

Pago por servicios ambientales hidrológicos y dinámica de la cobertura arbórea en la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México

Payments for Hydrologic Environmental Services and forest cover dynamics in the Iztaccíhuatl-Popocatepetl region, Puebla

Manuel Jacobo Mora-Carvajal¹, Angel Bustamante-González^{1*}, Lenom Cajuste Bontemps², Samuel Vargas López¹, Gustavo Manuel Cruz Bello³, Javier Ramírez-Juárez¹

¹Colegio de Posgraduados, Campus Puebla. ²Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos ³Universidad Autónoma Metropolitana. *Autor para correspondencia: bus632003@yahoo.com.mx

Rec.: 2017-07-12 Acep.: 2019-04-11

Resumen

El pago por servicios ambientales hidrológicos es un instrumento de política ambiental aplicado en la mayoría de los países para promover la conservación de los ecosistemas, principalmente los forestales. En 2003, el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), implementó el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) para atender los problemas de agua y deforestación en el país. Un prerrequisito para que un área reciba el PSAH es que mantenga una cobertura vegetal mínima de 80%, o la aumente, durante los 5 años posteriores al inicio del contrato. Las evaluaciones de los impactos del Programa sobre la cobertura forestal consisten principalmente en estudios nacionales o regionales. En México no se tienen evaluaciones de los impactos a nivel comunitario, escala a la que el PSAH es ejecutado. En el presente estudio se evaluó el impacto del programa de PSAH en la dinámica de la cobertura arbórea en seis ejidos de la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla. Para realizar el estudio se utilizaron imágenes Quickbird y se realizó una clasificación supervisada. Los resultados indicaron que el Programa PSAH cumplió con su objetivo en cuatro de los seis núcleos agrarios analizados.

Palabras clave: servicios hidrológicos, servicio ambiental, Puebla, México.

Abstract

Payment for hydrologic environmental services is an instrument of environmental policy applied in most countries to promote conservation of ecosystems, especially forest ecosystems. In 2003, the Mexican government through the National Forestry Commission (CONAFOR) implemented the Payment for Hydrological Environmental Services (PHES) to address the problems of water and deforestation in the country. A prerequisite for an area to receive the PHES is to maintain a minimum 80% forest cover, or increase it during the five-year contract. PHES program Assessments on forest cover have been mainly national or regional scale studies. In Mexico there is not impact assessment at community level scale at which the PHES is executed. This study assesses the impact of PHES on the forest cover dynamics in six ejidos of the Iztaccíhuatl-Popocatepetl region, Puebla. To perform the study, two Quickbird images were used and a supervised classification was performed. The results indicate that the PHES achieved its goal in four of the six ejidos.

Keywords: hydrologic services, environmental service, Puebla, México.

Introducción

En México la tasa de deforestación, promedio anual nacional, para el periodo 2005-10 fue de 155,000 ha. Para el bosque templado fue de 181,000 ha anuales y para las selvas de 115,000 ha (SEMARNAT, 2012). El principal factor de deterioro es la degradación causada por la remoción de la cobertura forestal para actividades agrícolas y ganaderas (Reyes et al., 2010), además de los incendios forestales y la tala ilegal. Una función importante de los ecosistemas forestales en particular es la regulación del ciclo hidrológico, ya que son vitales para la conservación de la calidad y cantidad del agua de las cuencas forestales. Los procesos de deterioro de los ecosistemas afectan el suministro del servicio ambiental hidrológico. Para hacer frente a los problemas de deforestación, la pérdida de la recarga hídrica y la escasez de agua en las cuencas forestales, en México se adoptó el esquema de pago por servicios ambientales (PSAH) (Muñoz-Piña et al., 2011).

Los ecosistemas forestales proveen, directa o indirectamente, beneficios a la sociedad, ya que contribuyen a satisfacer necesidades humanas particulares, a través de los servicios ambientales (Liu y Kontoleon, 2018; Small et al., 2017). El concepto de servicio ambiental se originó en la esfera económica, como un intento para valorar los beneficios intangibles que proveen los ecosistemas y para trascender una visión solamente de eficiencia económica, hacia la búsqueda de la sostenibilidad ecológica y la equidad social (Constanza, 2000). La publicación del trabajo Ecosistemas y Bienestar Humano: Síntesis (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) es considerada como el inicio de la revisión del concepto de los servicios ambientales para el desarrollo de marcos empíricos y conceptuales y su aplicación en el uso sostenible de los ecosistemas (La Notte et al., 2017). El instrumento económico a través del cual se ha aplicado este concepto es el esquema de Pagos de Servicios Ambientales (PSA), el cual consiste en dar incentivos a los usuarios de las tierras forestales para que protejan o mejoren el abastecimiento de dichos servicios (Börner et al., 2017). El mayor énfasis se ha puesto en el mantenimiento de los servicios: protección de la biodiversidad, protección del agua, mitigación de las emisiones de los gases efecto invernadero y la provisión del paisaje (Arriagada et al., 2012).

El Programa de Pagos por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) se inició en México en 2003 y en 2004 se inició el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento

de los Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA) (CONAFOR, 2011). El PSAH es un instrumento de política pública nacional para atender los problemas del agua y la deforestación en el país (Muñoz-Piña et al., 2008). Este Programa consiste en otorgar una compensación económica a los propietarios y poseedores por los servicios ambientales hidrológicos derivados del buen estado y conservación de bosques y selvas del país. A través del Programa se pretende que quienes se benefician de los servicios hidrológicos del ecosistema paguen de manera directa y contractual a los dueños de las tierras, para garantizar, así, la conservación de los ecosistemas y la provisión de los servicios ambientales. En el periodo 2003-12 en la región Iztacihuatl-Popocatepetl, compuesta por nueve municipios del estado de Puebla, México, la CONAFOR apoyó 37 proyectos de PSAH en una superficie 13,308.3 ha, por un monto de \$mex.23,231,106.

No obstante, una deficiencia del PSAH es la falta de seguimiento y evaluación a estos proyectos. En el país se han realizado estudios sobre el proceso de diseño de este Programa, así como de los actores involucrados en él y sus reglas de operación y los retos de la focalización del programa (García-Amado et al., 2011; Muñoz-Piña et al., 2008; Muñoz-Piña et al., 2011); pero aún faltan estudios para evaluar el impacto de los programas de pago por servicios ambientales sobre la cobertura forestal a nivel comunitario, ya que un requisito indispensable para que un área reciba el PSAH es mantener o aumentar, durante los 5 años que dura el contrato, un mínimo de 80% de cubierta forestal. Debido a que la información sobre los efectos del PSAH sobre la conservación de la cubierta forestal a nivel comunitario es limitada, el objetivo del presente estudio fue analizar el impacto del programa de PSAH sobre la conservación de la cubierta forestal en seis núcleos agrarios de la región Iztacihuatl-Popocatepetl, Puebla, apoyados con el programa de PSAH en el periodo 2003-09.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el área beneficiada por el PSAH de los núcleos agrarios ejido San Miguel Tianguistengo, ejido Santa Rita Tlahuapan, ejido San Andrés Hueyacatitla, ejido San Rafael Ixtapalucan, ejido Guadalupe Zaragoza y ejido San Felipe Teotlalcingo (Figura 1). Los primeros cuatro ejidos fueron beneficiarios del programa de PSAH en el periodo 2003-08 y los dos restantes en el periodo 2004-09. Los principales tipos de vegetación en el área de estudio son bosque de pino, bosque de pino-encino y bosque de oyamel.

Para evaluar los cambios en la cubierta vegetal se utilizaron dos imágenes multiespectrales del

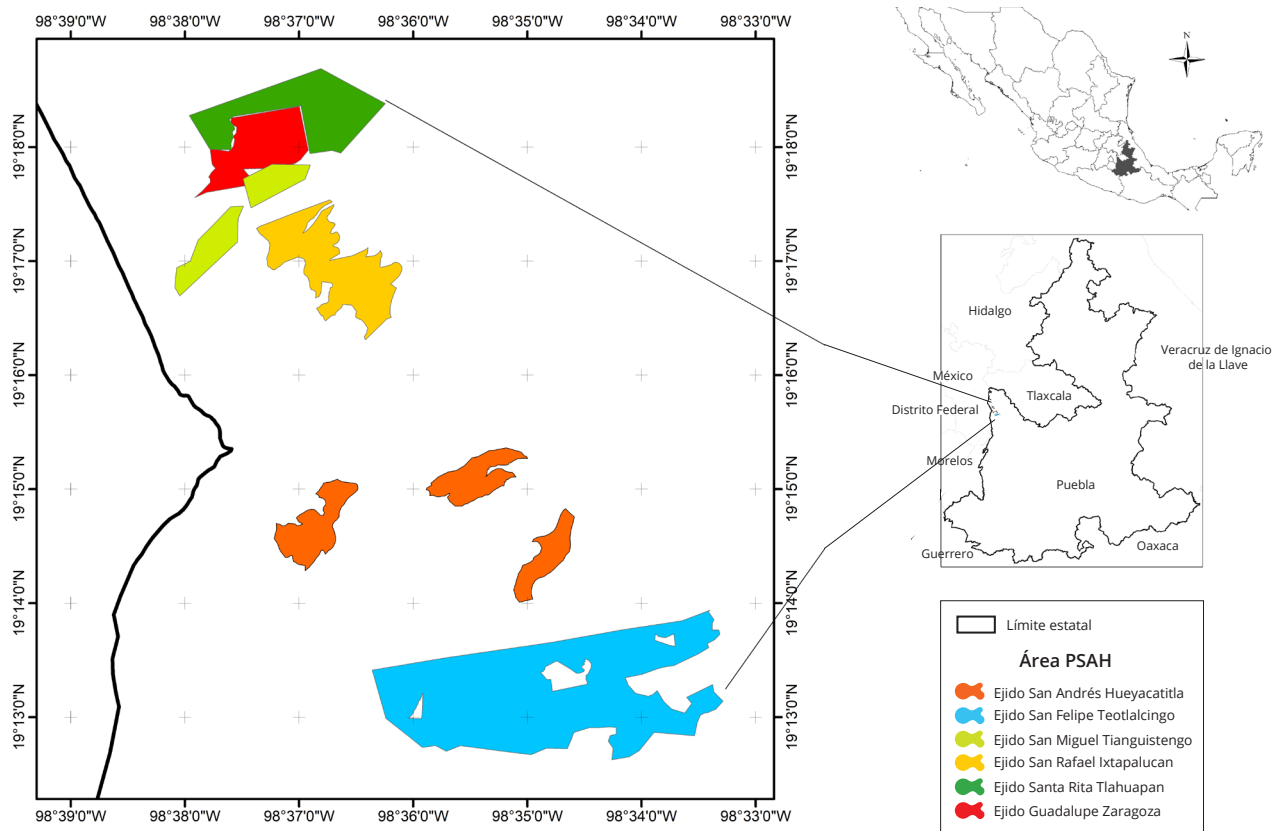


Figura 1. Área de estudio. Fuente: Comisión Nacional Forestal. Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

satélite Quickbird con resolución espacial de 2.44 m, una del 08 de agosto del 2003 y la otra del 21 de julio de 2009. Se utilizó la misma época del año para reducir la variabilidad que se presenta en las respuestas espectrales de las cubiertas vegetales debido a cambios fenológicos de la vegetación. Para disminuir distorsiones en las imágenes se realizó una corrección radiométrica y una corrección atmosférica (Huete et al., 2002).

Se realizó una clasificación supervisada con el software Erdas Imagine 2011. Se combinaron las bandas 2 (verde), 3 (roja) y 4 (infrarrojo), donde la vegetación, debido a su estructura celular, tiene mayor reflectividad. Como consecuencia de la alta resolución de las imágenes, las muestras de entrenamiento para cada clase se definieron tomando muestras de píxeles para las clases identificadas visualmente (Churches et al., 2014). Se definieron seis clases para la imagen de 2003: nube, suelo desnudo, sombra, pasto, arbusto y arbolado; y cinco clases para la imagen de 2009: suelo desnudo, sombra, pasto, arbusto y arbolado, debido a la ausencia de nubes. Cada clase tuvo mínimo 10 campos de entrenamiento y cada uno de estos estuvo compuesto, mínimo, por 40 píxeles (McCoy, 2005). Para la imagen de 2003, la clasificación de máxima verosimilitud (Otukey y Blaschke, 2010) fue realizada con 88

muestras de entrenamiento y para la imagen de 2009 con 103 muestras.

Como resultado, se obtuvo el área de cada clase para 2003 y 2009 con el fin de evaluar el cambio de la cobertura forestal por efecto del PSAH. Para determinar la exactitud de la clasificación se utilizó una matriz de confusión (McCoy, 2005) y el Índice Kappa (Olofsson et al., 2013). El resultado del análisis Kappa es el estadístico KHAT que mide la concordancia entre los datos de la clasificación y la realidad del suelo. Este método considera a los valores por encima de 0.8 como de alta concordancia, los valores que oscilan entre 0.8 y 0.4 como de concordancia moderada y los valores menores que 0.4 como de baja concordancia (Congalton y Green, 2008). La exactitud del productor se estimó como la proporción de sitios verificados que se ubicaron correctamente en el mapa generado; mientras que la exactitud del usuario es la probabilidad de seleccionar un punto al azar en cualquier categoría del mapa y que pertenezca realmente a la categoría presente en el terreno (Olofsson et al., 2013). Se generaron 120 puntos de referencia al azar para ser utilizados en la matriz de confusión. El valor de referencia de cada pixel de cada punto aleatorio se obtuvo de la combinación de bandas 1 (azul), 2 (verde) y 3 (rojo). Como derivado de

la clasificación supervisada se generaron dos mapas, uno para la imagen de 2003 y otro, para la imagen de 2009. Estos mapas fueron utilizados para calcular el área correspondiente a cada clase contando el número de píxeles.

Resultados

En la imagen de 2003 la clase suelo tuvo la mayor exactitud del productor (100%) y del usuario (100%). La clase arbolado tuvo 92.31%, siendo el segundo porcentaje más alto para la exactitud del productor, y 96% como tercer porcentaje más alto para la exactitud del usuario. El valor del Índice Kappa fue de 0.79 (concordancia moderada) y la precisión global de la clasificación fue del 88% (Tabla 1). La clase arbolado tuvo un mayor porcentaje en la exactitud del productor y del usuario en la imagen de 2003. Tanto la precisión global de la clasificación como el Índice Kappa fueron mayores para este año.

En la imagen de 2009 las clases suelo y arbusto tuvieron la mayor exactitud del productor (100%) y la clase sombra, la del usuario (100%). La clase arbolado tuvo 83.33% (tercer porcentaje más alto) para la exactitud del productor por arriba de los porcentajes de la clase sombra y pasto, y 93.33% (segundo porcentaje más alto) para la exactitud del usuario. El valor del índice Kappa fue de 0.65 (concordancia moderada) y la precisión global de la clasificación fue del 81.67% (Tabla 2).

Los seis núcleos agrarios presentaron cambios en su cobertura forestal (Figura 2). Los ejidos San Andrés Hueyacatitla y San Felipe Teotlalcingo perdieron cobertura forestal. Por el contrario, los ejidos San Rafael Ixtapalucan, San Miguel

Tianguistengo, Guadalupe Zaragoza y Santa Rita Tlahuapan incrementaron su cobertura forestal durante su participación en el programa de PSAH (Figura 3).

En el ejido San Andrés Hueyacatitla ocurrieron las pérdidas de cobertura vegetal más alta (67.25 ha) lo que representa una disminución de 15.44%; mientras que el ejido Guadalupe Zaragoza presentó un incremento de 13.55 ha de cobertura vegetal, equivalente a una ganancia de 16.77% (Tabla 3).

Discusión

De acuerdo con la escala utilizada para determinar la exactitud de la clasificación (Congalton y Green, 2008), cuyo valor de Kappa entre 0.8 y 0.4 se considera como de concordancia moderada, y asumiendo que el valor mínimo estandarizado y aceptado para la precisión de la clasificación global es de 85% (Foody, 2002), los resultados obtenidos por el Índice Kappa y la precisión global para la imagen de 2003 muestran que es posible diferenciar las clases de cobertura forestal. Aunque el resultado obtenido para la precisión global en la imagen de 2009 es inferior a 85%, también es posible diferenciar las clases precisadas, resultado similar a lo encontrado por Arenas et al. (2011). El error asociado con la precisión de la clasificación en conjunto podría ser, en gran parte, debido a la falta de capacidad para diferenciar espectralmente la cobertura de arbustos y herbáceas de la cobertura arbórea utilizando solo las bandas 2 (verde), 3 (roja) y 4 (infrarrojo), como lo explican Churches et al. (2014) en un estudio similar.

Tabla 1. Matriz de confusión utilizada para determinar la exactitud de la clasificación de la imagen de 2003. Iztaccihuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

Componente	Nube	Sue- lo	Som- bra	Pas- to	Ar- busto	Arbo- lado	Total
Nube	0	0	0	0	0	0	0
Suelo	0	7	0	0	0	0	7
Sombra	0	0	13	0	0	0	13
Pasto	0	0	0	1	2	2	5
Arbusto	0	0	4	0	13	4	21
Arbolado	0	0	1	2	0	72	75
Total	0	7	18	3	15	78	120
Exactitud del productor (%)	—	100	72.22	33.33	86.67	92.31	—
Exactitud del usuario (%)	—	100	100	20	61.9	96	—
Precisión global (%)	88	—	—	—	—	—	—
Índice Kappa global	0.79	—	—	—	—	—	—

Tabla 2. Matriz de confusión utilizada para determinar la exactitud de la clasificación de la imagen de 2009. Iztaccihuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

Componente	Suelo	Som- bra	Pasto	Arbusto	Arbo- lado	Total
Suelo	6	0	2	0	2	10
Sombra	0	3	0	0	0	3
Pasto	0	1	14	0	6	21
Arbusto	0	0	0	5	6	11
Arbolado	0	1	4	0	70	75
Total	6	5	20	5	84	120
Exactitud del productor (%)	100	60	70	100	83.33	—
Exactitud del usuario (%)	60	100	66.67	45.45	93.33	—
Precisión global (%)	81.67	—	—	—	—	—
Índice Kappa global	0.65	—	—	—	—	—

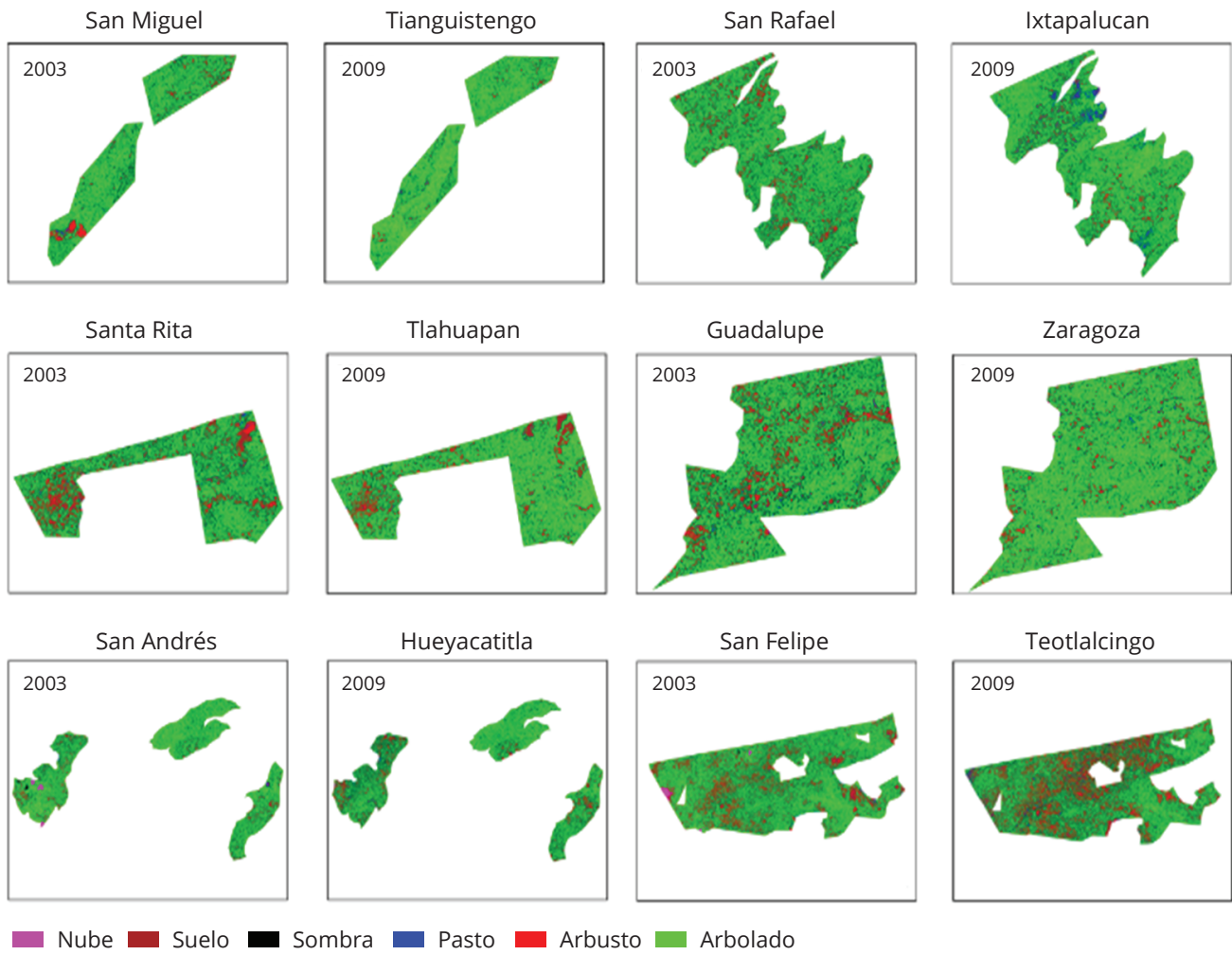


Figura 2. Cambios en cobertura vegetal de los ejidos incluidos en el estudio en el periodo 2003 - 09. Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

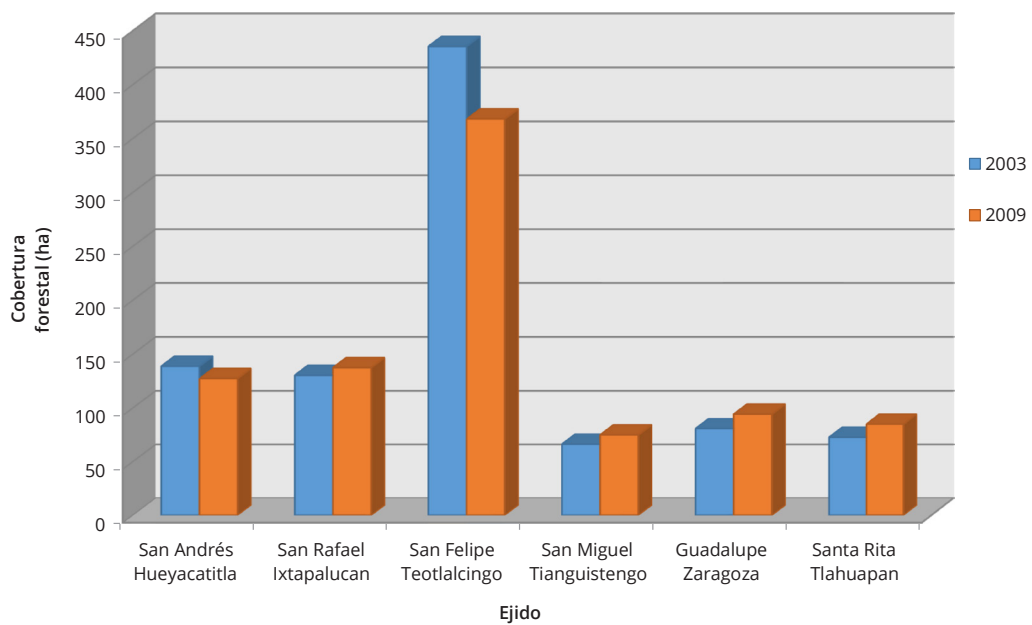


Figura 3. Superficie con cambio de cobertura forestal en los ejidos en el periodo 2008 - 09. Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

Tabla 3. Cambio de cobertura forestal a través del tiempo en seis núcleos agrarios. Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México.

Ejido	2003 (ha)	2009 (ha)	Cambio de cobertura (ha)	Cambio de cobertura (%)
San Andrés Hueyacatitla	138.83	127.50	-11.33	-8.16
San Rafael Ixtapalucan	130.46	137.51	7.05	5.4
San Felipe Teotlalcingo	435.59	368.34	-67.25	-15.44
San Miguel Tianguistengo	66.31	74.96	8.65	13.04
Guadalupe Zaragoza	80.79	94.34	13.55	16.77
Santa Rita Tlahuapan	72.80	84.98	12.18	16.73
Total	924.78	887.63	-37.15	-4.01

Los resultados de esta investigación muestran que el objetivo del programa se cumplió en cuatro ejidos (San Rafael Ixtapalucan, San Miguel Tianguistengo, Guadalupe Zaragoza y Santa Rita Tlahuapan) de los seis estudiados, ya que la cubierta forestal aumentó 41.43 ha en los 5 años que duró el contrato del Programa de PSAH. En los ejidos San Andrés Hueyacatitla y San Felipe Teotlalcingo se registró una pérdida total de 78.58 ha, por lo que se considera que no se cumplió con el objetivo del programa. La deforestación fue el factor principal de deterioro de la cobertura forestal, lo que incidió y limitó el éxito del programa de PSAH, asociado a la tala ilegal, la extracción intensiva de resina de pino y la producción de carbón de encino por las comunidades locales, para quienes el bosque es la principal fuente de ingresos y la única fuente de energía.

El ejido San Felipe Teotlalcingo, que participó con mayor superficie en el PSAH, (722 ha), equivalente al 65% de las tierras de uso común en el ejido, fue el que perdió la mayor cantidad de cobertura arbórea (67.25 hectáreas). En contraste, El ejido San Miguel Tianguistengo, que recibió apoyo del programa de PSAH en una superficie de solamente de 96 ha, que representan 55% del total de la superficie de uso común del ejido, presentó un incremento de cobertura arbórea de 8.65 ha. En el caso del ejido San Andrés Hueyacatitla, que recibió apoyo en 10% del total de su superficie de uso común, fue el segundo en perder mayor cobertura arbórea (11.33 ha); mientras que el ejido Santa Rita Tlahuapan fue el segundo en ganar superficie arbórea (12.18 ha) y solo recibió apoyo en 7% de la superficie de uso común. La pérdida de cobertura arbórea puede estar relacionada con la falta de conocimiento de los propietarios sobre el cuidado del área apoyada por el Programa de PSAH.

Las tendencias de cambios de cobertura forestal encontradas en el presente estudio fueron similares a las encontradas por Scullion et al. (2011), quienes en Coatepec, México, estudiaron el impacto de los pagos por servicios ambientales utilizando teledetección y entrevistas. Estos autores encontraron que los propietarios de terrenos que recibieron pagos de PSAH tenían un mayor nivel de conservación que aquellos que no recibieron pagos; aunque en ambos casos ocurrió la pérdida de cobertura, en los primeros la pérdida fue menor. Encontraron, además, que en los ecosistemas de bosque de pino y bosque mesófilo, los terrenos de los propietarios que recibieron pago perdieron 3 ha y 98 ha de cobertura forestal, respectivamente, y en los que no recibieron pago estas pérdidas fueron de 60 ha y 362 ha. Estos incrementos en deforestación fueron debidos a la expansión de actividades agrícolas como plantaciones de café, pasturas, agricultura mixta y plantaciones de caña de azúcar.

Para la época del presente estudio, en México no existían estudios sobre programas de PSAH con resolución espacial similar que sirvieran como referencia. Tomando como referencia resultados en otros países, se puede decir que el impacto de los programas tiene un efecto pequeño (< 1%) en la reducción de la deforestación (Pfaff et al., 2008; Robalino et al., 2008). Generalmente, en estos estudios se ha encontrado que los ejidos con programas PSAH tienen más cobertura forestal que aquellos que no cuentan con él (Ortiz Malavasi et al., 2003; Sierra y Russman, 2006; Zbinden y Lee, 2005). Por otra parte, debido a factores de sesgo en la selección de la muestra y a la utilización de diferentes metodologías es difícil comparar resultados de los programas de PSAH (Sills et al., 2008).

Conclusiones

El Programa de Pagos de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) tuvo un efecto positivo parcial sobre la dinámica de la cobertura arbórea, ya que en cuatro de los seis ejidos analizados se encontró un aumento en superficie arbolada. La pérdida de cobertura arbórea en dos ejidos indica que hay factores locales que inciden negativamente en el cumplimiento del objetivo del Programa.

Referencias

- Arenas, S., Haeger, J. F. y Jordano, D. 2011. Aplicación de técnicas de teledetección y GIS sobre imágenes Quickbird para identificar y mapear individuos de peral silvestre (*Pyrus bourgeana*) en bosque esclerófilo mediterráneo. Rev. Teledet. 35:55-71. http://www.aet.org.es/revistas/revista35/Numero35_07.pdf.

- Arriagada, R.A., Ferraro, P.J., Sills, E.O., Pattanayak, S.K., y Cordero-Sancho, S. 2012. Do payments for environmental services affect forest cover? A farm-level evaluation from Costa Rica. *Land Econ.* 88(2):382-399. doi: 10.3368/le.88.2.382.
- Börner, J., Baylis, K., Corbera, E., Ezzine-De-Blas, D., Honey-Rosés, J., Persson, U.M., y Wunder, S. 2017. The effectiveness of payments for environmental services. *World Devel.* 96:359-374. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.03.020>.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Servicios ambientales y cambio climático. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/24/2727DOSSIER.pdf>.
- Congalton, R. G., y Green, K. 2008. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. USA. CRC press.
- Constanza, R. 2000. Social goals and the valuation of ecosystem services. *Ecosystems* 3:4-10. DOI: 10.1007/s100210000002.
- Churches, C. E., Wampler, P. J., Sun, W., y Smith, A. J. 2014. Evaluation of forest cover estimates for Haiti using supervised classification of Landsat data. *International. J. Applied Earth Observ. Geoinf.* 30:203-216. doi:10.1016/j.jag.2014.01.020.
- Foody, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80(1):185-201. Doi: 10.1016/S0034-4257(01)00295-4.
- García-Amado, L. R., Pérez, M. R., Escutia, F. R., García, S. B., y Mejía, E. C. 2011. Efficiency of Payments for Environmental Services: Equity and additionality in a case study from a Biosphere Reserve in Chiapas, Mexico. *Ecol. Econ.* 70(12):2361-2368. doi: 10.1016/j.ecolecon.2011.07.016.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., y Ferreira, L. G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1):195-213. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- La Notte, A., D'Amato, D., Mäkinen, H., Paracchini, M.L., Liqueste, C., Egoh, B., Geneletti, D., y Crossman, N.D. 2017. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecol. Indic.* 74:393-402. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.030>.
- Liu, Z., y Kontoleon, A. 2018. Meta-Analysis of livelihood impacts of payments for environmental services programmes in developing countries. *Ecol. Econ.* 149:48-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.02.008>.
- McCoy, R. M. 2005. *Field Methods in Remote Sensing*. New York, USA. Guilford Press. <https://www.guilford.com/books/Field-Methods-in-Remote-Sensing/Roger-McCoy/9781593850791>.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M., y Braña, J. 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecol. Econ.* 65(4):725-736. doi: 10.1016/j.ecolecon.2007.07.031.
- Muñoz-Piña, C., Rivera, M., Cisneros, A., y García, H. 2011. Retos de la focalización del Programa de Pago por los Servicios Ambientales en México. *Rev. Esp. Est. Agrosoc. Pesq.* 228(1):87-113. <https://estevecorbera.files.wordpress.com/2010/08/special-issue-pes-2011-spanish.pdf>.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Stehman, S. V., y Woodcock, C. E. 2013. Making better use of accuracy data in land change studies: Estimating accuracy and area and quantifying uncertainty using stratified estimation. *Rem. Sens. Environ.* 129:122-131. doi: 10.1016/j.rse.2012.10.031.
- Ortiz Malavasi, E., Sage Mora, L. F., y Borge Carvajal, C. 2003. Impacto del Programa de Pago de Servicios Ambientales en Costa Rica como medio de reducción de la pobreza en los medios rurales. Serie de Publicaciones RUTA. San José, Costa Rica: Unidad Regional de Asistencia Técnica. Recuperado de: <http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/ICAP/UNPAN027094.pdf>.
- Otukei, J.R., y Blaschke, T. 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *Intern. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.* 12:27-31. doi: 10.1016/j.jag.2009.11.002.
- Pfaff, A., Robalino, J. A., and Sanchez-Azofeifa, G. A. 2008. Payments for environmental services: empirical analysis for Costa Rica. Working Papers Series SAN08-05. Durham, USA: Terry Sanford Institute of Public Policy, Duke University. Recuperado de: <http://people.duke.edu/~asp9/files/PSAeffects%20SAN08-05.pdf>.
- Reyes, D.G.J., Mas, J.M. y Velázquez, A. 2010. Trends of tropical deforestation in Southeast Mexico. *Singapore J. Trop. Geogr.* 31(2):180-196. doi 10.1111/j.1467-9493.2010.00396.x.
- Robalino, J., Pfaff, A., Sanchez-Azofeifa, G. A., Alpizar, F., León, C., y Rodríguez, C. M. 2008. Deforestation impacts of environmental services payments: Costa Rica's PSA program 2000-2005. Discussion Paper EfD DP 08-24. Environment for Development. Recuperado de: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/EfD-DP-08-24.pdf>.
- Scullion, J., Thomas, C. W., Vogt, K. A., Perez-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. *Environ. Conserv.* 38(04):426-434. doi: 10.1017/S037689291100052X.
- SEMARNAT. 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. Recuperado de: https://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Informe_2012.pdf.
- Sierra, R., y Russman, E. 2006. On the efficiency of environmental service payments: a forest conservation assessment in the Osa Peninsula, Costa Rica. *Ecol. Econ.* 59(1):131-141. doi: 10.1016/j.ecolecon.2005.10.010.

- Sills, E., Arriagada, R., Ferraro, P., Pattanayak, S., Carrasco, L., Ortiz, E., Cordero, S., Caldwell, K., and Andam, K. 2008. Impact of the PSA Program on Land Use. In G. Platais and S. Pagiola (Eds.), *Ecomarkets: Costa Rica's Experience with Payments for Environmental Services* (pp 1-22. The World Bank, Washington, DC. Recuperado de: <http://siteresources.worldbank.org/INTEEI/214574-1112740068165/22251637/CostaRica09-LandUseChange.pdf>.
- Small, N., Munday, M., and Durance, I. 2017. The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits. *Global Environmental Change*, 44:57-67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.03.005>
- Zbinden, S., y Lee, D. R. 2005. Paying for environmental services: an analysis of participation in Costa Rica's PSA program. *World Develop.* 33(2):255-272. doi: 10.1016/j.worlddev.2004.07.012.