



# La deforestación y sus factores causales en el estado de Sinaloa, México

## Deforestation and its causal factors in Sinaloa, Mexico

Sergio A. Monjardín-Armenta<sup>1</sup>, Carlos E. Pacheco-Angulo<sup>2</sup>, Wenseslao Plata-Rocha<sup>1</sup> y Gabriela Corrales-Barraza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>2</sup> Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Mérida, Venezuela.

\* Autor de correspondencia. sa.monjardin12@info.uas.edu.mx

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue estudiar la deforestación y sus causas en el estado de Sinaloa, México. Para ello, se utilizó la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación del año 1993 y 2011 a escala 1:250 000, con esta se estimó la deforestación mediante una técnica de detección de cambios; posteriormente, se caracterizó la deforestación mediante la consulta a expertos. Por último, se aplicó la matriz de cambios para analizar las pérdidas, ganancias y transiciones y corroborar cartográficamente lo obtenido por los expertos y la detección de cambios. Los resultados indican una deforestación de 126.50 km<sup>2</sup>/año y una tasa media anual de 0.41%. De la consulta a expertos se determinó que las principales causas de estos procesos son la expansión agrícola y la extensión de infraestructura con un impacto de 49.40% y 18.8%, respectivamente. En cuanto a la matriz de cambios, se determinó que especialmente la categoría de selvas perdió 2374.19 km<sup>2</sup>, por el contrario, la agricultura de temporal también se extendió 3326.62 km<sup>2</sup> y la categoría de asentamientos humanos pasó de tener 191.51 km<sup>2</sup> a 623.28 km<sup>2</sup>.

**PALABRAS CLAVE:** cartografía, consulta a expertos, matriz de cambios, modelo causal, uso de suelo y vegetación.

### ABSTRACT

The objective of this research was to study deforestation and its causes in the state of Sinaloa, Mexico. Using mapping of land use and vegetation in 1993 and 2011 at a scale of 1: 250 000, deforestation was estimated through a technique of detecting changes, and then characterized by consulting experts. Finally, a matrix of change was applied to analyze the losses, gains and transitions and to corroborate cartographically the results obtained by the experts and the detection of changes. The results indicate a deforestation of 126.50 km<sup>2</sup>/year and an average annual rate of 0.41%. The consultation of experts determined that the main causes of these processes are agricultural expansion and extension of infrastructure, with impacts of 49.40% and 18.8%, respectively. The matrix of change showed that the particular category of rainforest lost 2374.19 km<sup>2</sup>, on the contrary, seasonal agriculture also increased by 3326.62 km<sup>2</sup> and human settlements increased from 191.51 km<sup>2</sup> to 623.28 km<sup>2</sup>.

**KEY WORDS:** mapping, expert consultation, matrix of change, causal model, land use and vegetation.

### INTRODUCCIÓN

La deforestación es la conversión directa, inducida por el hombre, de tierras forestales a tierras no forestales (United Nations, 1992). Una de las últimas evaluaciones más importantes fue realizada por Hansen *et al.* (2013), los cuales obtuvieron una pérdida de 2.3 millones de kilómetros cuadrados y una ganancia de 0.8 millones de kilómetros cuadrados de bosques a nivel global durante el periodo 2000-2012. Así mismo, Recursos Forestales

Mundiales (Global Forest Resources Assessment, FRA) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization, FAO) estimó que las tasas de deforestación han disminuido los últimos cinco años, presentando una pérdida de 76 000 km<sup>2</sup>/año y una ganancia de 43 000 km<sup>2</sup>/año, lo que equivale a una pérdida neta anual de 33 000 km<sup>2</sup>/año a nivel mundial en el periodo 2010-2015 (FRA, 2015).

También se ha estimado que la deforestación aporta aproximadamente entre diez y veinte por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (Pacheco, Aguado, Vilanova y Martínez, 2012), lo que afecta negativamente al funcionamiento global del medio ambiente y produce un conjunto de cambios que interfieren en el clima, en el ciclo de carbono, en la pérdida de biodiversidad, el sumidero de agua potable, entre otros sistemas naturales (Lepers *et al.*, 2005; Lambin y Meyfroidt, 2010; Meyfroidt, Rudel y Lambin, 2010). Algunos autores deducen que este proceso es provocado principalmente por el crecimiento de la superficie dedicada a la agricultura (Lambin, Geist y Lepers, 2003; Rudel, DeFries, Asner y Laurance, 2009) y por el incremento acelerado de la población urbana (De Fries, Rudel, Uriarte y Hansen, 2010).

Dicha problemática se ha analizado a escala global (FAO, 2010; Hansen *et al.*, 2013; FRA, 2015), regional (Achard *et al.*, 2014; Organización del Tratado de Cooperación Amazónica, 2014; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014; Forest Survey of India, 2014; Bartalev, Kissiyar, Achard, Bartalev, y Simonetti, 2014) y local (Potapov, Hansen, Stehman, Loveland y Pittman, 2008; Asner, Knapp, Balaji y Pérez-Acosta, 2009), contemplando que para estimar la deforestación de manera precisa es necesario trabajar con escalas que van de 1:25 000 a 1:50 000 (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics [GOFC-GOLD], 2013).

En el caso de México se han realizado una diversidad de trabajos enfocados en el estudio de la dinámica territorial de todo el país, algunos de estos hacen referencia a cambios, fragmentación y predicción de usos y coberturas de suelo, pérdida de bosques y selvas, evaluación de la deforestación y cálculo de sus tasas y agricultura (Mas *et al.*, 2004; Rosete-Vergés *et al.*, 2014; Couturier, Núñez y Holb, 2012; Sánchez-Colón, Flores-Martínez, Cruz-Leyva y Velázquez, 2009; Velázquez, Mas, Bocco y Palacio-Prieto, 2008; Bonilla-Mhoeno, Redo, Aide, Clark y Grau, 2013; Skutsch *et al.*, 2013; Torres, Magaña y Moreno, 2008; Velázquez *et al.*, 2002a; Velázquez *et al.*, 2002b; Armenta *et al.*, 2016), y en particular se han desa-

rollado otra cantidad importante para áreas de estudio específicas, tal es el caso del trabajo desarrollado por Bocco, Mendoza y Masera (2001) sobre la dinámica de los cambios de uso de suelo en Michoacán; el estudio de García, López, Moreno, Villers y García (2000) que realizó la delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en Celaya, Guanajuato; la investigación desarrollada por Miranda-Aragón *et al.* (2012) para obtener las tasas de deforestación en San Luis Potosí; el estudio sobre la deforestación y deterioro de selvas tropicales en Uxpanapa, Veracruz realizada por Hernández, Ellis y Gallo *et al.* (2013) y finalmente la tesis de Corrales (2013) en la cual estudió los cambios en la cobertura para el estado de Sinaloa en el periodo de 1976 a 2006.

Hoy en día existe una diversidad de técnicas para analizar la deforestación, tales como: detección de cambios, álgebra de mapas, matriz de cambios, transformaciones, análisis multitemporal, y mediante el procesamiento digital de imágenes de satélite (Chuvieco, 2008; Pontius, Shusas y McEachern, 2004; Pacheco, Aguado y Mollicone, 2011). Asimismo, para indagar y comprender los actores de los procesos de deforestación que impulsan la pérdida de cobertura forestal se han realizado estudios mediante técnicas de análisis exploratorio de datos, regresiones, estadísticas bayesianas, redes neuronales (Lesscheen *et al.*, 2005), así como también mediante la revisión de literatura publicada por expertos (Lambin y Meyfroidt, 2010; Lambin *et al.*, 2003; Geist y Lambin, 2001). Sin embargo, la gran mayoría de los trabajos sobre deforestación se enfocan en determinar de manera cuantitativa las pérdidas, ganancias y tasas de deforestación o, por lo contrario, solo se enfocan en estudiar los factores causales sin realizar el enlace entre estas dos vertientes.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue realizar un estudio integral que permitiera analizar la deforestación de manera cuantitativa y cualitativa mediante análisis geoespacial y técnicas estadísticas. En lo particular, esto permitirá obtener, además de la cartografía y superficie de



pérdida de cobertura forestal, los factores o causantes de los procesos de deforestación y verificar estos a partir de un análisis espacial mediante la matriz de cambios, ya que esta contempla el beneficio de corroborar las ganancias y pérdidas forestales además de indicar las transiciones entre los usos y coberturas de suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El presente trabajo se enmarca en el Estado de Sinaloa, localizado en el noroeste de México, entre los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Nayarit y el Océano Pacífico (Fig. 1). Contempla 18 municipios de diferentes características fisiográficas que van desde la zona litoral, pasando por un extenso valle y hasta la Sierra Madre Occidental (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2015). En 1976, Sinaloa estuvo ocupado por 55.97% de cobertura de bosques y selvas, misma que para el año 2006 disminuyó a 49.54%, es decir, se perdieron 368 056 ha (Corrales, 2013). Lo anterior indica que el estado de Sinaloa sufre una pérdida significativa de cobertura forestal, por lo que es necesario describir y analizar a profundidad esta problemática así como sus causas principales y secundarias debido a las complicaciones ambientales que provoca y que afectan a las principales actividades socioeconómicas del estado como lo son: la agricultura, la ganadería, la pesca y el turismo.

### Materiales

Para el análisis de la deforestación se utilizaron los mapas de usos de suelo y vegetación (USyV) del estado de Sinaloa de los años 1993 y 2011 a escala 1:250 000, los cuales se obtuvieron a través del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Dichos mapas tienen una leyenda que consta de 17 y 14 categorías de usos de suelo respectivamente, por lo que fue necesario homogeneizar y reclasificar las categorías en función del derivado clasificatorio del Inventario Nacional Forestal de México (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2015) y los principales usos de suelo y vegetación del estado de Sinaloa, quedando finalmente dos mapas

con las 10 categorías siguientes: agricultura de riego y humedad, agricultura de temporal, asentamiento humano, bosque, cuerpo de agua, matorral, otros tipos de vegetación, pastizales, selvas y vegetación hidrófila (Fig. 2).

Por otro lado, cabe mencionar que se utilizaron los resultados de 30 encuestas que se aplicaron a personas expertas en temas forestales a nivel nacional y regional.

Asimismo, para el procesamiento de la información cartográfica se utilizaron los *softwares* ArcGis, Idrisi y GvSIG.

### Metodología

La metodología del estudio consta de tres etapas: 1) obtención de la deforestación a partir de la cartografía de USyV; 2) consulta a expertos para determinar los elementos causales de la deforestación; y 3) verificación, mediante un análisis de cambios de uso y coberturas de suelo, de los factores conductores de la deforestación derivados de la consulta a los expertos (Fig. 3).

En la primera etapa se generaron dos mapas a partir de los mapas de la figura 2, con la leyenda de bosque (categorías de bosques y selvas) y no bosque (todas las demás categorías), con los cuales se realizó el análisis de la pérdida de cobertura de bosques y selvas. Posteriormente, se aplicó una técnica de detección de cambios, específicamente la diferencia entre mapas, para obtener la cartografía de pérdida de bosques y selvas (1993-2011), y la tasa media anual (TMA) de deforestación, utilizando la ecuación (1) empleada por Sader y Armond (1988):

$$TMA = \frac{((B1-B2)*100)}{B1*N} \quad (1)$$

Donde:

B1 y B2 es la cobertura de bosques en las diferentes fechas  
N es el número de años evaluado.

En segundo lugar, se realizó una consulta a expertos con la finalidad de determinar los elementos causales de la deforestación. Para ello se contó con la opinión vía encuesta de especialistas forestales y ambientales de diferentes instituciones como: la Comisión Nacional Forestal

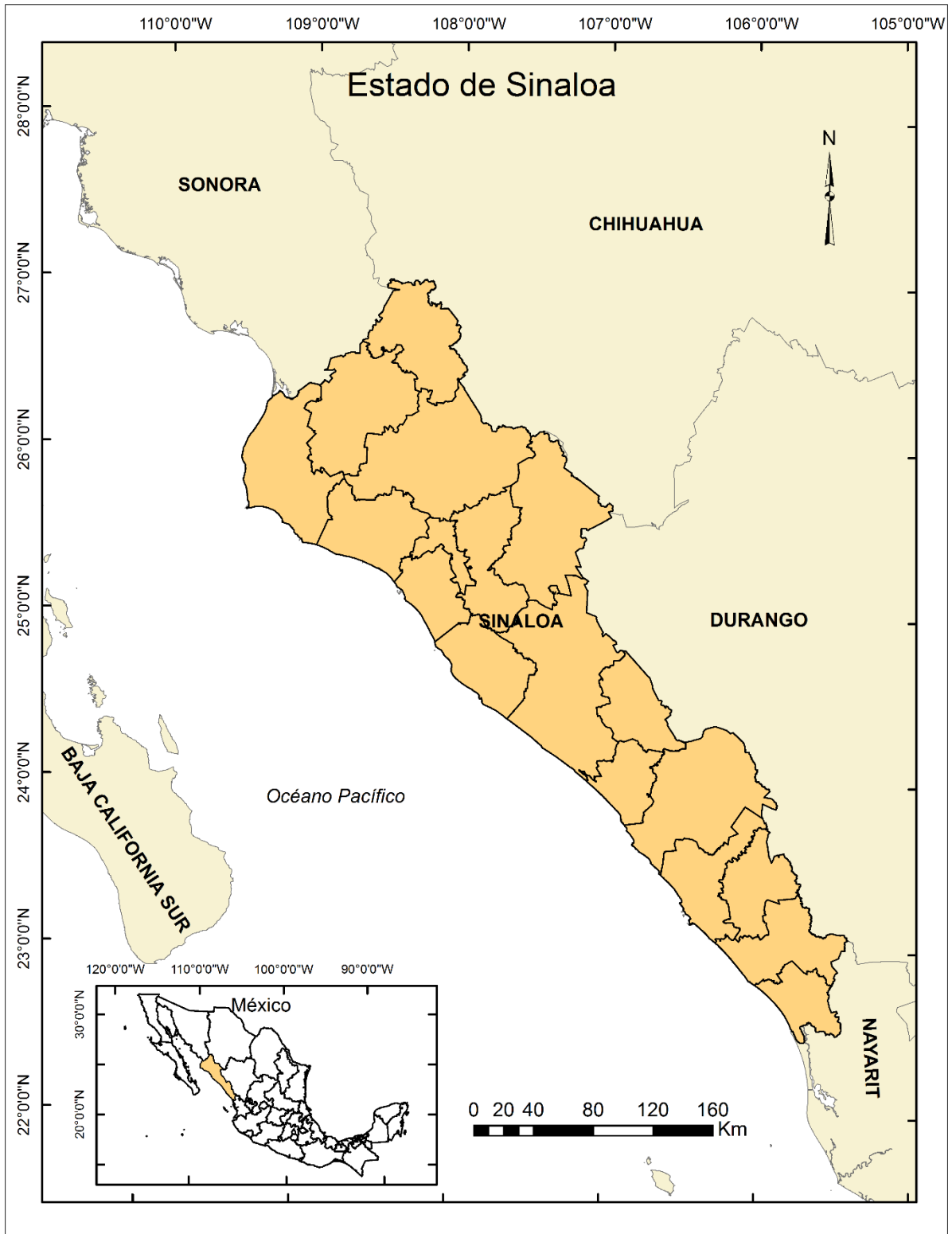


FIGURA 1. Localización geográfica del área de estudio.

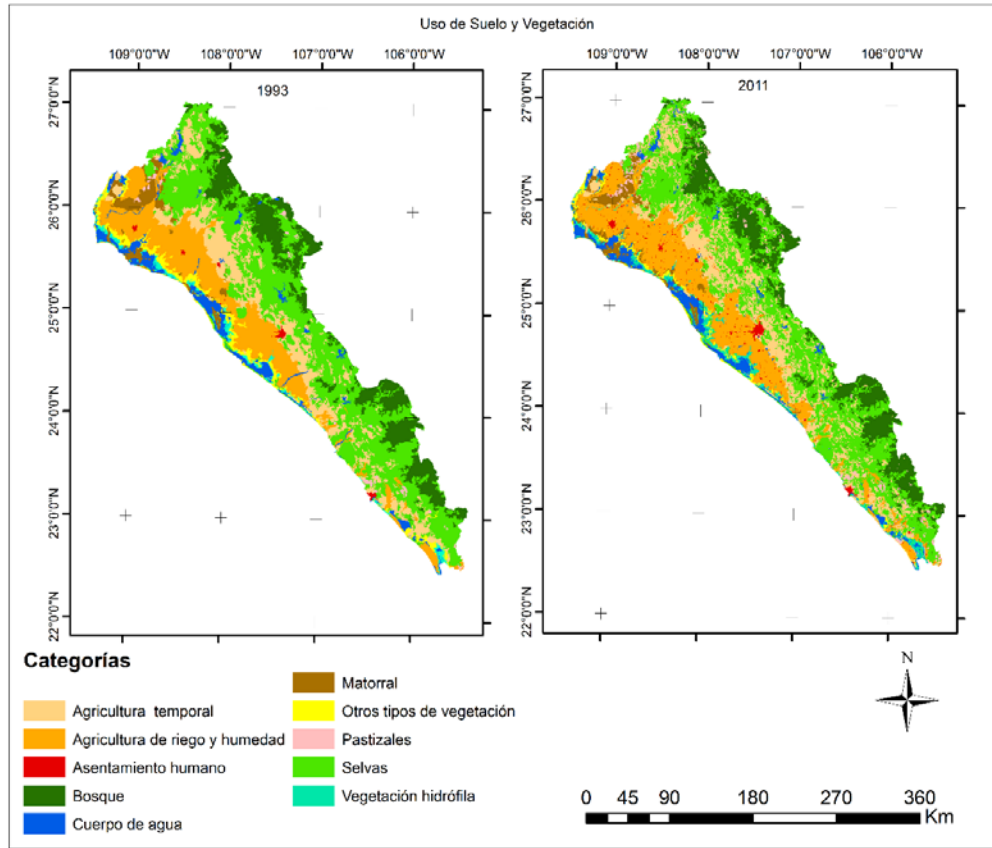


FIGURA 2. Mapas de usos de suelo y vegetación de los años 1993 y 2011.

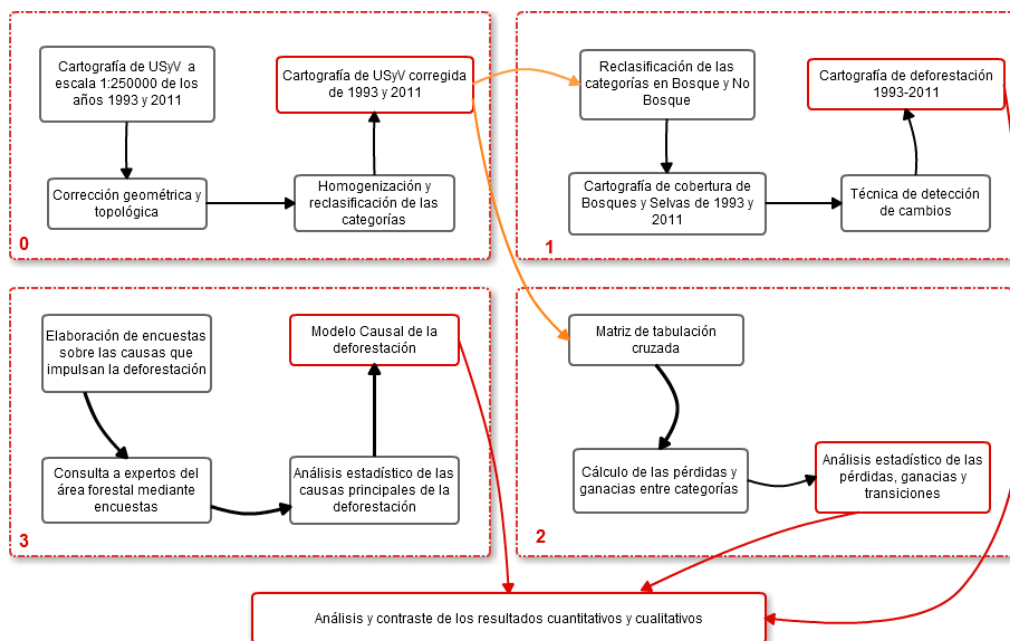


FIGURA 3. Esquema metodológico.

(Conafor), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa), la Dirección Forestal del Gobierno del Estado de Sinaloa, el Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación, la Universidad Autónoma del Estado de México, y de investigadores de la Universidad Autónoma de Sinaloa.

A estos expertos se les aplicó una encuesta diseñada en función de los elementos causales de la deforestación de los países del cinturón tropical (Geist y Lambin, 2001) los cuales se adaptaron a las condiciones propias del estado de Sinaloa acorde con el periodo y con los espacios geográficos determinados, tal cual y como se han realizado en otras áreas de estudio (Pineda, 2010, Pacheco *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2013).

En este caso, los elementos causales de deforestación que se adaptaron e identificaron se dividieron en dos grandes grupos: el primero corresponde a las causas principales, las cuales generan de manera inmediata los procesos de deforestación como son: la expansión agrícola, la extensión de infraestructuras, la explotación maderera, la explotación minera y la presencia de conflictos sociales. Estas causas directas son motivadas por un segundo grupo de causas subyacentes o secundarias que involucran a factores: demográficos, económicos, tecnológicos, políticos, institucionales y culturales. La identificación de cada uno de estos elementos se subdivide en función de las actividades que se desarrollen en el área de estudio.

Una vez obtenidas las encuestas se contabilizaron las frecuencias de los elementos causales principales y secundarios y sus subdivisiones, en función de la aparición de los mismos durante el periodo de 1993 a 2011. Esto permitió conocer porcentualmente la influencia de cada uno de ellos dentro de los procesos de deforestación en el estado de Sinaloa. En función de estos porcentajes se realizó un análisis para establecer la relación de las causas secundarias sobre las causas principales y viceversa.

Finalmente, en la tercera etapa de la metodología se realizó el análisis de los cambios de uso y coberturas de

suelo mediante la metodología desarrollada por Pontius *et al.* (2004) y Pontius y Santacruz (2014) empleando los mapas con las 10 categorías, lo cual permitió obtener para cada uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre categorías en el periodo 1993 y 2011. En particular, en esta etapa se verificó cuáles fueron las principales transiciones desde y hacia las coberturas de bosques y selvas con la finalidad de conocer y comparar la concordancia de los resultados de los elementos causales generados de la consulta de expertos y dichas transiciones.

## RESULTADOS

En una primera instancia y como resultado de la primera etapa de la metodología se determinó, a partir de la cartografía obtenida de bosques y selvas (Fig. 4), que para el año 1993 el estado de Sinaloa poseía una superficie de 30 377 km<sup>2</sup> de cobertura, es decir, 52.95% del territorio del estado, mientras que para el 2011 estas mismas coberturas mostraron una superficie de 28 100 km<sup>2</sup>, lo que representó 48.98%.

La diferencia de la cobertura de bosques y selvas de los años de 1993 y 2011 arrojó una pérdida forestal de 2277.18 km<sup>2</sup>, correspondiente a 3.97% y una tasa media anual de deforestación de 0.41%, cifra que está por encima del promedio anual del país que oscila entre 0.35% y 0.40% de acuerdo con la FAO (2010); aunque otros estudios a nivel nacional revelan tasas de deforestación mucho más elevadas (Mas *et al.*, 2004; Rosete *et al.*, 2014; Sánchez-Colón *et al.*, 2009).

En la figura 5 se observan las áreas de deforestación en el estado, y en la tabla 1 se muestran los datos de superficie total, su pérdida y la tasa media anual a nivel municipio. A partir de esto se visualiza que el municipio de San Ignacio cuenta con la mayor cobertura de bosques del estado, seguido de Sinaloa de Leyva y Badiraguato.

Por su parte, los municipios que presentan mayor superficie de deforestación son: Badiraguato, Culiacán y El Fuerte, con pérdidas de 514.89 km<sup>2</sup>, 339.58 km<sup>2</sup>, 210.92 km<sup>2</sup>, respectivamente. También se observa que Sinaloa de Leyva fue el único municipio que no presentó

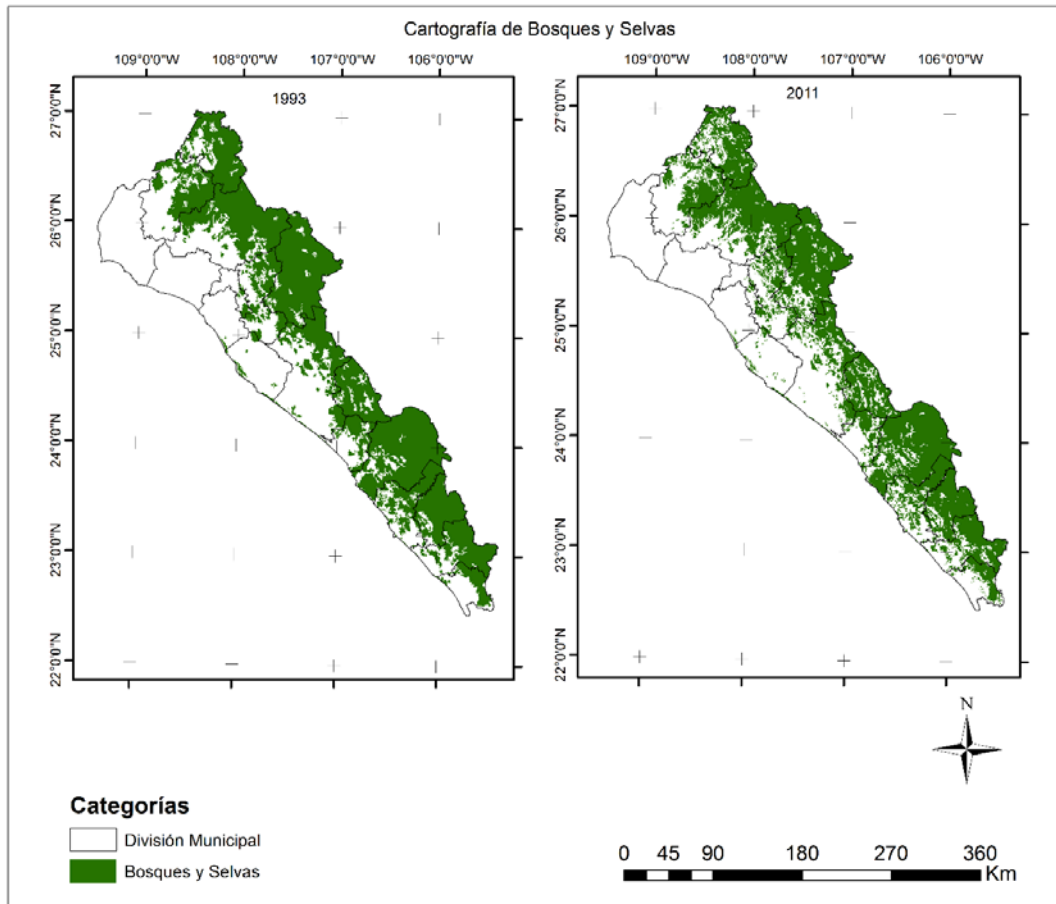


FIGURA 4. Cartografía de bosques y selvas de los años 1993 y 2011.

una pérdida neta, por lo contrario, mostró un incremento en su superficie forestal de 15.847 km<sup>2</sup>.

Asimismo, se muestran las tasas medias anuales de deforestación por municipio, resultando que Salvador Alvarado, Angostura y Elota son los que presentan las tasas medias anuales de deforestación más altas (Tabla 1).

En lo que corresponde a la segunda etapa de la metodología se pudo determinar, a partir de las 30 encuestas realizadas a expertos, que la causa principal que originó la deforestación para el periodo 1993 y 2011 fue la expansión agrícola con 49.4%, seguida de la extensión de infraestructura con 18.8% y de la extracción de madera con 16.84%. Mientras que en las causas secundarias se tienen como principales actores a los factores demográficos (29.4%) y los factores económicos (27.88%) (Tabla 2).

Como se puede observar y según datos obtenidos de la consulta, dentro de las subcausas principales y como los principales actores involucrados en el proceso de deforestación en el estado de Sinaloa están los cultivos permanentes, la extracción de madera con fines comerciales, el transporte, la extracción minera metálica y el narcotráfico (Tabla 2).

Por su parte, se identificó que las subcausas secundarias derivan del incremento de la población, del crecimiento del mercado y su comercialización y de las obras estructurales dentro de los entes que inducen el proceso de pérdida de cobertura forestal en nuestro estado (Tabla 2).

En el mismo sentido, los resultados de las encuestas realizadas a las personas expertas indican la relación porcentual que existe entre las causas principales y secundarias, dando como resultado un sistema que conduce a la

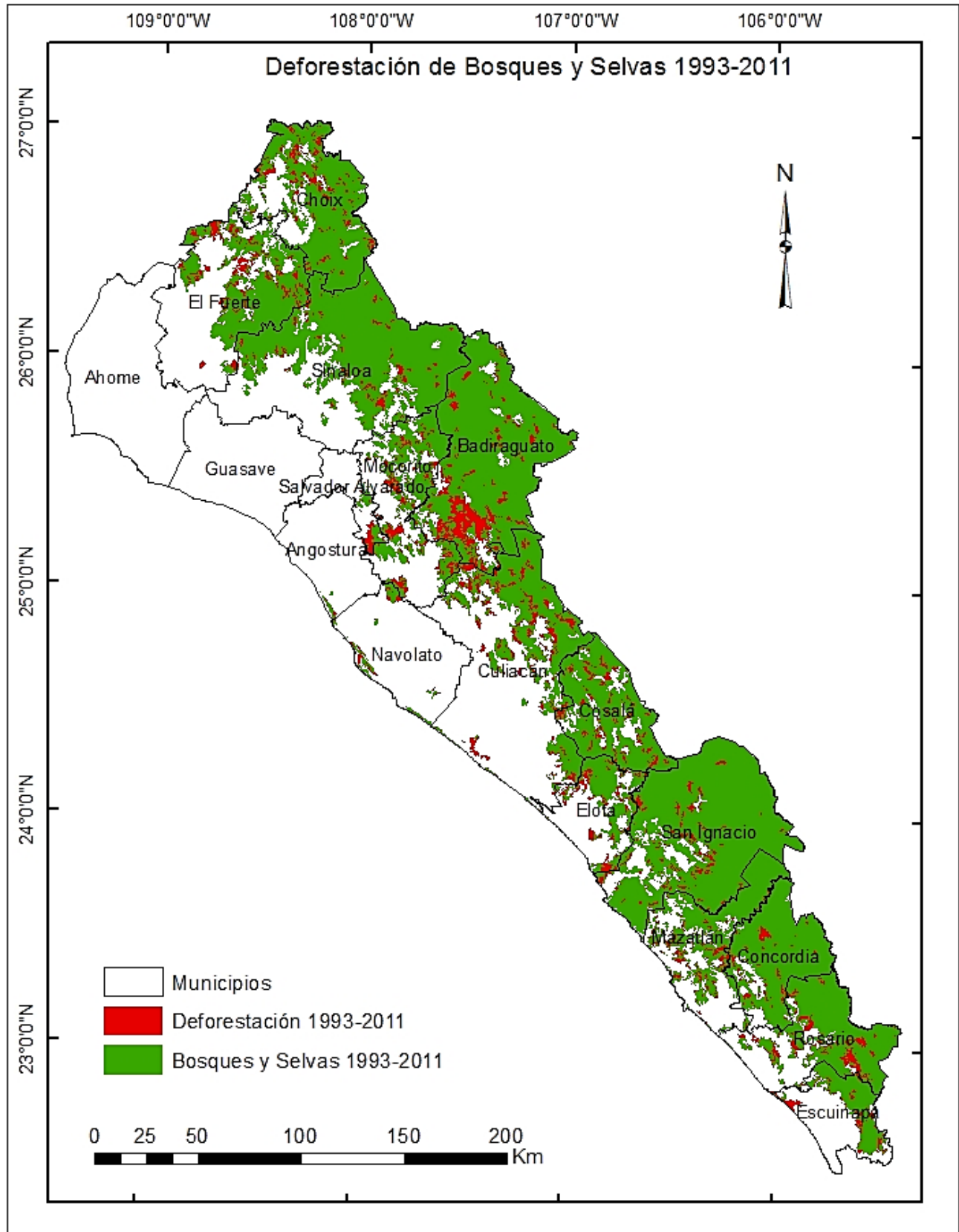


FIGURA 5. Cartografía de pérdida de cobertura de bosques y selvas 1993-2011.





TABLA 1.- Cantidad de pérdida forestal de cada municipio en el estado de Sinaloa.

Municipio	Área de municipio en km <sup>2</sup>	Bosque en 1993 en km <sup>2</sup>	Bosque en 2011 en km <sup>2</sup>	Pérdida de bosques en km <sup>2</sup>	Tasa media anual de deforestación en %
Ahome	4024.97	0.00	0.00	0.00	0.00
Angostura	1791.62	29.02	23.02	6.00	1.15
Badiraguato	4786.86	<b>4501.01</b>	<b>3986.12</b>	<b>514.89</b>	0.64
Choix	3224.30	2513.17	2353.72	159.45	0.35
Concordia	2161.86	1942.56	1860.76	81.80	0.23
Cósala	2163.73	1882.87	1714.56	168.31	0.50
Culiacán	6283.63	2444.93	2105.35	<b>339.58</b>	0.77
El Fuerte	4179.22	1911.46	1700.53	210.92	0.61
El Rosario	2639.49	1840.39	1694.91	145.48	0.44
Elota	1649.53	760.19	641.51	118.68	0.87
Escuinapa	1553.71	650.04	608.14	41.90	0.36
Guasave	2922.12	0.00	0.00	0.00	0.00
Mazatlán	2532.39	1527.69	1426.15	101.54	0.37
Mocorito	2807.22	1399.38	1220.73	178.64	0.71
Navolato	2477.20	154.59	149.08	5.51	0.20
Salvador Alvarado	777.62	122.64	76.74	45.90	<b>2.08</b>
San Ignacio	5068.75	<b>4618.93</b>	<b>4444.52</b>	174.41	0.21
Sinaloa de Leyva	6330.20	<b>4078.40</b>	<b>4094.25</b>	-15.85	<b>-0.02</b>

deforestación en el estado; de igual manera se observa que más de una causa secundaria influye en una causa principal y viceversa (Fig. 6).

Como ejemplo de este sistema podemos deducir que la causa principal con mayor influencia en los procesos de deforestación es la expansión agrícola en el estado de Sinaloa con 49.40%, la cual es influenciada por 33% de factores demográficos, 29% de factores económicos, y 12% de factores tecnológicos debido al incremento acelerado de la población, pues cada vez se necesitan más y mejores productos agrícolas; asimismo, esta expansión agrícola es impulsada por 19% de factores políticos e institucionales que están estrechamente relacionados con los nuevos permisos de uso y tenencia de la tierra en coberturas forestales y el manejo de las leyes en cuanto a la planificación y gestión de los ecosistemas forestales;

por último, los factores culturales están presentes con 7% en este proceso, indicando los usos y costumbres del uso de leña en la cocina, mejoramiento de fincas y falta de valores, educación y conciencia ecológica hacia el cuidado de los ecosistemas forestales. De manera inversa, la causa secundaria con mayor presencia en la conversión de la cobertura boscosa son los factores demográficos con 29% de presencia en el estado; a su vez, esta causa es impulsada por la expansión agrícola con 37%, igualmente con 8% de extracción de madera y con 3%, 35%, 16%, de la explotación minera, extensión de infraestructura, y desencadenamiento de eventos sociales, respectivamente.

Finalmente, en la etapa 3 de la metodología se obtuvo la dinámica de los usos de suelo mediante la matriz de cambios (Tabla 3).

TABLA 2. Causas principales y secundarias de la deforestación en Sinaloa.

	Causa	%	Subcausa	%
Causas principales de la deforestación	Agricultura	49.4	Cultivos permanentes	35.36
			Agricultura itinerante	25.16
			Cría de ganado	31.6
			Apertura de nuevas áreas agrícolas	7.88
	Extracción de madera	16.84	Comercial	63.2
			Combustible	23.8
			Mejoramiento de fincas	13
	Extensión de infraestructura	18.8	Transporte	38.4
			Expansión de asentamientos	29.4
	Explotación minera	10.12	Servicios públicos	32.2
Metálica			65.8	
Desencadenamiento de eventos sociales	4.84	No metálica	34.2	
		Desplazamientos bruscos	12.24	
		Desorden Social	36.92	
Causas secundarias de la deforestación	Factores demográficos	29.4	Narcotráfico	50.84
			Incremento natural	24.6
			Migraciones	21.4
	Factores económicos	27.88	Incremento poblacional	54
			Crecimiento del mercado y comercialización	39.6
			Estructura económica	37.08
	Factores tecnológicos	10.8	Urbanización-industrias	23.32
			Obras estructurales	40.6
			Cambios de agrotécnicas	25.8
	Factores políticos e institucionales	19.4	Factor de producción agricultura	33.6
Políticas formales			23.8	
Clima político			42	
Factores culturales	12.52	Derecho a la propiedad	34.2	
		Actitud pública valores y creencias	61.2	
			Comportamiento familiar e individual	38.8

De esta matriz de datos (Tabla 3) se pudo observar que las categorías con mayores ganancias son la agricultura de temporal, las selvas y los asentamientos humanos, las selvas y los asentamientos humanos. Mientras tanto, las categorías con las mayores pérdidas corresponden a las selvas y a las agriculturas (Fig. 7).

Asimismo, se observa la intensidad de pérdida en las categorías de selvas, otros tipos de vegetación y en los cuerpos de agua, mientras que las categorías con mayor intensidad de ganancia son los asentamientos humanos, pastizal, vegetación hidrófila y la agricultura de temporal (Fig. 8).

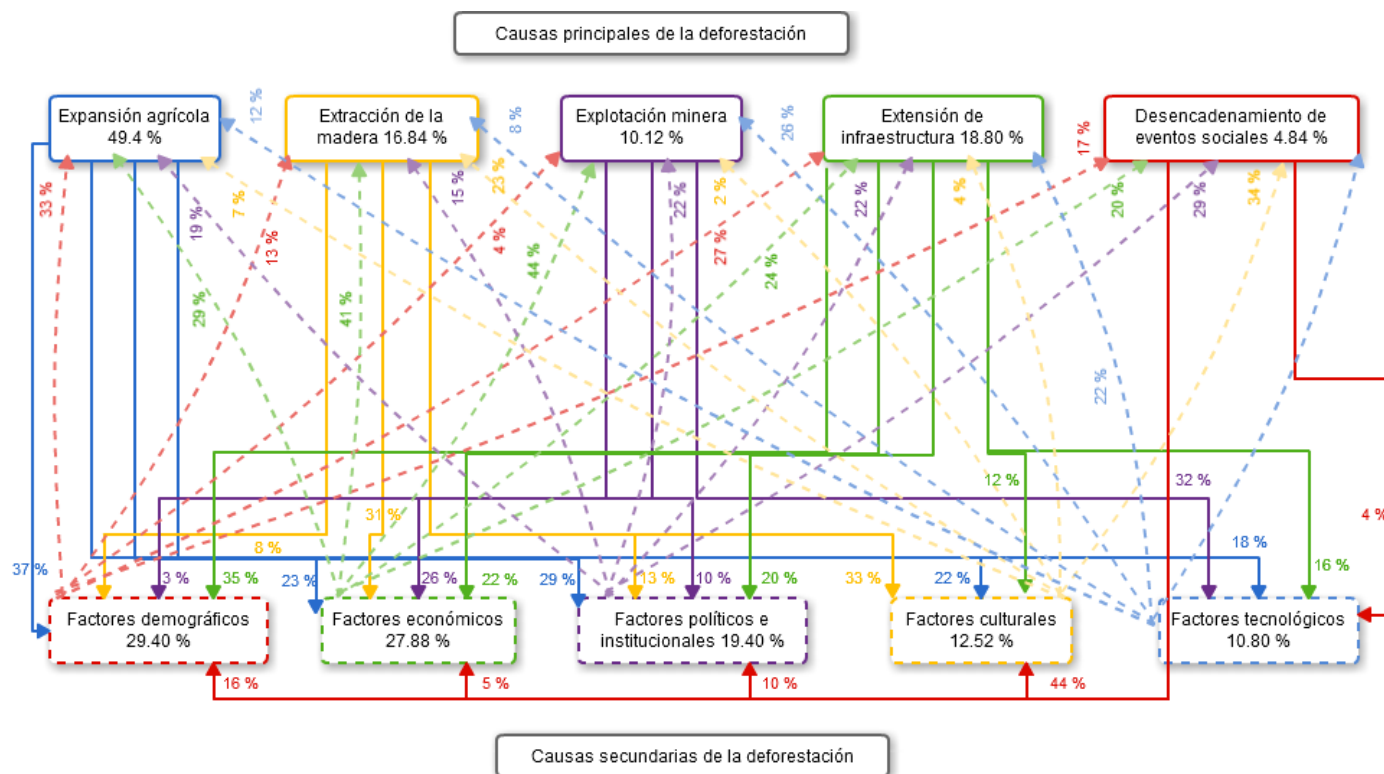


FIGURA 6. Sistema o modelo causal de los procesos de deforestación en Sinaloa cuyas unidades se encuentran en porcentajes de acuerdo a la frecuencia de aparición de cada factor causal en las encuestas. Adaptación de (Geist y Lambin, 2001; Pacheco *et al.*, 2011)

Al respecto, la agricultura de temporal en el año de 1993 contaba con 8305.26 km<sup>2</sup>, representando 14.48% de la superficie total del estado; al comparar estos datos con los observados en el año 2011 se muestra un aumento de superficie con 11 632.56 km<sup>2</sup>, ocupando 20.27% y manteniéndose en aumento.

En tal sentido, la categoría de asentamientos humanos presenta un aumento considerable en cuanto a su crecimiento, ya que si bien no representa grandes porcentajes con respecto a todo el territorio, sí lo es en cuanto a su propia superficie. Dicha categoría tenía en 1993 una superficie de 191.51 km<sup>2</sup>, representando solo 0.33% y para el año 2011, contaba con 623.28 km<sup>2</sup>, representando 1.08%.

Por último, los resultados de la matriz de cambios validan de manera espacial los resultados obtenidos por los expertos ya que estos corroboran que las transiciones de los cambios de uso de suelo más importantes coinciden

con las causas principales y secundarias que tienen mayor impacto en los procesos de deforestación. Un ejemplo de ello es que la agricultura de temporal le ha ganado gran cobertura a las selvas. Ligando estos datos con los resultados de la opinión de los expertos, se corrobora que la expansión agrícola es la causa principal de los procesos de deforestación. Tal es el caso de la categoría de asentamientos humanos que ha aumentado poco más de 300% y que está ligado estrechamente con la expansión de infraestructura y los factores demográficos.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la cartografía de pérdida de cobertura de bosques y selvas puede sobreestimar o subestimar las superficies deforestadas debido al nivel de detalle que presenta la cartografía de USyV a escala 1:250 000. En tal sentido, algunos investigadores recomiendan trabajar con escalas que van de 1:50 000 a 1:25,000 (GOF-

TABLA 3. Matriz de cambios

Datos en km <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total 1993	Pérdidas
1	111.25	9792.38	296.88	0	28.25	29.88	35.56	33.06	33.94	50.19	10411.38	10300.13
2	6247.31	1105.19	95.44	9.75	39.38	7.56	19.06	68.94	700.44	12.88	8305.94	7200.75
3	5.19	1.63	182.19	0	1	0.5	0	0.81	0.19	0	191.5	9.31
4	75.94	0	1.69	8064.38	0.13	0	0	154.25	430.25	0	8726.63	662.25
5	27.06	116.13	2.19	11.88	2340.06	18.06	68.44	20.94	48.75	80.81	2734.31	394.25
6	130.75	109.56	11.94	0	7.44	1252.38	21.25	110.94	18.31	18.38	1680.94	428.56
7	63.13	270.63	3.38	0	108.06	342	818.81	19.06	61	510.44	2196.5	1377.69
8	34.94	24.38	4.69	8.88	1.06	11.75	0	339.13	52.69	0.31	477.81	138.69
9	2324.81	208.06	24	702.19	58.69	25.5	49.75	307.94	17922.25	27.38	21650.56	3728.31
10	13.44	4.63	0.88	0	33.13	17.56	52.5	7.38	9.88	814.13	953.5	139.38
Total 2011	9033.81	11632.56	623.25	8797.06	2617.19	1705.19	1065.38	1062.44	19277.69	1514.5	57329.06	
Ganancias	8922.56	10527.38	441.06	732.69	277.13	452.81	246.56	723.31	1355.44	700.38		

Categorías

1	Agricultura de riego y humedad	6	Matorral
2	Agricultura de temporal	7	Otros tipos de vegetación
3	Asentamiento humano	8	Pastizales
4	Bosque	9	Selvas
5	Cuerpo de agua	10	Vegetación hidrófila

GOLD, 2013). Por otro lado, con referencia al análisis sobre la pérdida forestal a nivel municipal es importante mencionar que los municipios Salvador Alvarado, Angostura y Elota son los que presentan las tasas medias anuales de deforestación más altas, pero no indican zonas alarmantes en cuanto a pérdida de superficie forestal ya que estos municipios contemplan zonas de bosques y selvas muy pequeñas. Sin embargo, los municipios que se encuentran en la parte norte del estado son los que presentan mayores coberturas de pérdida, por ello, sería oportuno analizar más allá de las fronteras administrativas cómo podría ser el análisis completo de la cuenca hidrográfica Pacífico Norte, siendo esta un área territorial delimitada de manera natural por un parteaguas y que comparte características de elementos biológicos, físicos y antrópicos que reaccionan entre sí.

Mientras tanto, los resultados estadísticos de la consulta a expertos sobre las causas principales y secundarias de deforestación indican que son acordes con otros trabajos realizados en el cinturón tropical (Geist y Lambin, 2001; Pacheco *et al.*, 2012), determinando que los principales actores que impulsan este proceso son la expansión de la agricultura y la extensión de la infraestructura. No obstante, habría sido pertinente realizar consultas a personas que habitan en las zonas más afectadas, especialmente en las partes serranas donde se practica la agricultura y se utiliza la leña para usos domésticos, produciendo un análisis más robusto de los factores causales de la deforestación. De igual manera, se podría contemplar a futuro un estudio explicativo sobre los factores causales de la pérdida forestal mediante modelos de regresión logística espacial y regresión geográficamente ponderada.

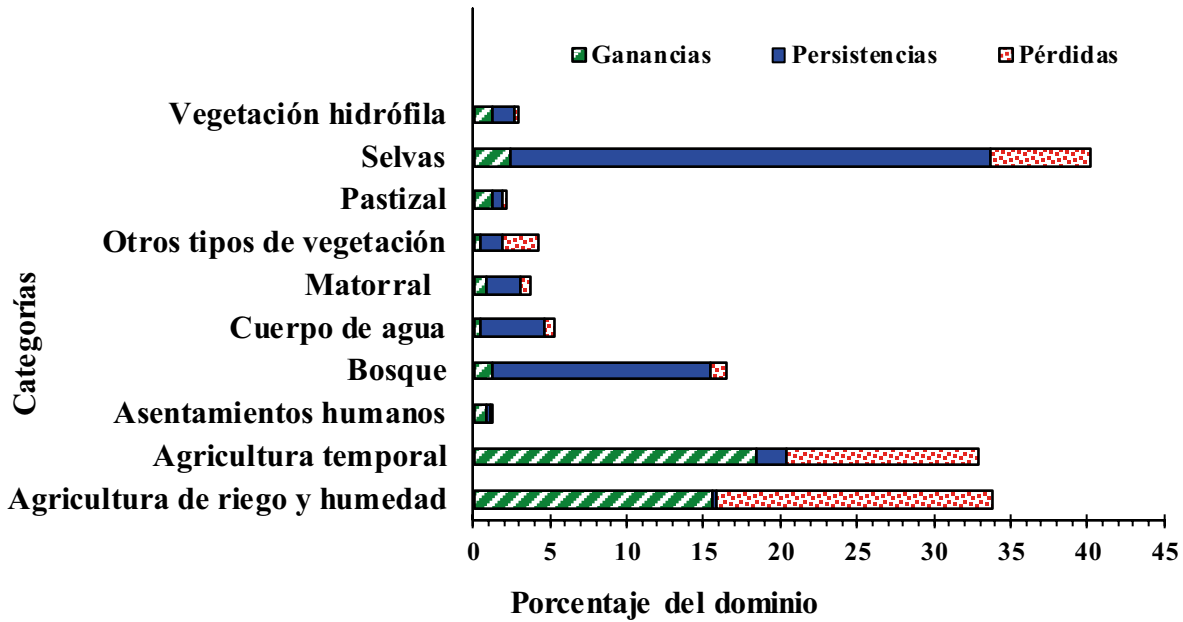


FIGURA 7. Ganancias, persistencias y pérdidas de usos de suelo entre 1993 y 2011.

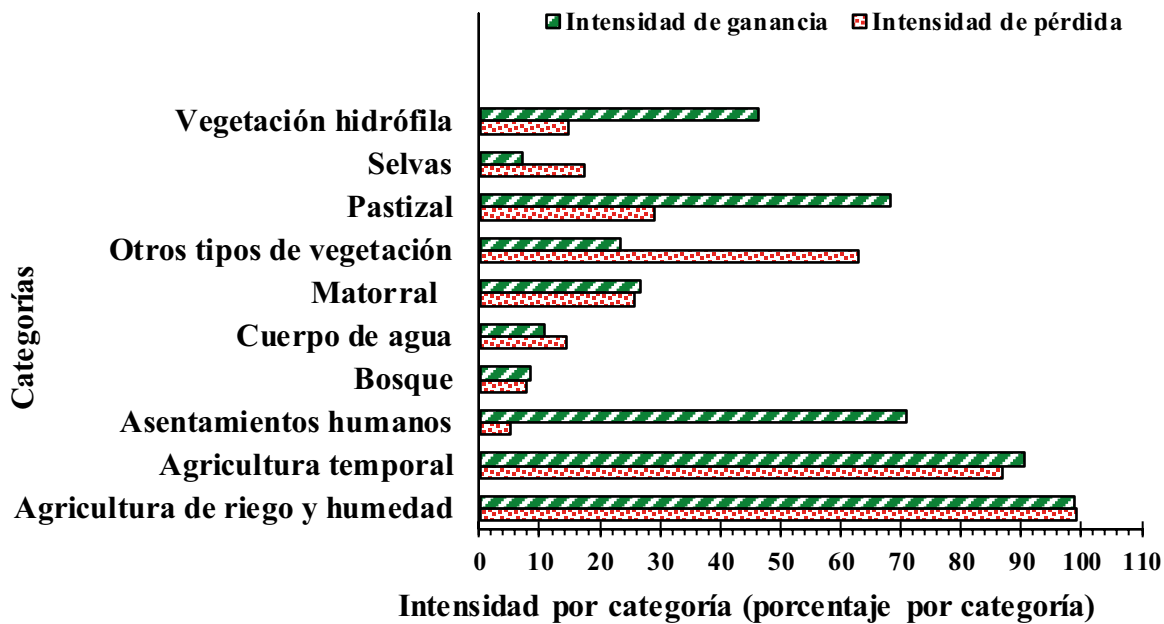


FIGURA 8. Intensidad de pérdida y ganancia por categoría.

Por otro lado, en una minoría de casos en el análisis realizado las respuestas fueron dispares, lo cual puede provocar sesgos en el análisis estadístico de los datos.

Por último, la matriz de cambios indica las transiciones, ganancias y pérdidas producto del cambio en la cober-

tura de usos de suelo y los tipos de vegetación, de lo cual se resaltan las transiciones más importantes o significativas, pero a su vez también muestra transiciones entre algunas categorías que habría que analizar con mayor profundidad. Sin duda, los datos que se obtuvieron de esta matriz están

en función de la escala de la cartografía utilizada, pero aun así proporciona información muy válida para comprender los cambios de uso y ocupación del suelo a nivel estado.

## CONCLUSIONES

Los resultados de la detección de cambios mediante el uso de la cartografía de cobertura de bosques y selvas de los años 1993 y 2011 indican que existe una gran pérdida de cobertura forestal en el estado de Sinaloa, con una tasa media anual ligeramente superior a la del país, estando México situado en el número 15 y 17 a nivel mundial.

De acuerdo con el análisis municipal de pérdida forestal y sus tasas, los municipios de Badiraguato, Culiacán, El Fuerte, Cósala y Mocorito son prioritarios para tomarse en cuenta en proyectos de reforestación y conservación por tener grandes pérdidas forestales y altas tasas de deforestación a nivel municipal.

Por otro lado, los resultados estadísticos de la consulta a expertos permitieron analizar y conocer los causantes de los procesos de pérdida de cobertura forestal de manera cualitativa y porcentual, así como también la interacción entre estos, determinando el comportamiento de un sistema o modelo causal de deforestación en el estado de Sinaloa. En tal sentido, se concluye que la expansión agrícola y la extensión de infraestructura son los responsables de aproximadamente setenta por ciento de los procesos de deforestación, impulsados principalmente por los factores demográficos y económicos.

Como se puede inferir, la matriz de cambios permitió realizar la validación de los resultados obtenidos de la detección de cambios y de la consulta a expertos ya que indica que las categorías de agricultura de riego y humedad, agricultura temporal y asentamientos humanos obtuvieron una ganancia neta de 2372.26 km<sup>2</sup>, asimismo las coberturas de bosques y selvas presentaron una pérdida neta de 2303.81 km<sup>2</sup>. Sin duda, estas cantidades de pérdidas y ganancias muestran un factor de similaridad de 0.95% y 0.98% con respecto a la superficie deforestada que se obtuvo mediante la técnica de detección de cambios que fue de 2277.18 km<sup>2</sup>. En tal sentido, mediante la matriz de cambios también se pudo corroborar la opinión de los

expertos, ya que las grandes transiciones importantes entre las categorías de uso de suelo pusieron en evidencia la gran correspondencia de estas con las causas principales y secundarias de la deforestación que tienen mayor impacto en los procesos de pérdida forestal.

Finalmente, es necesario comentar que se requiere de cartografía de Uso de Suelo y Vegetación de mayor precisión escala 1:50 000, que permita analizar a mayor detalle los procesos de pérdida forestal, sus interacciones espaciales con variables de tipo socioeconómico, biofísica, de accesibilidad, etc., y la simulación de escenarios alternativos de la actividad forestal.

## REFERENCIAS

- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H. J., Bodart, C., Brink, A. y Simonetti, D. (2014). Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global change biology*, 20 (8), 2540-2554.
- Armenta, S., Angulo, C., Rocha, W., Barraza, G., Andrade, R. y Gonzalez, J. (2016). Determination and analysis of hot spot areas of deforestation using remote sensing and geographic information system techniques. Case study: State Sinaloa, México. *Open Journal of Forestry*, 6 (4), 295-304. doi: 10.4236/ojf.2016.64024
- Asner, G., Knapp, D., Balaji, A. y Pérez-Acosta G. (2009). Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3 (1).
- Bartalev, S., Kissiyar, O., Achard, F., Bartalev, S. A. y Simonetti, D. (2014). Assessment of forest cover in Russia by combining a wall-to-wall coarse-resolution land-cover map with a sample of 30 m resolution forest maps. *International Journal of Remote Sensing*, 35, 2671-2692. doi: 10.1080/01431161.2014.883099
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). *La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación*. México: Investigaciones Geográficas. Instituto de Geografía. UNAM.
- Bonilla-Moheno, M., Redo, D., Aide, M., Clark, M. y Grau, R. (2013). Vegetation change and land tenure in Mexico: a country-wide analysis. *Land Use Policy*, 39, 355-364.



- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Ariel S.A.
- Comisión Nacional Forestal. (2015). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo*. Guadalajara, Jal., México: Conafor.
- Corrales, G. (2013). *Análisis de cambio de uso de suelo en el estado de Sinaloa utilizando sistemas de información geográfica*. Tesis de licenciatura no publicada. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.
- De Fries, R. S., Rudel, T., Uriarte, M. y Hansen, M. (2010). Deforestation driven by urban population growth and agricultural trade in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 3 (3), 178-181.
- Forest Survey of India. (2014). *Ministry of Environment, Forest & Climate Change*. Recuperado de [http://fsi.nic.in/details.php?pgID=sb\\_6](http://fsi.nic.in/details.php?pgID=sb_6)
- García, N. H., López, J., Moreno, R., Villers, M. y García, R. (2000). Delimitación y caracterización de las tierras con uso inadecuado para la agricultura en el distrito de desarrollo rural 004, Celaya, Guanajuato. *Terra*, 18 (1), 11-25.
- Geist, H. J. y Lambin, E. F. (2001). *What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of de-forestation based on sub-national case study evidence*. Louvain-la-Neuve, Bélgica: LUCC International Project Office.
- Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics. (2013). *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting, anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. Wageningen University. The Netherlands: GOF-C-GOLD.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R. Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O. y Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-Century. *Science*, 342. doi:10.1126/science.1244693
- Hernández, I. U., Ellis, E. A., Gallo, C. A. (2013). Aplicación de teledetección y sistemas de información geográfica para el análisis de deforestación y deterioro de selvas tropicales en la región Uxpanapa, Veracruz. *GeoFocus (Informes y Aplicaciones)*, 13, 1-24.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Conociendo a Sinaloa*. Recuperado de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825213176.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/estudios/conociendo/702825213176.pdf)
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2014). *Monitoring of the Brazilian Amazonia; Projeto PRODES*. Recuperado de <http://www.obt.inpe.br/prodes/inex.html>.
- Lambin, E. F. y Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economics change. *Land Use Policy*, 27, 108-118.
- Lambin, E. F., Geist, H. J. y Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual review of environment and resources*, 28 (1), 205-241.
- Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N. y Sholes, R. J. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981-2000. *BioScience*, 55, 115-124.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T. y Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5 (4), 249-261.
- Mendoza, M. B. (2002). *Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán*. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Meyfroidt, P., Rudel, T. K. y Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 20917-20922.
- Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M. y Aguirre-Salado, C. A. (2012). Deforestation rates in San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19 (2), 201-215.

- Organización del Tratado de Cooperación Amazonica. (2014). *Monitoreo de la deforestación, aprovechamiento forestal y cambios de uso del suelo en el bosque pan-amazónico*. Recuperado de [http://www.otca.org.br/portal/admin/\\_upload/publicacoes/folder\\_monitoreo\\_esp.pdf](http://www.otca.org.br/portal/admin/_upload/publicacoes/folder_monitoreo_esp.pdf)
- Pacheco, C. (2014). Identification and characterization of deforestation hot spots in Venezuela using MODIS satellite images. *Acta Amazonica*, 44, 185-196.
- Pacheco, C., Aguado, I., Vilanova, E. y Martínez, S. (2012). *Utilización de las tecnologías de la información geográfica (TIG) en el desarrollo de un sistema de medición, reporte y verificación (MRV) de emisiones de CO<sub>2</sub> en tres áreas "hot spot" de deforestación en Venezuela*. Documento presentado en el XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid, España.
- Pacheco, C., Aguado, I. y Mollicone, D. (2011). Las causas de la deforestación en Venezuela: un estudio retrospectivo. *Bio-llania*, 10, 281-292.
- Pineda, N. B. (2010). *Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante tecnologías de la información geográfica*. Disertación Doctoral. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid, España.
- Pontius, R. G. y Santacruz, A. (2014). Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table. *International Journal of Remote Sensing*, 35 (21), 7543-7554. doi:10.1080/2150704X.2014.969814
- Pontius, R. G., Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, (101), 251-268.
- Potapov, P., Hansen, M., Stehman, S., Loveland, T. y Pittman, K. (2008). Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3708-3719.
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E. N., Salinas-Chávez, E. y Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20 (1), 21-35.
- Rudel, T. K., DeFries, R., Asner, G. P. y Laurance, W. F. (2009). Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conservation Biology*, 23(6), 1396-1405.
- Sader, S. A. y Joyce, A. T. (1988). Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* (20), 11-19.
- Sánchez-Colón, S., Flores-Martínez, A., Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. (2009). Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En R. Dirzo, R. González e I. J. March. (Comps.), *Estado de conservación y tendencias de cambio. Vol II (75-129)*. México: Conabio.
- Skutsch, M., Mas, J. F., Bocco, G., Bee, B., Cuevas, G. y Gao, Y. (2013). Deforestation and land tenure in Mexico: A response to Bonilla-Moheno *et al.* *Land Use Policy*, 39, 390-396.
- Torres, J., Magaña, O. y Moreno, F. (2008). *Determinantes del cambio de uso/cobertura arbolada en México: un enfoque a través de probabilidades de transición* (Documento de Trabajo 450). México: CIDE.
- United Nations. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- Velázquez, A., Mas, J. F., Palacio, J. L., Díaz, J. R., Mayorga, R., Alcántara, C., Castro, R. y Fernández, T. (2002a). *Análisis de cambio de uso del suelo* (Informe técnico). México: INE-Instituto de Geografía, UNAM.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz, G. J., Mayorga, S. R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. L. (2002b). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21-37.
- Velázquez, A., Mas, J. F., Bocco, G. y Palacio-Prieto, J. L. (2008). Mapping land coverchanges in Mexico, 1976-2000 and applications for guiding environmental management policy. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 31 (2), 152-162. doi:10.1111/j.1467-9493.2010.00398.x

Manuscrito recibido el 6 de noviembre de 2015.  
Aceptado el 24 de septiembre de 2016.

Este documento se debe citar como:  
Monjardín-Armenta, S. A., Pacheco-Angulo, C. E., Plata-Rocha, W. y Corrales-Barraza, G. (2016). La deforestación y sus factores causales en el Estado de Sinaloa, México. *Madera y Bosques*, 23 (1), 7-22. doi: 10.21829/myb.2017.2311482