





Análisis espacial de Servicios Ecosistémicos en la periferia de Ciudad de México: Implicaciones para la conservación en el Bosque de Agua

Antonio Villanueva^{1,*} , Francesca Fagandini Ruiz^{2,3} , Leopoldo Galicia⁴ , Eugenio Figueroa B.^{5,6} 

(1) MondeGeo, 19 Aristide Maillol 34000 Montpellier, France.

(2) CIRAD, UMR TETIS, F-34398 Montpellier, France.

(3) TETIS, Univ. Montpellier, AgroParisTech, CIRAD, CNRS, INRAE, Montpellier, France.

(4) Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Circuito exterior S/N, México, CD. MX., C. P. 04510, México.

(5) Facultad de Economía y Gobierno, Universidad San Sebastián, Santiago, Chile.

(6) Facultad de Economía Universidad de Chile, Santiago, Chile.

*Autor de correspondencia: Javier García Muñoz [jgarciamz@unex.es]

> Recibido el 23 de enero de 2023 - Aceptado el 20 de septiembre de 2023

Como citar: Villanueva, A., Fagandini Ruiz, F., Galicia, L., Figueroa B., E. 2023. Análisis espacial de Servicios Ecosistémicos en la periferia de Ciudad de México: Implicaciones para la conservación en el Bosque de Agua. *Ecosistemas* 32(3):2523. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2523>

Análisis espacial de Servicios Ecosistémicos en la periferia de Ciudad de México: Implicaciones para la conservación en el Bosque de Agua

Resumen: Las Áreas Naturales Protegidas han sido tradicionalmente empleadas para preservar los ecosistemas naturales, aunque en las últimas décadas se han añadido esquemas de Pago por Servicios Ambientales para complementar estas iniciativas. Sin embargo, los Bosques Templados endémicos están expuestos a fuertes presiones por actividades antrópicas como el crecimiento urbano y la fuerte demanda hídrica para abastecer una de las ciudades más grandes del centro de México. La evidencia de México muestra que los PSA han tenido un impacto limitado en la conservación, ya que en sus primeros años los pagos fueron asignados en áreas con bajo riesgo de degradación ambiental, principalmente en las ANP. Esta asociación ha generado debates sobre su efectividad en la conservación y la provisión de servicios ecosistémicos.

Fue cuantificada la efectividad espacial de las Áreas Naturales Protegidas y el sistema de Pago por Servicios Ambientales para la conservación de Servicios Ecosistémicos de la zona central de México específicamente en la zona denominada Bosque de Agua. Los servicios de provisión de agua y regulación climática fueron modelizados con el software InVEST, mientras que los servicios de provisión de alimentos agrícolas y de madera fueron estimados a partir de la cobertura de stock de biomasa elaborado por el programa para la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, y la degradación de los bosques. A partir de estas estimaciones por unidades mínimas de análisis (1 ha) se generaron modelos de puntos calientes para cada SE.

Luego, se cruzaron áreas con altos valores de estos servicios ("puntos calientes") con Áreas Naturales Protegidas y zonas con Pago por Servicios Ambientales. Los resultados destacan que el Bosque de Agua no solo es proveedor de agua, sino que otros servicios también son significativos y necesitan una protección más eficaz. El 62% del área total del Bosque de Agua (160,356 ha.) presenta puntos calientes para al menos uno de los cuatro servicios medidos. Sin embargo, el 19% (28,864 ha.) de los puntos calientes de servicios no está protegido por ningún instrumento de conservación. Esto pone de relieve la importancia de revisar y ajustar los enfoques de conservación existentes para garantizar la sostenibilidad de estos valiosos servicios que nos da la naturaleza.

Palabras clave: áreas naturales protegidas; ordenamiento territorial; pago por servicios ambientales; sistemas de información geográficos

Spatial analysis of Ecosystem Services at the periphery of Mexico City: Conservation implications: A case study of the Bosque de Agua

Abstract: Protected Natural Areas have traditionally been employed to preserve natural ecosystems, although in recent decades, Payment for Ecosystem Services schemes has been added to complement these initiatives. However, the endemic Temperate Forests are exposed to strong pressures due to anthropic activities such as urban growth and high water demand to supply one of the largest cities in central Mexico. Evidence from Mexico shows that PES programs have had a limited impact on conservation, as in their early years, payments were allocated in areas with low risk of environmental degradation, mainly within the Protected Natural Areas. This association has sparked debates about their effectiveness in conservation and the provision of ecosystem services.

The spatial effectiveness of Protected Natural Areas and the Payment for Ecosystem Services (PES) system in conserving Ecosystem Services was quantified in the central zone of Mexico, specifically in the area known as the 'Water Forest' (Bosque de Agua). The services of water provision and climate regulation were modeled using the InVEST software, while services related to agricultural food provision and timber were estimated based on the biomass stock coverage developed by the program for reducing emissions from deforestation and forest degradation. Utilizing these estimations at the finest analytical unit (1 ha), hotspot models were generated for each Ecosystem Service.

Subsequently, areas with high values of these services ('hotspots') were overlaid with Protected Natural Areas and zones under Payment for Ecosystem Services. The results highlight that the Water Forest is not only a water provider but also hosts other significant services that require more effective protection. 62% of the total area of the Bosque de Agua (160,356 ha.) presents hotspots for at least one of the four measured services. However, 19% (28,864 ha.) of the service hotspots are not protected by any conservation instrument. This underscores the importance of reviewing and adjusting existing conservation approaches to ensure the sustainability of these valuable services provided by nature.

Key words: biomarker; oxidative stress; glutathione reductase; wild boar; malondialdehyde; kidney

Introducción

Los Bosques Templados, al igual que otros ecosistemas ofrecen variados beneficios a la sociedad, estos beneficios son producto de procesos biofísicos e interdependencias entre los sistemas bióticos y abióticos (Almeida-Leñero et al. 2014; Mendoza-Ponce y Galicia 2010; Galicia et al. 2018). Los Servicios Ecosistémicos (SE) pueden ser definidos como los beneficios que obtiene la sociedad de los ecosistemas. En otras palabras, elementos que la sociedad puede consumir, disfrutar y que contribuyen al bienestar de la sociedad. Estos SE son usualmente producidos por ecosistemas naturales, pero también puede ser provistos por áreas con intervención antrópica, como áreas agrícolas o parques urbanos (Daily 1997; MEA 2005; Balvanera 2012; Galicia y Zarco-Arista 2014). Los SE pueden ser clasificados en 3 grandes grupos: Servicios de provisión, de regulación y cultural (Haines-Young y Potschin 2011).

El nuevo paradigma antropocéntrico de conservación de los ecosistemas naturales refuerza las iniciativas históricas de conservación. A pesar de que se registra un aumento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) en el mundo, son documentadas la degradación de ecosistemas, disminución de biodiversidad y SE (Pesche y Méral 2016; Ferrer et al. 2021). El acierto parcial de las ANP ha empujado cuestionamientos sobre la efectividad del modelo de conservación de ecosistemas naturales e inspirado reflexiones sobre nuevos paradigmas de conservación que integran eficientemente las dimensiones ecológicas y sociales (tales como los SE con enfoque espacial) (Palomo et al. 2014; Pearson 2016). Actualmente, las ANP son la estrategia más conocida y aceptada para la conservación de ecosistemas (Dudley et al. 2014; Palomo et al. 2014). Han sido definidas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN - en inglés «International Union for Conservation of Nature») como un “espacio geográfico claramente definido, reconocido, resguardado y manejado con estatus jurídico con el fin de asegurar a largo plazo la conservación de la naturaleza como también los Servicios Ecosistémicos y sus valores asociados” (Dudley et al. 2008; Pesche y Méral 2016). La gran mayoría de las ANP han seguido históricamente el paradigma convencional de “islas” de conservación, el cual excluye las áreas forestales de las actividades antrópicas, por tanto, no considera los componentes sociales, culturales y políticos (Egoh et al. 2007; Costedoat et al. 2015).

Por otra parte, los análisis de la efectividad de los PSA se han centrado en los aspectos biofísicos, sociales y económicos de manera independiente (Corbera et al. 2020). En el caso de los biofísicos, uno de los principales indicadores es la deforestación evitada y la detección del cambio de uso de suelo con relación a la vida silvestre y la biodiversidad. Esto puede ser debido a la facilidad que ofrecen las herramientas de teledetección con relación a los gastos de implementación de monitoreo de indicadores que requieren de trabajo de campo y laboratorio (Carter Berry et al. 2020). Asimismo, porque mucho de los PSA están sesgados a los usuarios que conducen el cambio de uso de suelo. En cambio, el monitoreo de la diversidad está concentrado en las ANP's. Los servicios de regulación del ciclo hidrológico y el secuestro de carbono son los más valorados en los PSA, pero no tienen una medición instrumentada; y solo son evaluados indirectamente (Galicia et al. 2018). Por ejemplo, en el caso del secuestro de carbono, se relaciona con la dinámica de la cobertura vegetal y los incendios; mientras que el agua en muchos casos en un análisis visual. Por lo tanto, es fundamental modelar y estimar de manera cuantitativa los SE provistos por los ecosistemas.

En términos de los SE obtenidos, los BT de México son uno de los ecosistemas más importantes de la zona central del país para las comunidades locales. Esto debido a que de ellos se obtienen beneficios tales como: agua para consumo potable y agrícola, alimentos, madera, recreación, acumulación de carbón, entre otros SE no medidos hasta la fecha (Padilla et al. 2008; Galicia et al. 2018). En México las ANP en sus inicios tenían como fin conservar el recurso hídrico y forestal (Zonas

Protectoras Forestales), sin considerar el resto de los SE. En la práctica, la evolución de la conservación ha sido lenta y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) sigue definiendo a las áreas protegidas como: “porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos”. Recientemente se han incluido los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) como estrategia complementaria para asegurar la provisión de SE en las ANP. En México los PSA fueron incorporados hace más de una década, pero aún sus contribuciones en la conservación de ecosistemas naturales no son claros (Perevchikova 2016; Pesche y Méral 2016; Rodríguez-Robayo et al. 2020). La evidencia de México muestra que los PSA han tenido un impacto limitado en la conservación, ya que en sus primeros años los pagos fueron asignados en áreas con bajo riesgo de degradación ambiental, principalmente en las ANP (Costedoat et al. 2015). En los bosques templados de México, el objetivo de los PSA es compensar económicamente a los dueños de bosques para mantener la función proveedora de algunos SE específicos como la captación de lluvia y la recarga de acuíferos (servicios hidrológicos), el mantenimiento de estructuras naturales que permitan el desarrollo de la fauna silvestre (hábitat para la biodiversidad) o la acumulación de biomasa (captura de carbono) (Muñoz-Piña et al. 2008). Los instrumentos normativos espacialmente explícitos para la conservación como las ANP y las áreas con PSA son claves (Brenner 2010). En estas áreas se llevan acuerdos en varios niveles espaciales e involucra actores del territorio sumamente heterogéneos como instituciones privadas, del estado y actores locales (Lebreton 2015; Rees Catalán 2015; Izquierdo-Tort 2020).

Por otro lado, es sabido que el establecimiento de ANP influye positivamente en la conservación de la biodiversidad y la provisión de SE (Chape et al. 2005; Spanò et al. 2017). De hecho, a menudo la mayor concentración o puntos calientes de SE se encuentran dentro de los límites de las ANP (Palomo et al. 2014; García-Nieto et al. 2015). No obstante, otros estudios han revelado que gran cantidad de puntos calientes de los SE se encuentran fuera de las ANP (Davids et al. 2016). El término ‘puntos calientes’ se ha utilizado genéricamente en varias disciplinas para describir una región o valor que es mayor en relación con su entorno.

La hipótesis que dirige esta investigación es que la modelización espacial de SE puede ser una estrategia técnica potente para enfatizar esfuerzos de conservación ya que permite identificar las zonas de mayor y menor concentración de SE. Para identificar estas zonas de alto valor de SE utilizaremos la definición de puntos calientes como un área que exhibe una agrupación significativa de altos valores en la distribución espacial de los SE (Bagstad et al. 2017; Harris et al. 2017). El objetivo de esta investigación es aportar al debate de la conservación de áreas naturales a través la identificación de: 1) las áreas con mayor concentración de SE, y 2) la superficie de puntos calientes dentro de ANP y áreas con PSA al interior del Bosque de Agua.

Material y Método

Área de estudio

El Bosque de Agua (Fig. 1) posee 250 000 hectáreas (ha) y se encuentra en la periferia de ciudad de México entre 3 estados: México, Morelos y ciudad de México (Padilla et al. 2008; Su et al. 2015; López-García y Navarro-Cerrillo 2021). El Bosque de agua se extiende desde el Tepozteco, la Sierra del Chichinautzin y las Lagunas de Zempoala; hasta el Ajusco, el Desierto de los Leones y la Sierra de las Cruces. Esta zona está bajo fuertes presiones demográficas, expansión urbana, fragmentación de ecosistémicas naturales, actividad agrícola y minería ilegal (Kolb y Galicia 2012; Villanueva y Imbernon 2013; Galicia et al. 2018). En el Bosque de agua viven alrededor de 450 000 personas (INEGI 2010), pero más de 23 millones de personas benefician

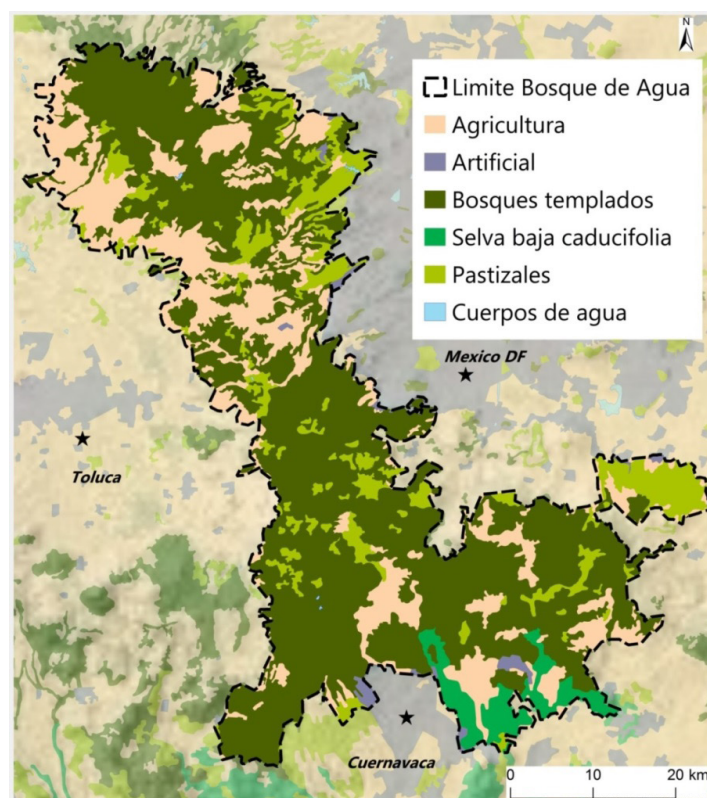


Figura 1. Uso de suelo del Bosque de Agua

Figure 1. Land Uses of Bosque de Agua (Water Forest)

del agua potable que provee esta región (ECOBA 2012) repartidas en las ciudades de Toluca, Cuernavaca y Ciudad de México. Esta zona es un área con paisajes principalmente mixtos, donde los principales usos de suelo de esta área son asentamientos humanos, áreas agrícolas, pastizales y bosques. El 64% de la superficie total del Bosque de Agua está dominada por bosques templados con presencia de *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii* and *Quercus* spp. (Carrera-Hernández y Gaskin 2008; Padilla et al. 2008; Challenger y Soberón 2008; ECOBA 2012). Un 67% (171 907 ha) del total de la superficie del Bosque de Agua se encuentra protegida por ANP. Las áreas Estatales (93 759 ha, equivalentes a 37% total del Bosque de Agua) y Federales (63 122 ha o 25% de la superficie total del Bosque de Agua) poseen la mayor superficie en el Bosque de Agua. Las superficies más pequeñas corresponden a las áreas municipales y las áreas de conservación de Ciudad de México (710 ha o 0.3% área total del Bosque de Agua).

En el Bosque de Agua, la superficie total de áreas con PSA al año 2009 fue de 75 773 ha. Un 85% de esta superficie se encuentra en superposición con ANP de carácter estatal o federal y solamente un 16% son complementarias a la conservación de ecosistemas naturales. En esta investigación fueron considerados para los análisis espaciales aquellas áreas con PSA fuera de ANP para evitar análisis con errores de doble conteo de información. La superficie total de áreas con PSA considerada es de 11 768 ha (Villanueva 2018) (Fig. 2).

Modelización de SE

La metodología empleada para el análisis espacial de los SE en esta investigación puede resumirse en tres etapas (Fig. 3). En la primera etapa, se llevan a cabo las modelizaciones de cuatro SE: Provisión de alimento, provisión de agua, provisión de madera y regulación climática. En la segunda etapa, a partir de estos modelos, se identifican los puntos donde se concentran valores elevados de los Servicios Ecosistémicos. Finalmente, en la tercera etapa, se superponen las áreas con los valores más altos con los polígonos de ANP y/o áreas con PSA.

Fueron modelizados cuatro SE de acuerdo a la clasificación común internacional CICES (Haines-Young y Potschin 2011) (Tabla 1): provisión de alimento agrícola (biomasa en cultivos agrícolas), provisión de agua (rendimiento hídrico), provisión de madera (biomasa en predios de vocación forestal) y regulación del clima local (almacenamiento de carbono). Estos servicios fueron seleccionados en base a su relevancia empírica en la zona de estudio y la disponibilidad de datos espaciales de fuentes oficiales y científicas. Los servicios de provisión de agua y regulación climática fueron modelizados con el software InVEST, el cual es una de las herramientas más completas y eficientes para la generación de modelos espaciales de SE (Tallis y Polasky 2011; Tallis et al. 2013; Guerry et al. 2015). InVEST utiliza una amplia variedad de datos espaciales, incluyendo los usos de suelos y datos biofísicos en forma de tablas de coeficientes. Los servicios de provisión de alimentos agrícolas y de madera fueron estimados a partir de: 1) la cobertura de stock de biomasa elaborado por el programa para la reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, y 2) la degradación de los bosques de las Naciones Unidas (REED+) (Cartus et al. 2014).

Modelo espacial de provisión de alimento (biomasa orgánica en suelo de aptitud agrícola)

Directa o indirectamente, lo que se consume para alimento humano procede de las plantas y su biomasa (Romero 2013). El aporte de la biomasa no es solo nutricional, también provee una importante fuente de material orgánico para la formación de suelos, abono y fertilizante natural para los cultivos, forraje para ganado. La biomasa puede contribuir igualmente a la disminución de agroquímicos en la actividad agrícola (Tappeiner et al. 2008; Mendoza-Ponce y Galicia 2010). Por otro lado, los cultivos agrícolas que poseen una gestión y prácticas adecuadas, pueden contribuir en la reducción del calentamiento global gracias a la captura de carbono (Matthews 2000; Barnes et al. 2016). La biomasa de cualquier planta contiene en su composición química un promedio de 45% de carbono de su peso total (Romero 2013), siendo un importante regulador del

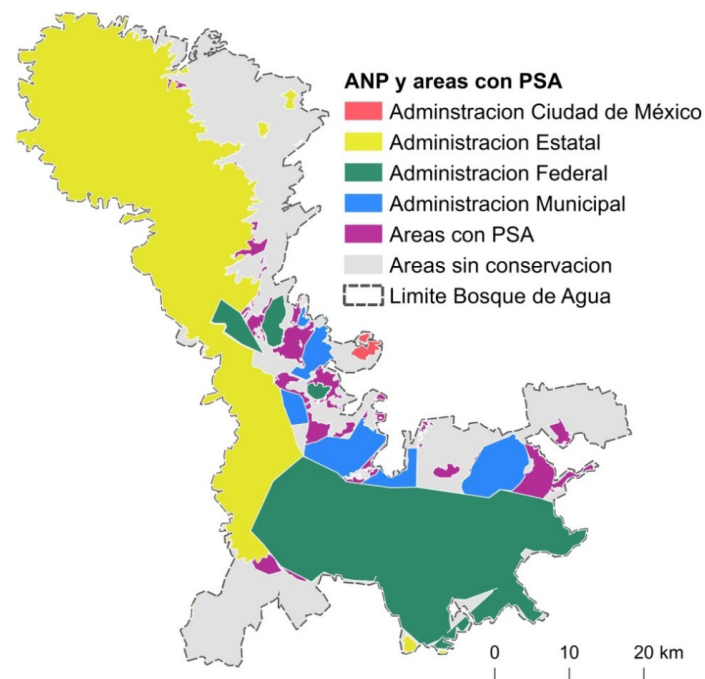


Figura 2. Áreas Naturales Protegidas y áreas con pago por servicios ambientales (PSA) al interior del Bosque de Agua.

Figure 2. Natural Protected Areas and areas with payment for environmental services (PES) of the Bosque de Agua.

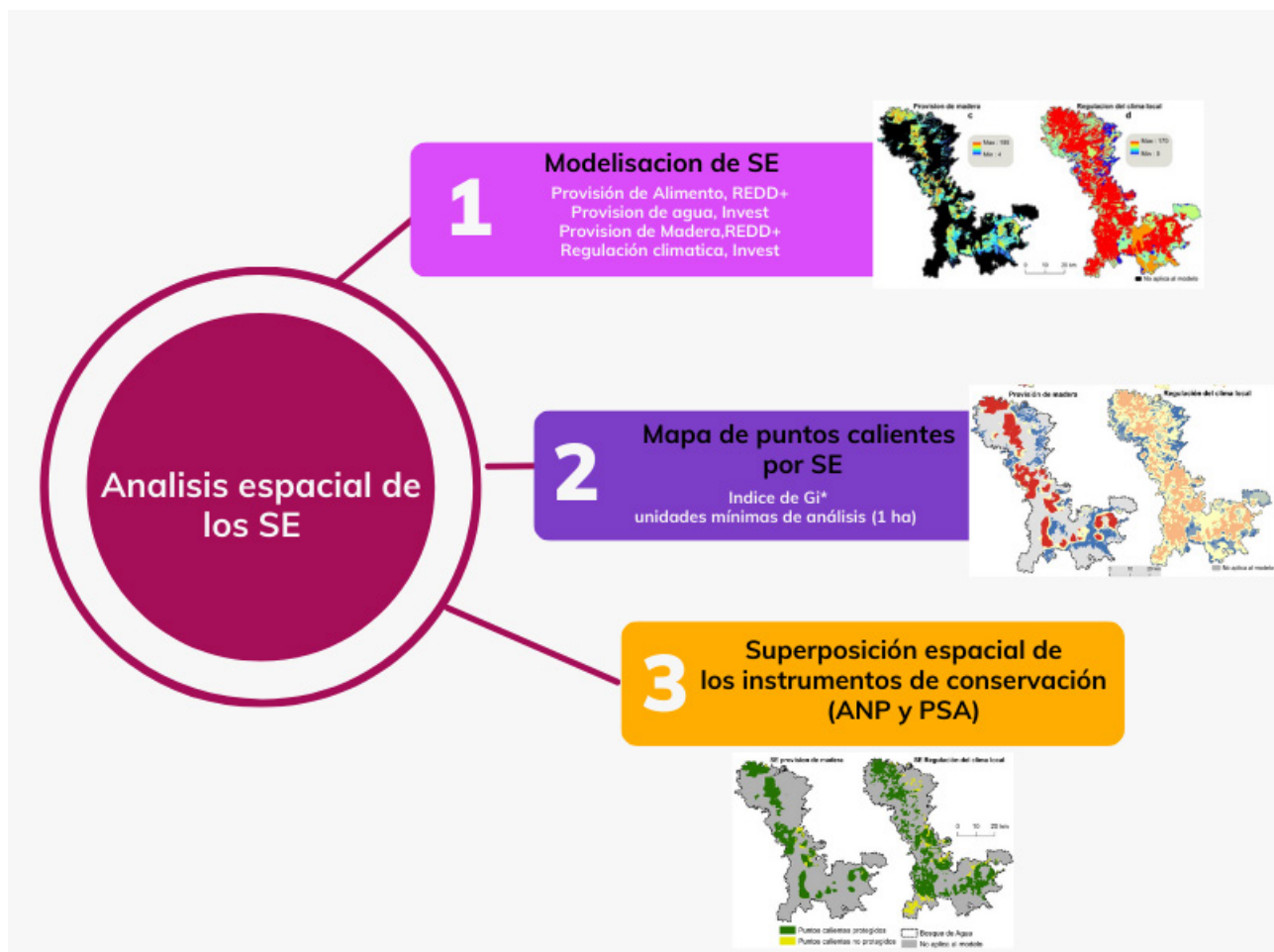


Figura 3. Etapas de la metodología de análisis espacial aplicada.

Figure 3. Stages of the applied spatial analysis methodology.

Tabla 1. Servicios Ecosistémicos modelizados.**Table 1.** Modelled Ecosystem services.

Categoría SE	Sub categoría	descripción CICES	Descripción	Soporte
Provisión	Alimento	Alimentos provenientes de sistemas agrícolas	Biomasa en suelo agrícolas	REDD+
Provisión	Agua	Disponibilidad de Agua para consumo humano	Estimación de la cantidad promedio anual de agua producida por una cuenca	InVEST
Provisión	Madera	Madera para uso comercial (material de construcción y leña)	Estimación del valor neto de la extracción de madera legal	REDD+
Regulación y mantenimiento	Regulación climática	Regulación del clima local	Estimación del almacenamiento de carbono	InVEST

ciclo de carbono (Mendoza-Ponce y Galicia 2010). La actividad agrícola en el Bosque de Agua representa un 61% de la superficie total (250 000 ha). La actividad agrícola es principalmente de subsistencia o en pequeña producción comercial, orientada a mercados locales y con ciclos de rápida rotación. En el área de estudio, los principales cultivos son papa, avena y trigo (ECOBA 2012; Villanueva y Imbernon 2013; Lebreton 2015). Para obtener un modelo de la capacidad potencial de provisión de alimentos en agroecosistemas a escala regional, fue estimado el almacenamiento de biomasa en áreas agrícola. La estimación se realizó a partir de la cobertura de biomasa elaborado por el programa REED+ (Cartus et al. 2014) y excluyendo los otros tipos de suelo (bosques, asentamientos humanos y pastizales naturales). A partir de la cartografía de uso de suelo realizada por Villanueva (2018) en el marco del proyecto franco-mexicano ANR SELINA (<https://anr.fr/Projet-ANR-11-ISH1-0001>) se extrajo la superficie de uso de suelo agrícola aplicada para este modelo.

Provisión de agua

La regulación del ciclo hidrológico es uno de los servicios tangibles de mayor impacto en el mundo entero. Su perturbación ha modificado la disponibilidad y vulnerabilidad sobre la población rural, incidiendo principalmente en la obtención de agua potable y para uso de riego agropecuario (Hamel y Guswa 2015). El rendimiento de agua es definido como la cantidad de escurrimiento superficial y subterráneo de agua a través de un paisaje determinado (Tallis y Polasky 2011). El modelo utilizado requiere información previa como: uso de suelo, precipitación anual media, evapotranspiración potencial anual media, profundidad del suelo, contenido de agua disponible en la vegetación, profundidad de la raíz de las plantas, límite de cuencas y sub cuencas y los atributos biofísicos por tipo de uso de suelo (Mendoza et al. 2011; Tallis et al. 2013; Guerry et al. 2015). Para calcular el rendimiento hídrico (Y_{xj}) se utilizó el módulo "Water Yield" de InVEST. El modelo se basa en los principios del balance hídrico en una escala espacio temporal, considerando la curva de Budyko (Zhang et al. 2007) fiber, and fuel. These ecosystem services from agriculture, classified as provisioning services by the recent Millennium Ecosystem Assessment, depend in turn upon a web of supporting and regulating services as inputs to production (e.g., soil fertility and pollination y la precipitación anual. El rendimiento hídrico anual a nivel geoespacial con SIG por píxel (30 m x 30 m) del paisaje (Y_{xj}) es definido en la Ecuación 1:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_{xj}}\right) P_{xj} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde,

AET_{xj} es la evapotranspiración real anual por píxel "x" para cada tipo de cobertura el uso del suelo "j", y P_{xj} es la precipitación anual en ese píxel "x" según el tipo de uso de suelo "j". El cálculo de la evapotranspiración (AET_{xj}) se estableció a partir de una

aproximación de la curva de Budyko, desarrollada por Zhang et al. (2001) (Ec. 2).

$$\frac{AET_{xj}}{P_{xj}} = \frac{1 - w_x * R_{xj}}{1 + w_x * R_{xj} + \frac{1}{R_{xj}}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde,

El coeficiente w_x (Ec. 3) indica el agua disponible para las plantas. Este coeficiente adimensional representa la diferencia relativa en la forma en que las plantas utilizan el agua del suelo para la transpiración Zhang et al. (2001). Puede ser estimado según la siguiente ecuación:

$$w_x = \left(\frac{AWC_x}{P_{xj}}\right)^Z \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde,

AWC_x (mm) es estimado a partir de la textura del suelo y la profundidad efectiva de las raíces. AWC se calcula como la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente de la planta. El parámetro Z corresponde a la constante de Zhang y representa la estacionalidad de las precipitaciones. Generalmente varía entre 0.5 y 2.0 con 0.5 como valor típico de los biomas de pastizal natural y 2 para los biomas forestales (Zhang et al. 2001).

R_{xj} es el índice de sequía de Budyko (1974). Valores mayores a 1 significan que la celda es potencialmente árida. Este índice está basado en la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación a nivel de píxel "x" para el uso de suelo "j" (Ec. 4).

$$R_{xj} = \frac{k_{(xj)} * ET_{o(x)}}{P_{xj}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde,

$ET_{o(x)}$ es la evapotranspiración de referencia para la celda "x" y $K_{(xj)}$ es el coeficiente de evapotranspiración de las plantas asociado al tipo de suelo "j" de la celda "x". $ET_{o(x)}$ representa la demanda climática y $K_{(xj)}$ determina las características de la vegetación en cada celda "x" (Tallis et al. 2013).

Modelo espacial de provisión de madera en áreas de producción silvícola potencial

La provisión de madera proporcionada por los bosques templados mexicanos representa el 93% (US \$ 1.336 millones) del valor total de la silvicultura en los bosques mexicanos. Pero existen pocos estudios que lo consideren un SE, sino en general es más bien visto como extracción de madera asociada a la degradación de ecosistemas naturales (Galicia y Zarco-Arista 2014). La población local tiene un papel importante en la conservación y gestión forestal en México (Barton Bray y Merino Pérez 2004;

Bray 2013). Las empresas forestales comunitarias son el principal mecanismo para la explotación forestal comunitaria. Esto implica realizar inventarios forestales y planes de manejo, obtener permisos de explotación y recursos para realizar la extracción forestal (Gerez y Purata 2008). Las características de las empresas forestales comunitarias varían según la gobernanza de cada ejido y/o comunidad (Antinori y Bray 2005). La superficie de explotación por comunidad o ejido está asociada a la propiedad forestal a explotar y al proyecto presentado. No obstante, la superficie de bosques con potencial comercial bajo algún programa de explotación corresponde a un 25% de la superficie boscosa (Bray et al. 2007; Gasca Zamora 2014). Para generar el modelo espacial de provisión de madera, se estimó la disponibilidad potencial de biomasa aérea en los bosques localizados en propiedad de comunidades o ejidos. El tronco es la principal fuente comercial en la explotación comercial de madera en México. La biomasa contenida en el tronco para bosques templados en zonas con características similares al área de estudio corresponde a un 89% de la biomasa aérea total (Ec. 5) (Mendoza-Ponce y Galicia 2010).

$$b_s = \sum_{j=1}^I (0.89 * a_i) \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde,

b_s = Biomasa forestal disponible con potencial comercial en ejidos y comunidades; a_i = Biomasa aérea forestal.

a_i = Se utiliza el mapa de biomasa forestal aérea estimado por el programa REED+

Modelo espacial de regulación del clima local

El modelo InVEST de almacenamiento de carbono se basa en una simplificación del ciclo de carbono y genera un mapa del total de carbono (Mg C ha^{-1}) almacenado para una fecha específica en un paisaje determinado. El modelo considera las reservas de carbono en la biomasa aérea (corteza, troncos, ramas, hojas), biomasa subterránea (los sistemas radiculares vivos de la biomasa aérea), biomasa contenida en el suelo (componentes orgánicos del suelo) y materia orgánica muerta (residuos vegetales, materia muerta en pie) (Conte et al. 2011; Tallis y Polasky 2011). Esta información se agrega a través de tablas de coeficientes de carbono para cada uso de suelo. Se determinaron los coeficientes por tipo de uso de suelo con una revisión bibliográfica de los datos de carbono disponible para la zona de estudio (Tabla 2).

La reserva de carbono para un paisaje es la suma de las reservas de carbono de los cuatro tipos de almacenes de carbono para un tiempo t (Ec. 6) (Conte et al. 2011):

$$C_t = \sum_{j=1}^I (C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{dj}) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde,

C_t = Total de carbono acumulado para un paisaje en un tiempo t ; j = Uso de suelo; C_{aj} = Toneladas de carbono acumulado por ha en biomasa aérea; C_{bj} = Toneladas de carbono acumulado por ha en biomasa subterránea; C_{sj} = Toneladas de carbono acumulado por ha en biomasa contenida en el suelo; C_{dj} = Toneladas de carbono acumulado por ha en biomasa muerta.

Metodología puntos calientes

A partir de estas estimaciones por unidades mínimas de análisis (1 ha) se generaron modelos de puntos calientes para cada SE. Para identificar la localización de agrupaciones de valores altos de SE se utilizó el índice G_i^* que mide la intensidad de la agrupación de valores altos o bajos (Bagstad et al. 2017; Harris et al. 2017). Varias son las técnicas utilizadas para la definición de puntos calientes de fenómenos y patrones espaciales. Una de las más robustas corresponde al índice G_i^* . Este es un índice estadístico espacial diseñado por Getis y Ord (2010) que mide el grado de asociación que resulta de la concentración ponderada de puntos (Getis y Ord 2010). Esta técnica permite visualizar espacialmente los puntos calientes y fríos de un fenómeno espacial (Timilsina et al. 2013). Un punto caliente estadísticamente significativo corresponde a una entidad con un valor alto y rodeado por otras entidades con valores altos. La suma local para una entidad (unidad mínima de análisis) y sus vecinos se compara proporcionalmente con la suma de todas las entidades (Getis y Ord 2010).

El índice de "G" o concentración de valores altos de SE fue calculado con el software ArcGIS 10.2. Estos puntos calientes se forman cuando en un entorno de vecindad, los valores que alcanza la variable analizada son altos; por el contrario, los segundos se originan cuando los valores son bajos. Esta técnica permite detectar la presencia de puntos calientes o fríos, siempre que posea una significación estadística al presentar valores próximos a los alcanzados en el entorno inmediato. El cálculo de esta técnica se define en la Ecuación 7 (Bhunja et al. 2013; Ruktanonchai et al. 2014):

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij}(d) x_j}{\sum_j w_{ij}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde,

G_i^* es la estadística calculada para cada unidad mínima de análisis, (d) es la distancia que define a los valores vecinos (distancia del vecino más cercano en este caso), es el peso espacial, es el valor del SE, en este caso generado para cuatro SE (Regulación del clima local, provisión de agua, madera y alimento agrícola). Luego de obtener los puntos calientes para cada SE individualmente, estos mapas de SE reclasificados se superpusieron y sumaron para obtener un nuevo mapa de suministro de servicios múltiples. Luego de obtener los puntos calientes para cada SE individualmente, estos mapas de SE reclasificados se superpusieron y sumaron para obtener un nuevo mapa de suministro de servicios múltiples. Una vez definidos las agrupaciones de valores más altos o puntos calientes de SE fue analizada la correspondencia espacial en términos de superficies de puntos calientes que están dentro o fuera de ANP y las áreas con PSA.

Tabla 2. Parámetros usados en el modelo de almacenamiento de carbono en InVEST.

Table 2. Parameters used in the InVEST carbon storage model.

Uso de suelo	C_above	C_below	C_soil	C_dead	Fuente
Bosque Templado	103.37	13.46	47.60	5.29	Ordóñez et al. 2008; Mendoza-Ponce y Galicia 2010
Asentamiento Humano	0	0	0	0	Tallis et al. 2013
Agricultura	0.5	0.2	82	0.6	Ordóñez et al. 2008
Pastizal	2.84	0.47	90.00	0.7	Ordóñez et al. 2008; Mendoza-Ponce y Galicia 2010
Selva baja caducifolia	47.40	6.70	76.20	11.09	Jaramillo et al. 2003; Nívar 2009

Resultados

Los resultados de esta investigación se dividieron en 3 grupos: (1) distribución espacial de SE, (2) superficies y distribución espacial de puntos calientes por SE, y (3) superposición espacial de los instrumentos de conservación (ANP y PSA).

Distribución espacial de los SE

Todos los resultados corresponden a valores de stock registrados para el año 2014 y basados en las coberturas de uso de suelo (Villanueva 2018). La distribución espacial de provisión de alimentos (biomasa aérea en suelos agrícolas) posee un promedio de 90 toneladas por ha al año en los agroecosistemas del Bosque de Agua. Sus valores varían entre 2 y 180 ($\sigma=20$) toneladas de biomasa agrícola por ha en predios agrícolas (Fig. 4). A su vez, la provisión de agua posee un promedio anual por subcuencas de 6412 m³ por ha, con valores mínimos de 4918 m³ y máximos de 9230 m³ ($\sigma=907$) (Fig. 4b). La capacidad promedio de provisión de madera es de 80 toneladas por ha de stock, con valores mínimos de 4 y máximos de 185 ($\sigma=27$). La regulación del clima local está garantizada por el carbono almacenado en el área de estudio, el cual es en promedio 132 Mg C de stock por ha, con valores mínimos de 0 y máximos de 170 ($\sigma=49$) (Fig. 4d). Los servicios de almacenamiento de carbono y provisión de agua cubren toda la extensión del bosque de agua, mientras que los servicios de biomasa agrícola y maderable están limitados a las zonas agrícolas y forestales respectivamente.

Superficies y distribución espacial de puntos calientes por SE

La superficie total para los cuatro SE evaluados es de 160 356 ha. Es decir, la mayoría de la superficie total del Bosque de Agua (62%) posee puntos calientes para al menos uno de los cuatro SE evaluados, mientras que la superficie de puntos fríos cubre una superficie de 68 051 (26% de la superficie total del Bosque de Agua). Se puede observar tres grupos de SE según la superficie de puntos calientes. El SE de regulación del clima local posee la mayor superficie de puntos calientes con 84 931 ha equivalentes al 33% de la superficie del Bosque de Agua. El caso contrario es el SE de provisión de agua con la superficie más baja de puntos calientes equivalente al 17% de la superficie del Bosque de Agua (43 121 ha). Los SE de provisión de madera (51 231 ha) y alimento agrícola (50 792 ha) poseen el mismo porcentaje de superficie con puntos calientes (20% de la superficie del Bosque de Agua). El SE con menor concentración de puntos fríos corresponde al SE de provisión de alimento agrícola (38 912 ha). En caso contrario el SE regulación del clima local posee la mayor superficie de puntos fríos (60 394 ha). Los SE de provisión de madera y agua poseen superficies similares 43 667 ha y 43 393 ha respectivamente. Según la relación entre superficie de puntos calientes y de puntos fríos se pueden identificar dos grupos. Los servicios de alimento y regulación del clima local son los más altos, con una representación de puntos calientes sobre 57% del área del Bosque de Agua, mientras que los servicios de madera y provisión de agua son los SE con menor representatividad de puntos calientes (inferior a 54%) (Fig. 5).

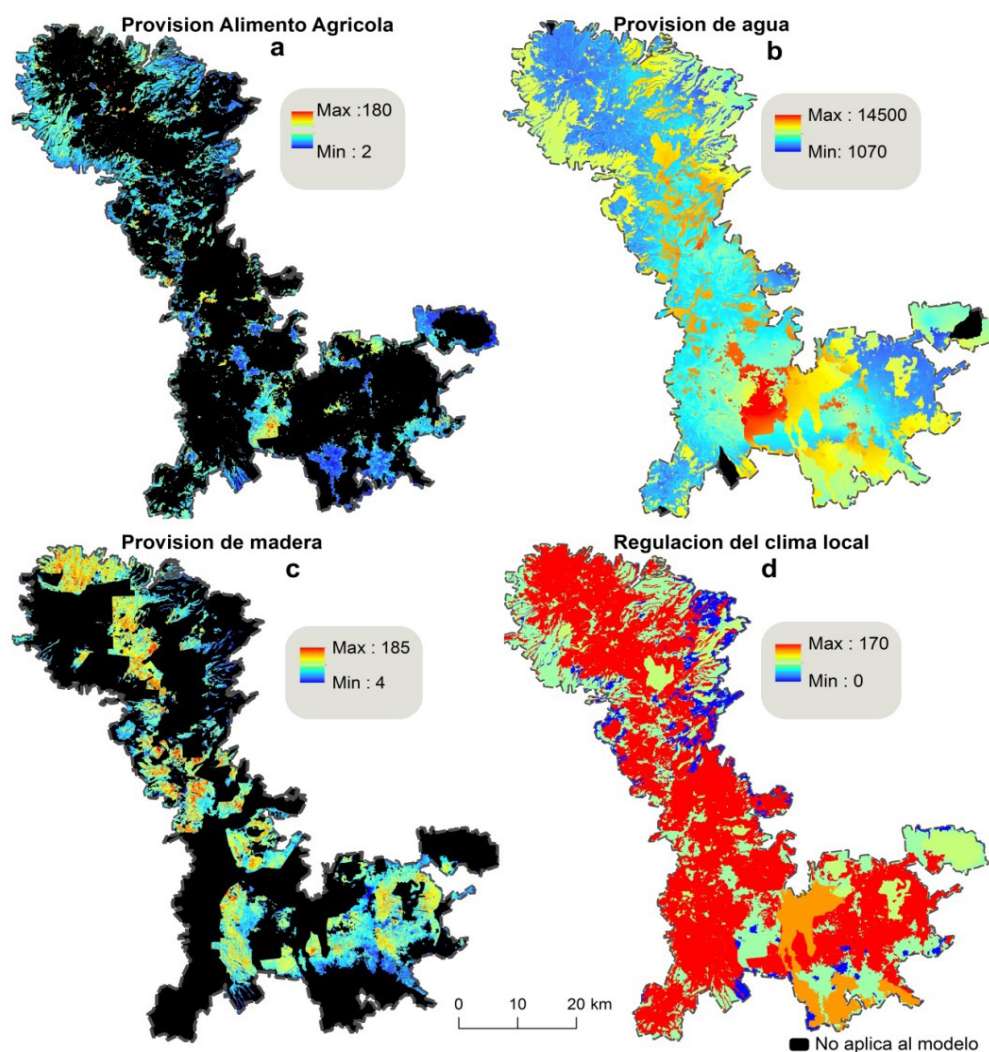


Figura 4. Mapas de la distribución espacial de lo SE: a) servicios de alimentos (biomasa agrícola), b) provisión de agua, c) provisión de madera (biomasa maderable) y d) regulación del clima local (almacenes de carbono).

Figure 4. Maps of the spatial distribution of ES: a) food services (agricultural biomass), b) water provision, c) timber provision (timber biomass) and d) local climate regulation (carbon stores).

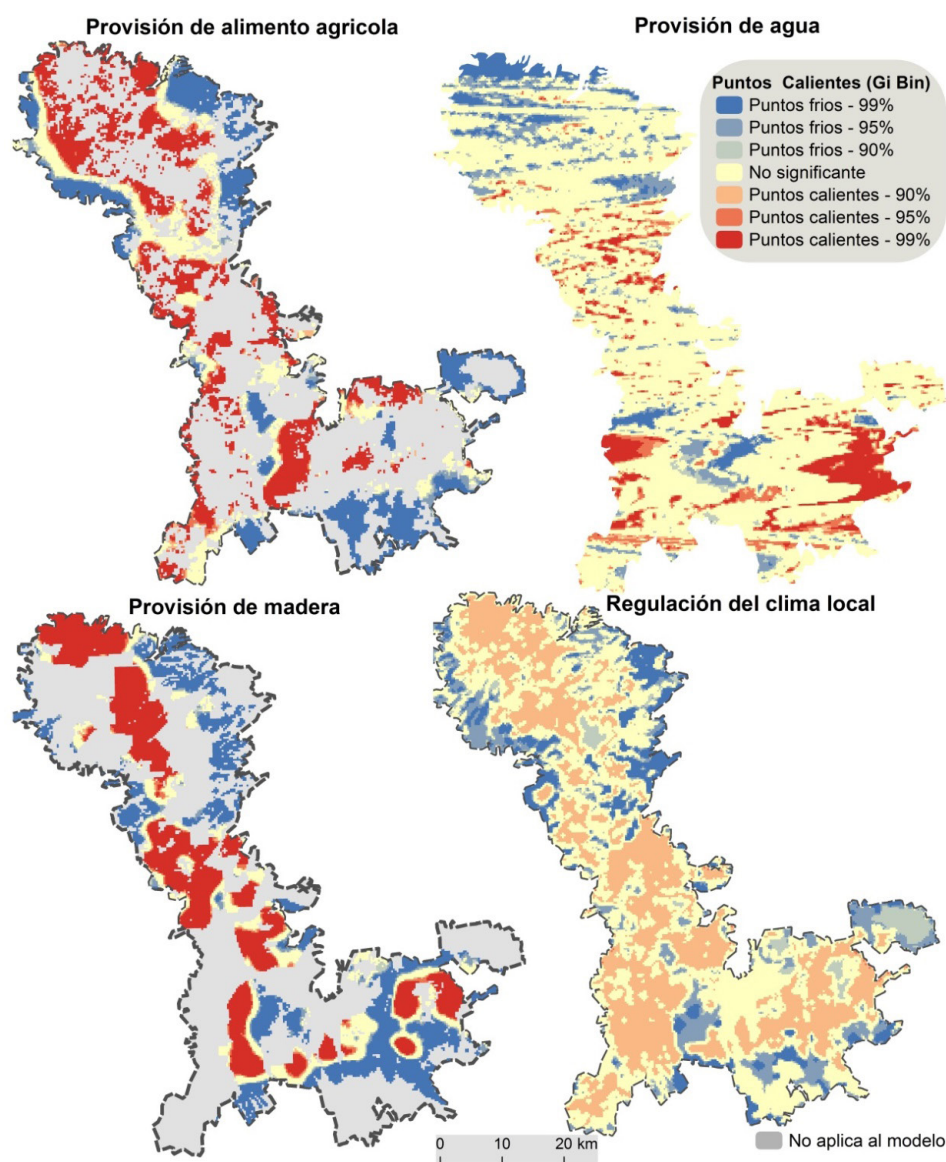


Figura 5. Mapas de puntos calientes y puntos fríos por SE.

Figure 5. Maps of hot and cold spot by ES.

Superposición espacial de los instrumentos de conservación (ANP y PSA)

En términos de superficie protegida, las ANP y las áreas con PSA en el Bosque de Agua aseguran la protección de 130 890 ha de puntos calientes de SE, equivalentes a un 81% de la superficie del Bosque de Agua (Fig. 6). El Estado de México (70 695 ha) posee la mayor superficie de puntos calientes protegidos, seguido por el estado de Morelos (37 628 ha) y finalmente la Ciudad de México (13 161 ha). El SE de regulación del clima local posee la mayor superficie de puntos calientes protegidos (84 933 ha). Por otro lado, los SE de provisión de madera y alimentos poseen 50 000 ha de puntos calientes protegidos cada uno. Finalmente, el SE con menor superficie de puntos calientes protegidos es el SE de provisión de agua (43 121 ha).

Por tipo de ANP (Tabla 3) y según la superficie de puntos calientes de SE, podemos identificar tres grupos: 1) Áreas Federales y Estatales: Del total de puntos calientes bajo protección, la mayor cantidad se encuentran en ANP estatales (68 681 ha) y federales (40 812 ha). Juntas suman un 69% del total de puntos calientes bajo protección. 2) Áreas Municipales y con áreas con PSA: Las áreas con PSA y las áreas de administración municipal protegen respectivamente entre el 6% (9962 ha) y 7% (11 037

ha) de los puntos calientes de SE bajo protección. 3) Las áreas de conservación de administración de Ciudad de México poseen un 0.2% (390 ha) de los puntos calientes de SE.

Los resultados de la proporción entre superficie total por tipo de área natural protegida y la superficie con puntos calientes nos muestran que las áreas a escala local poseen mayor pertinencia en la conservación de los SE. Las áreas con PSA poseen mayor pertinencia al momento de resguardar los SE, ya que el 85% de su superficie (9962 ha) corresponden a puntos calientes de SE y las áreas protegidas con administración municipal poseen el 77% (11 037 ha) de su superficie con puntos calientes. Por otro lado, las áreas protegidas de mayor superficie y de mayor escala administrativa (Estatales y Federales), poseen menor pertinencia en la conservación de los SE. Esto, debido a que la relación entre lo protegido y los puntos calientes de SE es menor que en las áreas locales (PSA y municipales). Así, las áreas de administración Estatal poseen el 73% (68 681 ha) bajo protección y las áreas Federales poseen el 64% (40 812 ha). De los resultados se desprende que el número de puntos calientes de provisión de SE es alto para todos los tipos de ANP, no obstante, se observan 28 864 ha de puntos de calientes de SE sin proteger que equivalen casi a la mitad de toda la superficie del Bosque de Agua.

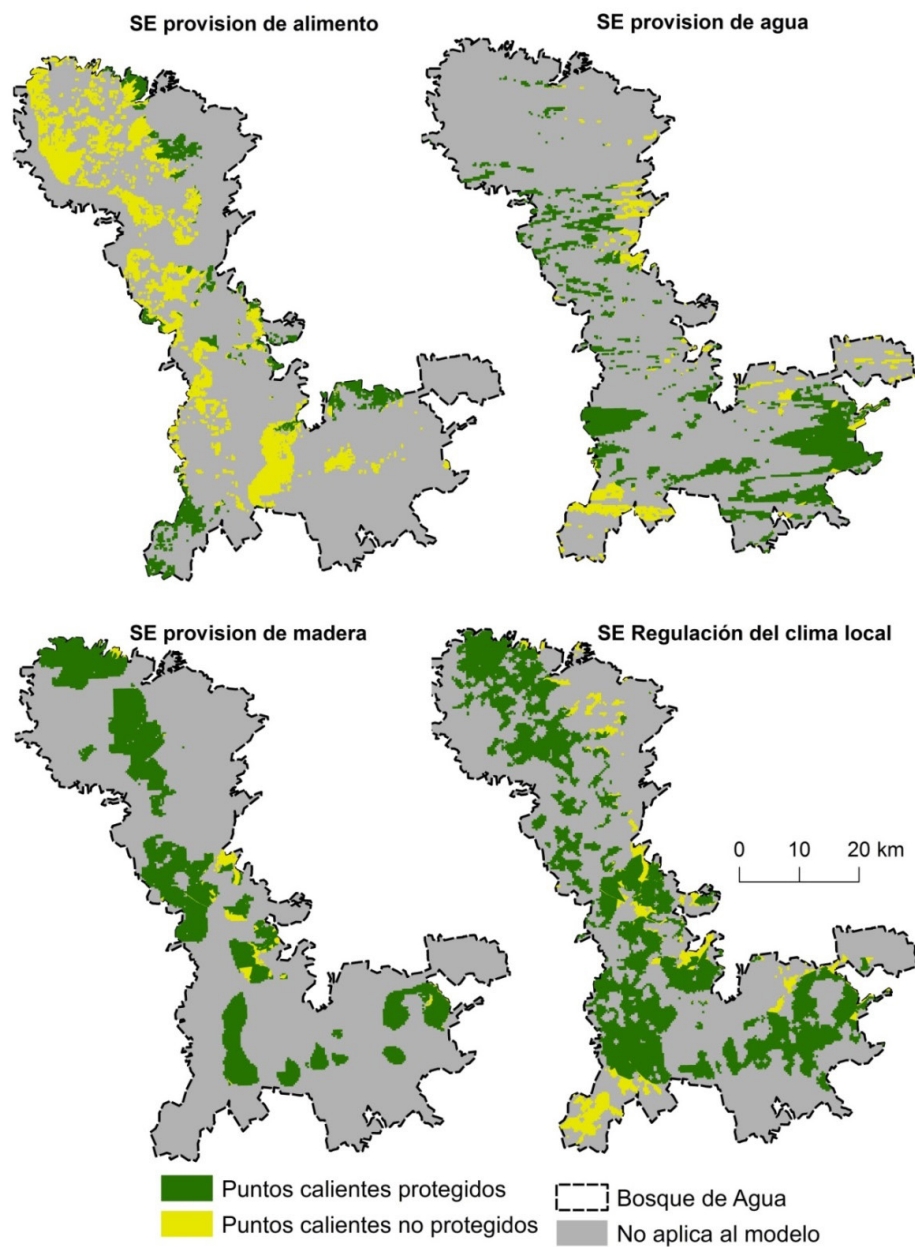


Figura 6. Superficie de puntos calientes con SE protegidos y no protegidos.

Figure 6. Hotspot surface with protected and unprotected ES.

Tabla 3. Puntos calientes protegidos por tipo de áreas naturales.

Table 3. Protected hotspots by type of natural areas.

Tipo ANP	Área total por tipo ANP (ha)	Área puntos calientes (ha)	Porcentaje (%)
Área con PSA	11 760	9 963	84.7
Municipal	14 315	11 038	77.1
Estatal	93 759	68 681	73.3
Federal	63 122	40 813	64.7
DF	710	389	54.8

Discusión

Bosque de Agua, más que un proveedor de agua

Los SE de provisión de agua y regulación climática son los más importantes para la estrategia de conservación del Bosque de Agua y para la asignación de PSA en los bosques templados para la zona de estudio (ECOBA 2012; Rodríguez-Robayo et al. 2020). Tanto así que CONAFOR (Comisión Nacional Forestal de México), encargada de coordinar el programa de esquemas de PSA define que *“Los servicios ambientales influyen directamente en el mantenimiento de la vida, generando beneficios y bienestar para las personas y las comunidades”* (CONAFOR 2017). Es importante señalar que lamentablemente, la definición de CONAFOR incluye solo paisajes forestales y naturales, dejando afuera otros paisajes que traen beneficios para la sociedad en términos de bienestar, como los paisajes agrícolas (Wratten et al. 2012). Existen varios ejemplos donde los incentivos a través de PSA en predios agrícolas han mejorado la calidad de los ecosistemas (Lipper y Neves 2011). Las metodologías agrícolas y pecuarias que optimizan las sinergias con las funciones ecosistémicas, tales como aquellas que gobiernan los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos, la fijación del nitrógeno y el control natural de las plagas, exhiben la capacidad de potenciar la calidad del suelo, materializar una utilización más eficaz del recurso hídrico disponible, fortalecer la adaptabilidad al contexto climático y elevar los rendimientos económicos y la productividad alimentaria. Concomitantemente, estas estrategias fomentan y preservan los servicios ambientales inherentes. (Eigenbrod et al. 2009; Lipper and Neves 2011; Galicia et al. 2018). El análisis de los puntos calientes nos muestra que no tan solo los SE hídricos y de captura de carbono son importantes en el Bosque de Agua, sino que también los servicios de provisión de alimento y madera. Este punto es importante ya que en general estos dos últimos SE son considerados como detrimentos de los ecosistemas naturales y por tanto no son habitualmente asociados como una contribución al bien estar en bosques templados de la zona central de México (Galicia and Zarco-Arista 2014).

Los bosques templados aportan servicios ecosistémicos relacionados con los recursos hídricos como son el mantenimiento de la calidad de agua y el mantenimiento de la capacidad de recarga de acuíferos, entre otros, que inciden en el bienestar de la población urbana y rural de la ciudad, como es la comunidad agraria Magdalena Contreras Atlitc (Almeida-Leñero et al., 2007). El SE de provisión de agua, no produce el mayor número de puntos calientes en el Bosque de Agua, sino que la mayor cobertura de puntos calientes corresponde al SE de regulación del clima local. Cabe destacar que esta investigación solo consideró un número restringido de cuatro SE en total. Se dejó fuera una amplia gama de SE, como los culturales u otros de regulación presentes en Bosques templados de la zona central de México (Almeida-Leñero et al. 2014; Galicia et al. 2015; Perez-Verdin et al. 2016). En términos de la superficie efectiva con puntos calientes, el SE de regulación del clima local posee la mayor superficie. No obstante, Carrera-Hernández y Gaskin (2008); Hoth (2014); Bergen (2015), sugieren que los habitantes locales de esta zona se benefician en mayor medida de otros SE tales como de provisión agrícola y de madera, debido a que los beneficios que se obtienen son más directos (Galicia et al. 2015). Sin embargo, bajo una mirada de sistemas socio-ecológicos, las autoridades locales no asignan la importancia necesaria a este tipo de SE ni a los suelos agrícolas (Galicia et al. 2018). Por otro lado, las estadísticas de puntos calientes de SE acotados al Bosque de Agua carecen de la visión de flujos complejos de provisión de SE hídricos. De hecho, una fuente emisora de SE puede constituir un ecosistema completo. Un ejemplo de fuente emisora es un humedal que produce SE de provisión con beneficios a sus alrededores próximos como distantes (Burkhard et al. 2012; Goldenberg et al. 2017). En este caso el Bosque de Agua puede ser considerado como una fuente emisora de SE de provisión de agua, donde dicho SE es principalmente aprovechado

por grandes ciudades en la periferia del Bosque de Agua (Ciudad de México, Cuernavaca y Toluca) debido al ciclo hidrológico y factores físicos de la topografía. Sino que este SE de provisión de agua es aprovechado por las aglomeraciones antrópicas ubicadas en cotas inferiores y en las afueras del Bosque de Agua.

¿ANP y PSA al servicio de los Servicios Ecosistémicos?

Las ANP y PSA consideran en sus objetivos políticos y teóricos los SE (Perevochtchikova 2016). Sin embargo, al no considerar de manera efectiva los SE a través de indicadores precisos existe una importante fracción de SE sin proteger. Esta investigación revela que al menos un 26% de la superficie de los puntos calientes de SE en el Bosque de Agua no se encuentran bajo protección de ANP ni en áreas con PSA. En términos de superficie, para la zona de estudio la mayoría de las áreas con PSA se encuentran en superposición con ANP. La superposición de áreas con propósitos de conservación genera un efecto de “doble protección” o de “doble valoración”, en vez extender la superficie protegida del Bosque de Agua. Esta superposición entre ANP protegidas y áreas con PSA se explica debido a que la asignación de PSA en sus inicios en México fueron asignados de preferencia en ANP con bosques de carácter Federal, donde los objetivos eran de carácter social asistencial más que ecológicos (Ezzine-de-Blas et al. 2016). El 26% de la superficie de puntos calientes de SE no protegidos puede estar asociado a que no se entregan PSA actualmente en el Bosque de Agua en áreas agrícolas, solo en áreas forestales. Esto asociado a que no existe en México un instrumento de conservación de ecosistemas naturales o PSA integrador que permita conciliar las necesidades antrópicas de extracción de recursos naturales y conservación de SE (Galicia et al. 2018).

Actualmente, no hay elementos concretos para determinar la efectividad complementaria de las áreas con PSA en el Bosque de Agua para el mantenimiento de los ecosistémicas. Existe un gran número de áreas protegidas en el Bosque de Agua (79% del total de la superficie del Bosque de Agua), no obstante, hay una gran superficie de ANP y áreas con PSA en superposición y al mismo tiempo una vasta superficie de puntos calientes de SE no protegida 26% (68 051 ha). Bajo este escenario, si fuese expandido el PSA en áreas agrícolas, existiría un mayor número de puntos calientes de SE protegidos. Otras experiencias muestran la efectividad de los PSA en suelos agrícolas y su contribución en el mantenimiento de los SE como la conservación de suelos (Power 2010). Investigaciones locales evidencian que el PSA no logra ser un incentivo económico real efectivo para impedir la deforestación y fragmentación de ecosistemas naturales en áreas de bosques en México (Rojas-López et al. 2012). El mantenimiento de los SE en el Bosque de Agua es asegurado principalmente por las ANP's, en zonas forestales, no obstante, la población local de esta zona se beneficia de actividad agrícola de subsistencia e industrial; pero también de otros beneficios tales como actividades turísticas en zonas agrícolas y urbanas.

La complementariedad de las ANP y las áreas con PSA no es clara, ya que muchas de estas áreas se encuentran en superposición y por tanto no representan una estrategia efectiva de conservación incrementada por la interacción de ambos dispositivos. Para enfrentar los desafíos de conservación de áreas naturales donde existen actividades antrópicas, es necesaria una visión integradora que permita poner en valor los SE producidos por ciertas actividades como la agricultura. En el Bosque de Agua hay dos SE que cubren toda la superficie de estudio, regulación del clima local y provisión de agua. Los otros dos SE, provisión de madera y alimento agrícola, están circunscritos a los usos de suelos donde existe actividad forestal y agrícola. Por tanto, no es posible realizar análisis comparativos. No obstante, los resultados nos muestran una visión inédita de la provisión de SE y su distribución espacial en la zona periférica de una de las ciudades más grandes del mundo (Ciudad de México). Además, los SE como herramienta para definir las áreas prioritarias para la conservación de ecosistemas naturales contribuye en la toma

de decisiones, ordenación y gestión integral de los territorios. Variada es la gama de SE sin explorar que subyacen en el Bosque de Agua, ejemplo de ellos son los servicios producidos por los paisajes agrícolas tales como: retención de suelo, servicios culturales (recreación, belleza escénica y turismo), polinización, entre otros. Ampliar la investigación en la caracterización de estos tipos SE sería una potente ayuda para la planificación territorial de ANP.

Conclusiones

Esta investigación aporta elementos sobre la noción de SE como un marco que permite reforzar, complementar y visualizar la distribución de servicios ecosistémicos y conservación de estos en áreas naturales protegidas. Dentro de las ventajas de la modelización espacial se destaca su bajo costo de implementación y velocidad en comparación con la recolección de datos en campo. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos modelos representan una aproximación de la realidad y no deben considerarse como un reemplazo absoluto de la recopilación de datos sobre el terreno. A pesar de estas limitaciones intrínsecas a la modelización y al número reducido de SE medidos, este trabajo demuestra el potencial del mapeo de los SE. De este modo la modelización de los SE posibilita la identificación espacial de la distribución de las áreas con una mayor o menor presencia de SE. Este enfoque puede proporcionar contribuciones valiosas para orientar políticas e instrumentos relacionados con la conservación y compensación de los SE. Para enriquecer el análisis de los SE desde una perspectiva socio-ecológica en el Bosque de Agua, es recomendable que futuras investigaciones se adentren en el estudio de la percepción de los actores locales con respecto a estos SE en dicha área.

Contribución de los autores

Antonio Villanueva: Conceptualización, Metodología, Redacción - Software — Metodología Revisión y edición. Francesca Fagandini Ruiz: Redacción – borrador inicial. Leopoldo Galicia: Redacción - revisión y edición – Eugenio Figueroa B. Supervisión, Redacción – Revisión

Referencias

Almeida-Leñero, L., Revollo-Fernandez, D., Caro-Borrero, A., Figueroa, F., Espinosa, M.D., Cruz, G., Mazari-Hiriart, M. 2014. El Pago por Servicios Ambientales en México 2010: una evaluación multidisciplinaria. En: Perevotchkikova, M. (Coord.), *Pago por Servicios Ambientales en México. Un acercamiento para su estudio*, pp. 155-180. Colmex, México.

Antinori, C., Bray, D.B. 2005. Community forest enterprises as entrepreneurial Firms: Economic and institutional perspectives from Mexico. *World Development* 33: 1529-1543.

Bagstad, K.J., Semmens, D.J., Ancona, Z.H., Sherrouse, B.C. 2017. Evaluating alternative methods for biophysical and cultural ecosystem services hotspot mapping in natural resource planning. *Landscape Ecology* 32: 77-97.

Balvanera, P. 2012. Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales: *Ecosistemas* 21(1-2):136-147. Recuperado a partir de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/articulo/view/33>

Barnes, A., Sutherland, L.-A., Toma, L., Matthews, K., Thomson, S. 2016. The effect of the Common Agricultural Policy reforms on intentions towards food production: Evidence from livestock farmers. *Land Use Policy* 50: 548-558.

Barton Bray, D., Merino Pérez, L. 2004. *La experiencia de las comunidades forestales en México: veinticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología; Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, México.

Bergen, M. 2015. Connections and contradictions grow in Mexico's 'Water Forest' | Human Nature - Conservation International Blog. Disponible en: <http://blog.conservation.org/2015/06/connections-and-contradictions-grow-in-mexicos-water-forest/> [Accedido 24 de mayo de 2016].

Bhunia, G.S., Kesari, S., Chatterjee, N., Kumar, V., Das, P. 2013. Spatial and temporal variation and hotspot detection of kala-azar disease in Vaishali district (Bihar), India. *BMC Infectious Diseases* 13:64.

Bray, D.B. 2013. When the State Supplies the Commons: Origins, Changes, and Design of Mexico's Common Property Regime. *Journal of Latin American Geography* 12: 33-55.

Bray, D.B., Duran Medina, E., Merino Pérez, L., Torres Rojo, J.M., Velasquez Montes, A. 2007. *Nueva Evidencia: Los Bosques Comunitarios de México protegen el ambiente, disminuyen la pobreza y promueven la paz social*. Universidad Nacional Autónoma de México; CIIDIR Oaxaca-Instituto Politécnico Nacional; Universidad Internacional de Florida y Universidad de California-Berkeley.

Brenner, L. 2010. Gobernanza ambiental, actores sociales y conflictos en las Áreas Naturales Protegidas mexicanas. *Revista mexicana de sociología* 72: 283-310.

Budyko, M.I. 1974. *Climate and Life*. Academic Press, Orlando, EE.UU. 508 p.

Burkhard, B., Kroll, F., Nedkov, S., Müller, F. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *Ecological Indicators* 21: 17-29.

Carrera-Hernández, J.J., Gaskin, S.J. 2008. Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology* 353: 228-246.

Carter Berry, Z., Jones, K.W., Gomez Aguilar, L.R., Congalton, R.G., Holwerda, F., Kolka, R., Looker, N., et al. 2020. Evaluating ecosystem service trade-offs along a land-use intensification gradient in central Veracruz, Mexico. *Ecosystem Services* 45: 101181.

Cartus, O., Kelldorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., Fuentes, J. 2014. A National, Detailed Map of Forest Aboveground Carbon Stocks in Mexico. *Remote Sensing* 6: 5559-5588.

Challenger, J., Soberón, A. 2008. Los ecosistemas terrestres. En: Soberón, J., Halffter, G., Llorente-Bousquets, J. (Eds.), *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*, pp. 87-108. CONABIO, México.

Chape, S., Harrison, J., Spalding, M., Lysenko, I. 2005. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 360: 443-455.

CONAFOR. 2017. Compromiso por los servicios ambientales. *Comisión Nacional Forestal Blog*. [Accedido 13-10-2022]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conafor/articulos/compromiso-por-los-servicios-ambientales>

Conte, M., Nelson, E., Carney, K., Fissore, C., Olwero, N., Plantinga, A.J., Stanley, B., Ricketts, T.H. 2011. *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*, EconPapers. Disponible en: <https://EconPapers.repec.org/RePEc:oxp:obooks:9780199589005>

Corbera, E., Costedoat, S., Ezzine-de-Blas, D., Van Hecken, G. 2020. Troubled Encounters: Payments for Ecosystem Services in Chiapas, Mexico. *Development and Change* 51: 167-195.

Costedoat, S., Corbera, E., Ezzine-de-Blas, D., Honey-Rosés, J., Baylis, K., Castillo-Santiago, M.A. 2015. How Effective Are Biodiversity Conservation Payments in Mexico? Adam, P. (ed.), *PLOS ONE* 10: e0119881.

Daily, G.C. 1997. *Introduction: What are Ecosystem Services? Nature's Services: Societal dependence on natural Ecosystems*. Island Press. Gretchen C. Daily, Washington, DC. USA.

Davids, R., Rouget, M., Boon, R., Roberts, D. 2016. Identifying ecosystem service hotspots for environmental management in Durban, South Africa. *Bothalia* 46:2. <http://dx.doi.org/10.4102/abc.v46i2.2118>

Dudley, N. (Ed.). 2008. *Guidelines for applying protected area management categories*. IUCN, Gland, Suiza. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/pag-021.pdf>

Dudley, N., MacKinnon, K., Stolton, S. 2014. The role of protected areas in supplying ten critical ecosystem services in drylands: a review. *Biodiversity* 15: 178-184.

ECOBA. 2012. Estrategia Regional para la Conservación del Bosque de Agua.

Egoh, B., Rouget, M., Reyers, B., Knight, A.T., Cowling, R.M., van Jaarsveld, A.S., Welz, A. 2007. Integrating ecosystem services into conservation assessments: A review. *Sustainability and Cost-Benefit Analysis* 63: 714-721.

- Eigenbrod, F., Anderson, B.J., Armsworth, P.R., Heinemeyer, A., Jackson, S.F., Parnell, M., Thomas, C.D., et al. 2009. Ecosystem service benefits of contrasting conservation strategies in a human-dominated region. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276: 2903-2911.
- Ezzine-de-Blas, D., Wunder, S., Ruiz-Pérez, M., Moreno-Sánchez, R. del P. 2016. Global Patterns in the Implementation of Payments for Environmental Services. García-Gallego, A. (ed.). *PLOS ONE* 11: e0149847.
- Ferrer, L.M., Rodríguez, D.A., Forti, M.C., Carriello, F. 2021. The anthropocene landscape and ecosystem services in the closure of sand mining: Paraíba do Sul River basin – Brazil. *Resources Policy* 74: 102405.
- Galicia, L., Zarco-Arista, A.E. 2014. Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management* 10: 275-288.
- Galicia, L., Chávez-Vergara, B., Kolb, M., Jasso-Flores, I., Rodríguez-Bustos, L., Solís, E.L., Guerra de la Cruz, V., et al. 2018. Perspectivas del enfoque socio-ecológico en la conservación, aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques* 24(2):1443.
- Galicia, L., Potvin, C., Messier, C. 2015. Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1358-1368.
- García-Nieto, A.P., Quintas-Soriano, C., García-Llorente, M., Palomo, I., Montes, C., Martín-López, B. 2015. Collaborative mapping of ecosystem services: The role of stakeholders' profiles. *Best Practices for Mapping Ecosystem Services* 13: 141-152.
- Gasca Zamora, J. 2014. Gobernanza y gestión comunitaria de recursos naturales en la Sierra Norte de Oaxaca. *Región y sociedad* 26: 89-120.
- Gerez, P., Purata, S.E. 2008. *Guía Práctica Forestal de Silvicultura Comunitaria*. SEMARNAT/CONAFOR/CCMSS. México.
- Getis, A., Ord, J.K. 2010. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis* 24: 189-206.
- Goldenberg, R., Kalantari, Z., Cvetkovic, V., Mörtberg, U., Deal, B., Destouni, G. 2017. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. *Science of The Total Environment* 593-594: 599-609.
- Guerry, A.D., Polasky, S., Lubchenco, J., Chaplin-Kramer, R., Daily, G.C., Griffin, R., Ruckelshaus, M. et al. 2015. Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 7348-7355.
- Haines-Young, R., Potschin, M. 2011. *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): 2011 Update. Paper prepared for discussion at the expert meeting on ecosystem accounts organised by the UNSD, the EEA and the World Bank, London, December 2011*. No. EEA/BSS/07/007. Disponible en: https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2009/11/CICES_Update_Nov2011.pdf
- Hamel, P., Guswa, A.J. 2015. Corrigendum to «Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina» published in *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 839–853, 2015. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 855-855.
- Harris, N.L., Goldman, E., Gabris, C., Nordling, J., Minnemeyer, S., Stephen Ansari, Lippmann, M. et al. 2017. Using spatial statistics to identify emerging hot spots of forest loss. *Environmental Research Letters* 12: 024012.
- Hoth, J. 2014. *Urban Jungle: No Forest, No Water for Mexico City | Human Nature* - Conservation International Blog. Disponible en: <http://blog.conservation.org/2014/03/urban-jungle-no-forest-no-water-for-mexico-city/> [Accedido 24 de mayo de 2016].
- INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *INEGI*. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/> [Accedido 24 de mayo de 2016].
- Izquierdo-Tort, S. 2020. Payments for ecosystem services and conditional cash transfers in a policy mix: Microlevel interactions in Selva Lacandona, Mexico. *Environmental Policy and Governance* 30: 29-45.
- Jaramillo, V.J., Kauffman, J.B., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D.L., Ellingson, L.J. 2003. Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems* 6: 609-629.
- Kolb, M., Galicia, L. 2012. Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic: regional patterns and processes of deforestation and regeneration in southern Mexico: Challenging the linear forestation narrative in the Neo-tropic. *The Geographical Journal* 178: 147-161.
- Lebreton, C. 2015. *Gouvernance(s) sur un volcan. Controverses, arrangements et reconfigurations autour des instruments participatifs d'une aire naturelle protégée mexicaine (le Nevado de Toluca)*. École normale supérieure. Lyon, France.
- Lipper, L., Neves, B. 2011. Pagos por servicios ambientales: ¿qué papel ocupan en el desarrollo agrícola sostenible? *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* 228: 55-86.
- López-García, J., Navarro-Cerrillo, R.M. 2021. Changes in the constituents of the "Bosque de Agua" of the Sierra Cruces-Ajusco-Chichinutzin, Mexico, an area with payment for environmental services. *Environmental Earth Sciences* 80: 703.
- Matthews, E. (ed.). 2000. *Pilot analysis of global ecosystems: forest ecosystems*. World Resources Institute, Washington, DC., USA.
- MEA. 2005. *Ecosystems and human well-being: general synthesis: a report of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press, Washington, DC.
- Mendoza, G., Ennaanay, D., Conte, M., Tood Walter, M., Freyberg, D., Wolny, S., Hay, L., et al. 2011. Water supply as an ecosystem service for hydropower and irrigation. En *Natural capital: theory & practice of mapping ecosystem services*, pp. 365. New York, USA.
- Mendoza-Ponce, A., Galicia, L. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83: 497-506.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J.M., Braña, J. 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics* 65: 725-736.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 257: 427-434.
- Ordóñez, J.A.B., de Jong, B.H.J., García-Oliva, F., Aviña, F.L., Pérez, J.V., Guerrero, G., Martínez, R., et al. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255: 2074-2084.
- Padilla, B., Romero, F., Jaramillo, F., Guerrero, F., Barrios, R. 2008. The water forest of Mexico City. *International Journal of Wilderness* 14(2): 28-33.
- Palomo, I., Montes, C., Martín-López, B., González, J.A., García-Llorente, M., Alcorlo, P., Mora, M.R.G. 2014. Incorporating the Social-Ecological Approach in Protected Areas in the Anthropocene. *BioScience* 64: 181-191.
- Pearson, R.G. 2016. Reasons to Conserve Nature. *Trends in Ecology and Evolution* 31: 366-371.
- Perevochtchikova, M. 2016. *Estudio de los efectos del Programa de Pago por Servicios Ambientales experiencia en Ajusco, México*.
- Perez-Verdin, G., Sanjurjo-Rivera, E., Galicia, L., Hernandez-Diaz, J.C., Hernandez-Trejo, V., Marquez-Linares, M.A. 2016. Economic valuation of ecosystem services in Mexico: Current status and trends. *Ecosystem Services* 21: 6-19.
- Pesche, D., Méral, P. 2016. *Les services écosystémiques. Repenser les relations nature et société*. Editions Quae, Versailles, France.
- Power, A.G. 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365: 2959-2971.
- Rees Catalán, A.K. 2015. The Monarch Butterfly Biosphere Reserve: An exemplary participative approach? *Environmental Development* 16: 90-103.
- Rodríguez-Robayo, K.J., Perevochtchikova, M., Ávila-Foucat, S., 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.
- Rojas-López, O., González-Guillen, M. de J., Gómez- Guerrero, A., Romo-Lozano, J.L. 2012. Renta de la tierra y pago de servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales* 3: 41-56.
- Romero, A.M. 2013. Revisión bibliográfica. La biomasa de los cultivos en el agroecosistema. sus beneficios agroecológicos. *Cultivos Tropicales* 35: 11-20.

- Ruktanonchai, C.W., Pindolia, D.K., Striley, C.W., Odedina, F.T., Cottler, L.B. 2014. Utilizing spatial statistics to identify cancer hot spots: a surveillance strategy to inform community-engaged outreach efforts. *International Journal of Health Geographics* 13: 39.
- Spanò, M., Leronni, V., Laforteza, R., Gentile, F. 2017. Are ecosystem service hotspots located in protected areas? Results from a study in Southern Italy. *Environmental Science and Policy* 73: 52-60.
- Su, J.G., Apte, J.S., Lipsitt, J., Garcia-Gonzales, D.A., Beckerman, B.S., de Nazelle, A., Texcalac-Sangrador, J.L., et al. 2015. Populations potentially exposed to traffic-related air pollution in seven world cities. *Environment International* 78: 82-89.
- Tallis, H., Polasky, S. 2011. Assessing multiple ecosystem services: an integrated tool for the real world. En: Kareiva, P., Tallis, H., Ricketts, T.H., Daily, G.C., Polasky, S. (eds.), *Natural Capital*, pp. 34-50. Oxford University Press.
- Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Sharp, R., Nelson, E., Ennaanay, D., et al. 2013. *INVEST 2.5. 3 User's Guide. The natural capital project*. Stanford, Available at <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest/> [Accedido el 22 de Febrero de 2015].
- Tappeiner, U., Tasser, E., Leitinger, G., Cernusca, A., Tappeiner, G. 2008. Effects of Historical and Likely Future Scenarios of Land Use on Above- and Belowground Vegetation Carbon Stocks of an Alpine Valley. *Ecosystems* 11: 1383-1400.
- Timilsina, N., Escobedo, F.J., Cropper, W.P., Abd-Elrahman, A., Brandeis, T.J., Delphin, S., Lambert, S. 2013. A framework for identifying carbon hotspots and forest management drivers. *Journal of Environmental Management* 114: 293-302.
- Villanueva, A. 2018. *Services écosystémiques et paysage : Interactions dans un système socio-écologique à la périphérie de la Ville de Mexico*. Archive Ouverte d'INRAE, ID : 10670/1.7uvi2r.
- Villanueva, A., Imbernon, J. 2013. Réalité et contraintes d'un corridor biologique dans la zone central du Mexique. *Bois et Forêts des Tropiques* 67: 41-50.
- Wratten, S.D., Gillespie, M., Decourtye, A., Mader, E., Desneux, N. 2012. Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 159: 112-122.
- Zhang, L., Dawes, W.R., Walker, G.R. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* 37: 701-708.
- Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M. 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Special Section - Ecosystem Services and Agriculture* 64: 253-260.