



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA  
FORESTAL EN DOS COMUNIDADES BAJO PAGO  
POR SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS  
EN LA CUENCA DE MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**BIOLOGO**

**P R E S E N T A:**

**LEONARDO CALZADA PEÑA**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. LUCÍA ALMEIDA LEÑERO**

**2015**

**Ciudad Universitaria, D. F.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno  
Apellido paterno  
Apellido materno  
Nombre(s)  
Teléfono  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Carrera  
Número de cuenta

2. Datos del tutor  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

3. Datos del sinodal 1  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

4. Datos del sinodal 2  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

5. Datos del sinodal 3  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

6. Datos del sinodal 4  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

7. Datos del trabajo escrito.  
Título  
Subtítulo  
Número de páginas  
Año

1. Datos del alumno  
Calzada  
Peña  
Leonardo  
68 31 92 75  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Biología  
308024131

2. Datos del tutor  
Dra.  
Lucía Oralia  
Almeida  
Leñero

3. Datos del sinodal 1  
M. en C.  
Irene  
Pisanty  
Baruch

4. Datos del sinodal 2  
Dra  
María  
Perevochtchikova  
-

5. Datos del sinodal 3  
Dr.  
Víctor Daniel  
Ávila  
Akerberg

6. Datos del sinodal 4  
Dra.  
María Fernanda  
Figueroa  
Díaz Escobar

7. Datos del trabajo escrito  
Evaluación del cambio de cobertura forestal  
en dos comunidades bajo pago por servicios  
ambientales hidrológicos en la cuenca de  
México  
50 p  
2015

“La educación y el conocimiento no están al servicio de la individualidad, sino pensados para la colectividad, la persona al servicio del bien común.”<sup>[1]</sup>

---

1 Makarenko, A. S. (1996). *Poema pedagógico* (2° ed.). Madrid: Akal.

*Con cariño a mi familia*

*A Rosario*

---

## Table of Contents

<b>I.</b>	<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>III.</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>3</b>
1.	<b><i>Servicios Ecosistémicos</i></b> . . . . .	<b>3</b>
1.1	Servicios ambientales hidrológicos. . . . .	6
2.	El bosque como generador de servicios hidrológicos. . . . .	7
3.	El pago por servicios ambientales . . . . .	7
3.1	El pago por servicios ambientales hidrológicos . . . . .	10
4.	La evaluación ambiental del PSA . . . . .	11
<b>IV.</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>13</b>
1.	Evaluaciones nacionales . . . . .	14
2.	Estudios de caso del PSA. . . . .	18
<b>V.</b>	<b>Justificación</b>	<b>21</b>
<b>VI.</b>	<b>Método</b>	<b>21</b>
1.	Área de estudio . . . . .	21
1.1	Cuenca del río Magdalena (CRM), D. F. . . . .	22
1.2	Cuenca presa de Guadalupe (CPG), estado de México . . . . .	23
2.	Evaluación del PSAH en dos comunidades de la cuenca de México. . . . .	24
2.1	Monitoreo de las tendencias de actividad fotosintética de la vegetación . . . . .	25
2.2	Evaluación de cambios en cobertura forestal. . . . .	27
<b>VII.</b>	<b>Resultados</b>	<b>28</b>
1.	Variación inter-anual de la actividad en la vegetación . . . . .	28
2.	Estimación de la degradación . . . . .	30
3.	Cambio en cobertura forestal en las comunidades de estudio. . . . .	31
4.	Cambio de uso de suelo a escala de predio. . . . .	36
<b>VIII.</b>	<b>Discusión</b>	<b>37</b>
1.	Análisis a escala de cuenca. . . . .	38
2.	Análisis a escala de comunidad y predio . . . . .	41
3.	Discusión metodológica . . . . .	41
<b>IX.</b>	<b>Conclusión</b>	<b>43</b>
<b>X.</b>	<b>Literatura citada</b>	<b>44</b>
<b>XI.</b>	<b>Agradecimientos</b>	<b>50</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Clasificación de servicios ecosistémicos y algunos ejemplos. . . . .	5
<b>Figura 2</b>	Modelo de escala jerárquicas anidadas aplicado en la evaluación de cambios en cobertura forestal . . . . .	12
<b>Figura 3</b>	Localización del área de estudio . . . . .	22
<b>Figura 4</b>	Descripción del proceso metodológico. . . . .	25
<b>Figura 5</b>	Variación inter-anual del indicador sumNDVI con respecto al valor medio del periodo 2003-2013 a escala de cuenca. . . . .	29
<b>Figura 6</b>	Tendencia en los cambios anuales en el indicador sumNDVI para el periodo 2003- 2013 a escala de cuenca. . . . .	30
<b>Figura 7</b>	Degradación de la cobertura forestal a escala de cuenca dentro de la cuenca del río Magdalena. . . . .	32
<b>Figura 8</b>	Degradación de la cobertura forestal a escala de cuenca dentro de la cuenca presa de Guadalupe. . . . .	33
<b>Figura 9</b>	Cobertura forestal de la comunidad Magdalena Atlitlic (CRM) escala 1:50,000 . . . .	34
<b>Figura 10</b>	Cobertura forestal de la comunidad Santiago Tlazala (CPG) escala 1:50,000. . . . .	35

---

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Servicios ambientales más reconocidos internacionalmente en la aplicación de políticas y legislación. . . . .	5
<b>Tabla 2</b>	Clasificación de servicios hidrológicos. . . . .	6
<b>Tabla 3</b>	Evolución de programa de PSA en México, 2003-2010.. . . .	9
<b>Tabla 4</b>	Modalidades de PSA aplicadas en México. . . . .	10
<b>Tabla 5</b>	Imágenes de satélite más usadas en evaluaciones de cambio en cobertura forestal. . . .	13
<b>Tabla 6</b>	Características de las evaluaciones de impacto del PSA a escala nacional consideradas en este trabajo. . . . .	15
<b>Tabla 7</b>	Características de los estudios de caso considerados en este trabajo. . . . .	19
<b>Tabla 8</b>	Año de inicio, superficies inscritas y montos de los pagos totales y por hectárea en el programa de PSAH para las dos comunidades estudiadas dentro de la cuenca de México. . . . .	24
<b>Tabla 9</b>	Tasas de deforestación por periodo en el predio con PSAH y zonas sin él dentro de las comunidades de estudio. . . . .	36



## I. Resumen

El pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH), pretende complementar otras políticas enfocadas a la conservación en áreas con importancia hidrológica. Inicialmente en 2003 se fijó un indicador práctico para la evaluación de impacto ambiental, basado en el porcentaje de área con cobertura forestal. El presente estudio evaluó la aplicación del PSAH en dos comunidades de la cuenca de México, durante el periodo 2003-2014, en términos de degradación y pérdida de cobertura forestal en tres escalas diferentes: cuenca, comunidad y predio; esto bajo la premisa de la importancia que juega la heterogeneidad en las diferentes escalas espaciales para comprender los procesos de cambio y deterioro en la cobertura forestal. Para realizar la estimación en la degradación se empleó un análisis de seriado temporal del índice de vegetación normal diferenciado (NDVI) mediante compuestos de imágenes del satélite MODIS; para medir la pérdida de cobertura forestal se empleó un método de comparación en clasificaciones supervisadas en imágenes satelitales LANDSAT con una resolución de 15 m. Los resultados obtenidos para el análisis de pérdida en cobertura forestal a nivel comunidad indican que en un lapso de 11 años las superficies de bosque templado en las comunidades Magdalena Atlitic y Santiago Tlazala, perdieron 270 ha y 178 ha, correspondientes a las tasas de deforestación de 1.36% y 0.61% respectivamente. Por otra parte, se encontraron menores tasas de cambio en cobertura forestal en los predios bajo PSAH que en los que no cuentan con él. Finalmente la estimación en la degradación a nivel cuenca muestra zonas de bosque que la mayor parte de la degradación ocurre en las zonas bajas de las cuencas, mientras que las zonas altas presentan bosques con una degradación baja o nula en zonas donde no se aplica el pago por servicios ambientales.

## II. Introducción

La evaluación ambiental del programa del PSAH en México se ha abordado desde sus inicios, en 2003, como el monitoreo de cambio en cobertura forestal. Pese a los avances logrados por evaluaciones teóricas (Pagiola et al., 2005; Wunder, 2007; Muñoz-Piña et al., 2007) y prácticas (Alix-García et al., 2012; UNAM, 2012; Perevochtchikova y Vázquez, 2012) en cuestiones de integración de métodos y desarrollo de indicadores clave para las fases de selección de los sitios posibles para pago y monitoreo del efecto del PSAH, aún prevalece la necesidad de integrar la heterogeneidad ambiental en las evaluaciones (Alatorre-Troncoso, 2014; Alix-García et al., 2014; J. Alix-García et al., 2011; Scullion et al., 2011), mediante el uso de escalas espaciales anidadas distintas (Burnett y Blaschke, 2003; Wheatley y Johnson, 2009; Rocés-Díaz et al., 2015).

Las evaluaciones del cambio de cobertura forestal y su relación con el PSAH han expuesto tres tipos distintos de limitaciones ligadas a la heterogeneidad ambiental: 1) espacial, 2) temporal y 3) funcional. Cada una de éstas conforma entramados jerárquicos que los métodos uni-escalares no son capaces de visualizar (Wheatley y Johnson, 2009). A pesar de sus limitaciones, las evaluaciones dan bases para la formulación de un método que permite conjugar los niveles de detalle de una escala focal y la agregación de información de una escala regional (Alix-García et al., 2014; Scullion et al., 2011; Universidad Nacional Autónoma de México, 2012; Valdez-Lazalde et al., 2006).

Diversos autores han planteado el uso de escalas múltiples para la evaluación de instrumentos enfocados al uso de suelo o la cobertura de terreno (Burnett y Baschke, 2003, Hilker et al. 2009; Mialhe et al., 2015). Estos estudios plantean un puente teórico entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos que los explican. A partir de lo anterior se argumenta que lo importante no es la elección de la escala correcta para analizar los cambios, sino la integración de escalas.

En el PSAH la visión multi-escalar es importante, debido a que su evaluación se fundamenta en indicadores de cambios en la cobertura forestal, influidos a su vez por procesos que actúan de manera distinta tanto espacial como temporalmente (Carr et al., 2005; Rocés-Díaz et al., 2014). En la representación espacial, pueden reconocerse tres tipos de cambio en el terreno: los graduales, los abruptos y los estacionales. La pérdida de cobertura se puede abordar analizando intervalos largos de tiempo, empero, el fenómeno de la degradación de la cobertura forestal muchas veces está sujeta a cambios graduales y, más aún, a cambios estacionales (Jacquin, et al., 2010). Es posible medir estos

cambios graduales y estacionales a partir de indicadores fenológicos (Paruelo et al., 2004; Ayanu et al., 2012; Herrmann et al., 2014); sin embargo, estos estudios deben tener una escala tal que sea posible observar cambios estacionales y deben abarcar suficientes años como para detectar patrones, y así poder diferenciar los cambios estacionales normales de los eventos de degradación (Jacquin et al., 2010).

Alix-García et al. (2014) proponen que para mejorar la evaluación y el funcionamiento del PSAH deben contemplarse las zonas adyacentes a los sitios con pago. Esto permitirá evitar apoyos aislados a predios rodeados por zonas deforestadas. Esto último es particularmente relevante en zonas caracterizadas por minifundios, como las comunidades y ejidos de la zona centro-sur del País. Por otra parte, algunas evaluaciones estudian sólo los cambios en la cobertura forestal, es decir, la modificación en la superficie cubierta por bosque, tanto en sitios con PSAH como en sitios sin él (Alix-García et al., 2012); no obstante, complementar lo anterior con el uso de indicadores fenológicos facilita realizar otras mediciones como la fragmentación o los disturbios, además de que permite detectar la pérdida de masas forestales completas (Paruelo et al., 2004; Jacquin et al., 2010; Zhang et al., 2014).

Este estudio aborda el análisis de dos cuencas importantes en la provisión de SAH que han participado en el programa de PSAH. Se presenta un estudio multiescalar para el periodo 2003-2014 con base en tres enfoques: el estudio de los cambios en la cobertura forestal a escala de predio y (2) a escala de comunidad y, finalmente, (3) el análisis de las variaciones anuales de la fenología de la vegetación a escala de cuenca. A partir de estos tres elementos se plantean las bases para construir un método que permita describir los cambios en la cobertura y mapear la degradación en zonas con PSAH y sin él.

### **III. Marco teórico**

#### **1. Servicios Ecosistémicos**

En las últimas décadas, a partir de la influencia de círculos académicos y políticos internacionales, comenzó a considerarse el papel del ambiente en las agendas públicas nacionales, potenciado por el surgimiento del movimiento ambientalista (Durand, 2014). El debate público se centró en la degradación ambiental cuyas causas, se asumía, eran el incremento poblacional y la expansión urbana (Bifani, 2007). Actualmente, se considera que los procesos de degradación están influenciados por los patrones de producción y consumo en los que se utilizan bienes tangibles e intangibles, mediados a

su vez, por diversos factores políticos, socioeconómicos y ambientales (Carr, Suter, & Barbieri, 2005) Barbier, 2007(Bifani, 2007). Esto propició la adopción de estrategias que influyeran estos factores, tomando en cuenta la importancia de los bienes en la satisfacción de las necesidades humanas (Bifani, 2007). Parte de estas estrategias, fue la formulación de un concepto que encontrara un balance entre los objetivos de desarrollo y el funcionamiento de los ecosistemas, facilitando la vinculación entre la conservación de los bienes tangibles e intangibles y los modelos de desarrollo supeditados a la aplicación de políticas y modelos económicos, conocido como servicios ecosistémicos (SE; Bifani, 2007; Brown, Bergstrom, y Loomis, 2006; Groot, Wilson, y Boumans, 2002; Hansen et al., 2015)

El concepto de SE es relativamente reciente. Estos se definen como todos aquellos beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas {UN, 1992; Carpenter et al., 2006; Fig. 1}. Los primeros esbozos en círculos políticos internacionales de la importancia de los ecosistemas en la satisfacción de las necesidades humanas se dio con la declaración de Estocolmo (1972), a partir de la cual, los ecosistemas se convirtieron en un punto central al reconocer su vínculo con la sociedad (Westman, 1977); sin embargo, es hasta el año de 1992 en la cumbre de las Naciones Unidas (Rio de Janeiro) donde surge el concepto de SE y éstos comienzan a ser evaluados como elementos importantes en la economía de las naciones (Gómez-Baggethun, De Groot, Lomas, y Montes, 2010). Los que posteriormente desembocaría en la creación de diferentes instrumentos con objetivos de conservación y desarrollo económico, bajo el supuesto de que otorgar valores monetarios en relación a los beneficios obtenidos de los ecosistemas finalmente generará un balance entre aprovechamiento y conservación (Grasso et al., 1997; Costanza et al., 1998; Fisher et al., 2008; Schägner et al., 2013).

La diferencia entre los conceptos de servicios ambientales (SA) y SE no está establecido de forma clara y definitiva en términos académicos, ya que ambos se suelen utilizar indiscriminadamente en la literatura; sin embargo, el concepto de SE es el más extendido en la literatura ecológica y es un concepto que se centra en el funcionamiento de los ecosistemas, mientras que en el ámbito de la economía y política ambiental se utiliza en mayor medida el término SA (Mora et al., 2012; Derissen y Latacz-Lohmann, 2013; Perevochtchikova, 2015). En este trabajo se empleará el concepto de SA, por ser el más utilizado en el ámbito de las políticas públicas con fines de conservación aplicadas a nivel internacional (Daily, 1997; Nicholson et al., 2009; Tabla 1), así como Latinoamérica y México (Balvanera et al., 2012; Perevochtchikova y Oggioni, 2014).



**Figura 1:** Clasificación de servicios ecosistémicos y algunos ejemplos. Fuente: elaboración propia a partir de Carpenter et al. (2006).

**Tabla 1:** Servicios ambientales más reconocidos internacionalmente en la aplicación de políticas y legislación.

Tipo de servicio ambiental	Ejemplos
<b>Secuestro y almacenamiento de carbono</b>	Producción de oxígeno, modulación y regulación climática, captura de carbono
<b>Servicios ambientales hidrológicos</b>	Recarga de acuíferos, purificación de agua, amortización de riesgos por inundaciones
<b>Biodiversidad</b>	Protección de la biodiversidad y acervo genético
<b>Belleza escénica</b>	Recreación, belleza paisajística

Fuente: modificado de Wunder (2005).

## 1.1 Servicios ambientales hidrológicos

De acuerdo con Wunder (2005), uno de los SA más reconocidos, dada la relación entre la sociedad y los recursos hídricos, son los SA hidrológicos (SAH). Éstos son todos aquellos servicios relacionados con el ciclo hídrico y, en particular, con el agua dulce en los ecosistemas terrestres. Dentro de este grupo existen cinco SAH principales (tabla 2): recarga de mantos freáticos y usos consuntivos, abastecimiento de agua por escorrentía, mitigación de daños por agua, servicios culturales ligados con la provisión de agua y servicios de soporte relacionados con el ciclo hidrológico (Brauman et al., 2007).

**Tabla 2:** Clasificación de servicios hidrológicos.

Servicios hidrológicos	Ejemplos
<b>Abastecimiento para uso consuntivo</b>	Recurso hídrico para uso habitacional, comercial, agricultura y generación de energía.
<b>Abastecimiento por escorrentía (in situ)</b>	Uso habitacional, recreación y provisión de insumos relacionados con el agua.
<b>Mitigación de daños por agua</b>	Reducción del riesgo de inundaciones, filtración del agua, control de la erosión y sedimentación.
<b>Servicios culturales</b>	Valoración religiosa, educativa y turística.
<b>Soporte</b>	Estacionalidad de los flujos de agua, reciclaje de nutrientes.

Fuente: modificado de Brauman et al. (2007); Andréassian (2004), y Bonell y Bruijnzeel (2004).

Los SAH son considerados como servicios que se producen a escala de cuenca hidrológica (SEMARNAT, 2008), por tanto, los procesos y condiciones de todos los ecosistemas y sus componentes, que estén dentro de una cuenca afectarán directamente la generación de los SAH. Un componente central, que influye en la relación entre los ecosistemas y el agua es la vegetación, particularmente la cobertura forestal (Andréassian, 2004; Bonell y Bruijnzeel, 2004; Vorosmarty et al. 2005).

## 2. El bosque como generador de servicios hidrológicos

Existe una percepción general en la sociedad en torno a la relación entre los bosques, y la calidad y el suministro de agua; especialmente en los procesos de infiltración, retención y almacenamiento de agua en las cuencas (Bonell y Bruijnzeel, 2004; Balvanera, 2012). En la actualidad, se ha estudiado la generación de dichos SAH en diferentes ecosistemas y se ha comprobado que las escorrentías superficiales son significativamente menores en bosques a las observadas en otros tipos de cobertura de terreno, como pastizales o cultivos, con excepción del bosque mesófilo de montaña, donde los niveles de humedad y escorrentías son significativamente mayores (Aylward, 2002; Badoux, 2003; Calder, 2004); por otra parte, en los bosques jóvenes se presenta un mayor volumen de escorrentías que en bosques maduros. Además, tanto la calidad del agua, como su infiltración se incrementan significativamente en presencia de cobertura forestal. No obstante, la infiltración también depende de la precipitación y del tipo de suelo, además de la cobertura forestal, por lo que la suposición de una mayor infiltración producto solamente de la cobertura forestal debe ser tomada con cautela (Aylward, 2002; Calder, 2004).

En particular, los bosques templados son fundamentales para la provisión de SAH. López-Morales (2012) en una valoración realizada para el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en conjunto con la Estrategia de Conservación del Bosque de Agua (ECOBA, 2012) sostienen que las zonas más importantes para la recarga de acuíferos en áreas periurbanas, se encuentran bajo algún tipo de cobertura forestal, como bosques de oyamel (*Abies religiosa*), vegetación sub-alpina (*Pinus hartwegii*) o vegetación riparia, las cuales presentan balances hídricos positivos, muy por encima de la media de infiltración por zona (López-Morales, 2012). Este tipo de evaluaciones han permitido valorar la importancia de los bosques periurbanos para la provisión SAH relacionados a la cantidad y calidad de agua (Chiabai et al., 2012), lo que finalmente apoya la generación de esquemas de conservación enfocados a las masas forestales con coberturas vegetales densas.

## 3. El pago por servicios ambientales

El pago por servicios ambientales (PSA) surgió como un esquema de mercado que busca compensar por la provisión de servicios ambientales. El PSA se creó a partir del protocolo de Kyoto en 1998, junto con otras políticas públicas ambientales con una lógica de mercado en el marco de la economía neoliberal, con el fin de mitigar la pérdida los SA (conservación neoliberal; Durand, 2014).

El PSA presupone que los problemas de degradación ecosistémica son producto de una falla en los sistemas de mercado (externalidades). Así, actúa bajo la premisa de que, al igual que un mercado convencional, la interacción directa entre ofertantes y demandantes finalmente provocará que existan precios de equilibrio, lo que a su vez propiciará el uso óptimo y alternativo de zonas con importancia ecológica (Martínez, 2012; Perevochtchikova, 2014).

Según Wunder (2005) los esquemas de PSA son transacciones voluntarias en las que existe al menos un comprador y un vendedor de un SA bien definido, si y sólo si el proveedor asegura la provisión continua del servicio (condicionalidad) (Wunder, 2005; Wunder, 2007). Desde su aparición, el PSA ha sido considerado una oportunidad para impulsar un paradigma de conservación que asegure un vínculo entre los propietarios de la tierra donde se generan los servicios y actores externos, usuarios de los mismos a través de una relación mediada por el mercado. Es por esta razón, que el programa ha sido ampliamente aceptado por gobiernos de países con economías en desarrollo, donde se pretende que el PSA ayude a resolver el aparente antagonismo entre las actividades productivas y el funcionamiento de los ecosistemas (Barbier, 2007; Bifani, 2007; Martínez, 2012). La legislación mexicana referente al Programa Nacional Forestal, considera al PSA como un instrumento de conservación que entrega una retribución económica directa a quienes manejan, resguardan, conservan y mejoran los ecosistemas que brindan SA necesarios para el bienestar de las sociedades; además, el programa funciona como un esquema híbrido que combina mecanismos de mercado e inversión estatal, con pagos tanto a pequeña propiedad privada como a núcleos agrarios (Shapiro-Garza, 2013; DOE, 2014).

En México, en el año 2000 se crea el Plan Nacional Forestal. Este plan que otorgaba una mayor atención a los SA como un factor importante en el desarrollo económico. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) creada en el mismo año, abordó los objetivos de desarrollo y conservación mediante criterios que impulsaban la creación de empleos y la competitividad para la conformación de industrias con manejo forestal sustentable. Finalmente, en el año 2003, da inicio el PSA con la modalidad de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) con una superficie total de 126,800 ha (Tabla 3); gracias al apoyo brindado por el Banco Mundial y a la modificación a la Ley Federal de Derechos que planteaba la redirección de recursos provenientes del uso, aprovechamiento y explotación de aguas nacionales hacia el Fondo Forestal Mexicano (Ochoa, 2009; Perevochtchikova y Vázquez, 2012)

En 2004 se crean el pago por captura de carbono y biodiversidad (PSA-CABSA), con una superficie apoyada de 184,200 ha y, en 2005, surge el programa de pago por servicios ambientales

del bosque (PSAB), con una superficie apoyada de 169,100 ha (Tabla 3). En 2006, Pro-Árbol integra los programas de PSAH, biodiversidad y agroforestería. En la actualidad, todas las modalidades de pago se encuentran vigentes en el país, enmarcadas en el Programa Nacional Forestal (PRONAFOR; CONAFOR, 2009; Perevochtchikova, 2011).

**Tabla 3:** Evolución de programa de PSA en México, 2003-2010.

<b>Años</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>Total</b>
<b>Superficies incorporada (miles de ha)</b>	126.8	215	195	145	462	502	502	507	2 654.8
<b>Monto total (millones de pesos)</b>	192	387	310	231	1 060	981	1 096	1 112	2 101

Fuente: modificado de CONAFOR, 2010.

Los principales objetivos de los programas de PSA, de acuerdo con CONAFOR (2009) son : 1) impulsar la planeación y organización forestal, fomentando la conservación y restauración; 2) generar desarrollo y expansión económica a partir de la valoración, conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales; 3) disminuir los índices de pobreza en áreas forestales (Perevochtchikova, 2011). Dichos objetivos son atendidos mediante criterios de elegibilidad para cada programa de tres tipos: 1.-Técnicos: ubicación en acuíferos sobreexplotados, porcentaje de cobertura forestal; 2.- Sociales: ubicación en zonas con alto índice de marginación, presencia de población indígena, tierras bajo propiedad comunal; 3.- Ambientales: ubicación en áreas naturales protegidas (ANP) o con alto riesgo de deforestación (DOF, 2014; Tabla 4).

En su planteamiento original, el programa contemplaba cinco años de pago con un monto de 300 y 400 pesos mexicanos por ha, dependiendo del tipo de vegetación, e iban dirigidos a ejidos, comunidades y pequeños propietarios cuyas tierras se encontraran vinculadas al abastecimiento de agua hacia asentamientos de más de 5,000 habitantes y con al menos 80% de cobertura forestal; no obstante, estos criterios han cambiado a lo largo de los periodos de ejecución, siendo uno de los cambios más importantes la reducción en el porcentaje de superficie mínima requerida, el cual pasó de un 80% a un rango entre 50 y 70%, dependiendo el región (Perevochtchikova, 2011; Tabla 4). Además, el PSA planteaba la cooperación con otros programas ambientales, como el de empleo temporal, impulsados por CONANP (Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible, PROCODES; Martínez, 2012).

**Tabla 4:** Modalidades de PSA aplicadas en México.

<b>Programa</b>	<b>Superficies de pago máximas y mínimas (ha)</b>	<b>Criterios técnicos ambientales de ejecución</b>
<b>Pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH)</b>	200-2000	Cobertura forestal: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Región Norte-Centro: 50% de área mínima</li> <li>• Región Centro-Sur: 70% de área mínima</li> </ul> Criterios que elevan la elegibilidad: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicación de otros predios con PSA en la misma región</li> <li>• Ubicación del predio en acuíferos sobreexplotados</li> <li>• Predios con alta biomasa y baja degradación de suelo (por actividad antrópica)</li> <li>• Alta disponibilidad de agua superficial y posición en la cuenca</li> </ul>
<b>Pagos para la conservación de la biodiversidad y captura de carbono (PSA-CABSA)</b>	200-2000	Cobertura forestal: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecosistemas forestales en buen estado de conservación, no existe área mínima de cobertura</li> </ul> Criterios que elevan la elegibilidad: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cercanía a áreas de Conservación de Aves (sitios ACA)</li> <li>• Ubicación del predio dentro de regiones hidrológica o terrestre prioritaria (RHP y RTP)</li> <li>• Presencia de corredores biológicos</li> </ul>

En el PSAH la cobertura forestal es evaluada en porcentaje, para el PSA-CABSA se considera la presencia o ausencia sin existir un porcentaje de área mínimo. Las superficies máximas y mínimas para el apoyo son las indicadas para ejidos, comunidades o agrupaciones, de acuerdo con la última modificación a las reglas de operación (28/12/14). Fuente: elaboración propia a partir de las reglas de operación PRONAFOR 2015, componente V. Servicios Ambientales (DOF, 2014).

### 3.1 El pago por servicios ambientales hidrológicos

En México, el PSAH se estableció como un programa diseñado para complementar otras políticas enfocadas a la conservación en áreas con importancia hidrológica. El programa otorga incentivos económicos directos a los propietarios de parcelas ubicadas en cuencas con problemas graves de sobreexplotación y pérdida de la provisión de servicios, relacionada con la deforestación (Muñoz-Piña et al., 2007; Braña et al., 2008).

El objetivo específico del PSAH es pagar por el suministro de los SA que proporcionan los bosques primarios; se pretende la conservación de los bosques como actividad económica, a partir de apoyos enfocados en cubrir la utilidad que le generaría al propietario utilizar su tierra en actividades alternativas, como la agropecuaria, industrial o urbana, a esto se le conoce como costo de oportunidad (INECC, 2002). El monto corresponde a la diferencia entre el costo de oportunidad y los ingresos que generarían en la siembra de maíz (Ochoa, 2009). En México, las reglas de operación del programa establecen que el PSAH concede apoyos económicos, en contratos de cinco años y con posibilidad de renovación, a los propietarios (individuales o sociales) de terrenos con cobertura forestal primaria. En 2003, se fijó un indicador práctico para la selección de predios con base en el porcentaje de área con cobertura forestal. En la actualidad los participantes pueden inscribir la totalidad o parte de la propiedad, en la cual deben mantener la cobertura forestal existente; esto se verifica mediante evaluaciones de terreno realizadas por CONAFOR, a partir de visitas a los sitios o el análisis de imágenes satelitales (Braña et al., 2008; Shapiro-Garza, 2013).

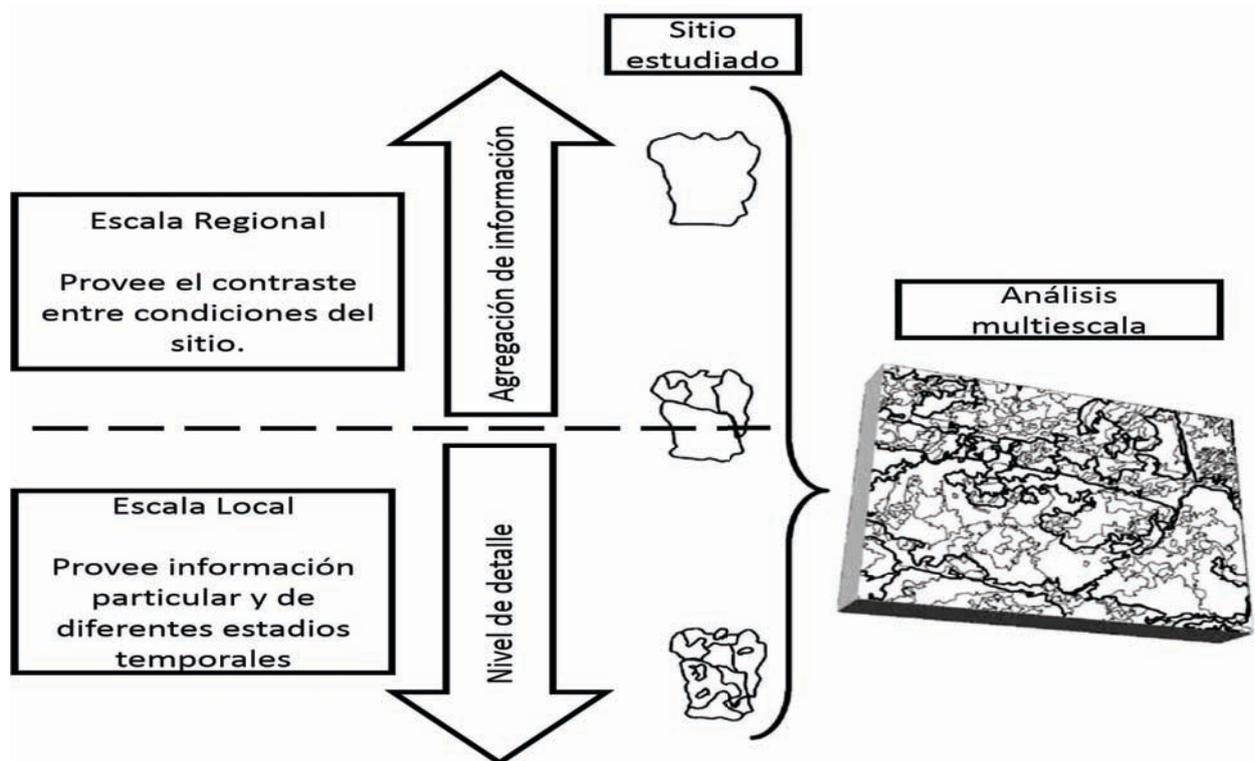
#### **4. La evaluación ambiental del PSA**

Uno de los mecanismos de evaluación del PSA es el seguimiento de los cambios periódicos en la cobertura forestal. La intención de dichas evaluaciones es describir el cambio en la cobertura forestal, permitiendo así, una mayor comprensión de los procesos que influyen positiva o negativamente en los cambios de cobertura, como las actividades humanas, el contexto cultural, la incidencia de otras políticas públicas, los componentes físicos del entorno, la sucesión ecológica y la regeneración natural, entre otros. Para monitorear los cambios en la cobertura vegetal se realiza una comparación espacial y temporal del uso del suelo.

Uno de los prerequisites al desarrollar monitoreo de cambio en cobertura de terreno es la comprensión de la estructura y funcionamiento del sistema ecológico que se está estudiando, ya que los cambios en la cobertura no suceden de manera lineal en términos espaciales y temporales, es decir, no actúan de la misma manera a una escala local o regional, o en periodos cortos o prolongados de tiempo; a esto se le conoce como heterogeneidad espacial y temporal (Torahi y Rai, 2011; Von Thaden, 2012). Los patrones de cambio en cobertura de terreno tienen como unidad básica de análisis los parches; los cuales pueden ser definidos como zonas arbitrarias de análisis interrelacionadas a diferentes escalas. Algunos análisis de cambio en cobertura vegetal se han llevado a cabo desde el enfoque de la

multiescala, estos estudios analizan un conjunto de parches a manera de mosaico, con diferentes escalas espaciales y temporales (Burnett y Blaschke, 2003).

El enfoque metodológico de escalas múltiples para el análisis de cambio de mosaicos de parches, provee una excelente oportunidad para hacer explícito el impacto sobre los cambios en la cobertura vegetal de políticas enfocadas a la conservación de la cobertura forestal como el PSA, esto se puede lograr gracias a la integración de escalas jerárquicas donde se observe el efecto de la políticas a diferentes escalas como la local y la regional , y la relación funcional que existe entre éstas escalas (Burnett y Blaschke, 2003; Fig. 2). En las últimas décadas los estudios con escalas múltiples han sido impulsados por los avances de la percepción remota (Klein et al., 2004). En ésta técnica se obtiene información desde una fuente lejana a partir de las interacciones entre sensores y el espectro electromagnético además de brindar una serie de opciones cada una con características enfocadas tanto a la parte espacial como a la temporal (Campbell y Wynne, 2002; Virk y King, 2006; Röder et al., 2008; Tabla 5).



**Figura 2:** Modelo de escala jerárquicas anidadas aplicado en la evaluación de cambios en cobertura forestal. Fuente: modificado de Burnett y Blaschke (2003).

**Tabla 5:** Imágenes de satélite más usadas en evaluaciones de cambio en cobertura forestal.

Plataforma	Sensor	Resolución (pixel)	Tiempo de revista	Costo
LANDSAT 7/8	Infrarrojo térmico	30 m (900 m <sup>2</sup> )	16 días	Gratuito/ Disponibles en red
	Visible/infrarrojo	60 m (3 600 m <sup>2</sup> )		
	PAN	15 m (225 m <sup>2</sup> )		
SPOT 6/7	PAN	1.5 ( 2.25 m <sup>2</sup> )	7 días	72 pesos / km <sup>2</sup> / adquisición bajo convenio
	Visible/ infrarrojo	6 m (400m <sup>2</sup> )		
Terra / Aqua	Modis	250 m (60 ha)	12 horas	Gratuito/ Disponibles en red

Fuente: elaboración propia a partir de <http://www.geo-airbusds.com/es/884-spot-6-y-spot-7>; [http://landsat.usgs.gov/band\\_designations\\_landsat\\_satellites.php](http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php); [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table)

#### IV. Antecedentes

Como cualquier otra política pública, el desempeño del PSA es evaluado en diferentes aspectos como el ambiental y socioeconómico. En el caso del impacto ambiental se utilizan indicadores para la selección de sitios y la evaluación, entre otros (Guevara, 2011; Perevochtchikova y Vázquez, 2012). Considerando esto, es importante realizar una revisión crítica de algunas de las evaluaciones, para entender los efectos del PSA en el ambiente para su retroalimentación (Perevochtchikova, 2014).

Recientemente se ha generado un crecimiento importante en el número de publicaciones enfocadas a la evaluación del PSA desde diferentes perspectivas que incluyen, tanto la socioeconómica como ambiental. En México, el PSA es un programa de carácter federal, por lo que está sujeto a permanentes evaluaciones de desempeño. Se han realizado en total, 19 evaluaciones oficiales y 25 estudios de caso en todo el territorio nacional así como 4 evaluaciones complementarias (Martínez, 2012). El desempeño del PSA se ha evaluado de manera regular, y varias evaluaciones incorporan criterios socioeconómicos y de política pública, además de los ambientales que usualmente se centran en la cobertura forestal y su dinámica. Por ejemplo, Pagiola et al. (2005) realizó un análisis del PSA como política con efectos en la mitigación de la pobreza, tomando como caso de estudio a países latinoamericanos, incluyendo a México, en los primeros años de aplicación del programa. Muñoz-Piña et al. (2007), por su parte, realizó un estudio sobre los criterios ambientales de selección en el PSAH, entre 2003 y 2005.

A continuación se presenta una revisión de algunas de las evaluaciones del desempeño ambientales del PSA. En total se analizan cuatro evaluaciones, dos realizadas a nivel nacional y dos estudios de caso con una perspectiva local. El análisis se centra únicamente en la dimensión ambiental y, dentro de ésta, los estudios relacionados con la cobertura forestal, tanto en las fases de selección como en la aplicación. Se toman en cuenta los métodos aplicados, así como las diferentes recomendaciones propuestas en cada uno de los análisis.

En primer lugar se presenta el análisis de las evaluaciones realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2012) y Alix-García et al. (2014). Ambas se realizaron a escala nacional; la primera examina el desempeño del PSA en 2010 en todas sus modalidades; la segunda se centra en el PSAH entre los años 2003 y 2010. En segundo lugar se abordan dos estudios de caso, solamente para el programa de PSAH; por un lado se considera el realizado por Valdez-Lazalde et al. (2006) que comprende los años 2003 y 2004, mientras que el de Scullion et al. (2011) examina el periodo de 1997 a 2009. Los estudios se seleccionaron con el objeto de contrastar los métodos utilizados y sus cualidades en el contexto de la evaluación en dos aspectos 1) Temporal. Las evaluaciones de Alix-García et al. (2011) y Scullion et al. (2011) consideran largos periodos, mientras que las de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México, 2012) y Valdez-Lazalde et al. {2006} se enfocan en procesos de corto plazo. 2) Espacial. Dos de las evaluaciones se hicieron a escala nacional e incluyen diferentes tipos de vegetación, mientras que los estudios de caso analizan áreas reducidas con un solo tipo de vegetación.

## **1. Evaluaciones nacionales**

Las dos evaluaciones a escala nacional analizadas incluyeron diferentes tipos de vegetación, dentro de los que destacan el bosque templado, la selva baja caducifolia, la selva alta perennifolia, el bosque mesófilo de montaña y el matorral xerófilo; cada una sujeta a dinámicas de cambio de uso de suelo distintas, lo que otorga una perspectiva más completa del funcionamiento del PSA (Tabla 6). Un elemento metodológico central en las evaluaciones nacionales es el uso de la percepción remota como una herramienta que presenta ventajas, como la capacidad de obtener información de manera regular, la posibilidad de realizar un análisis sistemático de los procesos y causas de la deforestación para la evaluación y, en especial, la capacidad de este método para el monitoreo de extensas regiones forestales, en las que resulta imposible realizar un muestreo completo. Pese a que ambos estudios comparten estos rasgos, existe una clara diferencia en el método, que se refleja en los resultados que cada una aporta y en las recomendaciones finales de estos estudios para mejorar el seguimiento de la cobertura forestal y su

**Tabla 6:** Características de las evaluaciones de impacto del PSA a escala nacional consideradas en este trabajo.

Autores	Evaluación	Enfoque	Método de evaluación	Resultados	Principales consideraciones
U N A M 2012	PSA-CABSA y PSAH	Análisis de cambio de uso de suelo en el año 2010	-Clasificaciones de terreno en imágenes SPOT y RADAR.  -76 predios de análisis en todo el país bajo PSA (PSAH -CABSA).  -Análisis de porcentaje de cobertura forestal con densitómetros esféricos y análisis de textura en las imágenes.	Existen diferencias importantes en las tasas de deforestación entre distintas zonas del país. Las más altas se dan en la región centro- sur.	Existe la necesidad de evaluar los cambios de cobertura en el predio previo a la aplicación del programa o compararlos con predios no sujetos a PSA.  Los estudios de cambio en cobertura forestal deben realizarse en periodos largos de tiempo.
Alix-García et al. 2014	PSAH 2003-2010	Comparativo a nivel parcela y puntos de muestreo, entre zonas con pago, zonas sin pago.	-Método comparativo a través de promedios anuales de NDVI de imágenes satélites MODIS.  -Puntos de muestreo a lo largo de todas las zonas con PSAH  -Comparación entre los valores de NDVI y datos climáticos asociados a cambios en los patrones fenológicos.	Las tasas de deforestación estimadas son mayores en predios ejidos que en propiedad privada  El riesgo de deforestación está asociado con factores como cercanía a poblados y pendientes menores.	Importancia de la heterogeneidad espacial y su importancia en la deforestación.  Existe una necesidad de emplear datos remotos con mayor resolución espacial en conjunción con datos fenológicos de MODIS.

Fuente: elaboración propia a partir de Alix-García et al. (2014) y UNAM (2012).

relación con el programa. Alix-García et al. (2014) realizan una evaluación con datos de alta resolución temporal (seriado anual de imágenes periodo 2003-2010) y baja resolución espacial (imágenes modis, resolución 60 ha), mientras que la evaluación realizada por UNAM (2012) es el caso contrario, con una alta resolución espacial (imágenes radar y spot, resolución 25 m) y una baja resolución temporal (solo un año de análisis).

Alix-García et al. (2014) abordan el efecto ambiental de la aplicación del PSAH desde el punto de vista fenológico. Analizan series de datos anuales en los que relacionan bajos índices de actividad fotosintética (obtenida con cocientes de difracción) con dos factores: el primero son los cambios climáticos y, el segundo, eventos de degradación o deforestación. Los resultados muestran que las tasas de deforestación son mayores en zonas sin PSA. Además, sostienen que los predios de propiedad social (ejidos y comunidades) muestran signos de deforestación o degradación mayores a los predios de propiedad privada adscritos al programa. Una posible razón para explicar este patrón es la extensión de los predios por tipo de propiedad: en su mayoría, los predios de propiedad social son más pequeños y dependen de un mayor número de personas, en comparación con los de propiedad privada, por lo que se protegen áreas con una extensión menor.

Entre las recomendaciones finales Alix-García et al. (2014) se menciona la necesidad de emplear imágenes de satélite de una mayor resolución espacial para complementar los estudios fenológicos, además sería necesario localizar espacialmente los puntos exactos donde se registraron eventos de pérdida y degradación de la cobertura forestal. Así mismo, reiteran la necesidad de considerar otros factores como causas de deforestación, como las características físicas y geográficas, dada la heterogeneidad y complejidad a la que está sujeto el PSA (Alix-García et al., 2014). Con la intención de complementar esta evaluación se desarrolló la evaluación de un equipo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2012), que comprende únicamente en un año de ejecución (2010).

La metodología empleada por la UNAM (2012) se enfoca en utilizar una alta resolución espacial, mediante composiciones pancromáticas y multi-espectrales de imágenes SPOT, con un pixel final de 2.50 metros; adicionalmente se sometieron las imágenes a una corrección de relieve y se complementaron los datos no disponibles por nubosidad con el uso de imágenes de RADAR y levantamientos de campo. Este estudio reportó importantes diferencias en las tasas de deforestación entre distintas zonas del país. Las mayores se registraron en la zona centro-sur, caracterizada por la abundancia de propiedades sociales; en comparación con la zona centro-norte, caracterizada por una

mayor proporción de propiedad privada, donde las tasas son menores. Esto puede estar relacionado con que en la segunda se paga por mayores extensiones de terreno, que asegura a su vez la conservación de unidades o masas forestales con mayor extensión, contrario a lo que sucede en el sureste del país.

Entre las recomendaciones finales del estudio de la (UNAM, 2012), se menciona que los estudios de cobertura deben aplicarse durante periodos de tiempo largos, para comprender mejor la dinámica de cambio en la cobertura y sus posibles causas. Además, hacen especial hincapié en la necesidad de realizar un monitoreo que contemple los cambios en la cobertura forestal antes y después de la aplicación del programa para poder comparar.

Las dos evaluaciones reportan que el riesgo de deforestación, además de estar sujeto al tipo de propiedad de la tierra y aplicación del programa, depende de factores geográficos como la pendiente, ya que los predios con pendientes menores son los más propensos a la deforestación porque son más aptos para desarrollar actividades agropecuarias. También es importante la cercanía a poblados, pues los más cercanos a los asentamientos humanos muestran una mayor deforestación. Finalmente consideran factores sociales, como los índices de marginación, pues donde éstos son más altos existen tasas de pérdida de cobertura más aceleradas.

En resumen, los análisis a escala nacional del PSA enfrentan retos en el análisis y limitaciones en las técnicas y datos empleados. Los métodos por su parte, presentan cada uno ventajas y desventajas en cuanto a sus alcances para generar resultados con mayor resolución temporal y espacial. Finalmente cada estudio expone una serie de consideraciones finales para el desarrollo y aplicación de un método de evaluación que integre datos de mediana o alta resolución espacial, que evite la sobre o subestimación de las tasas de deforestación, que considere datos topográficos y sociales, así como una evaluación pre y post-aplicación del PSA, es decir, estudios que comprendan un seriado temporal amplio.

En la siguiente sección se presentan los dos estudios de caso, que otorgan una perspectiva diferente en cuanto a la evaluación de impacto del programa de PSA. Los estudios de caso son aplicados a regiones específicas del país, pero comparten similitudes en metodológicas, resultados y recomendaciones con las evaluaciones nacionales.

## 2. Estudios de caso del PSA.

Desde la implementación del PSA se han realizado numerosos estudios de caso para conocer el impacto local del programa, los casos presentados aquí consideran únicamente el PSAH (Tabla 7). Los autores de ambos estudios proponen ajustes en la aplicación de métodos de diagnóstico y monitoreo. Ambos estudios poseen, tanto métodos como objetivos distintos: Valdez-Lazalde et al. (2006) comparan las estimaciones de deforestación entre imágenes de satélite con diferente resolución espacial, mientras que Scullion et al. (2011) evalúan una misma zona sujeta a PSAH y contemplan el análisis de un periodo previo a la ejecución del programa.

Cabe resaltar que ambos estudios se llevaron a cabo en sitios con una baja diversidad de comunidades vegetales. En el caso de Valdez-Lazalde et al. (2006) se trata de un ejido con una sola comunidad vegetal, compuesta casi en su totalidad por masas forestales puras, es decir, conformadas en su mayoría por una sola especie. Por su parte, Scullion et al. (2011) analizan una región más amplia, en la que se presentan únicamente dos comunidades vegetales, una de ellas (bosque de niebla o bosque mesófilo) es icónica por su alta diversidad específica y por su importancia en la provisión de servicios hidrológicos.

En el estudio realizado en el ejido de San Rafael, municipio de Tlahuacapan, Puebla, Valdez-Lazalde et al. (2006) comparan diferentes métodos con el fin de calificar la eficiencia en el monitoreo del cambio de cobertura forestal entre diferentes tipos de imágenes satelitales de mediana y alta resolución espacial. El análisis sugiere que de tratarse de predios con áreas extensas y varios tipos de vegetación, la aplicación de un monitoreo con imágenes de mediana resolución espacial, como LANDSAT, arroja buenos resultados, al permitir estimaciones similares a las obtenidas con datos de campo; no obstante, si se trata de predios con áreas pequeñas y masas forestales puras, las imágenes de mediana resolución espacial tienden a sobreestimar el porcentaje de cobertura forestal, por lo que es recomendable emplear imágenes de mayor resolución espacial como Ikonos, QuickBird o Geoeye.

Las recomendaciones realizadas para la evaluación del programa de PSAH en el ejido de San Rafael son la necesidad del uso de imágenes de alta resolución espacial, bajo las condiciones descritas en el párrafo anterior. Además es necesario considerar que el uso de dichas imágenes implica mayores conocimientos técnicos y costos. Finalmente, proponen la conformación de un modelo que incluya indicadores técnicos, ambientales y socioeconómicos.

**Tabla 7:** Características de los estudios de caso considerados en este trabajo.

Autores	Evaluación	Enfoque	Método De evaluación	Resultados	Principales consideraciones
Valdez-Lazalde et al. 2006	PSAH 2003-2004	Análisis de cambio en cobertura forestal comparativo entre imágenes de media y alta resolución.	-Clasificaciones de terreno con imágenes de mediana (SPOT y LANDSAT) y alta resolución (Ikonos y QuickBird-2)  -comparación de datos remotos contra datos tomados en campo.  -estimación de la cobertura forestal a partir de métodos de razón y regresión con datos de copas y área basal.	El análisis realizado mostró que las imágenes de alta resolución son más adecuadas para determinar el porcentaje de cobertura forestal que la imágenes de mediana resolución, aunque no debe considerarse fundamental en predios con masas forestales diferentes	La comparación entre imágenes indica que las imágenes de alta resolución son más adecuadas técnicamente para determinar el porcentaje de cobertura, aunque es más costoso y complicado.  Es necesaria la comparación entre elementos técnicos y socioeconómicos.
Scullion et al. 2011	PSAH 1997-2009	Observacional, pre- y post-aplicación del programa, conjunción de datos remotos y entrevistas de percepción social.	-Método mixto que combinan un análisis de series temporales de teledetección con imágenes LANDSAT y entrevistas de campo sobre percepción de impacto y cambio de cobertura forestal.	Las tasas de deforestación estimadas son mayores en predios sin historial de pago  Los análisis de seriado temporal muestran que pese a la disminución el PSAH no evitaron la pérdida neta del bosque.  Las entrevistas muestran que la conservación puede verse explicada por la acción de otros programas, más que la del mismo PSAH.	Es necesaria la aplicación de un monitoreo mixto más robusto, además de la inclusión de programas de conservación sinérgicos en la planeación y desarrollo del PSAH.

Fuente: elaboración propia a partir de Scullion et al. (2011) y Valdez-Lazalde et al. (2006).

Por otra parte, en el municipio de Coatepec, Veracruz, se aplicó un método de seguimiento con series temporales anuales y con dos importantes novedades, 1) el seriado de tiempo contempla 6 años previos a la aplicación del PSAH y 6 años de operación; 2) se conjuntan datos técnicos de teledetección y entrevistas sobre la percepción social del funcionamiento del programa. Los autores encuentran diferencias en las tasas de deforestación entre predios con PSAH y sin él; las mayores tasas se registraron en estos últimos. Los autores coinciden con las recomendaciones dadas por la evaluación nacional de UNAM (2012) y el estudio de caso de Valdez-Lazalde et al. (2006) al exponer la necesidad de dar seguimiento de largo plazo a estos cambios, incluyendo un periodo de análisis previo a la aplicación del programa, y la importancia de conjuntar un análisis de cambio de uso de suelo con la percepción social del programa (Scullion et al. 2011).

A partir de las ventajas y limitaciones de los métodos analizados aquí, en este trabajo de investigación se plantean las siguientes preguntas: 1) ¿El PSA es efectivo para reducir las tasas de deforestación? y 2) ¿se puede desarrollar un método que evalúe la efectividad del PSA y que subsane las limitaciones para representar la heterogeneidad espacial y temporal? A partir de estas preguntas se plantea el siguiente objetivo general:

Evaluar el efecto del PSAH en los cambios en la cobertura forestal en las cuencas del río Magdalena y presa de Guadalupe, mediante la integración de la heterogeneidad espacial y temporal, incorporando tres escalas espaciales anidadas.

Los objetivos particulares de este trabajo son:

- 1) Evaluar los cambios en la cobertura forestal a escala de cuenca en ambas zonas de estudio
- 2) Evaluar los cambios en la cobertura forestal a escala de comunidad en ambas zonas de estudio
- 3) Evaluar los cambios en la cobertura forestal a escala de predio, comparando aquellos que participan en PSAH y los que no lo hacen, en ambas zonas de estudio.

## **V. Justificación**

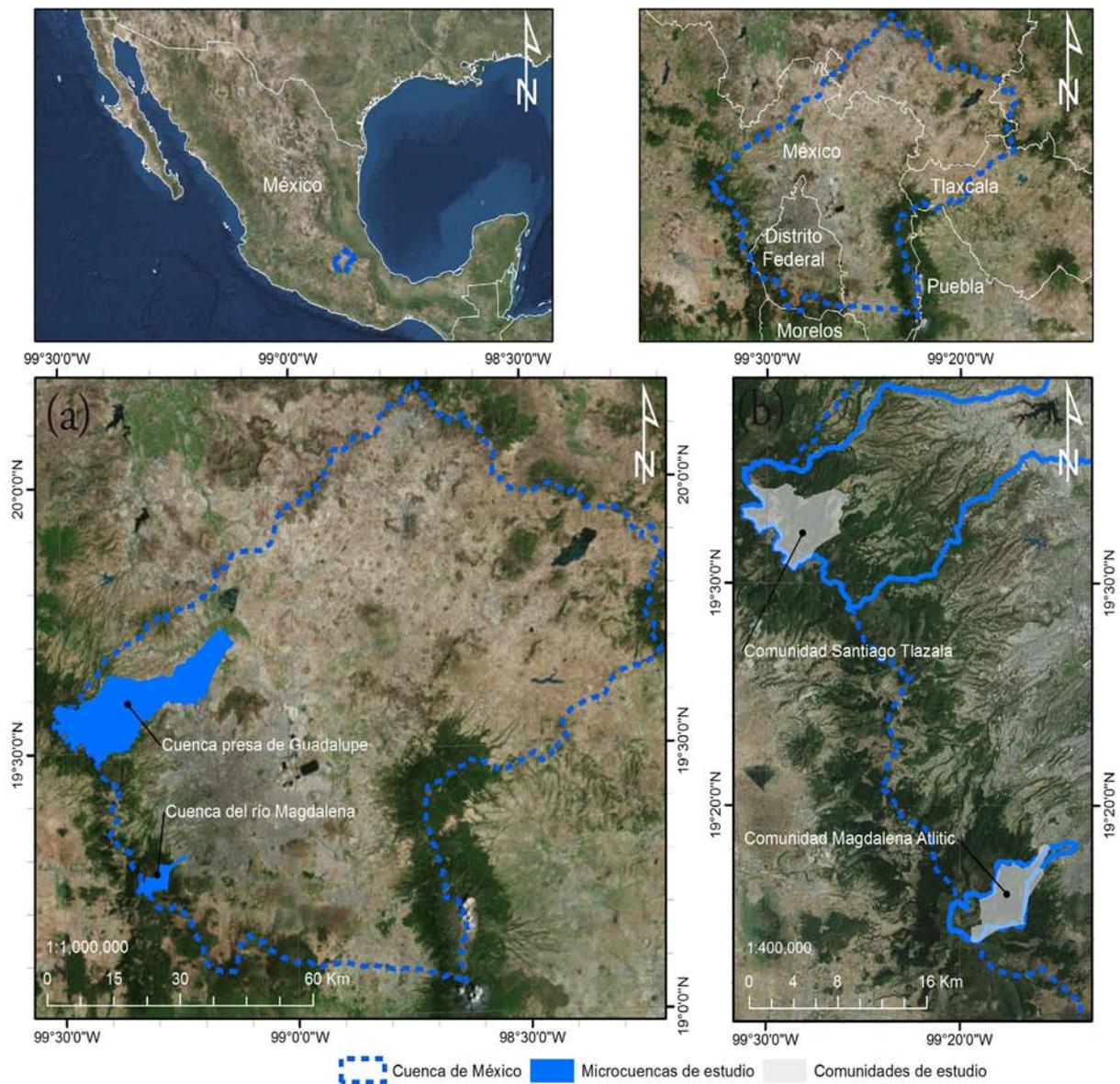
Las cuencas del río Magdalena y presa Guadalupe son parte del sistema de microcuencas que conforman la cuenca de México; ambas son parte importante del suelo forestal periurbano del centro del país, el cual alberga a más de 20 millones de habitantes (INEGI, 2010). Además de su importancia social y cultural, estas cuencas suman, en conjunto, más de 18 000 ha de áreas boscosas, las cuales están íntimamente relacionadas con la generación de SA, como regulación microclimática (precipitación, temperatura, humedad), la producción de oxígeno, la captura de carbono, la retención de suelo y, en particular, la provisión de servicios hidrológicos, como la recarga de acuíferos. Estas cuencas se encuentran bajo distintas presiones que pueden mermar la generación de bienes y servicios ambientales que proveen, lo que las convierte en centros de atención para la conservación.

El PSAH es un instrumento que se aplica en ambas cuencas con objetivos de conservación, por lo que es importante analizarlo a través de indicadores que muestren su impacto. Se han realizado evaluaciones de la cobertura forestal tanto a nivel nacional como local (Martínez, 2012). La dinámica de cambio en la cobertura forestal se usa como el indicador para estimar el impacto del PSAH. No obstante existen retos metodológicos debido a la heterogeneidad ambiental. Por ello, la utilización de un método que integre las distintas aportaciones de enfoques locales y regionales, desde una visión multi-escalar, puede ayudar a integrar dicha heterogeneidad ambiental.

## **VI. Método**

### **1. Área de estudio**

La cuenca de México se ubica en la región hidrológica no.26 (Pánuco), alberga alrededor de 15 millones de habitantes, con tan sólo 960,000 ha de extensión, lo que la convierte en la cuenca más poblada del país (Maderey y Jiménez, 2000; Santos et al., 2009). Dentro de ella se localizan la cuenca del río Magdalena y la cuenca presa de Guadalupe (Fig. 3).



**Figura 3:** Localización de (a) las microcuencas de estudio dentro de la cuenca de México y (b) de las comunidades Santiago Tlazala y Magdalena Atlitic dentro de la microcuencas de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de Núcleos agrarios (INEGI, 2007) y Red hidrográfica nacional, escala 1:50,000 (INEGI, 2012b).

### 1.1 Cuenca del río Magdalena (CRM), D. F.

La cuenca del río Magdalena (CRM) con 3,520.6 ha, se encuentra ubicada al SO del Distrito Federal (Cantoral Uriza, s/f) y presentan un rango altitudinal de entre 2,470 y 3,850 m snm. Los tipos climáticos registrados son: frío subhúmedo E(T)HC (w2) en los puntos más altos, semifrío

subhúmedo Cb'(w2)(w)(i')g en las zonas altas y medias, y templado subhúmedo C'(W1) (w)b(i')g en las bajas. El periodo con la mayor precipitación mensual, con 250 mm, es el mes de julio (Dobler, 2010).

La CRM posee tres de los cuatro tipos de bosques templados más importantes y representativos del país. En 2010, los bosques conservados cubrían una superficie de 1,997.6 ha, donde aproximadamente 70% de los individuos arbóreos son jóvenes y están distribuidos en un gradiente altitudinal con *Q. laurina* y *Q. rugosa* en las zonas más bajas, seguidos por *Abies religiosa* y, en las partes altas, *Pinus hartwegii*, asociados con zonas de pastizales en las zonas más altas (Ávila-Akerberg, 2010). La CRM forma parte del denominado Suelo de Conservación del Distrito Federal (SC) el cual es considerado como una zona con alta importancia ecológica debido a su alta diversidad biológica y a la generación de SA relacionados con la cobertura forestal, misma que ha ido disminuyendo en las últimas décadas debido, principalmente, a procesos de urbanización como los asentamientos irregulares, siendo los últimos 15 años el periodo más crítico (Aguilar, 2009).

La comunidad Magdalena Atlitic se ubica en su totalidad dentro de la CRM. Esta comunidad ha participado en el PSAH desde 2003. En la tabla 8 se muestra la superficie inscrita en el PSAH durante ese periodo, el monto total pagado y el pago asignado por hectárea.

## 1.2 Cuenca presa de Guadalupe (CPG), estado de México

La cuenca presa de Guadalupe (CPG), con un área total de 29,097.1 ha, está ubicada en el estado de México, al NO de la ciudad de México y presentan un rango altitudinal de entre 2,200 y 3,850 m snm. Los tipos climáticos son el templado subhúmedo C'(W1) (w)b(i')g y semifrío subhúmedo Cb'(w2)(w)(i')g en las zonas medias y altas, respectivamente. La temperatura media anual es de 15.1°C. El promedio de precipitación pluvial es de 680.1 mm (Morlán, 2012).

La CPG incluye en su territorio dos áreas naturales protegidas: el Parque Estatal Otomí Mexica y el Santuario del Agua y Forestal Presa Guadalupe, que protegen una superficie total de 11,859.8 ha y están ubicadas en la parte alta y baja de la cuenca respectivamente. Los bosques conservados cubren una superficie de 16,759 ha que representan 57.6% de la superficie. La CPG presenta las asociaciones vegetales de *Q. laurina* y *Q. rugosa* en las partes bajas, *A. religiosa* en la parte media, y de *P. hartwegii* y pastizales en las zonas más altas (Morlán, 2012). La CPG forma parte de la periferia de la zona

metropolitana norte considerada como una de las zonas boscosas más importantes para la provisión de SAH dentro de la zona metropolitana de la ciudad de México. La CPG al igual que muchas zonas periurbanas está sujeta a procesos de urbanización, no obstante, algo característico de esta área es que el proceso de transformación entre zonas con cobertura forestal y zonas urbanas no se debe a crecimiento propio de sus centros tradicionales, sino es derivado de la migración del Distrito Federal, y de la captura de habitantes que migran del resto del país (Santos et al. 2009).

La comunidad Santiago Tlazala se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la CPG. Esta comunidad ha participado en el PSAH desde el 2007. En la tabla 8 se muestran la superficie incluida el programa, el monto total y el pago por hectárea, para el ejercicio fiscal 2007.

**Tabla 8:** Año de inicio, superficies inscritas y montos de los pagos totales y por hectárea en el programa de PSAH para las dos comunidades estudiadas dentro de la cuenca de México.

Nombre	Año de inicio en el programa	Hectáreas con PSAH	Pago anual (USD)*	Pago por hectárea/año (USD)*
Magdalena Atlitic	2003	1,363	\$31,590	\$23
Santiago Tlazala	2007	1,570	\$46,915.	\$29

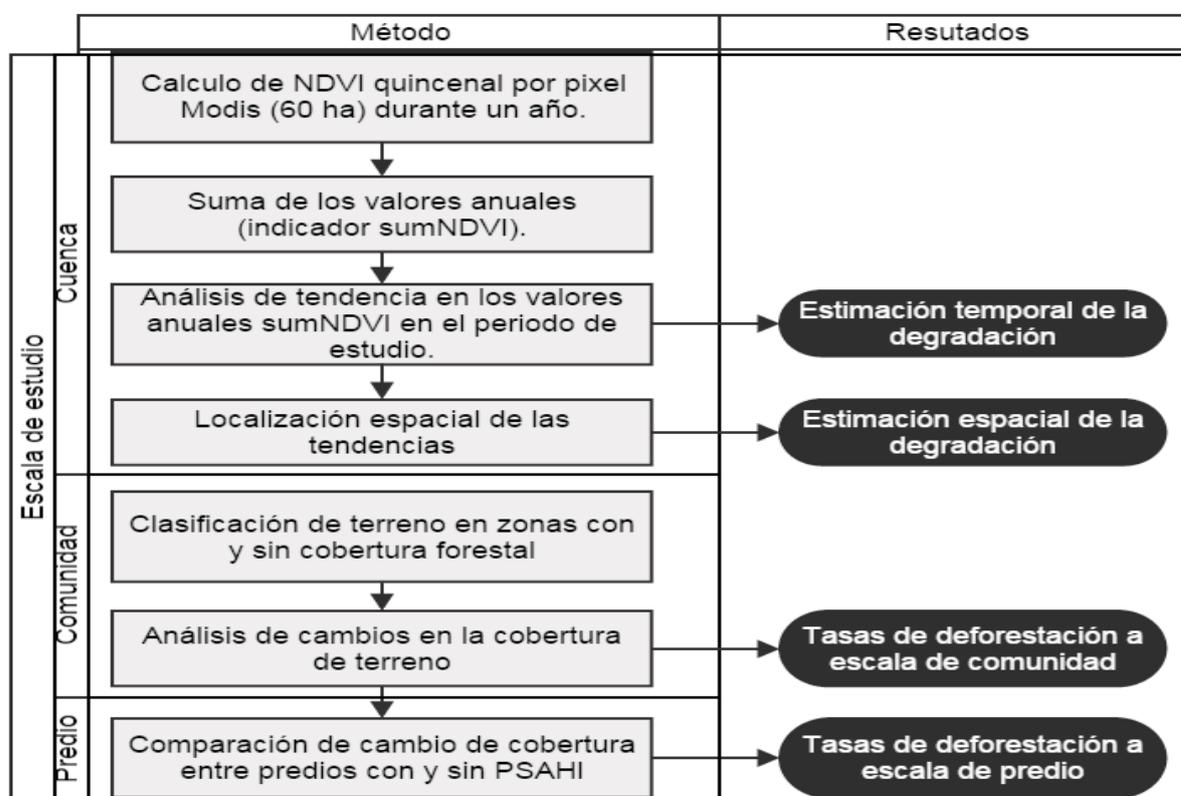
\*El valor de divisa es el dado por el tipo de cambio promedio para el año 2010. Fuente: elaboración propia a partir de CONAFOR (2009).

## 2. Evaluación del PSAH en dos comunidades de la cuenca de México.

Para estimar los cambios en la cobertura forestal y la degradación se delimitaron tres escalas de estudio diferentes (Fig. 3): cuenca, comunidad y predio con PSAH. Los datos de referencia incluyen: 1) Los polígonos de los predios bajo el esquema de PSAH, de la CONAFOR; 2) Clasificación de uso de suelo y vegetación serie V 1:100000, de INEGI (2012a); 3) Polígonos de territorio de bienes comunales de Santiago Tlazala y Magdalena Atlitic (INEGI, 2007), y 4) Polígonos de las cuencas CPG y CRM (INEGI, 2012b). Para las escalas de predio y comunidad se evaluó el cambio en la cobertura forestal a partir de imágenes LANDSAT de los años 2003, 2007, 2010 y 2014, mientras que para realizar una estimación de la degradación a escala de cuenca se utilizaron imágenes MODIS quincenales en el periodo 2003-2013.

## 2.1 Monitoreo de las tendencias de actividad fotosintética de la vegetación

A escala de cuenca se monitoreó el cambio fenológico de la cobertura forestal, a través de un análisis de seriado temporal del índice de vegetación normal diferenciado (NDVI), el cual responde a las diferencias de espectro reflejado por las plantas como producto de los cambios en actividad fotosintética o por la pérdida o ganancia de follaje (Paruelo et al., 2004). Los datos se obtuvieron a partir de un compuesto de imágenes satelitales Modis producto 1Q5A. Éste proporciona, cada 16 días, una medición promedio del NDVI, se obtuvieron en total 23 imágenes para los años 2003 a 2012 y un total de 21 para el año 2013. De estas imágenes se seleccionaron 2,301 píxeles de cobertura forestal para ambas cuencas. Se consideraron sólo aquellos píxeles que no mostraron cambios totales a otra clase de terreno a través del tiempo, para eliminar condiciones de borde o falsos estimados. Los píxeles se eligieron a partir de la capa de uso de suelo y vegetación de INEGI serie V escala 1:100,000. El análisis comprendió: 1) la caracterización de los cambios intra-anales de la vegetación mediante indicadores basados en valores de NDVI y 2) la estimación de la degradación por medio de métodos de correlación lineal de las tendencias de actividad anual de la vegetación (Fig 4).



**Figura 4:** Descripción del proceso metodológico. (Izq.) Escalas en las que se aplican cada uno de los análisis, desde la escala focal hasta la escala supra focal e infra focal. (Der.) Análisis y el tipo de resultados obtenidos.

### 2.1.1 Indicadores fenológicos a partir de valores de NDVI

Se realizó un análisis de tendencia para los valores de NDVI en el periodo 2003-2013 en ambas cuencas de estudio. Esta tendencia se estimó a partir de los valores de un indicador anual de NDVI para cada uno de los 2,301 píxeles, conocido como sumNDVI (eq1). Este indicador es la media acumulada durante la fase de crecimiento activo de la vegetación (valores máximos y mínimos anuales), definida gracias a la relación establecida entre NDVI estacional y parámetros fenológicos vinculados a los valores del NDVI (actividad fotosintética). La pendiente positiva o negativa en una regresión lineal en cada uno de los años determina una mayor o menor actividad fotosintética.

Para cada una de las cuencas se analizaron las fluctuaciones inter anuales del indicador sumNDVI, mediante la comparación del indicador anual y la media de todo el periodo, con lo que es posible establecer una estimación temporal de eventos de disturbio que afecten el NDVI (Tucker et al., 1991).

$$\text{sumNDVI} = \sum_{\text{mínimo NDVI}}^{\text{máximo NDVI}} \text{valores NDVI (cada 16 días)}$$

**Ecuación1:** Indicador sumNDVI anual

**Ecuación2:**

### 2.1.2 Estimación de la degradación

Para estimar la degradación se realizó un análisis de tendencias de actividad en la vegetación para cada píxel durante el periodo 2003-2013. Se realizó un cálculo de perfil de NDVI (eq 2) a partir de los valores de pendiente en la regresión lineal, tomando al tiempo como una variable independiente y los valores de NDVI en cada píxel como variable dependiente. Con base en el indicador de perfil de NDVI se calcularon las tendencias de cambio en la cobertura forestal. Una pendiente de 0 refleja cambios en la vegetación sujeta a dinámicas estables, es decir, cambios fenológicos estacionales normales, mientras que una pendiente significativamente mayor a 0, es atribuida a un aumento en la actividad fotosintética de la cobertura forestal; finalmente, una pendiente menor a 0, refleja la degradación de la cobertura forestal.

$$\text{Perfil de NDVI} = \frac{(n)(\sum_{i=1}^n i * NDVI_i) - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n NDVI_i)}{n * \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

Donde:

Perfil= pendiente en una regresión lineal

NDVI= el promedio anual de valores de NDVI en un año

n= acumulado de años

**Ecuación3:** Cálculo de pendiente o perfil de NDVI.

## **2.2 Evaluación de cambios en cobertura forestal**

Se realizó un análisis de cambio en la cobertura forestal a nivel de comunidad y predio para cada uno de los sitios de estudio en el periodo de 2003 a 2014, mediante imágenes LANDSAT 7 y 8 de la temporada con menor precipitación para cada uno de los años.

### **2.2.1 Preprocesamiento.**

Tras la obtención de las imágenes satelitales LANDSAT, se realizó una ortocorrección, debido a las características topográficas del terreno (Giles, 2001). La ortocorrección se realizó conforme al procedimiento propuesto por Chaplin y Bradyn (2003), mediante la eliminación de sombras por la selección de valores de NDVI por debajo del rango conocido en las áreas sin sombras, sin emplear una corrección topográfica. Adicionalmente, se llevó a cabo un proceso de refinamiento en la resolución espacial mediante la fusión de la imagen multispectral (pixel de 60m\*60m) y la imagen pancromática (pixel de 12m\*12m en LANDSAT 7 y 8m\*8m en LANDSAT 8) conforme al procedimiento de Campbell y Wynne (2011).

### **2.2.2 Análisis de datos**

Con el fin de asignar una clasificación de uso de suelo a cada una de las imágenes a partir de áreas de entrenamiento, se llevó a cabo una clasificación supervisada mediante el algoritmo de máxima verosimilitud (Chaplin y Bradyn, 2013), para lo que se seleccionaron puntos con píxeles que presentaron una firma espectral pura, es decir, que tuvieran un solo tipo de cobertura de terreno; estos puntos sirvieron como “verdad terrestre” (sensu Lobo et al., 2010). Las áreas de entrenamiento identificadas en imágenes SPOT evaluadas mediante el índice de Jeffrey-Matusita para comprobar su separabilidad, muestran las siguientes clases: con vegetación forestal y sin vegetación forestal. Finalmente, se realizó la clasificación supervisada en las imágenes utilizando estos archivos de firma (Chaplin y Bradyn, 2013; UNAM 2012). Para la validación de la clasificación se usaron como datos auxiliares puntos seleccionados al azar en las imágenes LANDSAT, en los que se corroboró su correcta clasificación con uso de la imagen SPOT y datos de campo. El trabajo de campo consistió en registrar cuadrantes seleccionados de 128 m<sup>2</sup> que presentaran la misma clase de terreno que la imagen (McCoy, 2005).

### 2.2.3 Modelo de cambio de cobertura forestal

Para el análisis de cambios en la cobertura forestal a nivel de predio y comunidad se realizó una comparación temporal de las imágenes. Para evaluar el impacto del PSAH a nivel de predio se analizó el cambio de cobertura forestal dentro y fuera de los predios participantes (UNAM, 2012), mientras que a escala de comunidad se analizó el cambio de todo el territorio. La evaluación de cambio se realizó usando uno de los indicadores empleados por la FAO (Montenegro et al. 2003; eq 3):

$$dn = \left[ \frac{A_1}{A_2} \right]^{1/(t_2 - t_1)} - 1$$

Donde:  
 dn= tasa de cambio en cobertura  
 A2= cobertura al final del periodo  
 A1= cobertura al inicio del periodo  
 t1: año de inicio del período  
 t2: año final del período

**Ecuación 4:** Cálculo de tasas de deforestación.

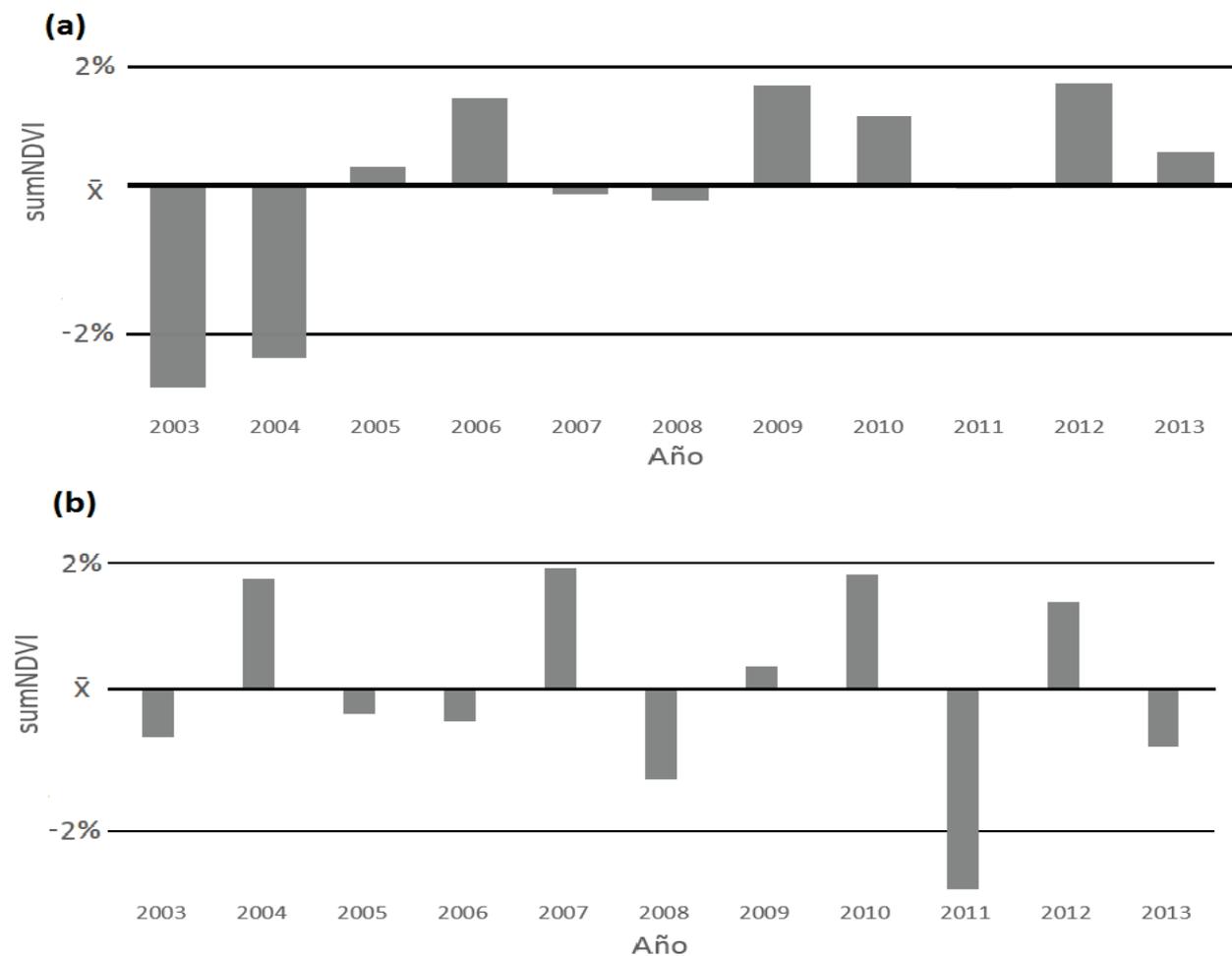
## VII. Resultados

### 1. Variación inter-anual de la actividad en la vegetación

El análisis de la variación inter-anual del indicador sum-NDVI a escala de cuenca muestra fluctuaciones constantes a lo largo de todo el periodo. En el caso de la CRM (Fig. 5a), entre los años 2005 y 2013 se observa una estabilidad global, con valores que se distribuyen dentro de un rango de -2% y 2% con respecto a la media, por lo que los cambios pueden estar relacionados a una variación fenológica normal, con cambios relacionados a la temporalidad o factores climáticos (Jacquin, 2009). Adicionalmente, en la mayoría de los años se presentan valores por encima de la media lo que está ligado a una actividad fotosintética alta en la vegetación.

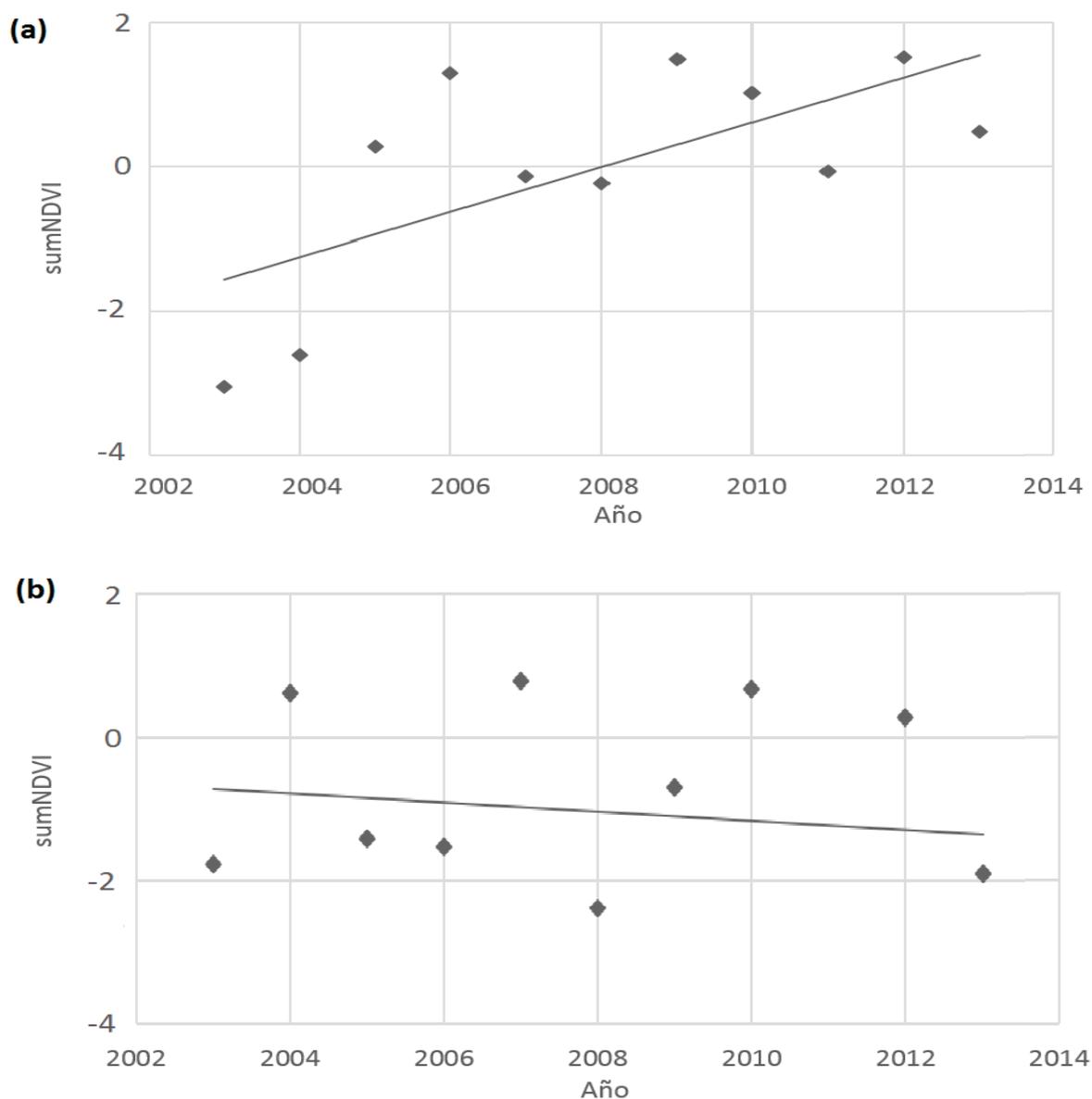
Los píxeles analizados para la CPG (Fig. 5b) presentan variaciones constantes en el indicador sumNDVI, aunque en su mayoría no sobrepasan los límites de 2% y -2%. Se observa un aumento importante en la actividad de la vegetación en el 2007, año en el cual comienza el PSAH, no obstante, éste se aplica a una fracción del área total de la cuenca, por lo que la dinámica puede atribuirse, además, a otros factores. En lo que concierne a valores por debajo de la media, destaca el calculado en el año 2011, siendo este valor la reducción más importante y el único que sobrepasa el límite inferior del rango de 2%,-2%.

Las estimaciones sobre las tendencias de cambio del índice de vegetación anual en el periodo de estudio para ambas cuencas, a partir de las variaciones inter-anales del indicador sumNDVI, muestran pendientes opuestas. En el caso de la CRM (Fig. 6a) la tendencia de cambio en el NDVI indica un aumento en los valores hacia los últimos años, es decir, que la cobertura forestal en esta cuenca incrementó su actividad hacia el final del periodo de estudio. En cambio, la CPG (Fig. 6b) presenta una tendencia decreciente en el indicador suma de NDVI, lo que indica que la cobertura forestal en esta zona disminuyó su actividad durante el periodo de estudio.



**Figura 5:** Variación inter-anual del indicador sumNDVI con respecto al valor medio del periodo 2003-2013 dentro de (a) la Cuenca del Río Magdalena y (b) la Cuenca presa de Guadalupe.

En general, en la CRM se observa que más del 50% de los años la cobertura presenta una dinámica positiva, lo que concuerda con la tendencia general calculada. Por otra parte, en la CPG más de la mitad de los años presentan valores negativos en el indicador sumNDVI, lo que se traduce en una dinámica negativa en su cobertura forestal, aunque cercana a cero.



**Figura 6:** Tendencia en los cambios anuales en el indicador sumNDVI para el periodo 2003-2013 a nivel de cuenca. Los valores mostrados en el eje de las ordenadas corresponden a los cuantiles 2% y 4% tanto positiva como negativamente considerando a la media como 0. Tendencia de cambio en sumNDVI para todos los píxeles con cobertura forestal dentro de (a) la Cuenca del Río Magdalena y (b) la Cuenca presa de Guadalupe.

## 2. Estimación de la degradación

Las tendencias de NDVI obtenidas a partir de la pendiente de la regresión lineal (perfil de NDVI) para cada una de las dos cuencas fueron divididas en 5 clases: 1) degradación severa ( $< -0.006$ ), 2) degradación moderada ( $-0.002$  a  $-0.006$ ), 3) degradación leve ( $-0.002$  a  $0$ ), 4) leve mejoría ( $0$  a  $0.003$ ) y 5) alta mejoría ( $> 0.003$ ).

En el caso de la CRM (Fig. 7) es notable una amplia zona con signos de mejoría moderada en la vegetación, relacionada con la tendencia positiva en la actividad de la vegetación, en la que destaca la región alta de la cuenca. Por otra parte la zona centro-oeste muestra un área con valores de degradación leve y finalmente la región baja de la cuenca está asociada con valores de degradación moderada y severa. Es posible relacionar pixeles con signos de degradación y años con valores reducidos en el indicador sumNDVI, por lo cual en el caso de la CRM los pixeles con degradación severa y moderada están ligados a años con valores por debajo de la media. En lo que respecta a la zona con PSAH, el análisis de degradación a una escala de cuenca muestra bosques con signos de degradación leve.

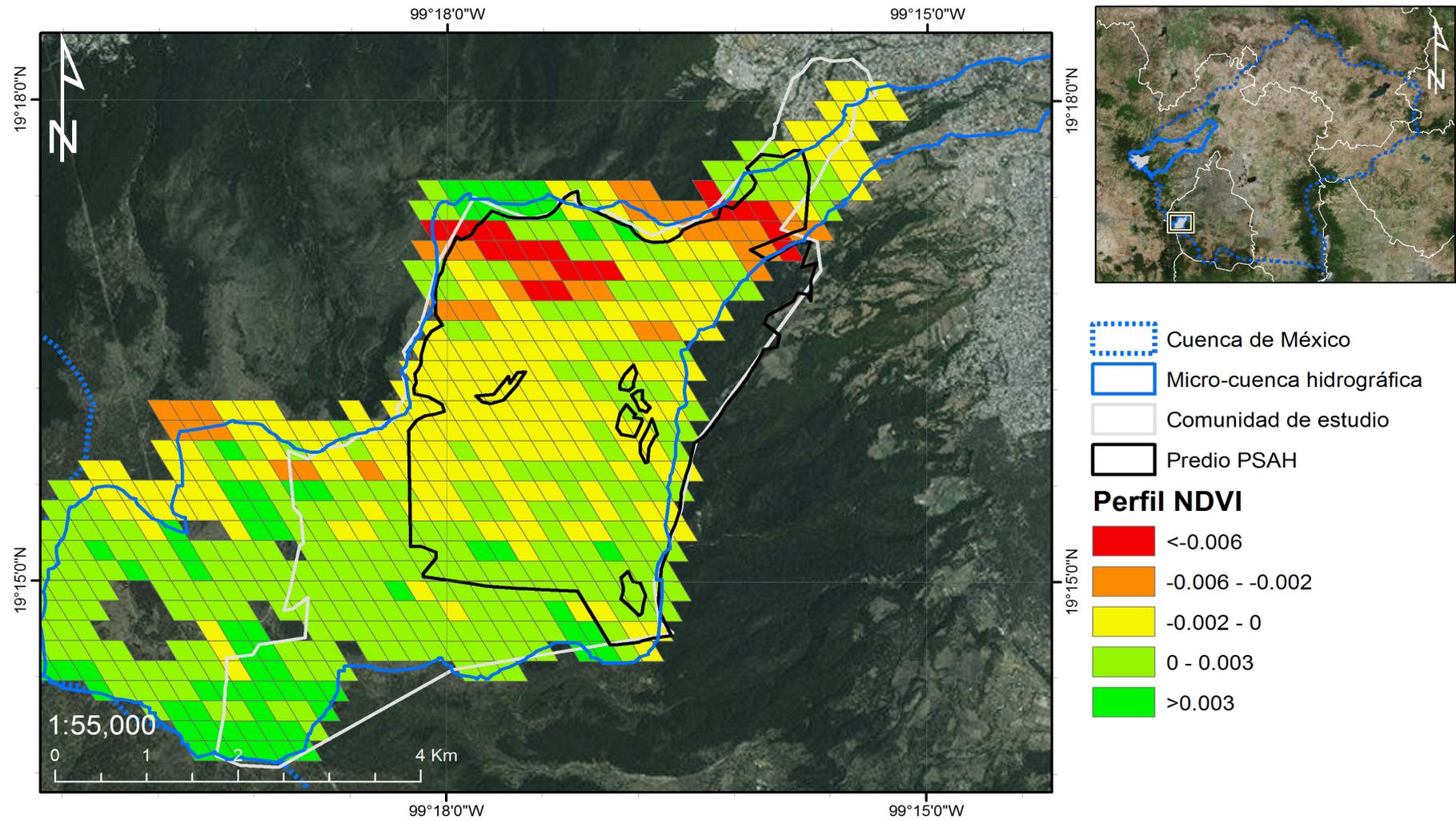
En el caso de la CPG (Fig. 8) el mapeo de la degradación presenta una amplia variación, con signos de degradación moderada y severa en la parte baja noreste de la cuenca, al igual que una franja que corre de este a oeste en la latitud  $19^{\circ}32'0''$  N con las mismas características. En lo que respecta a la zona con PSAH, el análisis de degradación a una escala de cuenca muestra bosques con signos de degradación moderada y severa. En un panorama general, la CPG presenta extensas áreas con signos de degradación moderada y severa, con una dinámica negativa en la actividad de la cobertura forestal.

### **3. Cambio en cobertura forestal en las comunidades de estudio.**

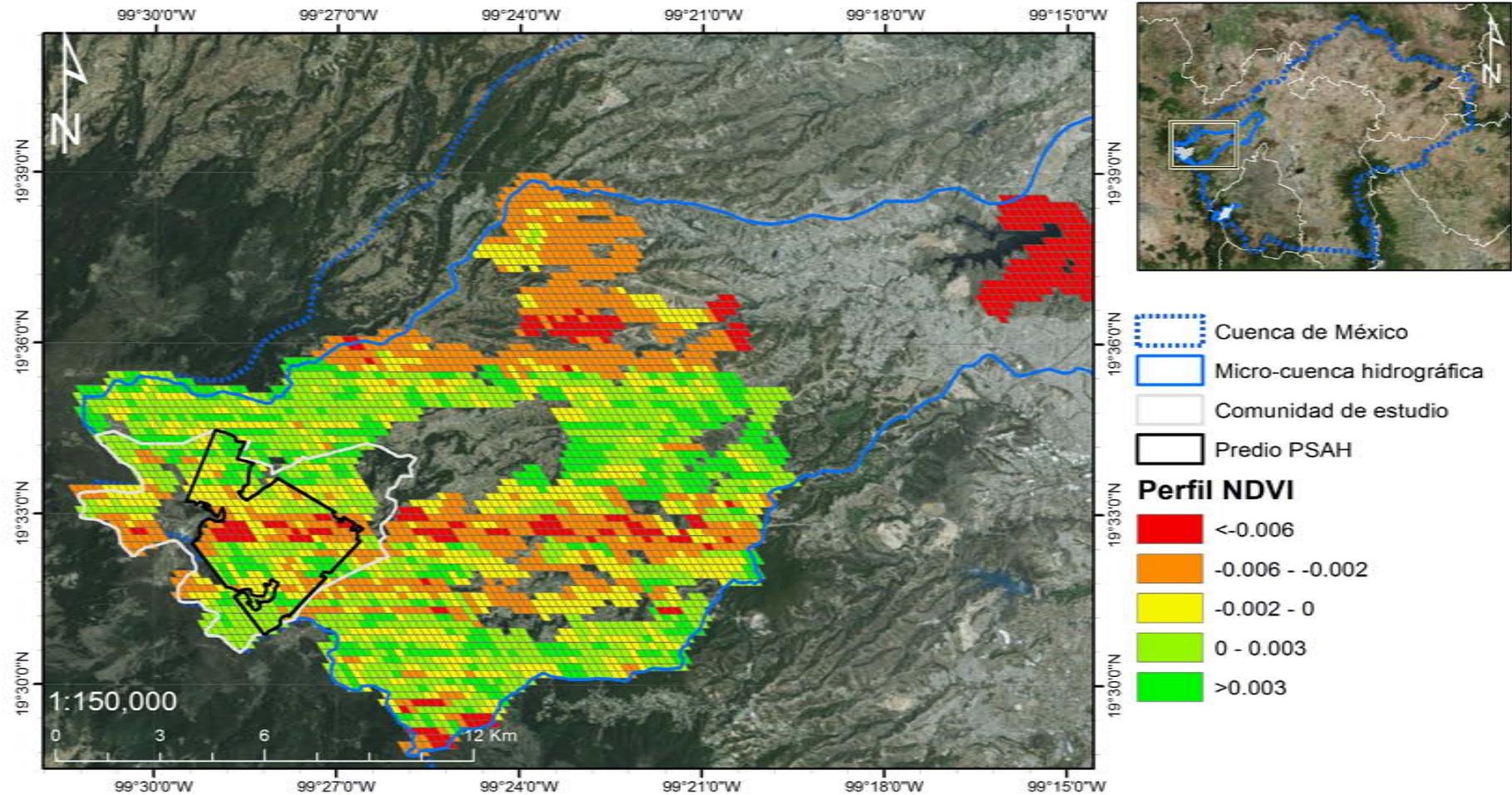
Los análisis de clasificación supervisada para las comunidades de estudio (Santiago Tlazala, perteneciente a la CPG, y Magdalena Atlitic, localizada en la CRM) se muestran en las figuras 9 y 10; en ellas se muestra la vectorización de la clasificación de terreno en los años 2003, 2010 y 2014.

Respecto a las proporciones de cambio de uso de suelo, se observa que durante el periodo de estudio (2003-2014) se presenta un cambio continuo en la cobertura forestal en ambas comunidades. La comunidad Magdalena Atlitic muestra un cambio de cobertura de terreno de “forestal” a “no forestal” con evidencias de fragmentación en las regiones altas de la comunidad, particularmente en el año 2014 (Fig. 9). Cuantitativamente, los cambios son de 110 ha entre 2003 y 2010, mientras que entre 2010 y 2014, se observa un cambio en el mismo sentido de casi 150 ha, en un periodo más corto (Fig. 9c).

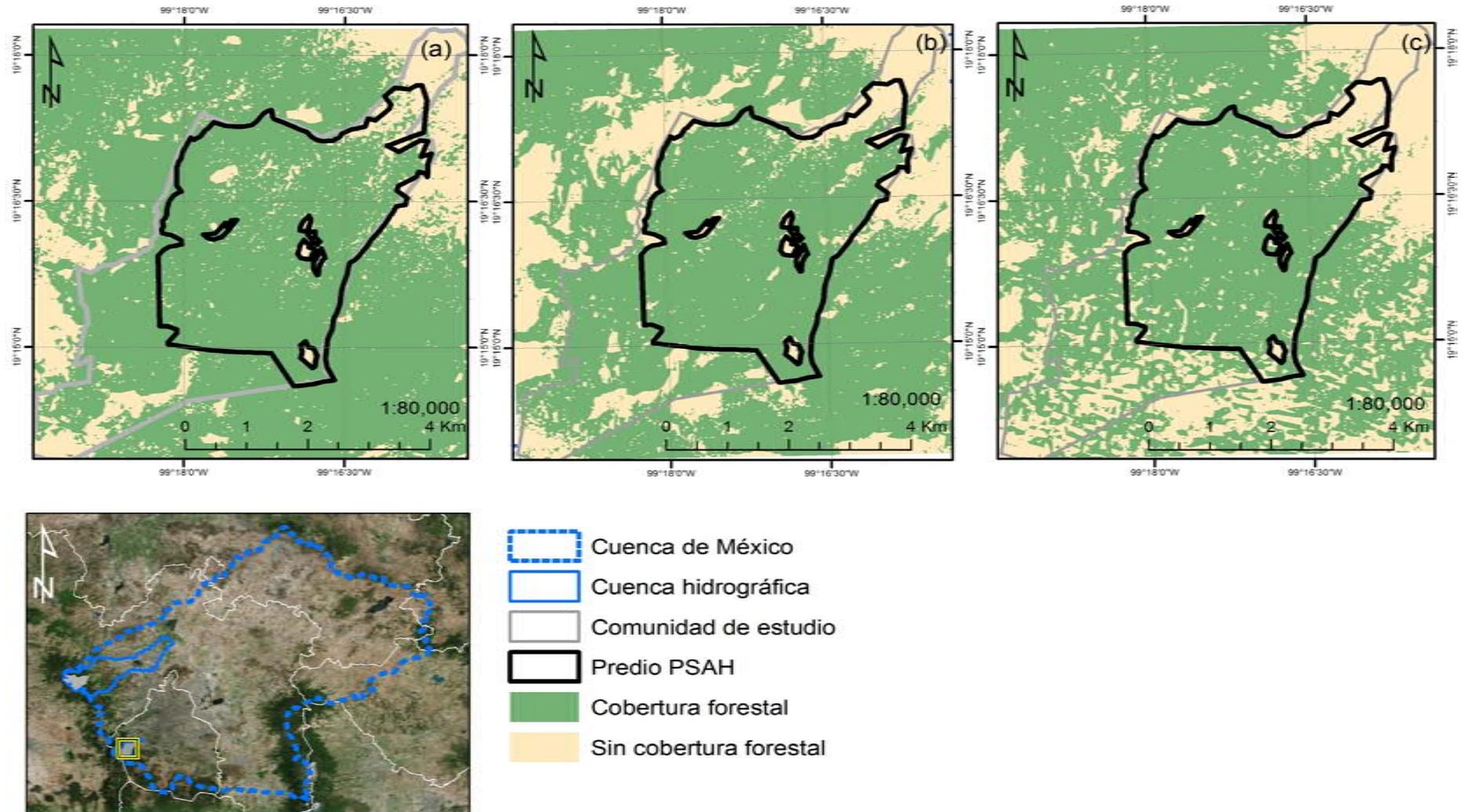
Por su parte, la comunidad Santiago Tlazala (Fig. 10) muestra una dinámica similar. Entre los años 2003 y 2010, se observa una pérdida de cobertura forestal de 100 ha, mientras que entre los años 2010 y 2014 se perdieron 80 ha. En comparación con la comunidad Magdalena Atlitic, la comunidad Santiago Tlazala presenta una pérdida menos abrupta de la cobertura forestal.



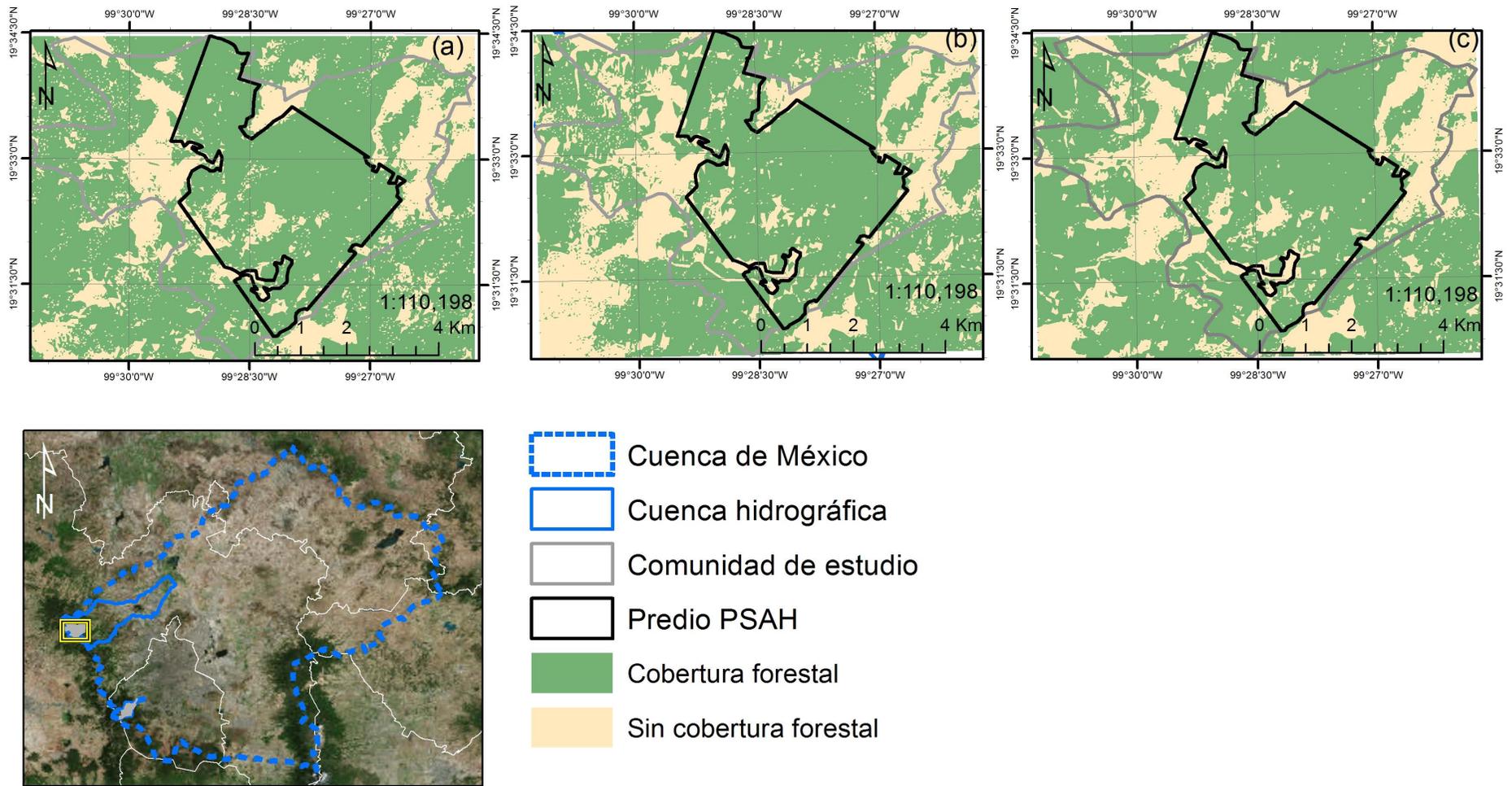
**Figura 7:** Degradación a nivel de cuenca dentro de la cuenca del río Magdalena. Se muestran los píxeles (60 ha) con degradación severa (rojo), degradación moderada (naranja), degradación leve (amarillo), leve mejoría (verde pálido) y alta mejoría (verde) de acuerdo con el indicador perfil de NDVI.



**Figura 8:** Degradación a nivel de cuenca dentro de la cuenca presa de Guadalupe. Se muestran los pixeles (60 ha) con degradación severa (rojo), degradación moderada (naranja), degradación leve (amarillo), leve mejoría (verde pálido) y alta mejoría (verde) de acuerdo con el indicador perfil de NDVI.



**Figura 9:** Cobertura forestal de la comunidad Magdalena Atlitic (CRM) escala 1:50,000. (a) Clasificación de terreno en el año 2003; (b) clasificación de terreno en el año 2010, y (c) clasificación de terreno en el año 2014.



**Figura 10:** Cobertura forestal de la comunidad Santiago Tlazala (CPG) escala 1:50,000. (a) Clasificación de terreno en el año 2003; (b) clasificación de terreno en el año 2010, y (c) clasificación de terreno en el año 2014.

#### 4. Cambio en cobertura forestal a escala de predio

Los cambios en la cobertura forestal a nivel de predio muestran tasas de pérdida más bajas en zonas con PSAH en ambas comunidades (Tabla 9). En la comunidad Santiago Tlazala se observa una diferencia entre las tasas de deforestación de las zonas con pago y sin pago, donde la tasa de deforestación es mayor en las últimas. Entre 2003 y 2010, se incrementó la cobertura forestal (0.16% anual) dentro del predio con PSAH, lo que coincide con el inicio de aplicación del programa, mientras que la zona sin pago se registro una tasa de deforestación de 2.21% anual. Esta diferencia entre predios se reduce en el periodo 2010-2014, cuando se registra una tasa de deforestación anual de 0.71% en el predio con PSAH y 0.76% en el predio sin éste. Finalmente, de manera global, durante el periodo completo se observó una tasa de deforestación anual de 0.69% y 2.93% en predios con y sin PSAH respectivamente.

En la comunidad Magdalena Atlitic, en el periodo completo la tasa de deforestación anual en el predio con PSAH fue de 0.63% y 3.14% para las zonas aledañas que no participan en programa. Las tasas de deforestación en los periodos 2003-2010 y 2010-2014, son de 0.34% y 1% en predios con PSAH, y 1.87% y 5% en zonas sin PSAH. Al igual que la escala de comunidad, se observa un aumento en la tasa de deforestación en el segundo periodo (2010-2014).

**Tabla 9:** Tasas de deforestación por periodo en el predio con PSAH y zonas sin él dentro de las comunidades de estudio.

Periodo	Comunidad Santiago Tlazala		Comunidad Magdalena Atlitic	
	Predio con PSAH	Zonas sin PSAH	Predio con PSAH	Zonas sin PSAH
2003-2010	-0.16%	2.21%	0.34%	1.87%
2010-2014	0.71%	0.76%	1%	5%
2003-2014*	0.60%	2.93%	0.63%	3.14%

\*Las tasas de deforestación en este periodo fueron calculadas conforme al método propuesto, por lo que no se trata de un promedio entre los periodos 2003-2010 y 2010-2014.

## VIII. Discusión

Las evaluaciones, tanto nacionales como locales, revisadas en este trabajo han expuesto la necesidad de formular un método que permita una visión más integral en términos de la heterogeneidad ambiental en cuanto a dos elementos fundamentales del PSAH: los criterios de selección de sitios y el monitoreo ambiental. En este sentido, es importante reconocer el papel que juega el PSAH en la dinámica de la vegetación y las ventajas y desventajas observadas con la aplicación de análisis en cada una de las escalas empleadas, colocando al enfoque multiescalar como una alternativa para la conjunción entre las partes, otorgando una visión integral.

Cada uno de los estudios analizados aquí, aborda el problema de la evaluación de impacto ambiental por distintas vías, lo que brinda elementos para generar una propuesta de método que integre las diferentes herramientas utilizadas. Por ejemplo, la evaluación realizada por la UNAM (2012) utiliza un método que se centra en tener el mayor nivel de detalle posible mediante el uso de imágenes de alta resolución espacial pero con una baja resolución temporal en una muestra pequeña, mientras que la realizada por Alix-García et al. (2011) se enfoca en tener una muestra más amplia con la intención de ser más representativa, un aspecto similar observamos en los estudios de caso, donde Valdez-Lazalde et al. (2006) aplican un método similar al realizado por UNAM (2012) en un ejido en el estado de Puebla, mientras que Scullion et al. (2011) utilizan un estudio que contempla la estimación de la deforestación 6 años previos a la aplicación del programa en bosques de Coatepec, Veracruz. No obstante las diferencias, los objetivos en todos los casos son similares y están guiados por las siguientes preguntas: ¿Si en los predios en los que se aplicó el PSA se redujeron las tasas de deforestación, en comparación de escenarios en los que el pago no se aplica? y ¿Si el programa es efectivo para prevenir la deforestación, en diferentes tipos de propiedad de la tierra y superficies sujetas de pago? (Alix-García et al., 2014).

Las evaluaciones nacionales muestran que el PSA ayuda a disminuir la pérdida de bosques en México; en contraste, los estudios de caso, pese a indicar resultados similares, argumentan que la disminución de la deforestación está sujeta además a la acción de otros programas, los cuales funcionan sinérgicamente con los objetivos ambientales del PSA (Scullion et al., 2011). Algo similar sucede con los datos de cobertura obtenidos en campo e imágenes de satélite; si bien, los análisis realizados con área de copa y basal demostraron ser más robustos, existe una disyuntiva entre los costos

de aplicación de las herramientas metodológicas y “la precisión de los datos obtenidos”. Por esto, aproximaciones como la de Alix-García et al. (2011) a pesar de ser de una baja resolución espacial, pueden aportar información similar a la obtenida en campo.

De manera general, los estudios nacionales se centran en los impactos del PSA en la deforestación; mientras que los locales, consideran el rol que juegan otras políticas públicas y la comparación entre los periodos antes y después de la implementación del PSA. Lo anterior abre la posibilidad de crear un proceso de evaluación que contemple las ventajas de los métodos usados en los distintos casos analizados aquí, en respuesta a la complejidad relacionada con las dinámicas de cambio de uso de suelo. La construcción de un método que responda a las características regionales y locales en las que se aplica el PSA ha sido considerado con anterioridad por varios autores (Pagiola et al., 2005; Daniels, et al., 2010; Guevara, 2011; Perevochtchikova y Vázquez, 2012). El análisis presentado en este trabajo, aborda al PSAH desde una visión local (escala de comunidad y predio) y regional (escala de cuenca), bajo el argumento de que las políticas públicas y su influencia en el territorio, al igual que relación entre deforestación y los propietarios de la tierra, están determinados por procesos que ocurren a diferentes escalas temporales y espaciales (Carr et al., 2005).

## 1. Análisis a escala de cuenca.

Para el análisis de cambios en la cobertura forestal a escala de cuenca, este estudio aborda la variación interanual en el NDVI como un estimador de la actividad fotosintética de la cobertura forestal. Algunos autores (Jacquin et al., 2010; Zhang et al., 2014) han demostrado que los valores del NDVI por debajo del límite de -2% con respecto a la media indican eventos de degradación a través del tiempo. En el caso de la CRM los valores mostrados para los años 2003 y 2004, pueden ser vinculados con eventos de degradación como incendios en la zona baja y media de la cuenca, correspondiente a zonas con *Quercus spp.* y *A. religiosa* respectivamente (Flores, 2006; Fig. 7), al igual que el valor mostrado en el año 2011, en el caso de la CPG.

La relevancia de análisis enfocados al NDVI, en el contexto de la evaluación de políticas públicas, es que el registro temporal de cambios en los patrones fenológicos puede ayudar al reconocimiento de patrones de degradación y a establecer la relación causa-efecto entre un evento de degradación y la aplicación de programas ambientales, como REED, esfuerzos de reforestación o el propio PSAH (Paruelo et al., 2004; Ayanu et al., 2012, Roces-Díaz et al., 2015).

Por otra parte, existen limitaciones en el análisis temporal de la degradación, como la imposibilidad de localizar espacialmente algún disturbio y la escala espacial de la información, pues el análisis depende de la resolución de la imagen MODIS, cuyo pixel es de 60 ha. Por esta razón, es posible sobre o subestimar los cambios en la cobertura, ya que el indicador sumNDVI no refleja la gravedad del evento de degradación, es decir un valor muy por debajo de la media no forzosamente indica un evento grave de degradación (Jaquin et al., 2010). Sin embargo, la generación de una línea de tendencia complementa el análisis anterior, ayudando a comprender la magnitud de la actividad en la vegetación, lo que se relaciona con la gravedad de la degradación y su comportamiento a lo largo del tiempo.

En el caso de la CRM la pendiente observada tiene un valor positivo, es decir, que la vegetación tuvo durante el periodo de estudio una actividad positiva, lo que se relaciona con una degradación relativamente baja. Esto puede guardar alguna relación con la aplicación del PSAH, iniciada desde 2003 y que incluye la mayor parte del territorio con cobertura forestal dentro de la cuenca. La CPG, por su parte, muestra un valor de pendiente negativo, aunque cercano a 0, lo que puede estar relacionado con eventos de degradación leve o moderada. Adicionalmente en esta cuenca se incluye en el PSAH únicamente a una comunidad vegetal en la parte alta, por lo que la degradación puede haberse desarrollado en zonas más bajas, que no participan en el programa o en otros enfocados a la conservación de la cobertura forestal. Si bien el cálculo de tendencia a partir de los valores de sumNDVI anuales indica la dirección “positiva” o “negativa” de la actividad fotosintética de la vegetación forestal y con esto señalan la gravedad de eventos de degradación dentro de la cuenca, no proporciona información específica acerca del funcionamiento del PSAH. Estas tendencias muestran la dinámica de la cobertura forestal a escala de cuenca, la cual pudiese estar explicada no solamente por la acción del PSAH, sino también por otros programas ambientales o sectoriales (agropecuarios, por ejemplo), así como por diversos factores socioeconómicos y ambientales (Scullion et al., 2011).

En el estudio en la actividad fotosintética de la vegetación existen tres factores que deben considerarse: (a) la baja resolución espacial, la cual puede solucionarse con el uso de una fuente de información alterna como las imágenes LandsAT; (b) el desconocimiento de la gravedad de la degradación, la cual puede ser estimada a partir del cálculo de la tendencia en sumNDVI y con un la aplicación del indicador de perfil de NDVI discutido a continuación y, finalmente, (c) la incapacidad de localizar espacialmente la degradación, la cual, de nueva cuenta puede ser obtenida con el cálculo del indicador perfil de NDVI.

El análisis de perfil de NDVI ofrece la posibilidad de calificar la degradación en 5 clases dentro de las cuencas. Este análisis emplea una categorización simple para entender la degradación desde una visión regional. La alta resolución temporal que ofrecen imágenes como MODIS, permite obtener información espacial no solamente de pérdida de la cobertura (Alix.Garcia et al. 2014), sino también de disturbios que no necesariamente implican el cambio de uso de suelo. El cálculo de perfil de NDVI se fundamenta únicamente en el NDVI que responde a la refracción del infrarojo de la cobertura, por lo que contempla solamente los cambios fenológicos del dosel y es susceptible de sobre estimar el área de zonas críticas de degradación, pues al encontrar zonas focalizadas donde existen disturbios importantes, muy cercanos a zonas con cobertura forestales con signos de mejoría arroja como resultado un promedio, es decir, que todos los pixeles, tanto el altamente degradado como los pixeles aledaños con signos de mejoría, se muestran como pixeles con niveles moderados de degradación a pesar de lo anterior, provee una aproximación de la degradación mediante un método con alta resolución temporal.

En el mapeo de la degradación (Figs. 6-7) tanto en la CRM como en la CPG es posible observar que la degradación se presenta en las zonas bajas de la cuenca, mientras que la zona alta de ambas cuencas presenta baja degradación, debido principalmente a que se trata de zonas cuyas condiciones suelen no ser aptas para la producción agropecuaria. A pesar de su buen estado de conservación no se trata de zonas incluidas en el PSAH, probablemente porque éste se aplica a zonas con una cobertura forestal superior a 50%. En la zona alta de la CRM se presenta una comunidad de bosque de *P. hartwegii*, que crece asociado con pastizales naturales. Es por ello que no cumple con los porcentajes de cobertura requeridos para los predios que participan en el programa. El análisis de degradación, por tanto, puede funcionar como un criterio de selección alternativo con la finalidad de seleccionar unidades completas de bosque que, de esta manera, mejoren la inclusión de diversas comunidades vegetales en el programa y que se evite el pago focalizado (Scullion et al., 2009). En el caso de la CPG, sucede algo similar, pues la zona con PSAH está concentrada en un área que cumple con el porcentaje de cobertura forestal, pero la estimación realizada por el cálculo de perfil de NDVI evidencia la existencia de bosque en buen estado de conservación que se encuentran fuera del PSAH debido, posiblemente, a que no cumple con el porcentaje mínimo de cobertura forestal.

## 2. Análisis a escala de comunidad y predio

Para complementar el análisis a escala regional, se empleó un análisis a escala de comunidad y predio con imágenes de mediana resolución, los mapas de cambio en cobertura forestal a escala de comunidad indican que existen procesos de fragmentación y pérdida, además de procesos de degradación estimados en el análisis regional, sobre todo en las partes más bajas. En relación con lo anterior, el análisis a nivel de predio muestra convergencias con la escala de comunidad. El periodo con la tasa de deforestación más baja en el caso de la comunidad Santiago Tlazala (CPG) es de 2010 a 2014; en cambio en la comunidad Magdalena Atlitic (CRM) durante el periodo 2003-2010 se observó una tasa de pérdida más elevada. Si bien las tasas de deforestación calculadas dentro de los predios apoyados con PSAH son menores que las registradas en los predios sin PSAH; en todos los casos, los cambios observados por periodo y su relación con la aplicación del programa muestran resultados mixtos. En este sentido, en el caso de la comunidad Magdalena Atlitic, los periodos de aplicación del programa y las diferencias en las tasas de deforestación entre predios con PSAH y las zonas aledañas son dispares, es decir, tras la aplicación del programa las diferencias en las tasas de deforestación entre zonas se reduce. En el caso de Santiago Tlazala las tasas de deforestación previas a la aplicación del programa se redujeron tanto dentro del predio con PSAH como en las zonas si él, por lo que esta disminución no puede ser atribuida al efecto del el programa.

## 3. Discusión metodológica

Las diferencias encontradas entre casos nacionales y locales tomados como antecedentes responden a la escala de análisis definida dentro de cada estudio, debido a que los patrones de cambio no ocurren de manera lineal dentro del espacio o del tiempo (heterogeneidad espacial y temporal; Wheatley y Johnson, 2009). La selección de la escala adecuada para realizar un estudio es un reto metodológico importante en las evaluaciones del PSAH, a esto se le denomina dependencia de escala (*sensu* Burnett y Blaschke, 2003). Considerar la dependencia de escala en los patrones y procesos de cambio en la cobertura forestal facilita la generación de modelos confiables y más adaptados a la realidad (Burnett y Blaschke, 2003; Wheatley y Johnson, 2009). Por tanto la pregunta clave es ¿Cómo considerar la dependencia de escala dentro del diseño metodológico?

Los primeros intentos que se realizaron para atender a esta pregunta se enfocaban en hacer más robustos los métodos de muestreo mediante la segmentación de imágenes basadas en probabilidad, lo que permitía un mejor análisis de una escala en particular, no obstante aún no se lograba un vínculo real entre las diferentes escalas analizadas. Es entonces que gracias al desarrollo de metodologías empíricas fundamentadas en sistemas jerárquicos anidados fue posible lograr un análisis integral incorporando las ventajas de diferentes escalas, mientras que la dependencia de escala se hacía más pequeña gracias a la comparación de la información (Burnett y Blaschke, 2003).

Tomando como base el modelo de escalas jerárquicas anidadas, se realizó una evaluación al PSAH que incorporaba el análisis con un enfoque regional a escala de Cuenca y un enfoque local a escala de comunidad y predio, dentro de dos sitios de estudios. Así, es posible conocer no sólo los cambios experimentados por las zonas boscosas en su extensión, sino también conocer la posible degradación o dinámica en la actividad fotosintética en puntos donde la cobertura forestal no ha cambiado a otros tipos de uso del suelo (Tucker et al. 1991; Carr et al., 2005; Von Thaden, 2012; Zhang et al. 2014). Los resultados presentados a escala de cuenca brindan información acerca de la dinámica de la cobertura forestal, ya que se enfoca al seguimiento de los cambios en la actividad de la vegetación con una resolución temporal amplia (2 mediciones diarias en el periodo 2003-2014), no obstante, aún no se puede explicar completamente la relación de estos cambios en la cobertura por acción del PSAH debido a que se trata de un estudio a escala regional por lo que la precisión espacial es baja. Por otra parte el análisis a escala de comunidad y predio, brindan información detallada de los efectos del PSAH sobre la cobertura forestal, no obstante el seguimiento temporal es bajo, puesto que se analizan únicamente tres años (2003 2010 y 2014). De manera general el enfoque regional (escala de cuenca) incorpora la heterogeneidad temporal al dar un seguimiento diario de los cambios en la cobertura pero no posee la resolución espacial suficiente para analizar a fondo todos los patrones de cambio en zonas pequeñas. Por otra parte el análisis local (escala de comunidad y predio) posee la resolución espacial para analizar cambios de uso de suelo en zonas puntuales pero no aporta información acerca de los cambios graduales dentro de la cobertura forestal.

El análisis multiseccular permitió integrar estos dos enfoques de análisis mediante la complementación de la información, es decir, debido a la dependencia de escala no basta con definir una sola escala de análisis (Roces-Díaz et al., 2015). Por otra parte, este método de evaluación podría ser mejorado con el uso de estrategias participativas de muestreo, de esta manera se lograrían tres

avances fundamentales: conocer la percepción que tienen los participantes en cuanto al impacto del PSAH, lograr una clasificación de terreno con un mayor detalle y conocer si la degradación es percibida en las mismas zonas en las que el indicador de perfil de NDVI muestra valores por debajo del 2% de la media (Herrmann et al., 2014; Mialhe et al., 2015).

## **IX. Conclusiones**

Este estudio presenta un método multiescalar que combina dos técnicas de percepción remota para caracterizar y entender los cambios en la cobertura forestal en tres escalas espaciales anidadas dentro de dos comunidades de la cuenca de México.

Los resultados muestran cómo la información producida puede ser usada para evaluar la dinámica de la cobertura forestal dentro y fuera de los predios bajo el programa de PSAH. El análisis de cambio en cobertura previo a la aplicación del PSAH en el caso de la CPG y el mapeo de la degradación pueden ser útiles en la fase de selección como indicadores complementarios, por ejemplo, en la selección de sitios que no cumplan con un 50% de cobertura requerido para su adición al programa pero que presenten signos de mejoría en la actividad de la vegetación y tasas de cambio cercanas a las esperadas en sitios con PSAH. El principal reto metodológico es lograr cerrar la brecha que existe entre la cobertura forestal como indicador y la evaluación directa de los efectos del PSAH como política pública con objetivos de conservación; los datos obtenidos por los métodos de percepción remota en conjunción con estrategias participativas presentan una especial oportunidad para atender este aspecto.

Si bien, el método empleado abordó algunas de las consideraciones expuestas en evaluaciones anteriores, se debe tener presente la heterogeneidad ambiental a la que funcionan este tipo de políticas públicas (Alix-García et al., 2014). Aún existen diversos aspectos del PSA insuficientemente evaluados, como la medición directa en la provisión de servicios, en especial los hidrológicos; mediciones de impacto social y visión de actores involucrados entre otras (Perevochtchikova y Vázquez, 2012), para los cuales es necesario desarrollar y consensuar métodos de análisis integrales.

<<<>>

## X. Literatura citada

- Alatorre-Troncoso, A.** (2014). *Mexico's national payments for ecosystem services programme: in the wrong place at the right time Gap analysis and assessment of conservation success* (Tesis de maestría en ciencias). Imperial College, London.
- Alix-Garcia, J. M., Shapiro, E. N., y Sims, K. R.** (2012). Forest conservation and slippage: Evidence from Mexico's national payments for ecosystem services program. *Land Economics*, 88(4), 613–638.
- Alix-García, J., Aronson, G., Radeloff, V., Ramírez-Reyes, C., Shapiro, E. N., Sims, K., y Yañez-Pagans, P.** (2014). *Environmental and socioeconomic impacts of Mexico's payments for ecosystem services program* (3ie Grantee Final Report). New Delhi: International Initiative for Impact Evaluation (3ie).
- Alix-Garcia, J., Shapiro, E. N., y Sims, K. R.** (2011). *Impacts of payments for ecosystem services on deforestation in Mexico: Preliminary lessons for REDD*. Land Tenure Briefs. Alix-Garcia, J., E. N. Shapiro, K. R. Sims.
- Andréassian, V.** (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1-2), 1–27.
- Ávila-Akerberg, V.** (2010). *Forest quality in the southwest of Mexico City. Assessment towards ecological restoration of ecosystem services* (Tesis doctoral). Albert Ludwings Universität.
- Ayanu, Y. Z., Conrad, C., Nauss, T., Wegmann, M., y Koellner, T.** (2012). Quantifying and Mapping Ecosystem Services Supplies and Demands: A Review of Remote Sensing Applications. *Environmental Science & Technology*, 46(16), 8529–8541.
- Aylward, B.** (2002). Land-Use, Hydrological Function and Economic Valuation. *Change*, (February), 99–120.
- Balvanera, P., Uriarte, M., Almeida-Leñero, L., Altesor, A., DeClerck, F., Gardner, T., Hall, J., Lara, A., Laterra, P., y Vallejos, M.** (2012). Ecosystem services research in Latin America: The state of the art. *Ecosystem Services*, 2, 56–70.
- Barbier, E. B.** (2003). The Role of Natural Resources in Economic Development. *Australian Economic Papers*, 42(2), 253–272.
- Bifani, P.** (2007). *Medio ambiente y desarrollo*. Madrid: Universitaria.
- Bonell, M., y Bruijnzeel, L. A.** (2004). *Forests, water, and people in the humid Tropics: past, present, and future hydrological research for integrated land and water management*. (M. Bonell & L. A. Bruijnzeel, Editores.) (Vol. 1904). Cambridge University Press.
- Braña, J., Muñoz-Piña, C., Torres, J. M., y Guevara, A.** (2008). *Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results* (Vol. 65).
- Brauman, K. a., Daily, G. C., Duarte, T. K., y Mooney, H. a.** (2007). The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), 67–98.
- Brown, T., Bergstrom, J., y Loomis, J.** (2006). Ecosystem Goods and Services—definition, Valuation, and Provision.

- Burnett, C., y Blaschke, T.** (2003). A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. *Ecological Modelling*, 168(3), 233–249.
- Calder, I. R.** (2004). Forest and water - closing the gap between public and science perceptions. *Water Science and Technology*, 49(7), 39–53.
- Campbell, J., & Wynne, R.** (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Ney York: Guilford.
- Cantoral, E., Almeida-Leñero, L., y Cifuentes, J.** (S/F) Biodiversidad del suelo de conservación Contrerense, Distrito Federal, base para estudios ambientales encaminados al manejo de ecosistemas. México.
- Carpenter, S. R., DeFries, R., Dietz, T., Mooney, H. A., Polasky, S., Reid, W. V., y Scholes, R. J.** (2006). Millenium Ecosystem Assessment: Research Needs. *Science*, 314(13), 257–258.
- Carr, D. L., Suter, L., y Barbieri, A.** (2005). Population Dynamics and Tropical Deforestation: State of the Debate and Conceptual Challenges. *Population and Environment*, 27(1), 89–113.
- Chaplin, J., y Bradyn L.** (2013) Using remote sensing and GIS to investigate the impacts of tourism on forest cover in the Annapurna Conservation Area, Nepal. *Applied Geography* 43. pp. 159-168
- Chiabai, A., Ojea, E., y Martin-Ortega, J.** (2012). *Defining and classifying ecosystem services for economic valuation: the case of forest water services* (Vol. 19–20).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).** (2009). *Servicios Ambientales del Bosque*. Consejo Nacional Forestal.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., y van den Belt, M.** (1998). The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics*, 25(1), 67–72.
- Daily, G. C.** (1997). *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. (G. C. Daily, Editor) (Vol. so). Island Press.
- Daniels, A. E., Bagstad, K., Esposito, V., Moulaert, A., y Rodriguez, C. M.** (2010). Understanding the impacts of Costa Rica's PES: Are we asking the right questions? *Ecological Economics*, 69(11), 2116–2126.
- Derissen, S., y Latacz-Lohmann, U.** (2013). What are PES? A review of definitions and an extension. *Ecosystem Services*, 1–4.
- Diario Oficial de la Federación (DOF).** (2014). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Decima sección, Reglas de Operación del programa nacional forestal 2015, domingo 28 de diciembre.
- Dobler, M.** (2010). *Caracterización del clima y su relación con la distribución de la vegetación en el suroeste del DF México*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Durand, L.** (2014). ¿Todos ganan? Neoliberalismo, naturaleza y conservación en México. *Sociológica*, 29(82), 183–223.

- Fisher, B., Turner, K., Zylstra, M., Brouwer, R., de Groot, R., Farber, S., Ferraro, P., Green, R., Hadley, D., Harlow, J. Jefferiss, P., Kirkby, C., Morling, P., Mowatt, S., Naidoo, R., Paavola, J., Strassburg, B., Yu, D., y Balmford, A.** (2008). Ecosystem services and economic theory: integration for policy-relevant research. *Ecological Applications : A Publication of the Ecological Society of America*, 18(8), 2050–67.
- Giles, P. T.** (2001). Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67(7), 833–840.
- Gómez-Baggethun, E., De Groot, R., Lomas, P. L., y Montes, C.** (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209–1218.
- Grasso, M., D'Arge, R., van den Belt, M., Paruelo, J., O'Neill, R. V., Sutton, P., Costanza, R., Limburg, K., Faber, S., de Groot, R., Hannon, B., Naeem, S., y Raskin, R. G.** (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Groot, R. D., Wilson, M., y Boumans, R.** (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408.
- Guevara, A.** (2011). Reflexiones sobre la Eficiencia, Equidad y Progresividad de los PSA en México. In *Memoria del Seminario Internacional sobre Evaluación de Políticas Públicas Forestales*. México: Comisión Nacional Forestal; Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Hansen, R., Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Rall, E., Kabisch, N., Kaczorowska, A., Kain, J., Artmann, M., y Pauleit, S.** (2015). The uptake of the ecosystem services concept in planning discourses of European and American cities. *Ecosystem Services*, 12, 228–246.
- Herrmann, S. M., Sall, I., y Sy, O.** (2014). People and pixels in the Sahel: a study linking coarse-resolution remote sensing observations to land users perceptions of their changing environment in Senegal. *Ecology and Society*, 19(3).
- Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J. G., Gao, F., y White, J. C.** (2009). A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1613–1627.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).** (2002). Estimación del Costo de Oportunidad del Uso de Suelo Forestal en Ejidos a Nivel Nacional.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** (2007). Censo agrícola, ganadero y forestal.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** (2010). Censo de Población y Vivienda.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** (2012a). Uso de suelo y vegetación escala, serie V.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** (2012b). Red hidrográfica Nacional escala 1:50000.
- Jacquín, A., Sheeren, D., y Lacombe, J.-P.** (2010). Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S3–S10.

- Klein Goldewijk, K., y Ramankutty, N.** (2004). Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets. *GeoJournal*, 61(4), 335–344.
- López-Morales, C. A.** (2012). *Valoración de servicios hidrológicos por costo de reemplazo: Análisis de escenarios para el Bosque de Agua*. México, D.F.: Documento de trabajo de la Dirección General de Investigación en Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas, Instituto Nacional de Ecología.
- Maderey, L., y Jiménez, A.** (2000). Los recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global. *México, Una Visión Hacia El Siglo XXI. Idots*, 39–53.
- Martínez, S.** (2012). El pago por servicios ambientales como instrumento económico de conservación ambiental: aproximaciones de evaluación en México. En E. Pérez, M. Perevochtchikova, y S. Avila (EdItores), ¿Hacia un manejo sustentable del suelo de conservación del Distrito Federal? Ciudad de México: IPN; Porrúa.
- McCoy, R. M.** (2005). *Field methods in remote sensing*. New York: Guilford Press.
- Mialhe, F., Gunnell, Y., Ignacio, J. A. F., Delbart, N., Oganía, J. L., y Henry, S.** (2015). Monitoring land-use change by combining participatory land-use maps with standard remote sensing techniques: Showcase from a remote forest catchment on Mindanao, Philippines. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36, 69–82.
- Montenegro, C., Gasparri I., Manghi E., Strada M., Bono J., y Parmucchi M. G.** (2003). *Informe sobre deforestación en Argentina*. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Mora, R., Sáenz, F., y Le Coq, J.** (2012). Servicios ambientales y ecosistémicos: conceptos y aplicaciones en Costa Rica. *PUENTE*, 13(2), 20–23.
- Morlán, F.** (2012). *Saneamiento del Río Cuautitlán en el tramo Cortina Presa Guadalupe–Residencial La Luz*. Instituto Politécnico Nacional.
- Muñoz-Pedrerros, A.** (2004). La evaluación del paisaje: una herramienta de gestión ambiental. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77, 139–156.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M., y Braña, J.** (2007). Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 65(4), 725–736.
- Nicholson, E., Mace, G. M., Armsworth, P. R., Atkinson, G., Buckle, S., Clements, T., Ewers, R., Fa, J., Gardner, T., Gibbons, J., Grenyer, R., Metcalfe, R., Mourato, S., Muûls, M., Osborn, D., Reuman, D., Watson, C., y Milner-Gulland, E. J.** (2009). Priority research areas for ecosystem services in a changing world. *Journal of Applied Ecology*. 46(6), 1139-1144.
- Ochoa, A.** (2009). *Pago por servicios ambientales hidrológicos en México: Implementación y funcionamiento* (Tesis de maestría). Colegio de México, Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, México.
- Pagiola, S., Arcenas, A., y Platais, G.** (2005). Can Payments for Environmental Services Help Reduce Poverty? An Exploration of the Issues and the Evidence to Date from Latin America. *World Development*, 33(2), 237–253.

- Paruelo, J. M., Golluscio, R. A., Guerschman, J. P., Cesa, A., Jouve, V. V., y Garbulsky, M. F.** (2004). Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography*, 13(5), 385–395.
- Perevochtchikova, M.** (2011). Programa de pago por servicios ambientales hidrológicos en México. En E. Pérez, M. Perevochtchikova, y S. Ávila (Editores), *Suelo de conservación del Distrito Federal*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional; Porrúa.
- Perevochtchikova, M.** (2014). Aproximación Teórico-conceptual a los Estudios de Servicios Ecosistémicos, Ambientales y Esquemas de Compensación. En M. Perevochtchikova (Editor), *Pago por Servicios Ambientales en México: un Acercamiento para su Estudio* (1° ed.). México: El Colegio de México, Centro de Estudios Democráticos, Urbanos y Ambientales.
- Perevochtchikova, M., & Vázquez, Á.** (2012). El Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, México. En E. Pérez, M. Perevochtchikova, y S. Ávila (Editores.), *Hacia un Manejo Sustentable del Suelo de Conservación del Distrito Federal*. México: Porrúa; Instituto Politécnico Nacional.
- Roces-Díaz, J. V., Díaz-Varela, R. A., Álvarez-Álvarez, P., Recondo, C., y Díaz-Varela, E. R.** (2015). A multiscale analysis of ecosystem services supply in the NW Iberian Peninsula from a functional perspective. *Ecological Indicators*, 50, 24–34.
- Röder, A., Udelhoven, T., Hill, J., del Barrio, G., y Tsiourlis, G.** (2008). Trend analysis of Landsat-TM and -ETM+ imagery to monitor grazing impact in a rangeland ecosystem in Northern Greece. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2863–2875.
- Santos, C., Escamilla, I., y Guarneros, L.** (2009). La expansión urbana en la zona norte de la periferia metropolitana de la Ciudad de México. En A. Aguilar y I. Escamilla (Editores), *Periferia Urbana. Deterioro Ambiental y Reestructuración Metropolitana*. Porrúa; Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Schägnler, J. P., Brander, L., Maes, J., y Hartje, V.** (2013). Mapping ecosystem services' values: Current practice and future prospects. *Ecosystem Services*, 4, 33–46.
- Scullion, J., Thomas, C. W., Vogt, K. A., Pérez-Maqueo, O., y Logsdon, M. G.** (2011). Evaluating the environmental impact of payments for ecosystem services in Coatepec (Mexico) using remote sensing and on-site interviews. *Environmental Conservation*, 38(04), 426–434.
- Shapiro-Garza, E.** (2013). Contesting the market-based nature of Mexico's national payments for ecosystem services programs: Four sites of articulation and hybridization. *Geoforum*, 46(0), 5–15.
- Tucker, C. J., Newcomb, W. W., Los, S. O., y Prince, S. D.** (1991). Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1133–1135.
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).** (2012). *Evaluación complementaria del ejercicio de los Programas Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos S-110 y Pago por Servicios Ambientales derivados de la Biodiversidad S-136*. Ejercicio fiscal 2010. (Informe final). México.
- Valdez-Lazalde, J. R., Guillén, M. de J. G., Y de los Santos Posadas, H. M.** (2006). Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multispectrales de alta resolución. *Agrociencia*, 40(3), 383–394.

- Virk, R., y King, D.** (2006). Comparison of techniques for forest change mapping using Landsat Data in Karnataka, India. *Geocarta International*, (19)87, 49–57.
- Von Thaden, J. J.** (2012). *Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México*. Universidad De La Sierra Juárez.
- Vorosmarty, C. J., Leveque, C., Y Revenga, C.** (2005). Fresh Water. In R. Hassan, R. Scholes, & N. Ash (Eds.), *Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends* (pp. 165–207). Island Press.
- Westman, W.** (1977). How much are nature's services worth? *Science*, 197(4307), 960–964.
- Wheatley, M., Y Johnson, C.** (2009). Factors limiting our understanding of ecological scale. *Ecological Complexity*, 6(2), 150–159.
- Wunder, S.** (2005). Payment for Ecosystem Services: Some nuts and bolts. *CIFOR Occasional Paper*, 42(42).
- Wunder, S.** (2007). The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation. *Conservation Biology*, 21(1), 48–58.
- Zhang, J., Zhang, L., Xu, C., Liu, W., Qi, Y., Y Wo, X.** (2014). Vegetation variation of mid-subtropical forest based on MODIS NDVI data — A case study of Jinggangshan City, Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 34(1), 7–12.

---

**XI. Agradecimientos**

Este proyecto se realizó gracias al apoyo brindado por el proyecto PAPIIT IT201415 “Monitoreo participativo de la reforestación, calidad ecológica y restauración de los ríos y arroyos en el Bosque de Agua con énfasis en la cuenca del río Magdalena, D.F.”

A la Dra. Lucía Almeida Leñero, por todo el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

A la M. en C. Irene Pisanty Baruch y a la Dra. María Perevochtchikova por sus acertados comentarios que contribuyeron al enriquecimiento de este trabajo.

A la Dra. María Fernanda Figueroa Díaz Escobar por sus minuciosas revisiones, su apoyo incondicional, su guía y su amistad.

Al Dr. Victor ávila Akerberg, por la revisión del trabajo y la discusiones que ayudaron a consolidar este estudio.

A la Ing. Agr. María Vallejo que desde Argentina colaboró en el análisis de degradación de la cobertura forestal a nivel de cuenca.

A mis compañeros de los labs. Ecosistemas de Montaña y Ecología de comunidades por la ayuda brindada durante las primeras fases del trabajo.

A mis amigos Taracena y Rodrigo por esos chispazos de apoyo que permitieron la realización de algunos análisis.

A toda la “Pandilla” por esas historias dignas de ser contadas.

A los “Sasquash busters” por su amistad y los buenos momentos.

A mi familia por el apoyo tras bambalinas.

A Rosario, la persona más importante en mi vida, por inmortalizarse en mis ideas, desde el puente de otoño hasta esa feria en Illinois.