

Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla

Recibido: 8 de enero de 2009. Aceptado en versión final: 8 de mayo de 2009.

Virginia Evangelista Oliva*

Jorge López Blanco*

Javier Caballero Nieto**

Miguel Ángel Martínez Alfaro**

Resumen. La Sierra Norte de Puebla (SNP) es una región con gran diversidad biológica y cultural en donde la cafeticultura ha tenido un papel relevante en el uso del suelo. El objetivo de esta investigación es conocer los patrones espaciales de la dinámica de cambio de la cobertura vegetal y el uso del suelo entre 1988-2003, y relacionarlos con las actividades de cafeticultura en la SNP. El análisis de cambio se realizó mediante una clasificación supervisada de dos imágenes de satélite Landsat, y se evaluó el cambio espacial entre las dos fechas mediante una matriz de detección de cambios. En ella se encontró que en el 58.4% del área no hubo cambios

y en el 41.6% sí los hubo. Los principales tipos de cambio fueron de pastizal (cultivado e inducido) o agricultura anual a cafetales con sombra/vegetación secundaria intermedia de bosque tropical o bosque mesófilo de montaña/cultivo permanente de cítricos; asimismo, el proceso de cambio de cobertura y uso del suelo está relacionado con la problemática actual del café.

Palabras clave: Cambio de cobertura y uso del suelo, clasificación supervisada, Landsat, café, Sierra Norte de Puebla.

Spatial patterns of land use/cover change in the coffee crop area of the Sierra Norte de Puebla

Abstract. The Sierra Norte de Puebla (SNP) is a region with a high biological and cultural diversity where the coffee plantations have had a relevant role in the land use cover characteristics. The objective of this study is to know the spatial patterns of the dynamics of the land use/cover change in the period 1988-2003, relating these patterns with activities of the coffee economic sector in the SNP. The change analysis was realized by means a supervised classification of two Landsat satellite images. The geographic or spatial change was evaluated overlaying the two land use/cover maps (1988-2003) obtaining a change matrix. Over the

15-year period considered, 58.4% of the study area remained unchanged and 41.6% had some class of change. The main changes were from induced grassland/agriculture to shade coffee plantations/intermediate secondary vegetation of tropical montane cloud forest or to tropical rain forest/permanent citrus crops. The change-patterns of the land use/cover dynamics are related to the current process of the coffee-sector problematic in the region.

Key words: Land Use Cover Change, Supervised Classification, Landsat, Coffee, Sierra Norte de Puebla.

* Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: voliva@ibiologia.unam.mx; jcaballero@ibiologia.unam.mx.

** Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, México, D. F., 04510, Coyoacán, México D.F. E-mail: jlopezblanco@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN

La actividad humana ha cambiado sustancialmente el paisaje biofísico terrestre, especialmente en el último siglo, en una forma que no tiene precedente (Ramankutty *et al.*, 2006). Diferentes autores consideran que la población humana se apropia de entre el 20 y el 40% de la productividad primaria neta terrestre del planeta, asimismo que el tamaño de la población y sus patrones de consumo tienen una influencia directa en la transformación de los ecosistemas (Vitouseck *et al.*, 1986).

Los cambios de la cobertura de la tierra y el uso del suelo han tenido un papel importante en el ciclo del CO₂, del agua, en el aumento de los contaminantes, en la degradación del suelo y en la disminución de la biodiversidad (Foley *et al.*, 2005). De esta forma, el uso del suelo presenta un dilema, es esencial para la humanidad pero deteriora los ecosistemas de los cuales depende para su supervivencia, asimismo, presenta un reto, desarrollar esquemas de manejo sustentable (*Ibid.*).

En este trabajo el objetivo principal es conocer los patrones espaciales de la dinámica de cambio de la cobertura vegetal y el uso del suelo (CCUS), entre 1988-2003, en el área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla.

Las poblaciones de las áreas cafetaleras viven desde hace varios años en crisis económica por el bajo precio del café (Rappo, 2006), esta crisis ha llevado a los productores a buscar alternativas de producción y de subsistencia, algunas de las cuales se han integrado al sistema de producción de café; otras han dejado los cafetales abandonados con un mínimo de manejo, dando como resultado aparente, una mayor heterogeneidad en el sistema de producción de este cultivo.

Ante esta situación, es importante entender el estado actual del área cafetalera, conocer la extensión y los cambios que se están realizando y las relaciones entre el cambio de cobertura vegetal y el uso del suelo y el proceso de la cafecultura.

Los estudios de CCUS basados en el procesamiento digital de imágenes de satélite han permitido identificar, monitorear y cuantificar a escala regional los grandes procesos de cambio de la cubierta vegetal (Coppin *et al.*, 2004).

El número de investigaciones de cambio de cobertura y uso del suelo basados en imágenes de satélite ha crecido exponencialmente en los últimos años, pero, aunque la teledetección es reconocida como un instrumento práctico para el monitoreo ambiental y la valoración de los recursos naturales, enfrenta obstáculos como la dificultad de interpretar consistentemente las características espectrales de la superficie bajo un amplio tipo de condiciones ambientales (Mas *et al.*, 2004).

El monitoreo del CCUS no da, por sí mismo, las causas de los cambios. Para tener un conocimiento del proceso de cambio, diversos investigadores se han dado a la tarea de encontrar la relación del cambio con variables biofísicas y/o socioeconómicas. Lambin *et al.* (2001) consideran que las valoraciones a escala global pueden estar en conflicto con lo que se encuentra a partir de datos a escala meso o micro, y que con base en ciertos estudios se han desarrollado simplificaciones de causa-efecto, las cuales no tienen sustento empírico, pero se han popularizado entre los tomadores de decisiones políticas y ambientales.

Un ejemplo de este tipo de simplificación es que al crecimiento de la población y a la pobreza se le han atribuido como la principal causa de la deforestación tropical (Mather y Needle, 2000). Numerosos estudios de caso sostienen que estos dos factores por sí solos no son la principal fuerza que explique la disminución de los bosques y encuentran que el punto crucial es el cambio en las oportunidades económicas, mediadas por factores institucionales, sociales, políticos y de infraestructura (Lambin *et al.*, 2001).

Varios autores afirman que ante la necesidad de realizar políticas ambientales efectivas se debe recurrir a todas las formas del conocimiento humano. Dentro de esta tendencia hacia la integración de ciencias y disciplinas, hay un interés creciente en la colaboración entre científicos de las áreas sociales, naturales y expertos en teledetección para tener un mejor conocimiento de las causas y los procesos que permitan una interpretación profunda de los patrones del cambio de cobertura y uso del suelo (Mertens *et al.*, 2000).

Desde una perspectiva espacial, las interrelaciones en el sistema humano-ambiente biofísico

funcionan a múltiples escalas, en donde los factores endógenos y exógenos que las conforman pueden ser dependientes de ellas. En general, las escalas más generales definen el contexto y las más finas, los mecanismos (Pan *et al.*, 2004).

En estudios recientes se han integrado, tanto análisis de imágenes de satélite como entrevistas de campo a niveles más locales, buscando entender mejor los procesos que llevan a la deforestación tropical y a los cambios en la complejidad del paisaje (Ramankutty *et al.*, 2006; Cortina, 2007).

En relación con estudios realizados sobre CCUS en la Sierra Norte de Puebla (SNP) hay varias investigaciones que muestran como resultados una fuerte alteración de los ecosistemas naturales, por ejemplo, Galván *et al.* (1999) consideran que el 90% de la superficie de la SNP ha sido modificada de vegetación natural a agroecosistemas, quedando solo 9.12% de vegetación primaria.

En el ordenamiento ecológico de las cuencas hidrológicas de los ríos Necaxa y Laxaxalpan, llevado a cabo por INE-UACH (2007), hacen una estimación de una tasa de deforestación anual de 1.9% y consideran que más del 70% de la vegetación natural ha sido modificada.

Alvarado *et al.* (2006), en un estudio sobre usos y destinos del suelo en quince municipios de la región de Cuetzalan, encuentran que el 30.5% de la superficie se destina al uso agrícola, el 10.7 a la ganadería y el 53.3 a la silvicultura, usando interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite.

EL ÁREA CAFETALERA DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA (ACSNP)

El estado de Puebla es el cuarto a nivel nacional, en cuanto a producción de café. En la Sierra Norte de Puebla el cultivo de café se encuentra entre los 300 y 1 400 msnm (Kraemer y Solórzano, 1990; Evangelista, 1999). El padrón cafetalero (SAGARPA, 2005) reporta una superficie de 61 460 ha cultivadas con café, en 548 localidades de 46 municipios del norte de Puebla (Figura 1). Los tipos de vegetación que hay son bosque tropical perennifolio, bosque mesófilo de montaña y vege-

tación riparia. Entre los 600 y 1 000 msnm hay una zona de ecocline entre los dos bosques (Martínez *et al.*, 1995). Los climas que se presentan en el área en estudio son cálido húmedo con lluvias en verano Amw, semicálido húmedo con lluvias todo el año (A)C(fm) y semicálido con lluvias en verano (A)C(m), (Bermeo, 2003).

En las áreas cafetaleras, especialmente en donde hay campesinos minifundistas, el café sólo es una alternativa más entre una gama de productos o actividades económicas (Evangelista, 1999). Así, en el área cafetalera del norte de Puebla, el paisaje es un mosaico de terrenos de cultivos anuales (maíz, frijol y chile); potreros para ganadería extensiva; huertos familiares y de sistemas de cultivo permanente, como el café con una sombra diversificada, con sombra monoespecífica o sin sombra; mezclados con fragmentos, cada vez más pequeños, de vegetación primaria y secundaria.

Además existen diferencias en producción y manejo de otros productos dentro de los cafetales. En varios municipios de la parte occidental de la Sierra se recolectan plantas medicinales para su venta, algunas de las cuales se están promoviendo dentro de los cafetales (Zurita, 2005). En el área oriental se han desarrollado cadenas de comercialización para la pimienta (*Pimenta dioica*), el mamey (*Pouteria sapota*) y zapote negro (*Diospyros dygina*); árboles que han aumentado su frecuencia en estos sistemas agroforestales (Martínez *et al.*, 2004).

Hay también tres municipios, Xicotepec, Zihuateutla y Jopala, en el centro norte del área, en los cuales existen fincas con plantaciones de monocultivo de café, en donde se han introducido especies exóticas comerciales como macadamia (*Macadamia integrifolia*), maracuyá (*Passiflora edulis*) y cedro rosado (*Acrocarpus fraxinifolius*), por la baja del precio del café en el mercado internecional.

METODOLOGÍA

El enfoque metodológico aplicado aquí se basa, a nivel general (a escala 1:100 000), en técnicas de análisis espacial para determinar los patrones de cambio de cobertura y uso del suelo. El análisis regional permitirá tener una visión general de la extensión

de los tipos de cobertura y uso del suelo, así como de los cambios que se han dado. El enfoque metodológico aplicado aquí es similar al aplicado por Muñoz y López (2008).

Delimitación del área en estudio

Se delimitó el ACSNP seleccionando los municipios con producción de café, de acuerdo con el Padrón cafetalero (SAGARPA, 2005) y con un informe obtenido en Sistema Producto-Café de SAGARPA (2001).

De estos municipios se eligieron las comunidades con más de 100 habitantes, localizadas entre los 300 y 1 500 msnm, pues si bien el café se produce preferentemente entre los 400 y los 1 400 msnm, los habitantes de comunidades que están arriba o abajo de estos límites pueden tener propiedades en las áreas cafetaleras. Es por ello que los límites del área cafetalera no coinciden estrictamente en su totalidad con la delimitación político-administrativa municipal (Figura 1). Solamente para los casos de los municipios de Xicotepec, Jopala y Zihuateutla se dejaron las comunidades de menos de 100 habitantes porque es una zona en donde existe una gran cantidad de fincas cafetaleras.

Se habló con las autoridades municipales, estudiantes e investigadores que han trabajado en los

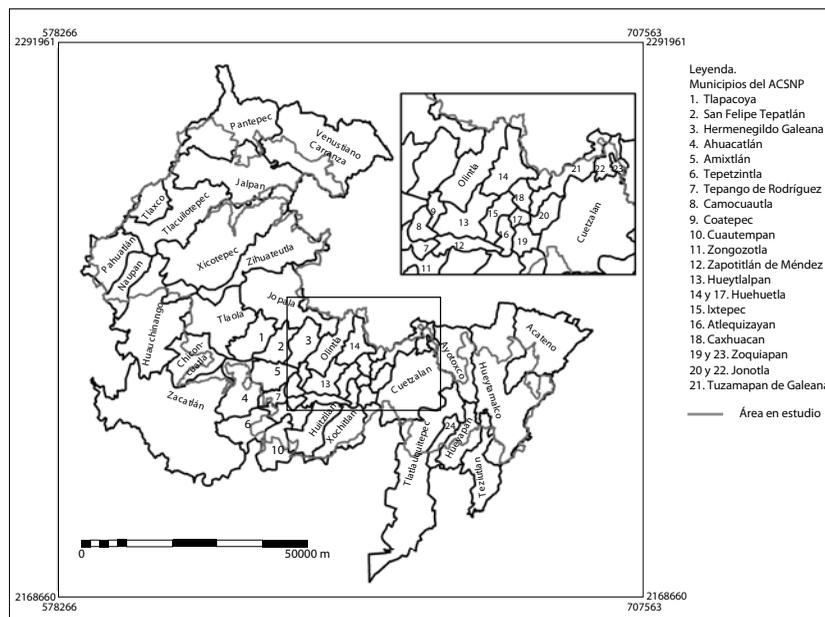
municipios cafetaleros para saber con más precisión cuáles son las comunidades productoras de café. Con las coordenadas de las comunidades seleccionadas se formó una nube de puntos en *Arctview* y sobre ésta se trazó un polígono envolvente.

Se generó un Modelo Digital del Terreno (MDT) procesando las curvas de nivel de los mapas topográficos a escala 1:50 000, que fueron registradas de manera digital con equidistancia vertical a cada 20 m; los archivos en formato de celdas o *raster* se interpolaron para generar el MDT.

Se sobrepuso el polígono y los puntos que representan a las comunidades cafetaleras, y un archivo de polígonos del padrón de cafeticultores de la Sierra Norte de Puebla, sobre un mapa de relieve sombreado para modificar el polígono envolvente inicial, tomando en cuenta las características geomorfológicas, en algunos casos, los límites municipales o estatales y el padrón de cafeticultores, en otros. En la Figura 1 se observa el polígono obtenido de la ACSNP y los municipios cafetaleros de la SNP.

Mapas de cobertura y uso de suelo mediante clasificación supervisada

Dentro del procesamiento digital de las imágenes de satélite se usó el algoritmo de agrupamiento estadístico de clasificación supervisada, pues es el



método recomendado cuando hay un conocimiento previo del área y porque permite que el analista seleccione las clases de cobertura de acuerdo con sus objetivos (Chuvioco, 2002).

Para elaborar los mapas de cobertura y uso del suelo del ACSNP se obtuvieron dos imágenes Landsat TM y ETM (noviembre de 1988 y febrero de 2003) y nueve ortofotos digitales a escala 1:20 000 (en escala original 1:75 000), del INEGI de (1995) de áreas que se conocían previamente en los municipios de Huitzilán, Xochitlán, Cuetzalan, Tuzamapan, Pahuatlán, Tlacuiltepec, Hueyapan, Zihuateutla y Jopala (los municipios se pueden ubicar en la Figura 1).

Se verificó que las imágenes de satélite estuvieran adecuadamente georreferenciadas usando las curvas de nivel a cada 20 m, a escala 1:50 000. La imagen de 1988 presentó una distorsión con respecto a su georreferencia original y a los rasgos cartográficos de comparación, por lo que se realizó una corrección geométrica de imagen a imagen, teniendo como base una imagen georreferenciada del año 2000. Se trazaron 94 puntos de control distribuidos en el área en estudio y la exactitud total de la transformación expresada con el error medio cuadrático fue por debajo del *pixel* (0.59).

Después de la georreferencia se usó el método del vecino más cercano para rectificar, remuestrear y *recortar* el área en cada una de las bandas de las imágenes 1988 y 2003, usando el sistema de coordenadas UTM, zona 14, con el *datum* WGS84 y coordenadas extremas (X, Y) de 584 000 m, 2 198 000 m y 687 020 m, 2 274 020 m, y una resolución de 30 m por *pixel*. Por último, se recortaron las bandas de las imágenes con el polígono del área específica de estudio transformado en formato *raster*.

Para las dos imágenes se predefinieron las clases de cobertura y uso del suelo para emplearlas en la etapa de entrenamiento en la clasificación de la imagen de satélite, usando fuentes auxiliares como las ortofotos, revisión de compuestos de falso color (RGB) con las bandas espectrales de las imágenes, conocimiento previo del área, consulta de expertos, los mapas topográficos, de poblaciones, de caminos, el padrón de cafecultores y el modelo digital del terreno.

Para ambas imágenes se consideraron 14 clases espectrales (Tablas 1 y 2). Con respecto a las clases de información utilizadas se denominó como vegetación secundaria inicial a los *acahuales* de arbustos y pequeños árboles (de entre 2-4 años), vegetación secundaria intermedia a los *acahuales* de cinco a diez años y la vegetación secundaria avanzada de más de diez años.

Para la agricultura anual se encontraron tres patrones espectrales diferenciados, porque en las partes más altas de la Sierra (hacia arriba de los 800 msnm), en los meses de noviembre a marzo los suelos que se dedican a ese uso están sin vegetación aparente (con rastrojo de maíz) o con cultivos en la primera fase de desarrollo, mientras que en las partes bajas, las áreas con cultivo de maíz (como principal cultivo), se encuentran en diferentes fases de desarrollo dependiendo de la altitud.

No fue posible la separación de las clases espectrales de cafetal con sombra y vegetación secundaria intermedia de bosque tropical (bt) o bosque mesófilo de montaña (bmm), posiblemente porque en muchos cafetales con sombra están presentes especies en este estadio de sucesión, como el jonote (*Heliocarpus apendiculatus*), cuerillo (*Trema micrantha*), sangre de grado (*Croton draco*) y hormiguillo (*Cecropia obtusifolia*).

Se realizó la clasificación supervisada seleccionando los campos de entrenamiento para las clases espectrales visuales preestablecidas utilizando los compuestos en color (al menos 250 píxeles para cada una). Para seleccionar los campos de entrenamiento se usaron las mismas fuentes auxiliares que en la pre-definición de clases.

En la imagen de 1988 se muestreó un total de 5 423 píxeles y en la imagen de 2003 fueron 5 939 píxeles. Se realizaron varias pruebas para separar otras clases espectrales como la de los cultivos permanentes de cítricos y ornamentales, pero se obtenían porcentajes muy bajos de exactitud del usuario, además quedaban agregados algunos píxeles que no tenían estos cultivos.

Se hizo la clasificación usando el algoritmo de máxima verosimilitud y se obtuvo la matriz de error espectral. Se realizaron los reagrupamientos o integración de clases para aquellas clases espectrales que correspondían a una sola clase de información. Se

Tabla 1. Matriz de error espectral para el año 1988

	agr1	agr2	agr3	ag	bp	bmm	bt	Ccs	ccsla	cec	pas	som	vs	zu	Exactitud del usuario
agr1	321	1	32	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	8	0.86
agr2	2	253	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	9	0.95
agr3	10	0	271	0	0	0	0	1	0	0	7	0	0	0	0.94
ag	0	0	0	453	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.00
bp	0	0	0	0	297	18	0	1	0	0	0	12	0	0	0.91
bmm	0	0	0	0	18	546	0	45	0	0	0	0	0	1	0.90
bt	2	0	0	0	0	0	286	20	2	0	0	0	0	0	0.92
ccs	13	1	0	0	0	60	75	355	8	0	1	0	0	2	0.69
ccsla	5	0	1	0	0	0	1	16	343	0	5	0	67	0	0.78
cec	0	0	0	0	0	0	0	0	0	410	0	0	0	12	0.97
pas	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	421	0	0	0	0.98
som	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	320	0	0	0.99
vs	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	264	0	0.89
zu	8	2	0	0	0	0	0	1	0	12	3	0	0	344	0.93
Exactitud del productor	0.87	0.98	0.89	1.00	0.93	0.88	0.79	0.81	0.89	0.97	0.94	0.96	0.80	0.91	

agr1=agricultura 1, agr2=agricultura 2, agr3=agricultura 3, ca=cuerpos de agua, bp=bosque de pino/bosque mixto de pino encino, bmm= bosque mesófilo de montaña/vegetación secundaria avanzada de bmm, bt= bosque tropical/vegetación secundaria avanzada de bt, ccs= cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos, ccsla=cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm en laderas sombrías/cultivo permanente de cítricos, som=vegetación con sombras, cec= cafetos o cítricos en crecimiento sin árboles de sombra, pas=pastizal cultivado e inducido, vg=vegetación secundaria inicial, zu=zona urbana/suelo desnudo/lechos de ríos.

unieron los tres tipos de agricultura, así como las dos de cafetal con sombra (laderas sombrías y laderas asoleadas). Debido a que a más de 1 450 msnm ya no se siembra café, a causa de la incidencia de heladas en invierno que acaban con el cultivo, se reclasificaron los cafetales con sombra con este criterio de altitud a la clase de vegetación secundaria intermedia de bmm.

Entre los 600 y 1 000 msnm existe una zona de ecotono de vegetación y con las diferencias radiométricas de cada imagen, al hacer el análisis de cambio, se podrían dar cambios de bmm a bt y viceversa, es por ello que se hizo una reclasificación de los bosque por el criterio de altitud de la siguiente manera: el bosque tropical debe estar a menos de 600 msnm, el bosque mesófilo de mon-

taña a partir de los 600 msnm, incluyendo el área de ecotono en donde se encuentran numerosas especies de origen tropical.

Después de realizar clasificación espectral las áreas urbanas resultaron estar sobrevaloradas en extensión de superficie, pues incluían lechos de ríos y algunas áreas con degradación del suelo. Para tener una extensión real de las áreas urbanas se digitizaron sus polígonos correspondientes directamente sobre la imagen más reciente, usando una composición en color, con el arreglo de bandas RGB 4/3/1 de la imagen de satélite. Así, del mapa de polígonos se obtuvo un mapa *raster*, el cual fue superpuesto con el mapa obtenido en la clasificación, con el objetivo de separar las áreas urbanas de otras con suelo degradado.

Tabla 2. Matriz de error espectral para el año 2003

	agr1	agr2	agr3	ag	bp	bmm	bt	ccs	ccsla	css	pas	som	vs	zu	Exactitud del usuario
agr1	346	2	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	3	0.95
agr2	0	269	61	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.81
agr3	0	43	201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.82
ag	0	0	0	452	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1.00
bp	0	0	0	0	408	22	0	3	0	0	0	8	0	0	0.93
bmm	0	0	0	0	38	460	0	29	0	0	0	0	0	0	0.87
bt	0	0	0	0	0	0	306	44	5	1	0	0	0	0	0.86
ccs	3	0	0	0	0	11	35	313	8	0	1	0	0	0	0.84
ccsla	2	0	1	0	0	0	10	14	493	10	16	0	43	0	0.84
css	0	0	0	0	0	0	3	0	27	576	0	0	12	0	0.93
pas	21	1	0	0	0	0	0	0	2	0	393	0	0	0	0.94
som	0	0	0	0	1	2	4	0	0	0	0	382	0	0	0.98
vs	0	0	0	0	0	0	0	0	26	7	0	0	271	0	0.89
zu	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	525	0.99
Exactitud del productor	0.92	0.85	0.76	1.00	0.90	0.93	0.85	0.78	0.88	0.97	0.92	0.98	0.83	0.99	

agr1=agricultura 1, agr2=agricultura 2, agr3=agricultura 3, ca=cuerpos de agua, bp=bosque de pino/bosque mixto de pino encino, bmm= bosque mesófilo de montaña/vegetación secundaria avanzada de bmm, bt= bosque tropical/vegetación secundaria avanzada de bt, ccs= cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos, ccsla=cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm en laderas sombrías/cultivo permanente de cítricos, som=vegetación con sombras, pas=pastizal cultivado e inducido, vs=vegetación secundaria inicial, zu=zona urbana/suelo desnudo/lechos de ríos.

En los mapas obtenidos por las reclasificaciones quedaron las siguientes clases de información: 1. Agricultura anual, 2. Cuerpos de agua, 3. Bosque de pino/Bosque mixto de pino encino, 4. Bosque mesófilo de montaña/vegetación secundaria avanzada de bosque mesófilo, 5. Bosque tropical, 6. Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos, 7. Cafetos o cítricos en crecimiento (sin sombra) en 1988, 8. Cafetal sin sombra o con poca sombra en 2003, 9. Cuerpos de agua, 10. Pastizal (cultivado e inducido), 11. Suelo desnudo/lechos de los ríos, 12. Vegetación secundaria de arbustos y árboles pequeños, 13. Vegetación secundaria intermedia de bmm (por arriba de 1 450 msnm), y 14. Zona Urbana.

A estos mapas se les aplicó en varias ocasiones el filtro de *pasa baja* (*Majority* o de mayoría; ITC, 2001) para quitar el efecto de dispersión de píxeles tipo *sal y pimienta*, los mapas de salida de este procedimiento son los que se usaron para la detección de cambios de cobertura y de uso del suelo.

Detección de cambios de cobertura y uso del suelo de 1988 a 2003

Un método frecuentemente usado para la detección de cambios y que es el que se ha empleado en este estudio, es la comparación en post-clasificación. Es también referida como *clasificación Delta*. Ésta implica producir clasificaciones espectrales independientemente en cada intervalo de tiempo, seguida por una comparación de *píxel por píxel* o

segmento por segmento para detectar cambios en el tipo de cobertura o uso del suelo.

En una adecuada codificación de la clasificación, resulta una matriz completa de cambio y clases de cambio que pueden ser definidos por el analista (Coppin *et al.*, 2004). La principal ventaja de la clasificación delta es que los datos de cada imagen se clasifican en forma separada y por tanto minimiza el problema de la calibración radiométrica entre los datos. Sin embargo, la exactitud de la comparación post-clasificación es totalmente dependiente de la exactitud de la clasificación inicial (*Ibid.*).

A partir de los principales cambios obtenidos se elaboraron mapas para los ocho principales tipos de cambio (que representan el 72% del total de los cambios). Se realizó una sobreposición digital (*cruzamiento*) de los mapas de cambio con el mapa de municipios para saber en cuáles se dio la mayor extensión.

Se realizaron nueve salidas de campo (de septiembre de 2007 a julio de 2008) a catorce de los principales municipios cafetaleros para hacer observaciones sobre el uso actual del suelo y entrevistas a campesinos y autoridades sobre los cambios de cobertura vegetal y uso del suelo entre 1988 y 2003.

Tomando en cuenta la frecuencia y distribución espacial de los tipos de cambio detectados en el periodo 1988-2003, se analizan sus patrones de cambio y con base en los datos recabados durante el trabajo de campo y en documentos publicados, se establecen unas primeras aproximaciones explicativas de las razones de dichos cambios.

RESULTADOS

Mapas de cobertura y uso de suelo mediante clasificación supervisada

Se definió un polígono de 3 043 km² en donde se encuentran 548 localidades productoras de café. Después de aplicar el algoritmo de máxima verosimilitud para la clasificación y hacer el cruzamiento entre el mapa obtenido y el mapa con los campos de entrenamiento para generar la matriz de error espectral, se obtuvo para la imagen de 1988 un 90.8% de exactitud total, 90.2% de exactitud

del productor y 90.1% de exactitud del usuario, teniendo los porcentajes más bajos de exactitud del productor en la clase de bosque tropical (79%), la cual se confunde con el cafetal con sombra, y en vegetación secundaria con arbustos y árboles pequeños (80%), la cual se confunde con el cafetal con sombra en laderas asoleadas (Tabla 1).

Para la imagen de 2003 se obtuvo un 90.8% de exactitud total, 90.0% de exactitud del productor y 84.4% de exactitud del usuario, con los porcentajes más bajos de error de omisión (exactitud de productor) en las clases agricultura 3 (76%), que se confunde con agricultura 2, y el cafetal con sombra (78%), que se confunde con el bosque tropical y con el bosque mesófilo (Tabla 2). Se debe tomar en cuenta que esta es sólo una medida que refleja la eficiencia de selección de los campos de entrenamiento utilizados para realizar la clasificación espectral supervisada (Muñoz y López, 2008).

Los valores de exactitud obtenidos son suficientemente óptimos tomando en cuenta la alta heterogeneidad del paisaje y la semejanza de respuesta radiométrica entre algunas clases espectrales, como las que tuvieron los porcentajes más bajos de exactitud del productor.

En los mapas finales de cobertura y uso del suelo (Figuras 2 y 3), los principales tipos de cobertura fueron Cafetal con sombra/Vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos, Pastizal (cultivado e inducido) y Agricultura anual. En los dos años es mayor el área con cubierta forestal (63.6% en 1988 y 67.6% en 2003), pero esta cubierta es principalmente perturbada y/o manejada con sistemas agroforestales (cafetales con sombra).

Detección de cambios y su explicación inicial (1988-2003)

En la matriz de cambio se encontró que en el 58.4% del área en estudio no hubo cambio y en el 41.6% sí. En la Tabla 3 se presentan las cifras de superficie (en hectáreas) de los ocho principales tipos de cambio y en la Figura 4, el mapa de esos tipos de cambio.

El tipo de cambio con mayor superficie fue el de Pastizal (cultivado e inducido) a Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/

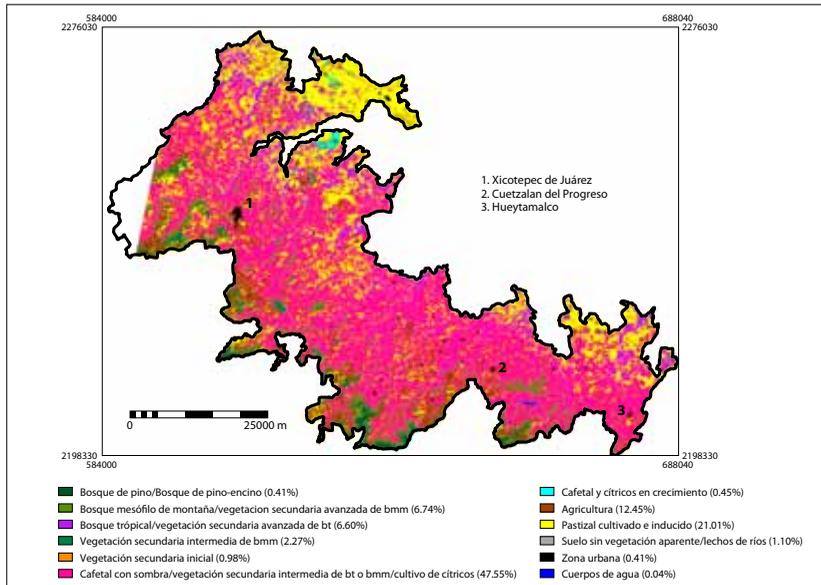


Figura 2. Mapa de cobertura y uso del suelo del área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla, 1988.

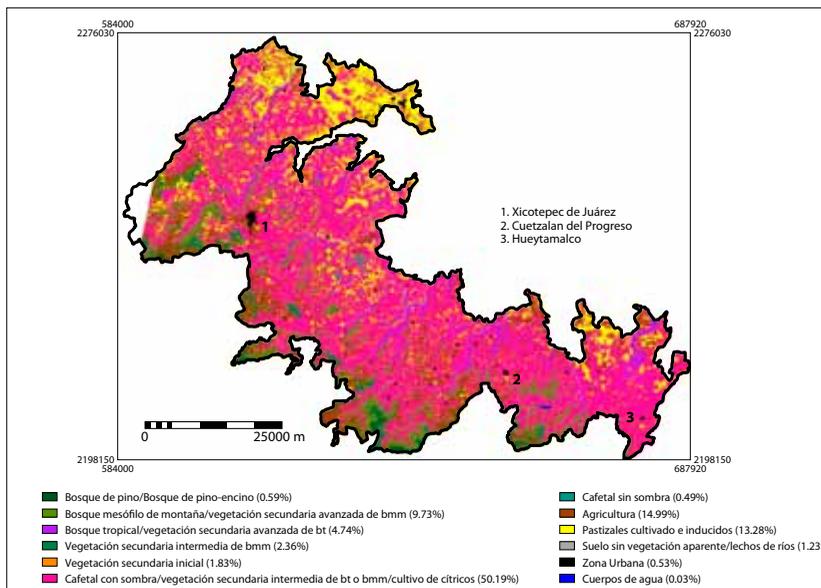


Figura 3. Mapa de cobertura y uso del suelo del área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla, 2003

cultivo permanente de cítricos (16.6% del total de los cambios), este cambio se da principalmente en los municipios de Xicotepec, Hueytamalco, Jalpan, Tlacuilotepec, Jopala y Zihuateutla (la ubicación de los municipios se puede ver en la Figura 1). En la SNP hay una constante extensión del área cafetalera según los censos agropecuarios existentes, incluyendo el padrón cafetalero de 2002 (Rappo, 2006), parte de estos cafetales se establecieron en pastizales (Alejandro Ramírez, com. personal).

Otra variable que puede ayudar a explicar este tipo de cambio es que en 1994 con la entrada del Tratado de Libre Comercio en el rubro de los productos pecuarios (Rappo, 1997), se ha disminuido la producción de carne de res en un 30% (Gazeta de la Sierra Norte, 2008), y se han abandonado pastizales en los que ahora se inicia un proceso de sucesión secundaria (Valdemar Cabrera, com. personal). A partir de observaciones directas se ha podido constatar la presencia de

Tabla 3. Principales cambios de cobertura y uso del suelo del área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla

1988	2003	Área (ha)	Porcentaje del total de cambios
Pastizal (cultivado e inducido)	Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	20 496.87	16.62
Agricultura anual	Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	13 054.14	10.58
Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	Agricultura anual	10 671.75	8.65
Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	Bosque mesófilo de montaña/ vegetación secundaria intermedia de bmm	10 574.46	8.60
Pastizal (cultivado e inducido)	Agricultura anual	10 238.10	8.30
Bosque tropical/ vegetación secundaria avanzada de bt	Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	9 274.23	7.52
Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	Bosque tropical/ vegetación secundaria avanzada de bt	7 585.38	6.15
Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos	Pastizal (cultivado e inducido)	6 474.51	5.25

pastizales abandonados con vegetación secundaria intermedia.

Algunas comunidades de Hueytamalco (como Limotitán El Grande) se formaron a mediados de la década de los ochenta, con la compra de parcelas a dueños de grandes potreros. Ante la presión social para la formación de ejidos, los ganaderos prefieren parcelar sus terrenos y vender (José Ortega, com. personal), esta tendencia de cambio de pastizal a sistemas agroforestales (cafetales y por debajo de los 400 m a cultivo de cítricos), se hace patente en el periodo analizado.

El segundo cambio en importancia fue el de Agricultura anual a Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos (10.6% del total de cambios). Los municipios con mayor extensión de este tipo de cambio fueron Xicotepec, Hueytamalco, Tlaola, Zi-

huateutla, Cuetzalan, Tlacuilotepec, Jalpan y Jopala.

En la SNP, un proceso común para establecer los cafetales o cítricos a partir de potreros o montes es dar en renta o préstamo, de uno a tres años, parcelas a campesinos sin tierra para que siembren maíz a cambio de que desmonten o hagan un barbecho profundo para eliminar el pasto, y dejar el terreno preparado para hacer las cepas en donde se plantarán los cafetos o cítricos (Sáenz, en preparación).

El tercer tipo de cambio es de Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos a Agricultura anual (8.7% del total de los cambios), los municipios con mayor extensión de este tipo de cambio fueron Xicotepec, Cuetzalan, Tlaola, Hueytamalco, Jopala, Tlacuilotepec y Huitzilán. Este cambio lo identifican y mencionan con claridad los agricultores de toda la sierra, quienes comentan que, al

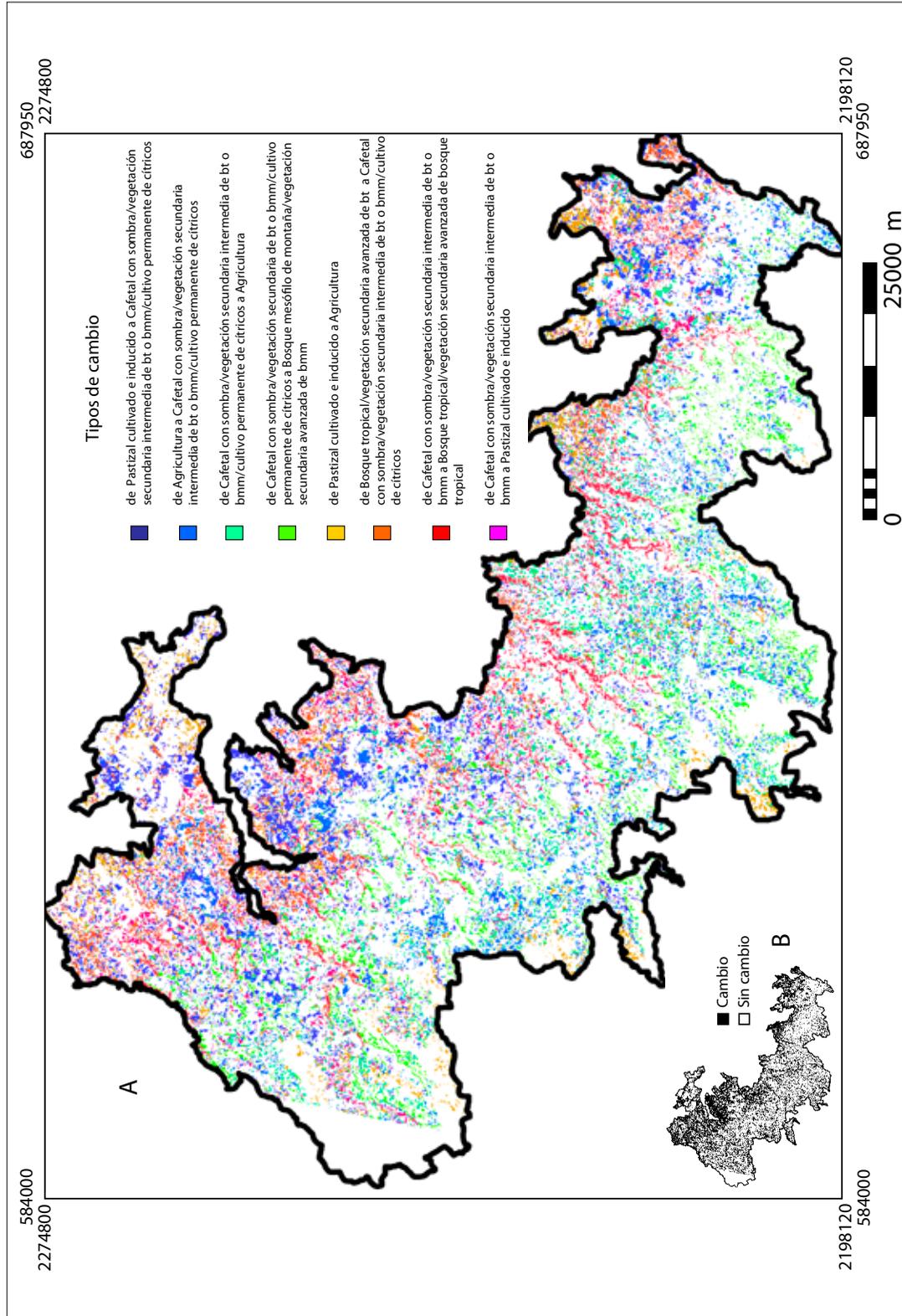


Figura 4. A. Mapa con los principales tipos de cambio en el área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla entre 1988 y 2003. B. Mapa del área de cambio en la zona en estudio, entre 1988 y 2003.

no ser rentables los cafetales, algunos se han transformado a cultivo de maíz. También se considera que el programa PROCAMPO (que brinda apoyo económico a los campesinos que siembran algún cultivo anual) ha influenciado este tipo de cambio (Carmelo León, com. personal).

En Xicotepec y Zihuateutla, en el área de las grandes fincas, algunos finqueros que trabajaban con préstamos bancarios, con la crisis del café quedaron en cartera vencida; algunas de estas fincas fueron rematadas por los bancos y otras las invadieron campesinos sin tierra y las han transformado a cultivos anuales (Alejandro Ramírez, com. personal).

El cuarto tipo de cambio fue el de Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos a Bosque mesófilo de montaña/vegetación secundaria avanzada de bmm (8.6% del total de cambios). Principalmente se presenta en los municipios de Xicotepec, Tlacuilotepec, Tlaola, Cuetzalan, Tlaltlauquitepec, Xochitlán, Huitzilán y Tlaxco, en las cañadas escarpadas, generalmente alejadas de las comunidades. Ciertamente estos son los cafetales que se empezaron a abandonar primero, pues los cortadores cobran más por ir a estos lugares y con los bajos precios del café era incosteable cosechar el producto (Leonardo Durán, com. personal).

Durante el trabajo de campo, en todas las comunidades visitadas fue frecuente la mención y observación directa de los cafetales abandonados, los cuales se encuentran en diferentes estadios de sucesión. En general, los cafetales que se mantienen son los cercanos a las comunidades, es decir, a no más de 1 a 1.5 horas a pie. Esto también puede ser una explicación para el séptimo cambio de Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm a Bosque tropical/vegetación secundaria avanzada de bosque tropical (el 6.2%), si bien aquí, además está el problema de una sobrestimación por la semejanza de la respuesta espectral de las dos clases, en los dos años analizados.

El quinto tipo de cambio fue de Pastizal (cultivado e inducido) a Agricultura anual (8.3%), el cual se ha dado principalmente en los municipios de Hueytamalco, Xicotepec, Jalpan, Pantepec, Venustiano Carranza, Tlacuilotepec y Cuetzalan. En Hueytamalco, Jalpan, Pantepec y Venustiano

Carranza aún se está dando el establecimiento de huerta de cítricos y de lichi, pasando antes por sembradíos de maíz, como se mencionó en el cambio dos. Son áreas por debajo de los 400 msnm donde ya son poco frecuentes los cafetales (Jesús Hernández, com. personal).

En áreas de mayor altura especialmente en ambientes de ladera y con predominancia de pequeños propietarios, como en sectores de Xicotepec y Cuetzalan, se ha disminuido la ganadería y cambiado el uso del suelo a agricultura de temporal (Evangelista, 1999). Otra posible causa de este tipo de cambio observado, es que cuando se cambia de variedad de pasto, temporalmente se siembra maíz.

También está la influencia de las fechas de toma de las imágenes, pues en noviembre (imagen de 1988), algunas parcelas agrícolas están en descanso y con pasto, en cambio en febrero (imagen de 2003) ya están roturadas o con maíz sembrado.

El sexto cambio importante es el de Bosque tropical/vegetación secundaria avanzada de bt a Cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo de cítricos (7.52%), la mayor extensión se da en los municipios de Jalpan, Xicotepec, Hueytamalco, Zihuateutla, Pantepec y Jopala. El bosque tropical ha disminuido porque se ha talado para establecer cafetales o cítricos, o más pausado con tala selectiva de especies útiles (maderables y para leña). Posiblemente este tipo de cambio esté sobrevalorado en extensión, debido a la confusión espectral entre las dos clases durante el proceso de clasificación supervisada.

El octavo cambio es de cafetal con sombra/vegetación secundaria intermedia de bt o bmm/cultivo permanente de cítricos a pastizal cultivado e inducido (5.25% del total de cambios), los municipios en donde es mayor este cambio son Jalpan, Jopala, Xicotepec, Tlacuilotepec, Zihuateutla y Hueytamalco. La posible razón de este cambio, se ha dado principalmente porque los agricultores eliminan los cafetales por no ser redituables y si bien la ganadería también está en crisis, se necesita menos inversión para mantener los pastos. Es por ello que algunos productores han introducido ganado con proyectos apoyados por el gobierno y en otros casos la estrategia es rentar los potreros (Carlos León y Agustín Sevilla, com. personal).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, el cambio de cobertura y uso del suelo del área cafetalera de la Sierra Norte de Puebla (ACSNP) presenta una disminución en extensión de pastizales y en agricultura de cultivos anuales, y un aumento en la cubierta forestal, tal aumento ha sido en sistemas agroforestales y con vegetación secundaria. Estos cambios tienen su mayor extensión en los municipios de Xicotepec, Jalpan, Jopala, Hueytamalco, Tlacuilotepec, Zihuateutla, Cuetzalan, Tlaola, Pantepec y Venustiano Carranza.

Si bien se trató de tener un alto número de *píxeles* muestreados para obtener una clasificación adecuada (Foody, 2002), la heterogeneidad de los *píxeles* en una misma ventana, dada por la microparcelación de la tierra, ha dificultado el esfuerzo de clarificar cuantitativamente la dimensión y el tipo de cambio sucedido en el ACSNP. Aun cuando, en términos absolutos, las cifras pueden estar subvaluando o sobrevalorando la extensión de dichos cambios, ya que como algunos autores han señalado que el tipificar el CCUS conlleva a problemas como errores de registro, el efecto de la variación en la iluminación atmosférica, en fechas distintas en una misma área, variabilidad en los sensores, efectos de topografía, tipos de vegetación heterogénea, variabilidad fenológica interanual (Rogan *et al.*, 2002; Foody, 2002), de cualquier manera los patrones obtenidos han permitido plantear nuevas hipótesis explicativas al respecto del fenómeno estudiado.

Para explicar estos patrones es importante tomar en cuenta varios factores que interactúan en diversos contextos a escalas locales, regionales o globales (Geist *et al.*, 2006). Factores económicos y políticos, a nivel internacional y nacional, como las fluctuaciones del mercado internacional del café, el Tratado de Libre Comercio México-USA-Canadá (en particular de productos pecuarios), los cambios en la política y en las instituciones nacionales relacionados con la cafecultura y los productos básicos, ellos son posibles causas subyacentes que han disparado los cambios de uso del suelo descritos anteriormente.

En la SNP el establecimiento de cafetales se inició en la década de los cincuenta pero la mayoría

son de los años setenta, cuando los productores tienen el apoyo económico y asesoría técnica por parte de INMECAFE (Bermeo, 2003). Martínez (1996) explica que debido a una baja de producción del café en Sudamérica aumentó el precio de este producto en el mercado mundial y la política nacional promovió la expansión del cultivo. Esta situación fue anterior al periodo estudiado.

Entre 1988 y 2003 hay una baja del precio del café y la política nacional disminuye el apoyo al cultivo, los primeros en reaccionar ante este panorama son los grandes productores (Rappo, 1997). Según el padrón cafetalero (SAGARPA, 2005), en los municipios de Xicotepec, Jopala, y Zihuateutla existían 99 fincas de más de 20 ha (con un total de 7 072 ha) y de éstas, 36 eran de más de 50 ha (con un total de 5 252 ha).

Administradores de asociaciones y organizaciones de cafecultores consideran que cerca del 40% de las fincas que existían en 1990 han sido abandonadas o se han transformado a plantaciones de cedro rosado, macadamia, pastizal o cultivo de maíz (Celso López, com. personal).

En el 2000, el gobierno a través del Consejo Nacional del Café estableció una política de apoyo temporal a los cafecultores, en áreas con menos de 600 msnm, con la exhortación a realizar un cambio de cultivo. En las áreas que están por debajo de los 400 msnm, en los municipios de Hueytamalco, Ayotoxco, Acateno, Venustiano Carranza y Pantepec, se ha dado un cambio constante de cafetales y pastizales a naranjales, y poco a huertas de lichi, incluso antes de la política estatal, y en la actualidad es mínima la presencia de café por debajo de esta cota actitudinal.

La falta de incentivos económicos, asesoría tecnológica y de mercadeo en el campo, ha provocado que en toda el ACSNP, los cafetales y pastizales se abandonen y haya una mayor migración a grandes ciudades del país o al extranjero; esta migración está acentuando los problemas de los cafecultores y ganaderos que aún quedan, pues se ha escaseado y encarecido la mano de obra asalariada (Bartra *et al.*, 2004).

Comparando los resultados con los trabajos anteriores existe una mayor coincidencia con los resultados de Galván *et al.* (1999), pues ellos

mencionan que más del 90% de la SNP ha sido transformado. En los resultados obtenidos en este trabajo quedan 13.8% en 1988 y 15.1% en 2003, de áreas con bosques, pero estas categorías incluyen vegetación secundaria avanzada de bt y bmm, por lo que no son sólo áreas de vegetación primaria.

En relación con el trabajo de INE-UACH (2007), si bien es cierto que las cuencas de los ríos Necaxa y Laxaxalpan incluyen barrancos profundos donde existe vegetación con menor grado de alteración, el 70% de vegetación modificada que reportan esas instituciones, es un dato muy conservador. En el estudio de Alvarado *et al.* (2006), en un área que se encuentra dentro del ACSNP se reporta 53.3% de extensión para la clase de uso silvícola, sin embargo, aun cuando en esta clase se incluyeran los cafetales y pastizales abandonados, resulta ser una cifra muy alta. Es importante señalar que en los trabajos de Galván *et al.* (1999) y de Alvarado *et al.* (2006), no se plantea una descripción de la metodología utilizada, con el fin de evaluar e interpretar los resultados de su clasificación de las imágenes de satélite.

En este trabajo se encontró un aumento de la cubierta forestal, de manera semejante a lo reportado en trabajos sobre el cambio de uso del suelo en áreas donde es importante la cafeticultura, como en el de Bandeira *et al.* (2002) en Chiapas, y en el de Ortiz (2001), en el municipio de Papantla en Veracruz. Hubo también coincidencia en que el establecimiento de cafetales con sombra tiene incidencia en el aumento de las áreas forestadas, asimismo, Ortiz (2001) reporta la presencia de vegetación en proceso de sucesión en potreros abandonados.

Los principales patrones de cambio que se encontraron fueron: extensiones compactas de los tipos de cambio de pastizal o agricultura a 1. Cafetal con sombra, 2. Vegetación secundaria intermedia de bosque tropical y bosque mesófilo de montaña, y 3. Cultivo permanente de cítricos, esto en las partes bajas del noroeste y sureste del ACSNP, en áreas con pendientes poco inclinadas y en donde hay mayor número de productores con grandes propiedades. En las porciones con mayor altitud, donde hay más terrenos abruptos y pequeños propietarios, los patrones de cambio fueron más dispersos. Otro patrón notable por su agrupamiento

de áreas se presentó en las laderas de las paredes de los barrancos en donde se dio el cambio de cafetal con sombra y vegetación secundaria intermedia de bosque tropical a vegetación secundaria avanzada de bosque tropical, especialmente en la parte central del ACSNP.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al M. C. Francisco Basurto Peña y a la Biól. Myrna Mendoza Cruz por su apoyo en el trabajo de campo y su colaboración en la interpretación de las imágenes de satélite. Asimismo, a los revisores anónimos por sus observaciones y sugerencias al manuscrito de este artículo.

REFERENCIAS

- Alvarado, M., F. Lozano, M. Martínez y A. Colmenero (2006), "Usos y destinos de los suelos en la región de Cuetzalán, Puebla, México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, num. 59, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 43-58.
- Bartra, A., R. Cobo y L. Paredes (2004), *Tosepan Titataniske. Abriendo Horizontes*, Sociedad Cooperativa Agropecuaria Regional Tosepan Titataniske, S.L.C. México.
- Bandeira, F. de P., J. López-Blanco and V. M. Toledo (2002), "Landscape management among tzotzil coffee growers of Polhó, Chiapas, Mexico: an alternative to deforestation", en Bandeira F. de P., *Análisis de factores que afectan el establecimiento y la estructura florística de los cafetales rústicos en dos áreas del suroeste de México*, tesis doctoral, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Bermeo, A. (2003), *La actividad cafetalera en los municipios de Xicotepéc, Zihuateutla y Tlacuilotepec en la Sierra Norte de Puebla, su organización y sus potencialidades de producción*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Colegio de Geografía, UNAM.
- Cabrera, V. (2008), Encargado de proyectos productivos, Presidencia Municipal de Venustiano Carranza, Puebla, comunicación personal, 27 de julio.
- Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys and E. Lambin (2004), "Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 25, no. 9, pp. 1565-1596.

- Cortina, S. (2007), *Uso del suelo y deforestación en los Altos de Chiapas*, tesis doctoral, Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado en Geografía, UNAM.
- Chuvieco, E. (2002), *Teledetección ambiental*, Ariel, Barcelona, España.
- Durán, L. (2007), Encargado del programa de café orgánico en la Cooperativa Tosepan Titataniske, Cuetzalan, Puebla, comunicación personal, 29 de mayo.
- Evangelista, V. (1999), *Influencia de dos cultivos comerciales en el cultivo de maíz en la comunidad de Naupan, Puebla*, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, UNAM.
- Foody, G. M. (2002), "Status of land cover classification accuracy assessment", *Remote Sensing of Environment*, no. 80, pp. 185-201.
- Foley, J. A., R. DeFries, G. Asner, C. Barford, G. Bonan, S. Carpenter, S. Chapin, M. Coe, G. Daily, H. Gibbs, J. Helkowski, T. Holloway, E. Howard, C. Kucharik, C. Monfreda, J. Patz, C. Prentice, N. Ramankutty and P. Zinder (2005), "Global consequences of land use", *Science*, no. 309, pp. 570-574.
- Galván, A., G. Hernández, H. Vélez, E. Gómez, A. Becerril y A. Luna (1999), *Evaluación de Impacto Ambiental. Informe final de actividades. Sierra Norte de Puebla*, SAGAR-Banco Mundial-UAM.
- Gazeta de la Sierra Norte (2008), Grave crisis en la ganadería de la Sierra Norte [<http://www.sierranortedepuebla.com.mx/Regional/CRISIS-EN-LA-GANADERIA>].
- Geist, H., W. McConnell, E. Lambin, E. Moran, D. Alves and T. Rudel (2006), "Causes and trajectories of land-use/cover change", en Lambin, E. F. and H. Geist (eds.), *Land-use and land-change. Local processes and global impacts*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 41-70.
- Hernández, J. (2007), Productor de lichi, Nanacatepec, Ayototxo, Puebla, comunicación personal, 30 de mayo.
- INE-UACH (2007), *Estudio de Ordenamiento Ecológico Territorial de las Cuencas Hidrológicas de los ríos Necaxa y Laxaxalpan* [http://www.ine.gob.mx/dgoece/ord_ecol/proyecto_necaxa.html: 15 de abril de 2007].
- ITC (2001), *ILWIS Version 3.0. User's Guide*, ITC, The Netherlands.
- Kraemer B., G. y L. A. Solórzano T. (1990), *Los productores de café en Zihuateutla, Pue. Origen, entorno y perspectivas*, UACH, Col. Cuadernos Universitarios, Serie Ciencia Sociales, núm. 8, Chapingo.
- Lambin, E., B. L. Turner, H. Geist, S. Agbola, A. Angelsen, J. Bruce, O. Coomes, R. Dirzo, G. Fischer, C. Folke, P. S. George, K. Homewood, J. Imbernon, R. Leemans, X. Li, E. Moran, M. Mortimore, P. S. Ramakrishnan, J. Richards, H. Skanes, W. Eteffen, G. Stone, U. Svedin, T. Veldkamp, C. Vogel and J. Xu (2001), "The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths", *Global Environmental Change*, no. 11, pp. 261-269.
- León, C. (2007), Representante general de la Unión Regional de Impulso a la Cafecultura Agropecuaria (URICA), Xicotepac, Puebla, comunicación personal, 23 de abril.
- López, C. (2007), Secretario de la Asociación Agrícola Local de Cafecultores de Zihuateutla, Puebla, comunicación personal, 24 de abril.
- Martínez A., M. A., V. Evangelista, M. Mendoza, G. Morales, G. Toledo y A. Wong (1995), *Catálogo de Plantas Útiles de la Sierra Norte de Puebla*, Col. Cuadernos, no. 27, Instituto de Biología, UNAM, México.
- Martínez, C. (1996), *El proceso cafetalero mexicano*, Instituto de Investigaciones Mexicanas, UNAM México.
- Martínez, M. A., V. Evangelista, M. Mendoza, F. Basurto y C. Mapes (2004), "Estudio de la pimienta gorda *Pimenta dioica* (L.) Merrill, un recurso forestal no maderable de la Sierra Norte de Puebla, México", en Alexiades, M. y P. Shanley (eds.), *Productos forestales, medios de subsistencia y conservación: estudios de caso sobre diversos sistemas de PFNM*, vol. 3 - América Latina, CIFOR-DFID, Jakarta, Indonesia, pp. 23-41.
- Mas, J-F., A. Velázquez, J. Reyes Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco, R. Castro, T. Fernández and A. Pérez-Vega (2004), "Assessing land/cover changes: a nation wide multirate spatial database for Mexico", *Applied Earth Observation and Geoinformation*, no. 5, pp. 249-261.
- Mather, A. S. and C. L. Needle (2000), "The relationships of population and forest trends", *The Geographical Journal*, 168, 1, pp. 2-13.
- Mertens, B., W. D. Sunderlin, O. Ndoye and E. Lambin (2000), "Impact of macroeconomic change on deforestation in South Cameroon: integration of household survey and remotely-sensed data", *World Development*, 28, 6, pp. 983-999.
- Muñoz-Villers, L. and J. López-Blanco (2008), "Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico", *International Journal of Remote Sensing*, 29, 1, pp. 71-93.
- Ortega, J. (2007), Presidente de la Asociación de productores de plátano de Limotitan, Hueytamalco, Puebla, comunicación personal, 31 de mayo.
- Ortiz, B. (2001), "Reversión de la forestación y la ganadería totonaca en el municipio de Papantla", en Hernández, L. (comp.), *Historia ambiental de la ganadería en México*, Instituto de Ecología, Xalapa, Veracruz, pp. 154-160.
- Pan, W., S. Walsh, R. Bilborrow, B. Frizzelle, C. Ertien and F. Baquero (2004), "Farm-level models of spatial patterns of land use and land cover dynamics in the

- Ecuadorian Amazon”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, no. 101, pp. 117-134.
- Ramankutty, N., L. Graumlinch, F. Achard, D. Alves, A. Chhabra, R. S. DeFries, J. A. Foley, H. Geist, R. A. Houghton, K. Goldewijk, E. F. Lambin, A. Millington, K. Rasmussen, R. S. Reid and B. L. Turner (2006), “Global land-cover change: recent progress, remaining challenges”, en Lambin, E. F. y H. Geist (eds.), *Land-use and land-change. Local processes and global impacts*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 9-40.
- Ramírez, A. (2007), Promotor de CIASA, Xicotepéc de Juárez, Puebla, comunicación personal, 7 de septiembre.
- Rappo M., S. E. (1997), *La ganadería bovina en Puebla y México*, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Fomento Editorial, Puebla.
- Rappo M., S. E. (2006), *El café orgánico frente a la crisis de la cafecultura mexicana desde los noventas, el proyecto de la Sociedad Cooperativa Regional “Tosepan Titataniske”*, en la Sierra Norte d Puebla, tesis de Doctorado, Posgrado en Economía, UNAM, México.
- Rogan J., J. Franklin and D. A. Roberts (2002), “A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery”, *Remote Sensing of Environment*, no. 80, pp. 143-156.
- Sáenz, F. (en preparación), *Estudio de los Sistemas Agrícolas en dos comunidades del Municipio de Venustiano Carranza, Ver.*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- SAGARPA (2001), Estadísticas de producción de café en Puebla por municipio. Sistema Producto-Café, México, D. F. Archivo digital en Excel (54 registros).
- SAGARPA (2005), Padrón cafetalero del estado de Puebla. Consejo Poblano del café, Xicotepéc de Juárez, Puebla, México. Archivo digital en Excel (56 395 registros).
- Sevilla, A. (2007), Ejidatario de Tenanguito, Zihuateutla, Puebla, comunicación personal, 8 de septiembre.
- Vitousek, P., P. Ehrlich, A. Ehrlich and P. Matson (1986), “Human appropriation of the products of photosynthesis”, *BioScience*, no. 36, pp. 368-374.
- Zurita, A. D. (2005), *Estudio de Solanum erianthum (Solanaceae), un recurso forestal no maderable en Pahuatlán, Puebla*, tesis de Licenciatura, FES-Iztacala, Estado de México.