

Dinámica socioecológica del cambio de uso de suelo en sistemas agroforestales de café: análisis espacio-temporal en la región mazateca (1994-2024)

Socioecological dynamics of land use change in coffee agroforestry systems: spatio-temporal analysis in the Mazatec region (1994-2024)

Jesús Guerrero-Carrera* y José Álvaro Hernández-Flores**

Recibido: 11/04/2025. Aceptado: 11/09/2025. Publicado: 9/10/2025.

Resumen. Los sistemas agroforestales de café en México atraviesan una crisis multidimensional marcada por la pérdida de superficie productiva, transformaciones socioecológicas y presiones derivadas de cambios globales en los mercados agrícolas y el clima. Esta investigación tuvo como objetivo cuantificar el cambio de uso de suelo en los sistemas agroforestales de la región mazateca, integrando herramientas de teledetección con marcos interpretativos de los sistemas socioecológicos. Se emplearon técnicas de análisis retrospectivo con imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2 para el periodo 1994-2024, complementadas con entrevistas a 103 productores y cinco técnicos locales, lo que permitió triangular evidencia espacial y percepciones sociales. Los resultados evidencian una transformación radical de estos sistemas: de las 43 756 hectáreas registradas en 1994, solo 5 864 ha (13.4 %) conservaron su cobertura original. La transición más significativa fue hacia vegetación natural (26 557 ha; 60.7 %), seguida por la conversión a cultivos anuales (8 338 ha; 19.1 %) y suelo urbano-descubierto (2 639 ha; 6.0 %). El periodo 2001-2015 representó la fase más crítica, con una pérdida del 62.1 % de la superficie agroforestal. Desde la percepción local, la migración, la caída de precios del café, la desaparición de apoyos institucionales, la ineficacia de los programas recientes, las plagas y la variabilidad climática se

reconocen como los factores más influyentes en el abandono de cafetales. Las conclusiones revelan una metamorfosis paisajística compleja donde los sistemas agroforestales no desaparecen, sino que se reconfiguran territorialmente, lo que subraya tanto su vulnerabilidad como las posibilidades de regeneración ecológica.

Palabras clave: adaptación, regeneración, resiliencia, paisaje, transformación.

Abstract. Coffee agroforestry systems in Mexico are undergoing a multidimensional crisis marked by the loss of productive land, socio-ecological transformations, and pressures from global changes in agricultural markets and climate. This study aimed to quantify land-use change in agroforestry systems in the Mazatec region, combining remote sensing tools with socio-ecological interpretive frameworks. Retrospective analyses using Landsat and Sentinel-2 imagery for the period 1994–2024 were complemented with interviews conducted with 103 coffee producers and five local technicians, allowing the triangulation of spatial evidence with social perceptions. Results reveal a profound transformation of agroforestry systems: of the 43 756 hectares recorded

* Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México A. C. Carretera Picacho Ajusco 20 Ampliación, Carr. Picacho-Ajusco, Tlalpan, 14110, Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0003-3747-0105. Email: jguerrero@colmex.mx

** Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México A. C. Carretera Picacho Ajusco 20 Ampliación, Carr. Picacho-Ajusco, Tlalpan, 14110, Ciudad de México, México. ORCID: 0000-0002-8349-0505. Email: jalvaro@colmex.mx. Autor de correspondencia.

in 1994, only 5 864 ha (13.4 %) retained their original cover. The most significant transition was toward natural vegetation (26 557 ha; 60.7 %), followed by conversion to annual crops (8 338 ha; 19.1 %) and urban-bare land (2 639 ha; 6.0 %). The period 2001–2015 was the most critical, with a 62.1 % loss of agroforestry area. From the local perspective, migration, declining coffee prices, the dismantling of institutional support, the ineffectiveness of recent programs, pest outbreaks, and climate variability are

recognized as the main drivers of coffee plot abandonment. The findings highlight a complex landscape metamorphosis in which agroforestry systems do not disappear but rather undergo territorial reconfiguration, underscoring both their vulnerability and the potential for ecological regeneration.

Keywords: adaptation, regeneration, resilience, landscape, transformation.

INTRODUCCIÓN

La producción de café es un sistema de alta complejidad socioecológica y de relevancia económica para México (Guerrero y Hernández, 2024). A nivel global, este país ocupa el décimo lugar como productor con una cosecha anual de 4.1 millones de sacos que involucra a más de 500 000 productores distribuidos en 15 estados (USDA, 2023). La singularidad del sistema cafetalero mexicano radica en el predominio de sistemas agroforestales; cerca del 85 % de la superficie cultivada se maneja bajo dosel arbóreo, configurando paisajes de alta complejidad ecológica (Perfecto *et al.*, 2019).

En este contexto, los sistemas agroforestales de café (SAC) constituyen socioecosistemas complejos en los que se articulan procesos ecológicos, productivos y socioculturales bajo dinámicas no lineales (Guerrero y Hernández, 2024). Desde la dimensión biofísica, albergan una riqueza biológica comparable al 60–70 % de los bosques naturales adyacentes (Jha *et al.*, 2014) y funcionan como corredores ecológicos estratégicos que resguardan servicios ecosistémicos críticos (Alvarez *et al.*, 2020). Al mismo tiempo, constituyen sistemas de conocimiento tradicional (Morandín *et al.*, 2023). La persistencia de estos sistemas depende, precisamente, de mantener acoplamientos funcionales entre sus componentes, lo que los hace simultáneamente resilientes y vulnerables frente a cambios disruptivos (Guerrero y Hernández, 2024b).

En la actualidad, los SAC enfrentan desafíos críticos caracterizados por la volatilidad de los mercados internacionales, la emergencia de problemas fitosanitarios como la roya del café y los efectos del cambio climático (Guerrero *et al.*, 2025). Estas presiones multinivel han propiciado transformaciones estructurales que se expresan con claridad en los

patrones de uso del suelo (Montejo *et al.*, 2022). De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de 2025, a nivel nacional la superficie destinada a la producción de café disminuyó 8.04 % entre 1994 y 2023, al pasar de 760 667 a 699 506 ha. En el estado de Oaxaca la reducción fue más drástica, con una pérdida del 36.33 % del área cultivada en ese mismo periodo (de 180 574 a 114 970 ha). Entre las zonas más afectadas destaca la región mazateca, donde la superficie dedicada a esta actividad se redujo en más del 50 %.

La dinámica de transformación de los sistemas agroforestales cafetaleros requiere ser analizada desde una doble perspectiva: por un lado, la cuantificación precisa de las modificaciones en la cobertura vegetal mediante técnicas de teledetección (Montejo *et al.*, 2022); por otro, la interpretación de sus causas y consecuencias a partir del enfoque de sistemas socioecológicos (Guerrero y Hernández, 2024). Este marco conceptual, desarrollado por autores como Berkes *et al.* (2003) y Ostrom (2009), permite entender cómo las transformaciones en el uso del suelo emergen de interacciones complejas entre factores ecológicos (como la incidencia de plagas) y sociales (como las dinámicas migratorias o los cambios en los mercados).

Desde una perspectiva teórica, el cambio de uso de suelo se conceptualiza como un proceso dinámico resultante de interacciones multidimensionales entre factores ecológicos y sociales. Geist y Lambin (2002) proponen un marco analítico que distingue entre causas próximas (modificaciones directas en la cobertura terrestre) y fuerzas subyacentes (factores demográficos, económicos, políticos y culturales). Por su parte, Turner *et al.* (2007) enfatizan que estos procesos se expresan a través de patrones espaciales que reflejan decisiones humanas profundamente

contextualizadas, históricamente situadas y territorialmente mediadas.

En este contexto, la región mazateca de Oaxaca constituye un caso representativo para el análisis de las dinámicas territoriales asociadas a los sistemas agroforestales de café. El estudio de sus transformaciones exige metodologías que integren el mapeo preciso de cambios en la cobertura mediante series temporales de imágenes satelitales (Wulder *et al.*, 2019), con aproximaciones interpretativas que consideren la naturaleza socioecológica de estos sistemas. La presente investigación propone un análisis espacio-temporal comprehensivo de los SAC en la región mazateca durante el período 1994-2024, con dos objetivos centrales: 1) cuantificar los patrones de cambio de uso de suelo, y 2) interpretar dichas transformaciones desde el marco conceptual de sistemas socioecológicos.

Este estudio pretende contribuir significativamente al diseño de políticas públicas para la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de café, proporcionando tanto evidencia cuantitativa de las transformaciones territoriales como un marco teórico que permita su comprensión integral. Los resultados ofrecerán insumos valiosos para la formulación de intervenciones que reconozcan la interdependencia entre los componentes ecológicos y sociales que configuran estos paisajes cafetaleros.

METODOLOGÍA

Esta investigación adoptó un diseño longitudinal retrospectivo con enfoque cuantitativo, basado en la interpretación multitemporal de imágenes satelitales para el período 1994-2024. El estudio integra técnicas de teledetección espacial con metodologías de investigación social para analizar la dinámica del cambio de uso de suelo en la región mazateca y su impacto en los sistemas agroforestales de café. Este enfoque mixto permite triangular datos cuantitativos derivados del análisis espacial con información cualitativa sobre los determinantes socioecológicos del cambio territorial, en línea con los marcos metodológicos, propuestos por Nelson *et al.* (2007), para el estudio de transformaciones en sistemas socioecológicos complejos.

Región de estudio

La región mazateca se localiza al norte del estado de Oaxaca, México, y se caracteriza por un relieve montañoso con altitudes que varían entre los 10 y 2000 msnm (Figura 1). Presenta un clima predominantemente húmedo con precipitaciones anuales entre 1000-3000 mm y temperaturas medias anuales que oscilan entre 12 y 24 °C (Lorea y Munn, 2005).

Históricamente, el territorio ha sido un importante productor de café cultivado bajo sistemas agroforestales diversos, en un contexto de fuerte presencia de población indígena mazateca que conserva sus prácticas agrícolas tradicionales (Moguel y Toledo, 1999). Esta región constituye un caso representativo de los paisajes cafetaleros mesoamericanos donde coexisten elementos culturales, productivos y ecológicos en configuraciones territoriales adaptadas a condiciones biofísicas y socioeconómicas específicas (Guerrero y Hernández, 2024).

Los municipios de la región mazateca que se integraron para este estudio fueron: Huautla de Jiménez, San José Tenango, Santa María Chilchotla, Santa María La Asunción, Huautepec, San Juan Coatzospam, San Bartolomé Ayautla, Santa Cruz Acatepec, San Antonio Eloxochitlan, San Pedro Ocopetatitlo, San Mateo Yoloxochitlan, Mazatlán Villa de Flores, San Lucas Zoquiapan.

Fuentes de datos y adquisición de imágenes satelitales

Para el análisis multitemporal se utilizaron imágenes Landsat 5 TM (1994 y 2001), Landsat 8 OLI/TIRS (2015) y Sentinel-2 (2024). La selección de imágenes se realizó considerando los criterios de calidad establecidos por Wulder *et al.* (2019) para estudios de cambio de cobertura forestal: cobertura nubosa inferior al 15 %, capturas durante la temporada seca para maximizar el contraste espectral entre coberturas y fechas cercanas entre sí para minimizar efectos fenológicos estacionales.

Las imágenes Landsat fueron obtenidas del repositorio Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), seleccionando la colección Landsat Collection 2, Level 2, la cual incluye correcciones atmosféricas. Las imágenes Sentinel-2 se obtuvieron a través de la plataforma

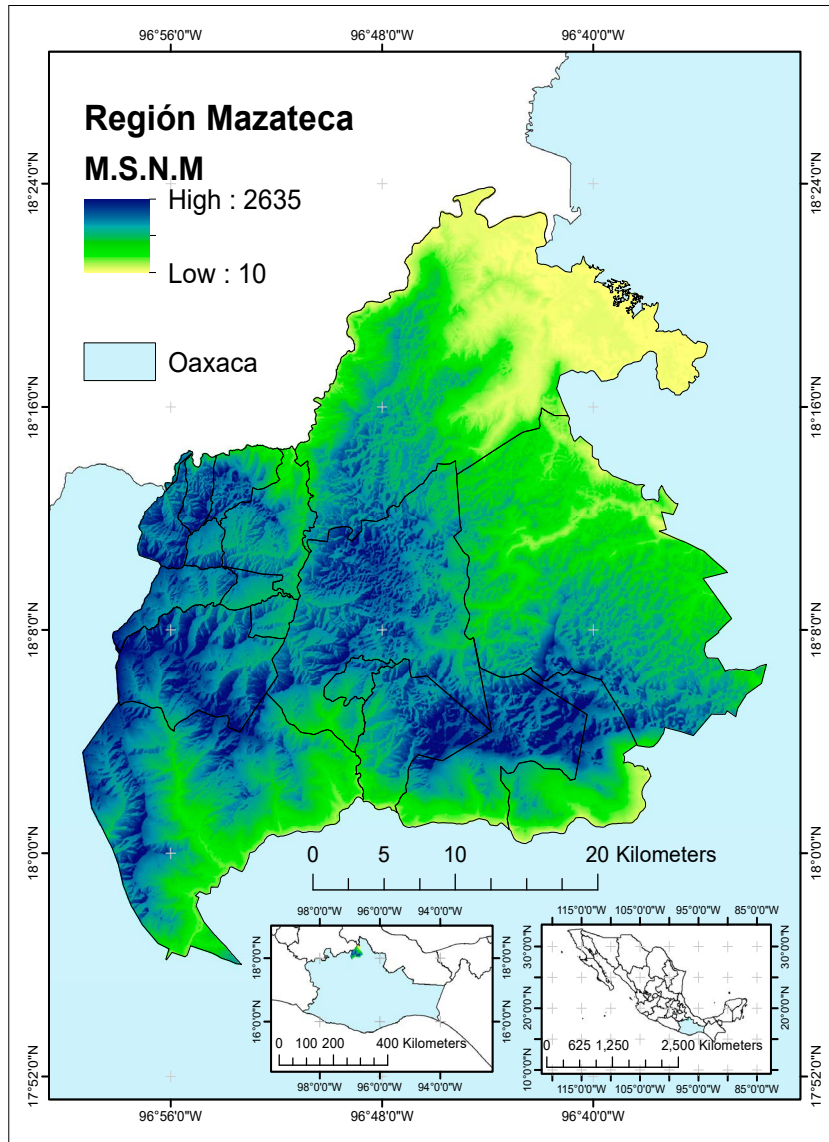


Figura 1. Delimitación de región de estudio (región mazateca). Fuente: elaboración propia.

Sentinel Hub EO Browser. Este diseño de muestreo temporal permite cubrir tres décadas de transformaciones paisajísticas, período considerado óptimo para detectar patrones significativos de cambio en sistemas socioecológicos forestales y agroforestales (Lambin y Meyfroidt, 2010).

Como fuentes complementarias se incorporaron límites administrativos de la región mazateca del Geoportal de CONABIO. La integración de múltiples fuentes de información geoespacial sigue el enfoque propuesto por Geist y Lambin (2002)

para el análisis multidimensional de los determinantes del cambio de uso del suelo.

Clasificación de coberturas y procesamiento de imágenes satelitales

La clasificación de coberturas de suelo en paisajes cafetaleros se diseñó con el propósito de analizar las dinámicas de transformación de los SAC, integrando criterios ecológicos, niveles de intensidad de uso y patrones de cambio documentados en la literatura científica (Moguel y Toledo, 1999;

Perfecto *et al.*, 2019). Se definieron seis categorías que permiten identificar transiciones clave entre SAC y otros usos del suelo, y contextualizar estas transformaciones dentro de la matriz paisajística, conforme a los principios de ecología del paisaje aplicados a agroecosistemas tropicales (Jha *et al.*, 2014). Las categorías establecidas fueron las siguientes:

1. Suelos urbanos y áreas descubiertas. Esta categoría representa la presión antrópica máxima sobre los SAC e incluye zonas urbanizadas, infraestructura y superficies sin cobertura vegetal. Su inclusión es crítica, ya que permite identificar procesos de fragmentación y expansión urbana, especialmente en áreas colindantes con cafetales, que suelen ser las primeras en transformarse (Seto *et al.*, 2012). Su monitoreo es clave para anticipar futuras conversiones de uso de suelo.
2. Bosques y selvas. Actúan como referencia ecológica para evaluar procesos de renaturalización de SAC abandonados (Chazdon *et al.*, 2016). Se clasifican mediante un umbral de cobertura del dosel superior al 80 %, lo que permite distinguir entre bosques maduros y SAF en estados avanzados de sucesión ecológica (Poorter *et al.*, 2016).
3. Sistemas agroforestales de café (SAC). Delimitados por la presencia simultánea de cafetales y árboles de sombra, constituyen el objeto central del análisis (Harvey *et al.*, 2021).
4. Cultivos anuales. Son el principal competidor espacial de los SAC (Baerenklau *et al.*, 2012). En la región mazateca los campesinos establecen sus cultivos de maíz en áreas adyacentes a los SAF, lo que contribuye a la fragmentación del paisaje cafetalero (Jaramillo *et al.*, 2022).
5. Cuerpos de agua. Incluyen ríos, lagunas y otras superficies acuáticas sensibles a los cambios de cobertura en las cuencas cafetaleras (Allan *et al.*, 2020).
6. Áreas con cobertura nubosa. Corresponden a zonas no clasificables debido a la presencia de nubosidad en las imágenes satelitales. Aunque no constituyen una categoría de cobertura en sentido estricto, su identificación es necesaria

para asegurar la transparencia en el análisis multitemporal.

Esta categorización permite evaluar transformaciones en el paisaje y sus implicaciones para la sostenibilidad agrícola y la conservación (Jha *et al.*, 2014), facilitando la comparación con estudios previos en regiones cafetaleras de Mesoamérica.

El pre-procesamiento de imágenes satelitales se realizó siguiendo protocolos estandarizados para estudios multitemporales en paisajes heterogéneos (Panuju *et al.*, 2020). Inicialmente se descargaron bandas multiespectrales previamente ortorrectificadas y con corrección atmosférica. Dado que la región mazateca se extiende sobre dos escenas satelitales (*path/row*) el área de estudio se dividió en zonas norte y sur, extrayéndose las bandas correspondientes a cada una de ellas. Los mosaicos se generaron mediante la herramienta de combinación en QGIS, asignando el valor 0 como “sin datos” para evitar artefactos en los bordes. Posteriormente, se generaron compuestos multibanda utilizando el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), creando rásteres compuestos (*stack bands*) para cada fecha de análisis (Congedo, 2021).

Se implementaron mejoras radiométricas y espaciales mediante el algoritmo de Normalización Radiométrica Relativa (RRN) con el fin de homogeneizar los valores radiométricos entre imágenes de diferentes fechas, siguiendo la metodología propuesta por Wu *et al.* (2015) para estudios multitemporales en sistemas agroforestales. Las bandas de 20 m de resolución de Sentinel-2 fueron remuestreadas a 10 m mediante convolución cúbica. Además, se calcularon índices de vegetación (NDVI, SRI y ARVI) que han demostrado mejorar significativamente la discriminación entre coberturas forestales y agroforestales en paisajes tropicales y subtropicales (Vaglio *et al.*, 2016).

La clasificación supervisada se realizó con base en la tipología previamente descrita. Las áreas de entrenamiento se generaron aplicando combinaciones específicas de bandas para facilitar la interpretación visual, siguiendo las recomendaciones de Dutra (2020) para la discriminación de sistemas agroforestales en imágenes multies-

pectrales. Se digitalizaron Regiones de Interés (ROI) en el módulo SCP de QGIS, estableciendo un mínimo de diez áreas de entrenamiento por clase, con al menos 100 píxeles por categoría y distribución espacial homogénea para capturar la variabilidad espectral intraclase, conforme a los criterios establecidos para clasificaciones en paisajes heterogéneos (Vaglio *et al.*, 2016). La clasificación se ejecutó mediante el algoritmo de Máxima Verosimilitud, seleccionado por su robustez demostrada en estudios previos sobre sistemas agroforestales (Lemenkova, 2024).

Análisis de los cambios de coberturas

Tras la clasificación supervisada, se realizó la conversión de los mapas resultantes de formato ráster a vector (*shapefile*), seguida de un riguroso proceso de corrección topológica siguiendo metodologías consolidadas en la literatura científica (Chen *et al.*, 2012). Este proceso incluyó la corrección de geometrías para eliminar inconsistencias, disolución de polígonos adyacentes de la misma clase utilizando el atributo “DN”, creación de índices espaciales para optimizar operaciones analíticas y reproyección a sistema UTM para garantizar cálculos de área precisos.

Para el análisis cuantitativo de cambios de coberturas, se calcularon las superficies en hectáreas para cada categoría de uso/cobertura en cada período temporal. Este análisis fue estructurado para identificar y cuantificar procesos específicos relevantes para la comprensión de las dinámicas territoriales en paisajes cafetaleros, aplicando la metodología propuesta por Pontius *et al.* (2004) y adaptada por Perfecto *et al.* (2007) para contextos agroforestales.

Los procesos analizados incluyeron: deforestación (transición de bosques-selvas a otras categorías), degradación forestal (transición de bosques-selvas a sistemas agroforestales), intensificación agrícola (transición de sistemas agroforestales a cultivos anuales), abandono agrícola (transición de áreas cultivadas a bosques y selvas) y urbanización (expansión de áreas urbanas sobre otras categorías).

Para cada proceso se calcularon tasas anuales de cambio según la fórmula propuesta por FAO (1996): $r = (1/t) * \ln(A2/A1)$, donde t representa

el intervalo temporal en años, A1 la superficie inicial y A2 la superficie final. Adicionalmente, se determinaron porcentajes de superficie afectada respecto al total regional y se analizaron patrones espaciales de agregación.

Análisis de transición

Se aplicó el método de intersección entre mapas de fechas consecutivas para generar matrices de transición, siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Pontius *et al.* (2004). Esta técnica permitió la creación de campos “T1_T2” mediante concatenación de códigos de clase (T1 para fecha inicial, T2 para fecha final), facilitando el cálculo de áreas de transición entre todas las combinaciones posibles de categorías. Los datos resultantes fueron exportados en formato XML para su análisis estadístico detallado, permitiendo cuantificar no solo magnitudes absolutas y relativas de cambio, sino también trayectorias específicas de transformación territorial.

Se generaron matrices de transición a partir del cruce de las capas de uso de suelo para identificar las superficies que permanecieron sin cambios (diagonal principal) y las transiciones de uso de suelo a otra (fuera de la diagonal). Las matrices de transición fueron generadas para los períodos 1994-2001, 1994-2015, 1994-2024, 2001-2015, 2001-2024 y 2015-2024, permitiendo cuantificar componentes fundamentales del cambio de uso del suelo: persistencia (áreas que mantuvieron la misma categoría), ganancias (áreas incorporadas a cada categoría), pérdidas (áreas que cambiaron desde cada categoría), cambios netos (diferencia entre ganancias y pérdidas) e intercambios (cambios bidireccionales entre categorías). Este enfoque analítico, validado por Rudel *et al.* (2005) en estudios sobre transformaciones forestales en América Latina, facilita la identificación de patrones temporales no lineales que podrían quedar ocultos en análisis de menor resolución temporal.

Todo el procesamiento y análisis geoespacial se realizó utilizando QGIS 3.28 con el complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) para el procesamiento de imágenes y clasificación. Los datos cuantitativos finales y la generación de gráficos se procesaron en Excel.

Se reconocen como limitaciones metodológicas la resolución espacial diferencial entre sensores, potenciales imprecisiones en la discriminación entre sistemas agroforestales complejos y bosques secundarios, posibles sesgos de recuerdo en datos retrospectivos de entrevistas y la exclusión de áreas con cobertura nubosa persistente. Estas limitaciones fueron abordadas mediante protocolos de validación rigurosa y triangulación de fuentes de información múltiples, siguiendo las recomendaciones de Congalton y Green (2019) para maximizar la robustez de los resultados en estudios multitemporales de cambio de uso del suelo.

Levantamiento de información socioeconómica

Como complemento al análisis espacial, se desarrolló un componente cualitativo para identificar los factores que han impulsado el cambio de uso de suelo y el abandono los SAC en la región mazateca. Se realizaron entrevistas abiertas a 103 productores de café de la región mazateca (Santa Cruz Acatepec, Santa María Chilchotla, Huautla de Jiménez, San Juan Coatzacoapam, San José Tenango, Huautepéc, San Bartolomé Ayautla, San Mateo Yoloxochitlán) y a cinco informantes clave, técnicos-productores con liderazgo comunitario y autoridades municipales, enfocadas en recuperar percepciones y experiencias sobre los procesos que han moldeado la cafecultura en las últimas décadas.

A partir de estas entrevistas se sistematizaron seis categorías que, de acuerdo con Robles (2011) y con Guerrero *et al.* (2020), han sido determinantes en la cafecultura de México: factores de mercado (caída y volatilidad de los precios internacionales del café), desaparición del marco institucional (retiro de organismos de apoyo como INMECAFÉ), inefectividad de programas actuales (débil impacto de iniciativas de fomento productivo), migración (salida de jóvenes y reducción de mano de obra), problemas fitosanitarios (particularmente los brotes de roya) y variabilidad climática (cambios en patrones de precipitación y temperatura). Estas dimensiones fueron empleadas para contextualizar los hallazgos del análisis multitemporal de imágenes satelitales, fortaleciendo la interpretación socioecológica de las trayectorias de abandono,

regeneración forestal y reconversión productiva observadas en la región.

Para el análisis se diseñó una matriz de codificación que permitió agrupar las respuestas obtenidas en las entrevistas en ejes temáticos previamente definidos a partir de la literatura y de los testimonios preliminares. Con esta base se aplicó un conteo de frecuencias y cálculo de porcentajes para estimar la importancia relativa de cada eje y facilitar su comparación.

Análisis de las dinámicas de los sistemas socio-ecológicos de los SAC

El análisis de los sistemas socio-ecológicos en la región mazateca se fundamentó en el marco teórico de trayectorias de adaptación y transformación propuesto por Nelson *et al.* (2007), adaptado al contexto de los sistemas cafetaleros por Guerrero y Hernández (2024). Este enfoque permitió interpretar las dinámicas de cambio desde una perspectiva integrada articulando procesos ecológicos y respuestas sociales.

Para el análisis de trayectorias de adaptación, se identificaron las estrategias implementadas por los actores locales frente a perturbaciones como la crisis del café y brotes de roya. Esto incluyó la evaluación de cambios en prácticas productivas, como la transición de sistemas agroforestales a cultivos anuales o el abandono de tierras, documentados mediante el análisis espacial. Estos patrones se interpretaron como respuestas adaptativas a presiones socioeconómicas y ambientales.

Por su parte, las trayectorias de transformación caracterizaron las nuevas configuraciones postdisturbio, como la expansión de bosques secundarios por abandono y los procesos de urbanización. Estas transiciones se evaluaron para determinar si representaban una reorganización sostenible o un deterioro irreversible, utilizando los criterios propuestos por Walker *et al.* (2004). El análisis reveló una polarización del paisaje entre áreas de regeneración natural y zonas de intensificación agrícola.

Este enfoque socio-ecológico permitió interpretar las dinámicas observadas no como simples cambios de cobertura, sino como procesos complejos en los que confluyen decisiones humanas y presiones externas reconfigurando el paisaje cafetalero maza-

teco a lo largo del período de estudio (1994-2024). Los resultados destacan la interacción entre factores ecológicos y sociales en la configuración de las trayectorias de cambio identificadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación de coberturas

Los mapas generados muestran la evolución espacio-temporal del uso de suelo en la región mazateca entre 1994, 2001, 2015 y 2024, evidenciando transformaciones significativas en la distribución de las coberturas (Figura 2). A lo largo de este periodo, se observa una reducción marcada de los sistemas agroforestales de café (SAC), acompañada de una creciente fragmentación del paisaje agroforestal (parches dispersos y reducidos), mientras que las áreas de bosques, selvas y cultivos anuales registran una expansión importante.

En la Figura 2, en coberturas de 2024, muestra el impacto de un incendio forestal de gran magnitud ocurrido en junio de ese año, el cual afectó una extensión significativa de bosques mesófilos de montaña (área con mancha continua de suelo descubierto), transformando amplias zonas de vegetación en suelo descubierto. Este evento podría incidir en la dinámica del cambio de uso de suelo observada en la etapa final del periodo analizado.

La generación de estas coberturas permitió identificar tres patrones críticos en la región mazateca: 1) la pérdida acelerada de los SAC, actualmente reducidos a parches aislados; 2) una dinámica activa en suelos urbanos y áreas descubiertas, con fluctuaciones espacio-temporales vinculadas a presiones antrópicas y 3) la afectación de una extensión considerable de bosques y selvas por el incendio de 2024, que transformó áreas continuas de vegetación en zonas degradadas. Estos resultados no solo evidencian la alta vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos ante perturbaciones, sino que también establecen una base geoespacial para cuantificar la magnitud de dichas transformaciones.

Cambios en la superficie de las coberturas

Los SAC experimentaron una reducción significativa durante el período de estudio. Entre 1994

y 2024, su superficie disminuyó de 43 756 ha a 13 780 ha, lo que representa una pérdida neta de 29 976 ha, equivalente al 68.5 % de la superficie original (Figura 3). Estos resultados coinciden con los periodos de declive en la producción de café registrado en los datos del SIAP (Figura 4), lo que refuerza la hipótesis de un declive sostenido de los SAC experimentaron una tendencia a la baja, reflejado tanto en la contracción espacial como en la caída de la producción cafetalera.

La reducción en las coberturas de los SAC no ha sido uniforme a lo largo del tiempo. Entre 1994 y 2001, la pérdida fue relativamente marginal: la superficie disminuyó de 43 736 ha a 43 069 ha, lo que representa una reducción de 666 ha (1.5 %). No obstante, la fase más crítica se registró entre 2001 y 2015, cuando los SAC se redujeron drásticamente de 43 069 ha a 16 324 ha, con una pérdida neta de 26 745 ha (62.1 %). Esta tendencia descendente continuó hasta 2024, con una disminución adicional que situó la superficie de los SAC en 13 791 ha.

Transición de SAC a otras coberturas

La matriz de transición (Cuadro 1) presenta las combinaciones de cambio para todos los períodos analizados. El intervalo más crítico, responsable de más del 80 % de las dinámicas observadas se produjo de 2001 a 2015. Otros períodos, como 1994-2001 y 2015-2024, mostraron transiciones similares en dirección, pero menores en magnitud.

El análisis de transición para el período 1994-2024 revela que de 43 756 ha de SAC registradas en 1994, únicamente 5 864 ha (13.4 %) conservaron esta cobertura hasta 2024. La mayor parte de la superficie original experimentó una transición hacia bosques y selvas, con 26 557 ha (60.7 %), seguida por la conversión a cultivos anuales (8 338 ha; 19.1 %), suelo urbano y áreas descubiertas (2 639 ha; 6.0 %), y cuerpos de agua (359 ha; 0.8 %). Esta distribución evidencia que la mayor parte de los sistemas agroforestales fueron objeto de sucesión hacia vegetación natural o de reconversión hacia usos productivos alternativos.

Durante el período 2001-2015, que corresponde a la fase de mayor transformación, de las 43 083 ha

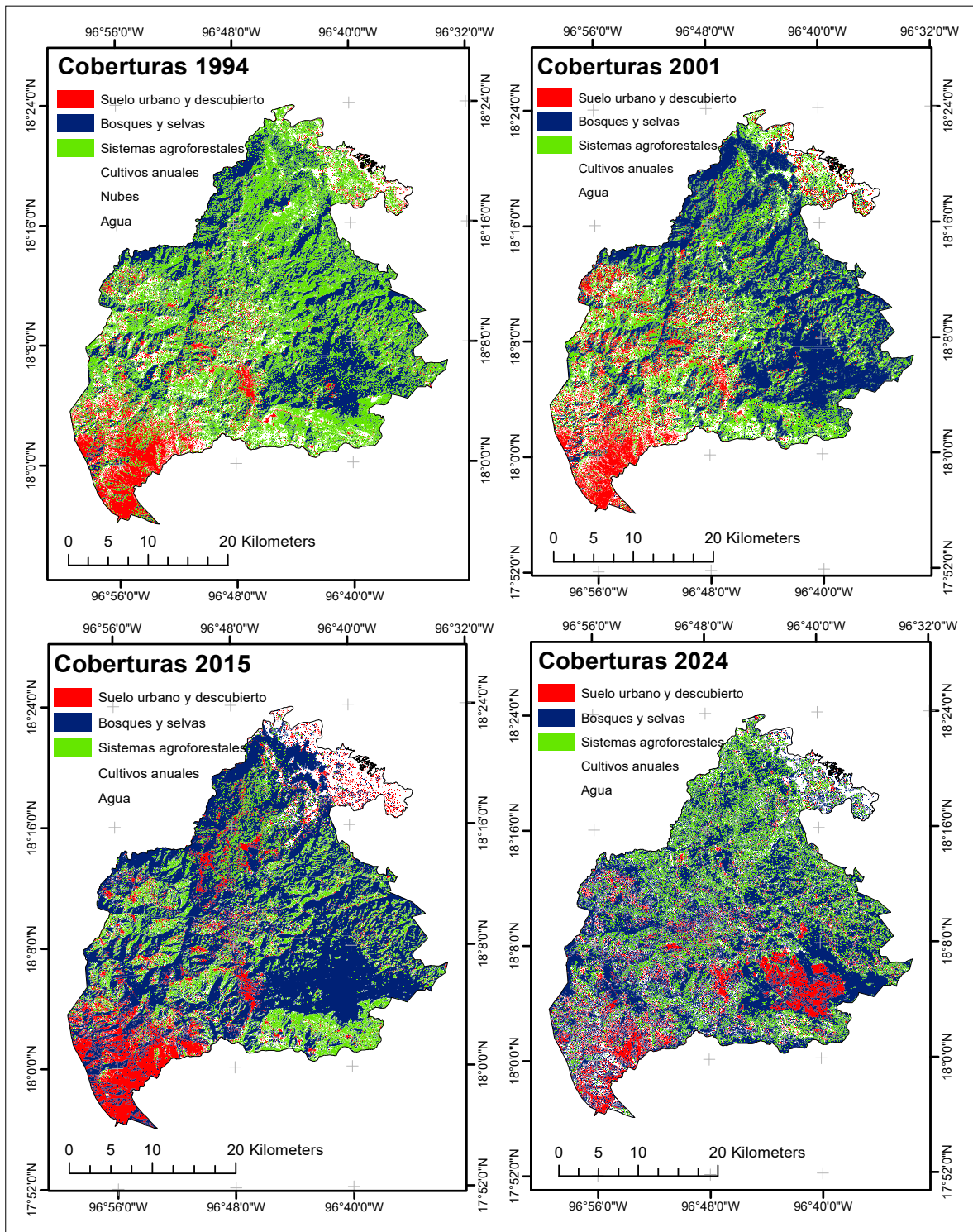


Figura 2. Mapas de cambio de uso de suelo 1994, 2001, 2015 y 2024. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de análisis de teledetección.

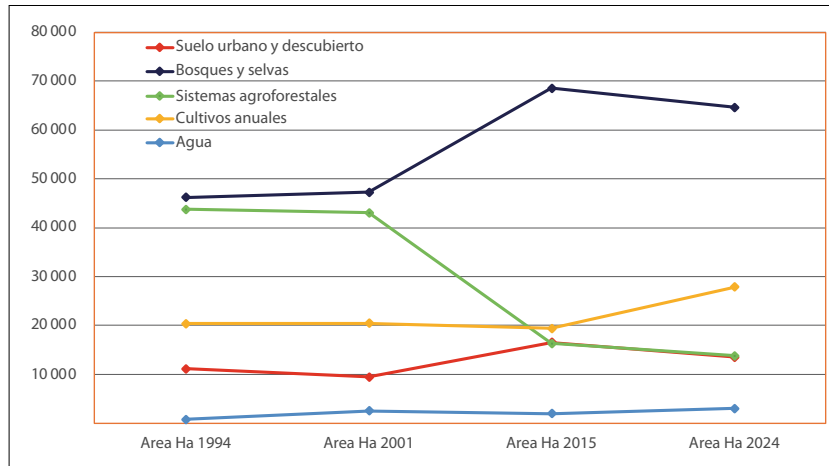


Figura 3. Tendencia de coberturas en los SAC en la región mazateca (1994–2024). Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de análisis de teledetección.

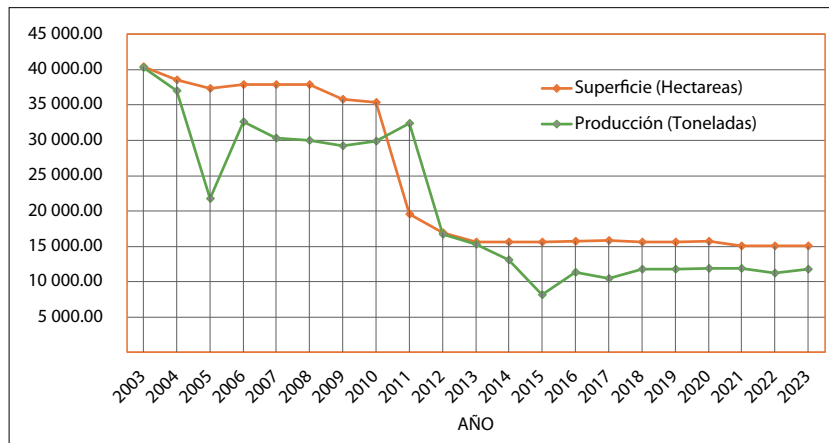


Figura 4. Tendencia productiva de café en la región mazateca (en hectáreas y toneladas). Fuente: elaboración propia con datos del SIAP 2025.

Cuadro 1. Matriz de transición de cambio de uso de suelo de 1994 a 2024 en hectáreas.

Periodo 1994 - 2001	SUD (Ha)	BYS	SAC	CA	Agua	Total 1994
SUD	6 030	248	1 127	3 272	475	11 152
BYS	1 139	37 858	6 551	460	214	46 222
SAC	602	8 857	28 659	5 424	194	43 736
CA	1 632	252	6 518	11 248	719	20 369
Agua	3	-	-	-	774	777
Nubes	44	47	215	36	158	500
Total 2001	9 450	47 262	43 070	20 440	2 534	122 757

Periodo 1994–2015	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 1994
SUD	7 331	2 388	247	938	242	11 146
BYS	1 157	43 246	748	1 069	24	46 243
SAC	3 018	19 853	11 175	9 486	219	43 753
CA	4 880	3 028	4 070	7 706	665	20 350

Cuadro 1. Continúa.

Periodo 1994–2015	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 1994
Agua	13	9	-	56	688	766
Nubes	74	102	86	130	106	499
Total 2015	16 473	68 626	16 327	19 386	1 945	122 757

Periodo 1994–2024	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 1994
SUD	4 514	2 215	201	3 800	413	11 143
BYS	3 748	26 881	6 403	9 069	132	46 232
SAC	2 639	26 557	5 864	8 338	359	43 756
CA	2 513	8 811	1 263	6 609	1 167	20 363
Agua	7	5	-	2	753	767
Nubes	59	173	49	68	147	497
Total 2024	13 479	64 642	13 780	27 885	2 970	122 757

Periodo 2001–2015	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 2001
SUD	6 192	2 169	221	764	98	9 445
BYS	846	43 541	1 368	1 474	53	47 283
SAC	3 187	19 033	11 206	9 576	81	43 083
CA	6 143	3 570	3 526	7 115	84	20 439
Agua	106	313	3	456	1 629	2 508
Total 2015	16 475	68 627	16 324	19 385	1 946	122 757

Periodo 2001–2024	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 2001
SUD	3 897	1 846	201	3 272	227	9 444
BYS	3 337	29 126	6 591	8 041	178	47 273
SAC	3 130	25 125	5 657	8 970	206	43 088
CA	3 080	8 296	1 332	7 456	279	20 444
Agua	56	223	15	132	2 080	2 507
Total 2024	13 501	64 616	13 796	27 872	2 972	122 757

Periodo 2015–2024	SUD	BYS	SAC	CA	Agua	Total 2015
SUD	6 168	2 161	220	761	98	9 407
BYS	843	43 368	1 363	1 468	53	47 094
SAC	3 174	18 957	11 161	9 538	81	42 911
CA	6 119	3 556	3 512	7 086	84	20 357
Agua	106	312	3	454	2 113	2 988
Total 2024	16 409	68 353	16 259	19 308	2 428	122 757

Descripción: Suelo urbano y descubierto (SUD) Bosques y selvas (BYS)
 Sistemas agroforestales de café (SAC) Cultivos anuales (CA) Agua y Nubes.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de análisis de teledetección.

de sistemas agroforestales existentes en 2001, solo 11 206 ha (26.0 %) conservaron esta cobertura hasta 2015. La conversión más significativa fue hacia bosques y selvas, con 19 033 ha (44.2 %), seguida por la transición a cultivos anuales (9576 ha; 22.2 %) y a suelo urbano o áreas descubiertas (3 187 ha; 7.4 %). Una fracción mínima, de apenas 81 ha (0.2 %), se convirtió en cuerpos de agua. Este patrón de transición sugiere procesos de abandono de cafetales y reconversión productiva durante este período crítico.

En contraposición a la reducción de los sistemas agroforestales, las coberturas de bosques y selvas experimentaron un aumento considerable durante el período de estudio. Entre 1994 y 2024, esta cobertura se incrementó en 18 410 ha, pasando de 46 232 ha a 64 642 ha. El mayor incremento se registró durante el período 2001-2015, con una ganancia neta de 21 344 ha. Este crecimiento se produjo, principalmente, a expensas de los sistemas agroforestales, lo que sugiere un proceso de regeneración natural en áreas cafetaleras abandonadas.

Los cultivos anuales también registraron una expansión significativa. En el mismo periodo, esta cobertura aumentó en 7 522 ha, al pasar de 20 363 ha a 27 885 ha. El mayor incremento se observó durante el período 2001-2024, con una ganancia neta de 7 428 ha. Esta expansión refleja procesos de reconversión productiva hacia cultivos de ciclo corto en terrenos previamente ocupados por sistemas agroforestales.

La cobertura de suelos urbanos y descubiertos presentó una dinámica no lineal entre 1994 y 2024. Aunque el incremento neto fue de 2 350 ha (de 11 152 ha a 13 502 ha), se observaron importantes fluctuaciones: una reducción entre 1994 y 2001 (-1702 ha), un aumento entre 2001 y 2015 (+7029 ha), y una nueva disminución hacia 2024 (-2977 ha). Estos cambios reflejan una dinámica intensa de procesos de deforestación, incendios forestales, sequías, habilitación de terrenos para cultivos anuales y urbanización, así como fuertes transiciones hacia coberturas de bosque y selvas en ciertos periodos.

La matriz de transición revela que, durante el período 1994-2024, los SAC registraron una baja

tasa de permanencia, ya que solo el 13.4 % de su superficie original se mantuvo sin cambios hasta 2024. En contraste, los bosques y selvas mostraron mayor estabilidad, con un 58.1 % de permanencia. Los cultivos anuales conservaron el 32.5 % de su superficie inicial, mientras que el suelo urbano y descubierto mantuvo el 40.5 %. Estos resultados indican que los sistemas agroforestales fueron la cobertura más dinámica y susceptible a transformaciones durante el período analizado.

Determinantes socioeconómicos y testimonios locales en la transformación de los SAC

La transformación de los SAC en la región mazateca responde a un entramado de factores económicos, institucionales, sociales y ambientales que actúan de manera simultánea y acumulativa. Entre los elementos más relevantes destacan las presiones del mercado, el desmantelamiento de estructuras de apoyo estatal, la limitada eficacia de los programas públicos, los flujos migratorios, los problemas fitosanitarios y la creciente variabilidad climática (Cuadro 2). El análisis de estos determinantes, a partir de las percepciones locales y de las valoraciones técnicas, permite comprender las múltiples rutas que han llevado al colapso de la cafecultura y a la reconfiguración de los paisajes productivos en la región.

La comparación muestra una convergencia clara en la identificación de factores estructurales: bajos precios, fragilidad del marco institucional, limitada efectividad de programas, migración, problemas fitosanitarios y variabilidad climática. Los productores subrayan los efectos inmediatos sobre los medios de vida (ingresos, disponibilidad de mano de obra y estrategias de subsistencia), mientras que las apreciaciones técnicas sitúan esas manifestaciones dentro de procesos sistémicos de falla institucional, desarticulación de cadenas de valor y déficit en asistencia técnica. Esta complementariedad indica que la transformación de los SAC es un fenómeno multidimensional y sinérgico: que erosionan las trayectorias de adaptación y favorecen trayectorias de abandono y transformación de los sistemas socioecológicos cafetaleros de la región mazateca.

Cuadro 2. Principales causas del colapso en la cafecultura mazateca.

Factor específico	Perspectiva de productores	Perspectiva de informantes clave/técnicos
Factores de mercado	71% de los productores han experimentado directamente los bajos precios internacionales del café que afecta la rentabilidad de la actividad cafetalera.	Analizan estructuralmente el impacto de los bajos precios internacionales e identifican la falta de organización productiva para una comercialización más rentable.
Desaparición del marco institucional	81%, sugieren la pérdida del apoyo que brindaba INMECAFÉ. Quedaron sin respaldo institucionales para enfrentar problemas productivos, certidumbre comercial y sin acceso a asistencia técnica.	Destacan especialmente la falta de asistencia tecnológica, créditos y programas de renovación de cafetales tras la desaparición de INMECAFÉ. Identifican vacío institucional que dejó desprotegidos a pequeños cafecultores.
Inefectividad de programas actuales	57% mencionaron que los programas dirigidos al campo como PROCAFE, no han mostrado resultados importantes en la cafecultura de la región. Incluso visualizan mayor efectividad de los programas asistencialistas que en los productivos.	Evalúan críticamente la efectividad de los programas dirigidos al campo. Identifican desconexión entre las políticas públicas dirigidas al campo y las necesidades reales locales.
Migración	El 53% señaló la migración de familiares como una de las principales causas. “Los jóvenes, sin perspectivas económicas en la cafecultura, optan por migrar a centros urbanos como (Ciudad de México, Puebla, Tehuacán y Estados Unidos) o integrarse a programas gubernamentales en lugar de trabajar el campo”. Esto provoca una drástica reducción de mano de obra en las comunidades y el abandono acelerado de cafetales por falta de rentabilidad.	Documentan la migración como factor determinante del abandono de SAC. Analizan la relación directa entre flujos migratorios y abandono de sistemas productivos. Identifican, baja rentabilidad productiva, desarraigo social y territorial de comunidades enteras. Observan, además, la pérdida acelerada de conocimientos tradicionales cafetaleros. Identifican ruptura en la transmisión intergeneracional del saber agrícola y técnicas de manejo de SAC.
Problemas fitosanitarios	93% mencionaron a las plagas y enfermedades como uno de los problemas más importantes, con los efectos de la roya del café en 2011, 2012. Perciben una imposibilidad sistémica de combatir la enfermedad sin apoyo técnico ni recursos económicos.	Identifican técnicamente la roya como factor crítico de abandono. Documentan falta de capacitación para manejo integrado de plagas y ausencia de programas de renovación varietal resistente.
Variabilidad climática	83% observan cambios evidentes en los patrones climáticos locales que afectan negativamente la producción de café y otros cultivos.	Documentan técnicamente los efectos de la variabilidad climática en los SAC y relacionan el cambio climático con la mayor vulnerabilidad de estos sistemas productivos.

Fuente: elaboración propia.

Dinámicas socioecológicas de los SAC

Las dinámicas socioecológicas en los SAC de la región mazateca revelan trayectorias diferenciadas de adaptación y transformación. El análisis muestra patrones complejos donde factores bio-

físicos, económicos y socioculturales interactúan de manera no lineal, generando transiciones hacia nuevos regímenes ecológicos y productivos. Estas dinámicas reflejan la capacidad diferencial de los actores locales para responder a perturbaciones

externas, así como los límites de resiliencia de los sistemas tradicionales. La coexistencia de procesos de abandono, intensificación agrícola y urbanización ilustra la naturaleza multidimensional de los cambios en sistemas socioecológicos bajo presión (Liu *et al.*, 2007).

La pérdida del 68.5 % de su superficie de los SAC entre 1994 y 2024 indica un cambio trascendental en el uso del suelo y el colapso del sistema productivo tradicional que, hasta finales del siglo XX, funcionó como eje articulador socioeconómico y cultural de la región mazateca (Guerrero y Hernández, 2024). Esta transformación excede ampliamente lo reportado en otras regiones cafetaleras de México, como la región Golfo-Centro de Veracruz, donde las reducciones de la superficie agroforestal apenas alcanzan el 12 % (Martínez *et al.*, 2009), lo que sugiere la presencia de vulnerabilidades estructurales específicas en el contexto mazateco.

El patrón no lineal de cambio registrado entre 2001 y 2015, cuando se perdió el 62.1 % de los SAC, coincide con eventos críticos como la caída de los precios internacionales del café (Guerrero *et al.*, 2020), la epidemia de roya (Avelino *et al.*, 2015) y el vacío institucional generado tras la desaparición del INMECAFÉ (Robles, 2011). Estos factores operaron de forma sinérgica, empujando al sistema más allá de su umbral de resiliencia (Walker *et al.*, 2004) hacia un estado alternativo difícilmente reversible.

La transformación del 60.7 % de los SAC hacia coberturas de bosques y selvas sugiere un abandono forzado más que una transición planificada, resultado de factores externos que exceden la capacidad de gestión local. Este proceso ha dado lugar a una singularidad ecológica: la regeneración natural de la cobertura forestal. Tal conversión expresa una forma de resiliencia ecológica, en la que el abandono de áreas agroforestales ha permitido el inicio de una sucesión secundaria y la recuperación parcial de las funciones ecosistémicas (Chazdon *et al.*, 2016).

La conversión de SAC a cultivos anuales (19.1 %) constituye una segunda trayectoria de cambio, vinculada a estrategias de adaptación reactiva o maladaptativa (Barnes *et al.*, 2017). En la región mazateca, estos cultivos (principalmente maíz y

frijol) se caracterizan por sus bajos rendimientos y un manejo convencional con escaso desarrollo tecnológico (Jaramillo *et al.*, 2021). Esta forma de reconversión productiva refleja tanto la vulnerabilidad socioecológica como la marginación histórica de los productores, quienes, ante la ausencia de alternativas sostenibles, adoptan estrategias de corto plazo orientadas a garantizar su subsistencia inmediata (Robles, 2011).

Cinner *et al.* (2018) plantean que, en contextos de pobreza y exclusión, las decisiones relativas a los cambios de uso del suelo tienden a maximizar el aprovechamiento inmediato del espacio, aun a costa de la degradación de la base de recursos. No obstante, este tipo de transiciones compromete la sostenibilidad de los medios de vida al reducir la capacidad adaptativa y erosionar servicios ecosistémicos clave (Folke *et al.*, 2010).

El tercer patrón de relevancia fue el incremento de suelos urbanos y áreas descubiertas (6.0 %). Aunque cuantitativamente menor, esta transformación tiene implicaciones socioecológicas profundas. El incendio forestal de 2024 en áreas de bosques y selvas naturales ilustra cómo las transformaciones previas, como el abandono de los SAC y la expansión de cultivos anuales mediante prácticas de roza, tumba y quema, pueden acumular vulnerabilidades que predisponen al sistema a nuevas perturbaciones. Este evento, lejos de ser aislado, podría intensificar ciclos de degradación del paisaje (Turner *et al.*, 2020). Estas dinámicas reflejan lo que Folke *et al.* (2010) denominan “trampas de pobreza ecológica”, en las que el colapso de sistemas productivos diversificados conduce a estados menos deseables tanto ecológica como socialmente. Las implicaciones para la resiliencia socioecológica son profundas. Como advierte Folke (2006), la pérdida de los SAC –sistemas tradicionalmente diversos y adaptativos– reduce la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder funcionalidad.

No obstante, la regeneración forestal observada podría representar un nuevo “ciclo adaptativo” donde el sistema entra en una fase de reorganización hacia una configuración alternativa (Walker *et al.*, 2004). La cuestión crítica, como señala Ostrom (2009), es si las instituciones locales y regionales

son capaces de orientar esa reorganización hacia trayectorias más sostenibles.

La experiencia mazateca ofrece lecciones fundamentales para la gobernanza de sistemas socioecológicos en contextos de alta vulnerabilidad. La fragilidad o incluso la ausencia de redes institucionales que respalden al sector campesino puede convertir crisis sectoriales temporales en transformaciones socioecológicas irreversibles (Ostrom, 2009; Aggarwal y Anderies, 2023). Este estudio documenta las dimensiones del colapso socioeconómico del sistema cafetalero y sus profundas repercusiones en los patrones de cambio de uso del suelo. Si bien los bosques secundarios y cultivos anuales emergen como producto de los nuevos equilibrios ecosistémicos, su origen en proceso de abandono no planificado limita significativamente su capacidad para sostener medios de vida resilientes o conservar biodiversidad funcional (Chazdon et al., 2019).

Frente a esta complejidad, las intervenciones futuras deberán asumir un enfoque multinivel, reconociendo que la restauración efectiva de paisajes agroforestales exige algo más que soluciones técnicas o ecológicas. Implica, además, la reconstrucción deliberada del capital social, el fortalecimiento de las capacidades adaptativas locales y la consolidación de instituciones comunitarias capaces de navegar las incertidumbres socioambientales (Aldrich et al., 2014).

CONCLUSIONES

La aproximación metodológica, basada en el análisis multitemporal de imágenes satelitales y técnicas de clasificación supervisada complementada con análisis de percepciones locales, permitió capturar de manera integral las dinámicas territoriales en la región mazateca. Los hallazgos revelan una transformación sin precedentes en los paisajes cafetaleros: lejos de constituir un proceso lineal de degradación ambiental, los SAC experimentaron una compleja reconfiguración socioecológica, en la que el 60.7 % de su superficie transitó hacia bosques secundarios, demostrando una notable capacidad de regeneración natural. Este fenómeno cuestiona los modelos tradicionales de interpreta-

ción del abandono agrícola y plantea la necesidad de marcos analíticos—como el enfoque de sistemas socioecológicos adoptado en este trabajo— que permitan comprender las dinámicas no lineales de transformación territorial.

Este estudio trasciende los resultados empíricos, al proponer un marco conceptual que concibe a los territorios cafetaleros como sistemas socioecológicos dinámicos. Esta perspectiva permite observar cómo las transformaciones paisajísticas emergen de interacciones complejas entre factores globales y locales, entre procesos ecológicos y decisiones humanas, y entre fuerzas de cambio y capacidades de adaptación. Más que ofrecer conclusiones definitivas, estos hallazgos abren nuevas líneas de investigación sobre la gobernanza de paisajes en transición y los umbrales de resiliencia de los sistemas agroforestales tradicionales ante perturbaciones.

Desde la perspectiva de política pública, los resultados plantean desafíos y oportunidades singulares. Por un lado, la regeneración observada sugiere la posibilidad de diseñar estrategias de conservación basadas en procesos naturales. Por otro, la persistencia de sistemas agroforestales residuales—equivalentes al 13.4 % de la superficie original—subraya la necesidad de programas de apoyo diferenciados que fortalezcan su viabilidad económica y ecológica. Particular atención merece el 19.1 % de área convertida a cultivos anuales, expresión de las estrategias de subsistencia en contextos de alta vulnerabilidad, que demanda intervenciones sensibles a las condiciones socioeconómicas locales.

REFERENCIAS

- Aggarwal, R. y Anderies, J. (2023). Understanding how governance emerges in social-ecological systems: Insights from archetype analysis. *Ecology and Society*, 28(2), art2. <https://doi.org/10.5751/ES-14061-280202>
- Aldrich, D. P. y Meyer, M. A. (2015). Social Capital and Community Resilience. *American Behavioral Scientist*, 59(2), 254-269. <https://doi.org/10.1177/0002764214550299>
- Alvarez-Alvarez, E. A., Almazán-Núñez, R. C., González-García, F., Brito-Millán, M., Méndez-Bahena, A. y García-Ibáñez, S. (2021). Shade coffee plantations

- maintain woody plant diversity and structure in a cloud forest landscape of southern Mexico. *Journal of Forestry Research*, 32(2), 637-648. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01143-5>
- Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F. P. L., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R. L., Meave, J. A., Norden, N., Santos, B. A., Leal, I. R. y Tabarelli, M. (2017). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: New insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research: Multiple successional pathways. *Biological Reviews*, 92(1), 326-340. <https://doi.org/10.1111/brv.12231>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A. J. y Morales, C. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security*, 7(2), 303-321. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-9>
- Baerenklau, K. A., Ellis, E. A. y Marcos-Martinez, R. (2013). Economics of Land Use Dynamics in two Mexican Coffee Agroforests: Implications for the Environment and Inequality. *Investigación Económica*, 71(279). <https://doi.org/10.22201/fe.01851667p.2012.279.37329>
- Barnes, M. L., Bodin, Ö., Guerrero, A. M., McAllister, R. R. J., Alexander, S. M. y Robins, G. (2017). The social structural foundations of adaptation and transformation in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 22(4), art16. <https://doi.org/10.5751/ES-09769-220416>
- Chazdon, R. L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Zambrano, A. M. A., Aide, T. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H. S., Craven, D., Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A. L., De Jong, B., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., Poorter, L. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2(5), e1501639. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501639>
- Chazdon, R. L., Lindenmayer, D., Guariguata, M. R., Crouzeilles, R., Rey Benayas, J. M. y Lazos Chavero, E. (2020). Fostering natural forest regeneration on former agricultural land through economic and policy interventions. *Environmental Research Letters*, 15(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab79e6>
- Chen, G., Hay, G. J., Carvalho, L. M. T. y Wulder, M. A. (2012). Object-based change detection. *International Journal of Remote Sensing*, 33(14), 4434-4457. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.648285>
- Cinner, J. E., Adger, W. N., Allison, E. H., Barnes, M. L., Brown, K., Cohen, P. J., Gelcich, S., Hicks, C. C., Hughes, T. P., Lau, J., Marshall, N. A. y Morrison, T. H. (2018). Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, 8(2), 117-123. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0065-x>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
- Dutra, D. J., Elmiro, M. A. T. y Garcia, R. A. (2020). Comparative analysis of methods applied in vegetation cover delimitation using Landsat 8 images. *Sociedade & Natureza*, (32), 699-710. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-56139>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. y Rockström, J. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*, 15(4), art20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
- Geist, H. J. y Lambin, E. F. (2002). Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52(2), 143. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0143:PCAUD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUD]2.0.CO;2)
- Glanz, H., Carvalho, L., Sulla-Menashe, D. y Friedl, M. A. (2014). A parametric model for classifying land cover and evaluating training data based on multi-temporal remote sensing data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (97), 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.004>
- Guerrero Carrera, J. y Hernández Flores, J. Á. (2024). Trayectorias socioecológicas de los sistemas cafetaleros en Tepatlaxco, Veracruz, México. *Sociedad y Ambiente*, (27), 1-30. <https://doi.org/10.31840/sya.v2024i27.2925>
- Guerrero-Carrera, J. y Hernández-Flores, J. A. (2024). Resiliencia de los sistemas socioecológicos cafetaleros ante el cambio climático en Veracruz, Oaxaca y Puebla, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v34i64.1500>
- Guerrero-Carrera, J., Jaramillo-Villanueva, J. L., Mora-Rivera, J., Bustamante-González, Á., Vargas-López, S. y Chulim-Estrella, N. (2020). Impacto del cambio climático sobre la producción de café. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 22(2). <https://doi.org/10.22231/asyd.v22i2.1680>
- Harvey, C. A., Pritts, A. A., Zwetsloot, M. J., Jansen, K., Pulleman, M. M., Armbrrecht, I., Avelino, J., Barrera, J. F., Bunn, C., García, J. H., Isaza, C., Munoz-Ucros, J., Pérez-Alemán, C. J., Rahn, E., Robiglio, V., Somarriba, E. y Valencia, V. (2021). Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A

- review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 62. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0>
- Jaramillo-Villanueva, J. L., Guerrero-Carrera, J., Vargas-López, S. y Bustamante González, Á. (2021). Use of agricultural technology, yields and economic profitability of small-scale producers (*Coffea arabica* L.). *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i11.1995>
- Jha, S., Bacon, C. M., Philpott, S. M., Ernesto Méndez, V., Läderach, P. y Rice, R. A. (2014). Shade Coffee: Update on a Disappearing Refuge for Biodiversity. *BioScience*, 64(5), 416-428. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>
- Lambin, E. F. y Geist, H. (Eds.). (2006). *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts*. Springer.
- Lambin, E. F. y Meyfroidt, P. (2010). Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change. *Land Use Policy*, 27(2), 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.003>
- Lemenkova, P. (2024). Support Vector Machine Algorithm for Mapping Land Cover Dynamics in Senegal, West Africa, Using Earth Observation Data. *Earth*, 5(3), 420-462. <https://doi.org/10.3390/earth5030024>
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H. y Taylor, W. W. (2007). Complexity of Coupled Human and Natural Systems. *Science*, 317(5844), 1513-1516. <https://doi.org/10.1126/science.1144004>
- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehltreter, K., Equihua, M. y Landgrave, R. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 1856-1863. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.023>
- Mons, S. y León Rodríguez, N. (2023). The complex socio-ecological landscape in Latin America: Transdisciplinary knowledge production to address diversity. *European Review of Latin American and Caribbean Studies*, (115), 1-23. <https://doi.org/10.32992/erlacs.10835>
- Montejo Morales, A. K., Castillo Santiago, M. Á., Soto Pinto, M. L. y León Martínez, N. S. (2022). Cambio en la cobertura y uso de suelo en sistemas agroforestales de café durante el periodo 1989-2020 en Ocosingo, Chiapas. *Revista de Geografía Agrícola*, (69), 147-165. <https://doi.org/10.5154/r.ga.2022.69.07>
- Panuju, D. R., Paull, D. J. y Griffin, A. L. (2020). Change Detection Techniques Based on Multispectral Images for Investigating Land Cover Dynamics. *Remote Sensing*, 12(11), 1781. <https://doi.org/10.3390/rs12111781>
- Perfecto, I., Jiménez-Soto, M. E. y Vandermeer, J. (2019). Coffee Landscapes Shaping the Anthropocene: Forced Simplification on a Complex Agroecological Landscape. *Current Anthropology*, 60(S20), S236-S250. <https://doi.org/10.1086/703413>
- Pontius, R. G., Shusas, E. y McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., Boukili, V., Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., Chazdon, R. L., Craven, D., De Almeida-Cortez, J. S., Cabral, G. A. L., De Jong, B. H. J., Denslow, J. S., Dent, D. H., DeWalt, S. J., Dupuy, J. M., Durán, S. M., Rozendaal, D. M. A. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211-214. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- Robles, H. M. B. (2011). *Los productores de café en México problemática y ejercicio del presupuesto*. Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Rudel, T. K., Coomes, O. T., Moran, E., Achard, F., Angelsen, A., Xu, J. y Lambin, E. (2005). Forest transitions: Towards a global understanding of land use change. *Global Environmental Change*, 15(1), 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.001>
- Seto, K. C., Güneralp, B. y Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Turner, B. L., Lambin, E. F. y Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
- Turner, M. G., Calder, W. J., Cumming, G. S., Hughes, T. P., Jentsch, A., LaDeau, S. L., Lenton, T. M., Shuman, B. N., Turetsky, M. R., Ratajczak, Z., Williams, J. W., Williams, A. P. y Carpenter, S. R. (2020). Climate change, ecosystems and abrupt change: Science priorities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794), 20190105. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0105>
- Vaglio Laurin, G., Puletti, N., Hawthorne, W., Liesenberg, V., Corona, P., Papale, D., Chen, Q. y Valentini, R. (2016). Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, (176), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.017>

- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. y Kinzig, A. P. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), art5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Wu, M., Huang, W., Niu, Z. y Wang, C. (2015). Generating Daily Synthetic Landsat Imagery by Combining Landsat and MODIS Data. *Sensors*, 15(9), 24002-24025. <https://doi.org/10.3390/s150924002>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, (225), 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>