

Susceptibilidad a deslizamientos en Malinalco, Estado de México, México. Un aporte a la reducción de riesgos de desastres a escala municipal

*Susceptibility to landslides in Malinalco, State of Mexico, Mexico.
A contribution to disaster risk reduction at the municipal scale*

Jesús Ezequiel Valdez Valdez,* Alexis Ordaz Hernández,** Luis Miguel Espinosa Rodríguez,**
y José Emilio Baro Suárez†

Recibido: 6/09/2022. Aprobado: 25/10/2022. Publicado: 25/11/2022

Resumen. Las causas que limitan el desarrollo de las comunidades pueden ser estudiadas desde diferentes ámbitos, sociales, políticos y económicos. Las inconsistencias en los diseños constructivos y en la planeación territorial, pueden generar escenarios de riesgos que provocan perturbaciones ambientales. El presente artículo, realiza una contribución en la primera fase de la gestión local del riesgo para el Municipio de Malinalco, Estado de México. Específicamente se determina la susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, en un contexto geográfico donde en los últimos 10 años ocurrieron al menos 36 deslizamientos.

Se empleó la metodología sugerida por Mora y Vahrson, donde se involucran factores condicionantes como la pendiente del terreno, la litología y la humedad; así como los factores desencadenantes, precipitaciones, sismicidad y uso del suelo. A partir del conocimiento físico del territorio y en especial del inventario de deslizamientos realizados, se

identifica una alta correspondencia espacial entre el 91.6% de los deslizamientos y las vialidades.

La cartografía obtenida, constituye una herramienta actualizada para la gestión de riesgo por deslizamientos en el municipio Malinalco. Se definen áreas prioritarias para realizar estudios detallados de estimaciones de coeficiente de estabilidad en taludes de carreteras, y en los casos que se justifique se podrían sugerir medidas de reforzamientos. Además, se pueden identificar las comunidades ubicadas en los niveles de susceptibilidad medio y alto; para de esta forma planear los diseños de alerta temprana que más se ajusten a la realidad física y social. El resultado obtenido, constituye un insumo cartográfico relevante en el ámbito de la planeación territorial futura del municipio, en aras de alcanzar actividades socio económicas coherentes con las condiciones físicas del territorio.

* Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad, Ciudad Universitaria, 50110, Toluca de Lerdo, Estado de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3366-2564>. Email: ezequiel-valdez@outlook.com

** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad, Ciudad Universitaria, 50110, Toluca de Lerdo, Estado de México, México. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6788-650X>. Email: aordazh@uaemex.mx. Autor de correspondencia.

*** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad, Ciudad Universitaria, 50110, Toluca de Lerdo, Estado de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9545-400X>. Email: lmepinosar@uaemex.mx

† Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad, Ciudad Universitaria, 50110, Toluca de Lerdo, Estado de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2514-8709>. Email: jebaros@uaemex.mx

Palabras clave: Escenarios de riesgos, deslizamientos, municipio de Malinalco.

Abstrac. The causes that limit the development of communities can be studied from different social, political and economic spheres. Inconsistencies in construction designs and in territorial planning can generate risk scenarios that cause environmental disturbances. This article makes a contribution in the first phase of local risk management for the Malinalco municipality, State of Mexico. Specifically, susceptibility to the occurrence of landslides is determined, in a geographical context where at least 36 landslides occurred in the last 10 years.

The methodology suggested by Mora and Vahrson was used, where conditioning factors such as the slope of the land, lithology and humidity are involved; as well as triggers, precipitation, seismicity and land use. Based on the physical

knowledge of the territory and especially the inventory of landslides carried out, a high spatial correspondence is identified between 91.6% of the landslides and the roads.

The cartography obtained constitutes an updated tool for the management of risk by landslides in Malinalco municipality. Priority areas are defined for detailed studies of stability coefficient estimates on road slopes, and in justified cases, reinforcement measures could be suggested.

In addition, communities located at medium and high susceptibility levels can be identified; in order to plan the early warning designs that best fit the physical and social reality. The result obtained constitutes a relevant cartographic input in the field of future territorial planning of the municipality, in order to achieve socio-economic activities consistent with the physical conditions of the territory.

Keywords. Risk scenarios, landslides, Malinalco municipality.

INTRODUCCIÓN

El Marco de Acción de Hyogo dejó valiosas experiencias en la gestión de riesgos de desastres y definió las directrices para alcanzar los objetivos de Desarrollo del Milenio (UNISDR, 2015) y estableció la necesidad de robustecer el análisis de los factores de riesgo subyacentes. Estos últimos, por su diversidad, exigen un análisis multidisciplinario, atendiendo a los diferentes puntos de vistas a considerarse en el análisis del riesgo (Cardona, 2001; Cardeñas, 2018, Silva, 2020).

Las afectaciones por amenazas geológicas en América Latina y el Caribe resultan alarmantes, y unidas a otras problemáticas, especialmente políticas y sociales, los impactos por eventos geológicos constituyen un freno al desarrollo. Por ejemplo, si se considera la década de 2010-2020, solo a causa de eventos de génesis geológica, en la región perdieron la vida 224 876 personas y las pérdidas económicas se aproximaron a los 52 763 000 000 USD (CRED, 2022).

Las bases de datos del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED, 2022) para México reportan nueve desastres (2010-2020) donde se contabilizaron 486 muertes y 9 845 000 000 USD en pérdidas económicas. En el caso particular de los deslizamientos, estos ocurren en escenarios delimitados por condiciones geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas, entre otras, relativamente bien estudiadas (factores condicionantes), y su ocurrencia es desencadenada

por sismos, precipitaciones o por acciones antrópicas. Los estudios de deslizamientos a diferentes escalas han alcanzado un desarrollo notable (Spiker y Gori, 2003; Guzzetti *et al.*, 2012; Lanni *et al.*, 2012; Leshchinsky *o.*, 2015; Cimini *et al.*, 2016; entre otros), sin embargo, incongruencias en el manejo del territorio (parte esencial en la gestión del riesgo), han conducido a la materialización del riesgo. Por ejemplo, en Teziutlán, Puebla, en 1999, después de diez días de intensas lluvias, el aumento considerable de las presiones intersticiales provocó varios deslizamientos en la zona. El más significativo ocurrió el 5 de octubre en la Colonia La Aurora, y provocó la muerte de 10 personas (Domínguez *et al.* 2016). Otro trágico suceso se presentó en la localidad La Pintada (en el estado de Guerrero), donde el 16 de septiembre del 2013 perdieron la vida 71 personas, debido al impacto de un deslizamiento y flujo de suelos y rocas, de acuerdo a la descripción de Domínguez *et al.* (2016); el factor desencadenante fueron las intensas lluvias asociadas a los fenómenos hidrometeorológicos Ingrid y Manuel. Precedidos por acumulados extraordinarios de lluvias (265.5 mm en 24 horas), los deslizamientos ocurridos en agosto del 2016 en los estados de Veracruz y Puebla ocasionaron 38 muertes (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2016).

El presente trabajo tiene como objetivo estimar la susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Malinalco, Estado de México, un escenario geográfico donde en los últimos diez años, se in-

ventariaron al menos 36 movimientos de ladera, con impacto directo, en la mayoría de los casos sobre las vialidades (Figura 1).

METODOLOGÍA

Caracterización del área de estudio

El municipio de Malinalco se ubica al sur del Estado de México, en las coordenadas 18°56'54"N y 99°29'46" W. Limita al norte con los municipios de Joquicingo y Ocuilan, al sur con el de Zumpahuacán y el Estado de Morelos, al este con el municipio de Ocuilan y también con el Estado de Morelos, al oeste con los municipios de Tenancingo y Zumpahuacán. Cubre una extensión aproximada de 208.9 km² y se encuentra a 1750 metros sobre el nivel del mar (Figura 2).

El municipio pertenece fisiográficamente al Eje Neovolcánico Transmexicano y a la subprovincia Cuenca del Balsas–Mexcala, y en la transición de los Terrenos tectonoestratigráficos Guerrero (Arco Teloloapan) y Mixteco (Plataforma Guerrero–Morelos). El sistema de toposformas que lo conforma es el siguiente: sierra de cumbres tendidas (63.08%), valle de laderas tendidas (19.29%),

valle de laderas tendidas con mesetas (9.53%), lomerío típico (5.3%), lomerío de basalto con cañadas (2.17%) y volcanes con mesetas (0.63%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010). La parte más alta de Malinalco se ubica en el norte donde se encuentra la localidad de San Simón el Alto, con una elevación aproximada de 2070 msnm; la parte más baja se ubica al sur, donde están las localidades de San Andrés Nicolás Bravo y La Angostura, con una elevación aproximada de 1060 msnm.

La carta geológico-minera del Servicio Geológico Mexicano (2014) indica que en el municipio afloran rocas y depósitos que van desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario, encontrándose en mayor porcentaje rocas sedimentarias e ígneas. En una pequeña parte del municipio se aprecian rocas metasedimentarias del terreno Guerrero, pertenecientes a la Formación Acapetlahuaya, que se compone de sedimentos volcanodetríticos interestratificados con lentes de caliza del Aptiano Superior. En el sur-suroeste se encuentran rocas sedimentarias representadas por bancos gruesos de caliza de la Formación Morelos, lutita, arenisca y caliza delgada, correspondiente a la Formación Mexcala del Cretácico Superior, y conglomerado

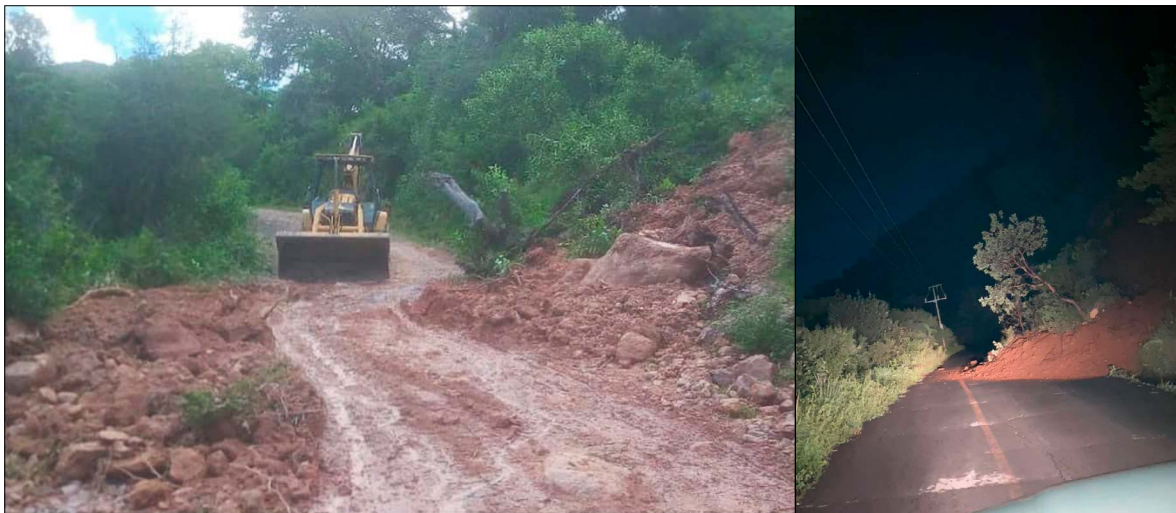


Figura 1. Impacto de los deslizamientos en las vías de comunicación en el municipio de Malinalco. Foto de la izquierda deslizamiento en el Camino a Monte Grande el 28 de agosto del 2020. Foto de la derecha deslizamiento en la Carretera San Simón–San Sebastián el 14 de septiembre del 2021. Fuente: fotos tomadas de redes sociales correspondientes al Ayuntamiento de Malinalco (2020) y Amigos de Malinalco (2021), respectivamente.

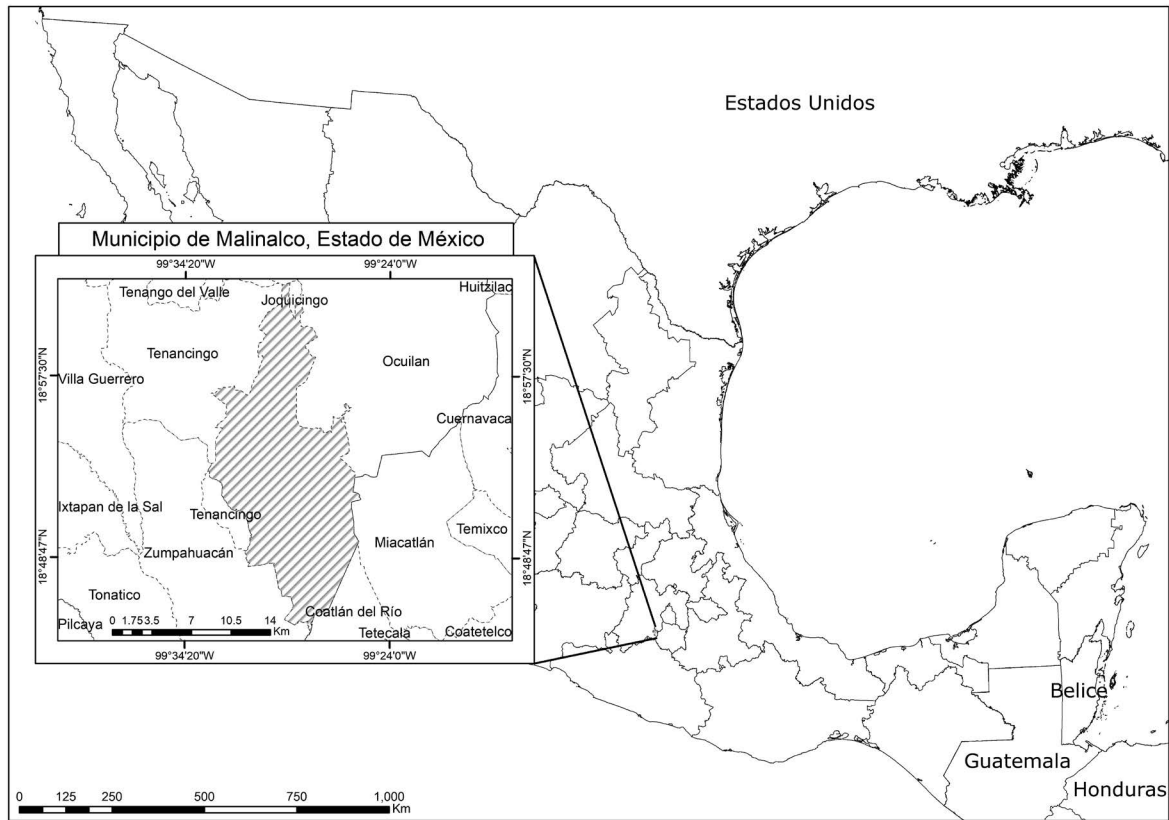


Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

rojo con intercalaciones de arenisca, toba y limo del Grupo Balsas del Eoceno-Oligoceno. En el centro y norte se hallan los flujos de basalto San Nicolás del Mioceno inferior y los flujos de andesita-basalto de la Formación Zempoala del Mioceno-Plioceno; al sureste se ubica el grupo Chichinautzin, compuesto por derrames de basalto, lapilli, ceniza y escoria. Los lahares de la Formación Tepoztlán del Mioceno Medio y de la Formación Cuernavaca del Plioceno están presentes junto a los depósitos sedimentarios del Holoceno.

El Censo de Población y Vivienda de 2020, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), contabiliza para el municipio de Malinalco 42 localidades y un total de 28 155 habitantes, de los cuales 14 322 corresponden a la población femenina y 13 833 a la masculina. Las tres localidades más pobladas son Malinalco, San Simón el Alto y Chalma.

El municipio cuenta con un total de 10 171 viviendas. El grado de marginación es bajo, de acuerdo con el Consejo Estatal de Población (CO-ESPO, 2020). El análisis de los últimos tres censos de población y vivienda (2000, 2010 y 2020), indica un incremento en el total de población y viviendas (Figura 3).

Materiales y métodos

Para determinar la susceptibilidad a deslizamientos, de acuerdo con el objetivo planteado para este caso de estudio, se seleccionó la metodología de Mora y Vahrson (1994), procedimiento ampliamente empleado en Latinoamérica (Segura *et al.*, 2011; Rodríguez-Solano *et al.*, 2013; Quesada-Román y Feoli-Boraschi, 2018; Ávila-Velásquez, 2019, López *et al.*, 2020). Probablemente, una de las respuestas a su amplio uso la encontremos en la facilidad para la obtención de los recursos mínimos

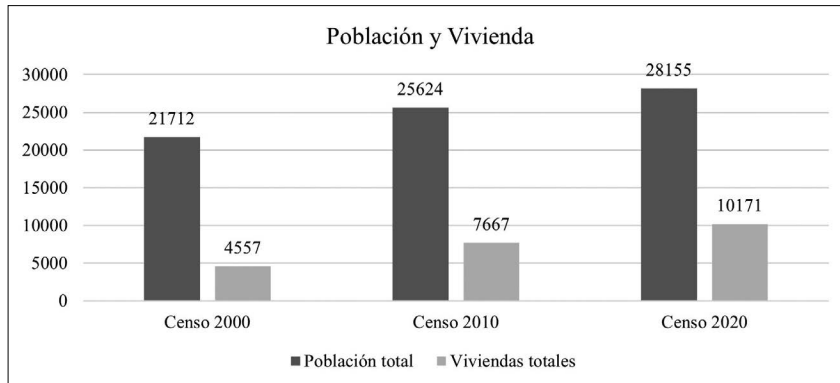


Figura 3. Comportamiento del total de población y de viviendas para el municipio de Malinalco, en los últimos tres Censos de Población y Vivienda.

Fuente: elaboración propia con base en información de INEGI (2020).

para su aplicación, con enfoque en los factores condicionantes y desencadenantes.

En su forma original la metodología de Mora y Vahrson (1994) sugiere el empleo de factores condicionantes (FC) y desencadenantes (FD) (Ecuación 1). Dentro de los primeros, o intrínsecos del sitio, consideran la pendiente del terreno (FC_P), la litología (FC_L) y la humedad (FC_H). Mientras que, en los factores desencadenantes, incluyen las precipitaciones (FD_{PR}) y la sismicidad (FD_S) (Ecuación 2).

$$\text{Susceptibilidad} = FC * FD \quad (e1)$$

$$\text{Susceptibilidad} = (FC_P * FC_L * FC_H) * (FD_{PR} + FD_S) \quad (e2)$$

Sin embargo, en la propia publicación, posterior a la aplicación del método en Tapantí (Costa Rica), Mora y Vahrson indican la necesidad de incluir la influencia del uso del suelo (agrícola, pastoreo, deforestación, desarrollo urbano, carreteras). Esta sugerencia fue de vital importancia para el trabajo que aquí se presenta, donde se comprobó una alta relación espacial entre los deslizamientos inventariados y las carreteras del municipio de Malinalco. De un total de 35 deslizamientos, 33 se ubican espacialmente dentro de un radio de 100 m a partir del eje de las carreteras, lo que justificó la inclusión de la cartografía de uso del suelo (FD_U) como parte de los factores desencadenantes (Ecuación 3).

$$\text{Susceptibilidad} = (FC_P * FC_L * FC_H) * (FD_{PR} + FD_S + FD_U) \quad (e3)$$

Se emplean las curvas de nivel con equidistancia de 20 m obtenidas de las cartas topográficas E14A48 y E14A58, a escala 1:50 000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019), para generar el modelo digital de elevación. Con apoyo de los sistemas de información geográficos, el modelo se reclasifica en 6 clases y a cada una se le adjudica un factor por pendiente del terreno (FC_P) (Tabla 1), obteniéndose la expresión cartográfica para las pendientes para el municipio de estudio (Figura 4).

De acuerdo al orden de los factores establecidos en la ecuación 3, se procede a obtener la zonificación de la Litología (FC_L), en este caso se digitalizó la carta geológica del Servicio Geológico Mexicano (2014), a escala 1:50 000, perteneciente al municipio de Malinalco. La inspección visual indicó que afloran cinco tipos litológicos, los cuales fueron clasificados de acuerdo con la predisposición a sufrir deslizamientos y se le asignó un factor FC_L (Tabla 2 y Figura 5). La predisposición o susceptibilidad para la clasificación y asignación del FC_L , se sustenta en la revisión de algunos trabajos que analizan el comportamiento de parámetros geotécnicos con incidencia en la estabilidad de las laderas, por ejemplo, ángulo de fricción interna, cohesión y peso específico (Alonso, 2005; Montalván *et al.*, 2017; Ramos, 2017). En la clasificación de acuerdo al nivel de susceptibilidad mostrada en la Tabla 2, se considera la capacidad de almacenar agua, derivada de la porosidad de cada litología, como un elemento clave que provoca un aumento considerable de la masa del potencial cuerpo deslizable. En materiales no consolidados suele usarse el descriptor índice de

Tabla 1. Rangos de valores de pendientes, clasificación y factor por pendiente del terreno (FC_p).

Valor de pendiente (m/km ²)	Equivalente en grados	Clasificación	FC _p
0 – 75	0 – 4.29	Muy baja	0
76 – 175	4.30 – 9.93	Baja	1
176 – 300	9.94 – 16.70	Moderada	2
301 – 500	16.71 – 26.57	Media	3
501 – 800	26.58 – 38.66	Alta	4
> 800	> 38.66	Muy alta	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

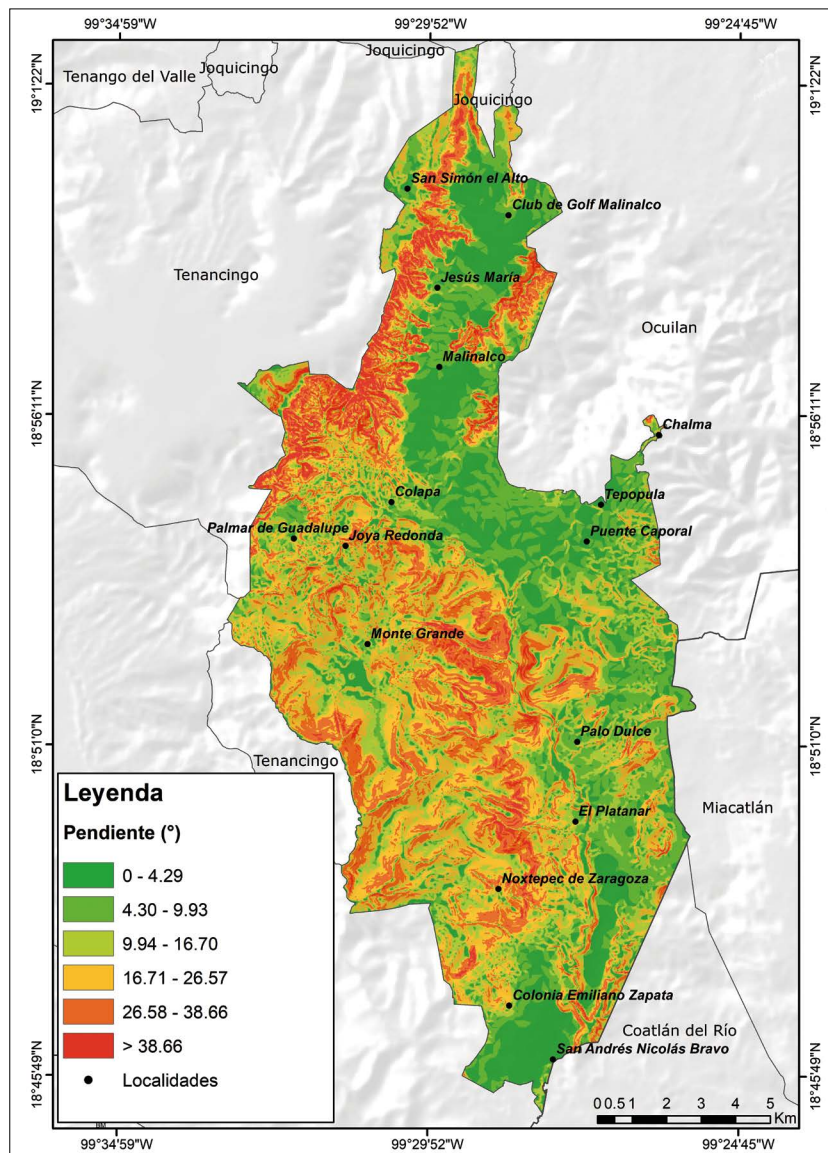


Figura 4. Mapa de pendientes para el municipio de Malinalco. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Descripción y clasificación de acuerdo al nivel de susceptibilidad de las litologías que afloran en el municipio de Malinalco.

Litología	Descripción	Clasificación	FCL
Rocas metamórficas	Rocas metasedimentarias del Terreno Guerrero, pertenecientes a la Formación Acapetlahuaya, se compone de sedimentos volcanodetríticos interestratificados con lentes de caliza del Aptiano Superior. Ambas litologías presentan metamorfismo incipiente de facies de esquistos verdes.	Bajo	1
Rocas volcánicas	Compuestos por tres grupos litológicos: 1) basaltos, caracterizados por derrames de basalto, lapilli, ceniza y escorias pertenecientes al Grupo Chichinautzin del Pleistoceno; (2) Andesita-Basalto, compuestos por flujos de andesita, basalto, dacita y riodacita con intercalaciones de brecha volcánica andesítica y horizontes de lahar, que actualmente se denomina Formación Zempoala del Mioceno-Plioceno, y 3) Basalto-Andesita, conformados por flujos de basalto emplazados a lo largo de fisuras del Mioceno Inferior, conocidos como Basalto San Nicolás.	Moderado	2
Rocas sedimentarias	Representadas por tres grupos litológicos: 1) conglomerados correspondientes al Grupo Balsas del Eoceno-Oligoceno, formado por conglomerado rojo con intercalaciones de arenisca, tobas y limos; 2) Lutitas, arenisca y calizas de la Formación Mexcala del Cretácico Superior, y 3) calizas de la Formación Morelos compuestas por bancos potentes de calizas de facies arrecifal del Albiano-Aptiano.	Medio	3
Lahares	Caracterizados por dos grupos litológicos: 1) Lahar, en este caso formados por conglomerados del Plioceno, que en conjunto forman un abanico aluvial de grano medio a grueso, cuyos constituyentes son casi exclusivamente de rocas volcánicas andesíticas, actualmente identificados como lahar de la Formación Cuernavaca, y 2) Lahar-Piroclástico, donde se identifican derrames de lava, intercalados con depósitos piroclásticos y lahares, que dieron origen a la Formación Tepoztlán del Mioceno Medio.	Alto	4
Sedimentos cuaternarios	Se compone de 2 grupos litológicos del Holoceno: 1) Aluvión, asociados a cauces de ríos y superficies de inundación, y 2) Arena-Grava, resto de depósitos no consolidados de arena y grava que rellenan los valles.	Muy Alto	5

Fuente: elaboración propia con base en información del Servicio Geológico Mexicano (2014).

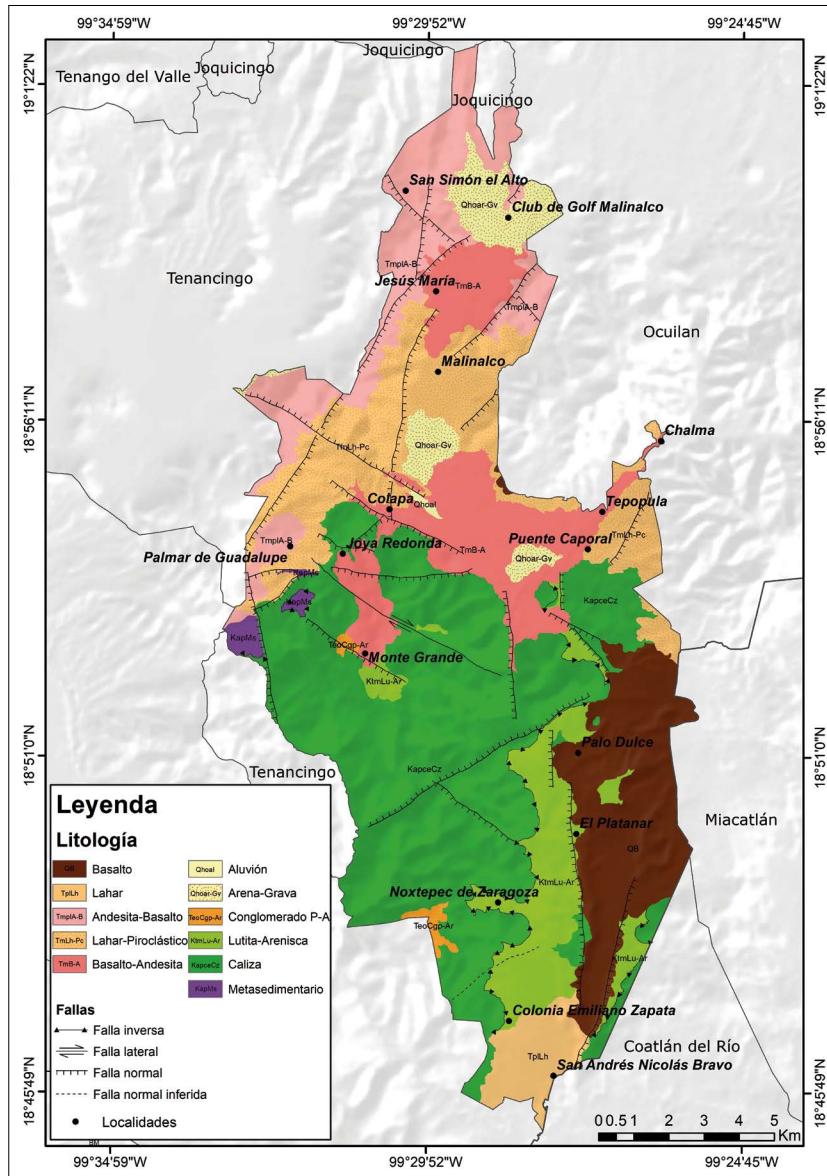


Figura 5. Cartografía geológica para el municipio de Malinalco, escala original 1:50 000. Fuente: elaboración propia con base en información del Servicio Geológico Mexicano (2014).

poros (e), por ejemplo, para arenas y gravas, como las que afloran en la zona norte de Malinalco, donde pudieran esperarse índices de poros por encima de 0.70 y humedades superiores al 25%, lo anterior de acuerdo con los valores de referencia consultados en la literatura (González de Vallejo, 2002 y Das, 2015). Por su parte, para las rocas generalmente se emplea el descriptor porosidad (n), por ejemplo, los basaltos, como los emplazados en el sureste del municipio (Figura 5) pudieran experimentar

porosidades en el rango de 0.1 al 2.0%, mientras que la humedad oscilaría entre el 0.5 y el 2.0% (González de Vallejo, 2002 y Das, 2015).

El tercer factor condicionante para estimar el comportamiento espacial de esta variable es la humedad (FC_H), se dispuso de información procedente 19 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cercanas al perímetro del municipio. En la Tabla 3 se presentan los promedios mensuales (desde 1980 a 2015) para las 19 estaciones, y en función

Tabla 3. Promedio mensual de precipitación desde 1980 a 2015 a partir de los registros de estaciones meteorológicas dentro y cercanas al municipio de Malinalco.

Estación	Mes												Factor Sh	
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		Total
15038 Joquicingo	9.9	12.1	7.9	31.6	78.3	152.1	209.5	191.7	160.8	67.1	17.2	9.3	947.51	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4	
15134 Vivero La Paz	9.5	7.2	8.9	19.2	69.6	182.1	169.9	168.3	165.0	66.9	12.2	5.9	884.92	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4	
15173 Ahuatenco	11.3	5.8	4.4	17.3	55.8	263.3	236.6	276.9	257.3	93.8	18.6	4.7	1245.77	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	2	1	2	2	2	0	0	7	
15223 Puente Caporal	7.8	3.3	3.6	6.8	35.8	134.6	137.6	148.7	118.0	46.0	14.0	10.4	666.66	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4	
15248 Coatepequito	7.4	9.9	5.9	18.6	71.3	198.6	182.1	177.3	199.4	76.2	15.9	5.1	967.79	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	4	
15256 Ocuilán	8.4	10.3	10.3	25.6	77.8	239.7	281.2	280.7	266.2	92.2	16.6	9.2	1318.28	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	0	0	7	
15295 San Pedro Ziatepec	15.0	13.4	16.4	30.6	88.5	192.1	221.1	218.8	191.3	94.3	21.3	12.0	1114.68	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	5	
15296 San Sebastián	16.4	5.8	7.9	21.8	51.6	227.8	246.9	315.1	337.9	103.9	23.3	17.6	1376.03	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	0	0	6	
15297 San Simónito	7.8	6.4	11.5	29.4	54.4	210.3	176.9	246.9	208.2	87.0	20.9	8.9	1068.43	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	5	
15298 Santa Cruz Tezontepec	12.0	7.2	12.2	32.2	69.1	209.2	239.1	280.5	228.0	95.0	15.4	9.9	1209.90	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	5	

Tabla 3. Continuación.

Estación	Mes												Total	Factor Sh
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
15299 Santa María	24.4	19.0	14.2	34.7	79.7	214.5	237.1	236.0	241.2	98.3	30.7	10.6	1240.53	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	5	
15324 Colonia Hidalgo	7.7	6.3	3.1	11.4	39.0	162.6	197.0	210.6	206.2	85.8	16.2	4.0	949.94	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4	
15366 Zumpahuacan	3.0	6.8	6.3	23.7	72.1	200.1	195.7	249.8	244.9	78.6	16.1	5.9	1103.09	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	5	
17029 Palpan	11.5	7.9	6.6	16.7	60.0	214.0	209.7	235.4	246.7	78.6	12.2	4.2	1103.47	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	5	
17058 Cuentepec	11.5	7.5	4.0	11.8	55.3	230.4	207.9	230.4	217.3	74.5	15.3	4.6	1070.43	2
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	5	
17061 Apancingo	6.4	7.0	6.0	20.6	61.0	216.5	193.5	209.4	186.0	63.3	8.1	2.8	980.50	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4	
17062 Chavarría	4.0	6.2	6.6	10.2	49.0	197.3	182.6	176.9	178.2	60.5	9.4	0.6	881.31	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4	
17073 Cuautlita	4.7	6.6	4.2	9.7	48.6	214.1	189.2	194.9	185.4	64.2	10.7	2.2	934.57	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4	
17092 Vista Alegre	7.6	7.8	2.2	15.7	29.4	205.7	201.7	230.6	161.4	88.4	10.9	5.0	966.55	1
Valor asignado	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	4	

Fuente: elaboración propia con base en información del Servicio Meteorológico Nacional (2022).

del promedio se le asigna un valor (Tabla 3). Posteriormente, aplicando las sugerencias de Mora y Vahrson, se suman todos los valores asignados para cada estación y el resultado se correlaciona con el factor humedad (FC_H) (Tabla 4). Finalmente, se interpolan los valores resultantes de FC_H para cada estación (Figura 6).

Hasta este momento se han descrito de forma detallada los pasos seguidos para la obtención de la zonificación de los tres factores condicionantes (FC_B , FC_L y FC_H). A continuación se presenta el procedimiento para la obtención de los factores desencadenantes. El primero, intensidad de precipitaciones (FD_{PR}), se obtiene con base de la información extraída de 19 estaciones meteorológicas (Figura 6). Se calcula la precipitación máxima diaria anual (1980-2015), para un periodo de retorno de 100 años, donde el municipio de Malinalco se ubicaría en el rango 101-200 mm, y de acuerdo con las sugerencias de Mora y Vahrson (1994), se le asignaría un valor de FD_{PR} de 2.

Por su parte, el Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana, del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2022), en su capa de información Geológicos/Indicadores/Global de Intensidades, ubica al municipio de Malinalco en la zona identificada con intensidad histórica de VII. Atendiendo a lo anterior, y al aplicar la propuesta de Mora y Mora (1992) se adjudica una calificación de media para un factor FD_S de acuerdo a la sismicidad de 5.

Como último factor desencadenante, se incluye el uso del suelo. La información se descargó en formato raster del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2015), la imagen cuenta con una resolución de 30 metros, se vectorizó en polígonos de acuerdo con la clasificación de suelos propuesta por CONABIO, y se añaden las carreteras a escala 1: 50 000, descargadas de la página del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (2021). A estas últimas, se le aplicó un área de influencia (*buffer*) con radio de 100.0 m (Guardado-Lacaba *et al.* 2019) (Tabla 5 y Figura 7).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conforme con el objetivo planteado, y en función de la metodología descrita en el apartado anterior, se obtienen dos productos cartográficos para el municipio estudiado. El primero consiste en el mapa de susceptibilidad a deslizamientos, donde se aplica el método de Mora y Vahrson (1994) sin modificaciones a la propuesta original de los autores. La cartografía arroja cuatro niveles de susceptibilidad: muy bajo, bajo, moderado y medio (Tabla 6 y Figura 8). El nivel medio indica la situación más crítica en el contexto planteado, y cubre 25 km², lo que representa el 12 % de la superficie municipal. La inspección visual indica que 14 comunidades desarrollan sus actividades socioeconómicas sobre los niveles de susceptibilidad a des-

Tabla 4. Criterios empleados para el análisis de la humedad. A: valores asignados de acuerdo a promedio mensual de precipitaciones, y B: rangos resultantes de la sumatorias de valores asignados, su calificación y valor de FCH .

A		B		
Promedio mensual de precipitaciones mm/meses	Valor asignado	Rangos de acuerdo a la sumatoria de valores asignados	Calificación	FCH
<125	0	0-4	Muy bajo	1
125-250	1	5-9	Bajo	2
>250	2	10-14	Medio	3
		15-19	Alto	4
		20-24	Muy Alto	5

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

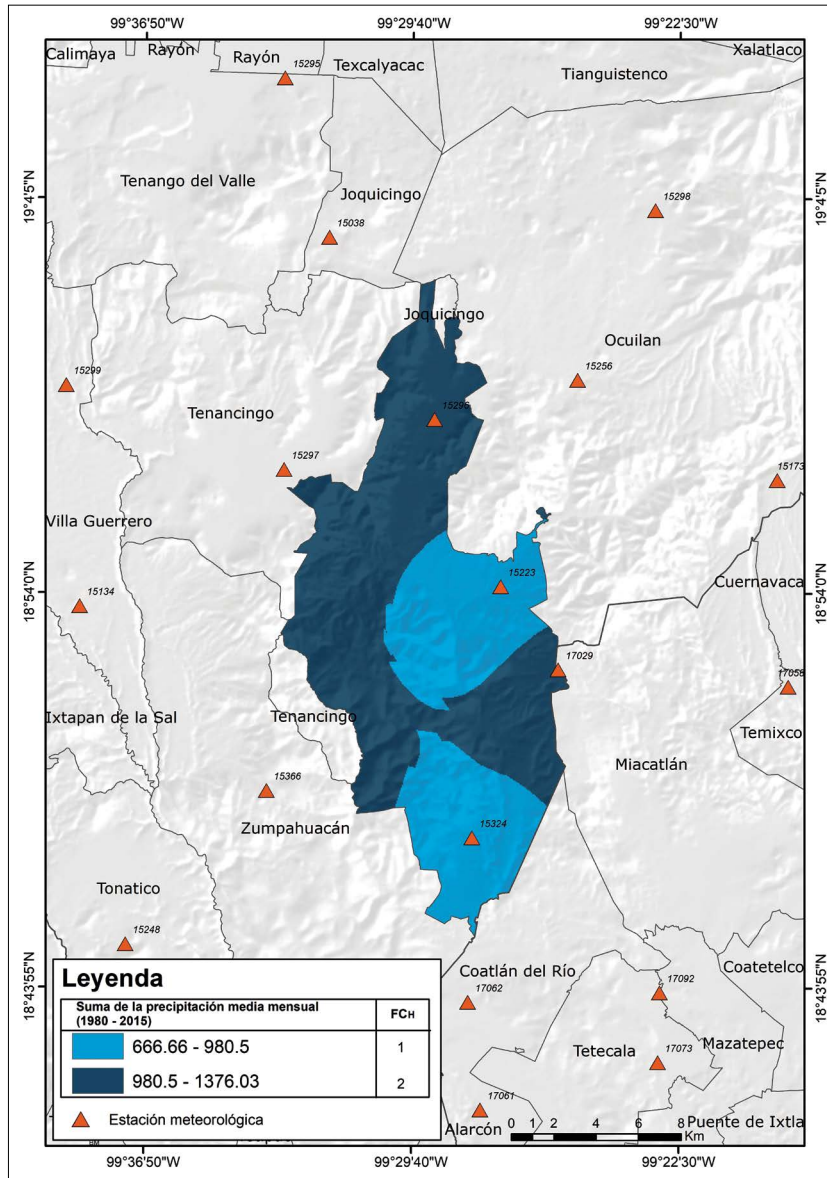


Figura 6. Distribución del factor condicionante humedad (F_{CH}). Fuente: elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional (2022).

Tabla 5. Categorías de uso de suelo para el municipio de Malinalco.

Uso del suelo	Descripción	Clasificación	FDU
Bosques	Se presentan 3 tipos de bosques: bosque de coníferas templado, bosque caducifolio tropical y bosque caducifolio templado.	Muy bajo	1
Matorrales	Formación vegetal caracterizada por el predominio de arbustos y árboles de porte bajo. Predominan en el SW del municipio.	Bajo	2
Pastizales	Los pastizales se encuentran poco y están dispersos en el municipio.	Medio	3
Uso agrícola	Presencia de agricultura de temporal, de riego anual y permanente.	Alto	4

Tabla 5. Continuación.

Uso del suelo	Descripción	Clasificación	FDU
Asentamientos/ Carreteras/ Cuerpos de agua	Aproximadamente, 6.58 km2 corresponden a asentamientos. Existen 140.73 km de carreteras.	Muy alto	5

Fuente: elaboración propia con base en información de CONABIO (2015).

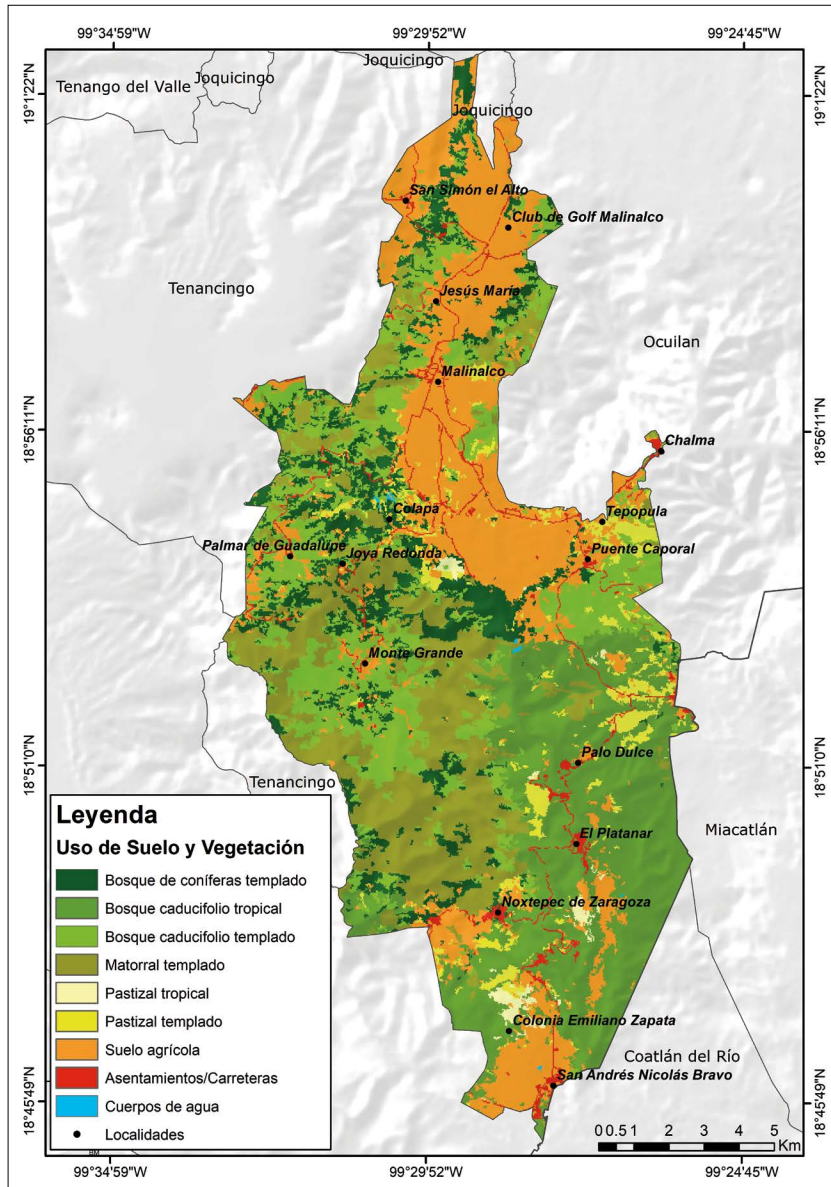


Figura 7. Principales usos de la superficie para el municipio de Malinalco. Fuente: elaboración propia con base en información de CONABIO (2015).

Tabla 6. Resultados numéricos de susceptibilidad a deslizamientos obtenidos para el municipio de Malinalco, aplicando el método de Mora y Vahrson (1994).

Valores obtenidos en la ecuación 2	Clasificación de la susceptibilidad por deslizamientos
0	Muy baja
14 - 28	Baja
35 - 140	Moderada
168 - 280	Media

Fuente: elaboración propia.

lizamientos “moderado” y “medio”, donde residen 14 800 personas.

Con el objetivo de validar la calidad de los resultados cartográficos, se elaboró el inventario de deslizamientos, que recoge eventos ocurridos desde 2009 al presente (Tabla 7). La valoración espacial de los eventos inventariados indica que 17 deslizamientos ocurrieron en un escenario de susceptibilidad media, 14 en susceptibilidad moderada, 1 en susceptibilidad baja y 3 en

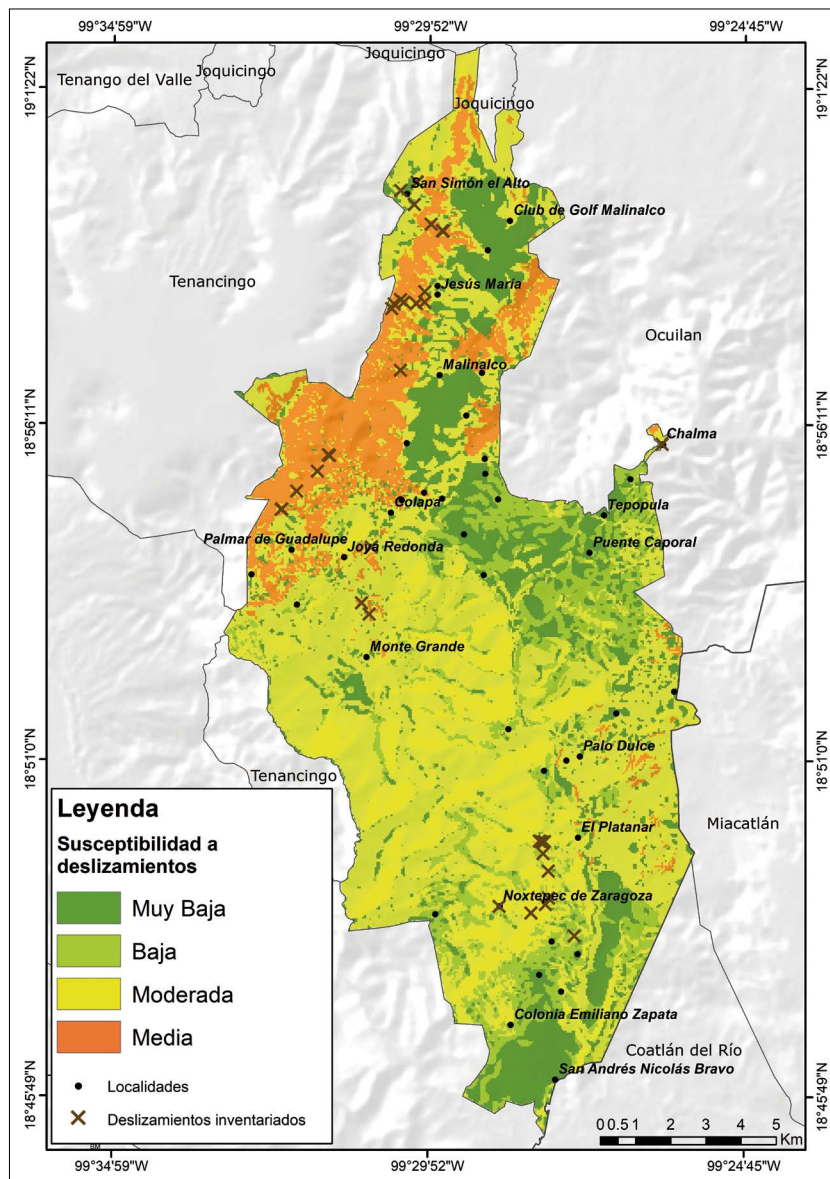


Figura 8. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos en el municipio de Malinalco, empleando los criterios sugeridos por Mora y Vahrson (1994). Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Deslizamientos inventariados en el municipio de Malinalco.

Id	Ubicación	Fecha	Latitud N	Longitud W	Nivel de daños	Fuente
1	Localidad San Simón el Alto	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2100120.607	447156.62	160 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
2	Localidad San Simón el Alto	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2100516.9	446776.152	100 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
3	Localidad San Simón el Alto	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2100755.079	447235.4	35 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
4	Localidad Jesús María	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2097636.881	447457.959	28 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
5	Localidad Santa Mónica	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2095406.053	446759.924	15 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
6	Localidad Noxtepec de Zaragoza	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2080151.955	449570.95	149 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
7	Localidad Chalma	Sin precisar. Registrado el 30/05/2019	2093298.466	454206.129	200 personas en riesgo	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
8	Carretera San Simón el Alto	Temporada de lluvias de, al menos, los últimos 5 años	2099558.3	447636.799	Afectación a vías de comunicación	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
9	Carretera Jesús María	Temporada de lluvias de, al menos, los últimos 5 años	2097301.532	447217.169	Afectación a vías de comunicación	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
10	Carretera Palmar de Guadalupe	Temporada de lluvias de, al menos, los últimos 5 años	2091458.075	443386.533	Afectación a vías de comunicación	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
11	Carretera Joya Redonda	Temporada de lluvias de, al menos, los últimos 5 años	2090373.065	445935.02	Afectación a vías de comunicación	Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco (2019)
12	Malinalco	06/09/2017	Sin precisar	Sin precisar	Afectación a vías de comunicación	Nota de prensa en AFondoCDMx Publicado el 06/09/2017
13	Carretera Palmar de Guadalupe	07/2013	2091447.1	443369.4	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.

Tabla 7. Continuación.

Id	Ubicación	Fecha	Latitud N	Longitud W	Nivel de daños	Fuente
14	Carretera de Malinalco a Tenancingo	20/09/2017	2097286.892	446587.523	Afectación a vías de comunicación	Nota de prensa en: sé uno noticias Publicado el 20/09/2017
15	Carretera La Cumbre	Fecha sin precisar. Los eventos se repitieron en los años 2009 y 2010	2097411.511	446770.086	Afectación a vías de comunicación	Comisión del Agua del Estado de México (2017).
16	San Nicolás	Fecha sin precisar. Los eventos se repitieron en los años 2009 y 2010	2097339.885	447451.356	Afectó a 4 personas	Comisión del Agua del Estado de México (2017).
17	Carretera Palmar de Guadalupe	Fecha sin precisar. Los eventos se repitieron en los años 2009 y 2010	2091458.075	443386.533	Afectación a vías de comunicación	Comisión del Agua del Estado de México (2017).
18	Monte Grande	Fecha sin precisar. El evento ocurrió en el año 2010	2088463.934	445877.122	Afectó a 4 personas	Comisión del Agua del Estado de México (2017).
19	El Platanar	Fecha sin precisar. El evento ocurrió en el año 2010	2081998.085	450857.332	Afectó a 5 personas	Comisión del Agua del Estado de México (2017).
20	Camino a monte grande	28/08/2020	2088785.926	445655.809	Afectación a vías de comunicación	Red social: Ayuntamiento de Malinalco Publicado el 28/08/2020
21	Carretera de Malinalco a Tenancingo	31/07/2021	2097157.511	446517.197	Afectación a vías de comunicación	Red social: Black & White del municipio de Tenancingo Publicado el 31/07/2021
22	Carretera San Simón - San Sebastián	14/09/2021	2099368.566	447955.014	Afectación a vías de comunicación	Red social: Amigos de Malinalco Publicado el 14/09/2021
23	Carretera San Nicolás - Tenancingo	30/09/2019	2097338.2	446867.2	Afectación a vías de comunicación	Red social: Seguridad Pública Malinalco Publicado el 30/09/2019

Tabla 7. Continuación.

Id	Ubicación	Fecha	Latitud N	Longitud W	Nivel de daños	Fuente
24	Carretera Malinalco - San Simón El Alto	30-sep-19	2099363.7	447984.2	Afectación a vías de comunicación	Red social: Seguridad Pública Malinalco Publicado el 30/09/2019
25	Carretera Malinalco-San Andrés Nicolás Bravo	03/07/2019	2081656.16	450818.769	Afectación a vías de comunicación	Red social: Ayuntamiento de Malinalco Publicado el 03/07/2019
26	Carretera El Palmar de Guadalupe - Malinalco	30-sep-19	2092979.8	444748.8	Afectación a vías de comunicación	Red social: Seguridad Pública Malinalco Publicado el 30/09/2019
27	Carretera Malinalco-San Andrés Nicolás Bravo	07/21	2081990.1	450774.5	Afectación a vías de comunicación	Identificado por la interpretación de rasgos geomorfológicos mediante la observación de imágenes Google Earth.
28	Carretera Colonia Juárez	07/21	2079313.6	451704.1	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
29	Carretera Noxtepec de Zaragoza-El Platanar	07/21	2080391.3	450975.2	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
30	Carretera Noxtepec de Zaragoza-El Platanar	07/21	2080207.1	450886.9	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
31	Carretera Noxtepec de Zaragoza-El Platanar	07/21	2079962.3	450476.5	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
32	Carretera El Palmar y Pachuquilla	03/2013	2091968.3	443809.8	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
33	Carretera Malinalco-San Andrés Nicolás Bravo	07/21	2082010.065	450717.77	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
34	Carretera Malinalco-San Andrés Nicolás Bravo	07/21	2081154.454	450968.102	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.

Tabla 7. Continuación.

Id	Ubicación	Fecha	Latitud N	Longitud W	Nivel de daños	Fuente
35	Carretera El Palmar y Pachuquilla	03/2013	2092534.255	444400.859	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.
36	Carretera El Palmar y Pachuquilla	03/2013	2092998.758	444712.546	Afectación a vías de comunicación	Elaboración propia con ayuda del programa Google Earth.

Fuente: elaboración propia.

susceptibilidad muy baja. Estos últimos 3 deslizamientos se asocian espacialmente a la construcción de taludes en carreteras, un elemento extremadamente relevante, como parte de la discusión de los resultados obtenidos, porqué indica la necesidad de incluir la influencia del uso del suelo.

Atendiendo a la evidencia descrita, en relación con la validación de la cartografía representada en la Figura 8, y considerando que, 33 deslizamientos inventariados se vinculan espacialmente a intervenciones antrópicas, específicamente carreteras, se decidió incluir el factor desencadenante “uso del suelo”. El resultado del segundo análisis se representa en la Tabla 8 y la Figura 9, el cual sugiere un mejor acercamiento a la realidad física municipal, donde, en este segundo caso, y a diferencia de la cartografía mostrada en la Figura 8, aparece reflejado el nivel de susceptibilidad “alto”.

Tabla 8. Resultados numéricos de susceptibilidad a deslizamientos obtenidos para el municipio de Malinalco, el análisis incluye el factor desencadenante “uso del suelo”.

Valores obtenidos en la ecuación 3	Clasificación de la susceptibilidad por deslizamientos
0	Muy baja
16 - 32	Baja
33 - 162	Moderada
165 - 330	Media
>350	Alta

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 10 se realiza un acercamiento visual a la carretera Malinalco-Palmar de Guadalupe, donde se revela un tramo muy inestable, en el que se han inventariado 6 deslizamiento en un segmento de 1200 m, y de acuerdo con el análisis realizado en este trabajo, transitaría por las categorías de susceptibilidad media y alta. Este último análisis ofrece consistencia a la cartografía obtenida y valida su aplicabilidad para fines de gestión del riesgo. Se puede observar en esta misma Figura 10 cómo la carretera se emplaza sobre montañas medianamente diseccionadas (251 a 500 m/km²) con pendientes superiores a los 25°, demostrándose como en las citadas condiciones morfométricas, los depósitos de lahares pueden ser muy inestables, lo que se agrava con la intervención antrópica. Estos últimos comentarios permiten establecer reglas para el comportamiento geomorfológico de la zona.

La ubicación espacial de los deslizamientos inventariados indica que al menos ocho ocurrieron asociados a lahares. La actividad de laderas en depósitos de lahares y sus características es un elemento bien estudiado en México (Aceves-Quesada *et al.*, 2013; Franco-Ramos *et al.*, 2016; Vázquez-Ríos y Franco-Ramos, 2022, entre otros trabajos). Para el caso del municipio de Malinalco los depósitos de lahares afloran en 37 km², de los cuales 15.5 km² corresponden a las categorías de susceptibilidad a deslizamientos media y alta.

El nivel de susceptibilidad “alto” es poco representativo cubre un área aproximada de 1.34 km² y se vincula espacialmente a un tramo de la carretera de Malinalco-Palmar de Guadalupe y de

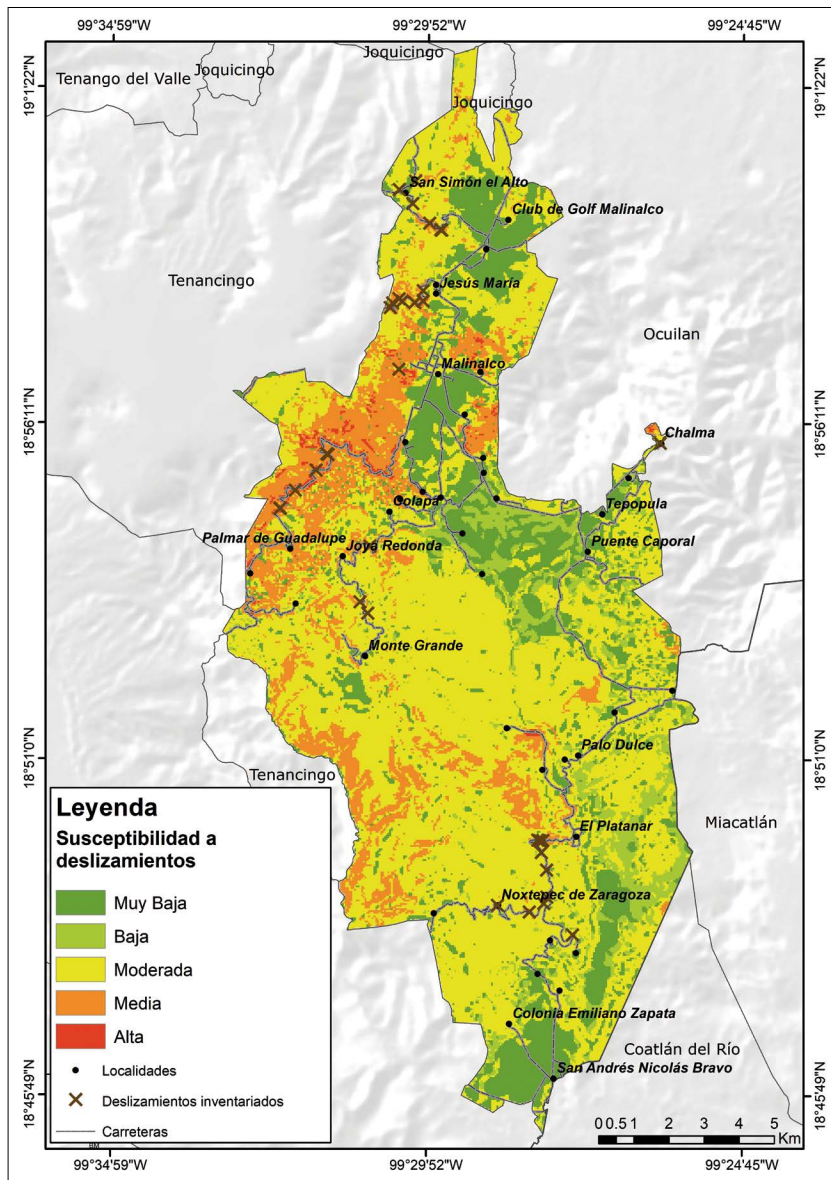


Figura 9. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos en el municipio de Malinalco, incluyendo el factor condicionante “uso del suelo”. Fuente: elaboración propia.

Chichiasco el Viejo a San Pedro Chichiasco. El nivel de susceptibilidad medio cubre 28.50 km² y en ella se emplaza de forma completa o parcialmente ocho comunidades: Las Paredes, Campos San Martín, Loma del Coporo, Cerro Pelón, Joya Redonda, Palmar de Guadalupe, Pachuquilla y El Platanar. Los escenarios geográficos citados deben constituir sitios prioritarios para la gestión de riesgo municipal. Se sugiere enfatizar el ordenamiento territorial, donde puedan ser considerados los

resultados descritos. Así mismo, es importante realizar estudios a escala de detalle en los taludes de carreteras del municipio, para estimar el coeficiente de estabilidad, y en caso de coeficientes inferiores a 1.5 (González de Vallejo, 2002), proponer medidas de estabilización. De acuerdo con la cartografía obtenida, el trazado de 3.62 km de carreteras corresponde espacialmente al nivel de susceptibilidad alto, 19.45 km al nivel medio, 69.78 km al nivel moderado, sobre los niveles de susceptibilidad

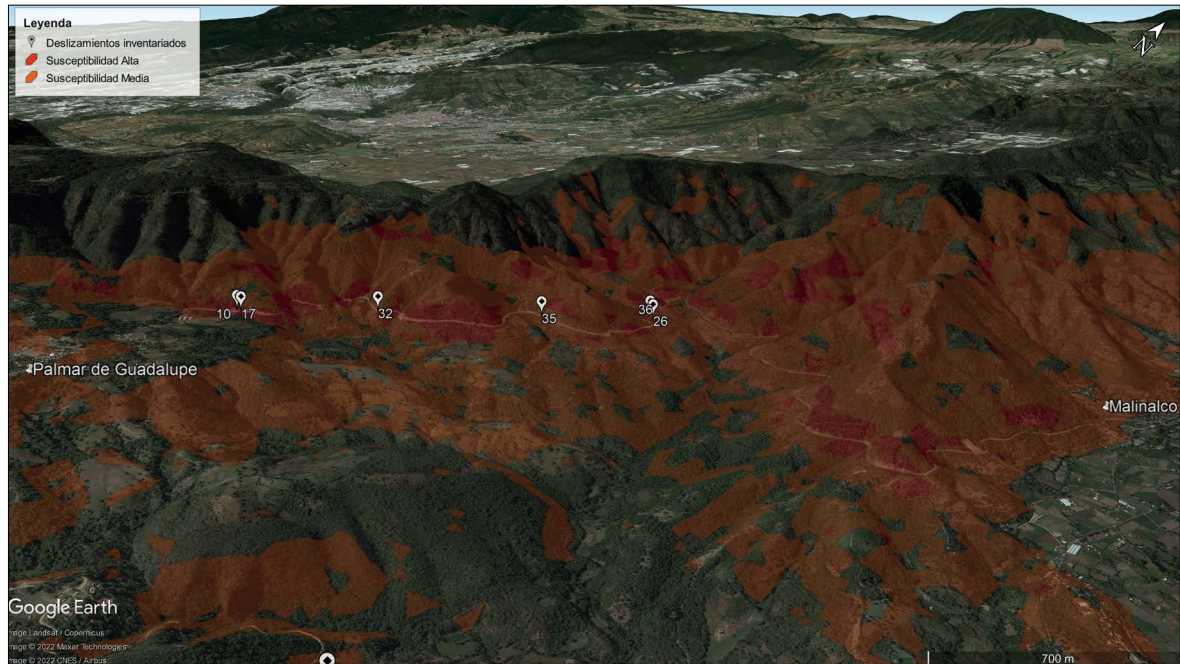


Figura 10. Tramo de la carretera Malinalco-Palmar de Guadalupe donde se identifican los niveles de susceptibilidad “media” y “alto”. En la imagen se demuestra la validez de la cartografía obtenida atendiendo a la correspondencia espacial con 6 deslizamientos inventariados. Fuente: elaboración propia.

bajo se emplazan 6.55 km y en el nivel muy bajo 40.23 km de vialidades.

El estudio no se enfocó al análisis de peligrosidad y no se establecen umbrales de lluvias que eventualmente pueden desencadenar los deslizamientos. Sin embargo, considerando: 1) algunos trabajos recientes en el Estado de México (Domínguez *et al.*, 2016 y Valdés-Fernández *et al.*, 2022), y 2) atendiendo al contexto en que se desencadenaron los deslizamientos inventariados (Tabla 7), ambos elementos sugieren un valor extremo de 234.14 mm mensuales. Para el Estado de México, el trabajo más reciente (Valdés-Fernández *et al.*, 2022), estimó 3 umbrales para dos escenarios, el primero, para valores de lluvia diarias, con un umbral mínimo de ≥ 56 mm, un umbral medio de ≥ 70 mm y un umbral máximo de ≥ 106 mm; y para valores de lluvias acumuladas en tres días, el umbral mínimo sería ≥ 35 mm, el umbral medio de ≥ 72 mm y el máximo de ≥ 150 mm. Esta información permite establecer sistemas de alerta temprana, con especial atención a las comunidades emplazadas en los nive-

les de susceptibilidad a deslizamientos identificados en este trabajo como “medio” y “alto”.

El Atlas Municipal de Riesgo (Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco, 2019), en su apartado “Fenómenos Geológicos-Geomorfológicos”, aborda el tema relacionado con los deslizamientos. En este caso, aporta la ubicación de asentamientos humanos en zonas de pendientes pronunciadas; además, indica sitios puntuales donde en el pasado han ocurrido deslizamientos. La cartografía mostrada en este artículo (Figura 9), representa una mejora considerable, desde lo cuantitativo, donde se ofrece elementos que justifican la zonificación de la susceptibilidad a deslizamientos mediante métodos ampliamente empleados en México y en la región. Y, especialmente, marca las zonas prioritarias que deben ser atendidas por parte de las instituciones del gobierno municipal y estatal. Así mismo, los autores, sugieren que se consideren los resultados obtenidos en el diseño e implementación del Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Malinalco.

CONCLUSIONES

La metodología Mora y Vahrson resultó, para este caso de estudio, una herramienta eficaz en la identificación de zonas susceptibles a movimientos de laderas mediante técnicas SIG. Sin embargo, se muestra que puede ser modificada de acuerdo con las características físicas del espacio geográfico estudiado y al nivel de información disponible.

El municipio de Malinalco presenta su mayor número de movimientos inventariados en las vías de comunicación (carreteras), ubicadas al norte, noroeste y sureste del municipio; por consiguiente, el uso de suelo constituyó un factor desencadenante robusto para el diseño metodológico. Las carreteras donde los movimientos de laderas se presentaron con mayor frecuencia fueron: San Simón el Alto-San Nicolás, Tenancingo-San Nicolás, Palmar de Guadalupe-Malinalco, Monte Grande- Jalmolonga, y La Angostura-El Platanar. Cada una de ellas, de acuerdo con la cartografía obtenida, corresponden espacialmente a los niveles de susceptibilidad medio y alto, elementos que validan los resultados (Figuras 9 y 10).

Además de la amenaza latente en los tramos de carreteras citados, se sugiere analizar detalladamente el riesgo por deslizamiento, en al menos ocho localidades del municipio Malinalco, donde se emplazan parcial o totalmente sobre el nivel de susceptibilidad medio las comunidades: Las paredes, Campos San Martín, Loma del Coporo, Cerro Pelón, Joya Redonda, Palmar de Guadalupe, Pachuquilla y El Platanar, que de acuerdo al censo de población y vivienda del 2020 concentrarían una población expuesta de aproximadamente 2 217 habitantes y 798 hogares.

Se demuestra que las acciones antrópicas, especialmente las modificaciones geométricas de los taludes para la construcción de carreteras, son un factor esencial. De lo anterior se sugiere, como medida inicial, en la gestión local de riesgo, la estimación del coeficiente de estabilidad de taludes, con énfasis en las carreteras ubicadas en las zonas con niveles de susceptibilidad, medio y alto (Figura 9). Se recomienda la inclusión de la cartografía obtenida en el ordenamiento territorial, y en el

establecimiento de prioridades para el diseño de sistemas de alerta temprana.

REFERENCIAS

- Aceves Quesada, J. E., Legorreta Paulín, G., Lugo Hubp, J., Umaña Romero, J. y Legorreta Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 91, 43-55. <https://doi.org/10.14350/rig.46503>
- AFondoCDMx. (2017, 6 de septiembre). Lluvias causan más derrumbes, deslaves y afectaciones a las vías de comunicación [Nota de prensa]. <https://afondocdmx.com/metropolitana/lluvias-causan-mas-derrumbes-deslaves-y-afectaciones-a-las-vias-de-comunicacion/>
- Alonso, E. (2005). Estabilidad de taludes. Universidad Politécnica de Cataluña. https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250339/2015/Tema5--Taludes.pdf
- Amigos de Malinalco. (2021, 14 de septiembre de). Deslave en la Carretera San Simón - San Sebastián. <https://www.facebook.com/groups/1406553952707647/posts/4800860513276957>
- Ávila Velásquez, D. I. (2019). Estimación de la susceptibilidad a deslizamientos en la región sur-este de la Reserva Biológica Montecillos a través del método Mora-Vahrson. *Revista SICES*, 2.
- Ayuntamiento de Malinalco. (2019, 3 de julio). Remoción de escombros en la carretera Malinalco-San Andrés Nicolás Bravo. <https://www.facebook.com/AyuntamientoDeMalinalco/posts/pfbid0gSqvoMEc6n11sSt2Jexwi98atyNQ7L8S2VGrKk4gZzjN-ggoNQ91ywMAD1kFDBwoml>
- Ayuntamiento de Malinalco. (2020, 28 de agosto). Reporte de deslave y cierre del camino a monte grande. <https://www.facebook.com/AyuntamientoDeMalinalco/posts/pfbid02uYcoW62XLYihbxDmVRzManLZQSRyHHLr9MLnfpavhdMoUN-MtaUbs7xkHSuiEWh8mVI>
- Black & White Tenancingo. (2021, 31 de julio). Bloqueo parcial de carretera. <https://www.facebook.com/bwtenancingo/posts/pfbid02K4sVXoSE-88yJc4qVQFKZ8RxTVH1bov6tkbcr1nLPXkHb-gr6dsaXG1JLXdJBrAAQBI>
- Cárdenas, K. (2018). Análisis general de la gestión del riesgo por inundación en Colombia. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad*, 4(1). <https://revistas.udea.edu.co/index.php/CAA/article/view/335841>

- Cardona, O. D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. Una crítica y una revisión necesaria para la gestión. <https://www.desenredando.org/public/articulos/2001/repvuln/RepensarVulnerabilidadyRiesgo-1.0.0.pdf>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2022). Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT del Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres. <https://public.emdat.be/data>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2022). Mapa global de intensidades para la República Mexicana. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
- Cimini, D., Portoghesi, L., Madonna, S., Grimaldi, S. y Corona, P. (2016). Multifactor empirical mapping of the protective function of forests against landslide occurrence: statistical approaches and a case study. *iForest*, 9, 383-393. <https://doi.org/10.3832/ifer1740-008>
- Comisión del Agua del Estado de México (2017). Reincidencia de Inundaciones en las Temporadas de Lluvias 2002-2017 Cuenca del Río Balsas. <https://docplayer.es/89284091-Reincidencia-de-inundaciones-en-las-temporadas-de-lluvias-cuenca-del-rio-balsas.html>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (2015). Cobertura del Suelo de México a 30 metros, 2015. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Consejo Estatal de Población. (2020). Índice de marginación municipal. https://coespo.edomex.gob.mx/indice_marginacion
- Coordinación Municipal de Protección Civil de Malinalco. (2019). Atlas de riesgos del municipio Malinalco, Estado de México, 2019. http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/EdoMex/Atlas_Malinalco_Dic2019_061.PDF
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ª. ed.). México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Domínguez, L., Castañeda, A. y González, A. E. (2016). Análisis de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos y sus posibles aplicaciones en un sistema de alerta temprana por inestabilidad de laderas. Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales. CENAPRED. https://www1.cenapred.unam.mx/COORDINACION_ADMINISTRATIVA/SRM/FRACCION_XLI_A/23.pdf
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. (2016). El paso de la tormenta Earl provoca 38 muertes en Puebla y Veracruz. <https://agua.org.mx/el-paso-de-la-tormenta-earl-provoca-38-muertes-en-puebla-y-veracruz/>
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M. y Vázquez-Selem, L. (2016). Tree-ring based record of intraeruptive lahar activity: Axaltzintle valley, Malinche volcano, Mexico. *Geochronometria*, 43, 74-83. DOI: <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0033>
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Guardado-Lacaba, R., Viltres-Milán, Y., Alfonso-Olivera, L. D. (2019). Cartografía de la peligrosidad por deslizamientos en el municipio de Mayari. *Minería y Geología*, 35 (2), 126-146. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223558779001>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. y Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112 (1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Malinalco, México*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/15/15052.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Curvas de nivel con equidistancia de 20 m. en formato shape. <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Lanni, C., Borga, M., Rigon, R. y Tarolli, P. (2012). Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (11), 3959-3971. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3959-2012>, 2012.
- Leshchinsky, B. A., Olsen, M. J. y Tanyu, B. F. (2015). Contour Connection Method for automated identification and classification of landslide deposits. *Computers & geosciences*, 74, 27-38. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.007>
- López, R. E., Zuluaga, A. D., Gómez, F. y Tapia, L. (2020). Aplicación del método Mora-Vahrson para evaluar la susceptibilidad a deslizamiento en el municipio de Manaure, Cesar, Colombia. *REDER*, 4(2), 57-70. <https://doi.org/10.55467/reder.v4i2.50>
- Montalván, F., Loo, M., Pérez, L., Carrión, P., Álvarez, A., Reyes, B. y Herrera, G. (2017). Estabilidad de taludes para un diseño de un relleno sanitario manual para una población de 5000 habitantes. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 4(3), 103-110. <https://doi.org/10.26423/rctu.v4i3.276>
- Mora, S. y Mora, R. (1992). Landslides Triggered by the Limón-Telire, Costa Rica Earthquake (April 22,

- 1991, M1=7.5) and Comparison with Other Events in Costa Rica: U.S. Geological Survey, Professional Paper in press.
- Mora, S. y Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering and Geologist*, 31(1), 49-58.
- Quesada-Román, A. y Feoli-Boraschi, S. (2018). Comparación de la Metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para Determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(61), 17-45. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-2.1>
- Ramos, A. A. (2017). *Análisis de estabilidad de taludes en rocas. Simulación con LS-DYNA y comparación con SLIDE*. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Geológica y Minería, Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/47326/1/TFM_ABEL_ANTONIO_RAMOS_VASQUEZ.pdf
- Rodríguez Solano, J. G., Quintana Cabeza, C. D., Rivera Alarcón, H. U., Mosquera Téllez, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: Estudio de caso. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 4(1), 13-22.
- Segura, G., Badilla, E. y Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 45, 101-121. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i45.1908>
- Seguridad Pública Malinalco. (2019, 30 de septiembre). En la carretera El Palmar de Guadalupe - Malinalco se presentó la caída de rocas y árboles. <https://www.facebook.com/SeguridadPublicaMalinalco>
- Seguridad Pública Malinalco. (2019, 30 de septiembre). Caída de rocas en carretera Malinalco-San Simón El Alto. <https://www.facebook.com/SeguridadPublicaMalinalco/posts/pfbid036ZH89HiYSc7nVT-BxuvWFdr3DtdF1u67rR9FdaZgRnkC6416yznR-bFTzD1o9GBQv7l>
- Seguridad Pública Malinalco. (2019, 30 de septiembre). Caída de rocas en carretera San Nicolás-Tenancingo. <https://www.facebook.com/SeguridadPublicaMalinalco/posts/pfbid02o7LXe8hkLBTuQHYS1CeD-C4iASezbWb1TcUscUbpHyeLkvbQUwKuRDL-VbZy3zCZMAI>
- Servicio Geológico Mexicano. (2014). Carta Geológica-Minera Tenancingo E14-A58. <https://www.gob.mx/sgm>
- Servicio Meteorológico Nacional (2022). Datos de precipitaciones por estaciones meteorológicas. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automatizadas-ema-s>
- SéUnoNoticias. (2017, 20 de septiembre). Malinalco sufre daños en viviendas [Nota de prensa]. <https://seunonoticias.mx/2017/09/20/malinalco-sufre-danos-viviendas/>
- Silva Bustos, N. (2020). Identificación de los Factores Subyacentes del Riesgo de Desastres en el Nivel Comunal en Chile. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(1), 21-34. <https://doi.org/10.55467/reder.v4i1.39>
- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (2021). Red Nacional de Carreteras 2021. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siat/
- Spiker, E. C. y Gori, P. L. (2003). National Landslide Hazards Mitigation Strategy: A framework for loss reduction. USGS Circular 1244, 56 p. U.S. Department of interior, U.S.G.S. Reston, Virginia, USA. <https://pubs.usgs.gov/circ/c1244/c1244.pdf>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Naciones Unidas. https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendai-frameworkfordisasterri.pdf
- Valdés-Fernández, C., Baró-Suárez, J., Flores-Olvera, P. y Franco-Plata, R. (2022). Propuesta de umbrales críticos de precipitaciones detonantes de procesos de remoción en masa, caso de estudio: Estado de México. *Revista Geográfica de América Central*, 2(69), 225-255. <https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.8>
- Vázquez-Ríos, M. y Franco-Ramos, O. (2022). Reconstrucción dendrogeomorfológica de procesos de remoción en masa y lahares en las Barrancas Seca y Ojo Salado, Pico de Orizaba, México. *Investigaciones Geográficas*, 107. <https://doi.org/10.14350/ig.60470>