



Monitoreo de la **degradación forestal** en México con base en el inventario nacional forestal y de suelos (Infys)

Monitoring forest degradation in Mexico based on the national forest and soil inventory (Infys)

Ángel Leyva-Ovalle¹, José René Valdez-Lazalde^{2*}, Héctor Manuel de los Santos-Posadas², Tomas Martínez-Trinidad², José Andrés Herrera-Corredor², Oziel Lugo-Espinosa³ y José Rodolfo García-Nava²

¹Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Edo. de México, México.

²Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Edo. de México, México.

³Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario Texcoco. Tejocote, Edo. de México, México.

*Autor de correspondencia. valdez@colpos.mx

RESUMEN

Existen muchas definiciones de degradación forestal. Sin embargo, la mayoría no son operativas dado que no proponen variables para medirla. Su medición es compleja; evaluarla implica comparar el estatus del bosque en un momento dado con un estado previo (condición de referencia o línea base). El reto del seguimiento (monitoreo) de la degradación inicia con su definición y con la identificación de la línea base. En este trabajo se propone un índice general de degradación (IGD) para evaluar la degradación forestal que ocurre en México en el periodo que transcurre entre mediciones del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys). El IGD está compuesto de indicadores que toman como insumo la base de datos del Infys. Paralelamente, el estudio pretende construir una línea base que permita dar seguimiento a la degradación forestal en años futuros. Los resultados a escala de entidad federativa indican que los estados de Puebla, Veracruz, Morelos y Colima no muestran evidencia global de procesos de degradación en el periodo evaluado. Contrariamente, Querétaro, Tamaulipas y el D.F. (Ciudad de México) registran cierto proceso de degradación. El valor del IGD ponderado a escala nacional indica que, en general, para los periodos evaluados de cinco años (*e.g.* 2004-2009, 2005-2010, etc.) los ecosistemas del país no registran procesos considerables de degradación, es decir, el valor obtenido del IGD es igual al valor de referencia. Sin embargo, a escala local es posible identificar áreas severamente degradadas o incluso deforestadas.

PALABRAS CLAVE: estimador de razón de medias, índice de degradación, línea base, monitoreo de bosques, Python.

ABSTRACT

There are many definitions of forest degradation, however, most of them are not operational because they do not propose variables to measure it. Its measurement is complex. Evaluation involves comparing the status of the forest at a given time with a previous state (reference condition or baseline). The challenge to follow-up the degradation process begins with its definition and the identification of the baseline. The present paper proposes a General Index of Degradation (IGD, for its meaning in Spanish) to assess forest degradation that occurs in Mexico in the time period between measurements of the National Inventory of Forest and Soil (Infys). The IGD is composed of indicators that take as input the Infys database. At the same time, the study aims to build a base line that will allow monitoring forest degradation in future years. The results at the scale of federal entity indicate that the states of Puebla, Veracruz, Morelos and Colima show no evidence of degradation processes (IGD) during the period evaluated. On the contrary, Querétaro, Tamaulipas and Mexico City recorded certain process of degradation. The value of the IGD weighted at the national scale indicates that in general, for the five-year periods evaluated (*e.g.* 2004-2009, 2005-2010, etc.) the country's ecosystems do not record any significant degradation, i.e., the value obtained from the IGD is equal to the baseline value. However, at the local scale it is possible to identify areas severely degraded or even deforested.

KEYWORDS: mean ratio estimators, degradation index, baseline, forest monitoring, Python.

INTRODUCCIÓN

Existen docenas de definiciones de degradación forestal que incorporan elementos diversos como el agente que la provoca, los cambios en la estructura, las funciones, los productos, o en los servicios que proporciona el bosque (Simula, 2009; Lund, 2009; Schoene, Killmann, von Lüpke y Loyche-Wilkie, 2007; Penman *et al.* 2003); sin embargo, en términos generales esta puede entenderse como la reducción de la capacidad de un bosque para proporcionar bienes y servicios (diversidad biológica forestal, retener biomasa-existencias de carbono), funciones productivas o funciones de protección (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2011). Su medición es compleja dado que debe reflejar los impactos derivados de procesos naturales y humanos que ocurren a intensidades diferentes. Implica considerar indicadores o criterios múltiples, a escalas temporal y espacial predefinidas. En acuerdo con Guariguata, Nasi y Kanninen (2009), la mayoría de las definiciones generadas a través de un consenso internacional son imperfectas y no resultan adecuadas para la toma de decisiones (Thompson *et al.*, 2013).

En México, la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (DOF, 2017) define a la degradación forestal como el “proceso de disminución de la capacidad de los ecosistemas forestales para brindar servicios ambientales, así como capacidad productiva”. Por su parte, la Ley General de Cambio Climático (LGCC) (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2014) indica que se entiende por degradación a la reducción del contenido de carbono en la vegetación natural, ecosistemas o suelos, en relación con un valor de referencia que refleje las condiciones en zonas donde no ha ocurrido la intervención humana (Morales-Barquero, Borrego, Akutsch, Kleinn y Healey 2014). Se considera que, para efectos de la presentación de Comunicaciones Nacionales ante organismos internacionales, México aplica la definición estipulada en la LGCC (Morales-Barquero *et al.*, 2014; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [Inecc], 2015). Esta definición se utiliza en este trabajo.

Evaluar la degradación implica comparar el estatus del bosque en un momento dado, con un estado previo

identificado como línea base o de referencia. La elección de un método específico para ello depende del tipo de degradación, de la intensidad con la que ocurre, de la disponibilidad de datos históricos, de la capacidad técnica y de los recursos disponibles, así como de las ventajas y limitaciones de los diferentes enfoques de medición y monitoreo. La medición repetida de variables del bosque como: número de árboles, daños al dosel, porcentaje de cobertura arbórea, área basal, etc. debería permitir demostrar si la degradación ocurre o está ausente, siendo una decisión política el umbral (valor) para evaluar la disminución de un producto o servicio (FAO, 2011). Lo anterior podría resultar en una definición operativa de la degradación, basada en indicadores medibles *in situ* (ej. inventarios forestales nacionales multitemporales y sitios permanentes de muestreo, conjunto de datos de aprovechamientos comerciales, datos indirectos o proxy de mercados nacionales) o mediante sensores remotos (ej. mapeo directo de la cobertura y cambios en la estructura del bosque o mapeo indirecto a través de enfoques de modelado), o mediante la combinación de técnicas que proporcionen la mejor opción (Herold *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2013; Morales-Barquero *et al.*, 2014).

En América Latina, particularmente en Brasil, se han realizado esfuerzos importantes para evaluar la degradación forestal a través de sensores remotos de alta y mediana resolución espacial (Souza *et al.*, 2013; Shimabukuro *et al.*, 2015). Souza *et al.* (2013) cuantificaron la tasa anual de degradación (definida como la disminución de la cobertura arbórea en más de 25%) para la región amazónica durante los años 2000-2010 mediante imágenes de satélite Landsat con precisión de usuario aceptable (0.82).

En relación con los esfuerzos institucionales de México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) y la Comisión Nacional Forestal (Conafor), generaron el sistema MAD-MEX (Monitoreo de Datos de Actividad para el programa mexicano REDD+), empleando imágenes *Landsat* y datos de campo del Infys para validación de los resultados. Los productos generados por MAD-MEX sirven de línea base para el



seguimiento de la deforestación (Gebhardt *et al.*, 2014), dejando de lado la degradación.

La dificultad para definir y cuantificar la degradación forestal inhibe el establecimiento de umbrales cuantitativos para su evaluación y es una restricción importante en la aplicación de mecanismos nacionales o internacionales de mitigación como REDD+ (Reducción de emisiones de gases efecto invernadero por deforestación, degradación y buen manejo de bosques). En el caso particular de México, la falta de datos históricos de biomasa y la capacidad limitada del país para monitorear la degradación empleando sensores remotos de alta resolución, sugiere la búsqueda de métodos alternativos para estimar la degradación forestal. Una opción alternativa es el uso de índices de referencia local basados en datos de inventarios forestales (Morales-Barquero *et al.*, 2014; Maniatis y Mollicone, 2010), los cuales deben ser capaces de representar zonas de baja o nula degradación y tener características biofísicas comparables, incluyendo también a las variables socioeconómicas. Estos dos factores deben ser abordados a escala del paisaje, mientras se desarrollan las actividades relacionadas con REDD + (Morales-Barquero *et al.*, 2015).

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue evaluar la degradación forestal que ocurrió en México en el periodo entre mediciones del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (Infys). Para ello se propone un índice general de degradación (IGD) compuesto de indicadores que toman como insumo la base de datos del Infys. Paralelamente, el estudio tiene la finalidad de construir una línea base que permita dar seguimiento (monitorear) a la degradación forestal en años futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El IGD propuesto en este trabajo y utilizado para evaluar la degradación forestal en México tiene como base variables de densidad forestal, de daño presente en el arbolado y el sitio y de diversidad, calculadas a partir de los datos

colectados como parte del Infys, correspondientes a la fase de campo 2004-2009 y remediciones (2009-2014) -Conafor (2012a). El Infys colecta datos dasométricos y de la condición general del bosque mediante un sistema de muestreo sistemático en conglomerados. Cada conglomerado se compone de cuatro sitios circulares de muestreo de 400 m² (Conafor, 2012a). El cálculo de los indicadores que componen el IGD, y del IGD mismo, se realizaron en el lenguaje de programación Python 2.7.6. –uno de los 10 lenguajes más empleados en aplicaciones en el mundo (TIOBE, 2014). El uso de Python deja abierta la posibilidad al desarrollo posterior de estimaciones espaciales de las variables estudiadas en puntos no muestreados, al considerar la migración de la presente aplicación a un sistema de información geográfica (SIG).

Metodología

Las bases de datos del Infys fueron migradas al sistema manejador de base de datos (SMBD) SQLite 3.0, ya que este SMBD opera de manera natural y se distribuye junto con el lenguaje Python a partir de la versión 2.5 (González-Duque, 2014). Las tablas obtenidas (formato SQLite 3.0) fueron exportadas conservando el nombre de las columnas, el formato y la cantidad de información, de manera íntegra con respecto al formato original.

En el entorno mencionado se depuró la base de datos del Infys para evitar redundancia e inconsistencia en los datos dasométricos. Se emplearon instrucciones de SQLite para seleccionar solamente datos útiles para el procesamiento de información y así considerar únicamente: árboles vivos, diámetro normal mayor o igual a 7.5 cm, altura total mayor a 0 y clave del género no nula. Adicionalmente, con la finalidad de evitar ambigüedades, los nombres científicos de las especies descritas en dichos documentos fueron validados cuidando que estos estuvieran correctamente escritos, con la nomenclatura adecuada y haciendo referencia a la sinonimia actual. Posteriormente, se verificó que cada taxón (nombre científico) coincidiera con la clave de género y especie inscritos dentro de los catálogos correspondientes de la base de datos del Infys, realizando correcciones a dichos catálogos para

mantener la consistencia e integridad de los datos (ej. un nombre científico con más de una clave).

En esta fase exploratoria del análisis se identificaron los bosques de referencia (*BR*) por tipo de ecosistema y entidad federativa, con la finalidad de construir una línea base y efectuar comparaciones posteriores para evaluar la degradación mediante los cambios registrados en los indicadores que se presentarán posteriormente. Los bosques de referencia corresponden a conglomerados del Infys que no registraron disturbios aparentes en el suelo y la vegetación al momento de su establecimiento.

El análisis realizado consideró únicamente los conglomerados que fueron medidos en ambas etapas del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (fase I 2004-2009 y remediciones 2009-2014). Al considerar ambos conjuntos de datos, el monitoreo de la degradación se realizó para un periodo de cinco años (2004-2009, 2005-2010, 2006-2011, 2007-2012, etc.).

Una vez que las bases de datos fueron filtradas y depuradas, para cada individuo de las especies arbóreas presentes en cada sitio de muestreo, se calculó su volumen maderable utilizando las ecuaciones generadas por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1985). Posteriormente se calcularon, para cada conglomerado, mediante los estimadores de razón definidos por Velasco-Bautista, Ramírez, Moreno y de la Rosa (2003) las variables (ha^{-1}) volumen, número de árboles, cobertura de dosel (%), área basal (m^2) y el índice de diversidad de Shannon-Wiener; además de registrar la presencia de daños en el arbolado.

La aplicación de estimadores de razón a tamaños de muestra pequeños tiene como consecuencia grandes varianzas, lo que genera intervalos de confianza muy amplios (Velasco *et al.*, 2003), teniéndose un problema de definición de la población. Para solventar esta situación, se agruparon los tipos de vegetación relativamente homogéneos (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2009) para establecer substratos (Tabla 1). Este nivel de estratificación permitió aumentar el número de conglomerados analizados e incrementar la precisión estadística de las estimaciones.

TABLA 1. Substratos de vegetación considerados.

Tipo de vegetación	Substrato definido
Selva alta perennifolia	Selva Alta-Mediana
Selva alta subperennifolia	
Selva mediana caducifolia	
Selva mediana subcaducifolia	
Selva mediana subperennifolia	
Selva baja caducifolia	Selva Baja
Selva baja subcaducifolia	
Selva baja subperennifolia	
Selva baja perennifolia	
Selva baja espinosa	
Bosque de abies	Coníferas
Bosque de ayarín	
Bosque de cedro	
Bosque de pino	
Bosque de táscate	
Matorral de coníferas	
Bosque de pino-encino	Coníferas y latifoliadas
Bosque de encino-pino	
Bosque de encino	Latifoliadas
Bosque mesófilo de montaña	
Bosque de galería	

Substrato: agrupación de tipos de vegetación relativamente homogéneos, basados en la clasificación de Inegi (2009).

Los datos procesados del Infys (fase I 2004-2009 y remediciones 2009-2014) sirvieron de base para plantear un IGD compuesto por indicadores de densidad forestal (volumen de madera, número de árboles, cobertura de dosel, área basal), de daño al arbolado y de biodiversidad (índice de Shannon-Wiener; Pla, 2006) (Tabla 2). Los indicadores propuestos pueden considerarse variables proxy para el monitoreo de degradación forestal y en su conjunto forman el IGD.

Cada indicador se construyó en apego a la metodología propuesta por la Organización para la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (*Organi-*



sation for Economic Co-operation and Development) [OECD] (2008). Con los índices correspondientes a cada variable se generó una matriz de correlación, encontrándose que estos no están correlacionados entre sí, evitando así información redundante. Lo anterior es resultado de aplicar los procesos de normalización y agregación (entre otros) en la construcción de cada indicador.

Partiendo de los indicadores propuestos, se aplicó el siguiente criterio general para calcular el Índice individual correspondiente:

$$I_n = \frac{(Y_{nt1} + Y_{nt1+1}) / 2}{BR}$$

Donde:

- I_n : índice n correspondiente al indicador Y_n .
- Y_{nt1} : indicador n , en el tiempo t_1 (fase 1 del Infys).
- Y_{nt1+1} : indicador n , en el tiempo t_{1+1} (remediciones del Infys).
- BR: Bosque de referencia. Conglomerados del Infys que no registraron disturbios aparentes en el suelo y la vegetación al momento de su establecimiento.

Criterio de decisión:

- Si $I_n > 1$: aumento en la magnitud del indicador (no evidencia de degradación),
- $I_n = 1$: el indicador es igual al BR (sin evidencias de procesos de degradación).
- Si $I_n < 1$: disminución en la magnitud del indicador (posible proceso de degradación/deforestación).

Para cada indicador (Tabla 2) se establece una línea base por ecosistema y entidad. El valor del indicador se toma al evaluar la magnitud de cambio (pérdida o ganancia) entre dos períodos de tiempo (fase I y remediciones), para finalmente relacionar o comparar el resultado con respecto al valor de referencia o bosque de referencia (BR) por ecosistema y Estado.

Índice general de degradación

El IGD contempla el uso de los indicadores previamente descritos, aplicándose de la siguiente manera:

$$IGD = \frac{\sum_{n=1}^6 I_n}{n}$$

Donde I_n es el índice n ; y los criterios de decisión son: Si $IGD \geq 1$: sin evidencia de proceso degradación; Si $IGD < 1$: posible proceso de degradación.

El IGD se probó procesando los conglomerados correspondientes a entidades consideradas como contrastantes en términos de los ecosistemas que abarcan: Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Chihuahua y Durango.

Los resultados obtenidos con respecto a indicadores resultaron consistentes y congruentes con lo hallado por Méndez-López y De los Santos-Posadas (2011), Velasco-Bautista (2015), Flores-Cruz (2014) y Conafor (2013). Con esa base se procesaron los datos correspondientes a 29 entidades federativas, así como los IGD por tipo de ecosistema y a escala nacional –los estados de Aguascalientes, Baja California y Tlaxcala no se procesaron por no contar con un bosque de referencia.

Se calcularon valores de IGD promedio por estado, ecosistema y a escala nacional considerando los conglomerados existentes en cada nivel de análisis. Esto permitió caracterizar cada una de las poblaciones de interés e identificar las tendencias que dieron origen a cada valor de IGD. Posteriormente se emplearon estimadores de medias de razón (Velasco-Bautista, 2015) para elaborar un histograma de los valores de IGD con la finalidad de conocer su distribución para la población bajo análisis. Como medida cuantitativa de la dispersión de los valores de IGD, se calculó el coeficiente de asimetría definido por Zwillinger y Kokoska (2000), de tal forma que poblaciones (entidades o ecosistemas) con valores de IGD similares pueden ser diferenciadas, permitiendo una mejor caracterización o diferenciación de dichas poblaciones.

Con la finalidad de garantizar que los resultados obtenidos sean contrastables a partir de los indicadores previamente discutidos, se emplearon gráficos radiales. Estos permiten representar variables de distinta naturaleza y facilitan el análisis de su comportamiento (Pérez-Benedicto, 2013).

TABLA 2. Indicadores simples para el monitoreo de degradación forestal: volumen, densidad del bosque y de biodiversidad.

No. Indicador	Objetivo	Cálculo	Fundamento	Criterio	VARIABLES
Y ₁	Volumen en m ³ ha ⁻¹ (VOL)	Se estima el volumen / biomasa para cada árbol registrado en cada sitio de la base de datos (Infys y remuestreo) usando los distintos modelos alométricos que se han desarrollado en el país. Se aplican los estimadores de razón propuestos por Velasco <i>et al.</i> (2003), para obtener estimaciones a escala de hectárea.	Generar un indicador que permita establecer si existe pérdida de volumen / biomasa, considerando al Infys y su remuestreo del mismo	Para obtener este indicador, se deben considerar aquellos sitios del Infys que coinciden con el remuestreo	Diámetro normal, altura total y género de cada árbol.
Y ₂	Número de árboles ha ⁻¹ (NHA)	Se calcula el número de árboles ha ⁻¹ , al aplicar los estimadores de razón para el Infys, propuestos por Velasco <i>et al.</i> (2003).	Generar un indicador de densidad, para monitorear está variable, que permita junto con otros indicadores establecer si existe algún proceso de degradación.	Conteo simple de árboles al emplear los Estimadores de razón para el Infys (Velasco <i>et al.</i> , 2003)	
Y ₃	Cobertura de dosel (m ² ha ⁻¹) (CD)	Se calcula la cobertura de dosel, al sumar la cobertura de copa de cada individuo. $\sum \frac{\pi \times \text{DiamCopa}^2}{4}$			Diámetro de copa. Empleo de Estimadores de razón para el Infys (Velasco <i>et al.</i> , 2003)



TABLA 2. Indicadores simples para el monitoreo de degradación forestal: volumen, densidad del bosque y de biodiversidad. Continuación.

No. Indicador	Objetivo	Cálculo	Fundamento	Criterio	VARIABLES
Y ₄	Área basal (m ² ha ⁻¹) (AB)	$\frac{\sum \pi \times \text{Diámetro normal}^2}{40,000}$			Diámetro normal. Empleo de Estimadores de razón para el Infys (Velasco <i>et al.</i> , 2003)
Y ₅	Porcentaje de árboles dañados. (%DA)	Se calcula el porcentaje de árboles dañados, al aplicar los estimadores de razón para el Infys, propuestos por Velasco <i>et al.</i> (2003).	Generar un indicador de daño en el arbolado.	Si Tipo daño=1, No existe daño. Si Tipo daño>=2, el árbol está dañado por algún factor específico.	
Y ₆		$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$	Generar un indicador de Biodiversidad de abundancia proporcional	S: número de especies (la riqueza de especies) p _i : proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos (es decir la abundancia relativa de la especie); \bar{N} n _i : número de individuos de la especie i N: número de todos los individuos de todas las especies	

Finalmente, se empleó el índice de competitividad forestal estatal (Icofe) (Instituto Mexicano para la competitividad [IMCO], 2014) para contrastar los resultados obtenidos.

RESULTADOS

El valor del IGD calculado para todo el país se presenta en la tabla 3. Este, al igual que el resto de los valores de IGD presentados posteriormente, corresponden al promedio de los valores calculados de los indicadores asociados a cada variable para cada uno de los conglomerados del Infys.

De una manera más detallada se determinó el valor de IGD por tipo de ecosistema y sus indicadores asociados (Tabla 4).

Los valores del coeficiente de asimetría, al ser positivos (> 0), indican que la mayoría de los conglomerados muestreados para cada comunidad, se encuentran por arriba de la media (IGD).

En la tabla 5 se enlistan los valores de IGD obtenidos para cada entidad federativa, omitiéndose tres de ellas

debido a que no fue posible identificar un bosque de referencia dentro de su territorio (AGS, BC y TLAX).

Discusión

Las estadísticas sobre los disturbios que ocurren en los bosques y las selvas de México se centran en tasas de deforestación y en la incidencia de agentes de disturbio, no se hace referencia alguna respecto a indicadores que evalúen la degradación forestal (Masera-Cerutti, 1996; Torres-Rojo, 2004; Conafor, 2010), por ello no es posible contrastar los resultados generados en este estudio con otras fuentes nacionales. A escala internacional existen análisis y estimaciones de degradación como los mencionados por Souza *et al.* (2013) y Shimabukuro *et al.* (2015), sin embargo, tampoco son comparables con los resultados del presente trabajo, por ser derivados mediante una metodología diferente -uso de sensores remotos de alta y mediana resolución espacial.

En lo referente a la generación de índices, en México se cuenta con el índice de riesgo de deforestación (Inecc, 2013) y el índice de competitividad forestal estatal (Icofe) (IMCO, 2014), este último basado en el análisis de información sobre el aprovechamiento y la vulnerabilidad de los bosques en cada una de las entidades federativas. El Icofe, proporciona información específica en el rubro “Nivel de degradación en terrenos forestales”, considerando la clasificación del Infys (Conafor, 2012). En este sentido, se considera que el presente trabajo es prístino sobre el tema, más aun si se considera el aspecto cuantitativo sobre el monitoreo y evaluación de la degradación para México.

TABLA 3. Índice general de degradación (IGD) para México y valores de indicadores asociados.

<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>NHA</i>	<i>VOL</i>	<i>%DA</i>	<i>Ish</i>	<i>IGD</i>
0.97	0.94	1.00	0.99	1.06	1.03	1.00

AB=índice de área basal, CD= índice de cobertura de dosel, NHA= índice de número de árboles, VOL= índice de volumen, DA= índice de daño al arbolado, Ish= índice de Shannon-Wiener.

TABLA 4. Índice general de degradación (IGD) por ecosistema y valores de indicadores asociados.

<i>Comunidad</i>	<i>AB</i>	<i>CD</i>	<i>NHA</i>	<i>VOL</i>	<i>%DA</i>	<i>Ish</i>	<i>IGD</i>	<i>Coef. asimetría de Fisher</i>
<i>Selva Alta-Mediana</i>	1.059	1.018	0.992	1.068	1.009	1.006	1.020	0.51
<i>Selva Baja</i>	1.001	0.910	0.994	0.984	1.093	1.064	0.957	0.92
<i>Coníferas</i>	1.007	0.972	1.087	1.055	0.767	0.916	1.086	1.61
<i>Coníferas y latifoliadas</i>	0.999	0.895	1.012	0.961	0.846	1.006	1.007	0.84
<i>Latifolidas</i>	0.840	0.899	0.952	0.920	1.017	0.880	0.955	1.40

AB= índice de área basal, CD= índice de cobertura de dosel, NHA= índice de No. árboles, VOL= índice de volumen, DA= índice de daño al arbolado, Ish= índice de Shannon-Wiener.



TABLA 5. Índice general de degradación (IGD) y valores de indicadores asociados por entidad federativa.

<i>Entidad</i>	<i>Número de conglomerados</i>	<i>IGD</i>	<i>NHA</i>	<i>AB</i>	<i>VOL</i>	<i>CD</i>	<i>%DA</i>	<i>Ish</i>	<i>Coef. asimetría de Fisher</i>
BCS	15	0.92	0.70	0.43	0.24	0.20	2.46	1.46	0.38
CAMPECHE	250	0.88	1.04	0.97	0.55	0.92	0.79	1.03	-0.149
CHIAPAS	182	0.9	0.97	0.80	0.80	0.58	0.99	1.28	0.51
CHIHUAHUA	552	0.91	0.93	0.86	0.77	0.95	0.94	1.01	1
COAHUILA	35	0.93	0.80	0.83	0.88	0.65	1.04	1.37	1.5
COLIMA	9	1.13	1.03	1.14	1.20	2.06	0.58	0.78	1.1
DF	4	0.63	0.64	0.44	0.42	0.44	0.90	0.96	0.19
DGO	449	0.84	0.75	0.76	0.81	0.68	0.96	1.08	1.16
GRO	214	0.99	1.02	0.87	0.85	0.82	1.24	1.14	0.83
GTO	38	0.9	0.61	0.72	0.85	0.53	1.44	1.26	-0.05
HGO	55	0.87	0.74	0.62	0.58	0.75	1.56	0.99	1.78
JAL	278	0.97	0.84	0.87	0.86	0.84	1.04	1.37	0.22
MEX	59	0.99	0.75	0.87	1.01	0.76	1.33	1.20	0.96
MICH	192	1.06	1.08	0.96	0.88	0.92	1.52	0.98	0.67
MOR	4	1.54	0.65	1.05	0.94	1.14	3.66	1.80	-0.035
NAY	113	0.86	0.74	0.90	0.88	0.93	0.76	0.98	0.94
NL	45	1.01	0.63	0.80	0.82	0.82	2.16	0.86	0.87
OAXACA	412	1.06	0.88	0.99	0.98	0.86	1.39	1.26	0.66
PUE	62	1.39	0.85	0.72	0.95	0.79	3.78	1.22	0.77
QRO	21	0.59	0.69	0.42	0.46	0.36	0.69	0.92	0.23
QROO	264	0.97	0.88	0.90	0.85	0.85	1.30	1.03	-0.11
SIN	95	0.8	0.94	0.73	0.63	0.53	1.00	0.97	0.25
SLP	59	0.66	0.65	0.60	0.59	0.56	0.64	0.92	0.57
SON	130	0.83	0.89	0.41	0.54	0.79	0.80	1.53	0.82
TAB	10	1.11	1.53	0.93	1.13	1.14	0.51	1.41	-0.51
TAMPS	48	0.63	0.68	0.65	0.64	0.44	0.59	0.75	0.37
VER	73	1.4	1.43	1.78	2.02	1.40	0.65	1.06	0.51
YUC	151	1.04	0.99	1.03	1.09	0.88	1.14	1.08	0.59
ZAC	93	0.85	0.81	0.75	0.47	0.89	1.14	1.03	0.88

AB= índice de área basal, CD= índice de cobertura de dosel, NHA= índice de No. árboles, VOL= índice de volumen, DA= índice de daño al arbolado, Ish= índice de Shannon-Wiener.

No obstante que se identifican algunas áreas severamente degradadas en México, el valor del IGD ponderado a escala nacional indica que, en general, para el periodo evaluado (cinco años), en los ecosistemas del país no se identifica algún proceso considerable de deforestación/degradación, es decir, el valor obtenido del IGD es igual al valor de referencia (1.00) (Tabla 3).

Ecosistema

La figura 1 contiene de manera combinada la representación de los distintos indicadores que dan origen a cada IGD por ecosistema. Para el caso del indicador daño del arbolado, se utilizó el recíproco del valor original, ya que este a mayor magnitud representaba menor daño.

El indicador asociado al número de árboles por hectárea (NHA) presenta los mayores valores para el ecosistema coníferas, al igual que la comunidad representada por coníferas y latifoliadas. Para el caso del indicador correspondiente al volumen, el segundo mayor valor se presenta en el tipo de vegetación coníferas. Probablemente estos valores tengan relación con lo citado por Bray, Merino-Pérez y Barry (2005), quienes indican que el manejo forestal en México se desarrolla principalmente en las comunidades de coníferas y latifoliadas, privilegiando los valores más altos de índices para estas variables (NHA y VOL).

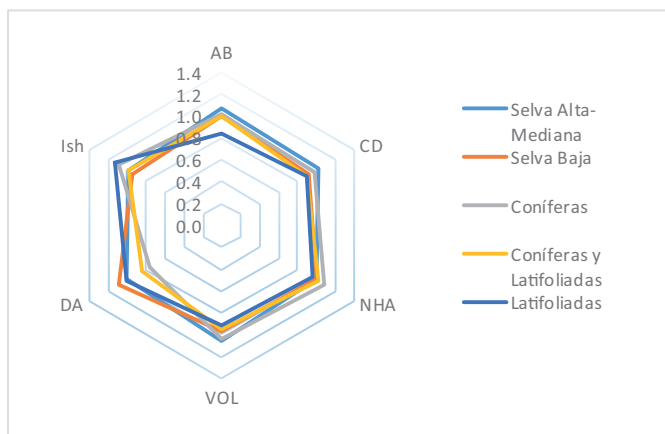


FIGURA 1. Representación multidimensional de los indicadores de degradación por ecosistema.

El indicador con mayor valor asociado al daño al arbolado (DA) se ubica en el ecosistema selva baja. En contraste, el índice de Shannon-Wiener, correspondiente al indicador de biodiversidad de abundancia proporcional es el más bajo para esta misma comunidad. En un estudio realizado en el estado de Quintana Roo, teniendo como objeto de estudio este tipo de vegetación (selva baja), se encontró que los principales disturbios (huracanes, incendios y la agricultura de roza-tumba y quema), generan impactos a gran escala (> 1 ha). Adicionalmente, la tala indiscriminada afecta la biodiversidad (Bray *et al.*, 2005).

Entidad federativa

Los estados con mejor calificación de IGD y, por lo tanto, sin evidencia global de procesos de degradación son: Puebla, Veracruz, Morelos y Colima.

En este caso la calificación del Icofe (IMCO, 2014), coincide para Veracruz (4° del Icofe) y Morelos (2° Icofe), existiendo una gran disimilitud entre ambos índices (IGD contra Icofe) para Puebla (20° del Icofe) y Colima (26° del Icofe).

El gráfico radial presentado abajo (Fig. 2), detalla la variación de los valores correspondientes a cada indicador que componen el IGD para los estados sin evidencia global de degradación. La variabilidad presente muestra las limitaciones del IGD como un indicador unidimensional.

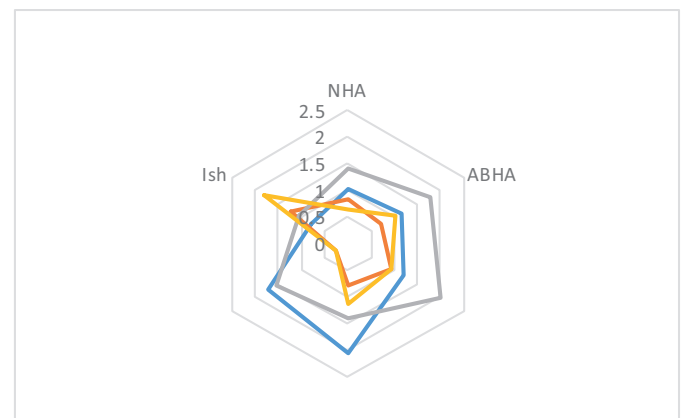


FIGURA 2. Gráfico radial para los estados con mayor IGD (sin evidencia de procesos de degradación).

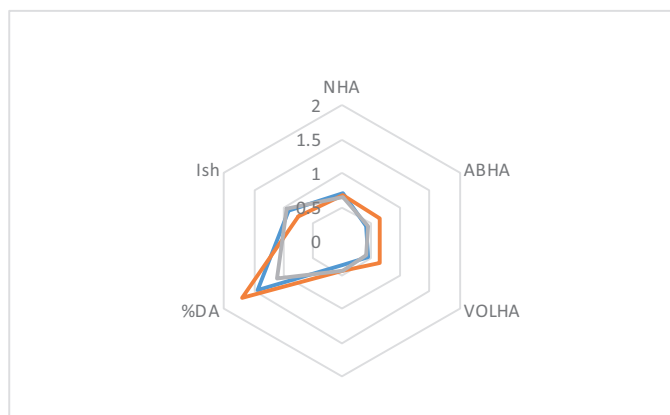


FIGURA 3. Gráfico radial para los estados con menor IGD (evidencias de procesos de degradación). QRO: Querétaro, TAMPS: Tamaulipas, DF: Distrito Federal (Ciudad de México).

Contrariamente, Querétaro, Tamaulipas y el DF (Ciudad de México) resultaron con los valores menores de IGD, indicando un posible proceso de degradación. En la figura 3 se puede constatar la homogeneidad de la tendencia de los valores del IGD correspondientes a cada indicador.

Al contrastar estas estimaciones del IGD contra el Icofe (2014) se encuentra cierta similitud para Querétaro (29° del Icofe) y Tamaulipas (21° del Icofe). Para el caso del DF no existe coincidencia (1° del Icofe). Para esta última entidad se deduce que la calificación otorgada por el Icofe (2014) se basa en el hecho que el DF cuenta con el mayor volumen de madera promedio a escala nacional (206 m³/ha), sin considerar el análisis de cambio de las variables e indicadores, objeto de la presente investigación. Caso contrario al anterior (Fig. 2), la gráfica contenida en la figura 3 sugiere que estas tres entidades comparten condiciones comunes de las variables o indicadores considerados en este estudio.

El coeficiente de asimetría permite deducir información referente a la distribución de los valores de IGD e indicadores asociados a las poblaciones analizadas (ecosistemas y entidades). Por ejemplo, si se considera el histograma presentado en la figura 4, así como el valor del coeficiente de asimetría, correspondiente al estado de

Campeche. El área sombreada corresponde a los conglomerados existentes en el estado cuyo valor está por arriba del IGD promedio ($\sigma = 1.011$). Aunque este valor indica que no existe ningún proceso de degradación aparente, el coeficiente de asimetría negativo (-0.149) revela que un mayor número de conglomerados degradados (área no sombreada) se concentra por debajo de la media.

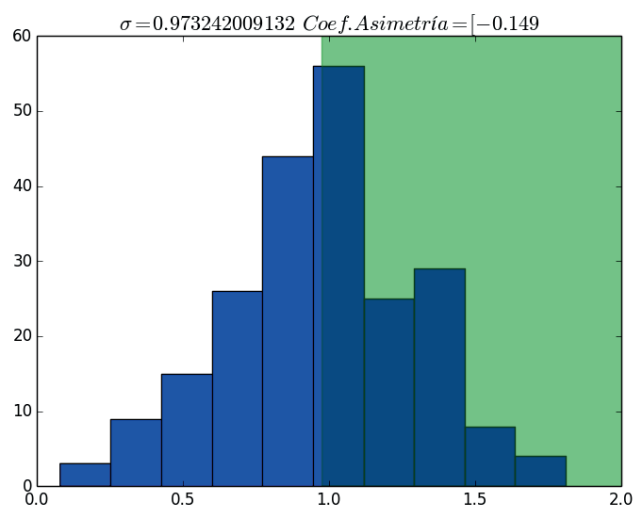


FIGURA 4. Histograma de valores de IGD para el Estado de Campeche.

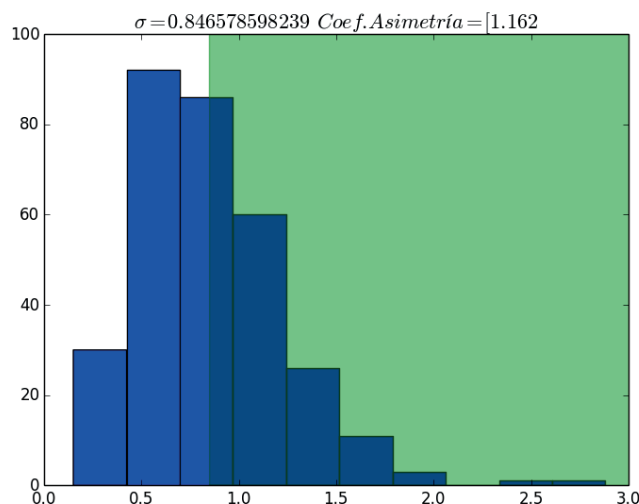


Figura 5. Histograma de valores de IGD para el Estado de Durango.

El estado de Durango es una de las entidades con mayor coeficiente de asimetría (1.1). Este valor indica que un mayor número de conglomerados no degradados (174) se ubican por arriba del IGD promedio (0.84) —área sombreada en la figura 5.

En la tabla 6 se propone un sistema de calificación referente a degradación forestal, con base en los resultados obtenidos por entidad.

En la figura 6 se muestra la distribución espacial de las categorías de degradación a escala nacional.

TABLA 6. Categorías de degradación basadas en el valor de IGD.

<i>Categoría</i>	<i>Intervalo IGD</i>	<i>No. Entidades</i>
Alto (predisposición) proceso de degradación	(0.59,0.66)	4
Moderado proceso de degradación	(0.80,0.88)	7
Ligero proceso de degradación	(0.90,0.99)	9
Sin proceso de degradación	> 1	9

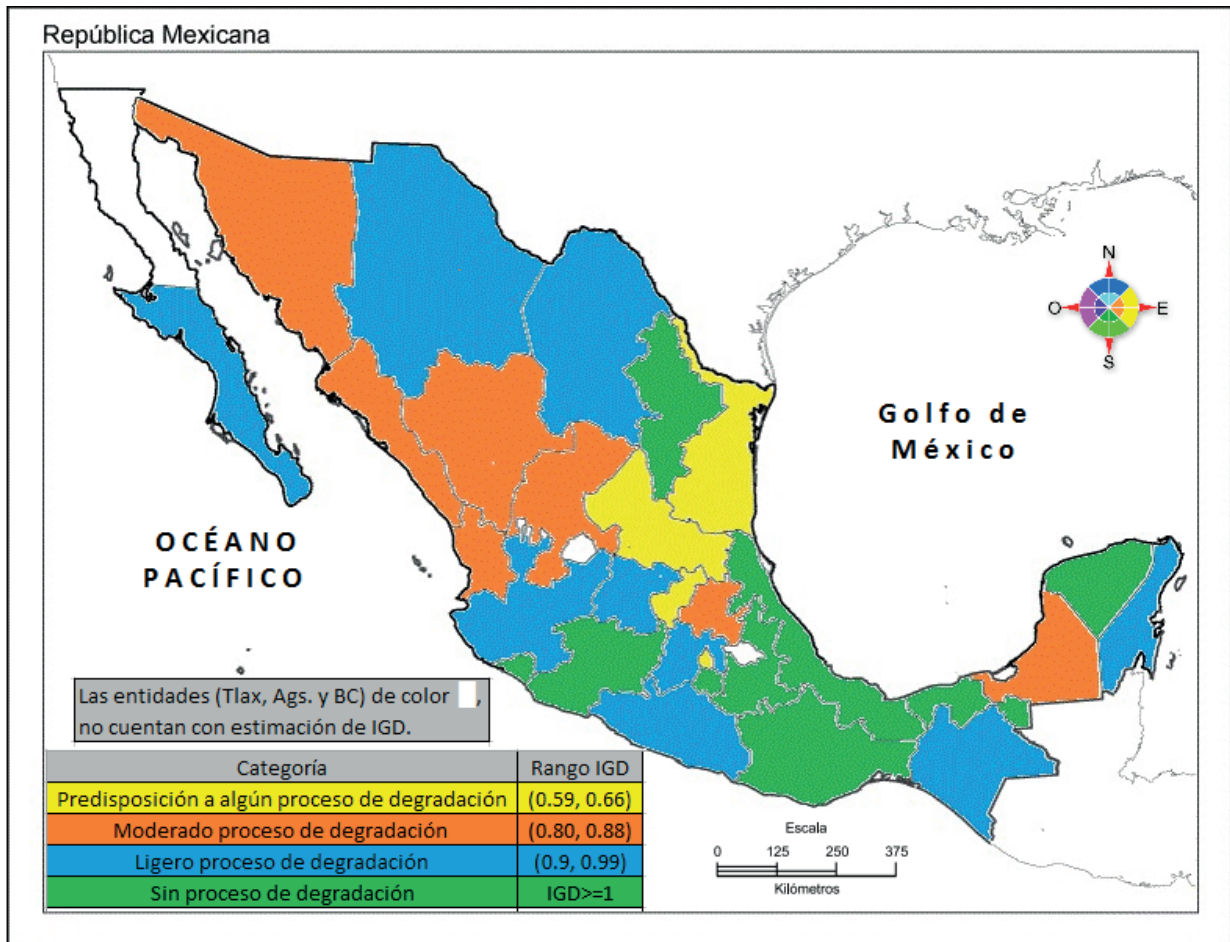


FIGURA 6. Categorías de degradación forestal por entidad federativa con base en el valor promedio de IGD.



Si existiera interés por conocer la variabilidad espacial de las variables estudiadas (indicadores y el IGD) en puntos no muestreados, se podría recurrir a técnicas de interpolación geoestadística (ej. kriging) con el auxilio de datos derivados de sensores remotos y/o sistemas de información geográfica. Dado que cada conglomerado se encuentra ubicado geográficamente, se podría mapear la distribución de los IGD relacionados con cada conglomerado, de tal forma que se pueda obtener una versión de la distribución espacial de la degradación en México, ubicando aquellas zonas con mayor concentración de conglomerados degradados; información sin duda valiosa para la planeación de acciones tendientes a disminuir o evitar la degradación forestal.

Dado que los resultados presentados tienen como base la malla nacional del Infys, la escala (1:250 000) y el esquema de muestreo correspondiente, siendo este último adecuado para 25 km² de vegetación continua, la aplicabilidad de los mismos es a escala nacional y por entidad federativa. Para una escala más detallada se requiere del uso de inventarios forestales locales con una mayor densidad de muestreo.

CONCLUSIONES

La mayoría de las investigaciones a escala internacional, los proyectos piloto REDD + y las agencias de certificación de carbono, se han centrado en la evaluación de la deforestación. México no es la excepción, los esfuerzos son considerables para el establecimiento de la línea base enfocada en evaluar este rubro.

Se conceptualizó, diseñó e implementó un índice general de degradación del bosque (IGD) que se alimenta de datos dasométricos (variables de densidad, de disturbio y de diversidad) provenientes del Infys de México y los procesa utilizando los estimadores de razón de medias propuestos por Velasco (2003; 2015). El IGD puede ser estimado a escala entidad federativa o a escala ecosistema. Los resultados de su aplicación pueden ser útiles para tomadores de decisiones en el área forestal, para orientar el diseño e implementación de políticas gubernamentales encaminadas a coadyuvar al logro de un manejo forestal

sustentable y para el monitoreo de los mecanismos para la mitigación del cambio climático.

Los resultados obtenidos a nivel de entidad federativa indican que los estados de Puebla, Veracruz, Morelos y Colima no muestran evidencia global de procesos de degradación (valor de IGD bajo) en el periodo evaluado. Contrariamente, Querétaro, Tamaulipas y el DF (Ciudad de México) registraron cierto proceso de degradación. El valor del IGD ponderado a escala nacional indica que, en general, para el periodo evaluado de cinco años, los ecosistemas del país no registran procesos considerables de degradación.

RECONOCIMIENTOS

A la Gerencia de Sistema Nacional de Monitoreo Forestal de la Conafor por proporcionar amablemente la base de datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos.

REFERENCIAS

- Bray, D. B., Merino-Pérez, L. y Barry, D. (2005). *The community forests of Mexico: managing for sustainable landscapes*. Austin, Texas: University Texas Press.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2012a). *Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Re-muestreo 2012*. Zapopan, Jalisco, México. Recuperado de www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/infys/temas/documentos-metodologicos.
- Comisión Nacional Forestal [Conafor] (2013). *Memoria Documental. Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. Zapopan, Jalisco, México. Recuperado de www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/4125CNF-24_Infys.pdf
- Diario Oficial de la Federación (2014). *Ley General de Cambio Climático*. México: DOF. Recuperado de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf
- Diario Oficial de la Federación (2017). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. México: DOF. Recuperado de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/259_240117.pdf
- Flores-Cruz, J. A. (2014). *Data Warehouse y minería de datos como alternativas al análisis de datos forestales*. Tesis de Maestría no publicada, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, México

- Gebhardt, S., Wehrmann, T., Muñoz-Ruiz, M. A., Maeda, P., Bishop, J., Schramm, M., Kopeinig, R., Cartus, O., Kelldorfer, J., Ress, R., Santos, L.A. y Schmidt, M. (2014). MAD-MEX: automatic wall-to-wall land cover monitoring for the Mexican REDD-MRV Program Using All Landsat Data. *Remote Sensing*, 6(5), 3923-3943. doi: 10.3390/rs6053923
- González-Duque, R. (2014). *Python para todos* (1ª ed.). Recuperado de <http://mundogeek.net/tutorial-python/>
- Guariguata, M. R., Nasi, R. y Kanninen, M. (2009). Forest degradation: It is not a matter of new definitions. *Conservation Letters*, 2(6), 286-287. doi: 10.1111/j.1755-263X.2009.00075.x
- Herold, M., Román-Cuesta R. M., Mollicone, D., Hirata, Y., Van Laake, P., Asner, G., Souza, C., Skutsch, M., Avitabile, V. y MacDicken, K. (2011). Options for monitoring and estimating historical carbon emissions from forest degradation in the context of REDD+. *Carbon Balance Management*, 6(13), 1-7. doi: 10.1186/1750-0680-6-13.
- Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO]-Reforestamos México. (2014). Índice de competitividad forestal estatal. México, D.F.: IMCO. Recuperado de http://imco.org.mx/medio_ambiente/indice-de-competitividad-forestal-estatal/
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2013). Índice de riesgo de deforestación (INE-IRDEF-2.0.1). Recuperado de www.inecc.gob.mx/irdef.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2015). *Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (1ª ed.). México, D.F.: Semarnat. Recuperado de www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=685
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] (2009). *Mapa de vegetación y uso de suelo serie IV*. México, D.F.: Inegi.
- Lund, H. G. (2009). *What is a degraded forest?*. Gainesville, Virginia: Forest Information Services. Recuperado de www.researchgate.net/publication/280921178_What_is_a_degraded_forest.
- Maniatis, D. y Mollicone, D. (2010). Options for sampling and stratification for national forest inventories to implement REDD+ under the UNFCCC. *Carbon Balance and Management*, 5(9), 1-14. doi: 10.1186/1750-0680-5-9.
- Masera-Cerutti, O. R. (1996). *Deforestación y degradación forestal en México*. Recuperado de www.union.org.mx/guia/actividadesyagravios/deforestacionenmexico.htm
- Méndez-López, B. y De Los Santos-Posadas, H. M. (2011). *Diagnóstico del potencial de reducción de emisiones de GEI derivadas de actividades REDD+ como un insumo a la elaboración de la estrategia nacional REDD+*. Montecillo, Edo. de México: Colegio de Postgraduados.
- Morales-Barquero, L., Borrego, A., Skutsch, M., Kleinn, C. y Healey, J. R. (2015). Identification and quantification of drivers of forest degradation in tropical dry forests: a case study in Western Mexico. *Land Use Policy*, 10(49), 296-309. doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.006.
- Morales-Barquero, L., Skutsch, M., Jardel-Peláez, E. J., Ghilardi, A., Kleinn, C. y Healey, J. R. (2014). Operationalizing the definition of forest degradation for REDD+, with application to Mexico. *Forests*, 5(14), 1653-1681. doi:10.3390/f5071653.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2011). *Assessing forest degradation towards the development of globally applicable guidelines: Towards the development of globally applicable guidelines* (Assessment working paper 177). Roma, Italia: FAO.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OECD] (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. París, Francia: OECD-JRC. Recuperado de www.oecd.org/std/42495745.pdf.
- Penman, J., Gytarsky, M., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K.L., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (2003). *Definitions and methodological options to inventory emissions from direct human-induced degradation of forests and devegetation of other vegetation types*. Kanagawa, Japan: The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Pérez-Benedito, M. A. (2013). Aplicación de los gráficos radiales en la gestión de los servicios públicos de transporte. *Revista de Auditoría Pública*, 60, 73-95. Recuperado de www.auditoriapublica.com/



- Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Interciencia*, 31(8): 583-590.
- Schoene, D., Killmann, W., von Lüpke, H. y Loyche-Wilkie, M. (2007). *Definitional issues related to reducing emissions from deforestation in developing countries* (FAO Forests and Climate Change Working Paper 5). Roma, Italia: FAO.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1985). *Inventarios Estatales Forestales en México*. México, D.F.: SARH.
- Shimabukuro, Y. E., Beuchle, R., Grecchi, R. C., Achard, F., Miettinen, J., Simonetti, D., Velasco Gomez, M., Duarte, V., Arai, E., Anderson, L. O., Oliveira and Cruz de Araújo, L. E. (2015). Detection of forest degradation caused by fires in Amazonia from time series of MODIS fraction images. En João Pessoa (Ed.), *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR* (pp. 651-658). Brasil: INPE.
- Simula, M. (2009). *Towards defining forest degradation: comparative analysis of existing definitions* (Forest Resources Assessment Working Paper 154). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Souza, C. M., Siqueira, J. V, Sales, M. H., Fonseca, A. V., Ribeiro, J. G., Numata, I., Cochrane, M. A., Barber, C. P., Roberts, D. A. y Barlow, J. (2013). Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 5(11), 5493-5513. doi:10.3390/rs5115493.
- Thompson, I. D., Guariguata, M. R., Okabe, K., Bahamondez, C., Nasi, R., Heymell, V., and Sabogal, C. (2013). An operational framework for defining and monitoring forest degradation. *Ecology and Society*, 18(2), 1-23. Recuperado de <http://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art20/>
- TIOBE (2014). *Tiobe Index*. Recuperado de www.tiobe.com/index.php/content/paperinfo/tpci/index.html.
- Torres-Rojo, J. M. (2004). *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020* (Informe Nacional México). Roma, Italia: FAO. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/j2215s/j2215s00.pdf>
- Velasco-Bautista, E. (2015). *Desarrollo de técnicas estadísticas para la evaluación y monitoreo de ecosistemas forestales en México*. Disertación doctoral no publicada, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México, México.
- Velasco-Bautista, E., Ramírez M., H., Moreno S., F. y de la Rosa V., A. (2003). Estimadores de razón para el inventario nacional forestal de México. *Revista Ciencia Forestal en México*, 28(94), 23-43.
- Zwillinger, D. y Kokoska, S. (2000). *CRC Standard probability and statistics tables and formulae*. Nueva York: Chapman & Hall.

Manuscrito recibido el 15 de enero de 2016.

Aceptado el 2 de mayo de 2017.

Este documento se debe citar como:

Leyva-Ovalle, A., Valdez-Lazalde, J. R., de los Santos-Posadas, H. M., Martínez-Trinidad, T., Herrera-Corredor, J. A., Lugo-Espinosa, O., García-Nava, J. R. y Arévalo-Galarza, G. (2017). Monitoreo de la degradación forestal en México con base en el inventario nacional forestal y de suelos (Infys). *Madera y Bosques*, 23(2), 69-83. doi: 10.21829/myb.2017.2321431