XVI SIMPOSIO INTERNACIONAL SELPER 2014

La Geoinformación al Servicio de la Sociedad

Memorias

Sociedad Latinoamericana en Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial Capítulo Colombia

30 AÑOS

Medellín, Colombia
29 de Septiembre al 3 de Octubre de 2014

Análisis del cambio de cobertura de suelo en la península de Yucatán de 1995 a 2010

Land Cover Change Analysis in the Yucatan Peninsula from 1995 to 2010

Ricardo M. Llamas*[1], René R. Colditz[1], César Feliciano[2]

[1]Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO), Avenida Liga Periférico-Insurgentes Sur 4903, Col. Parques del Pedregal, Del. Tlalpan, 14010, México D.F.

[2]Facultad de estudios superiores, Zaragoza, Universidad nacional autónoma de México (UNAM), Batalla 5 de Mayo SN, Ejercito Oriente, Del. Iztapalapa, 09230, México D.F.

*Primer autor: rllamas@conabio.gob.mx, Tel. +52-55-50044975

Resumen

El cambio de cobertura de suelo representa uno de los ejes principales en los estudios medioambientales. En México la tasa de cambio en la cobertura se ha incrementado aceleradamente en diferentes regiones aun cuando no es una tendencia generalizada en todo el país. La península de Yucatán es un claro ejemplo de esto, principalmente como consecuencia de la expansión urbana en la costa de Quintana Roo y la ciudad de Mérida, así como el desarrollo agrícola en los estados de Yucatán y Campeche. El presente trabajo realiza un análisis del cambio en la cobertura de suelo en intervalos de 5 años desde 1995 hasta 2010 en la porción de la península de Yucatán cubierta por la escena 020-046 (WRS2) de los sensores Landsat 5TM y 7ETM+. La identificación de cambio se realizó mediante un ejercicio de digitalización visual. Se presentan estadísticas para cada periodo así como la distribución del cambio alrededor de la ciudad de Mérida, en áreas naturales

protegidas (ANP) y en segmentos de distancia a partir de vías de comunicación. Finalmente se realiza el cálculo del Índice de Moran para determinar si existe heterogeneidad espacial asociada a las dimensiones de las áreas de cambio.

Palabras clave: Detección de cambios, Landsat, Sureste de México, Tendencias de cambio.

Abstract

Land Cover change has become one of the main topics in environmental studies. In Mexico, the land cover change rate has increased rapidly in many regions even though it is not a generalized trend across the entire country. The Yucatan peninsula represents a suitable example of land changes, mostly driven by urban sprawl in the coast of Quintana Roo and around city of Merida, as well as patterns of shifting cultivation in the states of Yucatan and Campeche. This work presents an analysis of land cover change at five-year intervals from 1995 to 2010 for the area covered by Landsat 5TM and 7ETM+ path-row 020-046 (WRS2). Change was identified by means of visual interpretation and digitalization, and statistics are shown for each five-year period. The distribution of changes is analyzed in detail for the surrounding area of Merida, natural protected areas and along major roads. Furthermore Moran´s index is applied in order to find spatial heterogeneity associated with the size of land change areas.

Key words. Change detection, Landsat, Southeastern Mexico, Trends of change.

Introducción

La cobertura de suelo y sus cambios en la superficie de la Tierra representan una expresión clara de la dinámica natural en el territorio así como de la influencia de las actividades humanas en la estructura del mismo. En la actualidad, la explotación de los recursos naturales para satisfacer las necesidades humanas como comida, vestido, medio de transporte, refugio, etc, son el principal factor que ha acelerado el cambio en la cobertura de suelo (Manandhar *et al.* 2010). El uso del suelo y el cambio en la cobertura del mismo, son además factores determinantes en la vulnerabilidad de ecosistemas, por lo que el conocimiento de la distribución y las dimensiones del cambio ayuda a los tomadores de decisión para el establecimiento de políticas públicas (Lu *et al.* 2004). Aunado a esto, la cobertura de suelo juega un papel importante en la generación de modelos climáticos al ser considerada como una de las variables climáticas esenciales (GTOS 2009), y también proporciona capas de información base para el diseño de modelos de predicción del cambio en la cobertura (Schneider & Pontius 2001; Chen & Pontius 2010).

Estudios concernientes a la cobertura de suelo, la evaluación de los recursos naturales y su relación con otros fenómenos a nivel mundial incluyen el mapeo de alteraciones en bosques (Masek *et al.* 2008; Pouliot *et al.* 2009), el manejo de recursos en áreas naturales protegidas (Fraser *et al.* 2009) y planeación territorial (Manonmani & Divya Suganya 2010) entre otros. En México, la cobertura de suelo también se ha representado en diversos productos cartográficos (Mas *et al.* 2004; INEGI 2009; Mas *et al.* 2009; Couturier *et al.* 2012; Colditz *et al.* 2012), los cuales pueden formar parte de sistemas de monitoreo (Latifovic *et al.* 2012; Gebhardt *et al.* 2014) que faciliten el análisis de los cambios (Manandhar *et al.* 2010). En

este sentido, es necesario actualizar la información existente, y aun cuando se conocen diversos métodos para este propósito, la detección automatizada de cambios se ha convertido en un técnica ampliamente usada para el mapeo y actualización de información sobre la cobertura de suelo (Muchoney & Haack 1994; Healey *et al.* 2005; Colditz *et al.* 2014). Estos procesos, necesitan de información derivada de fuentes no automatizadas para el entrenamiento y la validación de algoritmos, por lo que la generación de capas de cambio basadas en interpretación visual resulta un paso significativo.

Como parte del desarrollo de un proyecto de detección de cambios y monitoreo de la cobertura de suelo para evaluar el balance de carbono en México, se seleccionó un área del sureste del país en la península de Yucatán , donde el cambio en la cobertura de suelo se ha visto acelerado por la expansión urbana de dos grandes centros de población como son la ciudades de Mérida y Cancún (Llamas & Colditz 2012). Esto, como respuesta a una floreciente actividad industrial y turística en la península, y al crecimiento de la población debido a la oferta de empleos en ambos sectores.

El objetivo del trabajo fue la producción de capas de información con los cambios de cobertura de suelo entre periodos de 5 años en la escena WRS2 path-row 020-046 de los sensores Landsat 5TM y 7ETM+ de 1995 a 2010. Además de presentar estadísticas de tendencia de cambio en cada periodo y la distribución del mismo, se consideran diferentes elementos de categorización como el límite original del área metropolitana de la ciudad de Mérida, la densidad de vías de comunicación en la península y la localización de áreas naturales protegidas (ANP) en el área de estudio. También se realizaron cálculos sobre la

agrupación a aleatoriedad de las áreas de cambio en relación a las dimensiones de éstas utilizando el Índice de Moran.

Datos

Para el proceso de digitalización se seleccionaron imágenes Landsat de 30 m de resolución espacial en nivel 1T de la escena WRS2 path-row 020-046 con la menor cobertura de nubes posible y en las cuales las fechas de la imagen del año inicial y final en cada periodo no tuvieran una gran separación temporal. Después de una búsqueda exhaustiva para adquirir las imágenes óptimas, se obtuvieron tres escenas del sensor 5TM para 1995, 2000 y 2010, y dos del sensor 7ETM+ para el año 2005 (Figura1). Las dos imágenes de 2005 fueron combinadas en un compuesto para reducir la falta de información causada por la falla del corrector de escaneo en líneas del sensor, presente desde mayo de 2003 (Figura2).

Se estableció un marco de trabajo común a partir del área coincidente en los 4 años de imágenes. Se generaron capas adicionales considerando información relevante para el estudio (Figura 3). Se consideraron los polígonos de las ANP tanto federales como estatales que se localizan dentro del marco establecido, en el caso de aquellas ubicadas en los límites, se realizó un corte para sólo conservar la parte que coincidiera con el área de estudio. Se utilizó también la red de carreteras de la península de Yucatán a partir de la cual se generaron segmentos de distancia en rangos de 0-1 km, 1-2.5 km, 2.5-5 km, 5-10 km y >10 km. Finalmente, se determinó una zona de influencia de 10 km alrededor del anillo

periférico de Mérida, el cual se estableció como límite urbano en los planes de desarrollo iníciales de la ciudad.

Metodología

Preprocesamiento

Como parte del preprocesamiento de las imágenes seleccionadas, se aplicó el algoritmo LEDAPS (Masek *et al.* 2006) para la corrección atmosférica y la transformación de niveles digitales a datos de reflectancia de la superficie. Posteriormente se omitieron pixeles con presencia de nubes, o sombras mediante el algoritmo Fmask (Zhu & Woodcock 2012), de modo que sólo se conservó la información de tierra y agua para la digitalización de cambios.

Identificación de cambios en la cobertura de suelo

La digitalización de los cambios se efectuó en tres periodos, 1995-2000, 2000-2005 y 2005-2010. Para el primer periodo se tuvo que excluir la zona norte de las imágenes, incluyendo una porción del área urbana de la ciudad de Mérida, debido a problemas de georreferenciación ya que se observaba un marcado desfase entre ambas fuentes.

En los tres periodos, dos analistas generaron polígonos alrededor de las áreas que fueron claramente identificadas como cambios de cobertura en un compuesto de color RGB con las bandas 5 (1.55-1.75 µm), 4 (0.76-0.90 µm), 2 (0.52-0.60 µm). Se estableció una escala de despliegue de las imágenes en pantalla de 1:25,000 para evitar la sobre-digitalización de

polígonos de cambio debido a ligeras diferencias espectrales que se pueden observar en escalas mayores pero que no necesariamente representan un cambio en la cobertura, sino que pueden ser causadas por diferencias fenológicas en la vegetación, diferencia en el ángulo de visión del sensor, distintos contenidos de humedad en el suelo, etc. Una vez finalizada la identificación de cambios en los tres periodos, se obtuvieron tres capas con la información representada en polígonos. Adicionalmente se determinó el área común entre las cuatro imágenes Landsat, la cual cubre 33,090 km^2.

Posteriormente se realizaron cálculos de geometría en las capas de cambios para obtener el área de cada polígono. Debido a que algunos de los polígonos digitalizados como cambio fueron muy pequeños, aunado a que aquellos en los límites del marco de trabajo se redujeron al hacer el corte, se estableció un área mínima de análisis de 1 ha. La disminución en el número de polígonos ayudó a reducir efectos de sobre-digitalización y el área omitida de las capas iníciales no representó una pérdida significativa de información.

Cálculo de estadísticas

Se realizó el cálculo de la estadística básica para cada capa de información en los tres periodos de estudio, obteniéndose el área total de cambio entre cada par de años, las dimensiones medias de los polígonos, así como las áreas máximas de los mismos. Se obtuvo también el porcentaje de cambio entre periodos consecutivos de manera individual y también entre el periodo inicial y el periodo final con la intención de identificar posibles tendencias en el aumento o disminución de la intensidad de cambio en la península de Yucatán.

Como segundo paso, se calcularon las áreas identificadas como cambio en las diferentes categorías de las capas adicionales de ANP, segmentos de distancia desde vías de comunicación y la zona de influencia de 10 km alrededor de la ciudad de Mérida.

Finalmente, se aplicó una prueba de autocorrelación espacial para obtener el índice de Moran (Ecuación1) y determinar si el nivel de significancia indica agrupación entre los polígonos de cambio en relación al tamaño de éstos. La justificación para la aplicación de esta prueba recae en la hipótesis que considera que la expansión urbana tendría que presentarse en áreas de extensión similar a no ser que exista un gran proyecto de desarrollo. Además de que los cambios en las zonas agrícolas de producción intensiva también presentarían cambios en áreas similares debido al tamaño de los predios, y los cambios restantes en zonas rurales y en terrenos agrícolas aislados se manifestarían en pequeñas áreas relativamente dispersas pero cercanas a centros de población.

Resultados

El cambio identificado dentro de los polígonos restantes después de aplicar el área mínima de 1 ha (Tabla 1) fue de 131,955 ha entre 1995 y 2000, en el periodo de 2000 a 2005 de 77,523 ha y finalmente entre 2005 y 2010 de 51,034 ha (Figura 4, Tabla2). El área identificada dos veces como cambio en los periodos 1995-2000 y 2000-2005 fue de 2,384 ha. En el periodo 2000-2005 y 2005-2010 el área identificada doblemente como cambio fue de 1,505 ha. Adicionalmente, el área identificada como cambio tres veces considerando todos los periodos fue de sólo 45.8 ha.

De acuerdo con la Tabla 3, se observa que en relación con las ANP, todas presentaron el mayor cambio en el periodo inicial, descendiendo gradualmente en los dos periodos subsecuentes a excepción de los Petenes, donde el cambio se incrementó nuevamente en el tercer periodo a diferencia del segundo. El caso de Ría Celestún presenta una disminución drástica de los cambios, esto relacionado con la mínima extensión de esta ANP dentro del área de estudio.

En la zona de la ciudad de Mérida las estadísticas de cambio al interior del límite original de la ciudad muestran que el mayor cambio se presentó entre al año 2000 y 2005, mientras que en el rango de 10 km al exterior de periférico, el valor más alto se observa entre 1995 y 2000. En el caso de este análisis se debe de considerar que la parte norte de Mérida fue omitida en la digitalización del primer periodo, por lo que la interpretación de los valores presentados debe considerar esta característica.

La densidad del cambio en relación con los segmentos de distancia a partir de las carreteras y caminos muestra que la mayor ocurrencia de cambio se presenta en rangos de 1 a 2.5 km en los periodos de 1995-2000 y 2005-2010, mientras que entre 2000 y 2005 el mayor cambio observado fue en el área inmediata a las vías de comunicación e inferior a 1 km. Resulta también interesante que los mayores cambios dentro de los rangos mayores a 5 km se presentaron en los dos primeros periodos, lo que probablemente indica que no hubo un importante desarrollo de nueva infraestructura en zonas alejadas a los centros de población entre 2005 y 2010.

Finalmente, el análisis con el cálculo del Índice de Moran (Tabla 4), muestra que aun cuando se podría esperar la presencia de patrones en el agrupamiento de los polígonos en relación con las dimensiones de los mismos, estos se distribuyen heterogéneamente en el área de estudio. Los valores del Índice de Moran en los tres periodos son muy cercanos a 0, lo que indica una clara aleatoriedad espacial.

Conclusiones

La información obtenida como resultado de la digitalización ofreció la posibilidad de analizar la tendencia en el cambio de cobertura de suelo, pudiendo determinar si este se ha incrementado o disminuido durante el periodo de estudio. Se puede concluir que la consideración de las ANP facilitó el cálculo del área de cambio en aquellas zonas que por su estatus de conservación no deberían ser afectadas por cambios significativos, a menos que estos sean consecuencia de procesos naturales. El cálculo del Índice de Moran para conocer el grado de heterogeneidad en los polígonos de cambio de acuerdo con las dimensiones de estos, mostró que no existe un agrupamiento evidente basado en esta característica, por lo que se cumple la hipótesis nula de aleatoriedad espacial. Como parte del trabajo futuro, se realizarán digitalizaciones anuales entre 2005 y 2010, las cuales junto con el trabajo presentado servirán como insumo para la generación de modelos de balance de carbono y validación de algoritmos para la detección de cambios en forma automatizada.

Referencias

Chen, H., & Pontius, R. G. (2010). Sensitivity of a Land Change Model to Pixel Resolution and Precision of the Independent Variable. *Environmental Modeling & Assessment*, 16(1), 37–52.

Colditz, R. R., López Saldaña, G., Maeda, P., Argumedo Espinoza, J., Meneses Tovar, C., Victoria Hernández, A., Zermeño Benítez, C., Cruz López, I., & Ressl, R. (2012). Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using 250m MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 123, 541–552.

Colditz, R. R., Pouliot, D., Llamas, R. M., Homer, C. G., Latifovic, R., Ressl, R., Meneses Tovar, C., Victoria Hernández, A. & Richardson, K. (2014). North American-wide land cover change detection between 2005 and 2010 with 250 m MODIS data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, (sometido)

Couturier, S., Núñez, J. M., & Kolb, M. (2012). Measuring Tropical Deforestation with Error Margins : A Method for REDD Monitoring in South-Eastern Mexico. En P. Sudarshana (Ed.), *Tropical Forests* (pp. 269–296).

Fraser, R. H., Olthof, I., & Pouliot, D. (2009). Monitoring land cover change and ecological integrity in Canada's national parks. *Remote Sensing of Environment*, 113(7), 1397–1409.

Gebhardt, S., Wehrmann, T., Ruiz, M., Maeda, P., Bishop, J., Schramm, M., Kopeining, R., Cartus, O., Kellndorfer, J., Ressl, R., Santos, L., & 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.

GTOS. (2009). Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables – ECV-T9: Land cover. *GTOS-64.* (p. 36). Recuperado de http://www.fao.org/gtos/doc/ECVs/T09/T09.pdf

Healey, S. P., Cohen, W. B., Zhiqiang, Y., & Krankina, O. N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 301–310.

INEGI. (2009). Guía para la interpretación de cartografía, uso de suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie III (p. 74). Instituto Nacional de Geografía y Estadística.

Latifovic, R., Homer, C., Ressl, R., Pouliot, D., Hossain, S. N., & Colditz, R. R. (2012). North American land-change monitoring system. En C. P. Giri (Ed.), *Remote Sensing of Land Use and Land Cover: Principles and Applications* (pp. 303–324). Boca Raton, FL. CRC/Taylor & Francis.

Llamas, R. M., & Colditz, R. R. (2012). Characterization and distribution of the land cover change in Mexico between 2005 and 2010 based on automated detection with 250m MODIS images. En *Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, SELPER 2012* (p. 8). Cayena, Guayana Francesa.

Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365–2401.

Manandhar, R., Odeh, I. O. A., & Pontius, R. G. (2010). Analysis of twenty years of categorical land transitions in the Lower Hunter of New South Wales, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4), 336–346.

Manonmani, R., & Divya Suganya, G. M. (2010). Remote Sensing and GIS Application In Change Detection Study In Urban Zone Using Multi Temporal Satellite. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(1), 60–65.

Mas, J.-F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura / uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1), 23–39.

Mas, J.-F., Velázquez, A., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, C., Bocco, G., … Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multidate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261.

Masek, J. G., Huang, C., Wolfe, R., Cohen, W., Hall, F., Kutler, J., & Nelson, P. (2008). North American forest disturbance mapped from a decadal Landsat record. *Remote Sensing of Environment*, 112(6), 2914–2926.

Masek, J. G., Vermote, E. F., Saleous, N. Z., Wolfe, R. E., Hall, F., Huemmrich, Gao, F., Kutler, J., & Lim, T. K. (2006). A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990-2000. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 3(1), 68 – 72.

Muchoney, D. M., & Haack, B. N. (1994). Change Detection for Monitoring Forest Defoliation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(10), 1243–1251.

Pouliot, D., Latifovic, R., Fernandes, R., & Olthof, I. (2009). Evaluation of annual forest disturbance monitoring using a static decision tree approach and 250 m MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 1749–1759.

Schneider, L. C., & Pontius, R. G. (2001). Modeling land-use change in the Ipswich watershed. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85, 83–94.

USGS. (2013). *SLC-off Products: Background*. Recuperado el 08 de Agosto, 2014, de http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php

Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83 – 94.

Tabla 1. Número de polígonos identificados inicialmente como cambio y polígonos restantes después de filtrar por área mínima de 1 ha.

Capa de cambios	Polígonos iniciales	Polígonos restantes
1995-2000	18,223	17,308
2000-2005	11,550	11,372
2005-2010	7,616	7,263

Tabla .2 Cambio identificado en la digitalización de los tres periodos de estudio

Periodo	Cambio identificado (ha)	Área máxima (ha)	Área media (ha)
1995-2000	131,955	872	7.62
2000-2005	77,523	4,371	6.82
2005-2010	51,034	731	7.03

Tabla 3. Áreas identificadas como cambio y categorizadas en diferentes grupos de análisis. Áreas Naturales Protegidas (ANP), Cambios al interior y exterior del anillo periférico de Mérida, Segmentos de distancia a partir de vías de comunicación.

Áreas de cambio en diferentes categorías de análisis			
ANP	Cambio (ha) 1995-2000	Cambio (ha) 2000-2005	Cambio (ha) 2005-2010
Balaan Kaax	220.8	142.8	18.2
Lagunas de Yalahau	467.3	195.2	69.5
Los Petenes	151.1	25.9	45.7
Ría Celestún	103.2	0	0
Cambios urbanos Mérida	Cambio (ha) 1995-2000	Cambio (ha) 2000-2005	Cambio (ha) 2005-2010
Interior del periférico (10 km)	642.6	823.9	461.4
Exterior del periférico (10 km)	3,658.9	2,824.5	2,410.7
Segmentos de distancia	Cambio (ha) 1995-2000	Cambio (ha) 2000-2005	Cambio (ha) 2005-2010
1km	51,106.3	34,116.8	19,001.8
1-2.5km	57,437.9	33,464.8	20,447
2.5-5km	41,380.7	24,332.6	14,461.6
5-10km	20,796	13,334.7	8,203.7
> 10km	4,109.5	7,500.3	4,814.2

Tabla 4. Índice de Moran para determinar la autocorrelación espacial de los polígonos de cambio en relación con su área.

Periodo	**Índice de Moran**
1995-2000	0.024654
2000-2005	0.002102
2005-2010	0.040692

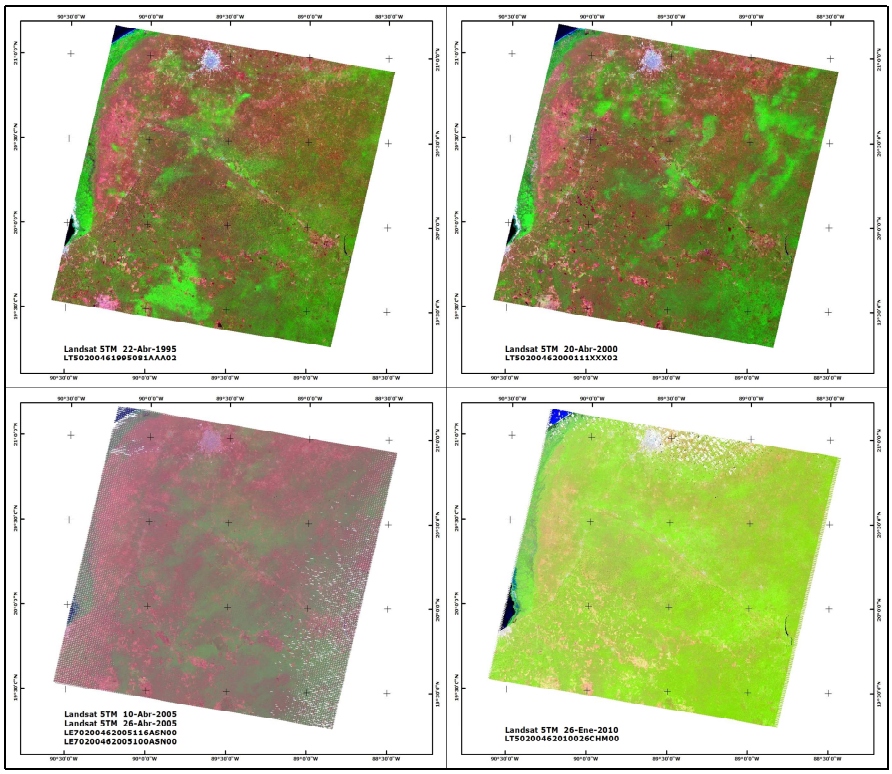

Figura 1. Imágenes seleccionadas para la digitalización de cambios en tres periodos de 5 años de 1995 a 2010. La imagen inferior izquierda es el resultado de un compuesto entre dos imágenes 7ETM+.

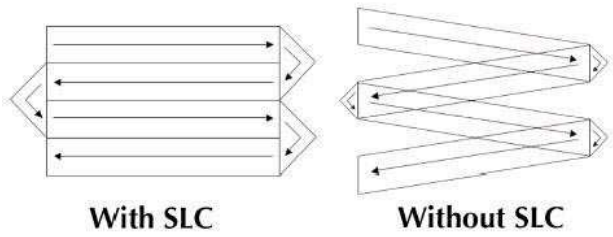

Figura 2. Efecto de la falla en el corrector de escaneo en líneas para el registro de información por el sensor Landsat 7ETM+ presente desde 2003 (USGS 2013).

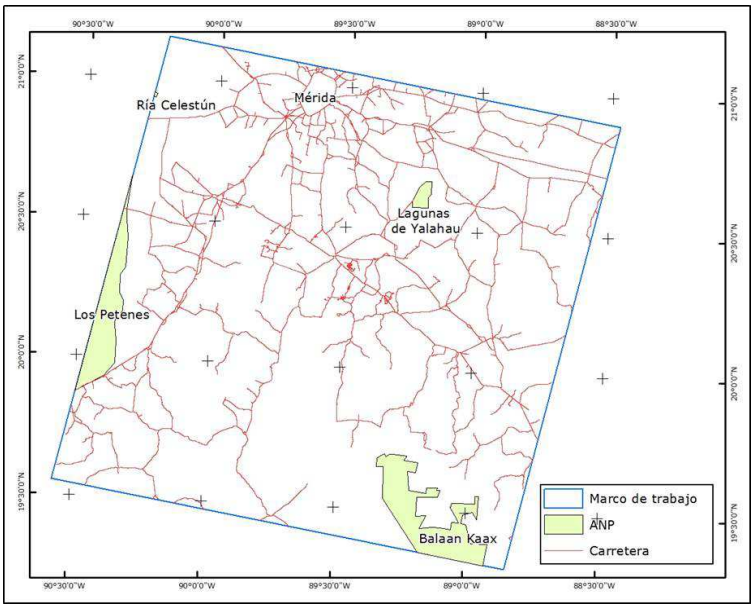

Figura 3. Capas adicionales de datos para derivar el análisis del área de cambio en diferentes categorías de información.

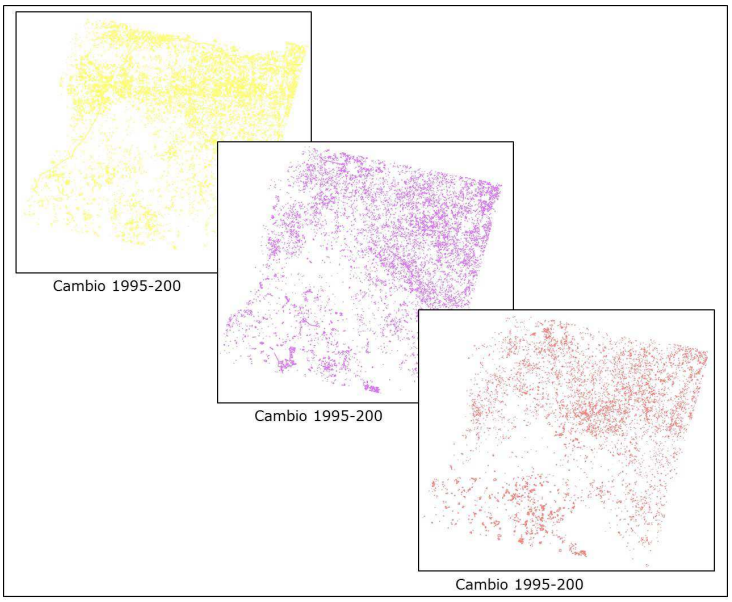

Figura 4. Polígonos correspondientes a las áreas identificadas como cambios en la digitalización de los tres periodos de estudio.

(1)

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} z_i z_j}{\sum_{i=1}^{n} z_i^2}$$

Donde z_i es la desviación de un atributo del elemento i a partir de su media $(x_i - \bar{X})$, mientras $w_{i,j}$ es el peso especial entre el elemento i y j, n es igual al número total de elementos, y S_0 es la agregación de todos los pesos espaciales.