

Iglesias Carreño, I. L., Salgado Hernández, M. C., Pérez Gutiérrez, R. (2025). Análisis de la influencia de los cambios de uso del suelo y vegetación en la ocurrencia de deslizamientos de ladera en la región Zoque, norte de Chiapas, México. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (Artículos), 35, 1-23. <https://dx.doi.org/10.21138/GF.875>

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN EN LA OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS DE LADERA EN LA REGIÓN ZOQUE, NORTE DE CHIAPAS, MÉXICO

^{1a}Irma Lisset Iglesias Carreño , ^{2b}María del Carmen Salgado Hernández , ^{2c}Rosalva Pérez Gutiérrez 

¹Universidad de Guadalajara. Av Juárez 976, Col. Americana, 44100 Guadalajara, Jal., México

²Universidad Autónoma de Guerrero. Ciudad Universitaria, Av. Lázaro Cárdenas S/N, 39087, Chilpancingo, Guerrero, México.

^a14413334@uagro.mx, ^bmcarsahe87@gmail.com, ^crperezg@uagro.mx

RESUMEN

Los deslizamientos de ladera representan uno de los fenómenos que más pérdidas materiales y humanas ha ocasionado alrededor del mundo por la reducción de la vegetación y los cambios de uso del suelo, derivados de las actividades antrópicas. La incidencia de huracanes en México contribuye al aceleramiento de estos eventos debido a la acumulación de precipitaciones. Este trabajo analiza la influencia que los cambios de uso del suelo y vegetación tienen en la susceptibilidad de los procesos de ladera en la región Zoque, en el estado de Chiapas, después de que en 2020 el huracán Eta ocasionó importantes deslizamientos en la zona. Se analizaron los cambios de usos del suelo y vegetación entre 1986 y 2020. Posteriormente, se modeló la susceptibilidad de la región a partir de los factores condicionantes (litología, uso del suelo y vegetación, pendiente y densidad de drenaje). El análisis espacial mostró que los sitios de mayor pendiente, donde se presentaron los cambios de usos del suelo y vegetación más significativos, son los más susceptibles a presentar deslizamientos. Las áreas deforestadas que se ocupan para la agricultura y la ganadería registraron susceptibilidades medias, altas y muy altas, las cuales fueron de amplio predominio en la región. Este estudio es de los únicos que identificaron la susceptibilidad a deslizamientos de ladera en la región. Los resultados tienen el propósito de coadyuvar a la planificación para la prevención y mitigación del riesgo.

Palabras clave: deslizamiento de ladera; susceptibilidad; cambio de uso de suelo; región Zoque; Sistemas de Información Geográfica

ANALYSIS OF THE IMPACT OF LAND USE AND VEGETATION CHANGES ON LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY IN THE ZOQUE REGION, NORTHERN CHIAPAS, MEXICO

ABSTRACT

Landslides are among the phenomena that have caused significant material and human losses worldwide, largely due to the reduction of vegetation and changes in land use driven by human activities. The frequency of hurricanes in Mexico further accelerates these events by increasing

precipitation accumulation. This study examines the impact of land use and vegetation changes on the susceptibility to hillside processes in the Zoque region of Chiapas, following the major landslides caused by Hurricane Eta in 2020. Changes in land use and vegetation between 1986 and 2020 were analyzed, and the region's susceptibility was subsequently modeled based on conditioning factors such as lithology, land use and vegetation, slope, and drainage density. The spatial analysis revealed that areas with the steepest slopes, where the most significant land use and vegetation changes had occurred, were the most susceptible to landslides. Deforested regions used for agriculture and livestock farming showed medium, high, and very high susceptibility, which were widespread throughout the area. This study is one of the few to identify landslide susceptibility in the region, and the results aim to support planning efforts for risk prevention and mitigation.

Keywords: landslide; susceptibility; land use change; Zoque region; Geographic Information Systems.

1. Introducción

Los deslizamientos de ladera son el resultado de la interacción espacio-temporal de varios factores condicionantes y desencadenantes, entre los cuales el uso del suelo y vegetación constituyen uno de los más importantes. El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) define al deslizamiento de ladera como un movimiento masivo de rocas, escombros o suelo debajo de las pendientes de elevaciones de terreno, bajo la presión directa de la gravedad (United States Geological Survey 2020). Los deslizamientos de este tipo se encuentran entre las principales causas de la evolución del paisaje, que afectan significativamente la vida humana y las actividades económicas (Pisano *et al.* 2017). En este contexto, tales procesos se caracterizan como uno de los desastres ambientales más devastadores del mundo (Selamat *et al.* 2023).

Los factores geológicos y geomorfológicos que influyen en un deslizamiento de ladera varían en períodos relativamente largos, a diferencia de los cambios de uso del suelo y vegetación, que constituyen un factor altamente dinámico y pueden ocurrir en poco tiempo debido a acciones naturales y antropogénicas (Wasowski *et al.* 2010, Promper *et al.* 2014, Reichenbach *et al.* 2014). En particular, las actividades humanas desempeñan un papel clave en estas transformaciones, ya que sus efectos inciden directamente en la estabilidad superficial de las laderas. Un ejemplo es la deforestación, que acelera los deslizamientos al modificar la estructura de la vegetación, debilitando el refuerzo mecánico de las raíces, la cohesión del suelo y los procesos hidrológicos (Beguiría 2006, Meli *et al.* 2024).

En esta investigación, el concepto de uso de suelo alude a la apropiación socioeconómica de la tierra (Nadim *et al.* 2006), es decir, el propósito que los seres humanos asignan al terreno para garantizar la producción y el sustento. Entonces, el cambio de uso del suelo y vegetación implica la transformación de la ocupación del suelo hacia otro uso, generalmente vinculado a una actividad productiva. Con relación a los deslizamientos de ladera, la vegetación protege al suelo de la erosión y mejora la estabilidad de las pendientes (Löbmann *et al.* 2020, Parra *et al.* 2021).

Los deslizamientos de ladera derivados de los cambios de uso del suelo y vegetación pueden intensificarse dentro de las regiones montañosas cuando aumenta la presión demográfica, debido al incremento de la demanda de las carreteras, los asentamientos humanos y las tierras agrícolas (Promper *et al.* 2014, Alawamy *et al.* 2020). Asimismo, estudios recientes han demostrado efectos significativos del cambio climático en la actividad de deslizamientos de terreno en superficies de montaña (Gariano *et al.* 2018, Shu *et al.*, 2019, Wicki *et al.* 2020).

Los efectos que el cambio climático tiene sobre la estabilidad de las laderas son múltiples, aunque el patrón más común es el ascenso del régimen de precipitaciones. En las últimas décadas, se ha presenciado en todo el mundo un aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos de lluvia extrema (Kharin *et al.* 2013, Rai *et al.* 2020). Estas condiciones de cantidad acumulada de precipitación y la distribución temporal también pueden influir en el equilibrio hídrico en las laderas y aumentar la inestabilidad de estas (Rai *et al.* 2020).

México ha sido afectado históricamente por la presencia de huracanes. De 1971 a 2021 se formaron 1697 ciclones tropicales, de los cuales 270 impactaron las costas mexicanas (100 por el Atlántico y 170

por el Pacífico) (CONAGUA 2021). En 2020 ocurrieron 17 huracanes, de los cuales nueve de ellos alcanzaron las categorías 3, 4 y 5 en la escala de Saffir-Simpson. Específicamente, el huracán Eta, categoría 4, en cinco días propició la acumulación de 632.5 mm de lluvia en distintos municipios de Chiapas (CONAGUA 2020). Concretamente, en la región Zoque de esta entidad se registraron 95 zonas afectadas por los deslizamientos de ladera derivados de las precipitaciones. Los deslizamientos más significativos cubrieron alrededor de 150 hectáreas. En estos eventos tres personas perdieron la vida y 60 viviendas se destruyeron (Frabes 2021). En las áreas afectadas se desarrollaban actividades agropecuarias y los asentamientos humanos habían incrementado.

Diversos estudios que analizan la influencia del cambio de uso del suelo y la vegetación en la ocurrencia de deslizamientos de ladera han desarrollado modelos enfocados en la clasificación de estos procesos (Hungry *et al.* 2014, Li y Mo 2019). Además, otras investigaciones han profundizado en el uso de métodos estadísticos y análisis espacial para procesar datos relacionados con factores condicionantes y desencadenantes de estos eventos (Budimir *et al.* 2015, Huang y Zhao 2018, Reichenbach *et al.* 2018, Merghadi *et al.* 2020, Lima *et al.* 2022). Entre estos aportes, Miller (2013) propuso el uso del Índice de Cobertura de Superficie como una variable relevante en el modelado de susceptibilidad, al representar el vigor y la degradación de la vegetación. Asimismo, Pisano *et al.* (2017), mediante un análisis multitemporal en ambiente SIG, evaluaron las tendencias pasadas de la cobertura del terreno (1954, 1981 y 2007) para simular escenarios de cambio de uso del suelo en la cuenca del río Rivo, Italia, para los años 2030 y 2050. Los autores concluyeron que el aumento de áreas agrícolas manejadas con prácticas adecuadas de siembra y cosecha contribuía a reducir la susceptibilidad a deslizamientos. También, Arabameri y Rezaei (2019) identificaron que el cambio de uso del suelo, el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) y la proximidad a carreteras fueron los factores más relevantes en la ocurrencia de deslizamientos en la cuenca de Sangtarashan, Irán.

Conocer los principales cambios de uso del suelo y vegetación a lo largo del tiempo resulta útil para evaluar el papel de la cobertura vegetal y de la actividad humana en las laderas propensas a deslizamientos superficiales (Reichenbach *et al.* 2014, Carone *et al.* 2015). Desde este panorama, el objetivo de investigación es analizar los cambios de uso del suelo y vegetación por actividades antrópicas y su relación con los deslizamientos de ladera en la región Zoque, al norte del estado de Chiapas, a través de un modelo de susceptibilidad desarrollado con Evaluación Espacial Multicriterio (EEM) en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

La representación espacial de la susceptibilidad a deslizamientos de ladera puede desarrollarse mediante métodos cualitativos o cuantitativos (Aleotti y Chowdhury 1999). El enfoque cualitativo se fundamenta en el juicio de los expertos y emplea datos obtenidos a través de la fotointerpretación y del levantamiento geomorfológico en campo (Kouli *et al.* 2010). Los enfoques cuantitativos se basan en análisis estadísticos o deterministas. En estos procedimientos se aborda la estabilidad de taludes y el cálculo del factor de seguridad, para lo cual se requiere de un conocimiento detallado de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del talud (Hao *et al.* 2020). Además de estos enfoques, los métodos heurísticos, que se consideran en un nivel intermedio entre los dos anteriores, se apoyan en el criterio y conocimiento del experto, así como en las especificidades del caso de estudio. Estos métodos se eligen en este trabajo porque son aplicables a nivel regional, emplean datos de teledetección y dependen del conocimiento del especialista sobre la geología y geomorfología del área de estudio. Asimismo, los métodos heurísticos permiten la validación cruzada con datos previos sobre los deslizamientos de ladera (Elmoulat 2021). Sin embargo, presentan una alta subjetividad, ya que requieren asignar previamente un valor de relevancia a cada variable geoambiental del análisis.

Esta investigación propone un análisis de susceptibilidad que emplea el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) como base para la modelación heurística (Saaty 1980, Abella y Van Westen 2008), el cual es incorporado a una EEM como alternativa para reducir la subjetividad. Esta estrategia ofrece que en la ponderación de criterios se minimicen los errores cuando el conjunto de datos no cumple con las condiciones necesarias para un análisis estadístico o determinista (Pisano *et al.* 2017).

El análisis conllevó la generación de un mapa con los cambios de uso del suelo y vegetación del año 1986 a 2020. Se realizaron inventarios de deslizamientos de terreno después de que ocurrió el huracán Eta y se aplicó la EEM para determinar la susceptibilidad a estos eventos en la zona. Los resultados se

pueden usar para asociar los cambios de uso de suelo con la probabilidad de deslizamientos de ladera y con ello evaluar alternativas de prevención y mitigación del riesgo para una planificación espacial más eficaz. Este tipo de procedimientos se han aplicado para generar mapas de riesgo que sustentan las políticas públicas en materia de gestión del riesgo (Gorsevski y Jankowski 2010, Gariano *et al.* 2018).

2. Materiales, datos y métodos

Esta investigación consistió en un análisis espacial con énfasis en el cambio de uso del suelo y vegetación como uno de los agentes más importantes que acelera los deslizamientos de ladera. El estudio implicó el procesamiento de imágenes satelitales, la rectificación en campo y la integración e interacción transversal de variables espaciales. A partir del PAJ y de la EEM se desarrolló la dinámica de los parámetros de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

2.1 Área de estudio

El área de estudio se ubica en la porción norte del estado de Chiapas, entre los 462 236 y 537 585 mde longitud este, y los 1 871 670 y 1 935 896 mde latitud norte, y cubre una porción de 3935 km² de la región Zoque (Figura 1). La delimitación del área se realizó a partir de la clasificación de las cartas topográficas, escala 1: 50 000 (Ixhuatán E15C39, Tecpatán E15C49, Amátan E15D31 y Jitotol E15D41) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Al interior de la zona se encuentran 28 municipios.

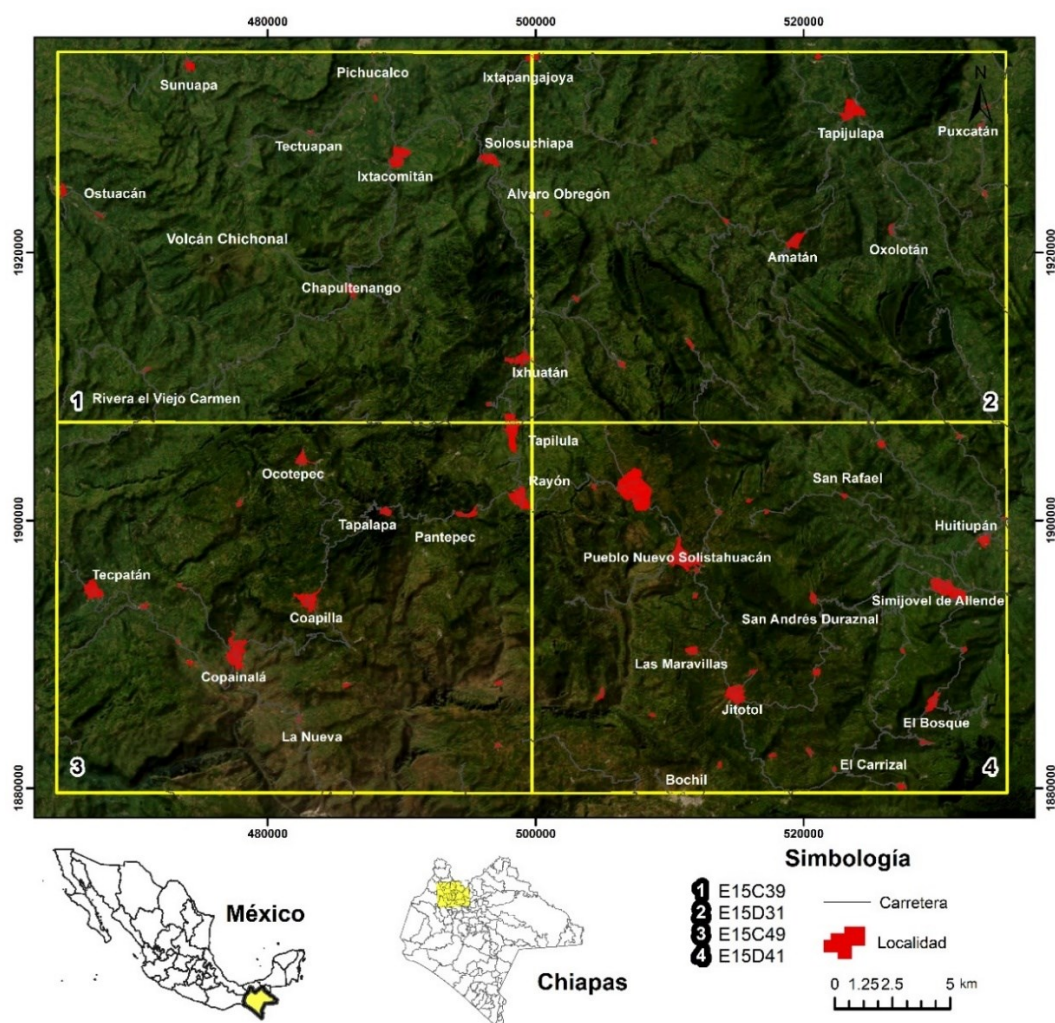


Figura 1. Ubicación del área de estudio en la región Zoque del estado de Chiapas, México

Fuente. Imagen satelital de ESRI y datos vectoriales de INEGI. Elaboración propia, 2024.

El área de estudio se definió en respuesta al interés de la organización Movimiento Indígena del Pueblo Creyente Zoque en Defensa de la Vida y el Territorio (Zodevite) por garantizar la seguridad de la población. El objetivo fue analizar el territorio de las comunidades zoques afectadas por el huracán Eta y evaluar posibles áreas de relocalización. Dado que estas comunidades se encuentran dispersas en doce municipios no siempre colindantes, se decidió trabajar con cuatro cartas topográficas que las abarcaran en su totalidad.

Las elevaciones más altas ubicadas dentro de la región son los cerros Tres Picos (1720 m) y Volcán Chichonal (1196 m) (INEGI 2013). La litología es predominantemente sedimentaria, representada por rocas clásticas distribuidas en secuencias rítmicas de lutitas, areniscas y calizas, que evidencian un ambiente de depósito marino; rocas ígneas de composición andesítica-traquita, producto de la historia eruptiva del Volcán Chichonal; además de depósitos aluviales no consolidados como la unidad más joven. El clima es cálido húmedo con una precipitación anual que varía entre los 1200 y 4000 mm. En la región norte del estado de Chiapas, la temperatura promedio más alta es de 30 °C y la mínima de 17.5°C (INEGI 2020). Asimismo, el área de interés se encuentra en la cuenca hidrológica Grijalva-Usumacinta RH30ER (CONAGUA 2014). Las corrientes superficiales más importantes son: río Pichucalco, río Ostucán, río Grijalva, río Grande, río El Platanar, río Amatán y río La Palma. La vegetación consiste en una variedad de bosque mesófilo de montaña alta, bosque de pino-encino, pastizal natural e inducido y selva alta. El pastizal es la ocupación de suelo que cubre una de las superficies más amplias en la zona de estudio, con 1382.11 km².

2.2 Adquisición de datos y tratamiento de imágenes satelitales

Se descargaron dos imágenes Landsat, con resolución espacial de 30 m, de la plataforma de acceso libre Earth Explorer®, del USGS, las cuales correspondían a los años 1986 (Landsat 5) y 2020 (Landsat 8). Posteriormente, se realizaron correcciones atmosféricas a estas imágenes, a través de la aplicación ArcMap del programa ArcGis® 9.5, con el fin de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia que se introduce en el sensor.

Los parámetros morfológicos se obtuvieron de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución de 15 m, el cual se extrajo del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (INEGI 2013). La litología se obtuvo de las cartas geológicas escala 1:50 000, del Servicio Geológico Mexicano (SGM). El mapa original se simplificó agrupando las principales litologías de afloramientos en 12 unidades. La reclasificación de los mapas generados utilizó la distribución de intervalos iguales, de cinco hasta siete clases. El mapa de pendientes se generó con referencia en la clasificación propuesta por Van Zuidam (1986), a través de la herramienta slope de ArcMap. La densidad de drenaje se calculó mediante Spatial Analyst Tools –Hidrology en el mismo programa, para identificar la dirección, acumulación y orden hidrológico. Este procedimiento permitió dividir la longitud total de las corrientes en el área de interés con el fin de representar las distintas medidas de esta variable por unidad de superficie y definir la disección (Horton 1932).

2.3 Identificación de los cambios de uso del suelo y vegetación

Se elaboraron dos mapas de inventario de las clases de usos del suelo y vegetación, los cuales correspondían a los dos años de estudio. Para detectar los cambios en estas clases se consideró un intervalo de 34 años (1986-2020). La elección del intervalo temporal se determinó por la disponibilidad de imágenes con una visibilidad satisfactoria para la fotointerpretación y un rango temporal amplio para identificar cambios notorios.

Se utilizó un tamaño de píxel de 30 m x 30 m como unidad mínima de mapeo para facilitar la interpretación. Los usos del suelo y vegetación se digitalizaron en 6 clases: agricultura, pastizal, selva alta, bosque, suelo desprovisto de vegetación y zona urbana. El número y clases de usos del suelo y vegetación se seleccionaron con base en los siguientes criterios: 1) su comportamiento hacia la propensión a deslizamientos; 2) estudios similares que abordan cambios en el uso del suelo y deslizamientos de ladera (Reichenbach *et al.* 2014); y 3) conocimiento del área y definición de la escala del trabajo.

Posteriormente, se crearon 1500 polígonos de entrenamiento por cada clase de uso del suelo y vegetación en cada imagen, con base en la concentración de píxeles que representaban el color y la textura característicos de cada clase. Para esta tarea, se empleó la combinación en falso color de las bandas de cada imagen (Rojo: 5, Verde: 4 y Azul: 3).

La detección de cambios en el uso del suelo y la vegetación entre distintos años se llevó a cabo mediante una categorización independiente, obtenida a través de una clasificación supervisada. Esta clasificación se generó mediante el método de máxima verosimilitud. Para cada tipo de uso del suelo y vegetación, se calculó la probabilidad de que cada celda perteneciera a la categoría correspondiente, de acuerdo con los valores registrados en los sitios de entrenamiento. La Figura 2 muestra el proceso seguido para la cartografía de las clases de uso del suelo y vegetación, así como las herramientas de ArcMap utilizadas en las acciones de representación.

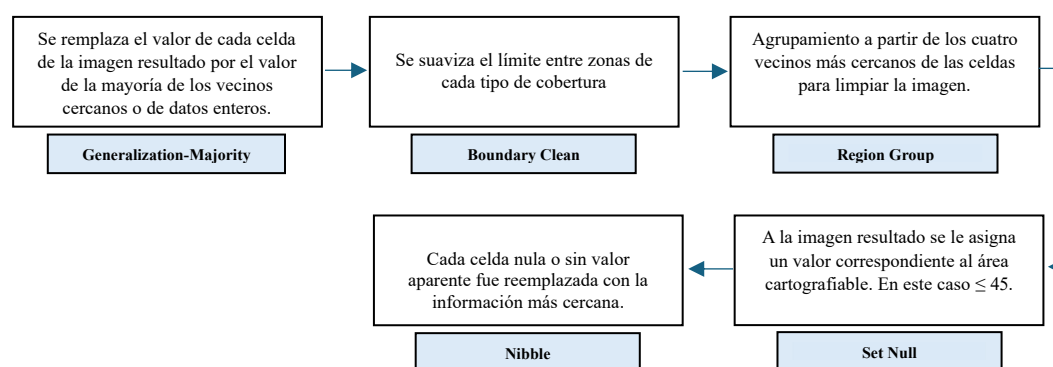


Figura 2. Flujo para identificar el uso del suelo y vegetación de las imágenes Landsat de 1986 y 2020

Fuente. Elaboración propia, 2024.

La validación de la clasificación supervisada para cada año se realizó mediante el cálculo de una matriz de confusión, considerando los errores de omisión y comisión, a partir de la cual se obtuvo el índice Kappa. Este índice mide la concordancia entre la clasificación y la realidad, con ajustes por probabilidad (Carletta 1996). La precisión de la clasificación fue del 95.9 % para 1986 y del 96.3 % para 2020. El coeficiente de Kappa en ambos casos fue de 0.92, lo que indica una clasificación óptima.

Después, a los resultados de la clasificación supervisada se asignaron valores en secuencia del 1 al 6 para el año 1986 y del 10 al 60 para el año 2020. Se estableció un valor para cada clase de uso, según correspondía. Una vez que las dos imágenes fueron clasificadas con los nuevos valores, estas se sumaron con el procedimiento de álgebra de mapas. El producto de esta operación fue un ráster que, consecuentemente, se convirtió a modelo vectorial para recibir un tratamiento de simplificación de datos en función de los atributos de cada clase de uso de suelo.

En la capa integrada se identificaron las áreas respecto a la matriz de transformación (Tabla 1), en la cual los valores 11, 22, 33, 44, 55 y 66 no manifestaron cambios. Los valores 12, 13, 14, 15 y 16 pasaron a agricultura; los 21, 23, 24, 25 y 26 a pastizal; los 41, 42, 43, 45 y 46 a bosque; los 51, 52, 53, 54 y 56 a matorral y, los 61, 62, 63, 64 y 65 a zona urbana. Con esta matriz se muestra la extensión para cada clase de uso del suelo y vegetación en los años de análisis, al colocar en el eje X el tiempo T0 y en el eje Y el tiempo T1. La tabulación cruzada resultó útil para cuantificar la variación dinámica o la persistencia de la población de muestra, la cual se ha usado en estudios ecológicos y de cambio territorial (Bracchetti *et al.* 2012).

Tabla 1. Matriz de transformación diseñada para el análisis de cambio de uso del suelo y vegetación de 1986 a 2020

Clase de uso del suelo y vegetación		2020					
		10	20	30	40	50	60
		Agricultura	Pastizal	Selva alta	Bosque	Suelo desprovisto	Zona urbana
1986	1 Agricultura	11	21	31	41	51	61
	2 Pastizal	12	22	32	42	52	62
	3 Selva alta	13	23	33	43	53	63
	4 Bosque	14	24	34	44	54	64
	5 Suelo desprovisto	15	25	35	45	55	65
	6 Zona Urbana	16	26	36	46	56	66

Fuente. Elaboración propia a partir del procesamiento de datos, 2023.

2.4 Susceptibilidad

La selección de los factores condicionantes para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de laderas se basó en el conocimiento previo sobre la inestabilidad del área de estudio. Para identificar la distribución espacial de los deslizamientos ocurridos tras el paso del huracán Eta en noviembre de 2020, se elaboró un inventario mediante fotointerpretación en Google Earth©. Adicionalmente, durante los primeros meses de 2021, se creó otro inventario de deslizamientos registrados en la zona desde 2002 —primer año con disponibilidad de imágenes en Google Earth tras su lanzamiento en 2001— hasta antes del impacto del huracán Eta, con el uso de la misma metodología. El objetivo de estos inventarios fue comparar la cantidad de deslizamientos ocurridos antes y después del huracán (Tabla 2).

Tabla 2. Cantidad de deslizamientos ocurridos en la región Zoque entre 2002 y 2020

Año	Deslizamientos	Año	Deslizamientos
2002	4	2013	67
2003	3	2015	26
2004	2	2016	42
2005	19	2017	39
2006	6	2018	96
2010	111	2019	87
2011	8	2020	3356
2012	13		

*En 2007, 2008, 2009 y 2014 no se identificó evento de deslizamiento.

Fuente. Elaboración propia a partir de la fotointerpretación de imágenes del Google Earth, 2024.

Para complementar el análisis, se realizaron observaciones directas en campo, como sugiere Borgomeo *et al.* (2014) para estudios de este tipo. Los recorridos en el área de estudio se llevaron a cabo en noviembre de 2020, tras el impacto del huracán, y en julio de 2021, fecha que coincide con el inicio de las lluvias más intensas.

La evaluación de la susceptibilidad a partir de la definición de los factores que condicionan los deslizamientos de ladera proporciona información de la estabilidad relativa del terreno. La suma de tales componentes constituye el coeficiente de susceptibilidad. Los componentes que se usaron para evaluar la susceptibilidad en el área de estudio se muestran en la Tabla 3.

La clasificación de los materiales litológicos y la asignación de valores según su contribución a la susceptibilidad se realizaron a partir del análisis de las cartas geológicas del SGM que cubren la zona, así como de la verificación en campo. Los rangos de pendiente, definidos según el grado de inclinación, se establecieron con base en la propuesta de Van Zuidam (1986), lo que permitió asociar las características de cada tipo de inclinación con la intensidad de los movimientos en masa. Los usos del suelo y vegetación se identificaron con la fotointerpretación de las imágenes satelitales correspondientes

al área de estudio. Su nivel de resistencia a deslizamientos de ladera se evaluó de acuerdo con los criterios propuestos por Zellet *et al.* (2012). En cuanto a la densidad de drenaje, se adoptó la clasificación de Horton (1932).

Tabla 3. Factores condicionantes para analizar la susceptibilidad a deslizamientos de laderas

Factor		Valor
Litología	Brecha andesítica-andesita, Caliza, Caliza-lutita y Dolomía-caliza	2
	Arenisca-lutita, Brecha andesítica-traquita, Caliza-arenisca y Lahar	3
	Grava-arena y Limolita-arenisca	4
	Aluvión y Granodiorita-diorita	5
Pendiente	Planicies, sin denudación apreciable (0 - 2°)	1
	Pendiente muy baja, peligro por erosión (2 - 4°)	2
	Pendiente baja, peligro severo de erosión (4 - 8°)	3
	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo (8 - 16°)	4
	Pendiente fuerte, procesos denudaciones intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelo (16-35°)	5
	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible (35-55°)	6
	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada (>55°)	7
Uso de suelo y vegetación	Bosque	1
	Selva alta	2
	Zona urbana	3
	Pastizal	4
	Agricultura	5
	Suelo desprovistos de vegetación	6
Densidad de drenaje	Baja (<1)	1
	Moderada (1-2)	2
	Alta (2-3)	3
	Muy alta (3>)	4

Fuente. Elaboración propia, 2023.

Los valores asignados a cada tipo de componente, según el factor, corresponde al peso que incide en el desarrollo de la susceptibilidad. Mientras el valor es más alto, la contribución del elemento, por sus características intrínsecas, es superior en la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento de terreno.

La asociación entre la distribución de cada clase de uso del suelo y vegetación con la magnitud de los deslizamientos se determinó mediante la aplicación del método de relación de frecuencia propuesto por Yalcin *et al.* (2011), que sugiere la siguiente fórmula para su cálculo:

$$RF = \frac{\left(\frac{\text{Área con deslizamientos en la clase}}{\text{Área total con deslizamientos}} \right)}{\left(\frac{\text{Área total de la clase}}{\text{Área total del área de estudio}} \right)}$$

Cuando la relación de frecuencia era igual a 1, significaba que la clase tenía la misma probabilidad de deslizamiento que el promedio del área. Si el valor era mayor a 1, indicaba una probabilidad superior al promedio, mientras que un valor menor a 1 reflejaba una probabilidad inferior. Este procedimiento condujo a identificar las zonas afectadas por deslizamientos dentro del área de estudio, al cuantificar los eventos registrados en los inventarios y estimar la probabilidad de ocurrencia en función de la cobertura de uso del suelo y vegetación.

Específicamente, el área de deslizamiento se calculó a partir de la zona de origen cartografiada. En esta operación se consideró la probabilidad espacial de ocurrencia de futuros deslizamientos, mediante la ubicación de sus áreas fuente. Los resultados permitieron estandarizar los deslizamientos para cada

clase de uso del suelo y vegetación con el fin de determinar la susceptibilidad a través de la EEM. Este método posibilita visualizar las localizaciones en un marco espacial normalizado que reconoce la distribución geográfica de la información (Vojteková y Vojtek 2020).

La EEM se desarrolló con base en el método de Mora-Vahrson (1994), el cual favorece la identificación de áreas con potencial de sufrir deslizamientos provocados por lluvias intensas, sismos de gran magnitud o la combinación de ambos. En el proceso de evaluación se integraron los factores condicionantes —litología, pendiente, uso del suelo y vegetación, y densidad de drenaje— de acuerdo con su grado de influencia en el fenómeno. Como complemento, se aplicó el PAJ, mediante una comparación por pares (Saaty, 1980), para determinar, dentro de un modelo de decisión, si un factor es más, menos o igualmente importante que otro (Tabla 4).

Tabla 4. Escala de comparación entre pares de Saaty (1980) adaptada al estudio

Valor*	Grado de importancia	Comentarios
1	Igual	Ambos factores (por ejemplo, litología y pendiente) influyen de igual manera en la susceptibilidad a deslizamientos.
3	Moderada	La experiencia o los estudios indican que un factor (por ejemplo, la pendiente) influye ligeramente más que el otro (como el uso del suelo).
5	Alta	La evidencia muestra que un factor (por ejemplo, la litología) influye considerablemente más que el otro (como la densidad de drenaje).
7	Muy alta	Un factor (por ejemplo, la pendiente del terreno) tiene una influencia mucho mayor que el otro (como el uso del suelo) en los deslizamientos.
9	Extremadamente alta	La influencia de un factor (por ejemplo, la litología en áreas con suelos arcillosos) es decisiva y supera sin dudas al otro.

* 2, 4, 6 y 8 Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La EEM permitió comparar las clases de los factores condicionantes con los niveles de susceptibilidad. Esta evaluación se abordó desde una perspectiva espacial con el propósito de identificar la extensión de los efectos del cambio en las coberturas del uso del suelo y la vegetación sobre la susceptibilidad a deslizamientos (Pourghasemi *et al.* 2014).

Para la integración de los factores condicionantes en el modelo, se utilizó la capa de información correspondiente al uso del suelo y vegetación del año 2020, ya que este periodo reflejaba las condiciones prevalecientes al momento de realizar el análisis de susceptibilidad. Dado que el objetivo principal del análisis es identificar las zonas con mayor propensión a experimentar deslizamientos, resulta fundamental considerar las condiciones actuales del territorio.

Si bien se contó con un análisis de cambio de uso del suelo entre 1986 y 2020, este se utilizó como herramienta complementaria para contextualizar y comprender la evolución del territorio y su posible relación con los procesos de inestabilidad del terreno. No obstante, dicho análisis no fue incorporado directamente en el modelo de susceptibilidad, ya que este modelo requirió variables que representaran el estado actual de los factores condicionantes, en este caso, el uso del suelo vigente, y no su dinámica temporal.

Cabe destacar que el mapa de uso del suelo y vegetación de 2020 refleja de manera implícita los cambios acumulados ocurridos en años previos, lo cual permite captar los efectos a largo plazo del cambio de cobertura sobre la susceptibilidad, aunque no se consideren de forma explícita o dinámica.

Por último, se sumaron los factores condicionantes de acuerdo con el valor ponderado del grado de importancia de cada elemento en la probable ocurrencia de un deslizamiento de ladera. Para ello se usó la herramienta de álgebra de mapas de ArcMap, donde se agregaron las capas reclasificadas, con la

representación espacial de cada factor. La ecuación aplicada fue la siguiente: (“uso de suelo” *0.35) + (“litología” *0.30) + (“pendiente del terreno” *0.25) + (“densidad de drenaje” *0.15).

La superposición de las capas de información de los componentes para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos requirió la homogenización de las distintas resoluciones espaciales. Se estableció una resolución uniforme de 30 m x 30 m para todas las capas con el fin de realizar el álgebra de mapas en el modelo ráster.

3. Resultados

3.1 Cambios de usos del suelo y vegetación

El cambio de uso del suelo y vegetación de 1986 a 2020 se evidenció en la reducción de la cobertura vegetal, así como en el incremento del suelo desprovisto y de espacios destinados para actividades antrópicas como la agricultura y la ganadería (Figura 3).

De acuerdo con la Tabla 5, la selva baja y el bosque cubrían el 86.86 % del área total en 1986. Esta cifra se redujo para 2020 en un 13.16 %, condición que se relaciona con el aumento de cultivos, de los asentamientos humanos, así como de los pastizales y del suelo desprovisto, ocupados para el pastoreo. El decrecimiento se mostró en -6.04 % y -27.79 % para la selva alta y el bosque, respectivamente

Asimismo, la Tabla 5 y la Figura 4 muestran que la cobertura de suelo desprovisto fue la que presentó el mayor aumento en la cantidad de porciones en ascenso del primer al segundo período, con un incremento del 267.59 %. Este mismo comportamiento, aunque en menor medida, se observó en el pastizal (69.58 %), la agricultura (36.51 %) y la zona urbana (28.95 %). En correspondencia con el aumento de estas coberturas, la selva y el bosque experimentaron una reducción en su extensión dentro del área total. El incremento del suelo desprovisto se evidencia en la distribución homogénea de parches a lo largo y ancho de toda la superficie analizada. Los parches son áreas no lineales, relativamente homogéneas, que se diferencian de su entorno (Armenteras y Vargas 2016). En 34 años, este crecimiento ha seguido un patrón exponencial, lo cual convierte a estas zonas en áreas potencialmente susceptibles a deslizamientos de ladera, especialmente si se ubican en pendientes con una inclinación superior a los 25°.

Tabla 5. Área total de las coberturas de uso del suelo y vegetación en 1986 y 2020, y la diferencia temporal

Tipo de cobertura	Área Total					
	1986		2020		2020-1986	
	km ²	%	km ²	%	Δ_x	$\Delta\%$
Agricultura	64	1.63	89	2.26	25	36.06
Pastizal	265	6.73	448	11.39	183	69.06
Selva alta	1986	50.47	1866	47.42	-120	-6.04
Bosque	1432	36.39	1034	26.28	-398	-27.79
Suelo desprovisto	109	2.77	398	10.11	289	267.59
Zona urbana	76	1.93	98	2.49	22	28.95

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat, 2023.

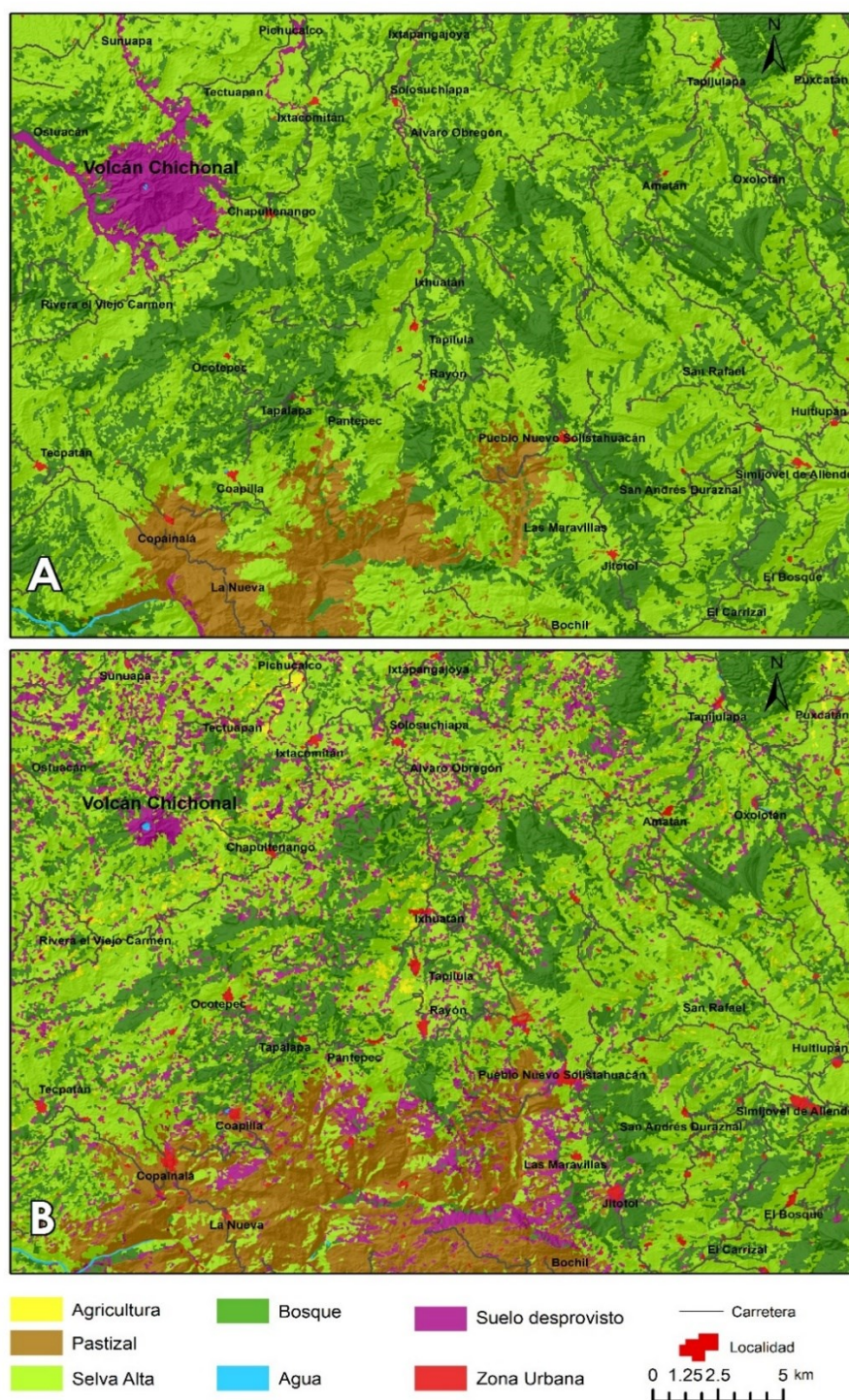


Figura 3. Cobertura de uso del suelo y vegetación en 1986 (A) y 2020 (B)

Fuente: Elaboración propia a partir de procesamiento de imágenes Landsat, 2023.

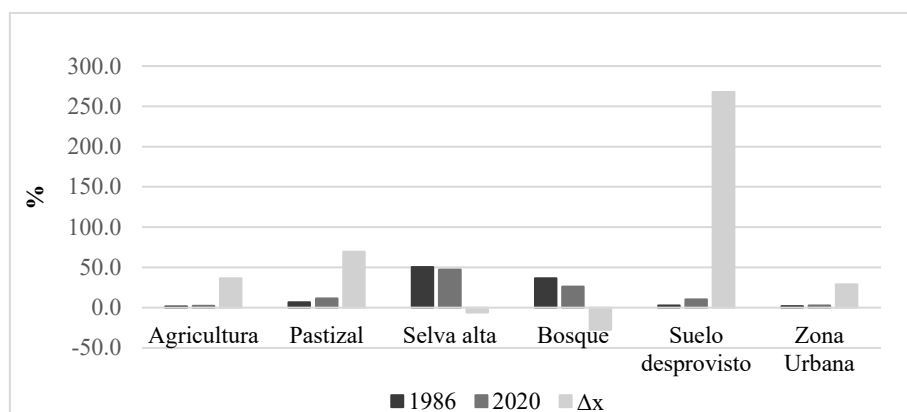
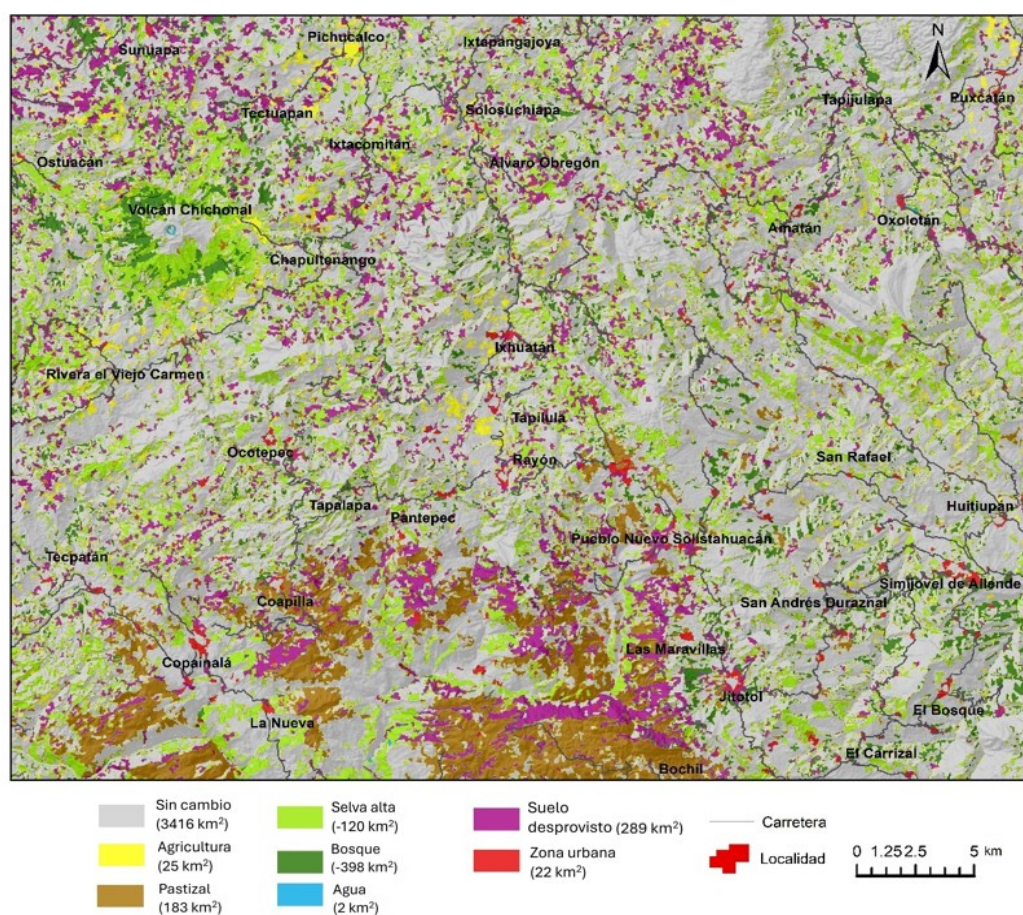


Figura 4. Porcentaje de cambio de 1986 a 2020 del área total por cobertura de uso de suelo y diferencia temporal

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Entre 1986 y 2020, el 86.81 % de la superficie total del área de estudio (3417 km²) no presentó modificaciones evidentes en el uso del suelo ni en la cobertura vegetal (Figura 5). No obstante, el 13.12 % restante mostró cambios significativos, entre los que destaca una reducción de 518 km² de vegetación natural, principalmente asociada a la selva alta y el bosque. La pérdida de esta cobertura vegetal se relacionó con un incremento de 25 km² en espacios destinados a las actividades agrícolas. También, parte de la superficie deforestada fue convertida en pastizales, comúnmente utilizados para el pastoreo. Aquellas zonas sin masa arbórea que no fueron transformadas en uso agropecuario se clasificaron como suelo desnudo, el cual sumó un total de 289 km². Respecto a la expansión de la mancha urbana, se determinó que el aumento de los asentamientos humanos incidió en la transformación del paisaje, mediante la ocupación de 22 km² previamente cubiertos por ecosistemas forestales. En cuanto, a los cuerpos de agua, se observó una disminución en su extensión superficial, pasando de casi 3 km² (0.07 % del área total) en 1986 a 2 km² (0.05 %) en 2020.

La concentración de parches que corresponden a pastizal y suelo desprovisto en 2020 se muestra en la zona circundante al área núcleo de las mismas coberturas, las cuales se localizan al sur del área de estudio, en las localidades de Pueblo Nuevo Solistahuacán, Coapilla, Las Maravillas y Bochil. En estas poblaciones la ganadería extensiva ha sido una de las actividades que condujo a la introducción de pastizales y a la pérdida de la cobertura vegetal. Hacia al noroeste, en las inmediaciones del volcán Chichonal y hacia el centro, en Ixhuatán, Tapilula y Rayón, se identificaron parcelas agrícolas, donde sobresalen los cultivos de maíz, frijol, calabaza y, en los terrenos de mayor elevación, café, cacao y guayaba, los cuales son destinados para la comercialización.



Tipo de cambio de uso del suelo y vegetación:

- Los espacios **sin cambio** (gris) generalmente corresponden a selvas y bosques sin modificación aparente.
- **Conversión a agricultura:** Los espacios agrícolas (amarillo) indican el reemplazo de la vegetación natural por cultivos.
- **Conversión a pastizales:** los espacios de pastizal (café) que incrementaron después de la deforestación.
- **Deforestación:** las áreas de selvas y bosques (verde claro y verde oscuro) donde se identificó la pérdida de cobertura forestal. El suelo desprovisto (morado) se considera consecuencia de la deforestación y sin nuevos usos u ocupaciones aparentes.
- **Urbanización:** expansión de áreas construidas, infraestructura o asentamientos humanos (rojo).

Figura 5. Coberturas de uso del suelo y vegetación que presentaron cambio y que no mostraron modificación aparente de 1986 a 2020

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat, 2023.

Los cambios de uso del suelo y vegetación determinados por la actividad antrópica se relacionan principalmente por las características geomorfológicas, geológicas y climáticas que condicionan las aptitudes del suelo para la agricultura y ganadería, fundamentalmente. Algunas áreas con pendientes superiores a 25° fueron modificadas, ya que se ocuparon tierras para cultivos a través de prácticas tradicionales, que incrementaron la erosión y, en consecuencia, la inestabilidad de los suelos. Sin embargo, la mayor parte de la superficie donde las poblaciones desarrollan la agricultura se da en pendientes suaves (5°-15°), condición que posibilita el uso de maquinaria agrícola. El ascenso de la zona agrícola para 2020 resulta equiparable a la mayor presencia de asentamientos humanos.

La superficie cultivable aumentó solo 0.63 %, con la correspondiente disminución de los bosques y las selvas para esta actividad en un 4.82 %. Esto es notorio en las zonas de cobertura arbórea que están próximas a los campos de siembra. Si bien, inicialmente el derrumbe de árboles fue para aprovechar mayor espacio para los cultivos, después de algunas rotaciones, las parcelas ya no se ocuparon para esta

actividad por lo que su abandono produjo el crecimiento de pastizales. Las zonas urbanas en 1986 se encontraban dispersas en la totalidad del área. Para el 2020 no se evidenció una variación significativa de los poblamientos, solo incrementó ligeramente la mancha urbana contigua al núcleo original. En mínimos casos surgen asentamientos aislados. Por lo tanto, el ascenso de la zona urbana al presentarse en terrenos de pendientes suaves, no se considera en el análisis de la distribución de deslizamientos superficiales.

3.2 Susceptibilidad a deslizamientos de ladera y su relación con los cambios de uso del suelo y vegetación

La integración de la cartografía de la litología, las pendientes de terreno y la densidad de drenaje (Figura 6) con el uso del suelo y la vegetación, como variables condicionantes de los deslizamientos de terreno, permitió identificar que el nivel de susceptibilidad predominante en el área de estudio es de mediana a muy alta (Figura 7).

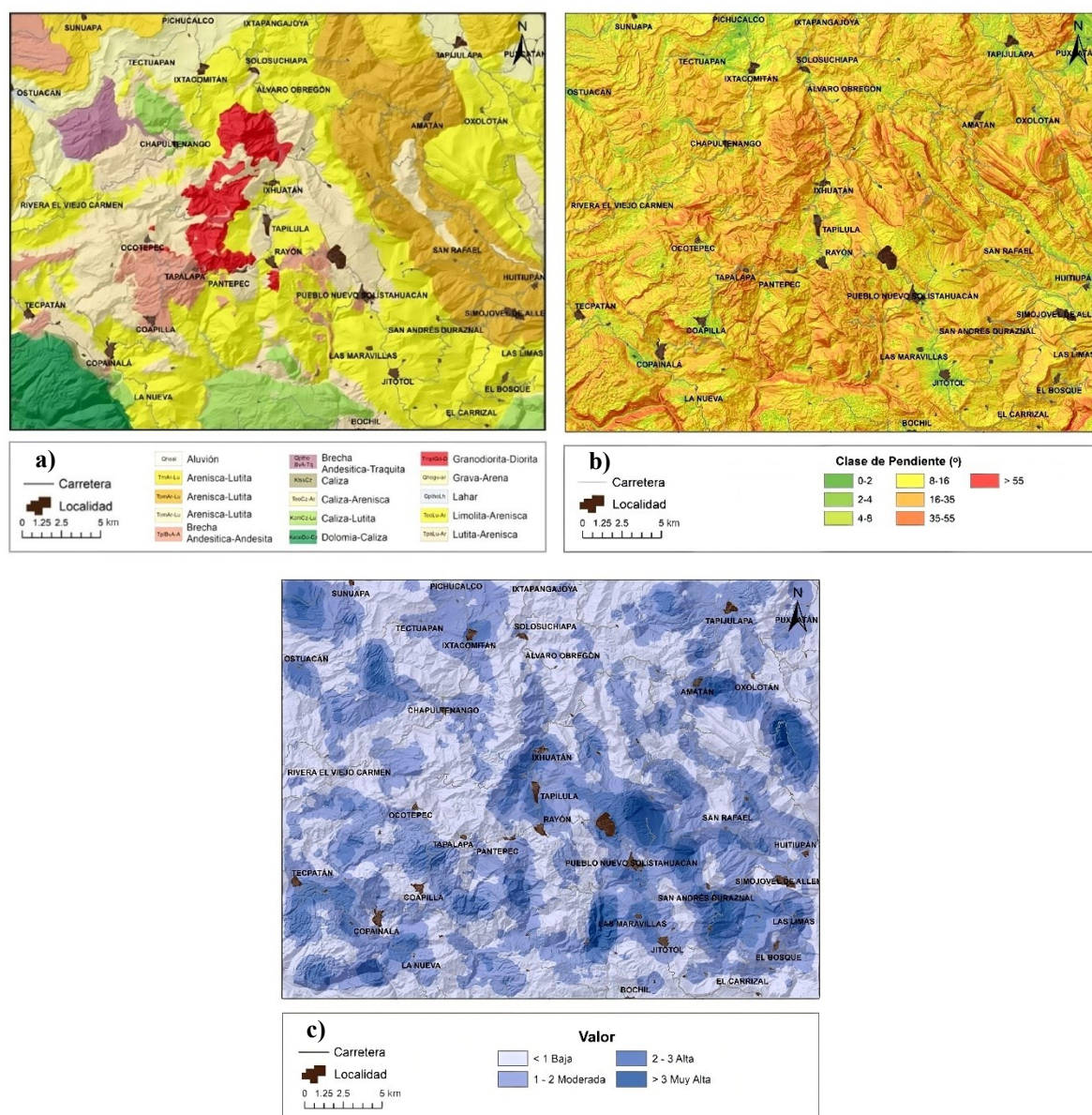


Figura 6. Capas de información de las variables condicionantes: litología (a), pendientes del terreno (b) y densidad de drenaje (c) que se integraron al cambio del uso de suelo y vegetación para identificar la susceptibilidad a deslizamientos

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento del MDE, 2023.

Las zonas que presentan cambio a suelo desprovisto para el 2020, especialmente sobre pendientes $>25^\circ$, registran susceptibilidad alta y muy alta (hasta 12 km^2). Esto ocurre en el sur, cerca de las localidades de Bochil y Pueblo Nuevo Solistahuacán, donde se evidenció el derribo de la cobertura vegetal. Hacia la porción central del área total, en las inmediaciones de los poblados de Ixhuatán, Rayón y Ocotepéc también se mostró una susceptibilidad alta y muy alta (alrededor de 68 km^2), condición que corresponde con la presencia de parches de suelo desprovisto de vegetación y de parcelas agrícolas. La misma situación ocurre en el noroeste, donde sobresalen las proximidades de la localidad de Sunuapa como los sitios con mayor susceptibilidad (de 15 a 16 km^2), lo cual coincide con la concentración de fragmentos de suelo desprovisto, la apertura de campos de cultivo y la cercanía a la selva alta. Estos lugares se caracterizan por rasgos litológicos conformados por areniscas, lutitas, limolitas, gravas y arenas. Las areniscas al estar compuestas de granos de arena, entre 0.0625 a 2 mm de diámetro (Dickinson, 1986), tienen buena porosidad y permeabilidad; sin embargo, las lutitas y limolitas, de granos muy finos, constituidos por partículas menores a 0.0625 mm y de granos intermedios, entre arenas y arcillas, dificultan la permeabilidad (Folk, 1962). Aunado a estas características, el suelo que pierde cohesión y compresión por la deforestación, así como por la erosión, adicionan un escenario de posible deslizamiento.

Las zonas con la susceptibilidad más baja se mostraron hacia el oriente, en las localidades de Oxolotán, Huitiupán y Simojovel de Allende, y hacia el sur en La Nueva. En estos espacios las actividades antropogénicas no tuvieron incidencia importante en los cambios de uso de suelo y, consecuentemente, tampoco en la susceptibilidad de deslizamientos de ladera.

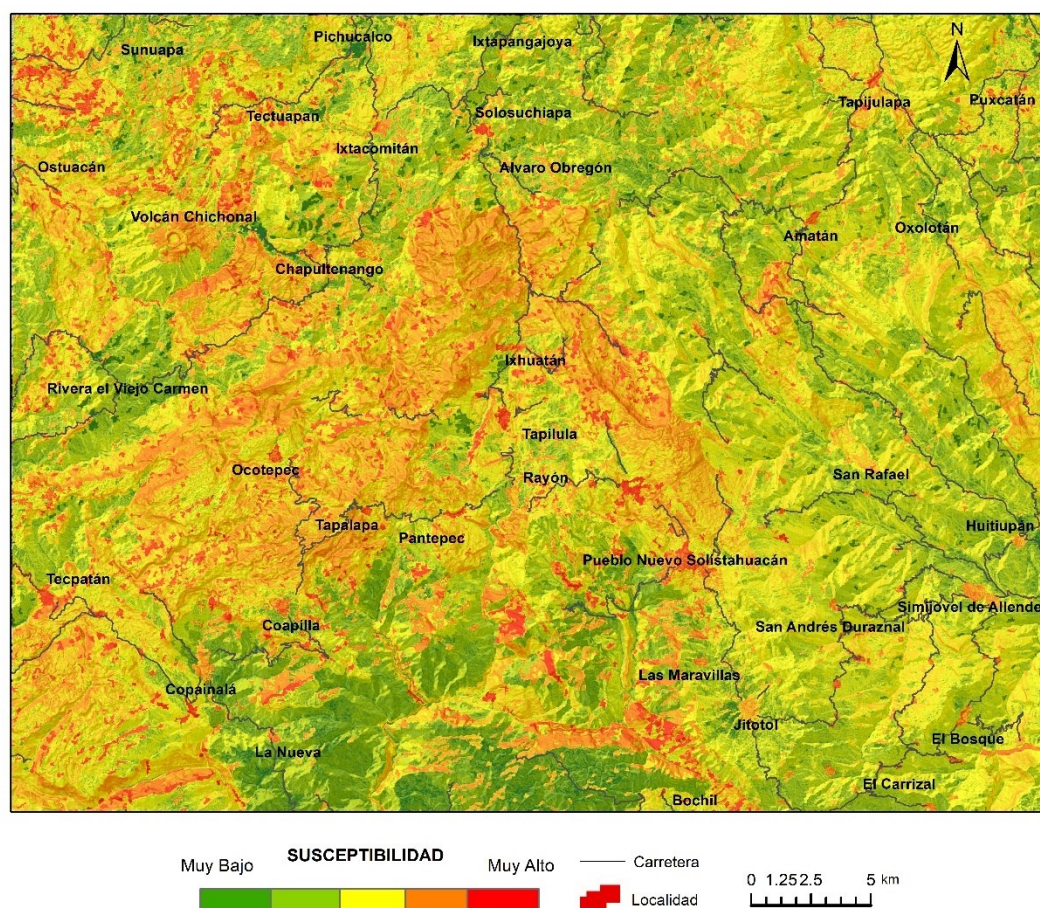


Figura 7. Susceptibilidad a deslizamientos de ladera

Fuente: Elaboración propia a partir del procesamiento de imágenes Landsat, 2023.

En la Tabla 6 se muestra el porcentaje de la cobertura que abarcaron los deslizamientos de ladera por uso del suelo y vegetación antes del huracán Eta (entre 2002 y 2019, que fue el periodo de

disposición de imágenes satelitales con mayor nitidez para la realización de inventarios por fotointerpretación) y después de dicho evento hidrometeorológico (2020). En este comparativo se muestra si la proporción de las clases de uso del suelo y vegetación en los puntos donde se identificaron los deslizamientos de terreno eran igual a las áreas donde las pendientes son susceptibles de estos movimientos (se considera como umbral una inclinación mayor a 25°). En este sentido, las clases de agricultura y pastizal tienen un alcance similar de área (41.57 % y 54.24 %, respectivamente, en relación con su área total), pero la proporción de deslizamientos de ladera en estas clases es diferente (Tabla 6). Hasta 2019 el suelo desprovisto había registrado el mayor acumulado de deslizamientos (43.72 %), después la ocupación correspondiente a la selva alta (23.38 %). En 2020, cuando ocurre el huracán Eta, se presentaron 3356 deslizamientos, los cuales se concentraron principalmente en la selva alta (34.37 %) y en con menor diferencia en el suelo desprovisto (31.09 %). Este aumento se ajusta a la amplia distribución de áreas de susceptibilidad (Figura 7).

De acuerdo con la relación de frecuencia, los valores superiores a 1 indican que la incidencia de los deslizamientos en la clase es mayor que la frecuencia en toda el área. Esto se muestra de manera significativa para el acumulado de años hasta 2019, en el suelo desprovisto, y en menos intensidad, para la selva alta y la agricultura. Tal condición se manifestó distinta en 2020, ya que el valor más alto de frecuencia se reportó en la selva alta y posteriormente en el suelo desprovisto y la agricultura (Tabla 6). Por el contrario, el valor que se registró menor a 1 indica que la frecuencia de deslizamiento en la clase es menor a lo que ocurre en el resto del área. El bosque y la zona urbana evidencian esta situación para los dos periodos. Por lo tanto, los valores más altos indican mayor propensión a fallas para la categoría que corresponda.

Tabla 6. Comparación del porcentaje de las clases de uso del suelo y vegetación en pendientes superiores a 25° con el porcentaje de deslizamientos de ladera en las mismas clases antes y durante 2019 y en 2020. Se incluye la frecuencia de deslizamientos en tales periodos

Clase de uso de suelo	Cobertura para pendientes >25°		Ocurrencia de deslizamientos		Relación de frecuencia	
	km ²	%	2019 (%)	2020 (%)	Año 2019	Año 2020
Agricultura	37	1.37	12.51	16.14	2.03	2.44
Pastizal	205	7.59	10.03	8.29	1.89	1.26
Selva alta	1293	47.87	23.38	34.37	2.44	4.01
Bosque	871	32.25	9.69	7.52	0.88	0.63
Suelo desprovisto	286	10.59	43.72	31.09	5.12	3.28
Zona urbana	9	0.33	0.67	2.59	0.00	0.27

Fuente: elaboración propia, 2024.

Si bien la pendiente y la densidad de drenaje han sido tradicionalmente reconocidas como variables clave en la inestabilidad del terreno, el uso del suelo y vegetación ha adquirido una relevancia creciente como uno de los factores más significativos. Esta importancia se explica por el hecho de que la remoción de la cobertura vegetal, el crecimiento urbano no planificado y la expansión agrícola y pecuaria pueden alterar de manera sustancial las condiciones hidrológicas y mecánicas del terreno, lo que a su vez incrementa la susceptibilidad a deslizamientos. La inclusión de esta variable en los modelos permite representar con mayor precisión los efectos espaciales y temporales derivados de las transformaciones antrópicas del paisaje.

Asimismo, los eventos asociados al cambio climático, como los ciclones tropicales de alta intensidad, aumentan la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos de ladera. En el área de estudio, se confirma la correspondencia entre las zonas con altos niveles de susceptibilidad —donde predominan actividades agrícolas y de pastoreo— y las áreas afectadas por deslizamientos tras las precipitaciones del huracán Eta (categoría 4) en el año 2020.

El método de relación de frecuencias, el EEM y el PAJ son enfoques complementarios que conducen a integrar de manera eficaz la información espacial relativa a los deslizamientos de ladera dentro de un entorno SIG. El método de relación de frecuencias proporcionó una base cuantitativa empírica fundamentada en la ocurrencia de eventos identificados mediante inventarios, mientras que el PAJ aportó un componente cualitativo y estructurado en la asignación de pesos a los factores condicionantes.

La retroalimentación de estos métodos, en el marco de la EEM, permitió una evaluación integral y espacialmente explícita de la susceptibilidad a deslizamientos de ladera, en la cual el uso del suelo y de la vegetación se incorporó como un factor dinámico y crítico que puede ser útil para la generación de escenarios de riesgo.

4. Discusión

Los estudios de análisis de susceptibilidad a deslizamientos de ladera mediante métodos heurísticos han enfrentado las limitaciones del desarrollo de los cálculos propuestos por metodologías de jerarquización y ponderación de variables. Estos procedimientos han sido utilizados por décadas y pocas veces enfatizan en minimizar errores de validación de la información. Sin embargo, la incorporación de otros métodos en la gestión de datos espaciales a través de un SIG ha permitido superar esta dificultad. Un ejemplo de las estrategias para mejorar la eficacia de los resultados en este tipo de análisis fue el modelo de relación de frecuencia, que condujo a identificar el vínculo entre la distribución de los deslizamientos y los factores como variables. En este caso el uso del suelo y la vegetación revelan una relación de la superficie afectada por un deslizamiento y la ubicación de elementos específicos, como las parcelas de cultivo o terrenos con suelo desnudo.

La definición del uso del suelo y vegetación como variable condicionante o desencadenante de los deslizamientos de ladera representa una cuestión crítica, debido a la implicación que tiene en la asignación de valor dentro de la evaluación de la susceptibilidad. A pesar de la naturaleza dinámica de este parámetro, la mayoría de los modelos asumen que la susceptibilidad permanece invariable en el tiempo, sin considerar que los factores condicionantes pueden experimentar modificaciones (Gariano y Guzzetti, 2016). Por esta razón, en el presente estudio, el uso del suelo y vegetación se caracterizó como un factor condicionante.

El análisis de los cambios en el uso del suelo y vegetación, así como su influencia en la ocurrencia de deslizamientos de ladera, dieron lugar a comprender las respuestas geomorfológicas asociadas a la modificación de la cobertura vegetal y la ocupación del territorio. Se investigaron las transformaciones del uso del suelo durante un periodo de 34 años en una zona altamente propensa a deslizamientos, ubicada en el estado de Chiapas, México. Sin embargo, este análisis de cambio de uso del suelo y vegetación (1986–2020) y el análisis de susceptibilidad a deslizamientos son dos enfoques complementarios dentro del estudio general. Mientras el primero permite entender la presión histórica y transformación del territorio, el segundo busca identificar zonas actualmente susceptibles, apoyándose en variables estáticas o contemporáneas como lo es el uso del suelo al 2020. En futuras etapas del estudio, se contempla la posibilidad de integrar ambos enfoques para desarrollar un análisis espaciotemporal más robusto.

El análisis de diversas variables, realizado mediante una evaluación espacial multicriterio, apoyada en el método de relación de frecuencias y el proceso de análisis jerárquico, evidenció que el uso del suelo y la vegetación no constituye el único factor de predisposición relevante para la ocurrencia de deslizamientos en el área de estudio. La evaluación del perfil histórico del uso del suelo y la vegetación entre 1986 y 2020 mostró un incremento en las parcelas agrícolas, lo cual se relaciona con el aumento de la población y, en consecuencia, de los asentamientos humanos. En 2010, la región registraba una población de 513 892 habitantes (INEGI 2010), distribuidos en 76 km² de superficie habitacional; para 2020, la población ascendió a 589 212 personas (INEGI 2020), con una expansión del área habitacional a 98 km². Se identificó que, además de las prácticas agrícolas inadecuadas, la tala de bosques y selvas, así como el aumento de áreas de pastizal inducido para actividades de pastoreo, también contribuyeron a intensificar los procesos de inestabilidad posteriores.

Si bien el análisis del cambio de uso del suelo entre el primer y el segundo año de estudio evidenció un aumento en la intervención humana sobre las ocupaciones del terreno, la ocurrencia de deslizamientos en 2020 en zonas sin actividad antrópica sugiere que el uso del suelo no constituye la única causa determinante de los deslizamientos de ladera. La combinación de las condiciones del terreno con la acumulación de precipitaciones mostró una mayor susceptibilidad en 2020, particularmente en

áreas con pendientes pronunciadas cubiertas por vegetación arbórea de selva alta. Según Lehmann *et al.* (2019), un bosque desarrollado ofrece un refuerzo radicular más significativo que el proporcionado por el sotobosque, como ocurre en la selva alta. Esta diferencia estructural influye en la limitada capacidad de esta vegetación para resistir el corte del suelo causado por la saturación hídrica, lo que favorece la generación de inestabilidad en las laderas (Davies 2015).

Factores como la precipitación constituyen una variable clave en el desencadenamiento de movimientos en masa, ya que la saturación del suelo debilita su cohesión. En este proceso, la cobertura arbórea influye directamente sobre la infiltración y el aumento de la humedad edáfica (Highland y Bobrowsky 2008, Wicki *et al.* 2020). Si bien algunos estudios (Bens *et al.* 2007, Reichenbach *et al.* 2014, Meli *et al.* 2024) señalan que las áreas forestales tienen un efecto estabilizador —debido al refuerzo de la cohesión del suelo mediante las raíces y a los efectos positivos en el balance hídrico—, Lan *et al.* (2020) plantea que los árboles pueden reducir la estabilidad en pendientes pronunciadas, ya que su peso incrementa la fuerza de deslizamiento en dirección paralela a la ladera. Este argumento se suma a la limitada capacidad de refuerzo que ofrece la vegetación de selva alta perennifolia, la cual se distribuye ampliamente en el área de estudio, donde también se identificaron deslizamientos tras las precipitaciones acumuladas por el paso del huracán Eta. En este contexto, la investigación incorporó la variable densidad de drenaje, dado que permite evaluar la influencia de la intensidad de las precipitaciones sobre el volumen de descarga de los cursos fluviales, así como su relación con las características geomorfológicas del terreno, las coberturas vegetales y los usos del suelo presentes en la región.

Con base en los resultados obtenidos, y en concordancia con lo reportado por Reichenbach *et al.* (2014) y Paz *et al.* (2017) en otras investigaciones, las zonas clasificadas con susceptibilidad baja y media pueden considerarse relativamente seguras, especialmente cuando se destinan a asentamientos humanos. No obstante, esto no implica una estabilidad absoluta del terreno, por lo que se recomienda mantener un monitoreo constante. En contraste, en las áreas con susceptibilidad alta y muy alta, se sugiere evitar el desarrollo de infraestructura urbana, incluso cuando se trate de parcelas agrícolas, debido a la mayor probabilidad de ocurrencia de fenómenos asociados a deslizamientos de ladera.

El enfoque de integración de métodos para identificar la susceptibilidad a deslizamientos de ladera, basado en la frecuencia de ocurrencia de eventos en áreas caracterizadas por clases de uso del suelo y vegetación, representa una contribución metodológica relevante, ya que agiliza los cálculos de valoración. Sin embargo, una limitante de este trabajo radica en que, si bien se aplican métodos validados para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo, su implementación aún se apoya en herramientas tecnológicas asociadas a procedimientos tradicionales. En este contexto, resulta pertinente explorar la eficiencia y eficacia de métodos multivariados más avanzados, como la regresión logística, las redes neuronales artificiales y los algoritmos de bosques aleatorios (*random forest*), dentro de entornos SIG. Diversos estudios han realizado aportes significativos en esta línea (Pham *et al.* 2017, Xie *et al.* 2017), al comparar distintos enfoques para mejorar la precisión de los modelos. En consecuencia, los futuros esquemas de evaluación de susceptibilidad deberían considerar la combinación de múltiples métodos, seleccionados según sus ventajas técnicas y su viabilidad operativa.

Otra limitación de este trabajo es que la presentación de los resultados no se desagrega a nivel municipal. Dado que el municipio constituye una unidad clave para la gestión de las estrategias de prevención y mitigación del riesgo, a través de los sistemas de protección civil, resulta fundamental realizar una zonificación detallada de la susceptibilidad a deslizamientos en cada uno de los municipios que conforman la región.

Se propone que en investigaciones futuras puedan incorporarse indicadores ambientales en el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos de ladera, con el objetivo de complementar la caracterización y diagnóstico de los terrenos, especialmente en el contexto de una creciente incidencia de eventos hidrometeorológicos asociados al cambio climático. Aunque numerosos estudios han señalado que la deforestación incrementa la susceptibilidad a los deslizamientos (Dai *et al.* 2002), pocos han abordado el papel específico del tipo de bosque, su estructura, estado de salud o las perturbaciones naturales que puede experimentar (Parra *et al.* 2021). Por tanto, será necesario analizar estas características de forma diferenciada y con un mayor nivel de detalle. Asimismo, será esencial incluir al análisis la distribución

de carreteras y caminos, ya que su construcción puede afectar directa o indirectamente la estabilidad de las laderas, ya sea por cortes en el relieve o por alteraciones en la escorrentía de aguas superficiales.

5. Conclusiones

Los factores que propician la inestabilidad de laderas se relacionan principalmente con el grado de inclinación del terreno, las características litológicas, el uso del suelo y la cobertura vegetal, así como con la acumulación de agua, derivada en gran medida de las precipitaciones. Además del tratamiento adecuado de estos factores determinantes, el proceso de elaboración de mapas de susceptibilidad a deslizamientos de ladera mediante un SIG debe incluir, de manera indispensable, los inventarios históricos de estos eventos, además de los registros de cambios en el uso del suelo y la vegetación. Estos elementos permiten establecer asociaciones más precisas, y evitan conclusiones erróneas sobre la relación entre los deslizamientos de tierra y las modificaciones en la cobertura vegetal y el uso del suelo.

Los resultados obtenidos indican que el 2.43 % de la superficie total de la región Zoque presenta niveles de susceptibilidad alta y muy alta. Las zonas con susceptibilidad moderada se distribuyen principalmente en el noreste y sureste de la región, con menor presencia en las áreas central, norte y noroeste. Este nivel de susceptibilidad abarca aproximadamente el 66 % del área de estudio. En los municipios de Bochil, Pueblo Nuevo Solistahuacán, Copainalá, El Bosque y Simojovel se concentra el 53 % de las áreas con susceptibilidad moderada, alta y muy alta. Esta condición representa un riesgo potencial para una población estimada en 166,299 habitantes, distribuidos en localidades de dichos municipios, que requieren atención prioritaria en las estrategias de prevención y mitigación de desastres.

Este estudio constituye uno de los primeros esfuerzos en esta región de México orientado a cuantificar y evaluar los impactos del cambio de uso del suelo y vegetación sobre la susceptibilidad de la zona a deslizamientos de ladera. Los resultados obtenidos aportan información valiosa para mejorar la comprensión de la magnitud y consecuencias de los cambios ambientales futuros, y pueden servir como referencia para apoyar a los tomadores de decisiones en la formulación de políticas de gestión y mitigación del riesgo asociado a estos fenómenos.

6. Agradecimientos

Se agradece al Movimiento Indígena del Pueblo Creyente Zoque en Defensa de la Vida y la Tierra (ZODEVITE) y al Centro de Lengua y Cultura Zoque A.C., por su apoyo durante el trabajo de campo.

Referencias bibliográficas

- Abella, E., Van Westen, C. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94(3-4), 453-466. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0087-y>
- Alawamy, J.S., Balasundram, S.K., Hanif, A.H.M., Sung, C. (2020). Detecting and analyzing land use and land cover changes in the region of Al-Jabal Al-akhdar, Libya using time-series Landsat data from 1985 to 2017. *Sustainability*, 12(11), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su12114490>
- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58, 21-44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- Arabameri, A., Pradhan, B., Rezaei, K., Lee, C. W. (2019). Assessment of landslide susceptibility using statistical and artificial intelligence-based FR-RF integrated model and multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 11(9), 999. <https://doi.org/10.3390/rs11090999>

- Armenteras, D., Vargas, O. (2016). Patrones del paisaje y escenarios de restauración: acercando escalas. *Acta biológica colombiana*, 21(1), 229-239. <https://www.redalyc.org/pdf/3190/319049262003.pdf>
- Beguiría, S. (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.018>.
- Bens, O., Wahl, N. A., Fischer, H., Hüttl, R. F. (2007). Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties. *European Journal of Forest Research*, 126, 101-109. <https://doi.org/10.1007/s10342-006-0133-7>
- Borgomeo, E., Hall, J. W., Fung, F., Watts, G., Colquhoun, K., Lambert, C. (2014). Risk-based water resources planning: Incorporating probabilistic nonstationary climate uncertainties. *Water Resources Research*, 50(8), 6850-6873. <https://doi.org/10.1002/2014WR015558>
- Bracchetti, L., Carotenuto, L., Catorci, A. (2012). Land-cover changes in a remote area of central Apennines (Italy) and management directions. *Landscape and Urban Planning*, 104(2), 157-170. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.09.005>
- Budimir, M. E. A., Atkinson, P. M., Lewis, H. G. (2015). A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression. *Landslides*, 12, 419-436. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0550-5>
- Carletta, J. (1996). Assessing agreement on classification tasks: The kappa statistic. *Computational Linguistics*, 22(2), pp. 249–254. <https://arxiv.org/pdf/cmp-lg/9602004>
- Carone, M., Gioia, E., Ferretti, M., Marincioni, F. (2015). Linking Vegetation Patterns and Landslide Occurrence: An Empirical Method. En: Lollino, G., *et al.* Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_209
- CONAGUA (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. México, Comisión Nacional del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99961/PMPMS_CC_R_os_Grijalva_y_Usumacinta.pdf
- CONAGUA (2020). Reseña del huracán Eta del Océano Atlántico. México, Climatología, Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/Ciclones/2020-Eta.pdf>
- CONAGUA (2021). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. México, Comisión Nacional del Agua. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- Dai, F. C., Lee, C. F., Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, 64(1), 65-87. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00093-X)
- Davies, T. (2015). Landslide hazards, risks, and disasters: introduction. En *Landslide hazards, risks, and disasters* (pp. 1-16). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396452-6.00001-X>
- Dickinson, W.R. (1986). Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and pelogeography of sedimentary basin. En K.L. Kleinspehn y C. Paola (eds.), *New perspectives in basin analysis*, Springer-Verlag, p. 27-42.
- Elmoulat, M., Debauche, O., Mahmoudi, S., Mahmoudi, S. A., Guttadauria, A., Manneback, P., Lebeau, F. (2021). Towards landslides early warning system with fog-edge computing and artificial intelligence. *International Journal of Ubiquitous Systems and Pervasive Networks*, 15(2). <https://doi.org/10.5383/JUSPN.15.02.002>
- Folk, R.L. (1962). Spectral subdivision of limestone types. En Ham, W.E. (Ed.). *Classification of Carbonate Rocks-A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, p. 62-84.
- Frabes, S. (20 de noviembre de 2021). Chiapas: A un año de la devastación por Eta, familias zoques desplazadas continúan en el abandono. *Radio Zapatista, Avispa Midia, Medios Libres*. <https://avispa.org/chiapas-a-un-ano-de-la-devastacion-por-eta-familias-zoques-desplazadas-continuan-en-el-abandono>

- Gariano, S. L., Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-science reviews*, 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Gariano, S.L., Petrucci, O., Rianna, G., Santini, M., Guzzetti, F. (2018). Impacts of past and future land changes on landslides in southern Italy. *Reg. Environ. Chang.*, 18, 437–449. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1210-9>
- Gorsevski, P. V., Jankowski, P. (2010). An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. *Computers & Geosciences*, 36(8), 1005-1020. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.03.001>Get rights and content
- Hao, L., Rajaneesh A., van Westen, C., Sajinkumar K. S., Martha, T. R., Jaiswal, P., McAdoo, B. G. (2020). Constructing a complete landslide inventory dataset for the 2018 monsoon disaster in Kerala, India, for land use change analysis. *Earth System Science Data*, 12, 2899–2918, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2899-2020>
- Highland, L., y Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia: Sistema Geológico de los EUA, 1-176. <https://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/doc2665/doc2665-contenido.pdf>
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13, 350-361.
- Huang, Y., Zhao, L. (2018). Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines. *Catena*, 165, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.003>
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda. México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., Wehner, M. (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic change*, 119, 345-357. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0705-8>
- Kouli, M., Loupasakis, C., Soupios, P., Vallianatos, F. (2010). Landslide hazard zonation in high-risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. *Natural hazards*, 52, 599-621. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9403-2>
- Lan, H., Wang, D., He, S., Fang, Y., Chen, W., Zhao, P., Qi, Y. (2020). Experimental study on the effects of tree planting on slope stability. *Landslides*, 17, 1021-1035. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01348-z>
- Lehmann, P., von Ruetten, J., Or, D. (2019). Deforestation effects on rainfall-induced shallow landslides: Remote sensing and physically-based modelling. *Water Resources Research*, 55(11), 9962-9976. <https://doi.org/10.1029/2019WR025233>
- Li, Y., Mo, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. *Geomorphology*, 340, 67-83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.04.020>
- Lima, P., Steger, S., Glade, T., Murillo-García, F. G. (2022). Literature review and bibliometric analysis on data-driven assessment of landslide susceptibility. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1670-1698. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7254-9>

- Löbmann, M. (2020). *The surface-mat effect and its measurement for estimating shallow erosion resistance of herbaceous vegetated alpine slopes*. Tesis de doctorado. University of Bozen-Bolzano. <https://hdl.handle.net/10863/35773>
- Meli, P., Ellison, D., Ferraz, S. F. D. B., Filoso, S., Brancalion, P. H. (2024). On the unique value of forests for water: Hydrologic impacts of forest disturbances, conversion, and restoration. *Global Change Biology*, 30(2), e17162. <https://doi.org/10.1111/gcb.17162>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D., Avtar, R., Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>
- Miller, A. J. (2013). Assessing landslide susceptibility by incorporating the surface cover index as a measurement of vegetative cover. *Land Degradation y Development*, 24(3), 205-227. <https://doi.org/10.1002/ldr.1115>
- Mora, S., Vahrson, W. G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49-58. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxi.1.49>
- Nadim, F., Kjekstad, O., Peduzzi, P., Herold, C., Jaedicke, C. (2006). Global landslide and avalanche hotspots. *Landslides*, 3, 159–173. <https://doi.org/10.1007/s10346-006-0036-1>
- Pham, B. T., Tien Bui, D., Prakash, I., Nguyen, L. H., Dholakia, M. B. (2017). A comparative study of sequential minimal optimization-based support vector machines, vote feature intervals, and logistic regression in landslide susceptibility assessment using GIS. *Environmental earth sciences*, 76, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6689-3>
- Parra, E., Mohr, C. H., Korup, O. (2021). Predicting Patagonian landslides: roles of forest cover and wind speed. *Geophysical Research Letters*, 48(23). <https://doi.org/10.1029/2021GL095224>
- Paz, J. A., González, R., Gómez, M., Velasco, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, (92), 1-16. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>
- Pisano, L., Zumpano, V., Malek, Z., Rosskopf, C.M., Parise, M., (2017). Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future. *Science of The Total Environment*, 601, 1147–1159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.231>
- Pourghasemi, H. R., Teimoori Yansari, Z., Panagos, P., Pradhan, B. (2018). Analysis and evaluation of landslide susceptibility: a review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3531-5>
- Promper, C., Puissant, A., Malet, J.P., Glade, T. (2014). Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Apply Geography*, 53, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.020>
- Rai, P.K., Singh, G.P., Dash, S.K. (2020). Projected changes in extreme precipitation events over various subdivisions of India using RegCM4. *Climate Dynamics*, 54, 247–272. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04997-6>
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A.C., Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environmental management*, 54, 1372–1384. <https://doi.org/10.1007/s00267-014-0357-0>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-science reviews*, 180, 60-91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.

- Selamat, S. N., Abd Majid, N., Taib, A. M., Taha, M. R., Osman, A. (2023). The spatial relationship between landslide and land use activities in Langat River Basin: A case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 129, 103289 (1-5). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103289>
- Shu, H., Hürlimann, M., Molowny-Horas, R., González, M., Pinyol, J., Abancó, C., Ma, J. (2019). Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d'Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction. *Science of the total environment*, 693, 133557 (1-14). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.363>
- United States Geological Survey (2020). Whay Study Landslide. https://www.usgs.gov/faqs/why-study-landslides?qt-news_science_products=0#qtnews_science_products
- Van Zuidam, R. A. (1986). Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers, The Hague.
- Vojteková, J., & Vojtek, M. (2020). Assessment of landslide susceptibility at a local spatial scale applying the multi-criteria analysis and GIS: a case study from Slovakia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 131-148.
- Wasowski, J., Lamanna, C., Casarano, D. (2010). Influence of land-use change and precipitation patterns on landslide activity in the Daunia Apennines, Italy. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 43, 387–401. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-101>
- Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S. I., Waldner, P., Stähli, M. (2020). Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning. *Landslides*, 17, 1881-1896. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01400-y>
- Xie, C.Y. (2011). A review of geological hazard spatial risk assessment. *Journal of Railway Science and Engineering*, 8, 97–102. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.2011.01.019>
- Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., Yomralioglu, T. (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>
- Zeller, K. A., McGarigal, K., Whiteley, A. R. (2012). Estimating landscape resistance to movement: a review. *Landscape Ecology*, 27, 777-797. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9737-0>

