



## Análisis de la pertinencia de las plantaciones forestales en Oaxaca

### Analysis of the pertinence of forest plantations in Oaxaca

Prudencia Caballero Cruz<sup>1</sup> y Eduardo Javier Treviño Garza<sup>1\*</sup>

#### Abstract:

The assessment of large-scale vegetation cover is a complicated and expensive task; however, remote sensing has facilitated the study of its dynamics and spatial distribution, based on the biomass estimator, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The need to know the success of the forest plantations established in the tropical and temperate region of southern Oaxaca during the 2014-2016 period, as well as the complexity and high costs implicit in the traditional evaluation of large-scale vegetation cover, motivated the use of NDVI and other geomatic techniques to estimate biomass and determine the environmental factors that influence its development. For this, the biomass was obtained by processing three series of satellite images: two from the Landsat 8 OLI sensor and one from the Sentinel-2. Through a canonical correspondence analysis, the variables that affected its dynamics were defined. And, from an analysis with time series it was determined that the plantations of the tropical and temperate zones present good development, but of different behavior between both. The environmental variables that affect its dynamics are altitude, precipitation, temperature, evapotranspiration, humidity and pH. Therefore, it is important to consider the environmental factors and the ecological requirements of the species before their establishment.

**Key words:** Biomass, environmental factors, satellite images, vegetation index, remote sensing, GIS.

#### Resumen:

La evaluación de la cubierta vegetal a gran escala es una tarea complicada y costosa; sin embargo, la percepción remota ha facilitado el estudio de su dinámica y distribución espacial, a partir del estimador de biomasa, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). La necesidad de conocer el éxito de las plantaciones forestales establecidas en la región tropical y templada del sur de Oaxaca durante el periodo 2014 -2016, así como la complejidad y los altos costos implícitos en la evaluación tradicional de la cubierta vegetal a gran escala, motivaron el uso del NDVI y otras técnicas geomáticas para estimar la biomasa y determinar los factores ambientales que influyen en su desarrollo. Para ello, se obtuvo la biomasa procesando tres series de imágenes de satélites: dos del sensor *Landsat 8 OLI* y una del *Sentinel-2*. Mediante un análisis de correspondencia canónica se definieron las variables que incidieron sobre su dinámica. Y, a partir de un análisis con series temporales se determinó que las plantaciones de la zona tropical y templada presentan buen desarrollo, pero de comportamiento distinto entre ambas. Las variables ambientales que afectan su dinámica son la altitud, precipitación, temperatura, evapotranspiración, humedad y pH. Por ello, es importante considerar los factores ambientales y los requerimientos ecológicos de las especies antes de su establecimiento.

**Palabras clave:** Biomasa, factores ambientales, imágenes de satélite, índice de vegetación, sensores remotos, SIG.

Fecha de recepción/Reception date: 19 de marzo de 2018

Fecha de aceptación/Acceptance date: 30 de octubre de 2018

---

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. Correo-e: eduardo.trevinogr@uanl.edu.mx

## Introducción

El abastecimiento de madera para la industria basado en el aprovechamiento de los bosques, se ha complementado con plantaciones forestales para disminuir la presión y la reducción de los ecosistemas naturales. Lo anterior ha resultado en que la superficie forestal de 29 países aumentó 6 % durante el periodo 2000-2010 (FAO, 2016). A nivel global las plantaciones forestales cubrieron en el 2010 una superficie de 264 millones de hectáreas, equivalente a 7 % de la superficie forestal mundial; de las cuales, 30 % se concentró en Asia a partir de especies nativas, y la mayoría se han establecido con fines industriales, con una mínima superficie para no comerciales (FAO, 2010).

En México, para los proyectos de plantaciones se suelen utilizar especies que son de rápido crecimiento (70 %) como *Pinus radiata* D.Don, *P. caribaea* Morelet, *P. taeda* L., *P. patula* Schiede ex Schltl. & Cham., *P. elliottii*, *P. palustris* Mill., *P. oocarpa* Schiede ex Schltl., *Eucalyptus grandis* W.Hill, *E. urophylla* S.T.Blake y *E. globulus* Labill.; mientras que *Tectona grandis* L.f. cubre 15 %, 12 % para latifoliadas como *Gmelina arborea* Roxb., *Acacia mangium* Willd. y *Albizia falcata* (L.) Fosberg y otras coníferas 3 % (Musálem, 2006; Velázquez *et al.*, 2013).

En el estado de Oaxaca se han establecido diversas plantaciones en la zona templada y tropical, en su mayoría con especies nativas, sin embargo, se desconoce la situación actual de su desarrollo, lo cual imposibilita una buena gestión de dichos recursos. La evaluación de la cubierta vegetal a gran escala es una tarea costosa, laboriosa y demandante de habilidades técnicas especializadas, que difícilmente los productores forestales pueden enfrentar. Esto justifica el uso de técnicas indirectas como las geomáticas, las cuales permiten integrar bases georreferenciadas sobre los recursos forestales (García *et al.*, 2001; Olivas *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2015). Además, facilita las diferentes actividades de recolección, captura, procesamiento, análisis e interpretación de la información. Entre sus ventajas se incluye la capacidad de representar visualmente los datos de la radiación electromagnética reflejada por la

cobertura forestal y otros tipos de cubierta de superficie de la tierra, registrados con ayuda de sensores remotos (Duarte *et al.*, 2016).

Con el desarrollo de los sensores remotos se ha estimulado la realización de estudios sobre la productividad y la biomasa de la vegetación, mediante el empleo de índices espectrales, el más común es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) que estima la biomasa de la vegetación de diferentes ecosistemas, está relacionado con el crecimiento de las plantas y ayuda a caracterizar los aspectos estructurales de los bosques (Torres *et al.*, 2014; Palestina *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015).

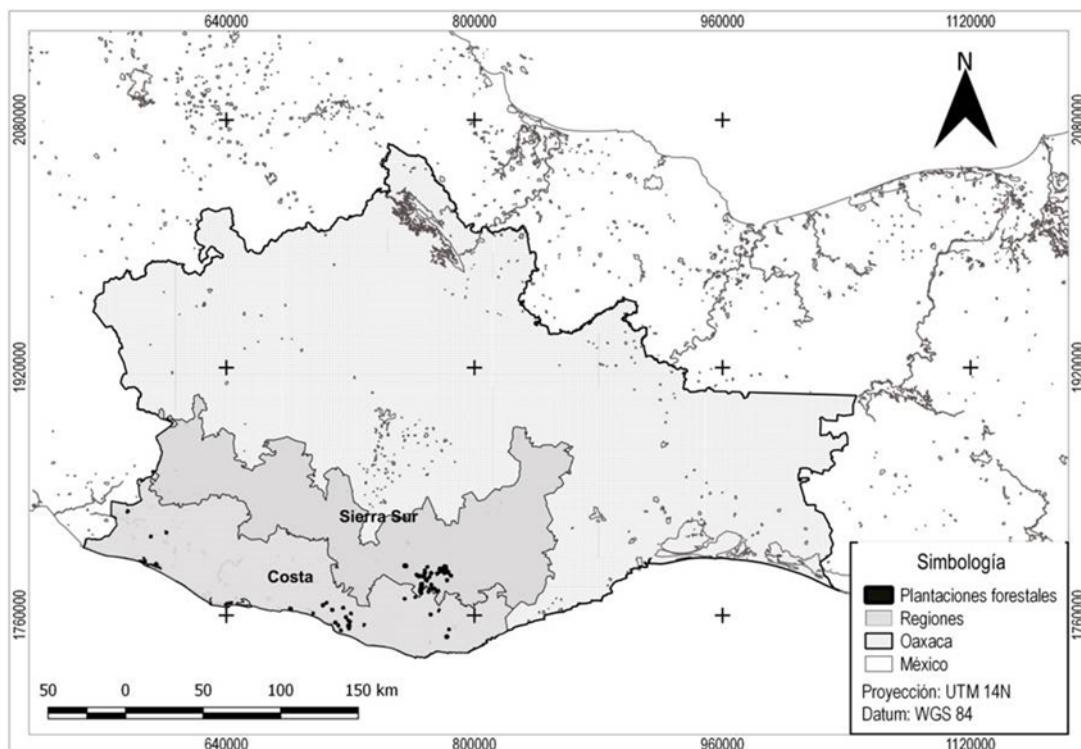
El objetivo de la presente investigación fue evaluar las plantaciones forestales comerciales de las regiones tropical y templada del sur de Oaxaca, con base en imágenes de satélite y datos adquiridos de las variables ambientales incorporadas a un dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

## **Materiales y Métodos**

### **Área de estudio**

El estudio se desarrolló en la zona sur del estado de Oaxaca (Figura 1); cuya cubierta vegetal original en la región Costa (RC) corresponde a selva y en la región Sierra (RS) a bosque templado. Ambos tipos de cubiertas incluyen actualmente pequeñas áreas destinadas a la agricultura, a la ganadería, zonas deforestadas y plantaciones forestales establecidas en superficies agrícolas abandonadas o degradadas.

El clima de la RC es cálido subhúmedo y semicálido subhúmedo, con una temperatura máxima de 32 a 36 °C, una media de 24 a 28 °C; la precipitación media anual varía de 800 a 1 500 mm (Fernández *et al.*, 2012); y sus unidades de suelo comprenden regosoles, umbrisoles, leptosoles, luvisoles y Phaeozem (Inegi, 2017). En la RS, el clima es templado subhúmedo y semifrío subhúmedo, con temperatura media de 12 a 18 °C, y una precipitación de 1 000 a 1 500 mm (Fernández *et al.*, 2012); sus principales tipos de suelos son Cambisol, Leptosol, Luvisol y Umbrisol (Inegi, 2017).



**Figura 1.** Puntos de ubicación de las plantaciones donde se desarrolló el estudio.

## Metodología

Para la evaluación de las plantaciones comerciales, se hizo una selección entre las establecidas en el periodo 2000 a 2014 financiadas por la Conafor. Se obtuvieron los datos vectoriales de su localización y extensión, los cuales fueron proporcionados por la gerencia de la Conafor en Oaxaca; se consideraron predios con una superficie mayor o igual a 5 ha, con la finalidad de facilitar el análisis mediante imágenes de satélite. En la RC las plantaciones corresponden a especies de latifoliadas: *Cedrela odorata* L., *Swietenia humilis* Zucc., *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A. DC. y *Swietenia macrophylla* King. En la RS, son coníferas: *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. greggii* Engelm., *P. patula* Schltdl. et Cham, *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. douglasiana* Martínez, *P. maximinoi* H.E. Moore y *P. leiophylla* Schltdl. et Cham.

Las plantaciones de la región tropical se desarrollaron bajo las siguientes condiciones: evapotranspiración promedio de 861 mm, precipitación media anual de 1 002 mm y a una altitud 445 msnm; en la región templada bajo escenario que se describe a

continuación: evapotranspiración de 636 mm, precipitación promedio de 1 340 mm y una altitud de 2 384 msnm.

Se recopilaron datos ambientales georreferenciados del área de interés, correspondientes a la precipitación media anual, temperatura media anual, profundidad del suelo, pH del suelo, textura del suelo, altitud y pendiente del terreno, en las páginas de Internet de la Conabio, Inegi y del *Inventario Nacional Forestal y de Suelos* (Inegi, 2016; Inegi, 2017; Conabio, 2017; Conafor, 2017). Se homogeneizaron sus sistemas de proyección a UTM, con la finalidad de realizar el análisis de las condiciones ambientales de la zona donde se encuentran ubicadas las plantaciones.

Se adquirieron escenas de imágenes satelitales del año 2014, 2015 y 2016, todas del mismo periodo (noviembre-diciembre). Las de 2014 y 2015 fueron de *Landsat 8 OLI* (*Operational Land Imager*) y las del 2016 de *Sentinel-2*. Todas las imágenes se obtuvieron de manera gratuita en los siguientes enlaces: <http://earthexplorer.usgs.gov/>(Landsat 8) y <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Sentinel-2).

Se llevaron a cabo dos tipos de correcciones: la geométrica para ajustar la localización de las escenas de imágenes entre sí, y la atmosférica para corregir anomalías de las imágenes; además de, convertir los números digitales de cada una de ellas a valores de radiancia y después a reflectancia mediante el uso del *software QGIS*.

En el análisis de la biomasa de la vegetación, con la técnica indirecta basada en el NDVI, se incluyeron un total de 78 plantaciones forestales, 28 en la zona tropical y 50 en la templada. Se analizaron por separado las coníferas y las latifoliadas, debido a que ambos grupos de especies presentan respuestas espectrales diferentes.

Se empleó el NDVI para monitorear el establecimiento de las plantaciones para los años 2014, 2015 y 2016. Este índice describió la dinámica de mezcla de suelo-vegetación, así como la cantidad, la calidad, el desarrollo y el vigor de las plantaciones (Torre *et al.*, 2014; Escribano *et al.*, 2015; Muñoz *et al.*, 2016). El NDVI se calculó empleando los valores espectrales correspondientes a la región de la luz visible roja (R) (0.6–0.7  $\mu\text{m}$ ) y la luz infrarroja cercano (IRC) (0.7–1.3  $\mu\text{m}$ ):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Previo a la evaluación de las series temporales del NDVI, se realizó la extracción de la superficie correspondiente a las plantaciones, para lo cual se usaron los límites de cada área. El producto fue una porción por imagen, para la cual se estimaron los estadísticos considerando los valores de los pixeles (media, desviación estándar, el valor mínimo y máximo). Tras obtener una desviación significativa ( $p < 0.05$ ) de los datos hacia una distribución no normal, se aplicó una comparación de medias con la prueba de *Friedman* para determinar si existen cambios significativos en las tres fechas de plantación.

En la clasificación de los valores del NDVI, se asignaron los comprendidos entre 0 y 0.4, para vegetación baja o rala; de 0.5, 0.6 hasta 0.8, para vegetación en desarrollo; y de 0.8 a 1, para vegetación sana, vigorosa y densa (Merg *et al.*, 2011; Meneses, 2012; López *et al.*, 2015) (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Clasificación de los valores de NDVI.

Clasificación	Valor
Nubes y agua	<0.01
Suelo sin vegetación	0.01-0.1
Vegetación ligera	0.1-0.2
Vegetación mediana	0.2-0.4
Vegetación alta	>0.4

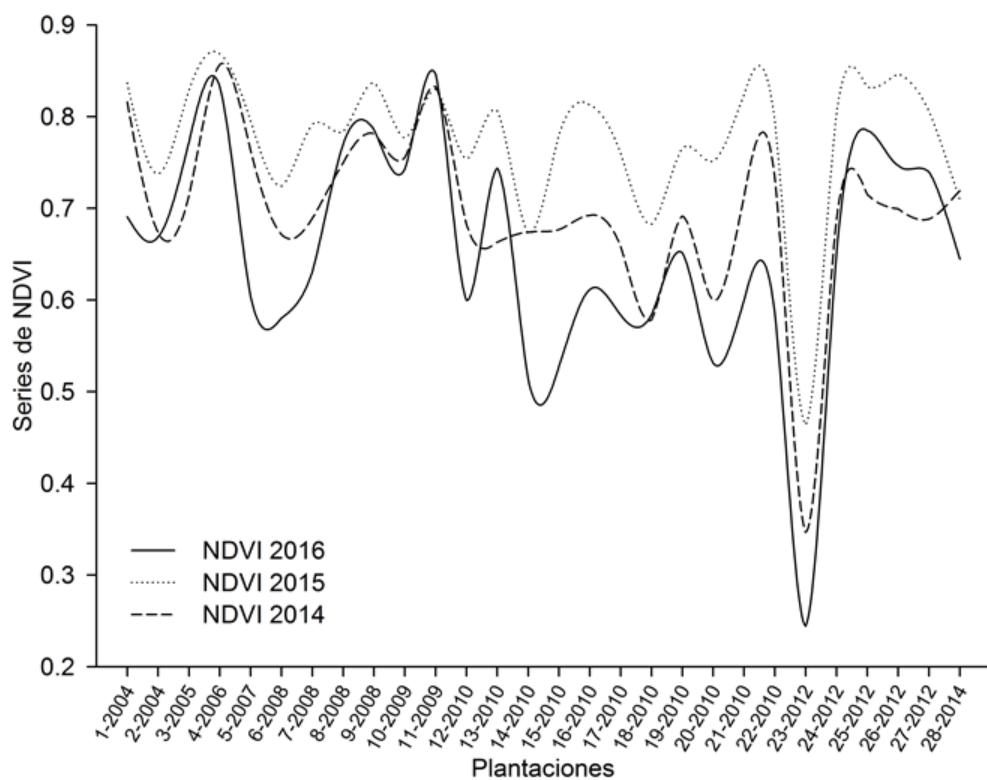
Por último, se hizo un análisis multivariado de correspondencia canónica (CCA), con el programa *R Studio* versión 1.1.4 (RStudio Team, 2016) para determinar las variables ambientales (precipitación media anual, temperatura media anual, altitud, pendiente, pH y profundidad del suelo) que inciden sobre la dinámica de las plantaciones. El CCA consistió en determinar el grado de asociación de todas las variables ambientales con respecto al NDVI del 2014, 2015 y 2016.

## Resultados y Discusión

### Dinámica de las plantaciones a partir del NDVI

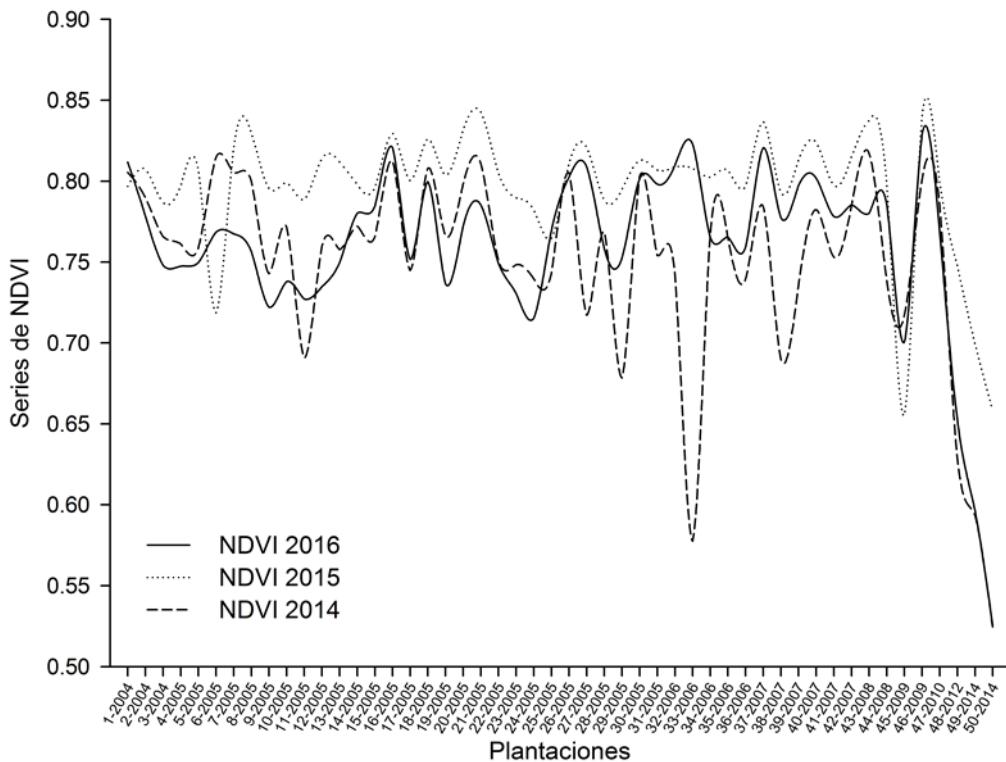
Todas las plantaciones de la zona tropical en sus tres evaluaciones correspondieron a una vegetación de media a alta y vigorosa, de acuerdo a la clasificación del NDVI realizada por Merg *et al.* (2011), López *et al.* (2015) y Meneses (2012). La tendencia del NDVI fue similar en los tres períodos anuales analizados; sin embargo, sus valores fueron menores para el año 2016, debido a una mejor resolución de las imágenes utilizadas (Figura 2). Los resultados de la prueba de *Friedman* indican que hay diferencias importantes en las tres series temporales de NDVI para la zona tropical (ANOVA Chi cuadrado = 33.429  $p<0.000$ ), las cuales muestran un incremento con el paso de los años.





**Figura 2.** Valores de NDVI para la biomasa de las plantaciones en zona tropical 2014 – 2016.

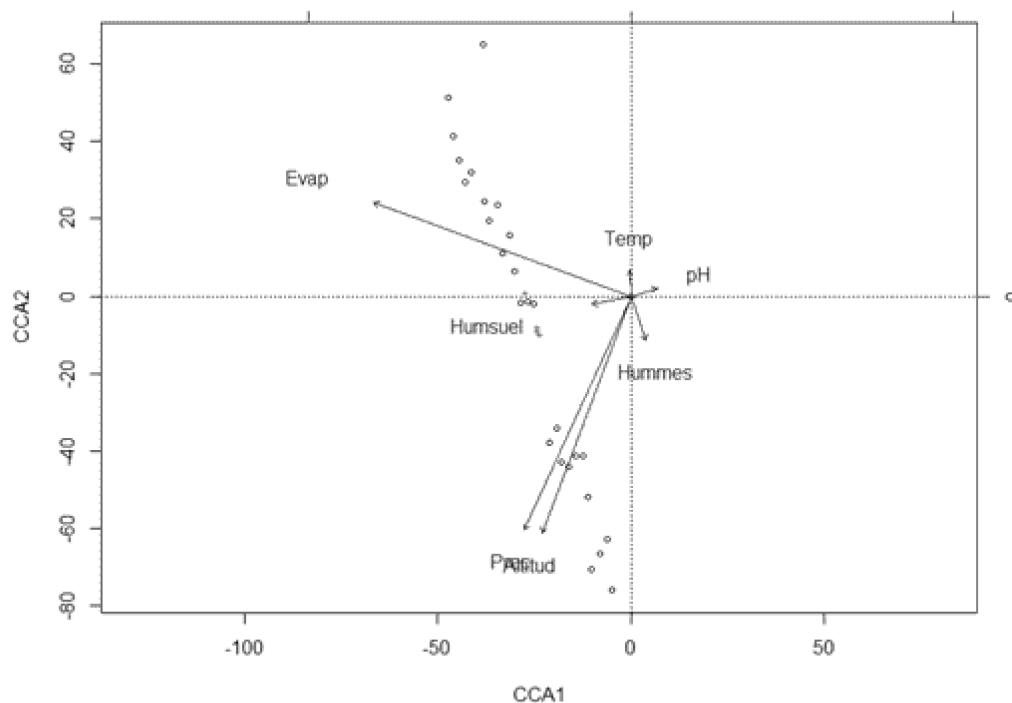
En la zona templada se determinó que todas las áreas corresponden a vegetación alta y en desarrollo. Las cifras de biomasa representadas por el NDVI presentaron una tendencia de incremento entre 2014 a 2015 (Figura 3); esto coincide con lo descrito por Vicente *et al.* (2004) para bosques y vegetación bien desarrollada. Los valores registrados para las plantaciones establecidas en los últimos años fueron los únicos bajos para la cantidad de biomasa, lo que, probablemente, obedece al poco tiempo transcurrido entre el establecimiento y la evaluación (Figura 3). Al utilizar la prueba de *Friedman*, se comprobó que hay diferencias significativas entre las plantaciones (ANOVA Chi cuadrado=50.520  $p<0.000$ ).



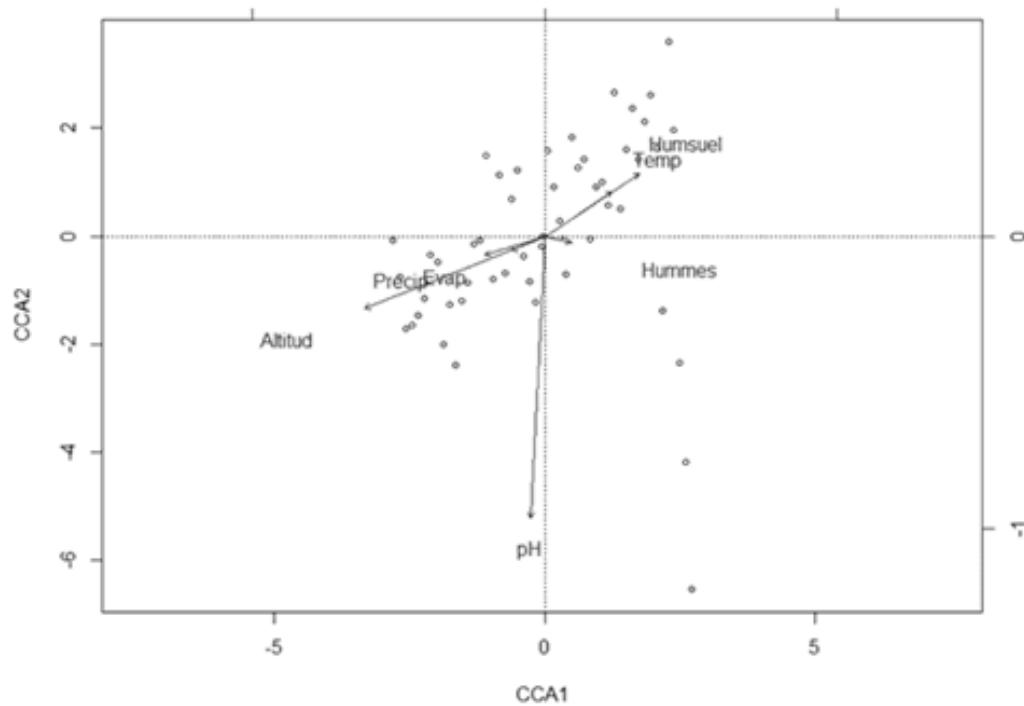
**Figura 3.** Valores de NDVI para biomasa de las plantaciones en zona templada 2014 - 2016.

### Factores ambientales asociados al NDVI

Con base en el análisis multivariado de correspondencia canónica (CCA), con las series temporales de biomasa y las variables ambientales, se determinó que para la región tropical la evapotranspiración, la precipitación y la altitud son factores que inciden en la dinámica de la biomasa de las plantaciones (Figura 4). Mientras que, en la región templada: la altitud, el pH, la temperatura, la evapotranspiración y la precipitación fueron las variables determinantes (Figura 5). Por lo tanto, es importante considerar las variables ambientales y las características del sitio (factores bióticos y abióticos), para tener una mayor productividad de las futuras plantaciones y menos fracasos.



**Figura 4.** CCA: series NDVI de especies tropicales vs variables ambientales.



**Figura 5.** CCA: series NDVI de coníferas vs variables ambientales.

La interacción de las variables climáticas, edafológicas y topográficas determinan el sitio donde pueden crecer las especies forestales, que tan rápido, y qué tan bien lo, hacen; no obstante, se deben de considerar factores internos como la calidad de las plantas al momento de ser establecidas en campo (Schlatter y Gerding, 2014). Es necesario efectuar una buena selección de los sitios antes de establecer las especies forestales, a fin de obtener una buena productividad maderable (Jofré *et al.*, 2013).

## **Conclusiones**

Las plantaciones de las regiones tropical y templada del sur de Oaxaca presentan un desarrollo favorable. La vegetación de cada fecha en ambas regiones está presente en la primera evaluación y evidencia un incremento con los años. Las plantaciones establecidas dos años antes de la evaluación carecen de aumento en su biomasa; por lo que es evidente que se requiere dejar pasar un tiempo razonable para usar este método indirecto de evaluación.

El desarrollo de la biomasa de las plantaciones en ambos tipos de ecosistemas depende de factores ambientales, los cuales deben considerarse al momento de modelar áreas ideales para ejecutar proyectos relacionados con las plantaciones en zonas de clima tropical y templado.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada al primer autor la realización de la presente investigación. A la Comisión Nacional Forestal. Al Geóg. Carlos A. Guerrero Elemen, Director General de Geografía y Medio Ambiente del Inegi, y a la Lic. Alejandra Cervantes Martínez, Coordinadora Estatal en Nuevo León del Inegi por las atenciones recibidas para obtener algunas de las imágenes de satélite. Así como al Ing. Carlos René Estrella Canto, Gerente Estatal de la Conafor en Oaxaca por su amabilidad de ceder la información de la localización de las plantaciones analizadas.

## **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## **Contribución por autor**

Prudencia Caballero Cruz: planeación, levantamiento y análisis de la información, redacción del texto; Eduardo J. Treviño Garza: planeación, análisis de la información, redacción y revisión del texto.

## **Referencias**

- Castillo R., J. J., L. Gama y C. Zequeira L. 2015. Análisis de regresión lineal en un sistema de información geográfico para determinar la tasa de deforestación en el estado de Tabasco. *kuxulkab'* 15(27): 15-18.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2017. *Inventario Nacional Forestal y de Suelos*. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/informacion-estadistica-y-vectorial-del-inventario-nacional-forestal-y-de-suelos> (23 de marzo de 2018).
- Duarte C., E. Emanuelli A., F. Milla A., O. Orellana, S. López y A. Quiroz H. 2016. Análisis de cambios de la cobertura forestal y uso de la tierra mediante imágenes satelitales de alta resolución espacial: años 2009-2012-2015 de República de Costa Rica. La Libertad, El Salvador. 48 p.
- Escribano R., J. A., C. G. Hernández D. A. y A. M. Tarquis A. 2015. Selección de índices de vegetación para la estimación de la producción herbácea en Dehesas. *Revista pastos* 44(2): 6-18.
- Fernández E., A., R. Romero C. y J. Zavala H. 2012. *Atlas Climático de México y Áreas Adyacentes*. Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA. México, D.F., México. 204 p.

- García N., H., R. R. García D., R. Moreno S., J. López B. y M. de L. Villers R. 2001. Enfoques Fuzzy y Booleano convencional para clasificar la aptitud agrícola de las tierras. *Agricultura Técnica en México* 27(2): 107-118.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2016. Datos de Relieve.<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx> (23 de marzo de 2018).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Recursos Naturales. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/> (23 de marzo de 2018).
- Jofré, P., C. Büchner, R. Ipinza, C. Bahamondez, S. Barros, P. García y J. Cabrera. 2013. Estado del arte las plantaciones forestales y el agua. Fundación para la Innovación Agraria (FIA) e Instituto Forestal (INFOR) de Chile. Gobierno de Chile. Ministerio de Agricultura. Valdivia, Chile. 118 p.
- López P., A., M. R. Martínez M. y D. S. Fernández R. 2015. Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua* 6(1): 121-137.
- Meneses T., C. M. 2012. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Revista internacional de silvicultura e industrias forestales Unasylva* 62(238): 39-46.
- Merg, C., D. Petri, F. Bodoira, M. Nini, M. Fernández, F. Schmidt, R. Montalva, L. Guzmán, K. Rodríguez, F. Blanco y F. Selzer. 2011. Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen, Sección Agronomía* 13(11): 1-11.
- Muñoz M., J. L., E. Cuasquer F., O. Moncayo C. y D. Delgado C. 2016. Aplicación de percepción remota para la detección de cambios en la cobertura boscosa de la reserva ecológica Mache-Chindul. *Revista La Técnica* 16(1): 76-93.

- Musálem, M. A. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales (No. 634.950972 S587). Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. pp. 2-16.
- Olivas G., U. E., J. R. Valdez L., A. Aldrete, M. D. J. González G. y G. Vera C. 2007. Áreas con aptitud para establecer plantaciones de maguey cenizo: Definición mediante análisis multicriterio y SIG. Revista Fitotecnia Mexicana 30 (4): 411-419.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal (Informe general). FRA2010/041. Roma, Italia. 346 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2016. El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma, Italia. 137 p.
- Palestina, R. A., M. Equihua, y O. M. Pérez M. 2015. Influencia de la complejidad estructural del dosel en la reflectancia de datos Landsat TM. Madera y bosques 21(1): 63-75.
- RStudio Team. 2016. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston. Version 1.1.447. [www.rstudio.org](http://www.rstudio.org) (18 de junio de 2018).
- Schlatter, J. E. y V. Gerding. 2014. Capítulo 10: Sitio forestal. In: González C., M. E. y A. Lara (eds.). Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile. Ed. UACH. Valdivia, Chile. pp. 309-319.
- Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (Conabio). 2017. Portal de geoinformación. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (23 de marzo de 2018).
- Torres E., G. Linares, G. Tenorio M., R. Peña, R. Castelán y A. Rodríguez. 2014. Índices de vegetación y uso de suelo en la región terrestre prioritaria 105: Cuetzalan, México. Revista Iberoamericana de Ciencias 1(3):101-112.
- Velázquez M., A., A. M. Fierros G., A. Aldrete, A. Gómez G., S. Fernández C., H. De los Santos P., T. Llandleral O., M. de J. González, J. López U. y C. Ramírez H. 2013.

Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México. Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados. México, D.F., México. 472 p.

Vicente S., S.M., T. Lasanta and A. Romo. 2004. Analysis of the spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish central Pyrenees: the role of human management. Environmental Management 34(6):802-818.

Zhao, Z., J. Gao, Y. Wang, J. Liu and S. Li. 2015. Exploring spatially variable relationships between NDVI and climatic factors in a transition zone using geographically weighted regression. Theoretical and Applied Climatology 120: 507-519.