

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

## **EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS PARA EL ESTUDIO DEL CAMBIO DE OCUPACIÓN DE SUELO Y PROPUESTA METODOLÓGICA PARA SOLVENTAR ALGUNAS DE SUS INCONSISTENCIAS: EL PARQUE NACIONAL NEVADO DE TOLUCA, MÉXICO**

HÉCTOR HUGO REGIL GARCÍA<sup>1</sup>, SERGIO FRANCO MAASS<sup>2</sup>, GABINO EUFEMIO NAVA BERNAL<sup>2</sup> Y JOSÉ ANTONIO BENJAMÍN ORDÓÑEZ DÍAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica. División de Ingenierías. Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Lascuráin de Retana No. 5. Guanajuato, Gto., México Col. Centro C.P. 36000

<sup>2</sup> Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, Universidad Autónoma del Estado de México. Instituto Literario 100, Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000.

<sup>3</sup>PRONATURA A.C. Aspérgulas 22, Colonia San Clemente. México, D.F., C.P. 01740 México D.F.

[regil\\_hh@yahoo.com.mx](mailto:regil_hh@yahoo.com.mx) , [sfrancom@uaemex.mx](mailto:sfrancom@uaemex.mx), [gnavab@uaemex.mx](mailto:gnavab@uaemex.mx), [jabordonez@hotmail.com](mailto:jabordonez@hotmail.com)

### **RESUMEN**

Se determinan las principales inconsistencias metodológicas en los estudios de cambio de ocupación del suelo identificando principalmente los relacionados con la diferenciación de criterios para la identificación de coberturas, la duplicidad de procesos que producen polígonos residuales al momento del procesamiento y la necesidad de aplicar procesos de reclasificación para hacer manejable la información generada. Se propone hacer la interpretación interactiva de los cambios sucedidos de la fecha 1 a la fecha 2, con lo cual se eliminaron posibles polígonos residuales que sobrestimarían la dinámica de cambio. Puede calificarse éste como un proceso equilibrado en términos de tiempos y precisión del producto, siendo que el producto final obtenido es mucho más detallado que cualquier otro reportado y el hecho de ser fácilmente replicable garantiza una constante y controlada evaluación del área estudiada.

Palabras clave: cambio de ocupación del suelo, método, parque nacional, sistemas de información geográfica.

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

## **EVALUATION OF THE TECHNIQUES FOR THE STUDY OF LAND COVER AND METHODOLOGICAL PROPOSAL TO SOLVE SOME OF THEIR INCONSISTENCIES: THE NEVADO DE TOLUCA NATIONAL PARK**

### **ABSTRACT**

The main methodological inconsistencies in the studies of change of land occupation are determined, primarily related to the differentiation of criteria for the identification of hedges, the duplicity of processes that produce waste polygons at the time of processing and the need to apply for reclassification processes in order to make manageable the generated information. It intends to make the interactive interpretation of the changes which have occurred from the date 1 to the date 2, thereby potential waste polygons were eliminated which overstate the dynamics of change. This can be termed as a balanced process in terms of time and accuracy of the product, being that the final product obtained is much more detailed than any other reported and the fact to be easily replicable ensures a constant and controlled evaluation of the studied area.

Key words: land cover, land cover change, method, national park, geographic information systems

### **1. Introducción**

Es sabido que uno de los estudios básicos para evaluar los impactos que los recursos naturales han recibido en un territorio es el de cambio de ocupación de suelo. En el ámbito mundial, una de las principales aplicaciones que han tenido los mapas de ocupación y uso del suelo ha sido la identificación de cambios en las masas forestales. Por lo general, estos cambios se han dado en el sentido de pérdida de bosques y selvas, lo cual, aunado a los procesos naturales y sociales que ello conlleva, representa uno de los mayores problemas a los que se enfrenta el planeta. Esta situación se ha visto agravada en los países tropicales y en vías de desarrollo (Myers, 1980; Grainger, 1984).

El evaluar de ésta manera el espacio ha permitido evaluar el estado de conservación y/o transición de los ecosistemas de manera tanto espacial como cuantitativa, con lo cual se ha avanzado hacia una mejor gestión en cuanto a las acciones de conservación o modificación de actividades que se deben llevar a cabo en un área determinada. Así, las técnicas utilizadas para éste fin han evolucionado a lo largo de las décadas, remontándose desde los levantamientos directos, hasta el procesamiento de imágenes de satélite con alta resolución espacial, espectral y temporal, gestionados por Sistemas de Información Geográfica.

A pesar de los avances a los que se han llegado en materia actualmente, es posible detectar aún inconsistencias tanto en los procedimientos como en los productos finales. Esta incertidumbre generada ha provocado que la cartografía generada y sus datos asociados sean utilizados con mesura. Así, la evaluación de las técnicas actuales para evaluar el cambio de ocupación de suelo es imprescindible para mejorar la calidad de la información generada, lo cual permitirá tener productos

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

de una calidad tal que permitan una mejor toma de decisiones que garanticen el uso y manejo óptimo de recursos naturales.

Este estudio pretende en un principio analizar las formas en las que actualmente se evalúan los cambios en la ocupación de suelo con el fin de encontrar las inconsistencias más importantes en cuanto a los productos cuantitativos y de representación cartográfica. En segundo término, se propone, por medio del estudio de caso del Parque Nacional Nevado de Toluca, solventar algunas de las fuentes de sesgo con el fin de mejorar la calidad de los resultados para que puedan extenderse sus alcances incluso a nivel de ser un insumo principal para la toma de decisiones en materia de manejo y conservación de recursos naturales.

## **2. Estado de la cuestión**

### 2.1. Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo

#### 2.1.1. El uso y la ocupación de suelo

Mucho se ha discutido sobre la diferencia entre uso de suelo y ocupación de suelo. Para tener una clara diferenciación, se puede decir que "ocupación del suelo" se refiere a la naturaleza física de la superficie del terreno que puede ser identificada visualmente en campo o a través de medios de percepción remota; mientras que, "uso del suelo" expresa el aprovechamiento o los fines económicos de esas cubiertas (Meyer y Turner, 1994). De manera más sencilla, Bocco (2001) define como cobertura a la descripción de los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado. El uso, por su parte, se refiere a la actividad socioeconómica que se desarrolla (o desarrolló) en una cobertura.

#### 2.1.2. Las técnicas de creación de cartografía de ocupación de suelo

A lo largo de los años han sido utilizadas para los estudios de ocupación de suelo, diversas técnicas cuyas características son diferentes según el contexto a laborar, desde los inventarios en campo, hasta llegar a las técnicas de percepción remota, que incluye la interpretación de fotografías aéreas analógicas por medio de estereoscopios, la interpretación de fotografías aéreas digitales por medio de software que permite una interpretación estereoscópica, y el procesamiento de imágenes satelitales con diferentes resoluciones; ha sido común la combinación entre éstas técnicas para obtener resultados más sólidos.

#### 2.1.3. Inventarios de ocupación de suelo

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

Durante décadas, y anterior a la incorporación de la digitalización cartográfica, los mapas de ocupación de suelo se realizaban por medio de levantamientos directos en campo, con una muy importante inversión de tiempo (de 5 a 10 años), tanto en trabajo de campo como en su publicación, siendo que, al momento de tenerlo disponible, la información plasmada resultaba ya desactualizada, además que los costos de generación eran muy elevados, sin embargo el grado de detalle otorgado por éstos materiales no ha sido posible ser igualado por procedimientos de percepción remota, lejos de esto, han sido realmente imprescindibles para una adecuada validación de la nueva cartografía realizada por métodos digitales.

Un ejemplo de ésta cartografía tan útil es el mapa de Uso de Suelo y Vegetación, escala 1:50 000, elaborado por el CETENAL (actualmente INEGI) entre 1970 y 1976, cuyos objetivos eran los siguientes (CETENAL, 1976):

- a) Conocer la localización de las áreas agrícolas, tanto de riego, de temporal y de humedad, como de agricultura nómada, así como los tipos de cultivos que se siembran en esas áreas.
- b) Saber cuál es la distribución de las áreas dedicadas a la ganadería.
- c) Conocer la localización de las áreas de interés forestal.
- d) Saber cuáles son los principales tipos de vegetación en su estado actual.
- e) Conocer el grado de afectación de los recursos vegetales y su dinámica de uso.
- f) Proporcionar información básica para la enseñanza e investigación sobre los recursos naturales.
- g) Servir de marco general para el señalamiento de políticas a nivel nacional, regional y local, que permitan el mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

Esta cartografía en particular se caracteriza por su complejidad en las categorías creadas, contando con 51 leyendas principales que podían ser combinadas según el contexto del área representada, siendo en la actualidad uno de los mapas más detallados que se ha elaborado en el país, el cual ha sido base para la generación y actualización en diferentes estudios como en los de Franco y colaboradores (2006a y 2006b).

#### 2.1.4. Fotointerpretación

La interpretación de fotografías aéreas tanto de manera analógica como digital, ha sido una técnica muy útil para determinar la ocupación del suelo, incluso para gestión y manejo catastral, dada su posibilidad de identificar de manera muy detallada los elementos en el espacio, dependiendo de las resoluciones adquiridas. Desde luego, una limitante es el hecho de que, para su generación, es necesario planificar y gestionar los permisos para un vuelo fotográfico, para lo cual el tiempo y la falta de agilidad de los trámites no permiten acelerar la realización de la toma de información.

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

A este respecto, existen instancias gubernamentales como el Instituto de Investigación e Información Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IIIGCEM), que tiene disponibles materiales tales como fotografías aéreas y ortofotos con una resolución espacial alta, sin embargo, uno de sus problemas es la limitada temporalidad de las tomas, dado el complejo procedimiento de generación. Esto imposibilita su uso para el seguimiento de la evolución del territorio en periodos menores a 10 años.

Es importante resaltar que las técnicas de fotointerpretación han aportado los principios básicos de identificación de elementos en el espacio, con los cuales el intérprete generará la cartografía de ocupación de suelo (Reuter, 2004):

- a) *Tamaño*: El tamaño del objeto observado, puede ser de gran ayuda para su plena identificación. Dos elementos diferentes pueden aparecer en la imagen fotográfica muy parecidos, sin embargo, la diferencia en tamaño puede ser el factor decisivo para su identificación.
- b) *Forma*: La forma contribuye a delimitar la clase a que pertenece un objeto y en muchos casos permite su clara e inequívoca identificación.
- c) *Tono y color*: El color y el tono contribuyen positivamente en fotografías aéreas a la identificación de objetos. Un mismo tipo de suelo puede aparecer bajo varias tonalidades en una misma foto dependiendo por ejemplo del grado de humedad. La experiencia del fotointérprete es de suma importancia para evitar errores debidos a factores secundarios.
- d) *Textura*: La textura puede ser definida como la distribución de tonos que presenta un conjunto de unidades que son demasiado pequeñas para ser identificados individualmente, en una fotografía. El tamaño de los objetos que determina la textura, varía con la escala de la fotografía y en algunos casos, puede ser elemento suficiente para la identificación de objetos.
- e) *Patrón*: El patrón se refiere a la agrupación ordenada de ciertos elementos con características especiales.

Independientemente de la técnica usada para la generación del mapa de cobertura, estos principios deben ser tomados en cuenta para una adecuada categorización de elementos en el espacio.

#### 2.1.5. Procesamiento de imágenes satelitales

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

El uso de imágenes satelitales para la creación de cartografía de uso y cobertura de suelo es la técnica más extendida en la actualidad dadas las bondades en reducción de tiempo que su procesamiento supone, lo cual ha agilizado la evaluación y toma de decisiones sobre el territorio.

Entre las ventajas ofrecidas por técnicas de teledetección, Chuvieco (2002) menciona, entre las más sobresalientes, a la visión global, la observación a distintas escalas, la cobertura frecuente, la homogeneidad en la adquisición y el acceso a regiones no visibles del espectro, sin embargo el costo de ésta agilización en procesos es visible en ciertas inconsistencias detectadas productos finales y su posterior análisis.

Entre los trabajos que han utilizado el procesamiento de imágenes satelitales para la creación de cartografía de ocupación de suelo, se encuentra el de Salvatierra y colaboradores (1997), quienes trabajaron con imágenes Landsat, iniciando con una clasificación no supervisada con 13 categorías. En éste trabajo se encontró que se generaron pequeños errores de asignación de píxeles a la cobertura adecuada atribuidos a confusiones espectrales. En éste caso, los polígonos mal asignados fueron eliminados, siendo que debieron ser redefinidos por fotointerpretación.

Por otra parte, Santana y Salas (2007) utilizaron para su investigación imágenes satelitales a las cuales se realizó una corrección geométrica, sin embargo no se realizó el proceso de corrección atmosférica, dado que las imágenes usadas excedían el 10% de nubosidad en la toma, lo cual deriva comúnmente en inconsistencias en la asignación de píxeles a la categoría adecuada en el momento del procesamiento.

#### 2.1.6. El cambio de ocupación de suelo

En la actualidad los estudios sobre los procesos dinámicos de los cambios en la ocupación del suelo y la deforestación son importantes y necesarios, porque proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada.

La naturaleza intrínseca de los ecosistemas encierra, como motor inherente, una serie de aspectos dinámicos. Durante las últimas décadas, no obstante, el hombre (originalmente considerado como una especie más y sujeta a la dinámica propia de cada ecosistema), se ha convertido en el principal desencadenador de la actividad transformadora de los ecosistemas. Su impacto global ha sido evaluado desde diversas perspectivas, entre las que destacan, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático; entre muchas otras consecuencias ambientales de mayor relevancia regional tales como la alteración de ciclo hidrológico, introducción de especies exóticas y pérdida de hábitat, entre otros (Vitousek *et al.*, 1997).

Una manera confiable para medir el grado de conversión ambiental antropogénica es a través del estudio de la dinámica espacio temporal de la cubierta vegetal. Se ha enfatizado en la necesidad de cuantificar dicho grado de conversión y expresarlo en términos de los factores

© Los autores

[www.geofocus.org](http://www.geofocus.org)

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

---

desencadenadores del cambio, dando principal énfasis a los resultados de la acción antrópica. La dinámica de la cubierta vegetal y su uso están íntimamente relacionados y es por eso que se requiere, para su abordaje, de disciplinas tanto sociales como naturales. A esta serie de términos se le denomina análisis del cambio de ocupación del suelo (Turner y Meyer, 1994).

Una alternativa para el análisis de cambio es la comparación de cartografía existente y elaborada en diferentes fechas. Este enfoque se basa en una operación de sobreposición que se facilita mediante la utilización de un sistema de información geográfica. El resultado de la sobreposición es un mapa de cambio que refleja la distribución espacial y los tipos de cambio.

Sin embargo, es muy importante asegurarse que las fuentes de información cartográfica tanto la de referencia como la actual sean compatibles en todos los sentidos (escala, número de clases, nomenclatura, sistema clasificatorio, entre otros), ya que los resultados pueden ser erróneos por la naturaleza inherente de las bases de datos (Palacio *et al.*, 2000).

Los enfoques dados en estudios de cambio de ocupación de suelo son diversos, por ejemplo, Chapa y colaboradores (2008), realizaron un estudio de fragmentación forestal por medio de técnicas fotointerpretación, con lo cual se evidenciaron los diferentes grados y patrones de deterioro forestal. Para éste caso, las técnicas usadas para éste estudio requirieron una importante inversión de tiempos en la generación de la cartografía, sin embargo con el cuidadoso control en los procesos se logró una alta precisión en los productos.

Bajo otro enfoque, Ureña (2004) trabajó el cambio de uso y cobertura de suelo derivado del aumento poblacional usando procesos de fotointerpretación y sobreposición para obtener cambios entre cubiertas. En éste caso, en los productos finales generados es evidente la aparición de áreas residuales que denotan heterogeneidad en los procesos previos de geoposicionamiento.

Por otra parte, Fernández y Prados (2010) utilizaron cartografía digital preexistente, la primera fecha, de un mapa de cultivos y aprovechamientos generalizados para el año 1975 y un mapa de cultivos a nivel regional para 1999. El estudio se llevó a cabo en una cuenca y las fuentes fueron procesadas de manera diferenciada para cada fecha por sobreposición y fusión, pasando por un proceso de reclasificación para homogeneizar leyendas. Se observan en el producto, polígonos residuales que a primera vista parecen producto de un previo mal agrupamiento de clases en los criterios de reclasificación, sin embargo, no es descartable el ser producto de un proceso diferenciado de generación de mapas para cada fecha.

En otro estudio, Aldana y Bosque (2008) detectaron en un Parque Nacional, los cambios sucedidos entre 1988 y 2003 por medio de un cruce tabular en formato raster, teniendo como producto alternativo al mapa, una matriz de transición. Los mapas de cobertura u ocupación fueron generados por la clasificación de imágenes Landsat. Como es posible deducir, el nivel de detalle no resultó muy alto dados los 30 metros de resolución de pixel y por la limitada capacidad del sistema utilizado para procesar categorías por mapa (20 máximo por fecha). El producto final evidenció

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

áreas residuales que, presumiblemente son debidas a una diferenciación espectral entre fechas en áreas en las que evidentemente no existió ninguna transición.

En materia de manejo y conservación de recursos naturales, los análisis de cambio de uso y cobertura de suelo son imprescindibles, ya que se evidencian diferentes procesos de manera espacial y temporal, ejemplo de ello es su uso como parte medular en la estimación de la captura de carbono en bosques y selvas y en programas de gestión y manejo de recursos naturales. A pesar de las múltiples variantes en las técnicas para la determinación del cambio de ocupación de suelo, es preciso detectar las fuentes de inconsistencias en los resultados para tener la certeza de obtener cada vez mejores productos en un futuro.

### 2.1.7. Inconsistencias en los análisis de cambio de ocupación del suelo

A pesar de la importancia que reviste el realizar estudios de cambio de ocupación del suelo, todas las técnicas que dan posibilidad de obtener productos cartográficos al respecto tienen inconvenientes que derivan en inconsistencias en sus resultados tanto cuantitativos como cualitativos. Las razones pueden tener muchas causales que van desde una mala elección de las técnicas para los fines específicos de una investigación, hasta el relajamiento en cuanto las medidas de control de procesos debido a que solo es requerido un dato general. Estas fuentes de error deben ser identificadas antes de la elección de insumos y procesos para evitar datos inconsistentes que promuevan tomar con mesura los resultados del estudio en etapas de toma de decisiones.

A continuación se presentan los errores comunes asociados a cada técnica de análisis de ocupación de suelo (tabla 1):

Tabla 1. Inconsistencias asociadas a las diferentes técnicas de análisis de ocupación de suelo

Técnica	Formato de salida	Errores inherentes a la técnica	Ventajas de la técnica
Inventario	Vectorial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aleatoriedad en la delimitación de los polígonos por categoría.</li> <li>• Sesgo en criterios de interpretación al necesitarse varios equipos de trabajo para cubrir las áreas.</li> <li>• Errores de posición y/o escala en la transferencia de datos a formatos digitales.</li> <li>• <i>Errores de borde derivados comúnmente de los diferenciados procesos de digitalización para las fechas trabajadas.</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La obtención de los datos de control 100% confiables.</li> <li>• Posibilidad de una categorización sumamente detallada.</li> <li>• Con una buena planificación, la periodicidad de generación o actualización puede reducirse sensiblemente.</li> </ul>



Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

Fotointerpretación analógica	Vectorial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de consistencia en posición de elementos y escala por las características de la toma fotográfica.</li> <li>• Incertidumbre en rodales en los cuales elementos como nubosidades o exceso de brillo en la toma impiden tener certidumbre de lo que se etiqueta para dichas áreas.</li> <li>• Incorrecta clasificación por un mal uso de la estereoscopia analógica.</li> <li>• Modificación de escala y posición ortogonal derivado del escaneo y compatibilización del software receptor hacia el producto analógico.</li> <li>• Producto final desactualizado, debido a que los procesos para obtener el producto toman un tiempo tal, que al momento de la publicación, el espacio interpretado puede haber ya cambiado.</li> <li>• <i>Errores de borde derivados comúnmente de los diferenciados procesos de digitalización para las fechas trabajadas.</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una alta calidad en la toma, que permite detallar sobre los elementos del territorio estudiado.</li> <li>• La visión estereoscópica permite identificar elementos que no es posible detectar en un análisis 2D (sombras, geoformas, efectos de nube, infraestructura).</li> <li>• Relativo bajo costo en la adquisición de fotografías aéreas.</li> </ul>
Fotointerpretación digital	Vectorial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibles problemas de posición y geometría atribuibles a la complejidad que supone la obtención de los puntos de control para la calibración de los pares estereoscópicos.</li> <li>• Incertidumbre en rodales en los cuales elementos como nubosidades o exceso de brillo en la toma impiden tener certidumbre de lo que se etiqueta para dichas áreas.</li> <li>• Deficiencias en la interpretación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agilización en los procesos de interpretación.</li> <li>• La visión estereoscópica permite identificar elementos que no es posible detectar en un análisis 2D (sombras, geoformas, efectos de nube, infraestructura).</li> <li>• Digitalización directa de los pares estereoscópicos en formato vectorial sin pasar por un nuevo proceso de ajuste.</li> </ul>

Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): “Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México”, *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

		<p>al no conseguir material con las características adecuadas para la investigación, dada la baja disponibilidad de fotografías aéreas o pares estereoscópicos de alta resolución.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Errores de borde derivados comúnmente de los diferenciados procesos de digitalización para las fechas trabajadas.</i></li> </ul>	
Procesamiento de imágenes satelitales	Raster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrestimación o subestimación de áreas dado el formato de celda que manejan las imágenes.</li> <li>• La capacidad de clasificación es relativamente limitada en comparación con las categorías que pueden crearse a partir de técnicas de fotointerpretación.</li> <li>• Errores de clasificación debido a diferencias espectrales en una misma área provocado por diferencias en las tomas en cuanto fecha, horario y condiciones ambientales de la toma o por una baja resolución espectral de las imágenes que son más accesibles para términos de investigación, lo cual produce áreas de transición en las cuales no existe ningún cambio de territorio entre dos o más fechas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodicidad de las tomas permite hacer un seguimiento muy práctico de los cambios más evidentes.</li> <li>• Evidente agilización de procesos para la generación de cartografía.</li> </ul>

Fuente: Elaboración personal.

Al observar los problemas que llevan de manera ineludible las técnicas actuales para la determinación del cambio de ocupación de suelo, se puede observar que uno de los principales problemas es la generación de áreas residuales en las cuales se reportan transiciones sin que en la realidad existan éstos cambios y es aún más preocupante la forma en que dichas áreas residuales son “corregidas” para evitar inconsistencias en los resultados tanto cuantitativos como en su representación cartográfica. Después de revisar la manera en que históricamente se han elaborado investigaciones sobre cambio de ocupación de suelo, es posible determinar que éste problema específico es atribuible a que los procesos de generación de la cartografía de una fecha con respecto

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

---

a otra se hacen de manera independiente, siendo ésta duplicidad de procesos el causal de éstos defectos en la cartografía generada, que, dicho sea de paso, a ésta altura del análisis, ya se habrá invertido una cantidad considerable en capital y en horas-hombre.

A continuación se presenta una propuesta para reducir éste sesgo que debilita la confiabilidad de la cartografía generada y al mismo tiempo tener la posibilidad de elaborar análisis muy detallados en materia, con el objetivo de extender los alcances de éste tipo de estudios hacia etapas de toma de decisiones.

## 2.2. El cambio de ocupación de suelo en el Parque Nacional Nevado de Toluca 2000-2009

La principal Área Natural Protegida (ANP) del Estado de México, por su extensión, es el Parque Nacional Nevado de Toluca (PNNT), el cual representa el 52% del área total de los 10 parques nacionales ubicados en el Estado de México (Vargas, 1989).

El PNNT constituye una de las principales zonas de reserva de recursos naturales del Estado de México, sin embargo, el crecimiento de la población del Valle de Toluca y la proliferación de asentamientos humanos y de actividades productivas dentro del parque, han venido afectando seriamente la zona forestal, poniendo en peligro la supervivencia de un importante patrimonio ecológico.

Dentro de los principales factores que han venido afectando al PNNT destaca la tendencia al cambio de ocupación del suelo y la presión antrópica sobre los recursos forestales, lo que repercute en la disminución de la densidad del arbolado, la pérdida de la biodiversidad genética y ecosistémica, la proliferación de plagas y enfermedades y la afectación de los suelos, por lo cual resulta imprescindible tener un seguimiento constante y detallado de los cambios sufridos por ésta ANP.

Pocos son los trabajos realizados a éste respecto dentro de la zona de estudio, sin embargo, el elaborado por Franco y colaboradores (2006a) sentó las bases para una correcta y meticulosa evaluación del espacio mediante la combinación de técnicas para lograr un producto muy detallado. Ésta investigación consistió en la identificación de transiciones sucedidas entre dos fechas: 1972 y 2000.

Para la generación de la cartografía para la primera fecha, se creó el mapa de cobertura de suelo a partir de la carta analógica de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:50000 Claves E14A37, E14 A47 y E14A48 de CETENAL, por procesos de digitalización interactiva. La selección de este producto fue debido a que, después de un cuidadoso análisis de diversos mapas de cobertura de suelo existentes, el de CETENAL era el más detallado en su categorización, siendo que, para el área de estudio, era constituido por 84 clases que evidenciaban tanto categorías absolutas como diferentes asociaciones con combinaciones de coberturas forestales, de vegetación secundaria, de

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

agricultura y de otros rasgos no naturales, lo cual permitía obtener un nivel de análisis muy detallado.

Para la segunda fecha se utilizaron ortofotos digitales escala 1:10000, haciendo un proceso de fotoidentificación apoyado por la clasificación 1972 y por medio de fotointerpretación analógica para áreas de difícil interpretación, logrando para ésta actualización, una leyenda de 125 categorías debido a la incorporación de nuevas coberturas no existentes para el mapa 1972.

Posteriormente se rasterizaron las imágenes para realizar una sobreposición que permitiera evidenciar los cambios de ocupación sucedidos en ése periodo de 28 años, sin embargo, las 125 categorías que pretendían ingresarse por fecha, excedieron la capacidad de procesamiento del software, por lo que hubo que reclasificar los mapas a solo 14 categorías haciendo énfasis en las densidades forestales.

Se observó entonces que, a pesar de haberse obtenido productos cuidadosamente elaborados, éstos solo pudieron ser usados para un análisis detallado de ocupación de suelo para dos fechas, pero no para analizar el cambio de ocupación al mismo nivel. De la misma manera, derivado del proceso individual de creación de los mapas, se observó la presencia en mapa de áreas residuales, que, después de ser analizadas, eran producto de la no coincidencia de nodos entre dos fechas por la duplicidad del trabajo de digitalización y no consecuencia de una transición real.

Esto dejó una sensación de un evidente desperdicio de inversión en tiempos motivado por la posibilidad del mejoramiento de la cartografía anteriormente creada. El presente trabajo pretende retomar tan valiosa información para llevar su nivel de detalle hasta el análisis de cambio de ocupación evitando al mismo tiempo los problemas de áreas residuales que parece ser un mal común entre todos los estudios de éste tipo.

Habiendo discriminado los vicios comunes entre los estudios de cambio de ocupación del suelo y los problemas presentados por el estudio precedente, se decidió realizar el análisis 2000-2009 tomando en cuenta algunas consideraciones:

- a) Para que un estudio de cambio de ocupación de suelo sea realmente funcional en Áreas Naturales Protegidas, el grado de detalle debe ser alto dada la importancia ecológica que esto reviste, para lo cual el sistema de clasificación CETENAL resulta el más adecuado para la presente investigación.
- b) Habiendo entendido que la duplicidad en procesos de generación cartográfica usualmente provoca áreas residuales que suponen transiciones donde no las hay, resulta necesario tener un mapa base sobre el cual se interpretarán los procesos de cambio de ocupación, para lo cual se tomó como primera fecha (2000) el mapa del suelo 2000, creado por Franco y colaboradores (2006a).
- c) Habiendo obtenido el mapa base, es necesario determinar el material cartográfico con el cual se interpretaría la ocupación 2009, dado que aún no se ha publicado el material

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

usado para el mapa 2000 (Ortofotos digitales 1:10000) para fechas más actuales, por lo que la búsqueda de materiales compatibles con la cartografía a utilizar y con alta resolución espacial, resulta imprescindible.

d) Es evidente que el tipo tan detallado de análisis buscado requiere un procesamiento ajeno a la clasificación de imágenes satelitales bajo un ambiente raster, por lo que se debe trabajar bajo un ambiente vectorial, dado que la interacción entre polígonos y tablas asociadas darán la posibilidad de controlar los procesos, dando como resultado un producto más confiable. Pese a ello, el insumo más adecuado para éste proceso resultó ser una imagen SPOT para el año 2009, con la misma resolución espacial que las ortofotos que dieron origen al mapa 2000.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Selección del material de trabajo

Como se comentó, el material base para la realización del mapa de cambio de ocupación de suelo fue el mapa de cobertura de suelo para el año 2000 elaborado por Franco y colaboradores (2006a), el cual cuenta con 125 categorías, con proyección en sistema NAD27, en formato vectorial, con un área mínima cartografiable de 800 metros cuadrados.

Por otra parte, se necesitaron los insumos utilizados para la creación de éste producto, es decir, Ortofotos digitales 1:10000 del IIIGCEM, las cuales representan la referencia de donde se evidenciarán los cambios de coberturas de suelo.

Finalmente había que seleccionar el material que sería utilizado para analizar la fecha más reciente que, además fuera compatible con las características del material con el cual se creara el mapa de cobertura 2000. Al no contar con éste mismo material actualizado, se optó por utilizar imágenes SPOT 5, cuyas características de resolución espacial y limpieza de la toma eran compatibles con las ortofotos para el año 2000 y que, se usarían para un proceso de fotoidentificación, no para uno de procesamiento digital de imágenes, dados los objetivos definidos.

#### 3.2. Tratamiento de insumos

Al obtener las imágenes SPOT sin el proceso de georreferenciación y correregistro, se procedió a realizar el cambio de posición de los píxeles sin modificar los niveles digitales (ND) para que no solo fueran modificados su posición y coordenadas, todo esto con la finalidad de que la información generada a partir de éste producto fuera lo más exacta posible. Para el caso de este trabajo de investigación se optó por utilizar el software Erdas bajo el siguiente procedimiento:

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

- a) Selección de la imagen a corregir y una imagen de referencia seleccionada desde el menú de corrección geométrica de imagen.
- b) Selección del MDE (Modelo Digital de Elevación) con la finalidad de que la imagen a georreferenciar considerara la altitud de la zona de estudio.
- c) Reasignación de la proyección con base en la imagen georreferenciada, es decir, una imagen que servirá de base para la corrección geométrica. Esta imagen puede ser multiespectral o pancromática, aunque para el caso de estudio se refiere a una imagen multiespectral.
- d) Seleccionado el MDE, se colocan las unidades en metros, así como el número de puntos de control que se tomarán en cuenta para la georreferenciación.
- e) Ingresar el ángulo de incidencia. Este dato, viene adjunto a la imagen que se desea georreferenciar en su archivo de Metadatos. Este ángulo de incidencia es de 23.71467.
- f) Reasignación de la proyección de la imagen, tomando en cuenta que las dos imágenes que se estarán comparando deberán tener los mismos parámetros de referencia, es decir; las unidades deben estar en metros, con el tipo de proyección UTM, con el Esferoide correspondiente a WGS84, Datum WGS84, Zona 14 Norte.
- g) Ubicación de los rasgos similares entre la imagen que se desea georreferenciar y la imagen georreferenciada, colocando un mínimo de 12 puntos de control, los cuales deben estar distribuidos de manera homogénea en las imágenes, con la finalidad de cubrir la mayor parte de éstas. El RMS (error medio cuadrático), debe ser menor a .5 para disminuir el margen de error entre las dos imágenes.
- h) Renombrada la imagen de salida de la imagen ya georreferenciada indicando el método de procesamiento de la imagen, en este caso se utilizó el método de "Cubic Convolution", que es el método más exacto.

Teniendo listo el insumo para el análisis 2009, resta homogeneizar las características de posición de los otros 2 productos (Ortofotos y mapa de ocupación 2000), dado que éstos están en Datum, NAD 27, cuando era necesario trabajar en Datum WGS84, dado su uso más extendido. Para ello, se realizó un sencillo proceso de reproyección en el Software ArcGIS en el menú de proyecciones y transformaciones, tanto para el producto raster como para el vectorial, teniendo como resultado la compatibilidad de los tres productos a fotoidentificar.

### 3.3. Interpretación de cambios de ocupación

Teniendo en cuenta de que los insumos a utilizar son ahora compatibles y adecuados para ser procesados para determinar espacialmente el cambio de ocupación de suelo, cabe precisar algunos puntos:

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

- A pesar de que se usará una imagen Spot modificada, ésta no pasará por un procesamiento digital de imágenes, sino por el de un proceso de fotoidentificación interactiva.
- Las bandas de la imagen Spot solo servirán como apoyo en la identificación de zonas con alta dificultad en discriminación de categorías. Su uso más extenso estará limitada a una escala de grises para no viciar el proceso de interpretación con una interpretación diferente al insumo de origen (Ortofotos 2000).
- Tradicionalmente en estudios de cambio de ocupación de suelo, la secuencia consiste en crear la cartografía de ocupación de la fecha 1, después crear por otro proceso independiente la cartografía de ocupación de la fecha 2, para por último procesar ambos mapas para crear el de cambio de ocupación, sin embargo, para el presente estudio se creará el mapa de cambio de ocupación a partir de las transiciones detectadas al superponerse las ortofotos digitales y la imagen Spot, siendo que, la edición se realizará sobre el mapa vectorial de ocupación de suelo 2000.
- Tradicionalmente, los análisis de cambio de ocupación de suelo son elaborados bajo un ambiente raster, sin embargo para términos de los objetivos planteados, se realizará en su totalidad en ambiente vector.
- El mapa de ocupación de suelo 2009 se creará a partir de la reclasificación del mapa de cambio de ocupación 2000-2009 para su análisis individual.

Así, el procedimiento será el que se describe seguidamente.

### 3.3.1. Sobreposición de materiales

Inicialmente, se superponen los materiales para corroborar su compatibilidad. Para el procedimiento se eligió el software ArcGIS 9.3, dada su versatilidad de edición de polígonos y manejo interactivo de tablas asociadas.

Después de cargar los insumos en el software, se procedió a definir los parámetros de identificación, en primer lugar definiendo el área mínima cartografiable que, para términos prácticos, se definió en 100 metros cuadrados. Teniendo esto en cuenta, se colocó en la capa inferior las ortofotos para el año 2000, en la segunda intermedia, la imagen Spot a escala de grises en transparencia para identificar los cambios entre ambas tomas, y, finalmente, se colocó el mapa vectorial de ocupación 2000 sobre el cual se haría la edición sin restricción de reducción de categorías.

### 3.3.2. Identificación interactiva de transiciones

Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): “Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México”, *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

Al necesitar un alto nivel de detalle, fue indispensable dividir la zona de estudio en 17 sectores, dado que el análisis habría de hacerse para cada polígono preexistente correspondiente al mapa 2000 (3986 en total). Determinada la delimitación del área de trabajo, se procedió a generar en la tabla asociada al mapa 2000, 2 columnas de interpretación, una para reportar las transiciones y otra para reportar las nuevas ocupaciones ; ésta última tenía la función más adelante de convertirse, después de un procesamiento de integración, en el mapa de ocupación de suelo 2009 (figura 1)

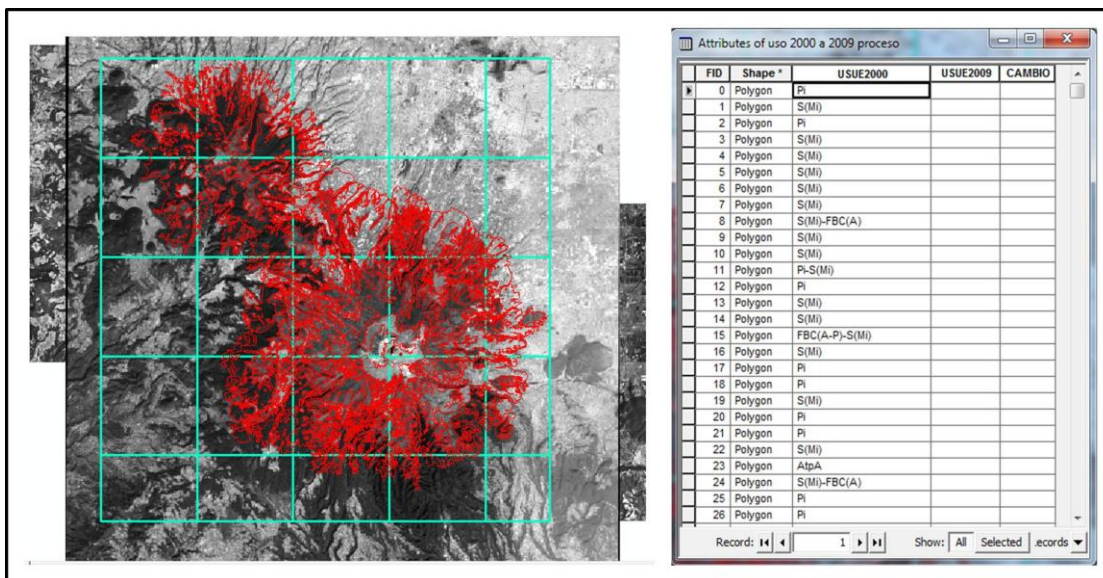


Figura 1. Sobreposición, delimitación de área de trabajo y creación de columnas de edición.  
Fuente: Elaboración personal.

Creada la tabla, se procedió a la identificación de transiciones derivadas de la detección de diferencias encontradas entre las ortofotos digitales y la imagen Spot. Al identificarse una transición, ésta era marcada mediante la edición del mapa vectorial de uso de suelo 2000 para posteriormente reportar en las columnas creadas la nueva transición. A continuación se presenta la secuencia de identificación interactiva (figura 2)



Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

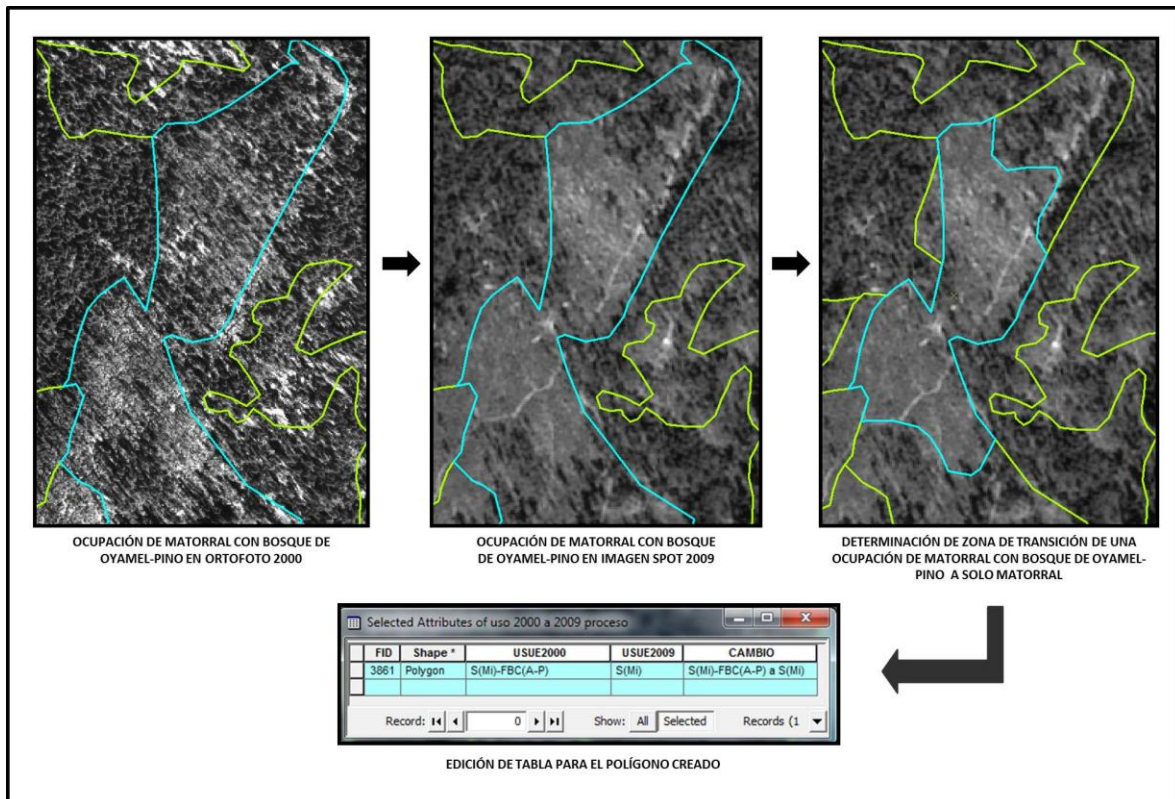


Figura 2. Secuencia de identificación de transiciones.  
Fuente: Elaboración personal.

Como es posible observar en la figura 2, se parte de analizar polígono a polígono la coincidencia de los elementos de la ortofoto con el mapa vectorial de ocupación 2000, en éste caso se seleccionó un área con ocupación de matorral con bosque de oyamel-pino. Posteriormente, se habilita la imagen Spot con el mismo mapa vectorial 2000 sobrepuesto para identificar las áreas en las cuales se reporta una ocupación en 2000 pero en 2009 ha existido una transición, en éste caso se observa que gran parte del polígono original tiene una ocupación de matorrales exclusivamente. Después de ello, se editó sobre el mapa vectorial el área que ha sufrido la modificación seccionando el polígono original. Finalmente, se edita la tabla para cada polígono de transición generado, reportando así en la primera columna creada la nueva ocupación de ésta área para 2009, y en la segunda columna, se reporta el cambio de ocupación surgido entre 2000 y 2009.

La secuencia de interpretación es realizada en cada uno de los 17 sectores de trabajo, siendo que, el mapa final de cambio de ocupación del suelo para el periodo 2000-2009 del Parque Nacional

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

Nevado de Toluca será obtenido por medio de la habilitación de la columna de cambio en la tabla asociada.

### 3.3.3. Validación del mapa de cambio de ocupación de suelo

Usualmente, para los trabajos de cambio de ocupación de suelo es necesario realizar dos validaciones, una por cada fecha de estudio, para después pasar a un proceso de sobreposición para obtener finalmente el mapa de cambio, sin embargo, para éste estudio el mapa creado fue el de transiciones entre dos fechas, y, en el entendido de que el mapa vectorial para el año 2000 había sido validado en el estudio de Franco y colaboradores (2006a), la validación ahora correspondía exclusivamente a lo detectado para cambios.

Para ello, como en el mapa 2000, el tamaño de muestra fue determinado según lo que señala Chuvieco (2002):

$$n = (z^2 s^2) / ((L^2 + (s^2 z^2 / N)))$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra,  $L$  es el intervalo de error tolerable,  $z$  la abscisa de la curva normal para un valor determinado de probabilidad,  $s^2$  la varianza muestral y  $N$  el tamaño de la población. Para muestras grandes ( $n > 30$ ) puede prescindirse del último término  $((N - n) / N)$  que se conoce como corrección para poblaciones finitas.

Para calcular el tamaño de la muestra es necesario fijar un margen de error permitido ( $L$ ), un rango de probabilidad (que fija el valor  $z$ ) y estimar, de alguna manera, la varianza muestral ( $s^2$ ). Así, considerando que se quiere estimar, con el 95% de probabilidad, el error del mapa, suponiendo que los aciertos son del 85%, y el máximo de error permitido es de  $\pm 5\%$ , el número mínimo de muestras debía ser de 196.

Determinado el tamaño de muestra, había que precisar que lo que se estaría muestreando en campo no serían ocupaciones, como tradicionalmente se hace para validar mapas de ocupación, sino que se buscarían las evidencias de transición que validaran la interpretación interactiva entre las dos fechas trabajadas. Así, se muestrearon 198 polígonos de transición, de los cuales 189 fueron coincidentes y 9 no correspondieron a la transición reportada por percepción remota, para obtener una confiabilidad del 95.4%, lo cual excede el nivel mínimo de validación cartográfica que es del 80%. Cabe mencionar que no fue posible tener una concentración mayor de sitios de muestreo en la parte sur del área de estudio dada la difícil accesibilidad. La distribución del muestreo entonces fue la siguiente (figura 3):

Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

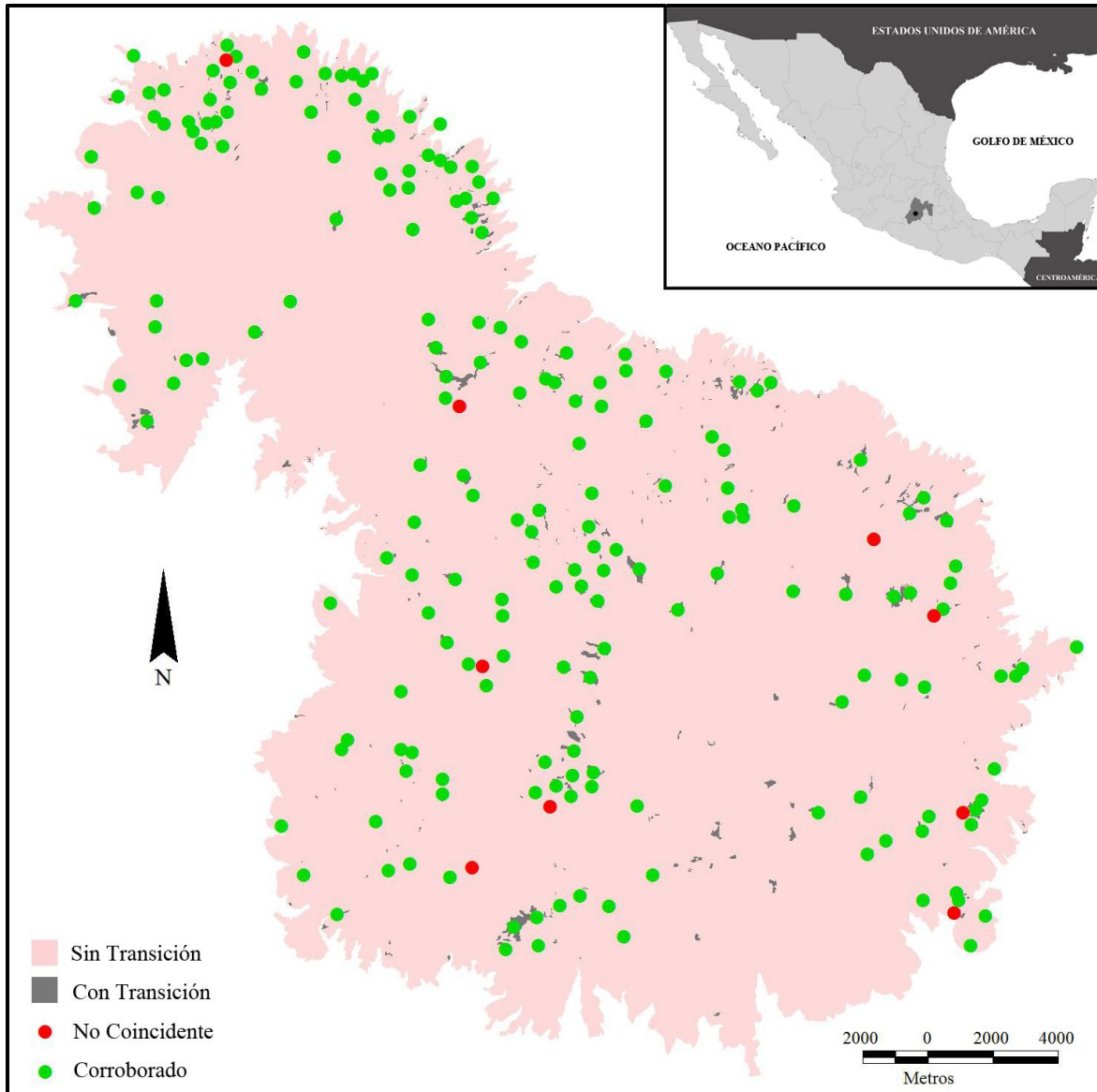


Figura 3. Distribución del muestreo para el mapa de cambio de ocupación de suelo 2000-2009.

Fuente: Elaboración personal.

#### 4. Descripción y análisis de resultados

Después de un cuidadoso análisis de los procesos utilizados para determinar el cambio de ocupación del suelo, y habiendo adecuado la metodología de acuerdo con los materiales disponibles, se obtuvieron los siguientes resultados:

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

#### 4.1. El mapa de cambio de ocupación de suelo 2000-2009

El producto obtenido tuvo un muy alto grado de detalle y complejidad, y tuvo las siguientes características:

- Un área mínima cartografiable de 800 metros
- Un 95,4% de confiabilidad.
- Un total de 553 polígonos generados reportando alguna transición.
- 174 categorías de transición.
- Generación manual de una matriz de transición con 130 categorías cruzadas para la sistematización de los cambios encontrados.

Para fines prácticos, se presentan las áreas en las que existió algún cambio de ocupación en el periodo 2000-2009.

#### 4.2. Cambio de ocupación del suelo 2000-2009

Un primer análisis a partir de los resultados de éste detallado producto arroja que 884,6 hectáreas del Parque Nacional Nevado de Toluca han tenido algún proceso de transición, lo cual representa el 1,64% del total del área de estudio.

De esa superficie, 698,32 hectáreas representan procesos de deterioro forestal (es decir, de pérdida total o de densidad del arbolado), 28,9 hectáreas representan procesos de recuperación forestal (es decir, reforestación o regeneración natural del arbolado) y 136,97 hectáreas representan cambios en los cuales no está involucrada una cobertura forestal (agrícolas, matorrales, suelo desnudo, manifestaciones antrópicas) (figura 4).

Así, derivado del análisis tanto del mapa como de la matriz de transición, es posible determinar la tasa de deforestación para el periodo estudiado es de 35,3 ha/año, contrastado con la tasa de reforestación que asciende apenas a 3,01 ha/año. Al margen de la tasa de deforestación, es posible identificar la tasa de disminución de la densidad del arbolado que, para el periodo estudiado asciende a las 43,38 ha/año.

Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", *GeoFocus (Artículos)*, n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157

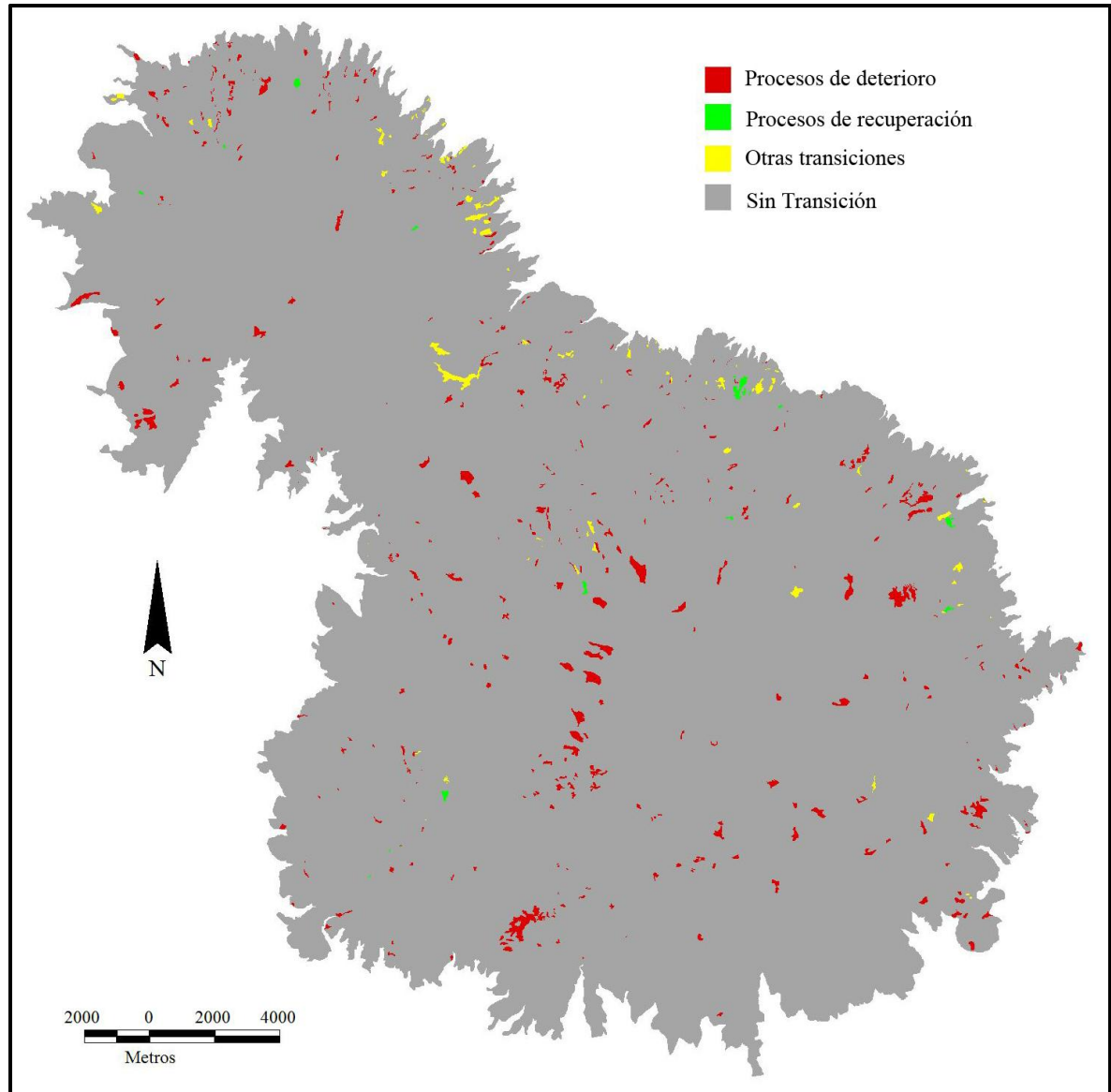


Figura 4. Procesos de cambio de ocupación de suelo 2000-2009.  
Fuente: Elaboración personal.

Cabe mencionar que con un análisis a fondo de los productos resultantes, es posible identificar, tanto la dinámica interna para los bosques, como los procesos propiamente antrópicos, dadas las especificidad de las categorías trabajadas a lo largo de éste estudio.

#### 4. Discusión y conclusiones

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

El presente trabajo pretendía realizar un análisis cuidadoso de los procedimientos por los cuales se ha logrado hacer un análisis del cambio de ocupación del suelo identificando las fuentes por las cuales se han generado inconsistencias en los productos con el fin de proponer un procedimiento que mitigara los problemas más representativos en ésta materia. Adicionalmente, se obtuvieron los primeros resultados derivados de los productos generados, siendo estos datos solo una pequeña parte de los alcances potenciales de análisis para la cartografía generada. Así, las conclusiones a las que llega éste trabajo de investigación son las siguientes:

Actualmente todos los estudios de cambio de ocupación del suelo presentan inconsistencias inherentes a la naturaleza de los procedimientos utilizados, por lo que es indispensable identificar de manera precisa las fuentes de error. Identificadas estas fuentes, se observa que es totalmente inadecuado definir solo una técnica para la obtención de los productos deseados, dado que una combinación de lo mejor de las metodologías solventará de una manera más equilibrada los vicios en los estudios por venir. Así, es ineludible aceptar que los procedimientos utilizados serán delimitados por la accesibilidad de los productos que servirán como insumos para la elaboración de éste tipo de análisis.

En cuanto al procedimiento propuesto, se observa que, a pesar de que el seleccionar trabajar bajo un ambiente vectorial pareciera inadecuado y que implicaría una muy grande inversión de tiempo frente a las ventajas relativas de los procesos automatizados en formato raster (incluyendo procesos de clasificación de imágenes satelitales), la interpretación del cambio de ocupación del suelo trabajada, solo implicó una inversión total de tiempo de 3 meses, teniendo sensibles ventajas contra otros procesos alternativos:

- a) El control en procesos supone un alto nivel de certidumbre hacia los productos obtenidos, en específico un mapa de cambio de uso de suelo y otro de uso de suelo actualizado.
- b) Los errores que habitualmente son atribuidos a diferencias por proyección y escala son identificados y corregidos antes del proceso de interpretación, por lo que al final del proceso se tiene certidumbre en la interpretación.
- c) Los errores de borde que aparecen en la generalidad de los trabajos para cambio de ocupación de suelo debido a una duplicidad de procesos de digitalización y a la generalización creada por procesos raster son eliminados al tener un proceso interactivo de interpretación con base a cartografía preexistente.
- d) Puede calificarse éste como un proceso equilibrado en términos de tiempos y precisión del producto, dado que, si bien no es un proceso automático de creación y sobreposición veloz como lo es el tratamiento digital de imágenes, tampoco implica una inversión considerable de tiempo como con las técnicas analógicas o automatizadas de fotointerpretación.
- e) El producto final obtenido es mucho más detallado que cualquier otro reportado, dado que, al ser procesos en los que habitualmente hay que hacer un procesamiento en

© Los autores

[www.geofocus.org](http://www.geofocus.org)

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

formato raster, los productos se ven limitados en el número de categorías para cruzar las fechas para obtener las transiciones, siendo que solo son 20 por fecha, contra las 130 categorías por fecha que se reportan para éste estudio. Cabe mencionar que es posible procesar ese mismo número de categorías por sobreposición vectorial, sin embargo las tablas de atributos generadas son de una interpretación sumamente compleja y es imposible identificar errores en los procesos.

f) El producto obtenido es pensado para ser repetido periódicamente para el área de estudio con fines de una constante y controlada evaluación sin un ajuste importante en la metodología, dado que se garantiza la existencia en los insumos (Imágenes Spot) que dictarán el comportamiento futuro del área de estudio estarán disponibles y que serán totalmente compatibles con los usados para éste estudio.

g) Como se habrá detectado en el proceso, para la correcta replicación de la metodología propuesta, es básico contar con un mapa vectorial con un muy alto nivel de detalle, elegido según las finalidades del estudio. En éste caso, el detalle ofrecido por la carta analógica de Uso de Suelo y Vegetación de CETENAL para 1972, era el adecuado para hacer una evaluación integral del estado de conservación de los recursos naturales del Área Natural Protegida, por lo que fue creada su versión digital, lo cual dio origen a su actualización para el año 2000 en el estudio precedente. Sin embargo, existen productos muy detallados como el Inventario Forestal Nacional y otros derivados de estudios específicos que sin ningún problema pueden ser actualizados bajo lo propuesto.

En cuanto a los primeros resultados encontrados para éste estudio, es posible detectar que los procesos de deterioro forestal superan con mucho a los de recuperación (35 ha/año contra 3 ha/año). Así, aunque la tasa de deforestación es menor a la esperada, los procesos de pérdida de densidad forestal son considerables (43 ha/año), lo cual evidencia la existencia de procesos de tala selectiva que han ido incentivando el deterioro gradual y constante del Parque Nacional.

El producto creado en éste estudio debe ser analizado de manera consciente, ya que la potencialidad que tiene para detectar dinámicas específicas tanto de recursos naturales como de procesos económicos puede poner la pauta para un inicio racional de toma de decisiones en ésta Área Natural Protegida que mejore sustancialmente sus condiciones tanto de manera ecológica como de manera social y económica.

### Referencias bibliográficas

- Aldana, A. y Bosque, J. (2008): "Cambios ocurridos en la cobertura/uso de la tierra del Parque Nacional Sierra de la Culata. Mérida-Venezuela. Período 1988-2003", *GeoFocus*, 8, 139-168.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001): "La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación", *Investigaciones Geográficas*, 44, 18-38.

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

---

CETENAL (1976): *Instructivo para la elaboración de la carta de uso de suelo*. México, D.F., Comisión de Estudios del Territorio Nacional.

Chapa, D., Sosa, J. y De Alba, A. (2008): "Estudio Multitemporal de fragmentación de los bosques en la Sierra Fría, Aguascalientes, México", *Madera y Bosques*, 14, 001, 37-51.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Madrid, España, Ariel.

Fernández, M. y Prados, M. (2010): "Cambios en las coberturas y usos del suelo en la cuenca del río Guadalfeo (1975-1999)", *GeoFocus*, 10, 158-184.

Franco, S., Regil, H.H., González, C. y Nava, G. (2006a): "Cambio de uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Nevado de Toluca, México, en el periodo 1972-2000", *Investigaciones Geográficas*, 61, 38-57.

Franco, S., Regil, H.H. y Ordóñez, J.A.B. (2006b): "Dinámica de perturbación-recuperación de las zonas forestales en el Parque Nacional Nevado de Toluca", *Madera y Bosques*, 12, 1, 17-28.

Grainger, A (1984): "Quantifying changes in forest cover in the humid tropics: overcoming current limitations", *Journal of World Forest Resource Management*, 1, 3-63.

Meyer, W. B. y Turner, B.L. (1994): *Changes in land use and land cover: a global perspective*. New York, U.S.A., Cambridge University Press.

Myers, N. (1980): *Conversion of tropical moist forest*. Washington, D.C, USA, National Research Council.

Palacio, J.L., Mas, J.F., Velásquez, A., Mas, J.F., Takaki, F., Victoria, A., Luna, L., Gómez, G., López, J., Palma, M., Trejo, I., Peralta, A., Prado, J., Rodríguez, A., Mayorga, R. y González, F. (2000): "La condición actual de los recursos forestales en México: Resultados del Inventario Forestal Nacional 2000", *Investigaciones Geográficas*, 43, 183-202.

Reuter, F. (2004): *Serie didáctica 24: Teledetección forestal: principios de fotointerpretación*. Santiago del Estero, Argentina, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Salvatierra, H., Roveda, G. y Aguilera, E. (1997): *Análisis multitemporal de la biosfera con apoyo de sensores remotos y SIG. (Módulo de cobertura/uso de la tierra)*. Santa Fe de Bogotá, Colombia, CORPOICA IGAC.

Santana, L. M. y Salas, J. (2007): "Análisis de cambios en la ocupación del suelo ocurridos en sabanas de Colombia entre 1987 y 2001, usando imágenes Landsat", *GeoFocus*, 7, 281-313.

Turner, B. L. y Meyer, W.B. (1994): "Global land use and land cover change: an overview" en Meyer, W. B. y Turner, B.L. (Coord.): *Changes in land use and land cover: a global perspective*. Cambridge University Press, 3-10.



*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

---

Ureña, N. (2004): *Efectos del aumento poblacional y del cambio del uso del suelo sobre los recursos hídricos en la microcuenca del río Ciruelas, Costa Rica*. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, CATIE.

Vargas, F. (1984): *Parques Nacionales de México y reservas equivalentes*. México, D.F., Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM.

Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J. y Melillo, J. M. (1997): "Human domination of Earths ecosystems", *Science*, 277, 494-499.

*Regil García, H.H., Franco Maass, S., Nava Bernal, G.E. y Ordóñez Díaz, J.A.B. (2015): "Evaluación de las técnicas para el estudio del cambio de ocupación de suelo y propuesta metodológica para solventar algunas de sus inconsistencias: el Parque Nacional Nevado de Toluca, México", GeoFocus (Artículos), n°16, p. 61-86. ISSN: 1578-5157*

---