

**USO DE TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES PARA EVALUAR CAMBIOS  
EN LA COBERTURA FORESTAL EN LA REGIÓN USUMACINTA, MÉXICO  
USE OF GEOSPATIAL TECHNOLOGY IN EVALUATING FOREST COVER  
CHANGES IN USUMACINTA REGION, MEXICO**

Juan Manuel Nuñez<sup>25</sup>

**RESUMEN**

El monitoreo regional de la cobertura forestal en Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sus alrededores es esencial dada su vulnerabilidad a presiones antrópicas, así como importante para el manejo y cumplimiento de sus reglamentos. En esta tarea, el uso de tecnologías geoespaciales desempeña un papel clave en el establecimiento de líneas base para el monitoreo de la cobertura forestal en relación con procesos específicos de cambio. Este trabajo, ofrece un enfoque geoespacial para aprovechar un conjunto de productos de Percepción Remota para cartografiar la cobertura forestal y analizar las tasas de deforestación en la Región Usumacinta en México (RUM). A través de información satelital, se generó información sobre la cobertura forestal en la RUM para los años 1990, 2000 y 2008. Donde la tasa promedio anual de deforestación para todo el periodo se estimó en 2,6% con una reducción del 24% en la cobertura forestal. Caracterizada por una alta iteración de tenencia de tierras ejidales muy aislada y ANP, esta región presenta un futuro incierto para la conservación de bosques a través de estos instrumentos de conservación en una de las zonas más importantes del trópico húmedo mexicano.

**PALABRAS CLAVE:** Tecnologías Geoespaciales, Percepción Remota; Cobertura Forestal; Áreas Naturales Protegidas; Región Usumacinta México.

**ABSTRACT**

<sup>25</sup> Investigador Asociado. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. J. L. Tamayo A. C." (CentroGeo) [jnunez@centrogeo.edu.mx](mailto:jnunez@centrogeo.edu.mx) Doctorado y Maestría en Geomática por el CentroGeo. Estudios de licenciatura en Ingeniería Topográfica y Geodesia por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Es investigador asociado del CentroGeo, en donde ha participado en el desarrollo de proyectos de investigación aplicada y vinculación en relación a sus líneas de investigación: geomática aplicada al monitoreo de bosques y áreas verdes, análisis espacial de servicios ecosistémicos y percepción remota urbana. Es profesor de asignatura de la División de Ingeniería Civil y Geomática de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en donde imparte de manera regular el curso avanzado de Percepción Remota.

Forest cover regional monitoring in Protected Areas and its surroundings is essential given its vulnerability to anthropic pressures, as well as being important for the management and compliance of its regulations. In this task, the use of geospatial technologies plays a key role in establishing baselines for the monitoring of forest cover in relation to specific processes. This work offers a geospatial approach to take advantage of a set of Remote Sensing products for mapping forest cover and analyzing deforestation rates in the Usumacinta Region in Mexico (MUR). Through satellite information, information was generated on the forest cover in the MUR for the years 1990 and 2008. The average annual deforestation rate was estimated at 2.6% with a 24% reduction in forest cover. Characterized by a high iteration of very isolated ejido lands tenure and Protected Areas, this region presents an uncertain future for the conservation of forests through these conservation instruments in one of the most important areas of the Mexican humid tropics.

**KEY WORDS:** Remote Sensing; Forest Cover; Protected Areas; Usumacinta Region México.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales, constituyen uno de los recursos naturales más importantes del mundo ya que albergan más del 40% de la biomasa vegetal por encima del suelo (Williams *et al.*, 2009). Desafortunadamente muchos de ellos están amenazados por la deforestación causada por actividades humanas como la expansión agrícola, la extracción selectiva de madera a gran escala y el desarrollo de infraestructura. Actualmente, la atención a la deforestación de los bosques tropicales proviene de preocupaciones sobre las consecuencias en la pérdida de sumideros importantes de carbono, la extinción masiva de la biodiversidad y la disminución de los medios de vida de las comunidades que habitan los bosque (Thompson *et al.*, 2009).

En México, un país de casi 2 millones de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), las tasas reportadas de deforestación varían en un amplio espectro, con respecto de diferentes regiones y ecosistemas, además de la multiplicidad y confusión en el empleo de términos (Couturier *et al.*, 2012). En el Informe Nacional de México sobre la evaluación de los recursos forestales mundiales (FAO, 2010), la pérdida promedio anual de bosque en el periodo 1993-2002 fue de 354 035 ha, mientras que en el periodo 2002-2007 disminuyó hasta las 155 152 ha. Sin embargo, al analizar la pérdida por ecosistema, para el caso de las selvas, en el primer periodo

el porcentaje de selvas deforestadas correspondía al 68.5% del total de la cobertura forestal perdida, mientras que para el último periodo ese porcentaje fue del 93.9%. De acuerdo con lo anterior, las pérdidas actuales de cobertura forestal en el país, están sucediendo casi exclusivamente en selvas como es el caso del trópico húmedo mexicano.

En este contexto, el uso de tecnologías geoespaciales para la generación de información oportuna, sistemáticamente repetitiva y precisa sobre la cobertura forestal en relación a estos procesos es altamente valorada, para identificar a diferentes escalas las zonas críticas, desde una perspectiva de aprovechamiento sustentable de los bosques (Nagendra *et al.*, 2013). La Percepción Remota, es decir, el empleo de protocolos establecidos para el manejo de la información satelital, permite proporcionar una gran cantidad de datos acerca de la superficie terrestre para el análisis global y detallado, la detección de cambios y el monitoreo de información a niveles más generales de agregación. Tal es el caso de la definición de la clase “bosque” en donde las confusiones entre categorías, se pueden eliminar al considerar una única clase, que por otro lado, puede ser caracterizada en función de su estructura, patrones espaciales o la posición en el paisaje; e inclusive aludir al tipo de vegetación y su densidad (Wulder, 1998). Haciendo referencia exclusivamente a la información satelital de los sensores multiespectrales con información en las regiones visible e infrarrojo del espectro electromagnético que pueden ser empleadas para el mapeo de “bosque”, existen diversas aproximaciones, agrupadas principalmente en tres técnicas: la interpretación visual, los procesos de clasificación y el modelado biofísico. En donde, la interpretación visual en pantalla está basada en la estratificación de cobertura forestal mediante el empleo de elementos presentes en la imagen, principalmente tono, textura, patrón y forma para diferentes realces o combinaciones de bandas. Por su parte, las técnicas de clasificación, tratan de la agrupación de una imagen en regiones separadas, mediante una gran diversidad de estrategias, que entre otras incluyen métodos estadísticos, orientación a objetos, etc. Finalmente el modelado biofísico, trata sobre la obtención de una o varias variables con significado físico y/o biológico, que permitan en este caso realizar la estimación de la cobertura forestal (Nandy *et al.*, 2003).

En este trabajo, se presenta un enfoque geoespacial para la implementación de métodos de regresión logística para la estimación de la cobertura forestal mediante modelado biofísico a partir de una serie de recursos de información satelital, con el fin de mapear las condiciones recientes, así como identificar las tendencias de cambio para la Región Usumacinta México

(RUM), la cual está conformada por los 21 municipios que contienen en su territorio la Cuenca del Usumacinta en su porción mexicana. Dicha regionalización no corresponde a una región de tipo administrativo, cultural o socioeconómica; por el contrario, el Río Usumacinta, y todo el capital natural dentro de su cuenca, constituyen el único elemento común de la misma, que en sí, está marcada por la heterogeneidad del territorio, de la sociedad y de la cultura.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

Se denomina Región Usumacinta México (RUM), a la unidad geográfica que comprende el conjunto de 21 municipios; 1 de Campeche, 5 de Tabasco y 15 de Chiapas (Figura 1). Estos municipios se ubican en su gran mayoría dentro de los límites geográficos de la cuenca del río Usumacinta en México. No obstante, hay partes de ellos que no pertenecen a la cuenca y partes de la cuenca que no están en la región. Con ello se asume que toda regionalización se desborda cuando el fin de la misma es la gestión pública, más aún cuando se involucran aspectos funcionales para su definición, entonces de lo que se trata es de apropiarse de una región que tiene fronteras difusas.

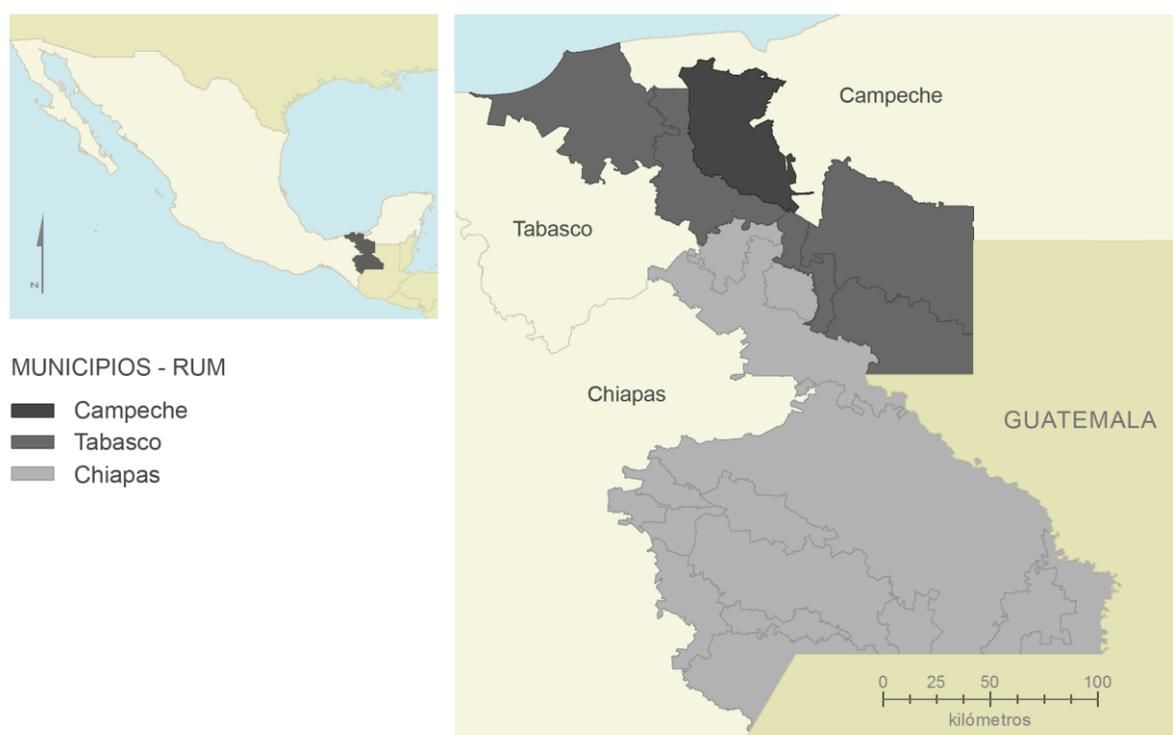


Figura 1. Área de estudio Región Usumacinta México

Su extensión es de aproximadamente 3.7 millones de hectáreas de las cuales, más de la tercera parte corresponde a dos municipios en Chiapas: Ocosingo (22%) y las Margaritas (14%). Si se considera el porcentaje de la RUM por entidad federativa, el 68% corresponde a Chiapas, el 27% a Tabasco y el 5% a Campeche. Con respecto a la regionalización administrativa, abarca dos regiones de Tabasco (región de los Ríos y región de los Pantanos) y tres de Chiapas, la región de la Selva, la Fronteriza y una pequeña porción de los Altos.

En lo referente a la población, y de acuerdo con los Censos de Población y Vivienda del INEGI, se observa que mientras en 1990, había aproximadamente más de 600 mil personas en la RUM, para 2010 la región cuenta con prácticamente 1 millón de habitantes, de las cuales, el 1.8% corresponde a Campeche, 25.6% a Tabasco y 73.5% al estado de Chiapas. Su densidad total calculada es de 27 habitantes por kilómetro cuadrado y, si bien se trata de una región con poca densidad, su tasa de crecimiento medio anual, entre 1990 y 2010, fue de 2.43 %, con dinámicas de crecimiento bastante diferenciadas, pero con una gran dispersión de localidades que duplicó el número de localidades en estos 10 años.

Con respecto a sus condiciones ambientales, esta región se caracteriza por poseer un gran capital natural conformado por, fragmentos de bosque mesófilo de montaña, un gran remanente de selva tropical húmeda y grandes sistemas lagunares y humedales, distribuidos sobre un gradiente altitudinal de 2800 metros (de la Maza y Carabias, 2011). Finalmente y en referencia a su composición social, se trata de una región bastante heterogénea, sin una articulación funcional explicitada, con importantes cantidades de territorio, una población en condiciones de pobreza y aislamiento y con una enorme presión sobre sus recursos naturales.

### **Adquisición de imágenes**

Para la realización de este trabajo se emplearon imágenes de los satélites Landsat TM de 1990, ETM+ del 2000 y SPOT 2, 4 y 5 del 2008. Se trata en el caso de las imágenes Landsat de una colección de 9 escenas individuales por cada una de las dos primeras décadas, las cuales proveen información de la cobertura terrestre en formato digital y ortorrectificado (es decir, con correcciones por desplazamientos de relieve), para toda el área de estudio de acuerdo a los parámetros propios del producto Geocover de NASA (Tucker *et al.*, 2004). En el caso de las imágenes SPOT, la colección empleada consta de 22 escenas del año 2008 proporcionadas por la Estación de Recepción México de la constelación SPOT (ERMEXS) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Principales características de las imágenes satelitales empleadas

Sensores	Resolución espacial (m)	Resolución espectral (bandas)	Amplitud de barrido (km)
Landsat 4-5 / TM	30 y 120	7 multiespectrales	184
Landsat 7 / ETM+	15, 30, 60 y 120	8 multiespectrales y 1 pancromática	184
SPOT 1-3 / HRV	10 y 20	3 multiespectrales y 1 pancromática	60
SPOT 4 / HRVIR	10 y 20	4 multiespectrales y 1 monocromática	60
SPOT 5 / HRG	2.5, 10 y 20	4 multiespectrales y 1 pancromática	60

### Estimación de cobertura forestal

Para el mapeo y caracterización de la cobertura forestal a través de la obtención de estimaciones mediante Percepción Remota, se implementó un análisis metodológico basado en la aplicación de correcciones radiométricas para la adecuada estimación de radiancia ( $W\ m^{-2}\ sr^{-1}$ ); y reflectancia (porcentaje de radiación solar incidente reflejada por la superficie). Obteniendo así, valores corregidos de reflectancia por época del año, fecha de toma y ángulos de inclinación solar, lo que reduce las diferencias ópticas de las diferentes escenas (Chander *et al.* 2009). El análisis fue realizado en seis etapas:

- 1) Pre-procesamiento de las imágenes seleccionadas
- 2) Cálculo de transformaciones espectrales y espaciales
- 3) Implementación de la regresión logística
- 4) Producción de mapas de cobertura forestal para las fechas establecidas
- 5) Evaluación de fiabilidad global
- 6) Cálculo de tasas de deforestación

A partir de las imágenes seleccionadas para cada una de las fechas de estudio, se realizó la corrección radiométrica de cada una de las escenas, de acuerdo con sus datos de fecha de adquisición, sensor y ángulo de elevación solar, principalmente. Así, la conversión de números digitales almacenados en las imágenes originales a valores de reflectancia aparente, modifica las diferencias de calibración entre bandas de las imágenes y cambia la escala de medición a un parámetro físico comparable entre distintos sensores a lo largo del tiempo. Este

procedimiento permite hacer comparables sets de imágenes entre lugares y fechas, lo que hace más robusta la extracción de variables biofísicas, la compatibilidad multitemporal y el análisis integrado con imágenes de diferentes sensores (Chuvienco, 2008).

Una vez corregidas radiométricamente las imágenes, se continuó con la ortorrectificación de las imágenes, una corrección geométrica del efecto topográfico a partir del uso de un Modelo Digital de Elevación (MDE). Esta corrección habitualmente implica realizar una rectificación diferencial, en donde el valor de cada píxel se transfiere separadamente desde la imagen de entrada a la resultante, a partir de corregir su posición en función del desplazamiento debido al relieve (Palá & Pons, 1995). Esta transformación se simplifica mediante el empleo de un modelo polinómico donde la altura extraída del MDE se introduce como una nueva variable independiente, lo que ofrece mejores resultados durante el pre-procesamiento. Todas las escenas resultantes de este procedimiento, acotadas a los límites de la Región Usumacinta en México, son proyectadas a la zona 15 norte del sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator.

A continuación, se aplicaron diferentes algoritmos para la extracción de rasgos espectrales y de contexto espacial para los diferentes sensores, en función de sus propias características. Se realizaron transformaciones para la extracción de rasgos espectrales consistentes en la obtención de componentes de la Transformación *Tasseled Cap* (TTC), la cual está dirigida a obtener componentes de significado físico por combinaciones lineales de las bandas originales de los sensores Landsat (Jensen, 2007).

La TTC, fue desarrollada originalmente para los sensores MMS por Kauth y Thomas (1976) y posteriormente ajustada por Crist y Kauth (1986) para los sensores TM y por Huang *et al.* (2002) para el sensor ETM+. Los componentes de la TTC para los sensores TM y ETM+ están asociados siempre a las mismas variables con significado biofísico, independientemente del tipo de imagen que se esté analizando.

A partir de la combinación lineal de las bandas originales mediante una serie de coeficientes, se construyeron nuevos ejes que ponen en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo (Tabla 2).

**Tabla 2.** Coeficientes Tasseled Cap para el uso con Landsat TM y ETM+

Índice	Sensor	Coeficientes propuestos					
<b>Brillo</b>	TM	0.2909	+ 0.2493	+ 0.4806	+ 0.5568	+ 0.4438	+ 0.1706
	ETM+	0.3561	+ 0.3972	+ 0.3904	+ 0.6966	+ 0.2286	+ 0.1596
<b>Verdor</b>	TM	- 0.2728	- 0.2174	- 0.5508	+ 0.7221	+ 0.0733	- 0.1648
	ETM+	- 0.3340	- 0.3540	- 0.4560	+ 0.6966	- 0.0240	- 0.2630
<b>Humedad</b>	TM	0.1446	+ 0.1761	+ 0.3322	+ 0.3396	- 0.6210	- 0.4186
	ETM+	0.2626	+ 0.2141	+ 0.0926	+ 0.0656	- 0.7630	- 0.5390

Los resultados generados mediante la TTC distinguen tres componentes, el primero el brillo, es decir, es la suma ponderada de las bandas originales; el segundo denominado verdor, está relacionado con la actividad vegetativa; y el tercero conocido como humedad, refiere al estatus de humedad ambiental presente.

En el caso de las imágenes SPOT, los cambios en el dosel del bosque se analizaron mediante el empleo de índices de vegetación. Principalmente el índice de vegetación de diferencia normalizada, variable biofísica que permite estimar el desarrollo de la vegetación a partir de la diferencia normalizada de los canales rojo e infrarrojo cercano. También se analizaron el índice normalizado del dosel (Vescovo y Gianelle, 2008) y el índice de vegetación del área foliar específico (Lymburner *et al.* 2000), los cuales son asociados a la repuesta específica de las estructuras arbóreas que definen la cobertura forestal. Se incorporaron también como variables empleadas para la extracción de información acerca de la cobertura forestal, a las variables topográficas de elevación, aspecto y pendiente derivadas del MDE.

A partir de las imágenes procesadas para los diferentes sensores y fechas, se extrajeron valores homogéneos de reflectancia, que fueron empleados para buscar patrones de reflexión/absorción a partir de la serie de variables independientes con información espectral y espacial a cerca de la cobertura forestal. Para el caso de las imágenes Landsat, las variables empleadas fueron, los tres primeros componentes de la TTC, brillo, verdor, humedad; así como las variables topográficas de elevación, pendiente y aspecto. Para el caso de las imágenes SPOT, las transformaciones empleadas como variables independientes fueron el índice de vegetación de diferencia normalizada, el índice de vegetación del área foliar específico y el

índice normalizado del dosel, además de las variables topográficas de elevación, pendiente y aspecto.

La técnica de reconocimiento de patrones empleada para el mapeo de la cobertura forestal está basada en la aplicación de modelos de regresión logística. La regresión logística, al igual que otras técnicas estadísticas multivariadas, otorga la posibilidad de evaluar la influencia de cada una de las variables independientes sobre la variable dependiente o de respuesta y controlar el efecto del resto (Hosmer, *et al.*, 2013). Por tanto, una variable dependiente, que en este caso corresponde a una variable dicotómica y una serie de variables independientes que son en este caso variables con significado biofísico. Como la variable dependiente es dicotómica, podrá tomar el valor "0" si el hecho no ocurre y "1" si el hecho ocurre. En este caso, la probabilidad de que un píxel pueda ser considerado cobertura forestal explicada a partir del número de factores planteados anteriormente para cada uno de los diferentes sensores. Clasificando con ello píxeles en las categorías de "bosque" o "no-bosque" a partir de la selección binaria de probabilidad. El modelo de regresión logística puede ser representado de la siguiente manera:

$$\text{logit}(\pi) = \log\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right)$$

Donde  $\pi_i$  es la probabilidad de observar la categoría o evento a predecir, y  $1 - \pi_i$  es la probabilidad de no observar la categoría o evento a predecir. Como en todo análisis multivariante, en la regresión logística se obtiene un valor teórico, o una combinación lineal de variables con ponderaciones determinadas empíricamente (Hair *et al.*, 1999). La forma del valor teórico de la regresión logística es similar al de la regresión múltiple, y representa una única relación multivariante con coeficientes que indican el peso relativo que tiene cada variable predictora. Dicha ecuación puede ser presentada en su forma aditiva:

$$\text{logit}\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Donde  $\beta_0$  es una constante y  $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$  son los coeficientes logísticos correspondientes a cada una de las variables predictoras  $X_1, X_2 \dots X_n$ .

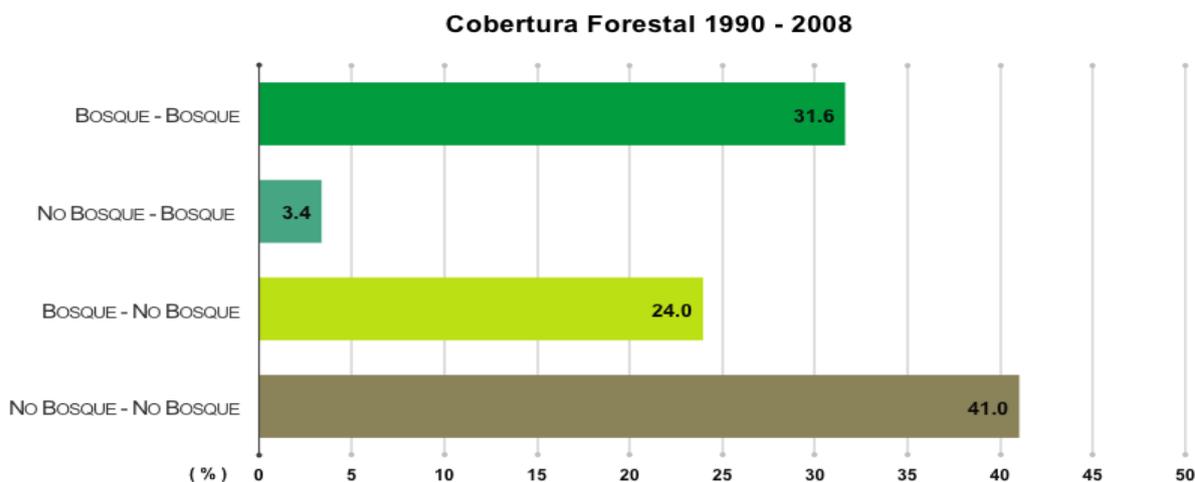
El procedimiento de cálculo del coeficiente logístico compara la probabilidad de ocurrencia de un suceso con la probabilidad de que no ocurra. Los coeficientes B son las medidas de los cambios en la razón de probabilidad denominado *odds ratio* y están expresados en logaritmos, por lo que deben ser transformados para ser interpretados. Así, un coeficiente positivo aumenta la probabilidad de ocurrencia, mientras que un coeficiente negativo la disminuye.

El análisis de regresión multivariada se realizó a partir de la selección de una máscara de puntos, que corresponden a sitios con presencia y ausencia de cobertura forestal. Aproximadamente para cada escena se generaron muestreos con una densidad de 0.11 puntos por kilómetro cuadrado, lo que corresponde aproximadamente a 400 puntos en el caso de cada imagen Landsat y 45 para el caso de SPOT. Se analizan las máscaras de puntos para cada una de las fechas propuestas y se modifican con respecto de los cambios observados. Para cada una de las escenas y respectivas fechas, se generan mapas binarios de cobertura forestal, con los cuales se construyen mosaicos binarios de cobertura forestal para cada uno de los periodos de evaluación.

La estimación de cobertura forestal se realizó conforme a los modelos de regresión logística construidos para cada escena individual, generando posteriormente un mosaico para toda la zona de estudio en cada una de las fechas propuestas para el análisis. Con el análisis de las imágenes clasificadas se generaron tres productos digitales binarios, en donde los píxeles con valor uno corresponden a zonas de bosque, mientras que los píxeles con valor cero corresponden a zonas de no bosque. Los productos finales para 1990, 2000 y 2008 de la RUM, con un tamaño de pixel de 90 metros corresponden a mapas binarios de cobertura forestal.

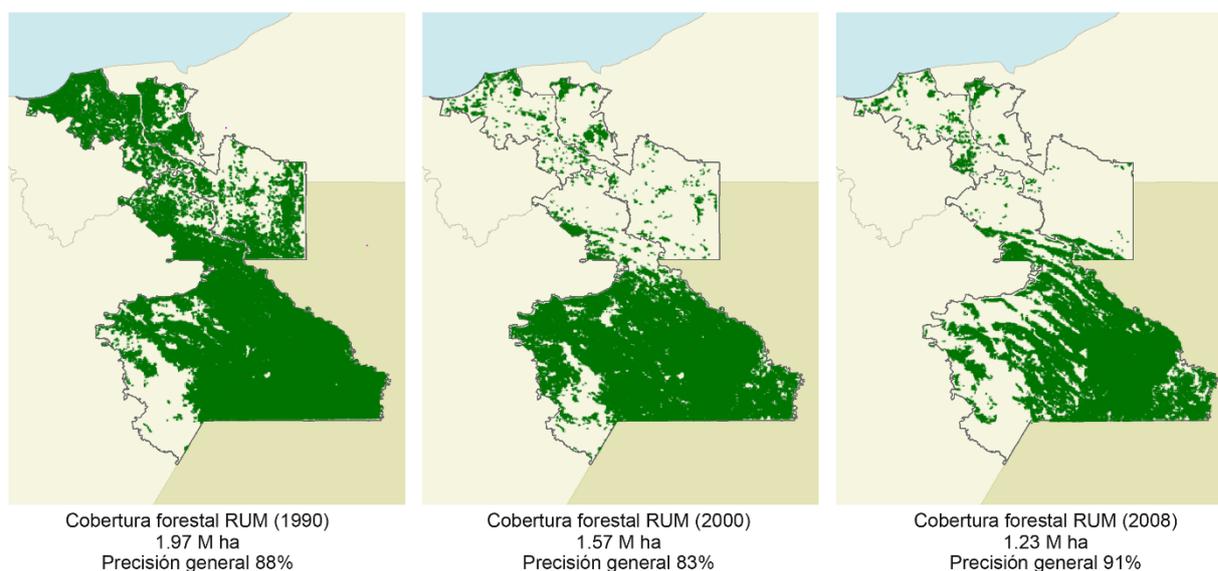
## RESULTADOS

Para los años analizados, la extensión de la cobertura forestal se estimó en 1 966 137 ha para 1990, mientras que para el 2000 la cifra descendió a 1 574 580 ha y en el 2008 a 1 230 982 ha. Haciendo referencia a los cambios obtenidos, se observa que a lo largo de 18 años la pérdida de cobertura forestal representa el 24% y sólo un 3% de reforestación o regeneración del total de los cambios. Mientras que sólo el 32% de la cobertura forestal se mantuvo como tal para dicho periodo. Mención aparte merece el 41% de la región sin cobertura forestal a lo largo del periodo de estudio (Figura 2).



**Figura 2.** Cambios en la cobertura forestal por categorías para la RUM 1990-2008

El mayor cambio a nivel de paisaje se registró de 2000 a 2008 en donde se perdieron anualmente en promedio 42 950 ha, pero considerando la amplitud del intervalo completo de tiempo, la pérdida de cobertura anual se reduce a 40 842 ha. Estos cambios principalmente se encuentran localizados en la porción sur de la región en el Estado de Chiapas y en la planicie costera del Estado de Tabasco (Figura 3).



**Figura 3.** Mapas temáticos de la cobertura forestal en la Región Usumacinta México

### Evaluación de confiabilidad

Los resultados de las imágenes clasificadas en los tres periodos fueron evaluados y de acuerdo con la distribución binomial de probabilidad, se estableció en 600 el número necesario de puntos de verificación para estimar, con el 95% de probabilidad, el error de los mapas producidos, asumiendo que los aciertos y errores están igualados a 50% y el máximo de error permitido es de  $\pm 4$  %.

Los mapas binarios resultantes de cobertura forestal de la Región Usumacinta México, se produjeron con fiabilidades globales entre 88.18 y 89.95% y estimadores del coeficiente Kappa del 0.7343 al 0.7813 (Tabla 3). El mapa de 2008 es el que presenta una mayor exactitud total, mientras que el mapa de 2000 presenta el año clasificado con mayores errores. También en cuanto al Error Relativo de Área (ERA) para la clasificación de la clase “bosque”, exclusivamente, el mapa de 2008 presenta el menor ERA (0.31 %) mientras que el de 2000 presenta un valor de 0.41%. Este índice puede considerarse como un estadístico que explica las variaciones en los errores de comisión y exclusión de la clasificación de una clase en particular (Lira, 2010).

**Tabla 3.** Estadísticos de fiabilidad de los mapas de cobertura forestal para la RUM calculados a partir de la matriz de confusión

Fiabilidad (%)						
Clase	1990		2000		2008	
	P	U	P	U	P	U
Bosque	72.7	99.5	71.1	100	78.5	98.9
No bosque	99.7	83.1	100	81.6	99.4	85.7
Puntos de prueba	600		600		600	
Fiabilidad global	88.75		88.18		89.95	
Fiabilidad media	86.2		85.6		87.6	
Coefficiente Kappa	0.7495		0.7343		0.7813	
ERA	0.370		0.406		0.308	
Intervalo de confianza (95% de probabilidad)	[85.6 - 90.8]		[84.6 - 90.0]		[87.4 - 92.2]	
NOTA: P es la fiabilidad del productor, U la fiabilidad del usuario, ERA es el error relativo de área						

En cuanto a los errores por exceso (comisión) y por defecto (omisión); la fiabilidad alcanzada por el productor en la categoría “bosque” para los años analizados, se obtiene en un rango de entre 71.1% y 75.8%. Esto es, que únicamente siete de cada diez zonas con cobertura forestal están incluidas en la clasificación como tal. No obstante, la fiabilidad del usuario supera el 98.9%, lo que quiere decir que prácticamente todas las zonas clasificadas como bosque, realmente lo son. Aquí puede observarse que de acuerdo con estos resultados, no se incluyen en la clasificación todas las áreas de cobertura forestal presentes en la zona de estudio, pero, los que son identificados, presentan una fiabilidad muy alta de serlo. Resultando con ello que ambas medidas de fiabilidad son complementarias y de gran trascendencia, la primera desde el punto de vista de quien produce la información y la segunda desde la perspectiva del usuario de la misma (Chuvienco, 2008).

### **Análisis de tasas de deforestación**

De acuerdo con la FAO (1996), la fórmula empleada para el cálculo de la tasa de deforestación promedio anual es derivada de la fórmula de interés compuesto de acuerdo con la siguiente expresión:

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

Donde  $A_1$  es la superficie en el tiempo inicial,  $A_2$  es la superficie en el tiempo siguiente y  $(t_2 - t_1)$  es el intervalo de tiempo entre las dos fechas de medición.

Se obtuvieron estimaciones de la tasa de deforestación para los periodos 1990-2000 y 2000-2008 para toda la RUM y para cada uno de los municipios que la conforman. Los cálculos de deforestación para el primer periodo, muestran una tasa de deforestación anual para toda la región de 2.2%, mientras que para el segundo periodo la tasa sube a 3.0%. Estos resultados muestran una tasa de deforestación en aumento para la toda la región. Sin embargo, al agrupar como una sola sub-región a los municipios que concentran al 80% o más de la extensión de bosque de toda la región, las tasas de deforestación muestran una tendencia a la baja. De 2.5% para el periodo 1990-2000, a 2.3% para el periodo 2000-2008; aumentando además el porcentaje de la cobertura del 80 al 85% del total de la región para el último de los periodos.

Este subconjunto de 8 municipios que concentran al 80% o más de la extensión de bosque de toda la región representa sólo el 57% de la extensión total de la misma. Datos que permiten identificar mayores grados de concentración de la cobertura forestal que son expresión, en lo esencial, del tamaño del municipio. En 6 de estos 8 municipios, el peso porcentual de la cobertura forestal total es mucho mayor (del orden de un 50% - 80% mayor) que el peso de su extensión en la región del Usumacinta. Para los casos de Tenosique y Palenque la proporción es inversa (entre ambos suman el 13.1% de la región, pero sólo el 9.5% de la cobertura forestal).

Estos datos son evidencia indirecta de que las Áreas Naturales Protegidas (ANP) presentan tasas de deforestación mucho menores, e inclusive poco significativas. Una aproximación que brinda mayor claridad es el comparativo del peso de cada municipio en la cobertura forestal respecto a su participación del total de hectáreas perdidas. Mientras que en el primer periodo los primeros cinco municipios que concentran la deforestación en un 67% son: Las Margaritas, Ocosingo, Palenque, Benemérito y Marqués de Comillas. Para el segundo periodo los primeros cinco que explican el 62% son: Ocosingo, Las Margaritas, Altamirano, Centla y Benemérito.

Este conjunto de municipios son emblemáticos de comunidades que define en gran medida la interacción entre territorios ejidales colindantes a las ANP y la pérdida de cobertura forestal. Mientras que dentro de las ANP, las tasas de deforestación, son poco significativas, en las áreas colindantes fuera de ellas, los procesos de pérdida de cobertura forestal son en ocasiones drásticos (Couturier *et al.*, 2012; Mendoza y Dirzo, 1999).

## DISCUSIÓN

Aún cuando sólo se estimó cobertura forestal mediante técnicas convencionales de modelado biofísico para la clasificación de las imágenes, los mapas binarios producidos alcanzaron niveles de exactitud considerable, lo que indica una suficiente agregación entre los datos de referencia y de la clasificación ( $Kappa > 0.7$ ). En definitiva, puede asegurarse, con un 95% de probabilidad que el rango de confianza de los resultados de cobertura forestal obtenidos se sitúa entre 84.6% y 92.2%. En donde los resultados en 2008 presentan los mayores niveles de exactitud, mientras que el año 2000 fue el más bajo clasificado. Ello permite afirmar que la estimación continúa del porcentaje de cobertura forestal para la definición de la categoría bosque, se presenta como una alternativa al enfoque tradicional de la utilización de

sistemas exhaustivos de clasificación predefinidos con números discretos de tipos de cobertura, para describir la distribución geográfica de la vegetación sobre la superficie terrestre con niveles de certidumbre suficientes.

Los resultados sobre el análisis de la deforestación para el periodo completo de estudio muestran una tasa de 2.6%, dividida en 2.2% para el periodo 1990-2000 y 3.0% para 2000-2008. Mientras que en la sub-región central y contigua de 8 municipios, descrita arriba (Las Margaritas, Ocosingo, Palenque, Benemérito de las Américas, Marqués de Comillas, Maravilla Tenejapa, Altamirano y Tenosique), la tasa de deforestación para todo el periodo es de 2.4%, dividida en 2.5% para el periodo 1990-2000 y 2.3% para 2000-2008.

Esta área que representa el 46.8% del total de la población de la RUM, presenta un 71% de localidades aisladas; dato que contrasta con el 53.7% para toda la región. Es también más parecida en su extensión y configuración geográfica, a la región lacandona mexicana, la cual ha sido estudiada con anterioridad con métodos de percepción remota (Mendoza & Dirzo, 1999). De acuerdo con ellos entre 1974 y 1991 se perdieron 163 000 ha, extensión equivalente aproximadamente el 23% del área original. Alcanzando tasas de deforestación de 2.1% para el periodo 1974-1981 y de 1.6% para el periodo 1981-1991. Si se excluyen los datos de la Reserva de la Biosfera de Montes Azules, los porcentajes aumentan a 3.3% y 2.1% respectivamente para cada periodo. Lo que pone de manifiesto el papel que el decreto del ANP tiene desde 1978. Esta es una situación semejante a lo que ocurre en el contexto de la RUM y su región central, en la cual además de Montes Azules, existen otras 8 ANP, incluida el Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Usumacinta de reciente decreto. Lo cual representa el 22.1% de la extensión total de la región bajo un estatus de área natural protegida, apenas menor que toda la RUM (23.6%) y prácticamente el doble que el promedio en el país (12.4%).

## CONCLUSIONES

La deforestación de los bosques tropicales y sus consecuencias sobre el cambio ambiental global, la biodiversidad y las comunidades humanas que los habitan, lo convierten en un problema que debe ser atendido a múltiples escalas espaciales y temporales. El monitoreo mediante tecnologías geoespaciales de la cobertura forestal puede desempeñar un papel importante para la generación de estimaciones confiables de cobertura forestal en áreas con

una alta iteración de tenencia de tierras ejidales muy aislada y ANP, como en el caso de la Región Usumacinta México.

Como se pudo corroborar con este trabajo, la cobertura forestal en la Región Usumacinta México concentrada hacia su porción central y conformada principalmente por selvas perenifolias alta y media, presenta patrones de reducción a deforestación en la subregión, pero de aumento de la misma en torno a zonas externas a las ANP. Haciendo evidente que mientras la presencia de áreas naturales, reduce las tasas de deforestación en una región, sus zonas aledañas, pueden presentar tasas de deforestación más altas a las que en promedio se pueden encontrar para toda la región.

Estos elementos ponen al descubierto una discusión acerca del papel de las áreas naturales en la conservación de los ecosistemas. Las ANP han sido objeto de críticas debido a que las acciones de protección se limitan a los polígonos establecidos, significando que fuera de dichos límites no tienen lugar los mecanismos o acciones de conservación, aún y cuando se trate de una región limítrofe o muy cercana a la misma. Creándose con ello dudas acerca del funcionamiento eficaz de dicho recurso como una herramienta para la protección del medio ambiente, no obstante que en México se ha comprobado su eficacia. Sin embargo es posible repensar a estas regiones conformadas por áreas naturales y sus entornos, como paisajes funcionales, en donde la configuración de aéreas naturales y zonas ocupadas para actividades agrícolas y pecuarias, pueden convivir tomando en cuenta la conectividad de los paisajes.

### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue posible gracias a la “Propuesta para una Gestión Territorial Integrada de la Cuenca Usumacinta en México”, proyecto del acuerdo por servicios profesionales entre ABT y CentroGeo (México COMP PROJECT GBTI 2: 24270). El autor agradece a Gabriela Quiroz – Cázares por el diseño cartográfico, así como a quienes tuvieron oportunidad de leer el material y aportaron al mismo con sus comentarios y recomendaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113(5), 893-903.
- Chuvienco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Ariel ciencia. 586 p.
- Couturier, S., Núñez, J. M., & Kolb, M. (2012). Measuring Tropical Deforestation with Error Margins: A Method for REDD Monitoring in South-Eastern Mexico. In *Tropical Forest* (Edited by Padmini Sudarshana, Madhugiri Nageswara-Rao and Jaya R. Soneji). INTECH Open Access Publisher.
- Crist, E. P., & Kauth, R. J. (1986). The Tasseled Cap de-mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52(1), 81-86.
- FAO (1996). *Forest Resources Assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes*. FAO Forestry Paper 130, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- FAO. (2010). *Global forest resources assessment 2010. Main report*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Hair, J. F., Suárez, M. G., Prentice, E., & Soler, D. C. (1999). *Análisis multivariante*. Prentice Hall. 799 p.
- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley & Sons. 528 p.
- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C., & Zylstra, G. (2002). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741-1748.
- Jensen, J. R., & Im, J. (2007). Remote sensing change detection in urban environments. In *Geo-spatial technologies in urban environments* (pp. 7-31). Springer Berlin Heidelberg.
- Kauth, R. J., & Thomas, G. S. (1976, January). The tasselled cap--a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In *LARS Symposia* (p. 159).
- de la Maza, J., & Carabias, J. (2011). *Usumacinta bases para una política de sustentabilidad ambiental*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Natura y Ecosistemas Mexicanos. 246 p.
- Lira, J. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*. UNAM. 605 p.

- Lymburner, L., Beggs, P. J., & Jacobson, C. R. (2000). Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(2), 183-192.
- Mendoza, E., & Dirzo, R. (1999). Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot. *Biodiversity and Conservation*, 8(12), 1621-1641.
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jongman, R. H., Tarantino, C., Adamo, M., & Mairota, P. (2013). Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45-59.
- Nandy, S., Joshi, P. K., & Das, K. K. (2003). Forest canopy density stratification using biophysical modeling. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 31(4), 291-297.
- Pala, V., & Pons, X. (1995). Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(7), 935-944.
- Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., & Mosseler, A. (2009). Forest resilience, biodiversity, and climate change. In *A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series (Vol. 43, p. 67).
- Tucker, C. J., Grant, D. M., & Dykstra, J. D. (2004). NASA's global orthorectified Landsat data set. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(3), 313-322.
- Vescovo, L., & Gianelle, D. (2008). Using the MIR bands in vegetation indices for the estimation of grassland biophysical parameters from satellite remote sensing in the Alps region of Trentino (Italy). *Advances in Space Research*, 41(11), 1764-1772.
- Williams, M. L., Milne, T., Tapley, I., Jreis, J., Sanford, M., Kofman, B., & Hensley, S. (2009). Tropical forest biomass recovery using GeoSAR observations. *Proceedings of 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Capte Town, South Africa, 12–17 July 2009; pp. IV-173–IV-176.
- Wulder, M. (1998). Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in physical Geography*, 22(4), 449-476.