada ha | Propiedad pública ha | ONG |
|-------------------------|--------------------|-------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|-----|
| Agua Blanca de Iturbide | PRI | 802 | 3998.17 | 14.08 | 7579.96 | 6.42 | 1 |
| Calnali | Encuentro social | 506 | 1668.28 | 2157.66 | 16710.47 | 0 | 2 |
| Chapulhuacán | PRD | 2099 | 5548.92 | 337.17 | 16754.43 | 0 | 2 |
| Eloxochitlán | PRD | 1044 | 2840.09 | 10318.66 | 9710.49 | 247.68 | 1 |
| Huayacocotla | PRI-PAN-PRD | 2263 | 23952.93 | 126.88 | 26484.06 | 358.51 | 7 |
| Huazalingo | PRI | 2321 | 7203.12 | 748.52 | 2412.37 | 30.24 | 3 |
| Huehuetla | Podemos | 2217 | 2499.94 | 92.27 | 18509.46 | 8.159 | 6 |
| Ilamatlán | Verde | 2697 | 889.71 | 6117.76 | 7998.91 | 222.16 | 1 |
| Jacala de Ledezma | PRI | 2144 | 13122.65 | 21586.54 | 8493.02 | 0 | |
| Juárez Hidalgo | PRD | 1037 | 25.94 | 4468.99 | 6163.76 | 0 | |
| La Misión | PAN-PRD | 0 | 988.59 | 1364.37 | 20453.10 | 168.78 | |
| Lolotla | PRI | 938 | 2447.64 | 799.46 | 13969.72 | 54.97 | 2 |
| Metztitlán | PRI | 3526 | 28186.03 | 5502.55 | 44055.38 | 311.45 | 2 |
| Molango de Escamilla | PRI | 1231 | 4540.76 | 1574.26 | 12908.850 | 156.22 | |
| Pisaflores | PRI | 275 | 1731.26 | 458.03 | 16329.97 | 0 | |

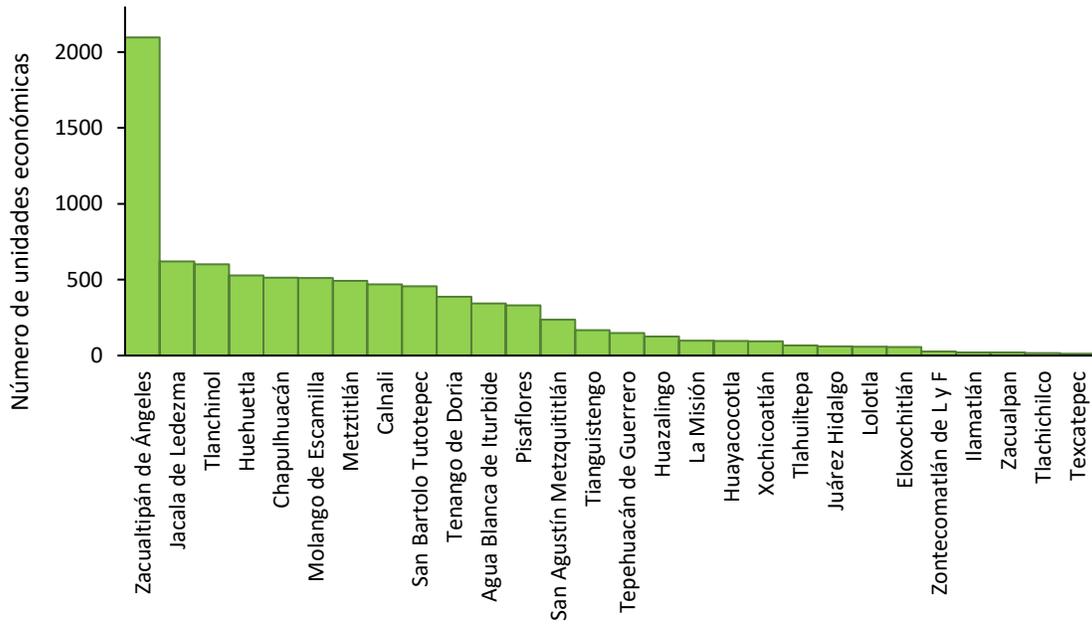
| | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------------|------|----------|----------|----------|--------|----|
| San Agustín Metzquititlán | PRI | 688 | 1056.72 | 0 | 23119.96 | 0 | 2 |
| San Bartolo Tutotepec | PRD | 181 | 906.60 | 250.96 | 34305.19 | 0 | 14 |
| Tenango de Doria | Morena | 409 | 1326.76 | 0 | 15589.00 | 525.74 | 7 |
| Tepehuacán de Guerrero | PRI | 5262 | 16018.92 | 2567.29 | 14851.32 | 28.77 | 6 |
| Texcatepec | Morena | 2626 | 13789.14 | 4542.43 | 865.69 | 0 | 2 |
| Tianguistengo | Nueva alianza | 2958 | 3807.76 | 4619.03 | 17600.37 | 6.37 | 2 |
| Tlachichilco | PT-Verde-Morena | 1405 | 2647.94 | 3364.87 | 16126.35 | 0 | 6 |
| Tlahuiltepa | PRI | 1277 | 12253.2 | 8721.26 | 31534.33 | 115.66 | 1 |
| Tlanchinol | PAN | 8711 | 4896.49 | 26499.14 | 6396.56 | 83.54 | 4 |
| Xochicoatlán | PT | 1297 | 4427.83 | 1183.78 | 11751.48 | 3.27 | 1 |
| Zacualpan | PRD | 287 | 3448.57 | 0 | 22610.87 | 17.20 | 4 |
| Zacualtípán de Ángeles | PRI | 1748 | 8976.45 | 2234.72 | 14967.93 | 9.74 | 6 |
| Zontecomatlán de López y Fuentes | PAN | 2926 | 2292.04 | 14187.11 | 7140.57 | 23.23 | 2 |

Apéndice 5

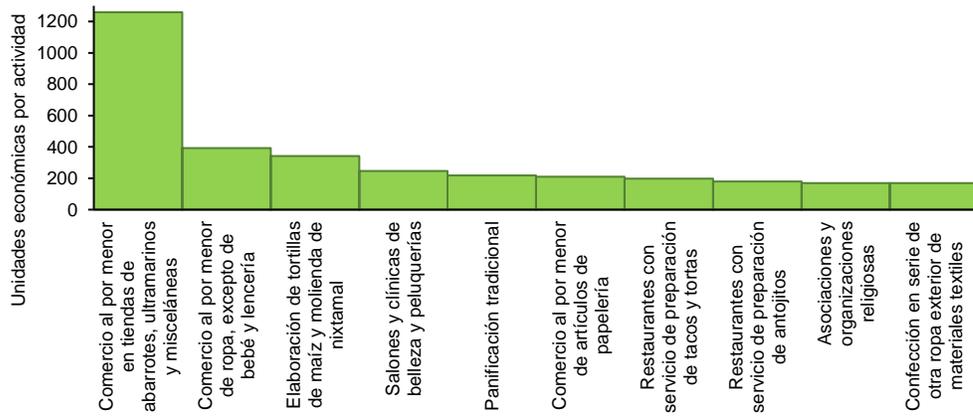
Tabla 5. Condición de la población. La población total, el porcentaje de población indígena, la población económicamente activa (PEA) y la población de 15 años y más con escolaridad básica, y el índice de marginación corresponden al censo de población y vivienda del INEGI (2020). El porcentaje de incidencia de la pobreza por CONEVAL (2020) y el Índice de Desarrollo Humano al informe de la PNUD (2019).

| Municipios | Población total | PEA (%) | Incidencia de la pobreza (%) | Población de 15 años y más con escolaridad básica (%) | Índice de marginación | | Índice de Desarrollo Humano | |
|----------------------------------|-----------------|---------|------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------------|-------|
| Agua Blanca de Iturbide | 10313 | 97.09 | 68.70 | 62.74 | 53.39 | Medio | 0.65 | Medio |
| Calnali | 16150 | 98.89 | 73.80 | 59.79 | 52.84 | Medio | 0.66 | Medio |
| Chapulhuacán | 22903 | 98.67 | 79.90 | 62.52 | 53.15 | Medio | 0.64 | Medio |
| Eloxochitlán | 2593 | 99.24 | 70.30 | 70.02 | 54.45 | Medio | 0.66 | Medio |
| Huayacocotla | 21796 | 98.21 | 77.30 | 61.33 | 52.30 | Alto | 0.65 | Medio |
| Huazalingo | 12766 | 99.20 | 84.20 | 61.56 | 52.35 | Alto | 0.65 | Medio |
| Huehuetla | 22846 | 98.68 | 79.40 | 50.87 | 48.80 | Alto | 0.61 | Medio |
| Ilamatlán | 13377 | 80.71 | 93.70 | 55.00 | 45.57 | Muy alto | 0.54 | Bajo |
| Jacala de Ledezma | 12290 | 99.24 | 71.60 | 62.27 | 53.92 | Medio | 0.66 | Medio |
| Juárez Hidalgo | 2895 | 98.14 | 76.40 | 69.78 | 54.48 | Medio | 0.65 | Medio |
| La Misión | 9819 | 97.97 | 73.10 | 69.75 | 50.02 | Alto | 0.61 | Medio |
| Lolotla | 9474 | 98.15 | 56.80 | 58.84 | 52.34 | Alto | 0.67 | Medio |
| Metztitlán | 20962 | 98.23 | 66.10 | 68.30 | 52.87 | Medio | 0.67 | Medio |
| Molango de Escamilla | 11578 | 98.79 | 79.70 | 56.92 | 54.66 | Bajo | 0.71 | Alto |
| Pisaflores | 18723 | 99.39 | 79.80 | 66.45 | 52.58 | Alto | 0.61 | Medio |
| San Agustín Metzquititlán | 9449 | 96.75 | 62.80 | 67.14 | 55.18 | Bajo | 0.71 | Alto |
| San Bartolo Tutotepec | 17699 | 98.42 | 77.90 | 52.18 | 48.65 | Muy alto | 0.60 | Medio |
| Tenango de Doria | 17503 | 98.55 | 72.90 | 60.87 | 53.22 | Medio | 0.65 | Medio |
| Tepehuacán de Guerrero | 31235 | 97.13 | 83.40 | 63.53 | 48.84 | Alto | 0.59 | Medio |
| Texcatepec | 10824 | 97.88 | 94.40 | 56.76 | 46.26 | Muy alto | 0.54 | Bajo |
| Tianguistengo | 14340 | 96.00 | 76.20 | 60.13 | 50.14 | Alto | 0.63 | Medio |
| Tlachichilco | 10900 | 95.71 | 84.90 | 60.13 | 48.07 | Muy alto | 0.61 | Medio |
| Tlahuiltepa | 9086 | 99.08 | 75.90 | 73.06 | 51.22 | Alto | 0.61 | Medio |
| Tlanchinol | 37722 | 98.60 | 84.00 | 62.56 | 52.83 | Medio | 0.64 | Medio |
| Xochicoatlán | 7015 | 97.33 | 65.80 | 64.93 | 54.69 | Bajo | 0.68 | Medio |
| Zacualpan | 6788 | 98.92 | 84.50 | 61.32 | 48.86 | Alto | 0.59 | Medio |
| Zacualtípán de Ángeles | 38155 | 99.15 | 54.70 | 59.66 | 56.50 | Bajo | 0.74 | Alto |
| Zontecomatlán de López y Fuentes | 14644 | 84.76 | 86.30 | 63.93 | 46.98 | Muy alto | 0.56 | Medio |

Apéndice 6



A



B

Figura 5. Número de unidades económicas por municipio (Figura A) y por actividad económica (Figura B).

Fuente: INEGI, 2021a.

Apéndice 7

Tabla 6. Lista de indicadores empleados para el cálculo del SESI y la construcción del diagrama de bucle causal del modelo dinámico del sistema socio-ecológico de la ZSSMO.

| SESI- componentes | Subcomponentes | Indicadores | | Tipo de dato | Escala | Fuente de datos |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------|-----------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Indicadores y cartografía de la resiliencia | integridad-social | Índice de Desarrollo Humano | IDH | Texto | na | Informe de Desarrollo Humano Municipal. PNUD 2015 |
| | | Índice de incidencia de Pobreza | IIP | Texto | na | Informe de pobreza municipal. CONEVAL 2015 |
| | integridad-gobernanza | Total, de recursos financieros generados | TRF | Texto | na | Presupuesto de Egresos del Estado de Hidalgo para el Ejercicio fiscal 2020. periódico Oficial del Estado de Hidalgo Decreto-número 525 de Presupuesto de Egresos del Gobierno del Estado de Veracruz-Ejercicio Fiscal 2020. SEFIPLAN, 2019 |
| | | Total, de ingresos recaudados (ingresos fiscales y no fiscales) | TIR | Texto | na | Estadísticas y Finanzas Publicas Municipales. INEGI 2020 |
| | | Gastos en Servicios Sociales | GSS | Texto | na | Gasto Federalizado (Destino del Gasto) Ejercicio Fiscal 2020. Transparencia presupuestaria Observatorio del gasto 2020 |
| | | Tasa de población económicamente activa | TPEA | Texto | na | Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 |
| | | Razón de ingreso | RI | Texto | na | Informe de pobreza municipal. CONEVAL 2020 |
| | | Tasa de eficacia de la solución del delito (índice de delincuencia) | ID | Texto | na | Incidencia delictiva del Fuero Común, nueva metodología, municipal 2015-2021. Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública 2021 |
| | | Tasa de participación de los votantes | TPV | Texto | na | Resultados del proceso electoral local 2019-2020. IEE 2020 Proceso electoral Veracruz. Sistemas de cómputos municipales 2020-2021. OPLE 2021 |
| | | Porcentaje de población indígena | PPI | Texto | na | Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 |
| | | Número de ONGs | ONG | Texto | na | Directorios de organizaciones de la sociedad civil. Registro Federal de las OSC 2021 |
| | | Numero de sesión de los cabildos | NSC | Texto | na | Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales. INEGI 2019 |
| | | Número de iniciativas aprobadas por los cabildos | NIAP | Texto | na | |
| | | Número de unidades económicas | UE | Texto | na | |
| | | Número de ejidos y comunidades agrarias | EyCA | Texto | na | Actualización del Marco Censal Agropecuario. INEGI 2016 |
| | | Número de ejidatarios | Ej | Texto | na | Censo Ejidal. INEGI 2007 |
| | | Relación de alumnos por profesor en primaria | RAPP | Texto | na | Principales cifras Ciclo escolar 2020-2021. Sistema Educativo Nacional 2021. Sistema Interactivo de Consulta de Estadística Educativa. SEN, 2021 |
| | | Relación de alumnos por profesor en secundaria | RAPS | Texto | na | |

| | | | | | | | |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| | | Relación de alumnos por profesor en medio superior | RAPMS | Texto | na | | |
| | | Número de primarias públicas por cada 1000 habitantes en edad escolar | NEP | Texto | na | | |
| | | Número de secundarias públicas por cada 1000 habitantes en edad escolar | NES | Texto | na | | |
| | | Número de escuelas medio superior públicas por cada 1000 habitantes en edad escolar | NENMS | Texto | na | | |
| | | Porcentaje de población de 15 años y más con escolaridad básica | PEB | Texto | na | Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 | |
| | | Personal sanitario total por cada 1000 habitantes | PSS | Texto | na | Atlas de riesgo por desastre en Salud. Secretaría de Salud Hidalgo 2015. SSH, 2015 | |
| | | Número de centros de salud por cada 1000 habitantes | CS | Texto | na | Clave Única De Establecimientos de Salud. Secretaria de Salud 2021 | |
| | | Porcentaje de hogares con acceso a agua potable dentro de la vivienda | APH | Texto | na | Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 | |
| | | Personal de servicios de recolección de residuos | PRR | Texto | na | Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales. INEGI 2019 | |
| | | Residuos Recolectados por Día (kg por día recolectados) | RRPD | Texto | na | | |
| | Porcentaje de la población con acceso al servicio de recolección de residuos | PPARR | Texto | na | | | |
| | integridad-ecológica | | Índice del Valor de los Servicios Ambientales | IVSE | Texto | na | Programa Apoyos para el Desarrollo Forestal Sustentable 2021. CONAFOR 2021 |
| | | | índice de la Relación entre los humanos y Servicios Ambientales | H-IVSE | Texto | na | Pago por Servicios Ambientales. CONAFOR 2021/ Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 |
| Índice de cobertura Forestal | | | ICF | Vectorial | 1:250 000 | Mapa de los Usos del Suelo y Vegetación series III y VII. INEGI 2021 | |
| Indicadores la presión socio-ecológica | exposición-peligros-biofísicos | índice de Deslaves | IDES | Texto | | Atlas Nacional de vulnerabilidad al Cambio Climático. INECC 2019 | |
| | | índice de Inundaciones | IINU | Vectorial | 1:250 000 | Mapa grado de peligro por inundaciones a nivel municipal. CENAPRED 2015 | |
| | | índice de Sequías | ISEQ | Vectorial | 1:250 000 | Mapa grado de peligro por sequías. CENAPRED 2015 | |
| | | índice de Ciclones tropicales | ICTR | Vectorial | 1:250 000 | Mapa grado de peligro por ciclones tropicales. CENAPRED 2015 | |
| | sensibilidad-peligros-biofísicos | índice de Densidad Poblacional | IDP | Texto | na | Censo de Población y Vivienda. INEGI 2020 | |
| | | Índice de Áreas Naturales Protegidas | IANP | Vectorial | 1:250 000 | Áreas Naturales Protegidas Federales de México CONABIO 2021 Áreas Naturales Protegidas Estatales, Municipales, Ejidales, Comunitarias y Privadas de México CONABIO 2020 | |

| | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| | presiones-ambientales | índice del cambio en los Servicios Ambientales | V-IVSE | Vectorial | na | Global Forest Change. Global Analysis & Discovery. Hansen <i>et al.</i> , 2013 |
| cartografía adicional | | Mapa de la división política municipal | | Vectorial | 1:250 000 | División Política municipal. INEGI 2020 |
| | | Mapa de la división política estatal | | Vectorial | 1:250 000 | División Política estatal INEGI 2020 |
| | | Mapa de ejidos y comunidades agrarias | | Vectorial | 1:250 000 | Perimetrales núcleos agrarios. Registro Agrario Nacional 2019 |

Apéndice 8

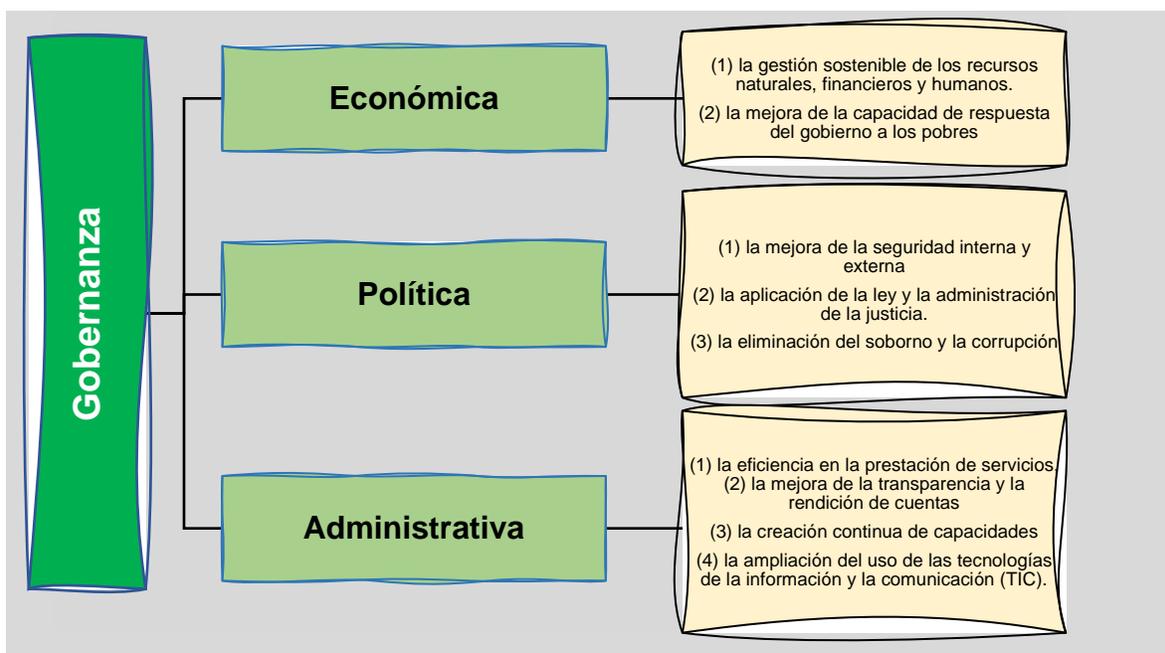


Figura 8. Marco de la integridad de gobernanza. Adaptado de la Virola *et al.* (2016).

Apéndice 9

Tabla 9. Clasificación municipal de los valores del SESI, se incluyen sus componentes y subcomponentes.

| Municipio | Integridad Social | Integridad de Gobernanza | Integridad Ecológica | RSE | Exposición a peligros biofísicos | Sensibilidad a Peligros biofísicos | Cambio en la disponibilidad de Servicios ecosistémicos | PSE | SESI |
|---------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-----|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----|------|
| Eloxochitlán | 6 | 14 | 1 | 3 | 14 | 25 | 26 | 27 | 1 |
| Xochicoatlán | 4 | 15 | 3 | 2 | 13 | 23 | 23 | 22 | 2 |
| San Agustín Metzquititlán | 2 | 23 | 11 | 5 | 24 | 13 | 27 | 23 | 3 |
| Tlanguistengo | 14 | 9 | 4 | 8 | 23 | 17 | 17 | 24 | 4 |
| Molango de Escamilla | 3 | 28 | 10 | 7 | 9 | 15 | 20 | 18 | 5 |
| Juárez Hidalgo | 12 | 26 | 14 | 16 | 19 | 26 | 22 | 28 | 6 |
| Zacualtipán de Ángeles | 1 | 18 | 7 | 1 | 16 | 1 | 14 | 5 | 7 |
| Tlanchinol | 18 | 1 | 2 | 4 | 11 | 7 | 10 | 7 | 8 |
| Tlahuilepa | 16 | 10 | 12 | 14 | 8 | 28 | 12 | 26 | 9 |
| Metztitlán | 5 | 22 | 6 | 6 | 4 | 11 | 28 | 10 | 10 |
| Jacala de Ledezma | 8 | 16 | 8 | 10 | 1 | 24 | 21 | 14 | 11 |
| La Misión | 22 | 17 | 17 | 22 | 18 | 21 | 13 | 25 | 12 |
| Calnali | 10 | 7 | 21 | 15 | 17 | 12 | 15 | 16 | 13 |

| | | | | | | | | | |
|----------------------------------|----|----|----|-----------|----|----|----|-----------|-----------|
| Lolotla | 9 | 21 | 20 | 17 | 5 | 18 | 19 | 15 | 14 |
| Huayacocotla | 13 | 5 | 9 | 9 | 26 | 22 | 2 | 6 | 15 |
| Agua Blanca de Iturbide | 7 | 27 | 26 | 20 | 21 | 10 | 24 | 19 | 16 |
| Chapuihuacán | 15 | 6 | 13 | 12 | 15 | 6 | 11 | 11 | 17 |
| San Bartolo Tutotepec | 21 | 3 | 22 | 19 | 3 | 19 | 16 | 13 | 18 |
| Zacualpan | 25 | 20 | 18 | 23 | 27 | 27 | 6 | 21 | 19 |
| Tenango de Doria | 11 | 8 | 19 | 13 | 6 | 5 | 25 | 9 | 20 |
| Tepehuacán de Guerrero | 24 | 2 | 16 | 18 | 12 | 8 | 9 | 8 | 21 |
| Zontecomatlán de López y Fuentes | 26 | 11 | 15 | 24 | 28 | 14 | 5 | 17 | 22 |
| Ilamatlán | 27 | 24 | 24 | 27 | 25 | 9 | 18 | 20 | 23 |
| Texcatepec | 28 | 25 | 23 | 28 | 20 | 16 | 8 | 12 | 24 |
| Tlachichilco | 23 | 19 | 27 | 26 | 7 | 20 | 3 | 4 | 25 |
| Pisaflores | 20 | 12 | 5 | 11 | 22 | 4 | 1 | 1 | 26 |
| Huazalingo | 17 | 13 | 28 | 25 | 10 | 2 | 7 | 3 | 27 |
| Huehuetla | 19 | 4 | 25 | 21 | 2 | 3 | 4 | 2 | 28 |

Apéndice 10. Descripción espacial de los subcomponentes del SESI. Se indican los valores para los indicadores empleados.

Componente Resiliencia Socio-Ecológica (RSE).

Subcomponente Integridad Social (IS)

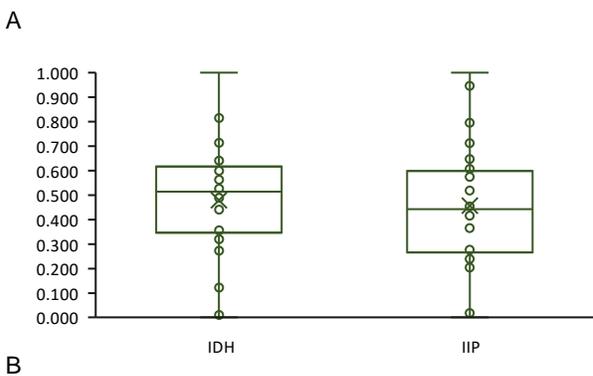
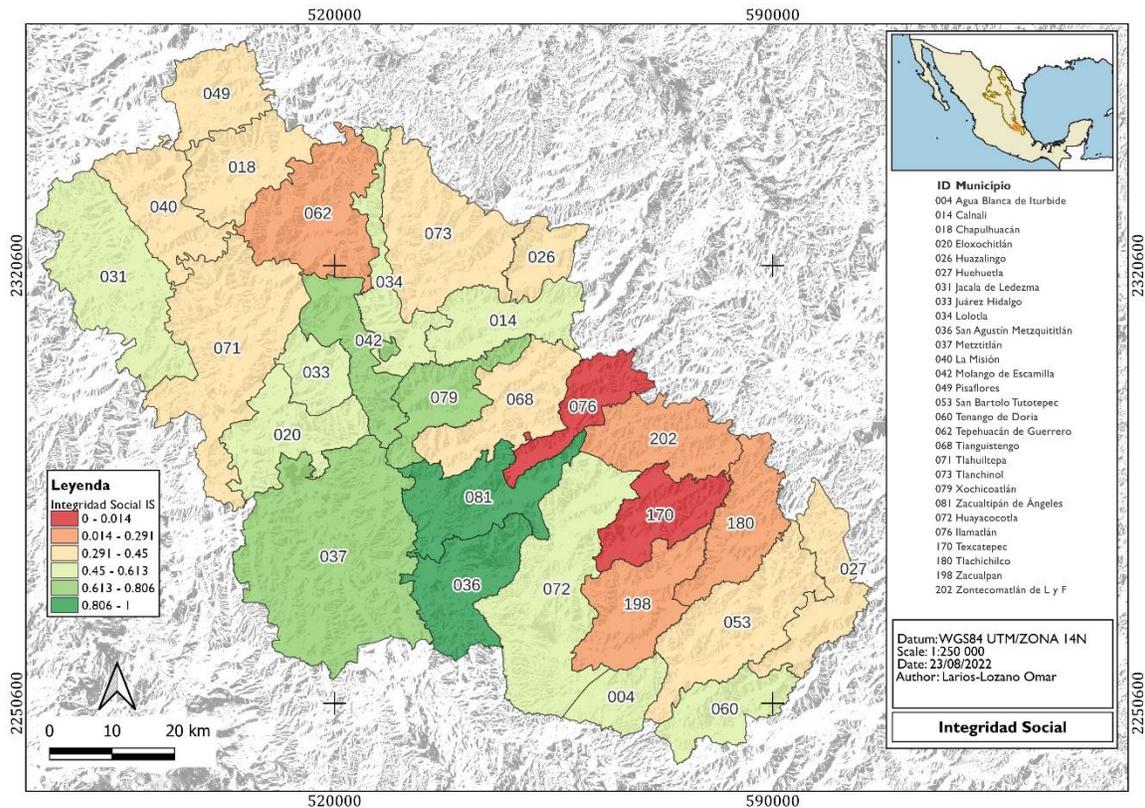
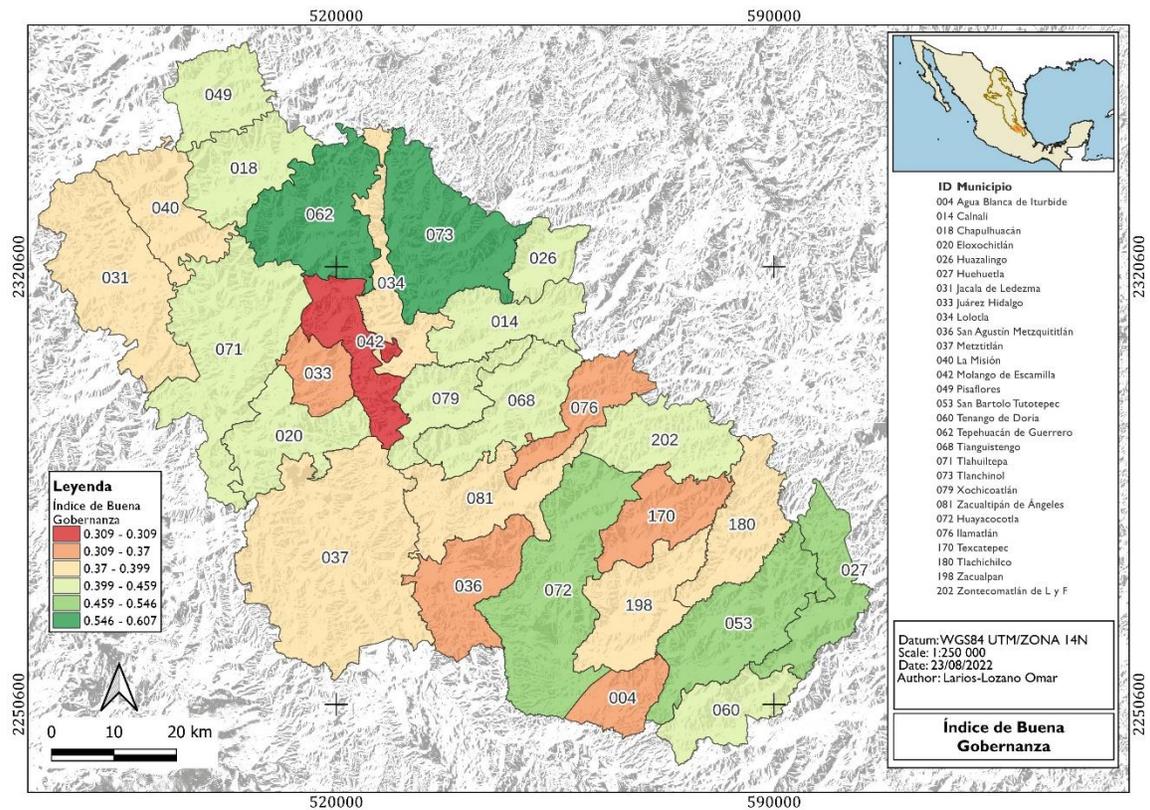
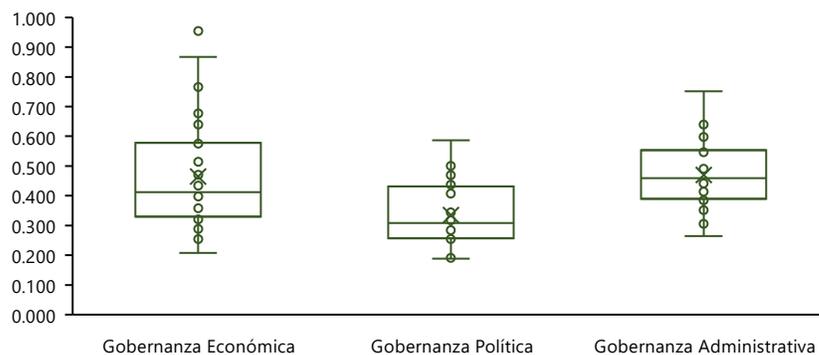


Figura 11. Integridad Social (IS) de la ZSSMO. **A)** En la escala de colores el verde indica municipios donde la IS es mayor, en contraste con los municipios en rojo donde la IS es baja. Fuente: PNUD, 2019; INEGI, 2020. **B)** Distribución de los municipios según los indicadores empleados para medir la IS; IDH (min. = 0, max. = 1, Q1= 0.350, mediana = 0.514, Q3 = 0.615, IQR= 0.265, media = 0.479, s.d. = 0.231); IIP (min = 0, max = 1, Q1 = 0.269, mediana = 0.442, Q3 = 0.590, IQR = 0.321, media = 0.457, s.d. = 0.241).

Subcomponente integridad de gobernanza (IG)



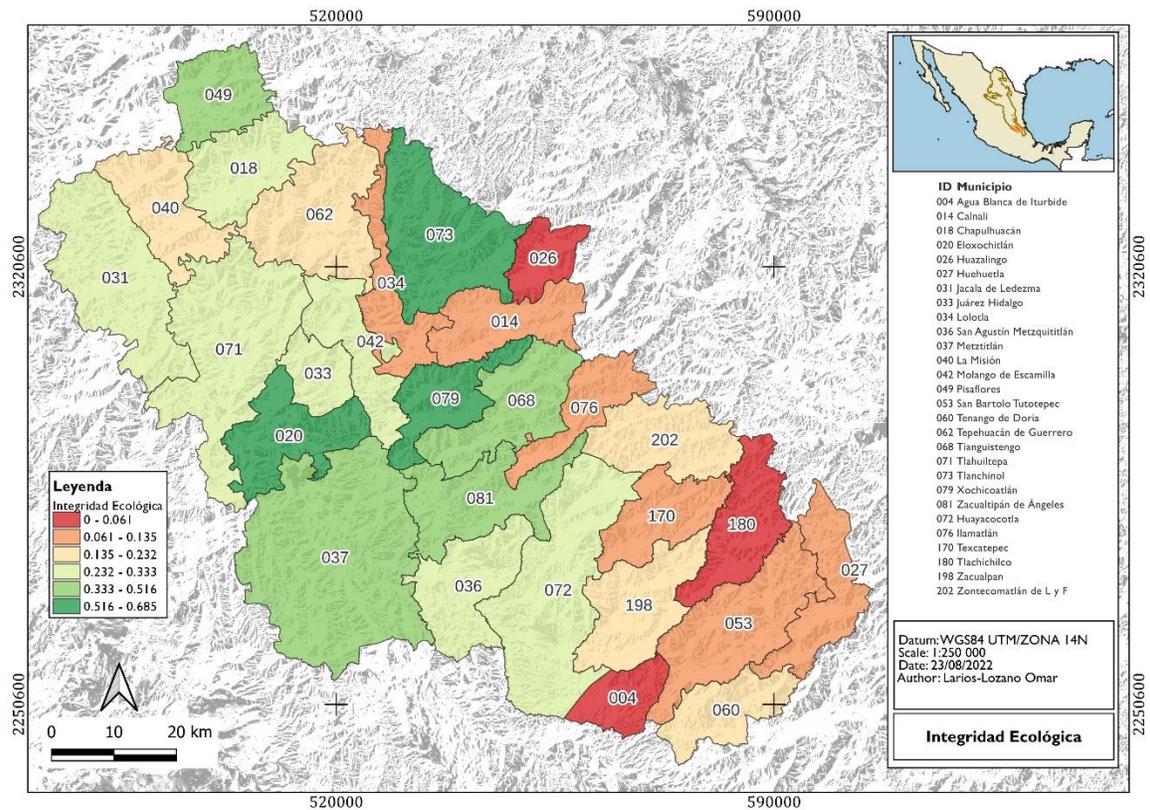
A



B

Figura 12. Integridad de Gobernanza (IG) de la ZSSMO. **A)** En la escala de colores el verde indica municipios donde la IG es mayor, en contraste con los municipios en rojo donde la IG es baja. Fuente: Ver anexo 1. **B)** Distribución de los municipios según las distintas áreas de gobernanza que integran el Índice de Buena Gobernanza (IBG); Gobernanza económica (min = 0.208, max, 0.954, Q1 = 0.334, mediana = 0.412, Q3 = 0.577, IQR = 0.243, media = 0.464, s.d. = 0.184); Gobernanza política (min = 0.188, max = 0.586, Q1 = 0.260, mediana = 0.308, Q3 = 0.425, IQR = 0.165, media = 0.335, s.d. = 0.111); Gobernanza administrativa (min = 0.265, max = 0.751, Q1 = 0.394, mediana = 0.459, Q3 = 0.551, IQR = 0.157, media = 0.469, s.d. = 0.111).

Subcomponente integridad ecológica (IE)



A

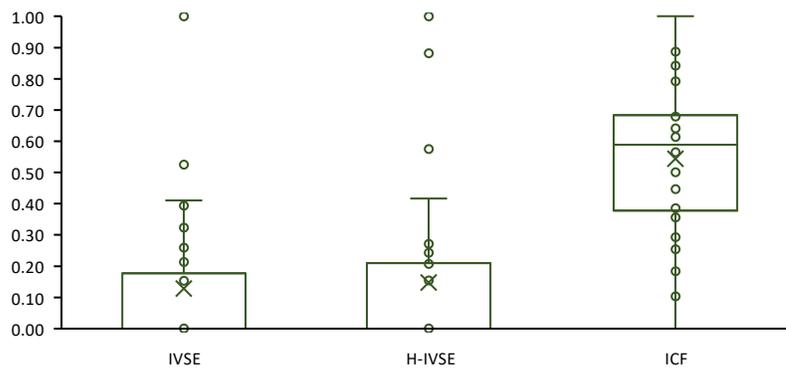
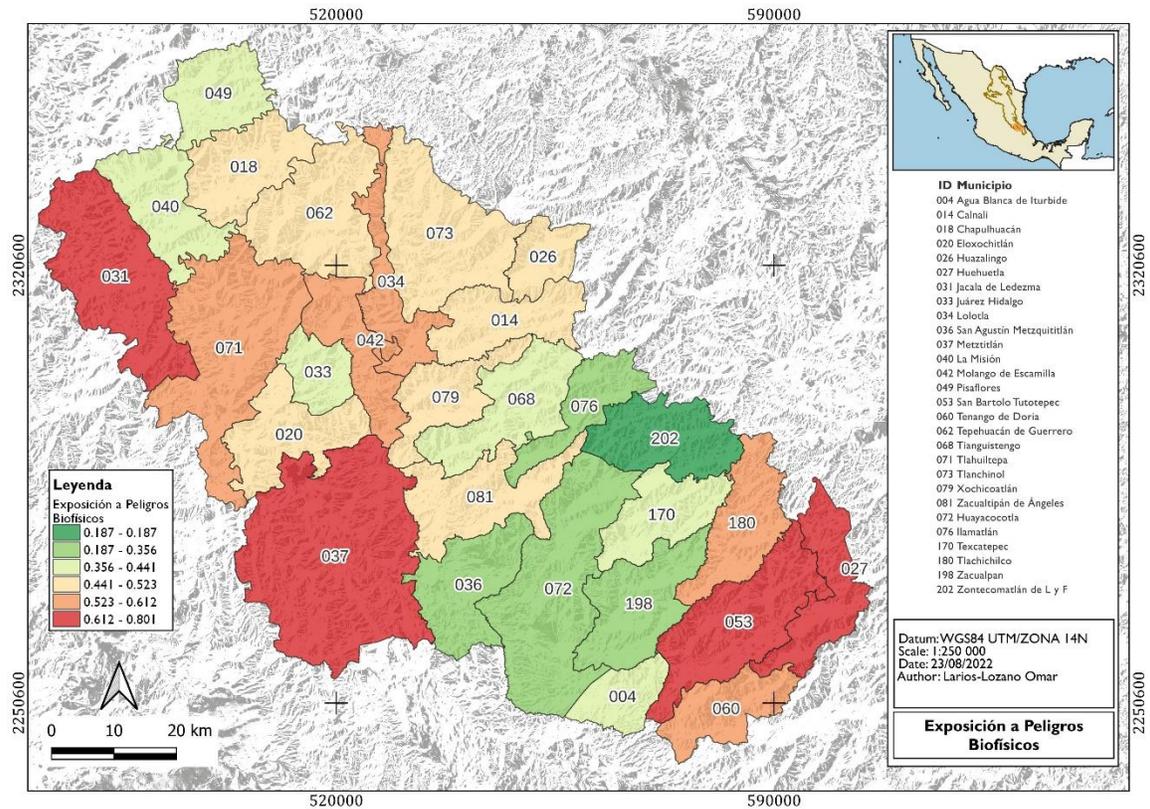


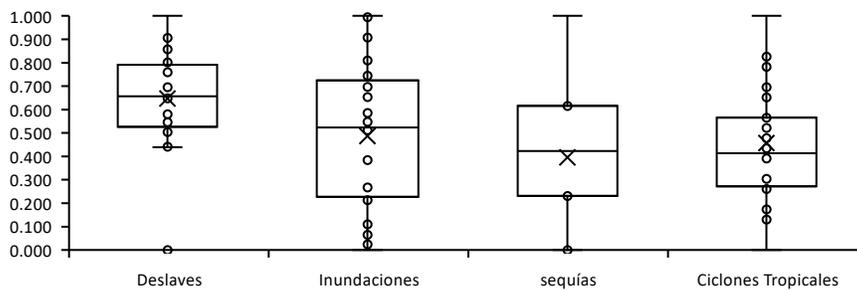
Figura 13. Integridad Ecológica (IE) de la ZSSMO. Integra los valores del índice del Valor de los Servicios Ecosistémicos (IVSE), el índice de la relación Sociedad-Servicios Ecosistémicos (H-IVSE) y el índice Cobertura Forestal (ICF). **A)** En la escala de colores el verde indica municipios donde la IE es mayor, en contraste con los municipios en rojo donde la IE es baja. Fuente: INEGI, 2020; CONAFOR, 2021. **B)** Distribución de los municipios según los distintos indicadores que integran la IE; IVSE (min = 0, max = 1, Q1 = 0, mediana = 0, Q3 = 0.189, IQR = 0.189, media = 0.128, s.d. = 0.230); H-IVSE (min = 0, max = 1, Q1 = 0, mediana = 0, Q3 = 0.213, IQR = 0.213, media = 0.147, s.d. = 0.268); ICF (min = 0, max = 1, Q1 = 0.370, mediana = 0.588, Q3 = 0.688, IQR = 0.317, media = 0.543, s.d. = 0.253).

Componente Presiones Socio-Ecológicas (PSE)

Subcomponente exposición a peligros biofísicos (EPB)



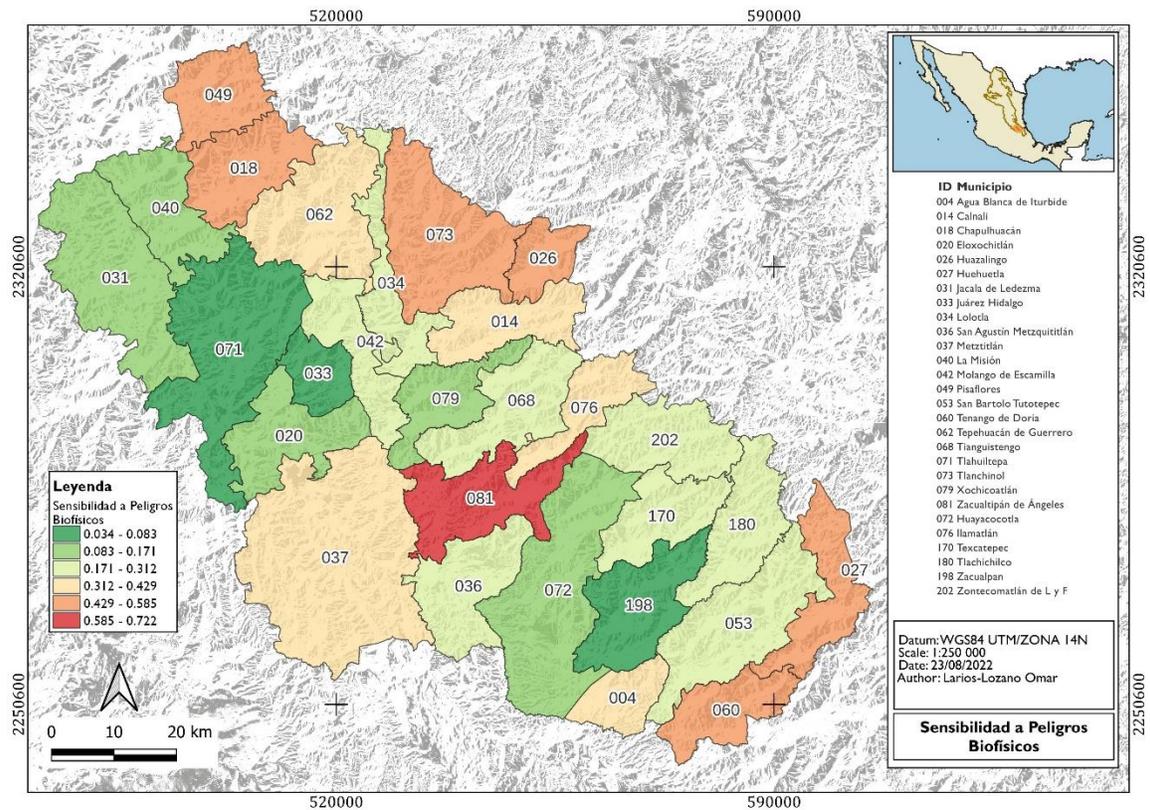
A



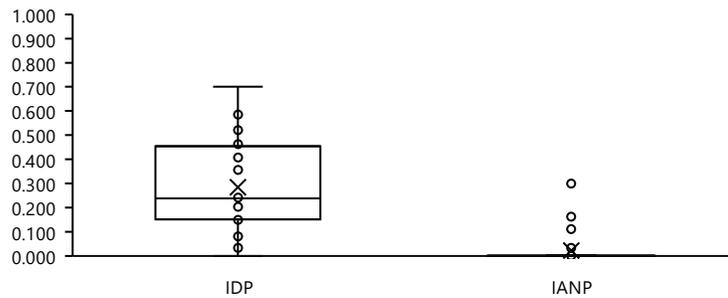
B

Figura 14. Exposición a los Peligros biofísicos (EPB) de la ZSSMO. Sintetiza los datos del peligro por deslaves, inundaciones, sequías y ciclones tropicales. **A)** Clasificación espacial. Muy alto (0.612 – 0.801), alto (0.441 – 0.612), medio (0.356 – 0.441), bajo (0.187 – 0.356), muy bajo (0.187). Fuente: INECC, 2018 y CENAPRED, 2015. **B)** Distribución de los municipios según los distintos indicadores que integran EPB; IDES (min = 0, max = 1, Q1 = 0.533, mediana = 0.657, Q3 = 0.780, IQR = 0.247, media = 0.647, s.d. = 0.200); IINU (min = 0, max = 1, Q1 = 0.240, mediana = 0.523, Q3 = 0.721, IQR = 0.480, media = 0.486, s.d. = 0.299); ISEQ (min = 0, max = 1, Q1 = 0.231, mediana = 0.423, Q3 = 0.615, IQR = 0.384, media = 0.395, s.d. = 0.273). ICTR (min = 0, max = 1, Q1 = 0.282, mediana = 0.413, Q3 = 0.565, IQR = 0.282, media = 0.456, s.d. = 0.232).

Subcomponente sensibilidad a peligros biofísicos (SPB)



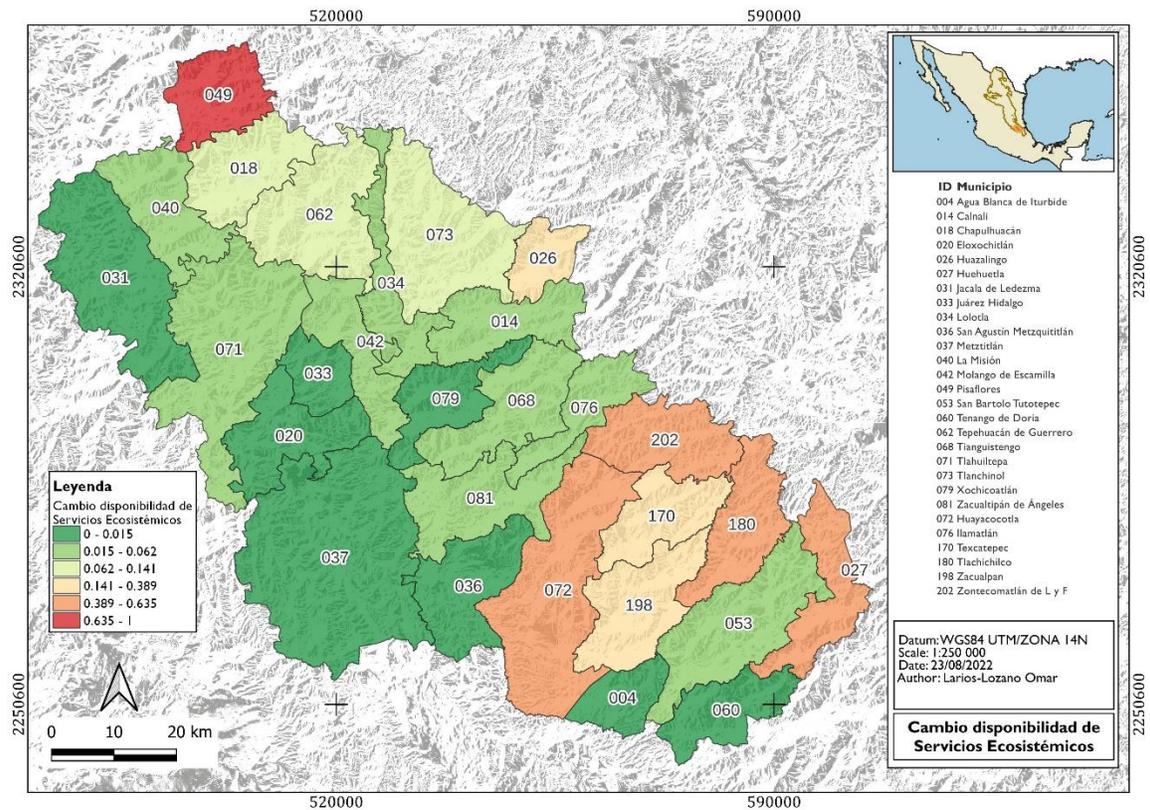
A



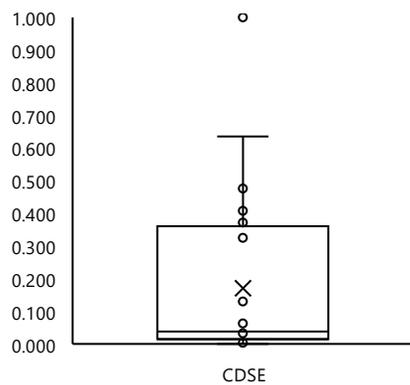
B

Figura 15. Sensibilidad a Peligros Biofísicos (SPB) de la ZSSMO. Integra los valores del Índice de Densidad Poblacional (IDP) y el Índice de Áreas Naturales Protegidas (IANP). **A)** En la escala de colores el verde indica municipios donde la SPB es mayor, en contraste con los municipios en rojo donde la SBP es baja. Elaboración propia. Fuente: INEGI, 2020; CONABIO, 2021. **B)** Distribución de los municipios según los distintos indicadores que integran la SPB; IDP (min = 0, max = 0.70, Q1 = 0.153, mediana = 0.238, Q3 = 0.446, IQR = 0.293, media = 0.284, s.d. = 0.183); IANP (min = 0, min = 0, max= 0.30, Q1 = 0, median = 0, Q3 = 0.001, IQR = 0.001, media = 0.022, s.d. = 0.065).

Subcomponente presiones ambientales (PA)



A



B

Figura 16. Índice de las Presiones Ambientales. Indica la pérdida de la cobertura vegetal para cada municipio de la ZSSMO, que se traduce en el cambio en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos (CDSE). **A)** En la escala de colores el verde indica municipios donde la CDSE es mayor, en contraste con los municipios en rojo donde la CDSE es baja. Fuente: Bravo-Cadena, 2019. **B)** Distribución de los municipios según el CDSE que miden las Presiones Ambientales: min = 0, max = 1, Q1 = 0.014, mediana = 0.037, Q3 = 0.348, IQR = 0.333, media = 0.170, s.d. = 0.244.

Apéndice 11

Tabla 15. Fuentes de validación de los elementos e interacción del modelo dinámico.

| Validación del modelo cualitativo de la ZSSMO | | |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| Subsistema | Componente | Fuente |
| Población | Marginación social | CONEVAL, 2020 |
| | Desarrollo humano | PNUD, 2019 |
| | Población indígena | INEGI, 2020 |
| | Usos y conocimientos tradicionales | Castillo-Oropeza y Delgado-Hernández, 2022 |
| | Economías familiares | García y Carrasquel, 2020 |
| Recursos y unidades de recursos | Cobertura forestal | Lorenzo <i>et al.</i> , 2019; INEGI, 2021 |
| | Ecosistemas naturales | INEGI, 2021 |
| | Servicios ecosistémicos | Bravo-Cadena y Pavón, 2018 |
| | Bosque de niebla | CONABIO, 2010 |
| | Disponibilidad hídrica | Monterroso-Rivas <i>et al.</i> , 2016 |
| Gobernanza | Instituciones | |
| | Recursos financieros | Gob del estado de Hidalgo, 2020 |
| | Unidades económicas | INEGI, 2021 ^a |
| | Políticas públicas | PO Hidalgo, 2023 |
| | Estrategias de desarrollo sustentable | García y Carrasquel, 2020 |
| | Instrumentos de conservación | CONAFOR, 2021; CONABIO, 2020 y 2021 |
| | Producción de bienes culturales | García y Carrasquel, 2020 |
| Principales impulsores de cambio | Agricultura. Ganadería y urbanización | Lorenzo <i>et al.</i> , 2019 |
| | Grupos ilegales/ tala clandestina | Castillo-Oropeza y Delgado-Hernández, 2022 |
| | Cambio climático | Cruz-Hernández <i>et al.</i> , 2020 |
| | Aculturación | García y Carrasquel (2020). |