

## Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztlán en Hidalgo, México

Roberto Reynoso Santos email: [reynoso.roberto@inifap.gob.mx](mailto:reynoso.roberto@inifap.gob.mx)  
Campo Exp. Centro de Chiapas, Centro de Investig. Regional Pacífico Sur, INIFAP. México.

José René Valdez Lalalde email: [valdez@colpos.mx](mailto:valdez@colpos.mx)  
Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. COLPOS. México.

Miguel Jorge Escalona Maurice email: [escalona@colpos.mx](mailto:escalona@colpos.mx)  
Postgrado en Desarrollo Rural. Campus Montecillo. COLPOS. México.

Héctor Manuel de los Santos Posadas email: [hmsantos@colpos.mx](mailto:hmsantos@colpos.mx)  
Postgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. COLPOS. México.

### RESUMEN

Se realizó un análisis temporal (2007-2013) de la dinámica de cambio de la cobertura vegetal y del uso de suelo en la cuenca río Metztlán, Hidalgo, México con el objetivo de actualizar su estatus. Se utilizó un mapa generado para 2007 con imágenes Landsat 5 y Landsat 7 e imágenes SPOT 5 y 6 para 2013. Los resultados muestran que las áreas destinadas a la agricultura de riego y temporal disminuyeron en 34,8 y 25,6 %, respectivamente. El análisis de cambios indica que el uso urbano y los cuerpos de agua aumentaron 305,3 y 82,4 %, respectivamente. Se recomienda transitar del uso de imágenes de mediana resolución espacial (Landsat), al uso de imágenes de alta resolución (SPOT) si la intención es evaluar con detalle los cambios que acontecen en la región.

**Palabras clave:** cambio de uso del suelo, cobertura de suelo, cuenca Metztlán, Landsat, SPOT.

## Analysis of land use dynamics in Metztlán watershed in Hidalgo, México

### ABSTRACT

A temporal analysis (2007-2013) of the dynamics of change in vegetation cover and land use in the river basin Metztlán, Hidalgo, Mexico was carried out in order to update their status. A generated map for 2007 with Landsat 5 and Landsat 7 images and SPOT 5 and 6 images for 2013 were used. The results show that the areas used for agricultural irrigation and unwatered land decreased by 34,8 and 25,6 %, respectively. The analysis of changes indicates that urban use and water bodies increased 305,3 and 82,4 %, respectively. It is recommended to move the use of images of medium spatial resolution (Landsat), to the use of high-resolution images (SPOT) if the intention is to evaluate in detail the changes occurring in the region.

**Keywords:** land use change, land cover, Metztlán basin, Landsat, SPOT.

## **INTRODUCCIÓN**

El cambio de uso del suelo y de la cobertura vegetal son un componente clave del deterioro ambiental a escala global, regional y local. Las principales preocupaciones son los impactos sobre la diversidad biológica mundial, la degradación del suelo, el ciclo del agua, los servicios ecosistémicos, los almacenes de carbono y el cambio climático (Feddema et al. 2005).

En México es indispensable examinar la dinámica de cambios de uso y cobertura del suelo debido a los procesos de deforestación presentes a razón de 155 000 ha por año (2005-2010) (FAO 2010), particularmente en regiones semiáridas dado que los estudios realizados en el país se han concentrado en el trópico húmedo o en bosques templados.

En la cuenca de Metztlán, Hidalgo, México, a pesar de que se ha registrado una tasa de deforestación baja (-0,5 % anual), durante el periodo de 1985 a 2007, la tasa de crecimiento de la mancha urbana es de 4,3 % anual, lo que representa un crecimiento de 250,8 % en 22 años (Valdez-Lazalde et al. 2011). Dada la magnitud de tales cambios, es indispensable continuar con su monitoreo para proveer información que permita evaluar su impacto sobre los ecosistemas terrestres, formular políticas de manejo e implementar modelos de monitoreo ambiental.

En este trabajo se evalúa la dinámica de cambio de uso de suelo y la cobertura de la vegetación en la cuenca de Metztlán, Hidalgo. El objetivo fue actualizar el estudio de la dinámica de cambios hasta 2013, tomando como base un mapa de cobertura vegetal generado para 2007. A diferencia del estudio anterior, aquí se utilizaron imágenes de la plataforma SPOT, de mayor resolución espacial y técnicas de clasificación supervisada. El uso de imágenes de mayor resolución espacial permitirá obtener datos más precisos de la dinámica de cambios que ocurre en la cuenca de Metztlán.

## **LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

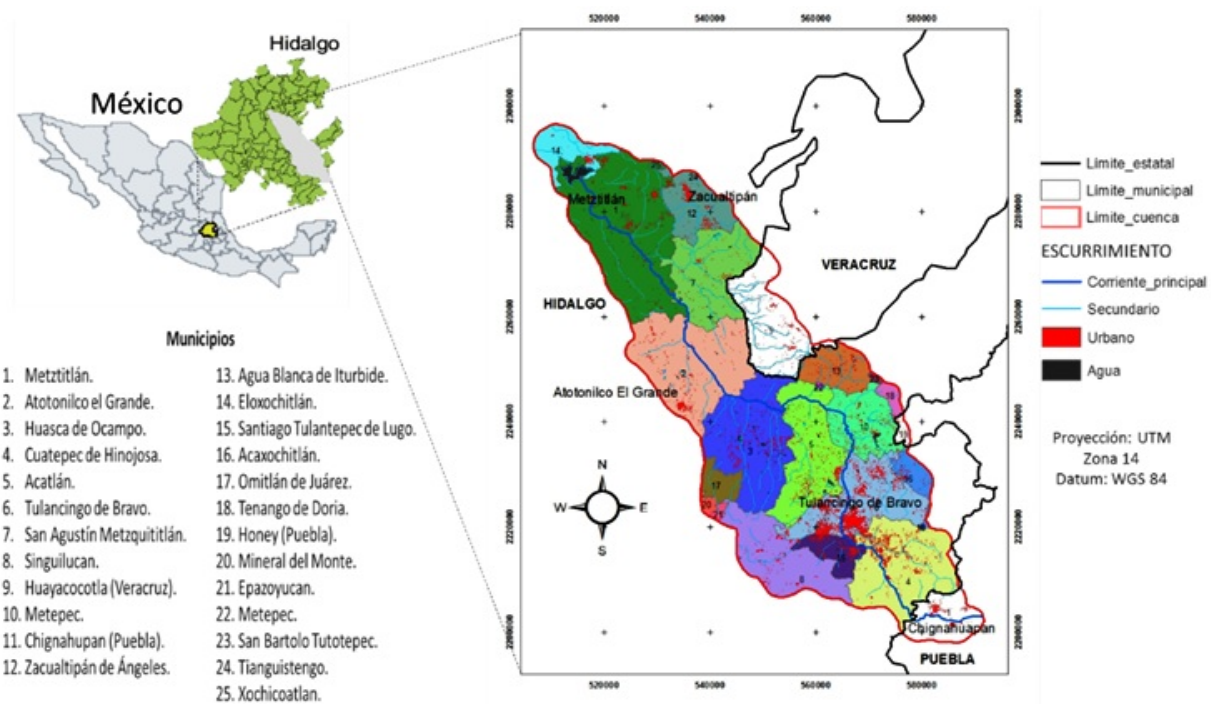
La cuenca del río Metztlán, con una superficie de 329 053,9 ha, se ubica dentro de los paralelos 19°53'41'' y 20°45'05'' latitud norte y los meridianos 98°55'04'' y 98°08'39'' longitud oeste. Se distribuye transversalmente en el estado de Hidalgo (89,9%), Veracruz (6,4%) y Puebla (3,7%) (Valdez-Lazalde et al. 2011), ver figura 1. Se considera el corazón agrícola del estado de Hidalgo, con dos distritos de riego, el de Metztlán (DR 008) y el de Tulancingo (DR 028). La cuenca se origina en el estado de Puebla, con un intervalo de altitud que va de los 3100 m en la sierra de Singuilucan, hasta 1250 m en la laguna Metztlán.

Cuenta con una población total de 286 543 habitantes, concentrándose en el estado de Hidalgo (95,66 %), seguido de Puebla (2,24 %) y Veracruz (2,10 %). En el estado de Hidalgo, los municipios de Tulancingo de Bravo, Atotonilco el Grande y Zacualtipán de Ángeles, concentran a las ciudades de mayor crecimiento poblacional de la cuenca Metztlán.

### **Material empleado y pre-procesamiento de imágenes**

Como base del análisis se tomó el mapa de uso de suelo 2007 generado a partir de imágenes multispectrales de dos fechas: Landsat 5 Thematic Mapper (TM) 1985 y Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) 2007 (Valdez-Lazalde et al. 2011). El mapa de uso de suelo 2013 para la cuenca se generó a partir de un mosaico compuesto de cuatro imágenes SPOT 5 y una SPOT 6. Estas fueron proporcionadas por la estación de recepción México (ERMEXng), con

un nivel de procesamiento 3A. En este formato, la imagen presenta corrección radiométrica básica, corrección geométrica y ortorectificación. A pesar del preprocesamiento básico de las imágenes, debido a las diferencias en las condiciones atmosféricas, ángulo solar y elevación solar entre las fechas de imágenes, se realizó una normalización radiométrica para minimizar dichos efectos, los cuales son críticos para la detección de cambios. Primero, los valores digitales (*DN*) se convirtieron a radiancia y, posteriormente, a reflectancia exoatmosférica adimensional. Segundo, las imágenes a nivel de reflectancia se corrigieron combinando la corrección radiométrica y el método mejorado de sustracción del objeto oscuro (Modelo COST) de Chávez (1996).



**Figura 1. Localización del área de estudio: la cuenca del río Metztitlán**

Con las imágenes SPOT 5 preprocesadas a nivel radiométrico y atmosférico, se generó un mosaico que cubre la totalidad de la cuenca a una resolución espacial de 10 m. Se usó la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 14 N y datum WGS84. La imagen SPOT 6 no se incluyó en el mosaico debido a que presenta características radiométricas diferentes a SPOT 5, por lo que se trabajó en una clasificación separada. El mosaico de SPOT 5 presentó nubosidad en la parte SW y SE de la cuenca, por lo que se realizaron recorridos intensos de campo en dichas zonas, para verificar el uso de suelo.

### Clasificación de uso de suelo

La clasificación de uso de suelo 2013 se homologó con la clasificación de uso de suelo 2007 definida por Valdez-Lazalde et al. (2011) para hacerlas compatibles. Inicialmente se generaron campos de entrenamiento y se calcularon los valores de divergencia transformada para evaluar la separación de las firmas entre las clases de entrenamiento. Se seleccionaron entre 30 y 300 píxeles para cada una de las clases temáticas generadas: 1) agricultura de riego (AR),

2) agricultura de temporal (AT), 3) cuerpo de agua (AGUA), 4) bosque de pino (BP), 5) bosque de encino (BE), 6) bosque de pino-encino (BPE), 7) matorral (MT), 8) matorral erosionado (MTE), 9) pastizal (PZ) y 10) urbano (UR).

Posteriormente se creó un mosaico compuesto de las bandas 4-3-2 (IRM-IRC-rojo) para el proceso de clasificación. Este se ejecutó a través de una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud. Este clasificador calcula una función de probabilidad estadística (bayesiana) de las entradas para las clases establecidas a partir de los sitios de entrenamiento. Después, cada píxel se asignó a una clase, a la que más probablemente pertenece.

Para comparar ambas clasificaciones, el mapa final de la clasificación de uso de suelo 2013 se remuestreó a 30 m, para tener la misma resolución espacial que el raster de la clasificación de uso de suelo 2007 generada por Valdez-Lazalde et al. (2011).

La precisión de la clasificación se evaluó cotejando 121 puntos de control distribuidos de manera aleatoria sobre las clases temáticas identificadas. Con esos datos se construyó una matriz de confusión e indicadores asociados: precisión global, precisión del usuario y el coeficiente Kappa.

### **Análisis de cambios**

El análisis de cambios se realizó a través de la técnica conocida como postclasificación, la cual ha demostrado ser eficiente para detectar la naturaleza, las tasas y la localización de los cambios entre mapas de uso de suelo derivados de imágenes de satélite de diferentes fechas. Varios investigadores la han usado exitosamente en ambientes urbanos. Inicialmente el mapa final 2013 fue reclasificado en las clases de bosque (BP, BE y BPE) para obtener el mismo número de clases temáticas que las utilizadas en el mapa de 2007. La comparación temporal de las clasificaciones se realizó en el módulo Land Change Modeler for Ecological Sustainability implementado en el paquete IDRISI Andes (Clark Labs 2006). Este proceso generó una matriz de transición de dos vías y una nueva capa temática que contiene los cambios de un uso de suelo. También se estimó la tasa de deforestación para obtener el tanto por ciento de cambio anual en los usos de suelo B (BP, BE, BPE) MT, MTE a AR, AT, PZ y UR mediante la ecuación (1) propuesta por Palacio-Prieto et al. (2004).

$$Td = [(S2/S1)^{(1/n)} - 1] \times 100 \quad (1)$$

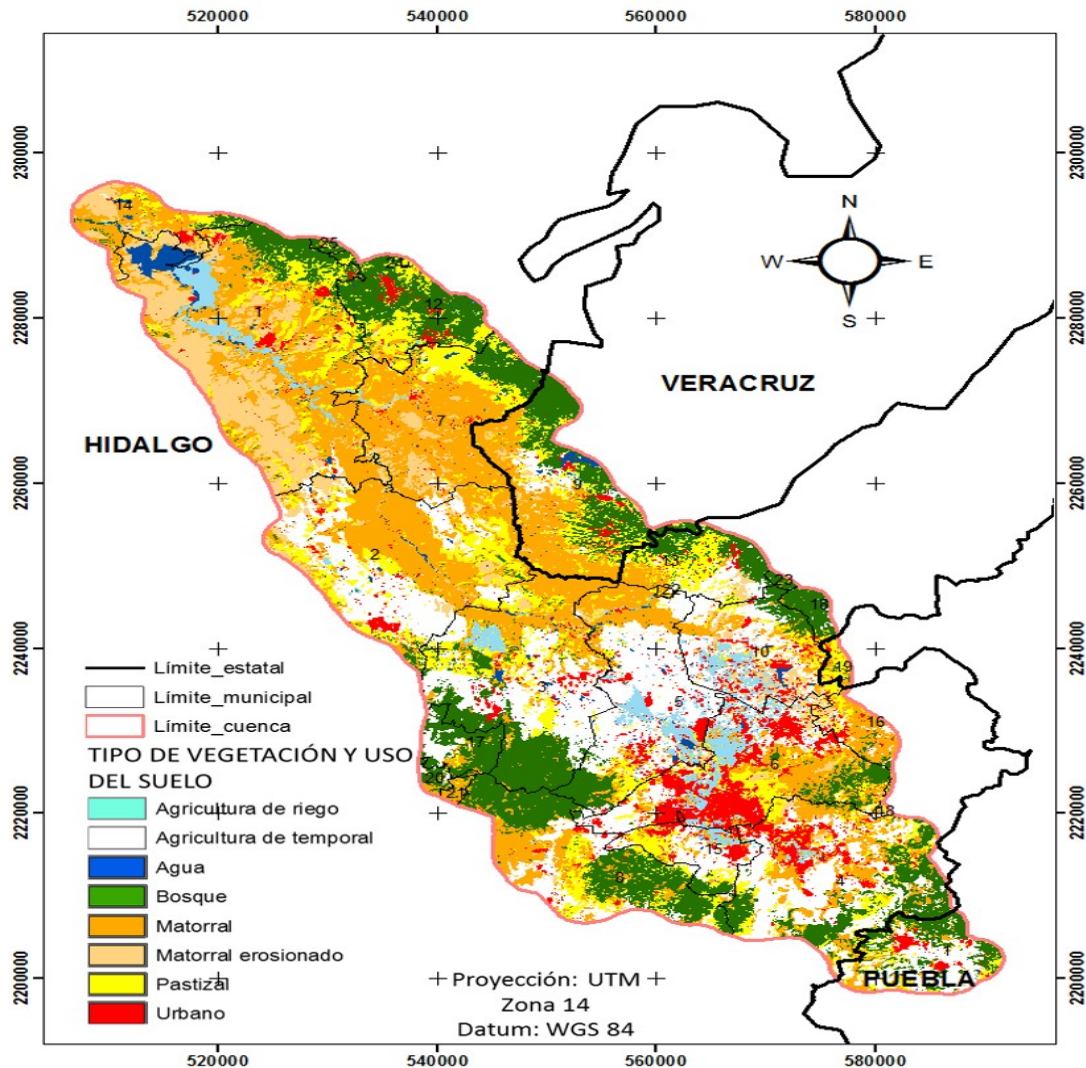
donde:  $Td$ = tasa de deforestación anual en tanto por ciento,  $S2$ = área arbolada en el año final,  $S1$ = área arbolada en el año inicial y  $n$ = número de años del periodo de análisis.

## **DINÁMICA DEL USO DE SUELO EN LA CUENCA METZTITLÁN**

### **Clasificación y validación del mapa de uso de suelo 2013**

El mapa generado para 2013 muestra que los usos de suelo más extendidos en la cuenca son la agricultura de temporal (89 596,55 ha), matorral (80 477,42 ha) y bosque (63 409,12 ha) (figura 2). La agricultura de temporal se encuentra extendida en toda la superficie de la cuenca, con mayor presencia en la parte sur, cercana a los asentamientos urbanos con alto número de

habitantes (Atotonilco el Grande, Tulancingo de Bravo, Singuilucan, Acatlán y Metepec) y terrenos planos aptos para este tipo de uso. En contraste, la agricultura de riego se encuentra localizada en los municipios de Metztitlán, Acatlán, Metepec, Tulancingo de Bravo y Huasca de Ocampo con un total de 17 058,81 ha. Su distribución se encuentra asociada con cuerpos de agua grandes (ríos y presas), terrenos planos extensos, y con la presencia de la mancha urbana.



**Figura 2. Mapa de vegetación y uso de suelo 2013 para la cuenca del río Metztitlán**

La mayor superficie de matorral se concentra en el área que corresponde a la reserva barranca de Metztitlán, caracterizada por climas con bajo contenido de humedad, como es el semiárido templado (BS, Cf) y terrenos con pendientes que van de 0 a 100 %, condiciones propicias para el desarrollo de matorral xerófilo (CONANP 2003), (Valdez-Lazalde et al. 2011). Por su parte, el bosque se encuentra con mayor extensión en las zonas altas de la cuenca (condición barlovento) donde predomina el clima templado (Valdez-Lazalde et al. 2011).

La exactitud general y el índice Kappa del mapa de uso de suelo son aceptables con valores de 92,2 y 91 %, respectivamente. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Valdez-Lazalde et al. (2011) con imágenes Landsat 7 ETM+ (2007), donde obtuvieron un 93 % de exactitud general y 91,5 % de índice Kappa. La tabla 1 presenta la matriz de confusión. En la diagonal se muestran los píxeles de la muestra correctamente clasificados para cada categoría, los valores fuera de la diagonal indican los píxeles clasificados incorrectamente y las categorías a las que se asignaron. Con excepción de las clases AT, UR, BE y MTE, las demás presentaron una exactitud general por clase por encima de 90 %.

**Tabla 1. Matriz de confusión para evaluar la exactitud de la clasificación de las clases temáticas 2013**

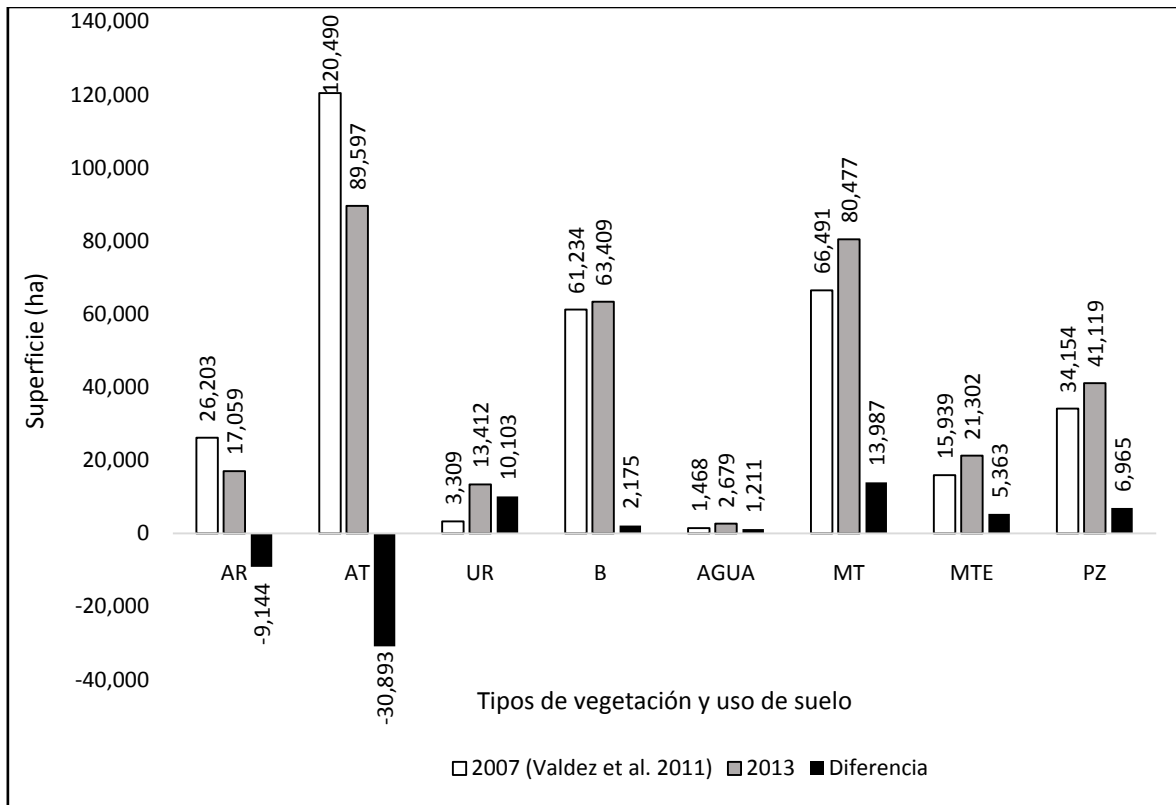
	CLASES	PIXELES CLASIFICADOS										
		AR	MTE	PZ	AGUA	UR	MT	BP	BE	BPE	AT	Total
DATOS REFERENCIA	AR	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74
	MTE	0	51	0	0	2	0	0	0	0	0	53
	PZ	2	0	74	0	1	2	0	6	0	3	88
	AGUA	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	70
	UR	0	0	0	0	57	0	0	1	0	2	60
	MT	0	1	0	0	0	77	0	3	1	8	90
	BP	0	0	0	0	0	0	137	1	2	0	140
	BE	0	0	0	0	0	0	0	53	1	0	54
	BPE	0	0	0	0	0	0	0	3	63	0	66
	AT	0	8	4	0	7	3	0	1	0	81	104
	<b>Total</b>	76	60	78	70	67	82	137	68	67	94	799
	<b>Exac. General (%)</b>	92,2			<b>Kappa</b>	91						

### Detección y análisis de cambios de uso de suelo

El análisis de cambios de cobertura y uso del suelo para el periodo 2007-2013 revela una dinámica importante en las superficies obtenidas para todas las categorías (figura 3). Actualmente 50,2 % de la cuenca está cubierto por B, MT y asociaciones secundarias como el MTE. Las tierras de cultivo (AT y AR) ocupan 32,1 % de la superficie. Los cambios más significativos se centran, por un lado, en la disminución de los usos AR y AT con 34,8 y 25,6 % respectivamente, y por el otro, en un aumento de los usos UR (305,3 %), B (3,5 %), AGUA (82,4 %) y PZ (20,3 %). La matriz de intercambio de superficies (tabla 2) muestra que los usos de suelo estudiados no se mantuvieron estables durante el período analizado, sino que mostraron un fuerte intercambio entre todas las clases. Las superficies con más del 50 % de cambio fueron los usos UR y AGUA (figura 4).

El comparativo entre la superficie de la clase de vegetación leñosa existente en el 2013 (*S2*) y la superficie de este tipo existente en 2007 (*S1*), mostró que las tasas de cambio (tabla 2) estimadas a partir de ambas clasificaciones son sustancialmente diferentes a las obtenidas por Valdez-Lazalde et al. (2011) para las dos décadas anteriores a 2007. Los resultados sugieren un

cambio en la tendencia al pasar de una tasa de deforestación a una tasa de reforestación. En S2 las superficies de cobertura leñosa (B, MT y MTE) tienen una tendencia positiva de 2,3 %, mientras que Valdez-Lazalde et al. (2011) reportaron una tendencia negativa de -0,5 % en un periodo de 22 años para el mismo tipo de coberturas. La tendencia hacia la recuperación de la vegetación leñosa no es disímil únicamente con lo reportado por los autores mencionados, también lo es con la mayoría de los estudios que han analizado la degradación de los ecosistemas naturales en México; contrariamente, los resultados sí coinciden con el aumento de los usos antrópicos del suelo.

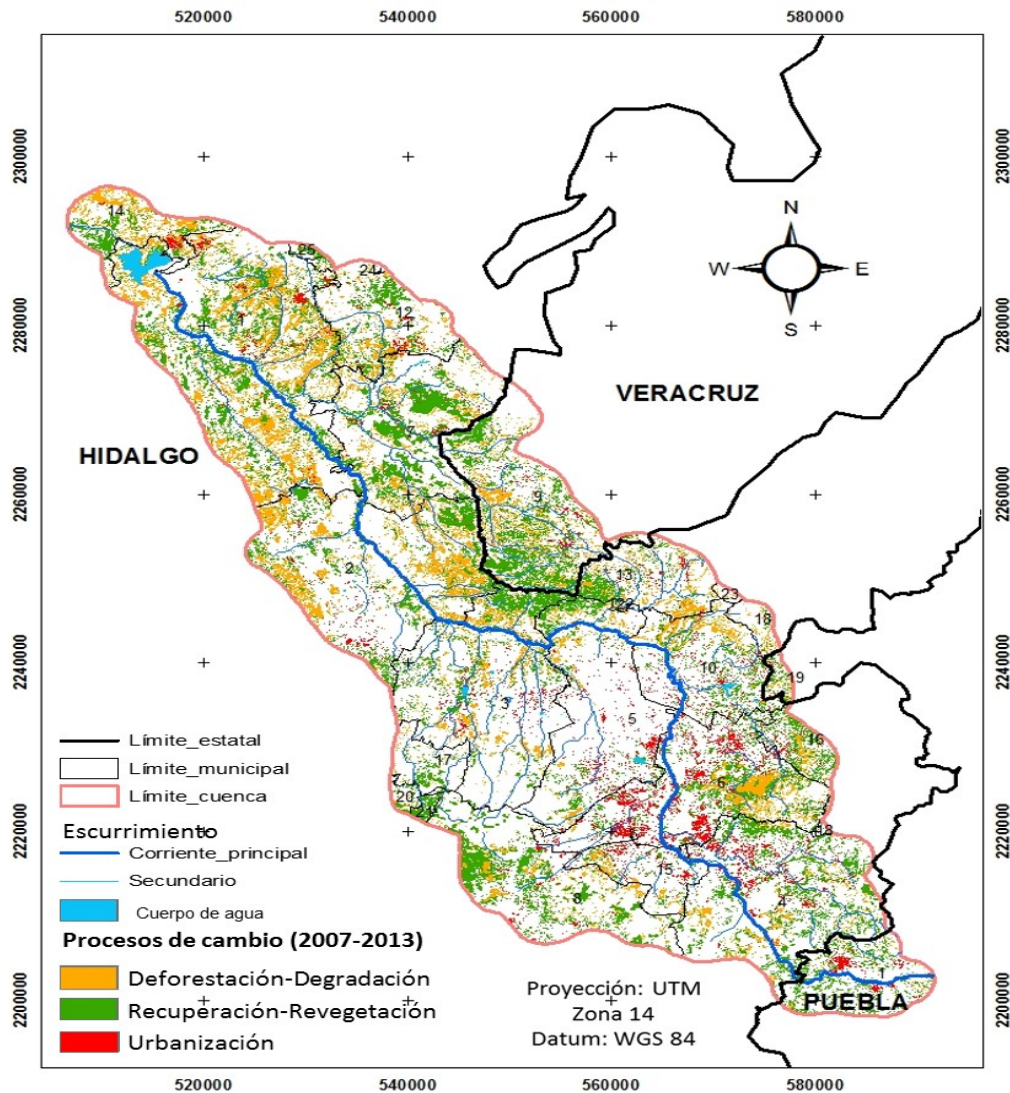


**Figura 3. Comparación de las superficies ocupadas por tipo de vegetación y uso de suelo entre la clasificación 2007 y 2013**

Las diferencias muy contrastantes para algunos tipos de uso de suelo se pudo deber a que las clasificaciones bajo comparación fueron generadas con datos de sensores con resolución espacial y espectral diferente; la clasificación 2007 (Valdez-Lazalde et al. 2011) se generó a través de imágenes Landsat con una resolución espacial de 30 m, mientras que la clasificación de 2013 se obtuvo con imágenes SPOT con resolución de 10 m.

La figura 5 muestra un acercamiento a una parte pequeña del mosaico de la imagen SPOT, en la que se observa una zona urbana rodeada de diversos usos de suelo (MT, AT, PZ), con predominancia de uso agrícola de temporal, los cuales resultaron en clases de uso de suelo diferentes después de la clasificación. En la misma zona, pero en la imagen Landsat 7 ETM+, difícilmente se visualizan los diferentes tipos de uso que existen (resultando en una clasificación

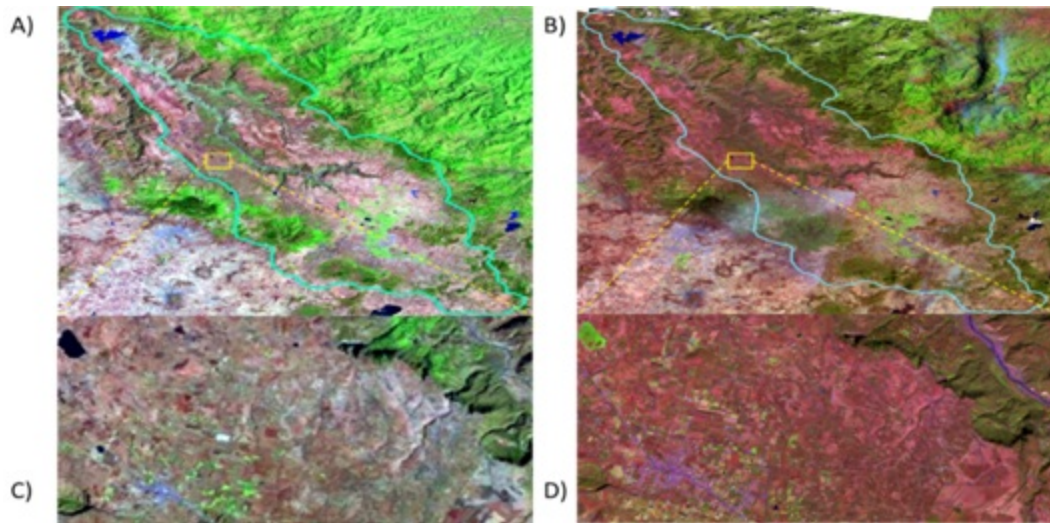
completa como AT), es decir, en la imagen SPOT es posible discriminar con facilidad el uso agrícola y el uso urbano, entre otros.



**Figura 4. Mapa de cambio de uso de suelo (2007-2013)**

Otra posible contribución a explicar las diferencias mencionadas es el error asociado con la clasificación 2013, ocasionado por el uso de imágenes SPOT de diferentes fechas. El hecho de que la clasificación 2007 haya sido generada con una imagen Landsat única tiene sus ventajas, mientras que la clasificación 2013 se generó a partir de un mosaico de imágenes SPOT 5 y 6 captadas en diferentes meses.





**Figura 5. A) Imagen Landsat 7 ETM+ (2007), composición R, G, B (B<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>) y C) acercamiento a una zona agrícola al E del municipio Atotonilco El Grande B) Mosaico SPOT 5 HRG 2 y SPOT 6 (2013), composición R, G, B (B<sub>4</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>3</sub>) y D) diferentes usos de suelo que puede ser identificados con mayor facilidad**

**Tabla 2. Matriz de intercambio de superficies de uso de suelo entre el período 2007-2013**

		2013									
		AR	AT	AGUA	B	MT	MTE	PZ	UR	Total	TC (%)
2007	AR	10 286	3 789	485	1 011	4 984	916	2 258	2 473	26 203	-6,9
	AT	4 294	67531	429	6 616	16677	3 505	15452	5 982	120488	-4,8
	AGUA	8	28	1 354	2	32	22	13	8	1 469	10,6
	B	398	3 297	22	48369	5 087	231	3 308	300	61011	0,7
	MT	985	4 235	282	3 900	41375	5 496	9 660	559	66 492	3,2
	MTE	211	947	45	219	3 753	8 497	1 955	310	15 938	5,1
	PZ	744	9 119	62	3 192	8 275	2 771	8 339	1 652	34 153	3,2
	UR	139	471	4	127	212	12	162	2 172	3 300	26,4
Total		17066	89416	2 683	63436	80397	21452	41147	13456	329053	

## CONCLUSIONES

- Se detectó un cambio positivo en la tendencia de deforestación en la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo en el periodo 2007-2013. Las superficies de cambio identificadas en el paisaje entre ambas clasificaciones (años) no se corresponden totalmente con lo acontecido en la realidad.

- Es importante transitar del uso de imágenes de mediana resolución espacial (Landsat), al uso de imágenes de alta resolución espacial (SPOT) si la intención es evaluar con detalle los cambios que acontecen en el paisaje de una región.
- El resultado aquí reportado sienta la base para el monitoreo posterior al detalle del uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán. Los resultados obtenidos para la clasificación 2013 se consideran aceptables y así lo muestran la exactitud por clase y el estadístico Kappa (91%).
- La actualización futura de los usos de suelo de la cuenca a través del uso de imágenes SPOT, permitirá tener información comparable para identificar zonas de cambio importantes para el monitoreo de los recursos naturales de la cuenca.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la estación receptora ERMEX por la facilitación de las imágenes SPOT para realizar la clasificación 2013 y a los guardaparques de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán (CONANP) por el apoyo brindado en los recorridos de verificación.

## REFERENCIAS

- CONANP** (2003). “Programa de manejo reserva de la biósfera Barranca de Metztitlán”. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 1ra. edición. México, D. F. 208 p.
- Chávez P. S.** (1996). “Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved”. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62: 2025-303. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Bethesda, USA.
- Clark Labs** (2006). “Software IDRISI Andes”. Clark University, Worcester, Massachusetts, USA.
- Feddema J. J., Oleson K. W., Bonan G. B., Mearns L. O., Buja L. E., Meehl G. A. and Washington W. M.** (2005). “The importance of land-cover change in simulating future climates”. *Science* 310:1674-1678. American Association for the Advance of Science, Washington, USA.
- FAO** (2010). “Global forest resources assessment 2010: progress towards sustainable forest management”. FAO Forestry Paper. Food and Agricultural Organization, United Nations.
- Palacio-Prieto J. L., Sánchez-Salazar M. T., Casado J. M., Propin F. E., Delgado C. J., Velázquez M. A., Chias B. L., Ortíz A. M. J., González S. J., Negrete F. G., Morales J. G. y Márquez H. R.** (2004). “Indicadores para la caracterización y ordenamiento territorial”. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México D.F.
- Valdez-Lazalde J. R., Aguirre C. A. S. y Ángeles G. P.** (2011). “Análisis de los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán (México) usando imágenes de satélite: 1985-2007”. *Revista Chapingo* XVII: 313-324, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Autónoma Chapingo. México.