BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
FACULTAD DE INGENIERÍA
COLEGIO DE GEOFÍSICA

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA, A PARTIR DE EVENTOS DEL AÑO 2004-2020, A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DE MORA-VAHRSON, CASO DE ESTUDIO: XICOTEPEC, PUEBLA.

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

DAYANE LUCÍA ISLAS MÁRQUEZ

DIRECTOR INTERNO: **MTRO. JOSÉ SERRANO ORTIZ**

DIRECTORA EXTERNA: **DRA. NELLY LUCERO RAMÍREZ SERRATO**

ASESOR EXTERNO: **DR. JORGE ALAN SALINAS JASSO**

FEBRERO 2026

Dedicatoria

A mis padres, Celia y Zenón, cuyo amor, apoyo y sacrificios incondicionales han sido mi mayor inspiración. Por enseñarme que la perseverancia y la dedicación son el camino hacia cualquier sueño, y por ser siempre mi refugio y mi guía. Este logro también es suyo, porque sin ustedes, nada de esto sería posible.

A mis hermanos, Luis Ángel y Cesar Alexis, por ser fuente de constante inspiración y alegría en mi vida. Los amo incondicionalmente, siempre estaré para ustedes.

A mis abuelitos, Lucia y Eudocio, cuyas palabras y apoyo, siempre me impulsaron a seguir adelante.

Finalmente, a la personita más importante en mi vida, Ximenita, mi querida hija, la luz de mi vida. Cada paso que doy, lo hago pensando en ti y en el ejemplo que quiero ser. Este logro es también para ti, con la esperanza de que siempre persigas tus sueños con valentía, esfuerzo y amor. Gracias por ser mi mayor motivación y mi razón para seguir adelante. Te amo infinitamente, espero ser un impulso en tu vida y que siempre te sientas orgullosa.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por siempre cuidar de mí y de mi familia.

Mi más profundo agradecimiento a la Dra. Nelly Ramírez por su dedicación y paciencia infinita. Su dirección académica, llena de sabiduría y estímulo, ha sido fundamental para dar forma a esta investigación y mi crecimiento académico. No puedo expresar con palabras cuánto valoro su apoyo y orientación a lo largo de este proceso.

Infinitas gracias al Dr. Jorge Alan Salinas Jasso, por su apoyo y aportaciones a este trabajo.

Agradezco el apoyo del Maestro José Serrano para realizar este proceso.

Agradezco a la BUAP, por brindarme la oportunidad de realizar mi trayectoria académica.

A la Facultad de Ingeniería y al Colegio de Geofísica, por la oportunidad de desarrollarme académicamente, así como a quienes compartieron horas de trabajo en conjunto y vivieron historias junto a mí.

En este trabajo, quiero rendir un homenaje especial a la memoria del Ing. Melesio Reynoso Carvajal, un docente cuya pasión por la enseñanza y dedicación al aprendizaje dejaron una huella imborrable en mi vida. Su compromiso con la educación y su constante apoyo fueron fundamentales en mi desarrollo académico y personal.

Ing. Melesio no solo compartió su vasto conocimiento, sino que también inspiró a sus alumnos a perseguir sus sueños y a nunca rendirse. Aunque ya no esté físicamente entre nosotros, su legado vive en cada uno de sus estudiantes, y su influencia continuará guiándome en mi camino. Agradezco profundamente haber tenido la oportunidad de aprender de Usted y de contar con su apoyo en este viaje académico.

Y finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte importante en mi desarrollo académico, en especial a quienes puedo considerar mis amigos, Anita, Sergio, Luis Enrique, María Fernanda, Emanuel, Ángel. Infinitas gracias por su apoyo y acompañamiento en este proceso. Así como a mis compañeros y jefes de trabajo, de quienes siempre he aprendido algo todos los días

ÍNDICE GENERAL

Resumen 1
Capítulo 1. Introducción 2
1.1 Planteamiento del problema 2
1.2. Justificación 3
1.3 Objetivos 5
1.3.1. Objetivo general 5
1.3.2. Objetivos específicos 5
1.4. Hipótesis 5
Capítulo 2. Marco Teórico 6
2.1. Conceptos 6
2.1.1 Susceptibilidad 6
2.1.2. Amenaza 6
2.1.3. Vulnerabilidad 7
2.1.4. Riesgo especifico 7
2.2. Procesos de remoción en masa (PRM) 7
2.2.1. Definición 7
2.2.2. Clasificación y mecanismos básicos de inestabilidad de laderas 8
2.2.3. Grado de actividad y velocidad de los procesos de remoción en masa (PRM) 12
2.2.4. Causas de los procesos de remoción en masa 13
2.3 Fenómenos hidrometeorológicos como factor detonante en los procesos de remoción en masa. 14
2.3.1. Consecuencias de los procesos de remoción en masa 15
2.4 Métodos para evaluar la susceptibilidad a ocurrencia de PRM 16
2.5 Procesos de remoción en masa en México 18
2.6 Inventario de PRM 22
2.7 Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica 23
2.7.1. Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) 24
2.7.2. Teledetección y sensores remotos 25
2.7.3. Procesamiento de imágenes satelitales 26
2.7.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 26
2.8. Metodología de Mora-Varshon 28
2.8.1. índice de susceptibilidad 29
2.8.2. Factores de susceptibilidad 31
Capítulo 3. Antecedentes de la zona de estudio: Xicotepec 36
3.1. Localización y condiciones naturales de la zona de estudio: Xicotepec 36

3.2. Contexto Regional y Socioeconómico 37
3.3 Fisiografía 39
3.4. Geología general.....40
3.5. Geomorfología 43
3.6. Clima.....44
3.7. Hidrología.....47
3.7.1. Hidrología superficial.....47
3.7.2. Hidrología subterránea.....49
3.8. Erosión.....54
3.9. Edafología.....56
3.10. Uso de Suelo y vegetación.....58
3.11. Antecedentes de la zona de estudio 61
3.11.1. Análisis de cambio climático 61
3.11.2. Elementos expuestos en Xicotepec.....62
CAPÍTULO 4. Metodología.....63
4.1. Desarrollo metodológico.....63
4.2 Inventario de PRM 65
4.3. Metodología de Mora-Vahrson 70
4.3.1. Uso de suelo 70
4.3.2 Pendiente.....73
4.3.3. Litología 75
4.3.4. Intensidad sísmica 77
4.3.5. Intensidad de precipitación.....79
Capítulo 5 Resultados y discusiones.....83
5.1 Inventario de PRM 83
5.2. Mapa de susceptibilidad.....87
5.3. Inventario de PRM de 2004-2020 en comparativa con el modelo de susceptibilidad.....90
5.3.1. Modelo de calibración 92
5.4. El mapa nacional de susceptibilidad en comparativa con el modelo de susceptibilidad obtenido.....95
6. Conclusiones 99
7. Recomendaciones 102
Bibliografía 104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Municipios del Estado de Puebla que cuentan con Atlas de Riesgo 2
Figura 2 PRM de la Pintada, Guerrero (2013) 18
Figura 3 PRM en Angangueo, Michoacán (2010) 19
Figura 4 PRM en Huauchinango, Puebla (2016) 20
Figura 5 PRM en Tlahuitoltepec, Oaxaca (2016) 21
Figura 6 PRM en la Sierra Norte de Puebla octubre de 1999 22
Figura 7 Procesos involucrados en la teledetección 26
Figura 8 Ubicación de la zona de estudio 36
Figura 9 Provincias fisiográficas en el municipio de Xicotepec. 39
Figura 10 Geología de Xicotepec 42
Figura 11 Geomorfología de Xicotepec 43
Figura 12 Unidades climáticas de Xicotepec. 46
Figura 13 Hidrología Superficial 48
Figura 14 Hidrología Subterránea 53
Figura 15 Erosión en el municipio 55
Figura 16 Edafología en el municipio 57
Figura 17 Uso de Suelo y vegetación 60
Figura 18 Desarrollo metodológico 63
Figura 19 Identificación de PRM 64
Figura 20 Uso de suelo de Xicotepec 72
Figura 21 Pendientes en el municipio de Xicotepec 74
Figura 22 Litología en el municipio de Xicotepec 76
Figura 23 Intensidad sísmica en el municipio de Xicotepec 78
Figura 24 Intensidad de precipitación en el municipio de Xicotepec 80
Figura 25 Regímenes de humedad 82
Figura 26 Registros de PRM 84
Figura 27 Tipo de roca afectada por los PRM 85
Figura 28 PRM identificados en el municipio de Xicotepec 86
Figura 29 Mapa de susceptibilidad 88
Figura 30 Inventario de PRM de 2004-2020 en comparativa con el modelo de susceptibilidad 91
Figura 31 FPR (False Positive Rate) del modelo 93
Figura 32 Curva ROC del modelo calibrado 94
Figura 33 Susceptibilidad de laderas CENAPRED 2024 98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificaciones de los procesos de remoción en masas, de acuerdo con diversos autores. 8
Tabla 2 Clasificación de los procesos de remoción en masa. Fuente EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) 9
Tabla 3 Velocidad y daño probable de los procesos de remoción en masa. 12
Tabla 4 Causas de procesos de ladera, tomada de Cruden y Varnes (1996) 14
Tabla 5 Ponderación de los factores asignados por el método. 29
Tabla 6 Índice de susceptibilidad 29
Tabla 7 Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al PRM 31
Tabla 8 Rangos de pendientes en grados 32
Tabla 9 Clasificación del valor litología 33
Tabla 10 Clasificación del valor de Uso de Suelo 34
Tabla 11 Clasificación de intensidad sísmica 34
Tabla 12 Intensidad de precipitación 35
Tabla 13 Climas en el municipio de Xicotepec 45
Tabla 14 Hidrología de Xicotepec 47
Tabla 15 Corrientes de agua 47
Tabla 16 Concesiones de extracción de agua en el municipio de Xicotepec 51
Tabla 17 Tipo de aprovechamiento de las concesiones de agua 52
Tabla 18 Características de los tipos de suelo en el municipio de Xicotepec 56
Tabla 19 Uso de suelo 59
Tabla 20 base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y perdidas ocasionados por los desastres en México de 2000-2022 68
Tabla 21 Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2023 69
Tabla 22 Clasificación para uso de suelo y vegetación 71
Tabla 23 Rangos de pendientes 73
Tabla 24 Factor litológico 75
Tabla 25 Precipitación media anual 79
Tabla 26 Régimen de humedad 81
Tabla 27 Inventario de PRM 83
Tabla 28 Resultados de susceptibilidad 87
Tabla 29 Índice de susceptibilidad a PRM 89
Tabla 30 Valores de AUC 93
Tabla 31 Área y porcentaje del municipio que ocupa cada categoría del mapa nacional de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas 96

Resumen

A nivel mundial, es necesario implementar medidas de prevención orientadas a reducir los riesgos asociados a fenómenos naturales y antrópicos, tales como terremotos, inundaciones, deslizamientos, huracanes, sequías, incendios forestales, erupciones volcánicas y accidentes tecnológicos. Para ello, es fundamental contar con sistemas de alerta temprana eficaces, que permitan una respuesta oportuna, así como con planes de evacuación bien estructurados y adaptados a los distintos escenarios de riesgo, con el objetivo de minimizar las pérdidas humanas, materiales y ambientales. En las últimas tres décadas, el municipio de Xicotepec, Puebla, ha experimentado de manera recurrente procesos de remoción en masa, originados principalmente por altos niveles de precipitación, estos fenómenos han generado impactos negativos tanto en el ámbito social como en el económico de la región. (FONDEN, 2023). En este estudio, se han empleado Sistemas de Información Geográfica para identificar zonas susceptibles a procesos de remoción en masa en el municipio Xicotepec, usando la metodología de Mora-Vahrson (Mora y Vahrson, 1994). Esta metodología clasifica la susceptibilidad mediante la consideración de factores como la pendiente, litología, uso del suelo, precipitación y sismicidad. Se han utilizado datos de distintas fuentes disponibles como Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Servicio Geológico Mexicano (SGM), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el uso de imágenes Sentinel 2, etc. Así como el software Arcgis 10.8 y QGis 3.1.4 para la elaboración de la cartografía y el análisis de información. Al combinar y relacionar la información obtenida, se logrará generar un mapa que de zonificación de las áreas más susceptibles a procesos de remoción en masa en el municipio.

Palabras clave: procesos de remoción en masa, susceptibilidad, sistemas de información geográfica.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El estado de Puebla tiene un total de 217 municipios, de los cuales solo el 18% cuenta con un Atlas de Riesgos. De acuerdo con CENAPRED (2024), el municipio de Xicotepec pertenece al 82% de los municipios que no cuentan con esta información, además de ser un municipio afectado por inestabilidad de laderas, principalmente relacionados a las altas precipitaciones, pendientes del terreno, geología, suelo, etc., que hacen que los deslizamientos localizados sean un peligro frecuente (CENAPRED, 2024).

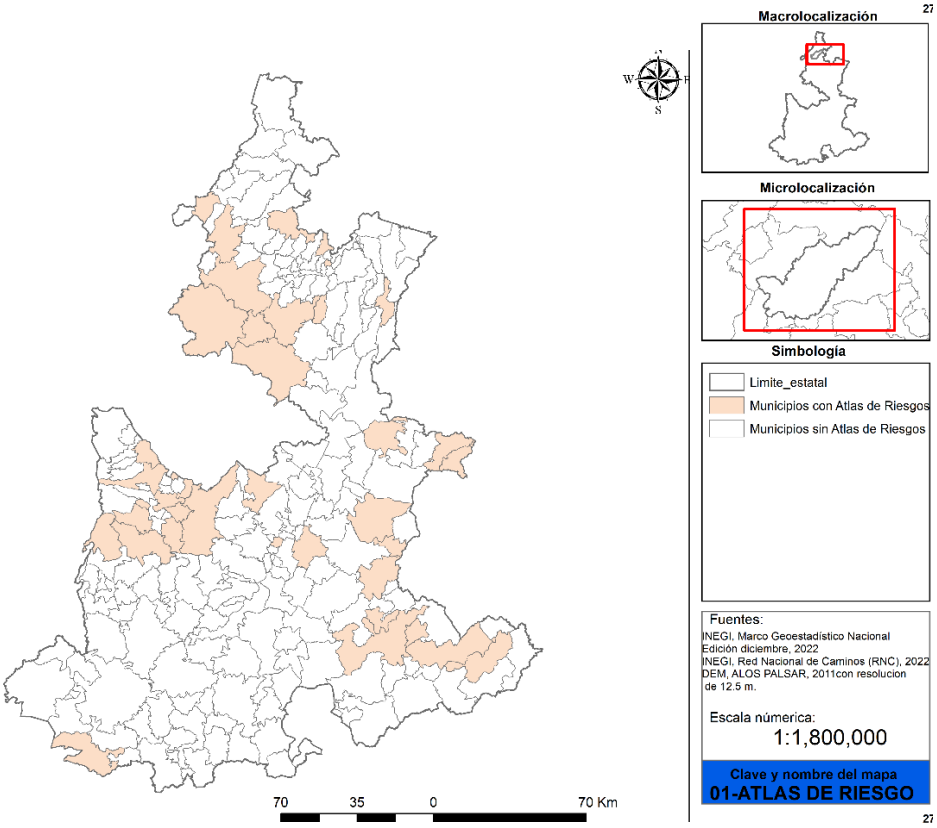


Figura 1 Municipios del Estado de Puebla que cuentan con Atlas de Riesgo

Fuente: Elaboración propia con datos del Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED.

1.2. Justificación

El estado de Puebla tiene altos niveles de vulnerabilidad ambiental (e.g., alto y muy alto) en el 13% de sus municipios, siendo principalmente (63%) aquellos ubicados en la Sierra Norte del estado (IPCC, 2007). Esto hace referencia a desastres registrados como sismos, inundaciones, PRM y amenazas volcánicas; el municipio de Xicotepec se encuentra en vulnerabilidad ambiental media.

Con información contenida en el Inventario Nacional de Fenómenos Geológicos (INEGI, 2011) y al Atlas de Riesgos del Estado de Puebla (CENAPRED, 2020) se identificaron algunos movimientos en masa en los años 2009 y 2014 el municipio de Xicotepec clasificados como caídos (desprendimientos), deslizamientos (traslacional), flujos (avalancha y de detritos) ocasionados por las lluvias prolongadas, con un valor de precipitación anual de 3000 mm.

Actualmente el municipio de Xicotepec no cuenta con información disponible (Atlas de Riesgo, Programa Municipal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico) que permita identificar la presencia estructuras significativas (por ejemplo, fallas) que puedan estar ocultas o enmascaradas debido a la densa vegetación y la topografía abrupta. Además, el municipio se encuentra en crecimiento poblacional, en el último censo realizado por INEGI en 2020 se registraron 80, 591 habitantes mientras que para el año 2040 se proyectó una población de 72,805 habitantes de acuerdo con los datos de Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios 1990-2040 (CONAPO, 2024). Esta tendencia, sumada al crecimiento urbano, hace indispensable contar con información actualizada y confiable que permita una adecuada planeación territorial, así como la prevención de riesgos y la reducción de posibles pérdidas.

A fin de contribuir a la reducción de la vulnerabilidad social en la región, este estudio tiene como objetivo identificar áreas susceptibles a procesos de remoción en masa, considerando las características geológicas, vegetales y orográficas del entorno. Esta información resulta fundamental para los responsables de la toma de decisiones y la gestión eficiente del territorio, además de ser clave en la formulación de estrategias integrales y en el desarrollo de políticas públicas.

Derivado de lo anterior, el uso del periodo 2004-2020 para el análisis de susceptibilidad en el municipio de Xicotepec es relevante y representativa sobre eventos geodinámicos ocurridos en la región. Durante estos años se registraron fenómenos significativos de remoción en masa (2009 y 2014), como desprendimientos, deslizamientos y flujos, los cuales fueron documentados en fuentes oficiales como el Inventario Nacional de Fenómenos Geológicos (INEGI, 2011) y el Atlas de Riesgos del Estado de Puebla (CENAPRED, 2020). Estos eventos permiten establecer una base empírica para entender la recurrencia y las causas de los procesos de inestabilidad del terreno, particularmente en un contexto de alta precipitación anual (hasta 3000 mm) y condiciones topográficas complejas.

Además, el año 2020 marca el punto más reciente de datos poblacionales confiables del INEGI, lo que permite establecer una relación entre el crecimiento urbano, la vulnerabilidad y el riesgo geológico. Por otro lado, considerar este periodo permite incorporar también los efectos del cambio climático y las transformaciones ambientales que han tenido lugar en las últimas décadas, de acuerdo con los criterios de vulnerabilidad establecidos por el IPCC (2007).

En conjunto, este periodo proporciona un marco temporal adecuado que combina disponibilidad de datos, relevancia de los eventos ocurridos y actualidad suficiente para realizar análisis pertinentes y apoyar la toma de decisiones en la gestión del territorio y la prevención de riesgos.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo cartográfico empleando la metodología de Mora-Vahrson y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el propósito de evaluar la susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de remoción en masa en el municipio de Xicotepec, Puebla.

1.3.2. Objetivos específicos

• Realizar un inventario de zonas afectadas por procesos de remoción en masa, mediante el uso de imágenes satelitales, para detectar zonas que han sido afectadas por estos procesos.

• Establecer factores condicionantes y desencadenantes, considerando la información disponible, para determinar qué factores influyen en el municipio.

• Cartografiar los elementos condicionantes y desencadenantes que influyen en el municipio, mediante el uso de información disponible e imágenes satelitales, para el modelo a desarrollar.

• Categorización de las cartografías temáticas con respecto a lo propuesto por Mora-Vahrson, asignando un valor a cada una de las variables de los factores condicionantes y desencadenantes.

• Zonificar al municipio de Xicotepec por susceptibilidad a procesos de remoción en masa mediante un análisis multicriterio por el método de Mora-Vahrson para identificar las áreas de mayor susceptibilidad.

1.4. Hipótesis

La metodología del análisis multicriterio mediante el método de Mora-Vahrson, permitirá identificar las áreas susceptibles a procesos de remoción en masa que aún no han sido detectadas, esto contribuirá a fortalecer las medidas de prevención, mitigación y planificación del territorio en el municipio.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Conceptos

2.1.1 Susceptibilidad

El termino de susceptibilidad se define como la propiedad del terreno que indica si las condiciones de una ladera son favorables o desfavorables para la estabilidad, haciendo referencia a factores intrínsecos de los suelos y/o rocas.

En el caso de susceptibilidad por inestabilidad de laderas se refiere al proceso de cuantificación relativa de la importancia que puede tener cada uno de los factores condicionantes en la posibilidad que se produzcan fenómenos de inestabilidad de laderas, (CENAPRED, 2008)

La susceptibilidad es un término usado por distintos autores, como Suárez, (2009); así mismo Vargas (2002) como quien define a la susceptibilidad como “la predisposición natural o potencialidad que tiene un área para que se presenten fenómenos de remoción en masa bajo la influencia de agentes tales como altas precipitaciones, cortes naturales y/o artificiales y sismos”. Soeters y Van Westen (1996) citados por Aristizábal y Yokota (2006) definen la susceptibilidad como la posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno.

2.1.2. Amenaza

Los factores detonantes, como precipitación, sismicidad y actividad volcánica no son considerados dentro de la definición. Varnes (1984), define el concepto de amenaza como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructivo dentro de un período de tiempo y en un determinado lugar, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno destructivo, en un periodo de tiempo específico y en una región determinada.

2.1.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es el conjunto de condiciones y procesos resultantes de factores sociales, económicos, culturales, ambientales, institucionales y políticos que determinan la capacidad de anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de los impactos de amenazas naturales o provocadas por el hombre, también se define como grado de perdidas experimentado por un elemento o conjunto de elementos, considerando el grado de daños potencial en una escala de 0 a 1, considerando 0(sin daños) y 1 (pérdida total).

2.1.4. Riesgo especifico

Es el resultado del producto de amenaza por vulnerabilidad, siendo el grado esperado de perdidas que se derivan de un evento natural destructivo

2.2. Procesos de remoción en masa (PRM)

2.2.1. Definición

Los fenómenos naturales (sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, etc.) y aquellos asociados a la intervención humana, también llamados antropogénicos (guerras, contaminación ambiental, cambio climático, etc.) causan daño a la estructura social de la zona donde se presentan (DOF, 2012). Los procesos de remoción en masa son parte de los peligros naturales más destructivos del planeta y de mayor amenaza para la población (CENAPRED, 2008)

La terminología de *"procesos de remoción en masa" (*mass movement processes) empleada en geomorfología, deriva del inglés y de acuerdo Brusden (1979) son fenómenos que involucran el movimiento de material formador de laderas por influencia de la gravedad (sin importar la asistencia de algún agente de transporte fluido, (Alcantara Ayala , 2000). El origen del término *"movimiento de remoción en masa"* fue la aportación de Penck (1894), haciendo distinción entre movimientos de masa y transporte en masa, (Alcantara Ayala , 2000).

Términos como “procesos gravitacionales”, “procesos de ladera” y “movimientos de ladera” con empleados como sinónimos de los “procesos de remoción en masa” (PRM) que son empleados para indicar que una ladera no es estable. (Sharpe , 1938) (Ward, 1990) (Varnes D. , 1958) (CENAPRED, 2008)

2.2.2. Clasificación y mecanismos básicos de inestabilidad de laderas

Existen diversas clasificaciones de los procesos de remoción en masa mencionadas en por distintos autores. (Tabla 1)

Autor	Clasificación de los procesos de remoción en masa
Skempton, 1953; Blong. 1973; Brunsden, 1973; Crozier, 1973	Basada en atributos morfológicos de los movimientos, tanto de la superficie de ruptura como del área de deposito
Sharpe, 1938; Ward, 1945; Hutchinson, 1968; Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes. 1978	Tipo de velocidad del movimiento
Zaruba y Mencl, 1969; Coates, 1977; Varnes, 1978	Tamaño y tipo de los materiales involucrados
Zaruba y Mencl, 1969	Antigüedad del movimiento
Erskine. 1973	Grado de actividad
Sharpe, 1938; Hutchinson, 1968	Tipo climático

Tabla 1 Clasificaciones de los procesos de remoción en masas, de acuerdo con diversos autores.

La clasificación del programa (EPOCH, 1993) es la más aceptada y aplicada a nivel internacional, basada en el mecanismo de movimiento, a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), muestra una diferenciación entre el tipo de movimiento y materiales involucrados (Varnes D. , 1978) (Hutchinson, 1988)(Tabla 2).

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
Tipo	**Roca (rock)**	**Derrubios (debris)**	**Suelo (soil)**
Desprendimientos (fall)	Caída o desprendimiento de rocas (rockfall)	Caída o desprendimiento de derrubios (debris fall)	Caída o desprendimiento de suelos (soild fall)
Vuelco o desplome (topple)	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de derrubios (debris topple)	Vuelco o desplome de suelos (soil topple)
Deslizamiento rotacional simple (rotational slide)	Individual (simple) Múltiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Múltiple (multiple) Sucesivo (succesive)	Individual (simple) Múltiple (multiple) Sucesivo (succesive)
Deslizamiento traslacional o de bloques no rotacional (translational slide, non-rotational)	Deslizamiento de roca en bloque (block slide)	Deslizamiento de derrubios en bloque (block slide)	Deslizamiento traslacional de suelos (slab slide)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (rock slide)	Deslizamiento de derrubios (debris slide)	Coladas de barro (mudslide)
Flujos (flow)	Flujo de rocas (rock flow)	Corrientes de derrubios (debris flow)	Flujos de tierra, arena o suelo (soild flow)
Expacion lateral (lateral spreading)	Expansiones laterales en rocas (rock spreanding)	Expansiones laterales en derrubios (debris spread)	Expansiones laterales en suelos (soil spreading)
Complejo (complex)	Ejemplo: Alud de rocas (rock avalanche)	Ejemplo: Flujo deslizante (flow Slide)	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras (slump-earthflow)

Tabla 2 Clasificación de los procesos de remoción en masa. Fuente EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988)

Fuente: Tomada de EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).

a. Desprendimientos o caídas

Son movimientos que ocurren en laderas con pendientes abruptas o muy inclinadas, de manera natural o artificial (Alcantara Ayala , 2000) donde el movimiento puede experimentar otros movimientos (CENAPRED, 2008) y son precedidos por deslizamientos o vuelcos que separan el

material desplazado de la masa intacta (Cruden y Varnes, 1996). El desprendimiento del material puede ser desde rocas individuales hasta bloques masivos, donde la velocidad de rodadura del material dependerá de la inclinación de la pendiente

b. **Vuelcos o desplome**

Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, en una masa de suelo, detrito o roca, con una rotación hacia adelante o parte externa, por empuje de unidades adyacentes o presión de fluidos (Varnes D. , 1978). Se producen únicamente en rocas, que mantienen una disposición estructural de los estratos contra el talud o discontinuidades. Los vuelcos pueden ser causados por el hielo o agua en las grietas de la masa, vibración, socavación, meteorización diferencial, excavación o erosión de la corriente (Highland y Bobroswky, 2008)

c. Deslizamientos

Son movimientos de materiales con pendiente abajo, donde una zona de debilidad separa el material deslizante del material estable, existen dos tipos de deslizamientos, los rotacionales y traslacionales, (Varnes D. , 1978)

- Rotacionales
- Traslacionales

Los deslizamientos **rotacionales** son en forma de cuchara, es decir, cóncava hacia arriba (CENAPRED, 2008), el deslizamiento es generalmente rotacional alrededor de un eje que es paralelo al contorno de la pendiente (Highland y Bobroswky, 2008). Ocurren en suelos arcillosos blandos, formaciones de rocas blandas o en zonas con materiales de relleno (USGS, 2004). La masa desplazada internamente, tendrá una mínima deformación, debido a que el mecanismo rotacional es de baja frecuencia; en materiales frágiles ocurrirá lo contrario (Sosa N., 2016).

Los deslizamientos **traslacionales**, son masas de suelo y roca que se desplazan hacia abajo y a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual, suficientemente inclinado (Cruden y Varnes, 1996). La masa del deslizamiento puede desintegrarse y convertirse en un flujo de escombros (Highland y Bobroswky, 2008)

d. **Flujos**

Los flujos se producen por la erosión y movilización del suelo o roca, causados por altas precipitaciones o deshielo rápido (Highland y Bobroswky, 2008) son difíciles de percibir, por su poca duración, causado por el movimiento continuo en las que las superficies de cizalla son próximas, mientras que tendrán diferentes velocidades de desplazamiento, por el movimiento intergranular de la masa (Alcantara Ayala , 2000). Debido a la disponibilidad de todos los tipos de materiales, los flujos se dividen y clasifican en a) flujos de rocas, b) flujos o corrientes de derrubios y c) flujos de arena o suelo (CENAPRED, 2008).

e. **Expansión Lateral**

Son desplazamientos casi horizontales, debido a las pendientes suaves donde ocurren, y el movimiento ocurre por una deformación interna (expansión del material) (Cruden y Varnes, 1996) (CENAPRED, 2008).

Varnes (1978) menciona que existen dos tipos de expansión lateral, el primero afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas, y otro que ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales que han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.

f. Complejo (Complex)

Estos movimientos se originan cuando el movimiento inicial, se transforma en otro durante su deslizamiento ladera abajo, transportan desde detritos a grandes masas de roca viajando a una gran

velocidad (CENAPRED, 2008). El material que se desplaza es metaestable, no compacto y poroso, que durante el colapso transfiere fluido (agua) aumentando la presión y perdida de la resistencia (Hutchinson, 1988)

2.2.3. Grado de actividad y velocidad de los procesos de remoción en masa (PRM)

Dependiendo del tipo de material y el ángulo de inclinación de la pendiente se puede determinar la velocidad de un proceso de remoción en masa, el material suelto (*e.g.,* rocas, detritos) viajara a una velocidad mayor y sin anticipación, mientras que los flujos de suelo pueden tener una velocidad menor y ser poco perceptibles, en la Tabla 3 se observa la clasificación de acuerdo a Cruden y Varnes (1996), donde se explican siete clases de movimiento desde extremadamente lento a extremadamente rápido y la velocidad está en mm/seg, se describen brevemente alguno de los daños probables para cada clase de velocidad.

Clase	**Descripción**	**Velocidad (mm/seg)**	**Valores típicos**	**Daños probables**
7	Extremadamente rápido	$5x\ 10^{3}$	5 m/s	Violento catastrófico. Destrucción de edificios por impacto de masa deslizada. Número elevado de muertos
6	Muy rápido	$5x\ 10^{1}$	3 m/min	Es difícil escapar. Algunos muertos. destrucción de edificios
5	Rápido	$5x\ 10^{-1}$	1.8 m/h	Algunas estructuras pueden mantenerse
4	Moderado	$5x\ 10^{-3}$	13 m/ mes	Pueden aplicarse medidas correctoras. Las estructuras y edificios pueden mantenerse
3	Lento	$5x\ 10^{-5}$	1,6 m/ año	Las estructuras permanentes no resultan dañadas en general
2	Muy lento	$5x\ 10^{-7}$	16 mm/año	Imperceptible si no es con instrumentación.
1	Extremadamente lento			Imperceptible si no es con instrumentación. Es posible la construcción con precauciones

Tabla 3 Velocidad y daño probable de los procesos de remoción en masa.

2.2.4. Causas de los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa pueden ocurrir en cualquier parte del mundo, si mantienen ciertas condiciones o factores que permitan la activación de su inestabilidad, (CENAPRED, 2008). Cruden y Varnes (1996) clasificaron las diversas causas que originan los procesos de ladera (Tabla 4.)

Causas de índole geológica	**Causas por procesos físicos**
Materiales débiles	Precipitación intensa
Materiales sensibles	Derretimiento rápido de nieve o hielo
Materiales intemperizados	Eventos de precipitación extraordinarios
Materiales sujetos a cizallamiento	Actividad sísmica
Materiales con fisuras y diaclasas	Erupciones volcánicas
Discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación)	Gelifracción
Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos)	Expansión e hidratación de arcillas
Contraste de permeabilidad	Variaciones hidrológicas
Contraste de materiales con diferente plasticidad	Construcción
Causas morfológicas	Causas de origen antrópico

Causas de índole geológica	Causas por procesos físicos
Levantamientos tectónicos o volcánicos	Excavación de laderas o del pie de las laderas
Erosión glaciar	Incremento de peso en las laderas
Erosión fluvial al pie de las laderas	Disección de cuerpos de agua (presas)
Erosión marina al pie de los acantilados	Deforestación
Erosión glaciar al pie de las laderas	Irrigación
Erosión en márgenes laterales	Actividad minera
Erosión subterránea	Vibraciones artificiales
Remoción de la vegetación (por incendios y sequias)	

Tabla 4 Causas de procesos de ladera, tomada de Cruden y Varnes (1996)

2.3 Fenómenos hidrometeorológicos como factor detonante en los procesos de remoción en masa.

Los fenómenos hidrometeorológicos, afectan por igual a cualquier región o sector social, han sido uno de los factores de mayor importancia para los cambios en las propiedades físicas del suelo y en consecuencia se obtenga inestabilidad, la cual podría tardar años en manifestarse o ser un movimiento más acelerado por la acción del hombre (INECC, 2021). En México, los fenómenos hidrometeorológicos tienen distintos efectos específicos, debido a la ubicación geográfica, orografía, los aumentos tan radicales en las precipitaciones anuales, y sumado a un inadecuado uso del suelo y deforestación, que aumentan la vulnerabilidad ante inundaciones y procesos de remoción en masa.

De acuerdo con Corominas (2006) las precipitaciones de gran intensidad, pero de corta duración provocan deslizamientos superficiales, flujos de derrubios y desprendimientos; mientras que, en episodios de precipitación baja a moderada, en un tiempo mayor (días a semanas) provoca deslizamientos rotacionales, traslacionales y flujos de lodo. La reactivación en grandes deslizamientos es consecuencia de episodios interanuales anormalmente húmedos (Coraminas, 2006)

2.3.1. Consecuencias de los procesos de remoción en masa

Cuando ocurre un fenómeno natural, los efectos se muestran en dos entornos básicos, el entorno social (infraestructura, sociedad y economía) y medio ambiente (naturaleza). En el entorno social, de manera total o parcial, afectan a las estructuras hechas por el hombre (viviendas, escuelas, hospitales), las cuales llevaran semanas, meses o años para su reconstrucción y en algunos casos se pierden vidas. Los procesos de remoción en masa son el tercer riesgo natural por el número de víctimas, a nivel global, después de los terremotos e inundaciones.

Diversas zonas del país son potencialmente activas a un PRM, por factores naturales, sin embargo, debido al aumento de la población y su búsqueda de urbanización se acelera o expone al impacto del fenómeno (Beraud Macias, 2018). Los efectos que tendrá un fenómeno de PRM dependen de las condiciones de la zona, población e infraestructura en dicha área, es importante mencionar que en México existen deficientes y en algunos casos inexistentes políticas de uso de suelo, que permiten la construcción de viviendas o edificios en áreas no aptas para ese fin (SEDATU, 2014). El número de pérdidas por PRM pueden evitarse, si la zona potencialmente activa, es identificada y se toman medidas de precaución y prevención del desastre (Oporto Gallardo, 2006); (Brabb y Harrods, 1989).

2.4 Métodos para evaluar la susceptibilidad a ocurrencia de PRM

Existen distintos métodos para evaluar la susceptibilidad a ocurrencia de procesos de remoción en masa, de los cuales existen dos grupos, los directos e indirectos, las clasificaciones y consideraciones dependen del autor, sin embargo, las clasificaciones más consultadas o mencionadas por Soeters y Van Westen, (Suárez, 2008), que indican los siguiente:

- Métodos determinísticos
- Métodos heurísticos.
- Métodos probabilísticos
- Métodos geomorfológicos

Métodos determinísticos: Se basan en el cálculo del factor de seguridad al deslizamiento de una ladera. Para este cálculo es necesario elaborar modelos de análisis de estabilidad de taludes, que requieren información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales y modelos de simulación de niveles freáticos de acuerdo a periodos de retorno. Estos modelos permiten el análisis, no sólo de la susceptibilidad a la rotura, sino también del alcance y de la frecuencia del fenómeno y por tanto de la amenaza de PRM.

Métodos heurísticos: Son los encargados de ponderar la influencia de cada factor en la inestabilidad de la ladera y así, de asignarle un peso, un grado de importancia dentro del proceso (Carrarra et al., 1995), son métodos conocidos como indirectos y una de sus ventajas es que los resultados se pueden extrapolar a zonas sin deslizamientos pero que posean una combinación de factores similar**.**

Métodos probabilísticos: Se basan en las relaciones existentes entre cada factor detonante del evento y su distribución actual y pasada, se utilizan cuando se dispone de abundante información sobre las causas que producen los PRM. Son métodos indirectos que se pueden extrapolar a zonas distintas de las utilizadas para estimar la susceptibilidad, pero que posean condiciones geológicas y

climáticas homogéneas. Estas aproximaciones permiten que los resultados se puedan aplicar a escala regional. Los modelos probabilísticos se clasifican como bivariantes y multivariantes:

- Los métodos bivariantes consideran una variable dependiente, la ocurrencia de PRM, y una independiente. El peso de cada factor se analiza por separado. Lo que se pretende, es la cuantificación de los factores que más influyen en los movimientos de ladera mediante el cálculo de la densidad de PRM para cada variable. Este tipo de métodos son adecuados para escalas medias.
- Los métodos multivariantes, estudian la interacción y dependencia de un conjunto de factores que actúan simultáneamente en la ocurrencia de PRM para establecer la implicación que tienen cada uno de ellos. Se trata de una aproximación más objetiva en la predicción espacial de los PRM.

Métodos geomorfológicos: Identifica y localiza los PRM y procesos asociados a éstos directamente en el campo. Mediante el trabajo in situ, el experto extrae unos criterios para la determinación de áreas potencialmente inestables y para la confección del mapa de susceptibilidad o peligrosidad final, al igual que los heurísticos y los probabilísticos, necesitan de un inventario de PRM del área de estudio para su desarrollo. La principal ventaja de estos métodos es la validez y detalle del análisis y mapa resultantes si se realizan por un buen experto. Su inconveniente es el alto grado de subjetividad, función de la experiencia del autor. La elaboración de mapas por esta técnica requiere conocer la morfología y tipología de los movimientos.

2.5 Procesos de remoción en masa en México

En México los procesos de remoción en masa son fenómenos que ocurren de manera muy común, debido a las condiciones geográficas y climáticas del país. Algunos de los PRM que han tenido mayor impacto por las pérdidas humanas, daños a la infraestructura y afectaciones económicas, son los siguientes:

- PRM de la Pintada, Guerrero (2013)

Fecha: 16 de septiembre de 2013

Causa: Tormenta tropical Manuel

Impacto: Este PRM sepultó gran parte de la comunidad de la Pintada, en el municipio de Atoyac de Álvarez, estado de Guerrero, dejando decenas de muertos y desaparecidos. La tormenta provocó intensas lluvias que saturaron el suelo, desencadenando deslizamientos de tierra. La masa deslizada impactó, destruyó y sepultó a prácticamente la mitad de las viviendas del poblado, 71 personas perdieron la vida.



Figura 2 PRM de la Pintada, Guerrero (2013)

Fuente: Tomada de Centro Nacional de Prevención de Desastres | 23 de septiembre de 2019

https://www.gob.mx/cenapred/articulos/eldeslizamientodeladeraenlacomunidadlapintadaguerrero#:~:text=Ocurri%C3%B3%20el%2016%20de%20septiembre,caf%C3%A9%2C%20la%20cual%20fue%20deforestada&text=Uno%20de%20los%20casos%20m%C3%A1s,16%20de%20septiembre%20de%202013.

- PRM en Angangueo, Michoacán (2010)

Fecha: Febrero de 2010

Causa: Intensas precipitaciones

Impacto: Las lluvias torrenciales provocaron un PRM que devastó la localidad de Angangueo, conocida por ser un santuario de la mariposa monarca. El evento dejo numerosos muertos y causo graves daños a la infraestructura.



Figura 3 PRM en Angangueo, Michoacán (2010)

Fuente: Tomada de: https://www.lavozdemichoacan.com.mx/michoacan/municipios/calles-eran-rios-casas-quedaron-destruidas-y-personas-sepultadas-angangueo-recuerda-10-anos-de-la-tragedia/

- PRM en Huauchinango, Puebla (2016)

Fecha: 06 y 07 de 2016

Causa: Tormenta tropical Earl

Impacto: Fuertes PRM y desbordamientos en ríos de Huauchinango, con algunos fallecidos y cuantiosos daños materiales.



Figura 4 PRM en Huauchinango, Puebla (2016)

Fuente: Tomado de https://municipiospuebla.mx/nota/2016-10-18/huauchinango/drenaje-y-deforestaci%C3%B3n-ocasionaron-PRM-en-huauchinango-cenapred

- PRM en Tlahuitoltepec, Oaxaca (2010)

Fecha: 28 de septiembre de 2010

Causa: Altas precipitaciones

Impacto: Perdida de varias viviendas en Santa Maria Tlahuitoltepec



Figura 5 PRM en Tlahuitoltepec, Oaxaca (2016)

Fuente: Tomado de https://expansion.mx/nacional/2010/10/01/en-tlahuitoltepec-oaxaca-inicia-la-reconstruccion-tras-el-deslave

- PRM en la Sierra Norte de Puebla (1999)

Fecha: Octubre 1999

Causa: Huracán Paulina

Impacto: Intensas lluvias con severos daños a infraestructura de varios municipios, 600 personas fallecidas, alrededor de 500 mil damnificados, más de 300 desaparecidos y cientos de comunidades incomunicadas.



Figura 6 PRM en la Sierra Norte de Puebla octubre de 1999

*Fuente: Tomada de **Rafael García Otero (archivo de La Jornada de Oriente)***

https://cupreder.buap.mx/desastres/?q=lluvias-de-octubre-de-1999-en-la-sierra-norte-de-puebla

2.6 Inventario de PRM

De entre todos los datos de entrada necesarios para la realización de los mapas de riesgo, el inventario de PRM ocurridos, es considerado el más importante ya que proporciona información sobre la frecuencia, los tipos, la magnitud y el daño que causan los PRM en un área (Van Westen, 2005), es una herramienta fundamental en el estudio y gestión del riesgo geológico, permite identificar zonas susceptibles y estimar la probabilidad de ocurrencia futura, sirviendo como base para comparar y mejorar modelos de susceptibilidad, amenaza y riesgo de PRM, es decir, sirve como modelo de calibración.

2.7 Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica

La evolución tecnológica en los últimos años ha sido significativa, y una de las áreas que más se ha beneficiado es la de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales ha transformado significativamente la manera en que se realiza el análisis espacial, la cartografía y la gestión territorial. Su capacidad para integrar, procesar y representar datos geoespaciales permite identificar patrones, analizar relaciones espaciales y apoyar la toma de decisiones fundamentadas. En el ámbito de la planificación territorial, los SIG facilitan la delimitación de áreas aptas para el desarrollo urbano, la conservación ambiental o la gestión de recursos naturales. Asimismo, contribuyen a la elaboración de cartografía temática actualizada y detallada, indispensable para el ordenamiento del territorio. En contextos de riesgo, esta tecnología permite integrar variables físicas y sociales para generar mapas de susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo, lo que fortalece las estrategias de prevención y mitigación de desastres. En conjunto, los SIG constituyen una herramienta clave para la gestión sostenible del territorio y la formulación de políticas públicas más eficientes***.***

Existen muchas definiciones de los SIG, una de ellas fue desarrollada en conformidad de treinta especialistas en SIG en 1989, donde definen que un Sistema de Información Geográfica es “Un sistema de hadware, software, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para la recopilación, almacenamiento, análisis y distribución de información de territorios” (Deuker y Kjerne, 1989)

Así mismo se encuentran algunas otras definiciones como lo planteado por Burrough (1998), quien considera definiciones basadas en tres categorías:

- Una poderosa “caja de herramientas” para recoger, almacenar, recuperar, transformar y visualizar datos del mundo real (Burrough, 1998)

- Un sistema de bases de datos en el que la mayoría de los datos están indexados geográficamente y con los cuales se puede realizar un conjunto de procedimientos

con el objetivo de dar respuesta a consultas sobre entidades espaciales en la base de datos (Smith et al., 1987)

- Una entidad institucional con una estructura organizativa que integra tecnología con bases de datos, expertos y ayuda económica continuada (Carter, 1989)

La obtención de datos e información que se usa en un SIG, se recopila con Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), es decir, con sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), teledetección y sensores remotos.

Considerando lo anterior, los Sistemas de Información Geográfica (*SIG),* son herramientas tecnológicas que permiten la recopilación, almacenamiento, procesamiento, análisis y visualización de datos espaciales referenciados geográficamente, son fundamentales para integrar múltiples capas de información geológica, geofísica, topográfica y ambiental, facilitando una comprensión más completa del subsuelo y de los procesos que afectan la superficie terrestre. Esta tecnología permite analizar fenómenos naturales como deslizamientos, actividad sísmica, estabilidad de laderas y dinámica del agua subterránea, contribuyendo a una gestión territorial más eficiente, a la evaluación de riesgos y a la toma de decisiones en proyectos de infraestructura, exploración y mitigación de desastres naturales.

2.7.1. Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS)

Un sistema global de navegación por satélite *(global navigation satellite system (GNSS))* permite determinar la posición geográfica de un usuario mediante un receptor, en cualquier parte del planeta, mediante la recepción de señales emitidas por satélites. En la actualidad el más conocido sistemas de GNSS, es el GPS *(global positioning system).* Con estos receptores se obtiene la posición del receptor en la superficie terrestre obteniendo la latitud, longitud y altitud.

2.7.2. Teledetección y sensores remotos

La teledetección, es también es conocida como percepción remota, es el conjunto de instrumentos o técnicas que permiten la adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, en general es un modo de obtener información acerca de objetos tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con el objeto.

Existen dos procesos involucrados en la teledetección, que son la adquisición de datos y análisis de los datos.

- Adquisición de datos: en este proceso se requiere la existencia de una fuente de energía, que permita la propagación de la energía en la atmosfera y a su vez generen interacciones energéticas con las características de la superficie terrestre, retransmitiendo la energía a través de la atmosfera, sensores aéreos y/o espaciales. Obteniendo la generación de datos del sensor en forma pictórica o digital.

  El proceso de adquisición de datos utiliza los sensores para registrar variaciones en forma en que las características de la superficie terrestre reflejan y emiten energía.

- Análisis de datos: implica examinar los datos obtenidos que generalmente se recopilan en forma de mapas, tablas, o archivos digitales, que pueden fusionarse con otro tipo de datos en un entorno geográfico.

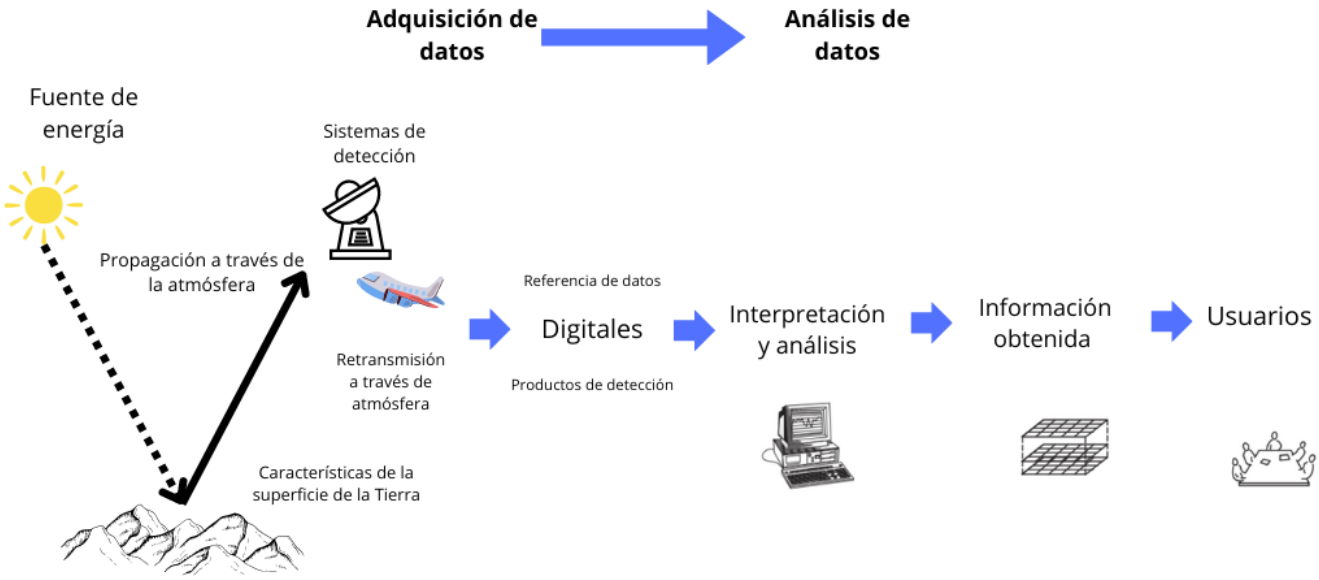


Figura 7 Procesos involucrados en la teledetección

Fuente: Elaboración propia

2.7.3. Procesamiento de imágenes satelitales

El procesamiento de imágenes satelitales permite analizar y comprender el entorno con una perspectiva científica y visual, debido a que se puede obtener información más detallada de una zona, resultado de la combinación o transformación de bandas espectrales.

En este caso, uno de los procesos de los que se hará uso para obtener información, será el siguiente:

2.7.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también conocido como NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizado en la Percepción Remota, debido a su sencillez e interpretación. El NDVI permite distinguir vegetación deteriorada y saludable en áreas extensas. Su cálculo se basa en la diferencia de reflectancia entre

las bandas del Rojo e Infrarrojo cercano. Este índice se basa en la diferencia entre la reflectancia medida en dos bandas específicas del espectro electromagnético:

- **Banda del rojo (RED):** corresponde a la luz visible en la región roja del espectro (aproximadamente 620-700 nm). Las plantas saludables absorben fuertemente esta luz para la fotosíntesis, por lo que la reflectancia en esta banda es baja cuando la vegetación está sana.
- **Banda del infrarrojo cercano (NIR):** corresponde a la región del espectro cercana al infrarrojo (aproximadamente 700-1100 nm). La vegetación sana refleja fuertemente esta radiación, por lo que la reflectancia en esta banda es alta en áreas con vegetación vigorosa.

El NDVI es utilizado en agricultura de precisión, debido a su aporte en el monitoreo de la salud de los cultivos, predecir zonas de incendio y crear mapas de desertificación.

El cálculo del NDVI se realiza de la siguiente manera:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NIR= Banda de infrarrojo cercano

RED= Banda del rojo

Esta fórmula aprovecha la diferencia en reflectancia entre estas dos bandas para distinguir la vegetación saludable de la deteriorada o la ausencia de vegetación. Cuando la vegetación está **sana**, la reflectancia en NIR es alta y en RED es baja, lo que da valores de NDVI cercanos a 1, y cuando la vegetación está **deteriorada** o escasa, la reflectancia en NIR baja y en RED puede aumentar, reduciendo el NDVI a valores cercanos a 0 o negativos.

2.8. Metodología de Mora-Varshon

La metodología Mora-Varshon (1994) es una combinación de factores obtenidos de la medición de indicadores y su distribución espacial. Esta metodología fue diseñada para clasificar los riesgos a PRM en zonas tropicales sísmicamente activas.

La metodología de Mora-Vahrson (1994) permite zonificar la susceptibilidad a PRM, originalmente esta metodología utiliza los datos de relieve relativo, que han sido modificados por Salazar en 2007, cambiando la variable de relieve por pendientes, quien usa los rangos propuestos por Van Zuidam (1986). Además, esta metodología permite determinar en un área, la susceptibilidad a PRM con el análisis de cinco variables, que consideran la susceptibilidad (factores condicionantes) y amenaza (factores desencadenantes). Dentro de los factores condicionantes se incluye la pendiente, litología, red hidrológica, uso de suelo y vegetación y en los factores desencadenantes (CENAPRED, 2020)

La combinación de estos factores permite realizar un mapa de zonificación considerando la siguiente ecuación:

$$H = (Sr * Sl * Ssv) * (Ts + Tp) \quad (2)$$

Donde:

H= Nivel relativo de amenaza

Sr= Pendiente del terreno

Sl=Litología de la zona

Ssv= Uso de suelo y vegetación

Ts= Sismicidad

Tp=Intensidad de precipitaciones

El análisis de estos factores se realizará en una escala 1:150 000, considerando las siguientes clasificaciones para cada factor:

Tipo	Factor	Porcentaje (%)
Condicionantes	Litología	30
	Pendiente	30
	Geomorfología	20
	Uso de suelo	20
Desencadenantes	Precipitación	70
	Sismicidad	30

Tabla 5 Ponderación de los factores asignados por el método.

Fuente: Mora y Vahrson (1994)

2.8.1. índice de susceptibilidad

El método de Mora-Vahrson propone que, a partir de la ponderación de los factores antes mencionados, se realice el cálculo del índice de susceptibilidad, los valores resultantes se consideran de acuerdo con lo siguiente:

Índice de susceptibilidad a PRM	Clasificación	Potencial a PRM
0-6	I	Muy bajo
7-32	II	Bajo
33-162	III	Moderado
163-512	IV	Mediano
513-1250	V	Alto
>1250	VI	Muy alto

Tabla 6 Índice de susceptibilidad

Tomando en cuenta lo contenido en Mora *et al* (2002); Mora (2004); Barrantes *et al* (2011), se establece una clasificación y caracterización de la susceptibilidad al PRM, considerando cinco clases de susceptibilidad, determinadas a partir del histograma de distribución de frecuencia.

Clasificación	**Potencial de PRM**	**Características**
I	Muy baja	Sectores estables, no se requieren medidas correctivas. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc
II	Baja	Sectores estables que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se debe permitir la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir:

		movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, bioestabilización de terrenos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos urbanos de baja densidad.
IV	Alta	Probabilidad de PRM alta (< 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy Alta	Probabilidad de PRM muy alta (> 50%) en caso de sismos de magnitud importante y lluvias de intensidad alta. Prohibido su uso con fines urbanos, se recomienda usarlos como áreas de protección.

Tabla 7 Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al PRM

2.8.2. Factores de susceptibilidad

El método de Mora y Vahrson (1994) originalmente usaba datos topográficos o relieve relativo, posteriormente esto fue modificado por Salazar (2007) cambiando la variable pendiente y usando la extensión propuesta por Van Zuidam (1986), que actualmente se obtiene con la implementación de sistemas de información geográfica (SIG).

Rango de pendientes (grados)	Descripción	Valor asignado
0-2	Plano o casi completamente	1
2-4	Inclinación suave	2
4-8	Pendientes inclinadas	3
8-16	Modelo escarpado	4
16-35	Escarpado	5
35-55	Muy escarpado	6
>55	Extremadamente escarpado	7

Tabla 8 Rangos de pendientes en grados

Fuente: Tomado de Van Zuidam (1986)

El valor de la litología (Sl) es considerado por la influencia que existe en el tipo de materiales, rocas y sedimentos implicados en la ocurrencia de PRM.

Litología	Clasificación	Valor asignado
Aluviones gruesos, permeable, compacto, con nivel freático bajo. Calizas duras, permeables. Intrusivos poco fisurados, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas, ignimbritas y similares: sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas: sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo.	Bajo	1
Rocas sedimentarias poco alteradas, estratificación maciza (decamétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas moderadamente fisuradas o alteradas, nivel freático o profundidades intermedias.	Moderado	2

Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados: drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.	Medio	3
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regoliticos de muy baja calidad mecánica con estado de alteración avanzado, drenaje pobre, se incluyen las categorías 3 y 4 con niveles freáticos someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos muy elevados.	Muy alto	5

Tabla 9 Clasificación del valor litología

Fuente: Tomado de Van Zuidam (1994)

En el caso del valor de uso de suelo y vegetación de la zona (Ssv) se consideran las siguientes categorías:

Cobertura vegetal	Valor asignado	Descripción
Zona Urbana	1	Muy bajo
Cuerpos de agua	2	Bajo
Matorral	3	Moderado
Pastizal	4	Medio
Agricultura	5	Medio Alto

Vegetación arbustiva	6	Alto
Bosque	7	Muy alto

Tabla 10 Clasificación del valor de Uso de Suelo

Fuente: Elaboración propia a partir de clasificación de NDVI

La intensidad sísmica es un factor de tipo desencadenantes que se determina por medio del análisis de los PRM de tierra derivados por terremotos o sismos, que indican la influencia de intensidades sísmicas.

La escala más utilizada para la medición de intensidad sísmica es la Escala de Mercalli, donde se considera con números romanos del I al XII, de acuerdo con la intensidad observada en diferentes áreas, la cual varía de acuerdo con la distancia del epicentro, geología y otros factores.

Escala de Mercalli Intensidad (MM)	**Calificación**	**Valor asignado**
I-III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Considerable	6
IX	Importante	7
X	Fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

Tabla 11 Clasificación de intensidad sísmica

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

La intensidad de precipitación es un factor importante en la ocurrencia de los procesos de remoción en masas, en complemento a otros factores, debido al efecto en la erosión del suelo, impacto al medio ambiente, etc, El valor de la intensidad hace referencia a la cantidad de lluvia, nieve u otra forma de precipitación que cae en un área específica en un tiempo determinado, que en este caso refiere a lo acumulado por año (mm/año). En la siguiente tabla se muestra una clasificación del valor de intensidad de precipitación máxima diaria:

Precipitación máxima n>10 años Tr=100 años	**Precipitación media n<10 años**	**Clasificación**	**Valor asignado**
<100 mm	<50 mm	Muy bajo	1
101-200 mm	51-90 mm	Bajo	2
201-300 mm	91-130 mm	Medio	3
301>400 mm	131-175 mm	Alto	4
>400 mm	>175 mm	Muy alto	5

Tabla 12 Intensidad de precipitación

Fuente: Mora y Vahrson (1994)

Capítulo 3. Antecedentes de la zona de estudio: Xicotepec

3.1. Localización y condiciones naturales de la zona de estudio: Xicotepec

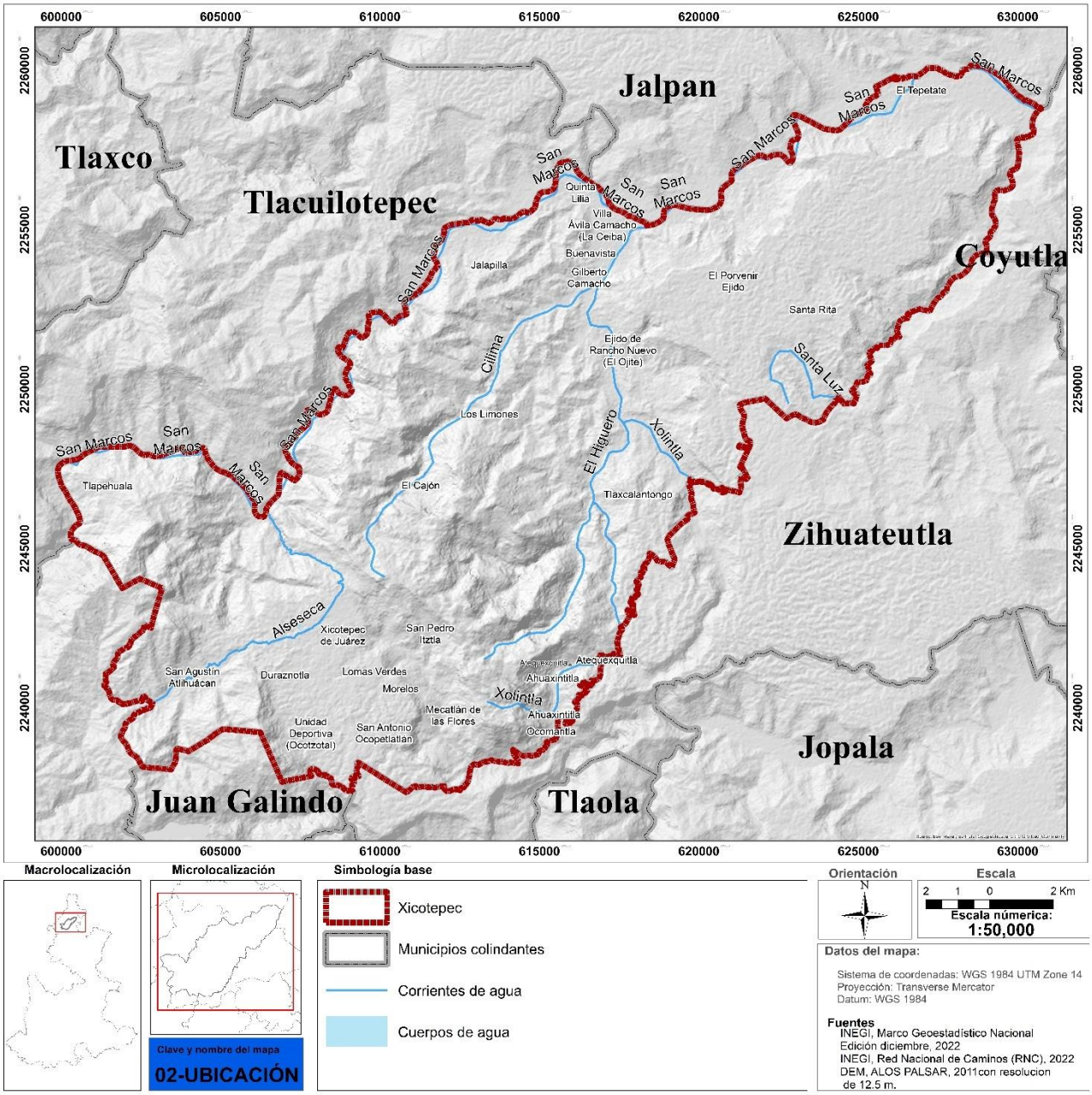


Figura 8 Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco geoestadístico (INEGI 2022).

De acuerdo con información de la Auditoria Superior del Estado (ASE, 2024) al Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla (CEiGEP, 2023) y a información contenida en el Marco Geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022) el municipio de Xicotepec de Juárez tiene una ubicación geográfica en los **paralelos 20° 14' 18" y 20° 26' 12" latitud norte y los meridianos 97° 45' 00" y 98° 03' 06" longitud occidental**. Con una extensión territorial de **310.09 km^2,** con unos 800 m de altura.

3.2. Contexto Regional y Socioeconómico

Como parte del Desarrollo Regional Estratégico, se ha establecido en el Plan Estatal de Desarrollo (PED) 2019-2024 agrupar los 217 municipios del estado de Puebla en regiones para mejorar la implementación de las políticas públicas (Secretaría de Planeación y Finanzas , 2024) se ha dividido en 32 regiones. El municipio de Xicotepec pertenece a la Región I: Xicotepec, ubicada en la zona norte del estado, conformada 10 municipios de acuerdo con información de la Auditoria Superior del Estado (ASE, 2024) y CEIGEP (2023):

- Venustiano Carranza
- Jalpan
- Pahuatlán
- Pantepec
- Zihuateutla
- Honey
- Francisco Z. Mena
- Tlacuilotepec
- Naupan
- Xicotepec de Juárez

Población

En los últimos años, la población de Xicotepec ha experimentado un crecimiento moderado. Según los datos del Censo de Población y Vivienda 2010, el municipio contaba con una población total de 75,601 habitantes. En comparación, en 2020, la población en Xicotepec fue de 80,591 habitantes, lo que representa un crecimiento del 6.6% en la última década.

En la cabecera municipal en el 2020 se tiene un registro de 41,455 habitantes y el resto de la población corresponde a las distintas localidades. Aunque no se dispone de datos precisos sobre la evolución de la población en los últimos tres años, se cuenta con datos de datos de Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios 1990-2040 (CONAPO, 2024) en los que se indica que en 2020 se registraron 80, 591 habitantes mientras que para el año 2040 se proyectó una población de 72,805 habitantes.

Etnicidad

En el municipio se encuentran un total de 3,082 habitantes (3 años en adelante) que son hablantes de alguna lengua indígena, de los cuales 34 no hablan español. Asimismo, 357 personas se autoidentifican como afromexicanas, negras o afrodescendientes.

Servicios de salud y vivienda

Con respecto a los servicios de salud del municipio, solo el 70.36% de la población cuentan con servicio de salud (público o privado). Además, en el municipio existe un total de 25,690 viviendas, de las cuales 21, 258 son de tipo particular, habitadas por un promedio de 3.8 personas, sin embargo, de estas viviendas 1,876 no cuentan con agua entubada, 951 no cuentan con drenaje, mientras que 1,115 son de piso de tierra y 269 se encuentran sin servicio de luz eléctrica.

3.3 Fisiografía

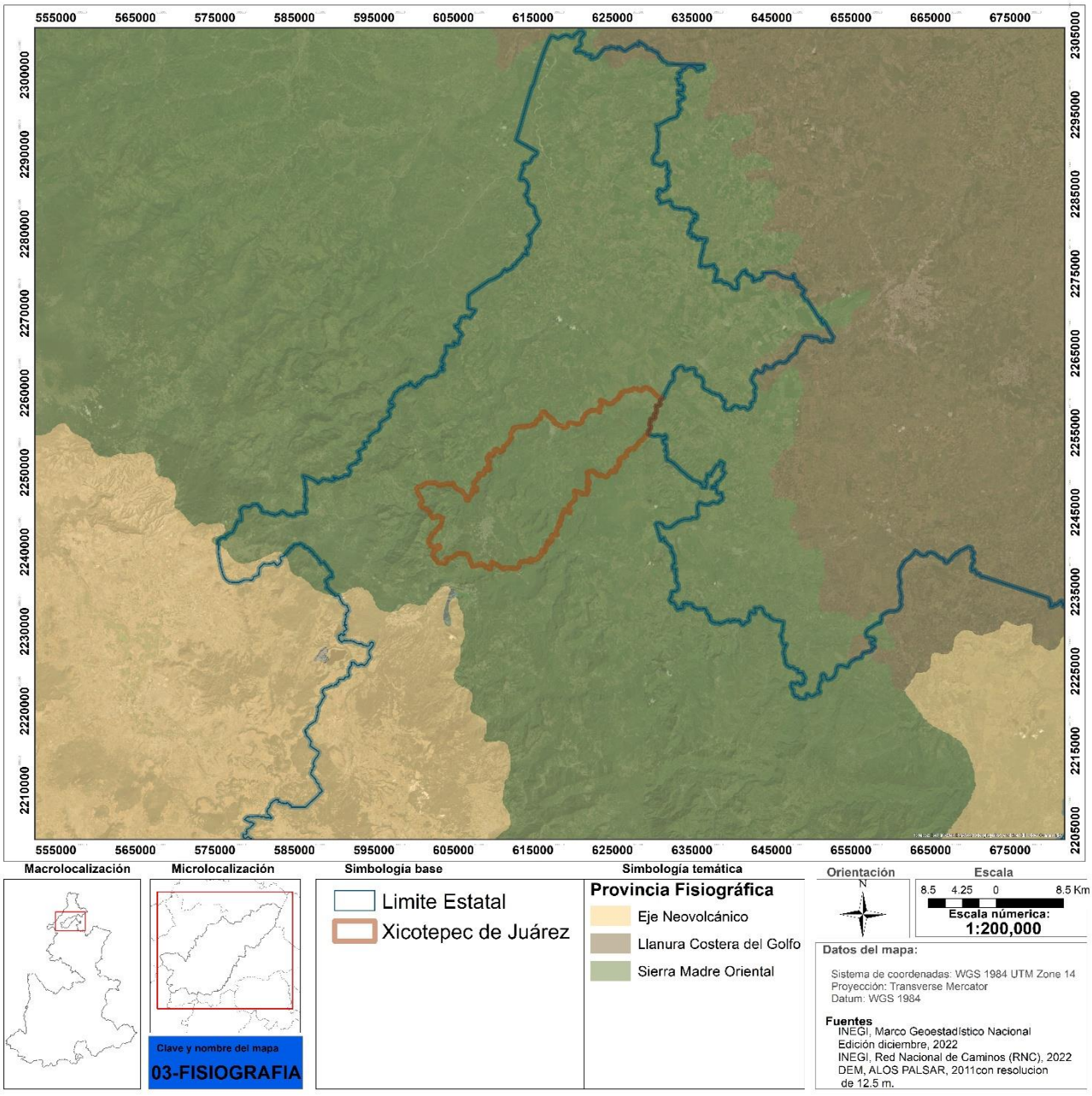


Figura 9 Provincias fisiográficas en el municipio de Xicotepec.

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico (INEGI 2022).

La región de estudio se encuentra en una porción de la Sierra Norte de Puebla, que corresponde al Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano; CPCM (Campa Uranga, 1985) y se

encuentra aledaña a la Faja Volcánica Transmexicana; FVTM (Ferrari, 2000) y la Llanura Costera del Golfo Norte (Ordoñez, 1941).

El CMCP es interpretado como un Cinturón Orogénico formado durante la Orogenia Laramide, ubicándose desde Parral (Chihuahua), hasta el centro y sur de México. De acuerdo con la clasificación del CPCM (Campa Uranga, 1985), la zona centro- sur del país se divide en dos sectores, el primero formado por los terrenos Mixteco y de Oaxaca, que son sepultados por la FVTM; el segundo sector incluye la plataforma de Morelos-Guerrero ubicada al occidente del primer sector.

La FVTM se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco. constituye uno de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica (Ferrari, 2000). La Llanura Costera del Golfo Norte, está conformado por una planicie extensa con alturas menores a 350 m.s.n.m. que va desde el estado de Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz (Lugo-Hubp, 2001).

3.4. Geología general

La zona de estudio es parte del Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicanas (CPCM) (Campa Uranga, 1985) que de acuerdo con López Ramos (1979), consiste en una cadena montañosa con una longitud aproximada de 800 km. En la Región I, se puede apreciar un relieve bastante accidentado, donde se encuentran rocas de tipo ígneo por la influencia de la FVTM y rocas sedimentarias.

La información geológica fue tomada de dos cartas geológico mineras obtenidas del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con clave F14-83 Pachuca y F14-12 Poza Rica, se observa de manera superficial, la presencia de rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico, pertenecientes a estructuras de tipo Flysh, (intercalaciones rítmicas de lutitas- areniscas) y rocas más recientes provenientes del Terciario, como basaltos, areniscas, tobas.

En la figura 10 se puede observar la presencia de una falla en la zona suroeste del municipio, hasta el municipio de Tlacuilotepec. La litología de Xicotepec pertenece a la era del Cenozoico y Mesozoico; la presencia de intercalaciones de Limonita y conglomerado poligénico, está ligada a la formación Cahuasas, así como otras rocas sedimentarias como Lutita- Caliza de la formación Soyatal, intercalaciones de Arenisca- Lutita de la formación Chicontepec y la presencia de Caliza-Lutita de la formación Tamaulipas; además se observa la presencia de rocas ígneas, como basaltos, de tipo extrusivo correspondientes a la edad del pleistoceno. En conjunto estas rocas forman parte del relieve accidentado del municipio de estudio.

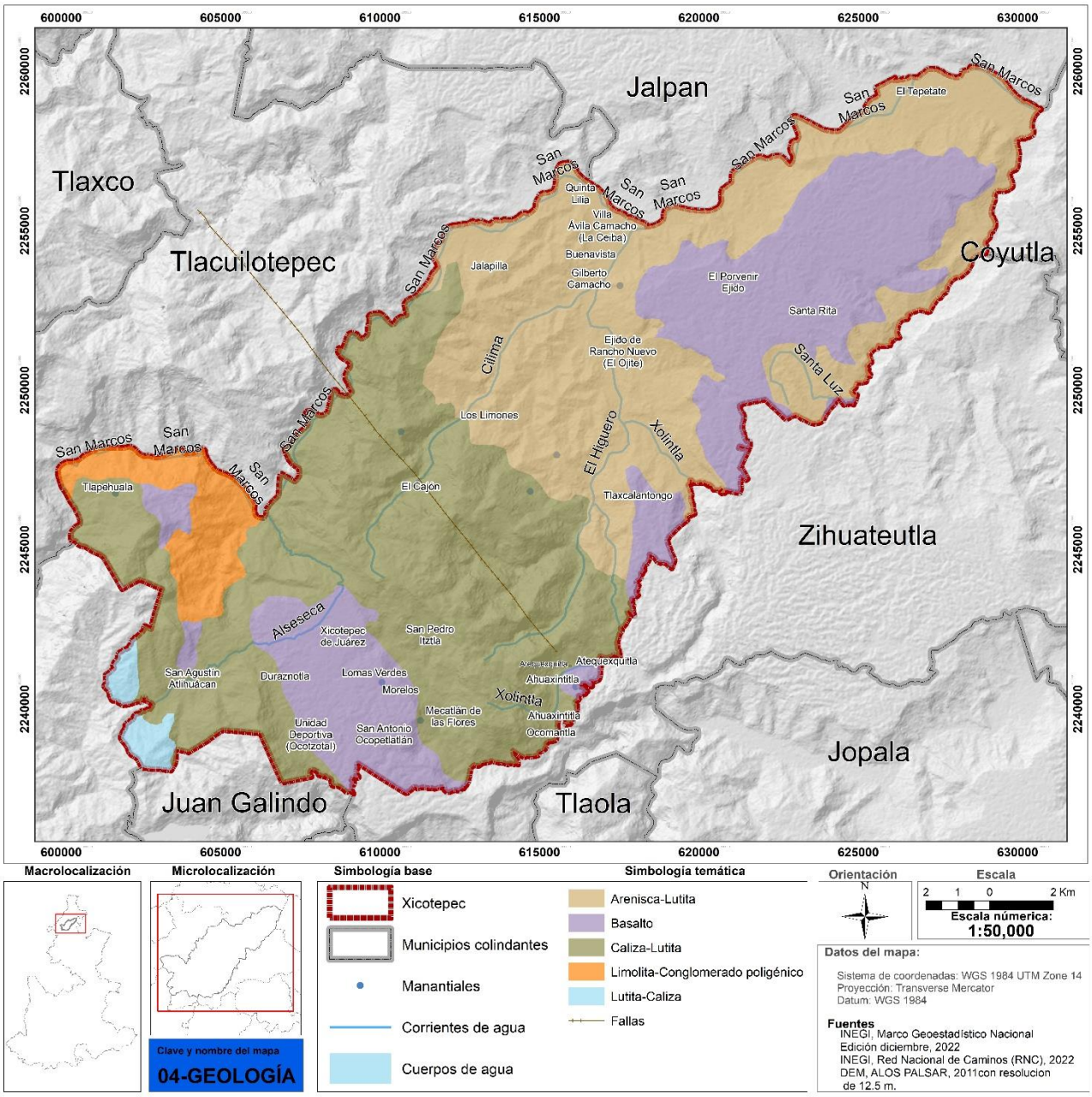


Figura 10 Geología de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico (INEGI 2022) y Servicio Geológico Mexicano

3.5. Geomorfología

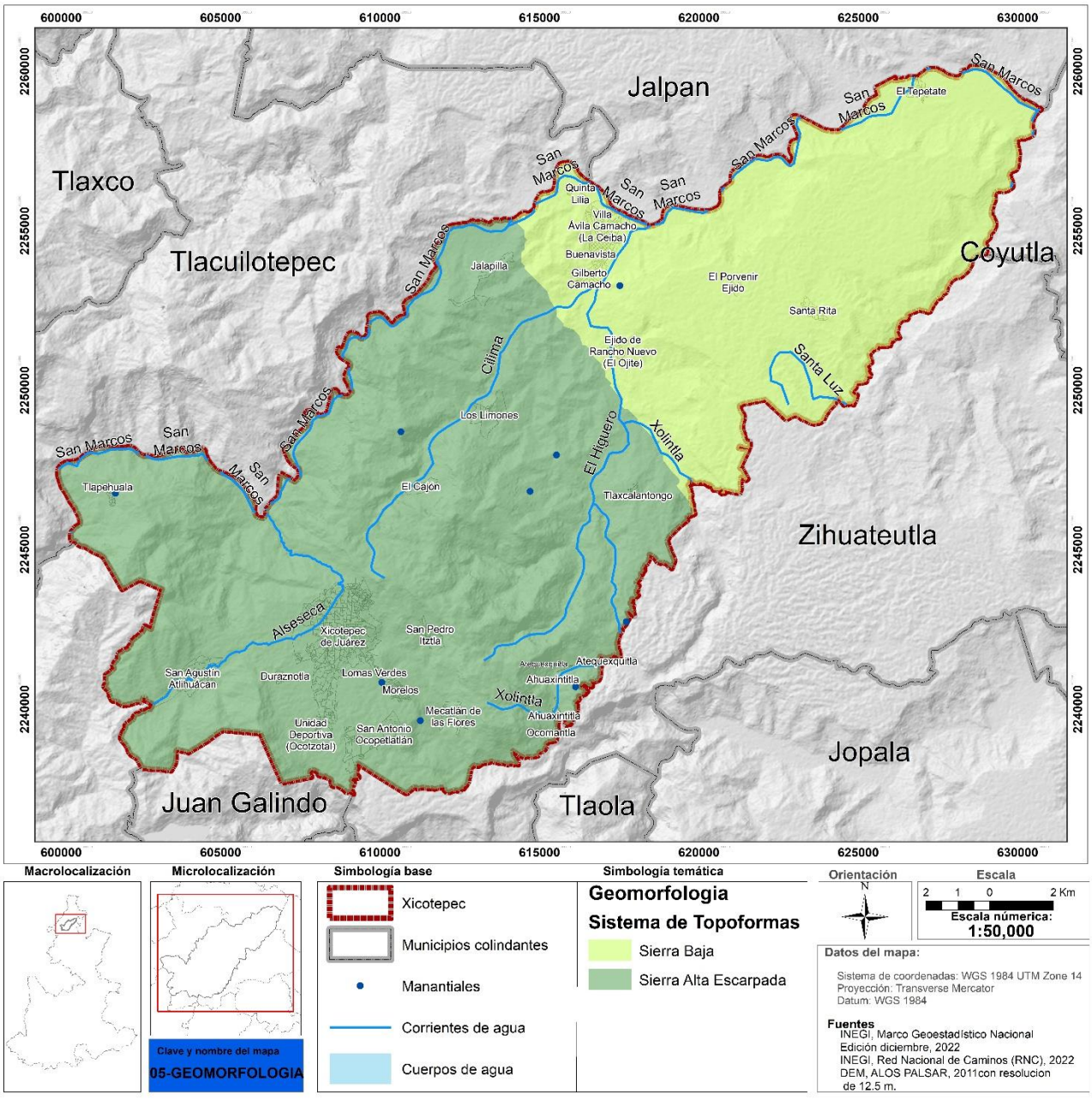


Figura 11 Geomorfología de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico (INEGI 2022)

Los principales elementos que caracterizan el relieve del municipio son: sierra alta escarpada, que ocupa 65.2% y sierra baja 34.8% Xicotepec es un municipio formado por sierras en el 100% de su extensión territorial.

La sierra alta escarpada hace referencia a una cadena o región montañosa de elevada altura y abruptas inclinaciones o pendientes en la región en cuestión. Mientras que la sierra baja es también una cadena montañosa, con zonas de menor altura que la sierra alta y con pendientes menos pronunciadas.

3.6. Clima

El municipio de Xicotepec se caracteriza por la presencia de 4 tipos de climas, considerando condiciones de temperatura, humedad, presión, vientos y precipitaciones, de acuerdo con información disponible en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023) y CONABIO (2011) los climas presentes son los siguientes:

- Am (f): Este clima corresponde al cálido húmedo, con temperatura media anual mayor de 22 °C y temperatura del mes más frio mayor de 18 °C. El valor de la precipitación del mes más seco menor de 60 mm; con lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

- C(f): Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C temperatura del mes más frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Con un valor de precipitación en el mes más seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.

- (A)C(fm): Clima semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18§C, temperatura del mes más frio menor de 18°C, temperatura del mes más

caliente mayor de 22°C. con un valor de precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.

- A (f): Corresponde al clima cálido húmedo, con temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frio mayor de 18°C. sub-valor de precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.

Clave	**Tipo**	**Superficie (Km^2)**	**Porcentaje de superficie (%)**
Am(f)	Cálido húmedo	45	14.56
C(f)	Templado húmedo	8	2.58
(A)C(fm)	Templado Subhúmedo	142	45.95
A(f)	Cálido húmedo	114	36.89

Tabla 13 Climas en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia en base a información de INEGI, 2020 y CONABIO, 2010.

Se puede observar que el municipio tiene en mayor presencia climas con variedades húmedas, lo cual puede ser un condicionante en la vida diaria de las personas por los cambios en valores de temperatura generando cambiaos a las actividades diarias y de producción de la población.

Además de esto, el municipio se caracteriza por tener altos valores en las precipitaciones, en los climas antes mencionados se indica que el valor de precipitaciones en el mes más seco es de 40

mm. Mientras que en las estaciones de verano e invierno se obtienen hasta mayor de 18% del valor anual de precipitación.

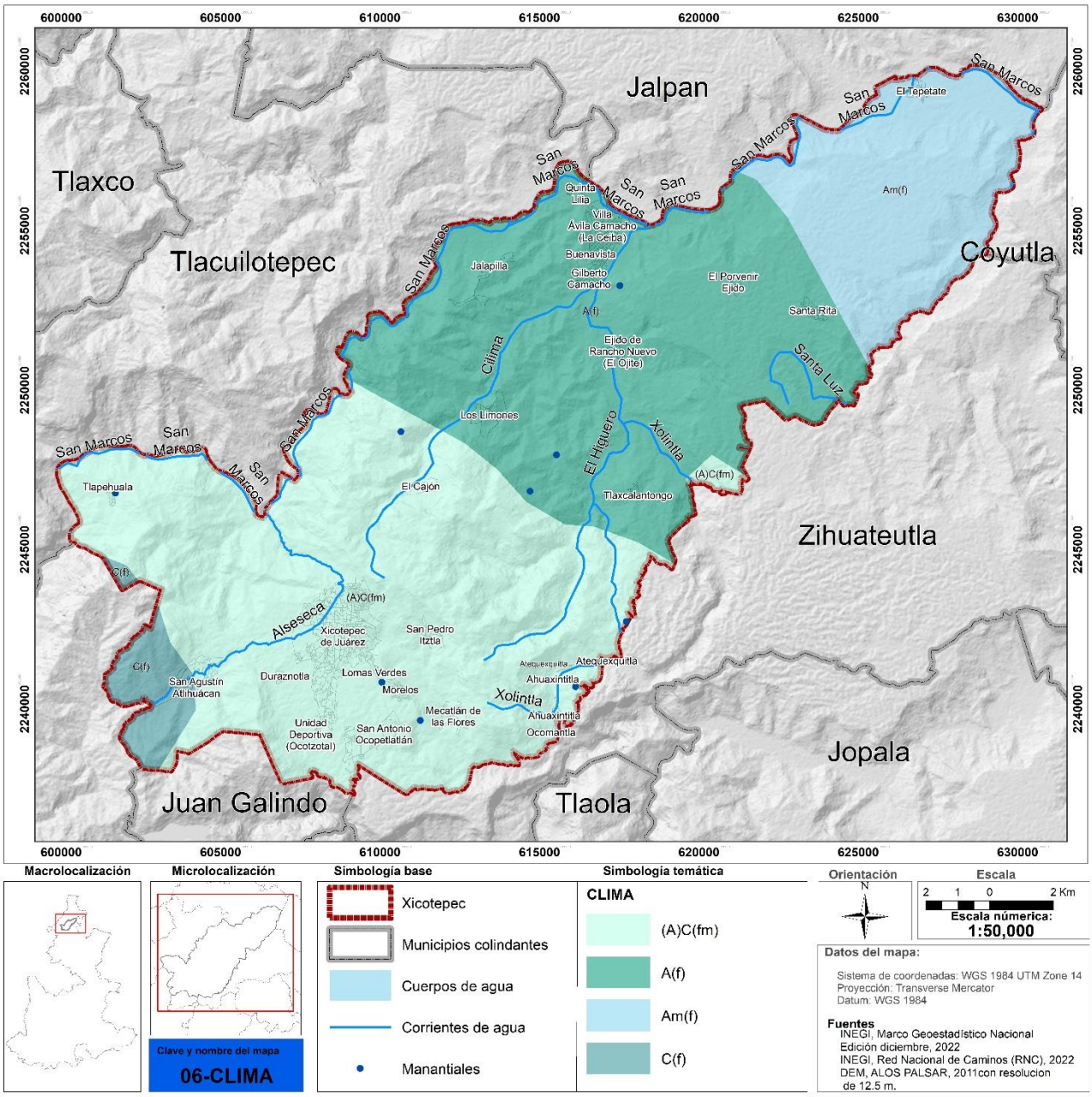


Figura 12 Unidades climáticas de Xicotepec.

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico (INEGI 2022)

3.7. Hidrología

3.7.1. Hidrología superficial

De acuerdo con información consultada en CONAGUA y el SINA (2023), el municipio de Xicotepec tiene múltiples escurrimientos, corrientes marinas del Golfo de México, manantiales y arroyos intermitentes que corresponden a la hidrología superficial del municipio. Xicotepec de ubica en la región Hidrológica RH27 Tuxpan-Nautla, la cual corresponde al 100% del municipio y corresponde a subcuenca Rio San Marcos que pertenece a la cuenca Rio Cazones con el 89% del municipio, mientras que el 11% restante es parte de la subcuenca Rio Necaxa que es parte de la cuenca Rio Tecolutla.

Región Hidrológica	**Cuenca**	**Subcuenca**
RH27 Tuxpan-Nautla (100%)	Rio Cazones (89%)	Rio San Marcos
	Rio Tecolutla (11%)	Rio Necaxa

Tabla 14 Hidrología de Xicotepec

En distintos puntos del municipio se localizan algunos manantiales y un termal, que en su mayoría son para consumo humano y aportan al caudal de arroyos intermitentes.

Corrientes de agua		**Arroyos**		**Manantiales**
Tipo Perrene	Alseseca	Tipo intermitentes	Santa Luz	Tezontles
	Cilima			Tarro
	Higuero			Tejeria
	San Marcos			Los lavaderos
	Xolintla			La pagua
				Duraznotla
				Xochipila

Tabla 15 Corrientes de agua

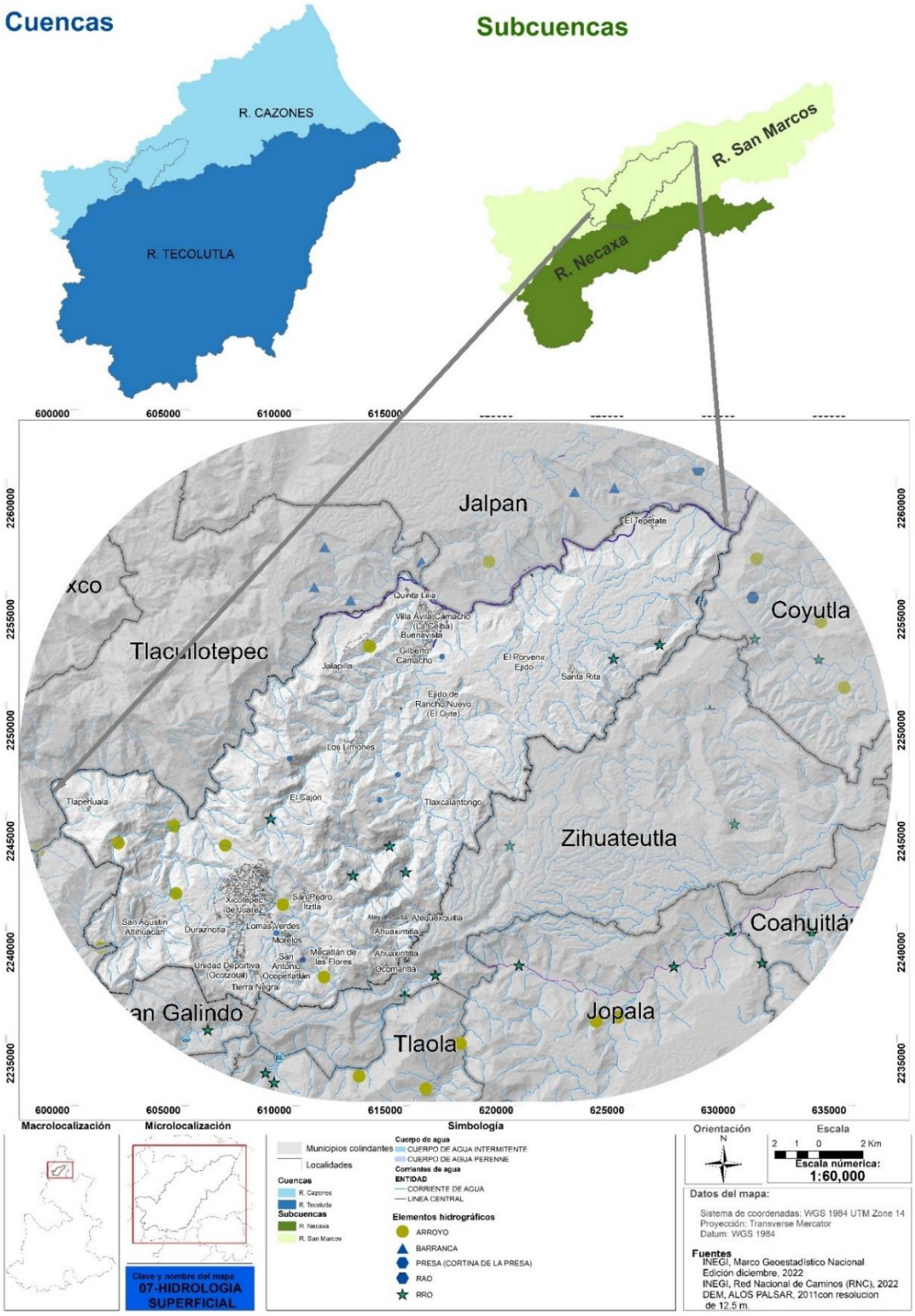


Figura 13 Hidrología Superficial

Fuente: Elaboración propia a partir de Marco Geoestadístico (INEGI 2022)

3.7.2. Hidrología subterránea

Xicotepec se encuentra en su totalidad territorial en el Acuífero Poza Rica (3001), el cual tiene una superficie de 2780 km^2. De acuerdo con información publicada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024)en el Diario Oficial de la Federación (DOF: 08/07/2016) que contempla la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y los lineamientos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, la disponibilidad de aguas subterráneas del acuífero en la siguiente:

Recarga total media anual (R): 55.7 hm3 /año

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es 362.8 hm^3 /año, todos son recarga natural. Volumen de extracción de aguas subterráneas es de 11,372,581 m^3 anuales reportado por el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 20 de febrero del 2020.

Descarga natural comprendida (DNC) La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para el caso del acuífero Poza Rica, su valor es 344.7 hm^3 anuales, que corresponden a las salidas flujo base del Río Cazones. No se considera comprometida la evapotranspiración porque ésta fue evaluada en el subálveo del Río Cazones en donde los niveles freáticos someros son alimentados por su flujo base. Por lo tanto, DNCOM = 344.7 hm^3 anuales.

Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión

mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 16,646,295 m^3 anuales, que reporta el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 30 de diciembre de 2020

Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) La disponibilidad de aguas subterráneas constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$DMA = R – DNC – VEAS \quad (3)$$

$$DMA = 362.8 – 344.7 – 16.646295$$

$$DMA = -1.453705 \ hm^3 \text{ anuales}$$

El resultado indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, su déficit es de 1,453,705 m^3

Dentro del municipio se localiza un total de 137 concesiones de extracción de agua, de acuerdo con información de CONAGUA (REPDA, 2023).

Tipo de aprovechamiento	Número de concesiones	Uso
Superficial	104	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/Pecuario
Subterráneo	8	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/
Descargas residuales	23	Público urbano/Agrícola/Servicios/Industrial
Zonas federales	119	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/Pecuario

Tabla 16 Concesiones de extracción de agua en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos del REPDA, CONAGUA, 2023.

Considerando el tipo de aprovechamiento de las concesiones, las de tipo superficial son 104, de tipo subterráneas 8 y se cuenta con 23 zonas de descarga residual; de todas las concesiones 119 se encuentran en zonas federales.

Tipo de aprovechamiento	Número de concesiones	Uso
Superficial	104	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/Pecuario
Subterráneo	8	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/
Descargas residuales	23	Público urbano/Agrícola/Servicios/Industrial
Zonas federales	119	Público Urbano/Agrícola/Servicios/Industrial/Diferentes usos/Pecuario

Tabla 17 Tipo de aprovechamiento de las concesiones de agua

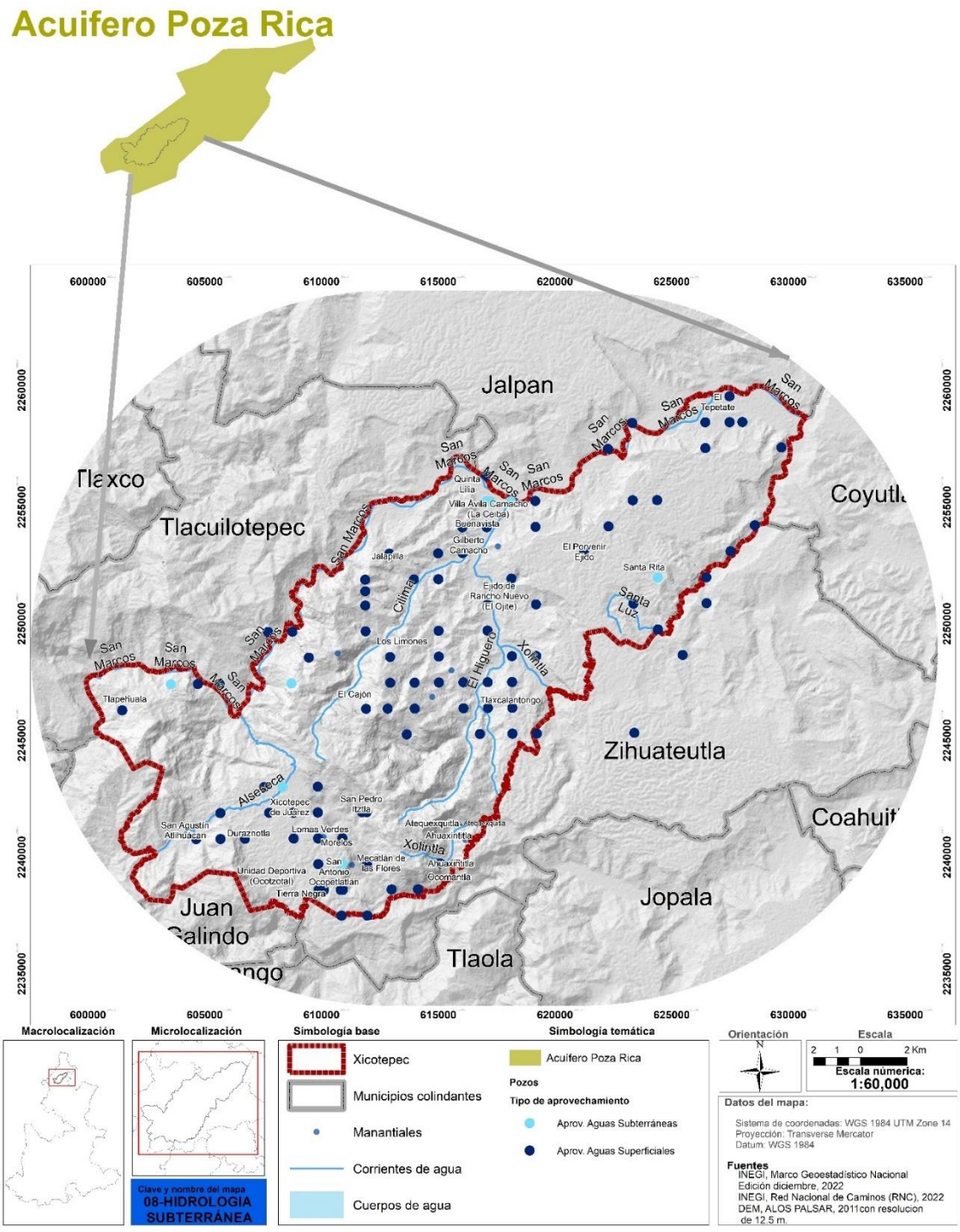


Figura 14 Hidrología Subterránea

Fuente: Elaboración propia con información de la base de datos del REPDA , CONAGUA, 2023.

3.8. Erosión

La erosión es un proceso de desgaste de la superficie de un cuerpo por factores externos, en este caso es un proceso de desgaste de la roca madre por procesos exógenos, teniendo efectos significativos en el relieve, perdida de hábitats naturales, calidad del suelo y sistemas de agua, por lo que es importante a considerar en el área ambiental y planificación territorial.

Existen dos tipos de erosión según el efecto, erosión progresiva o geológica y erosión acelerada. La primera ocurre de manera natural a lo largo del tiempo por algunos factores naturales como viento, lluvia, nieve, calor, etc.) y la segunda es con mayor velocidad y tiene efectos notorios a corto plazo, debido al factor de la acción humana.

En el municipio se puede observar que el proceso de erosión solo tiene influencia En 50% del municipio, mientras que 49% se denota como sin erosión evidente, de acuerdo con información contenida en INEGI (2014).

El tipo de erosión que actúa en el municipio es de tipo hídrica de un nivel leve a moderado y se observa también la presencia de localidad, es decir, erosión por actividades humanas.

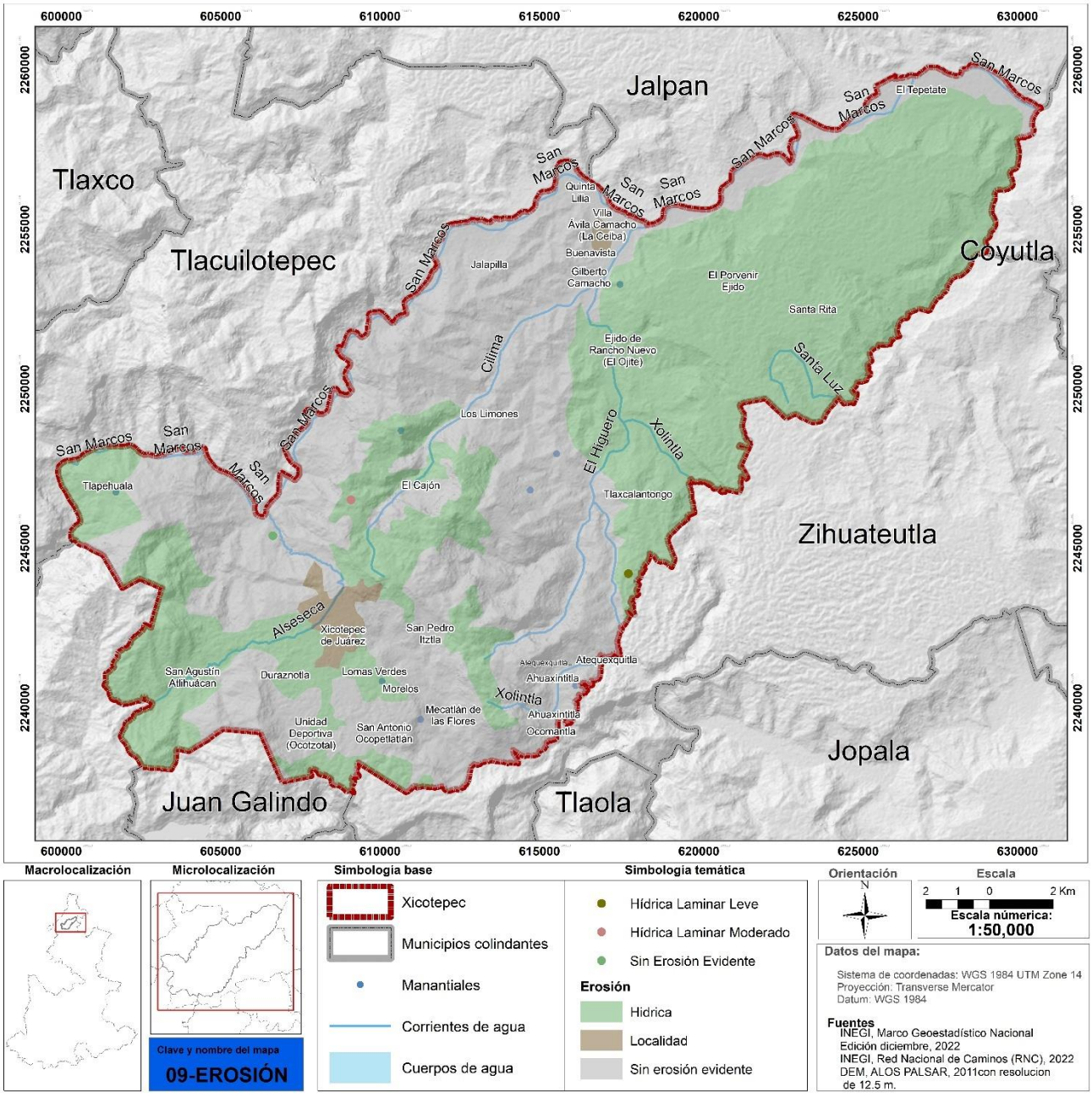


Figura 15 Erosión en el municipio

Fuente: Elaboración propia en base a información de Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I Continuo Nacional, INEGI, 2014.

3.9. Edafología

El suelo es una combinación de elementos naturales como el clima, la pendiente del terreno, la geología y la vegetación que forman un sistema natural. En nuestro país, existe una gran diversidad de tipos de suelo.

En la siguiente tabla se encuentran las características del suelo en el municipio de Xicotepec:

Tipo de suelo	**Textura**	**Superficie (Km^2)**	**Porcentaje de superficie (%)**
Phaeozem	Media	109.83	35.9
Acrisol	Media	47.04	15.4
Leptosol	Media	12.08	3.9
Regosol	Media	15.93	5.2
Cambisol	Media	105.8	34.6
Luvisol	Fina	1.98	0.6
Vertisol	Fina	13.41	4.4
Total			**100.0**

Tabla 18 Características de los tipos de suelo en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia en base a información de Conjunto de Datos de Edafología

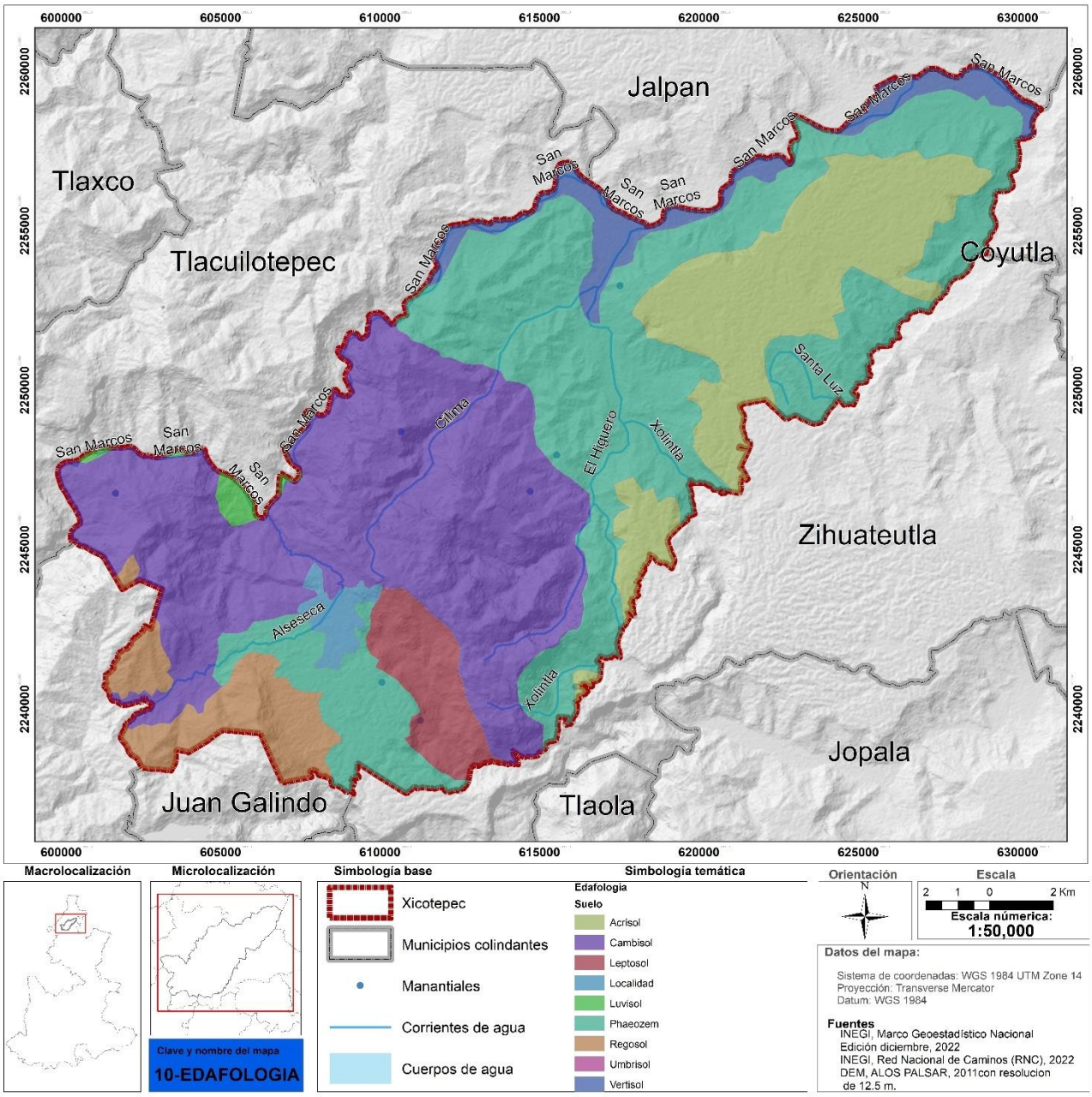


Figura 16 Edafología en el municipio

Fuente: Elaboración propia en base a información de Conjunto de Datos de Edafología

3.10. Uso de Suelo y vegetación

El municipio de Xicotepec es una zona con amplia vegetación a simple vista, esto gracias a las condiciones geográficas y climáticas de la zona que permiten su desarrollo. De acuerdo con el contenido en la Serie VII de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI (2017), el municipio cuenta con distintos usos de suelo y vegetación, descritos en la siguiente tabla:

Uso de suelo	Km^2
Asentamientos humanos	10.43
Bosque mesófilo de montaña	9.01
Bosque de pino-encino	1.45
Pastizal cultivado	73.84
Pastizal inducido	9.26
Agricultura de temporal anual	12.4
Agricultura de temporal anual y permanente	112.36
Agricultura de temporal anual, semipermanente y permanente	6.06
Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	20.03
Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña	21.48
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	0.4
Vegetación secundaria arbustiva de selva alta perennifolia	10.75

Vegetación secundaria arbórea de selva alta perennifolia	16.79
Vegetación secundaria herbácea de bosque mesófilo de montaña	5.07
Vegetación secundaria herbácea de selva alta perennifolia	0.7

Tabla 19 Uso de suelo

Fuente: Elaboración propia en base a información de Conjunto de Datos de Uso de Suelo y vegetación

Como se puede observar la superficie compuesta por vegetación en el municipio es en mayor porcentaje en comparativa a la zona de asentamientos humanos, es decir, no cuenta con una extrema perdida de vegetación.

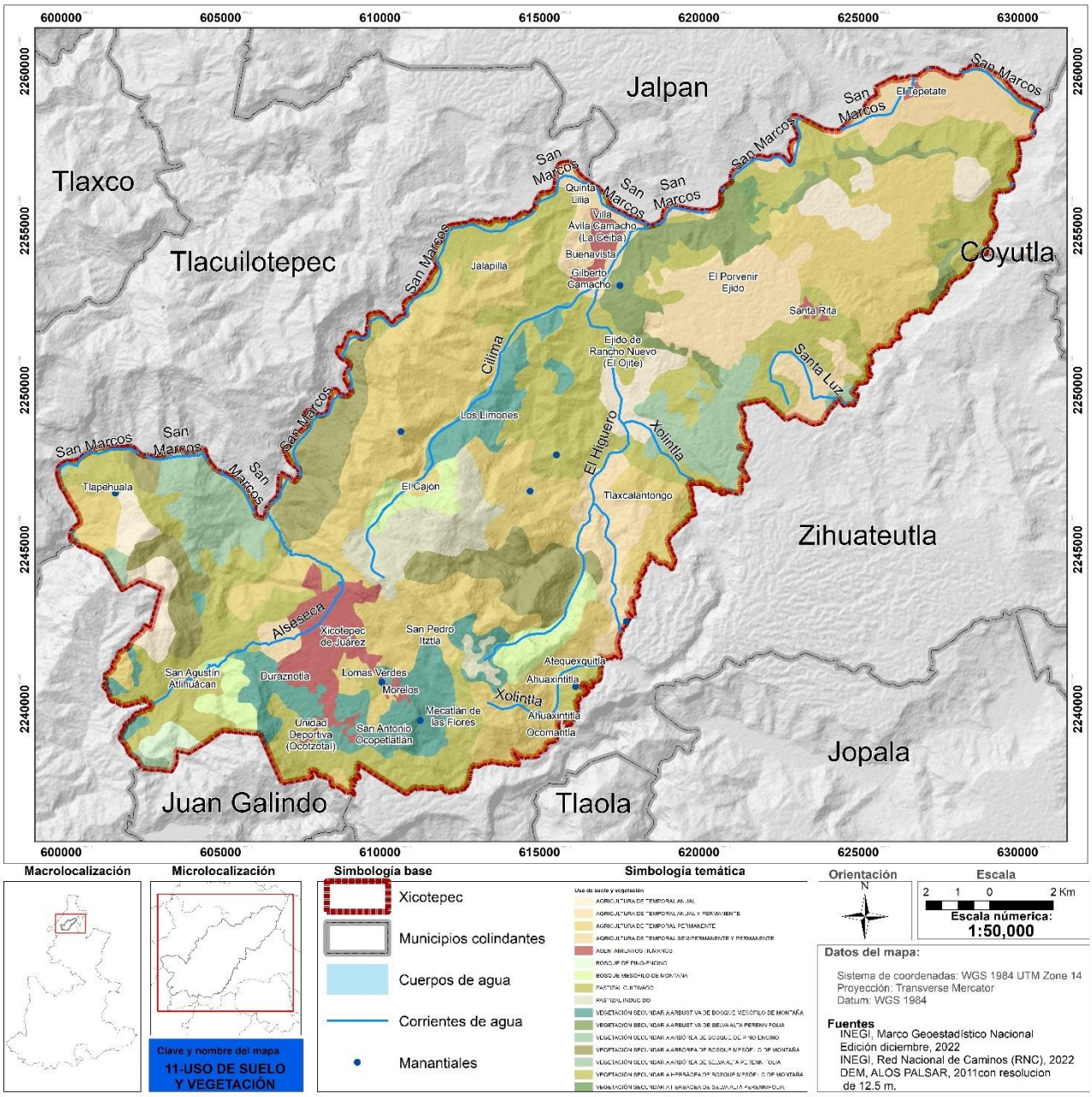


Figura 17 Uso de Suelo y vegetación

Fuente: Elaboración propia en base a información de Conjunto de Datos de Uso de Suelo y vegetación

3.11. Antecedentes de la zona de estudio

3.11.1. Análisis de cambio climático

En los últimos en México se ha impulsado la investigación y desarrollo de metodologías para evaluar la vulnerabilidad actual y futura al cambio climático (INECC, 2021) en este análisis de vulnerabilidad de identifica problemáticas asociadas a amenazas climáticas, variables de sensibilidad y capacidad adaptativa con impacto actual o futuro en los sistemas sociales, productivos, económicos y naturales.

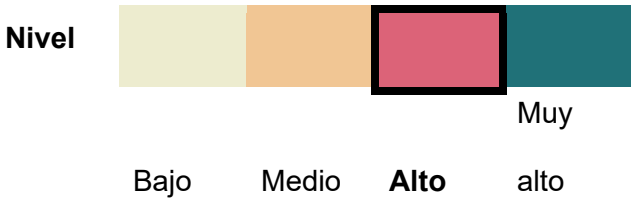
En este análisis se identificaron en 2019 los municipios vulnerables a nivel nacional, clasificándolos de la siguiente manera:

- Primer Nivel: 1448 municipios, muy alta y alta vulnerabilidad actual, con al menos una de 6 vulnerabilidades especificas
- Segundo Nivel: 273 municipios, tres vulnerabilidades en un grado muy alta y alta actual.
- Tercer Nivel: 83 municipios, cuatro o más vulnerabilidades en la categoría de muy alta o alta vulnerabilidad actual.

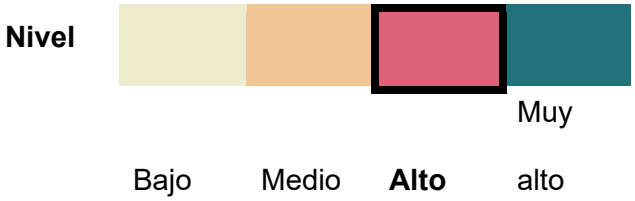
En el estado de Puebla de 217 municipios, solo 73 se encuentran dentro de los municipios vulnerables al cambio climático, de los cuales, en el primer nivel de priorización 63 municipios se encuentran en el estado, del segundo nivel 8 municipios y del tercer nivel 2 municipios (INECC, 2021). Con esta información se identifica que Puebla ocupa el lugar 29 a nivel nacional respecto a instituciones y recursos humanos que detonen los procesos de adaptación a una problemática climática.

El municipio de Xicotepec se encuentra dentro de la clasificación de *primer nivel* de priorización y con los siguientes niveles de vulnerabilidad para el municipio:

- Asentamientos humanos a inundaciones



- Asentamientos humanos a PRM



3.11.2. Elementos expuestos en Xicotepec

Además de lo anterior, CENAPRED (2020) identifica los bienes expuestos en el municipio, considerando que son los siguientes:



Mujeres

42,698



Viviendas

21, 258



Escuelas

223



Hombre

38,757



Equipamiento Salud

8



U.P. Pecuarias

157

CAPÍTULO 4. Metodología

4.1. Desarrollo metodológico

El desarrollo metodológico de este trabajo se dividió en seis etapas para cumplir con los objetivos de elaborar un modelo cartográfico que determine la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Xicotepec, Puebla, utilizando la metodología de Mora-Vahrson.

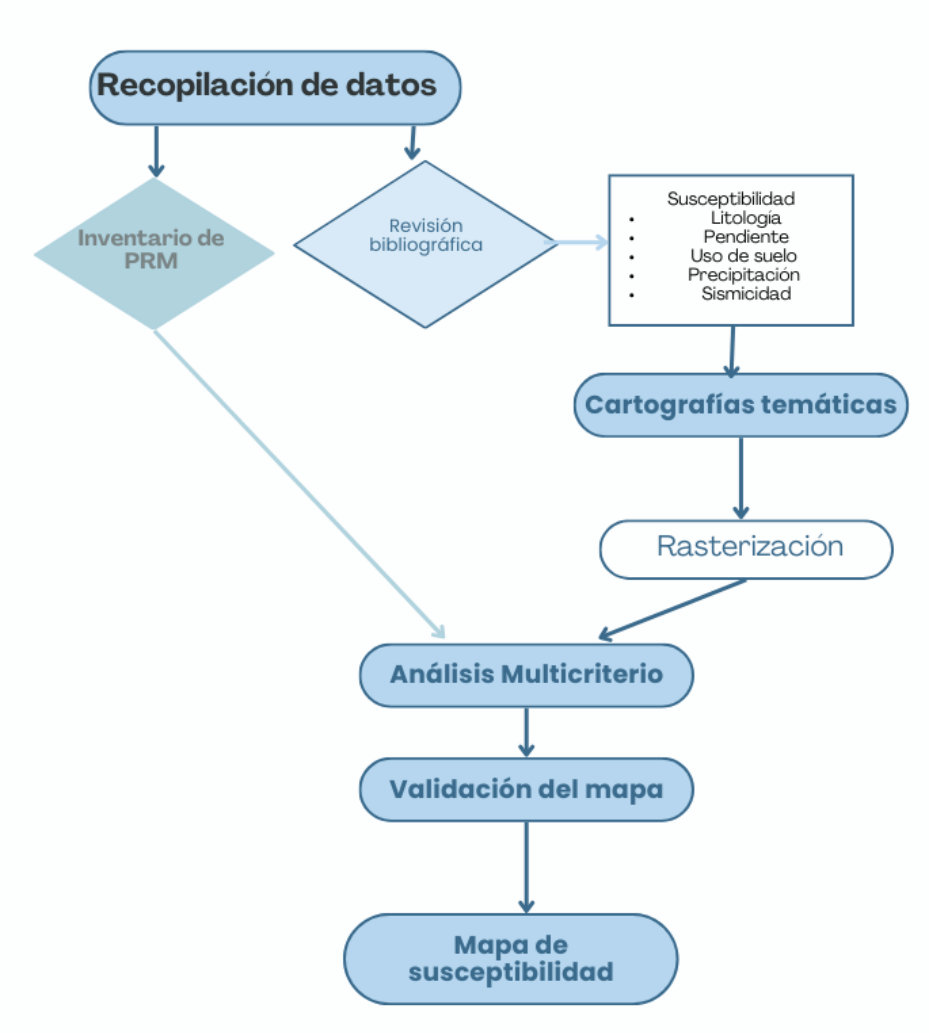


Figura 18 Desarrollo metodológico

Fuente: Elaboración propia

1) Inventario: Se realizó un registro mediante el uso de Google Earth realizando un análisis en distintas temporalidades entre los años 2004-2020, para identificar zonas que han sufrido algún PRM

en el municipio, añadiendo información recabada en CENAPRED e INEGI en los inventarios de PRM para validar la información encontrada. Además de asistencia al municipio a confirmar y recopilar información de los sitios afectados previamente.



Figura 19 Identificación de PRM

Fuente: Elaboración propia

2) Revisión bibliográfica: Se recopiló información disponible del municipio de distintas fuentes oficiales y de acceso libre como SGM, CONABIO, INEGI, CONAGUA y CENAPRED, como el Modelo de Elevación Digital, el mapa de uso de suelo, litología, lineamientos geológicos e información de precipitación. En este caso también se han considerado las imágenes Sentinel 2 y Landsat 9, adquiridas de forma gratuita en el visor Copernicus y EarthExplorer.

3) Cartografías temáticas: Se creo una base SIG a partir de la recopilación del trabajo de campo y la información recabada por elementos oficiales de manera personal por requisiciones a municipio.

4) Categorización de cartografías temáticas: Siguiendo la metodología de Mora-Vahrson se realizó una reclasificación de los valores originales en códigos numéricos que permitan evaluar la importancia y relevancia de cada atributo dentro de los mapas temáticos.

5) Análisis Multicriterio: Al adherirse a la ecuación principal del modelo, los factores se multiplican durante un análisis fundamental de SIG. El resultado numérico se comparó con los valores proporcionados en tablas previamente establecidas en la bibliografía, con el fin de zonificar los sitios según la probabilidad de que ocurra un PRM de ladera.

6) Validación del mapa final: Se realizó una regresión lineal espacial con respecto a los datos obtenidos del inventario a nivel local para determinar el grado de confianza del mapa resultante.

4.2 Inventario de PRM

En el Atlas de Riesgos del Estado de Puebla se mencionan los procesos de remoción de masas, incluyendo los PRM y la caída de bloques, como uno de los riesgos naturales que afectan a la región de estudio. En Xicotepec se han encontrado registros de tres grupos principales: caída, PRM y flujo.

De acuerdo con CENAPRED, en el municipio se han registrado algunos eventos geológicos que en algunas ocasiones han ocasionado daños muy graves en la población. En la siguiente tabla se muestran información contenida en la Base de Datos sobre el Impacto Socioeconómico de los Daños y Perdidas ocasionados por los Desastres en México de 2000-2022, elaborado por la Subdirección de Estudios Económicos y Sociales de la Dirección de Análisis y Gestión de Riesgo, que contiene análisis de información documental recabada de diversas fuentes del sector público y del privado, así como de visitas de campo y consultas directas con las autoridades locales, donde se pueden observar los distintos eventos en los que el municipio de Xicotepec se ha visto afectado de manera socioeconómica.

Año	Clasificación del fenómeno	Tipo de fenómeno	Municipios Afectados	Descripción general de los daños	Defunciones	Población afectada	Viviendas dañadas
2007	Hidrometeorológico	Ciclón tropical	Huauchinango, Xicotepec, Naupan, Zihuateutla, Pantepec, Fco. Z. Mena, Pahuatlan, Chinconcuahutla , Jopala y Jalpan	A causa de la Depresión Tropical Lorenzo se registraron 6 muertos entre los cuales se encontraba un menor. En el Mpio. de Naupan se registro un PRM sobre una vivienda. 560 se albergaron en 7 R.T. Se reportaron varias viviendas afectadas, algunas escuelas y daños en la infraestructura carretera del estado	6	566	sd
2007	Hidrometeorológico	Granizada	Acatlan, Xicotepec, Zautla, Cuautempan, Xchiapulco y Cuyuaco	La granizada afecto viviendas de material endeble y a cultivos. Hubo 7 lesionados	0	22	sd
2009	Hidrometeorológico	Lluvias	Xicotepec	Debido a las fuertes lluvias se registraron daños en 24 viviendas. Principalmente en sus techos	0	120	24
2010	Hidrometeorológico	Helada	Acateno, Ahuacatlán, Amixtlán, Atlequizayan, Camocuautla, Caxhuacan, Cuetzalan del Progreso, Hermenegildo Galeana, Huehuetla, Hueyapan, Hueytlalpan, Huitzilan de Serdán, Jalpan, Jonotla, Jopala, Juan Galindo, Olintla, San Felipe Tepatlán, Tepango de Rodríguez, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlaxco, Tuzamapan de Galeana, Xicotepec, Yaonáhuac, Zihuateutla, Zongozotla, Zoquiapan	Debido a la helada atípica 2,162 productores de café fueron afectados. El PACC apoyó con 912,417.48	0	2,162	0

2011	Hidrometeorológico	Sequía	Atlequizayan, Tlacuilotepec y Xicotepec	Como producto de la intensa sequia se registraron afectaciones en cultivos y ganado, por lo que Sagarpa apoyo a los productores afectados mediante el programa CADENA.	0	670	0
2013	Hidrometeorológico	Ciclón tropical	Ahuazotepec, Aquixtla, Atempan, Chiconcuautla, Chignautla, Francisco Z. Mena, Honey, Huauchinango, Hueyapan, Huitzilan de Serdán, Jalpan, Jopala, Juan Galindo, Naupan, Nauzontla, Pahuatlán, Pantepec, Teteles de Avila Castillo, Tetela de Ocampo, Teziutlán, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlapacoya, Tlaxco, Xicotepec, Xiutetelco, Xochiapulco, Xochitlán de Vicente Suárez, Zacapoaxtla, Zaragoza y Zihuateutla	Daños por fenómeno de lluvia severa ocurrida del 12 al 16 de septiembre de 2013 acausa de la Interación de las tormentas tropicales Ingrid y Manuel, en los municipios de Ahuazotepec, Aquixtla, Atempan, Chiconcuautla, Chignautla, Francisco Z. Mena, Honey, Huauchinango, Hueyapan, Huitzilan de Serdán, Jalpan, Jopala, Juan Galindo, Naupan, Nauzontla, Pahuatlán, Pantepec, Teteles de Avila Castillo, Tetela de Ocampo, Teziutlán, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlapacoya, Tlaxco, Xicotepec, Xiutetelco, Xochiapulco, Xochitlán de Vicente Suárez, Zacapoaxtla, Zaragoza y Zihuateutla del Estado de Puebla.	3	SD	563
2020	Hidrometeorológico	Lluvias	Huauchinango, Jolalpan, Xicotepec de Juárez, Zapotitlán de Méndez, Nauzontla, Olintla, Huehuetla, Tlaola, Tlapacoya, San Felipe Tepatlán, Hermenegildo Galeana, Amixtlán, Xicotepec de Juárez, Copales y Chiconcuautla.	08:00-20:00 horas/08 de agosto, derivado de las intensas lluvias en la sierra de Puebla (120.8 mm en el municipio de Pahuatlán, con un umbral de 109 mm), se reportan las siguientes afectaciones: •Daños en 89 viviendas y 39 caminos, en 8 municipios de la entidad: San Felipe Tepatlán, Hermenegildo Galeana, Amixtlán, Tlaola, Tlapacoya, Xicotepec de Juárez, Copales y Chiconcuautla. •28 familias fueron evacuadas. •1 barda colapsada. •3 viviendas afectadas por penetración de agua (atendidas y sin novedad). •Anegaciones al interior del mercado 5 de mayo. Municipio de Tlaola: •3 lesionados de forma leve. •3 familias evacuadas (12 personas aproximadamente), por desgajamiento de bordo cercano, se fueron con familiares.	0	372	93

2021	Hidrometeorológico	Ciclón tropical	Ahuacatlán, Ahuazotepec, Amixtlán, Aquixtla, Ayotoxco de Guerrero, Camocuautla, Caxhuacan, Chiconcuautla, Chignahuapan, Honey, Coatepec, Cuautempan, Cuetzalan del Progreso, Cuyoaco, Hermenegildo Galeana, Huauchinango, Huehuetla, Hueyapan, Hueytamalco, Huitzilan de Serdán, Atlequizayan, Ixtacamaxtitlán, Ixtepec, Jalpan, Jonotla, Jopala, Juan Galindo, Naupan, Nauzontla, Olintla, Pahuatlán, San Felipe Tepatlán, Tenampulco, Tepango de Rodríguez, Tepetzintla, Tetela de Ocampo, Tlacuilotepec, Tlaola, Tlapacoya, Tlatlauquitepec, Tuzamapan de Galeana, Venustiano Carranza, Xicotepec, Xiutetelco, Xochiapulco, Xochitlán de Vicente Suárez, Yaonáhuac, Zacapoaxtla, Zacatlán, Zapotitlán de Méndez, Zautla, Zongozotla , Zoquiapan, Pantepec y Francisco Z. Mena	Huracán categoría 2 "Grace" (lluvia severa) e inundación fluvial los dias 21 y 22 de agosto de 2021 55 municipios. El número de viiviendas 17916 se obtuvo de los boletines de la página de Secretaria de Bienestar	0	34,729	17,916

Tabla 20 base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y perdidas ocasionados por los desastres en México de 2000-2022

Fuente: Base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México de 2000 a 2022.

Además, en el Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2023 del CENAPRED (2024), se encuentran registrados 20 tipos de declaratorias en el municipio, de las cuales el 95% se clasifica en el tipo Hidrometeorológico y el 5% en tipo Geológico.

Tipo Declaratoria	Clasificación Fenómeno	Tipo Fenómeno	Fecha Publicación	Fecha Inicio	Fecha Fin	Observaciones
Contingencia Climatológica	Hidrometeorológico	Sequía	02/09/2005	01/05/2005	31/07/2005	Sequia atípica, Impredecible y No Recurrente
Emergencia	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	18/10/2005	06/10/2005	06/10/2005	Depresión Tropical "Stan"
Desastre	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	31/10/2005	03/10/2005	07/10/2005	Ciclón Tropical "Stan" y Onda Tropical No. 40
Emergencia	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	29/08/2007	23/08/2007	23/08/2007	Huracán Dean
Contingencia Climatológica	Hidrometeorológico	Lluvias	05/10/2007	22/08/2007	22/08/2007	Lluvia Extremas
Emergencia	Hidrometeorológico	Lluvias	12/10/2007	28/09/2007	28/09/2007	Remanentes Tormenta Tropical Lorenzo
Desastre	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	29/10/2007	28/09/2007	28/09/2007	Huracán Lorenzo
Desastre	Hidrometeorológico	Lluvias	20/09/2011	22/08/2011	23/08/2011	Sin Observaciones
Contingencia Climatológica	Hidrometeorológico	Sequía	02/11/2011	01/04/2011	30/04/2011	Desastre Sagarpa
Desastre	Hidrometeorológico	Lluvias	25/09/2013	12/09/2013	16/09/2013	Huracán Ingrid
Emergencia	Hidrometeorológico	Lluvias	22/08/2017	09/08/2017	09/08/2017	Lluvias producto del Huracán Franklin
Desastre	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	23/08/2017	09/08/2017	09/08/2017	Huracán Franklin
Emergencia	Hidrometeorológico	Nevadas, Heladas, Granizadas	21/12/2001	18/12/2001	18/12/2001	Heladas, Nevadas y Bajas Temperaturas
Desastre	Hidrometeorológico	Lluvias	15/08/2016	05/08/2016	06/08/2016	Lluvia severa
Emergencia	Hidrometeorológico	Lluvias	15/08/2016	05/08/2016	06/08/2016	Lluvia severa
Emergencia	Geológico	Actividad Volcánica	18/12/2000	15/12/2000	15/12/2000	Incremento en la actividad volcánica Popocatépetl. No especifica municipios en emergencia preventiva.
Desastre	Hidrometeorológico	Sequía	25/09/2002	01/08/2002	31/08/2002	Sequía atípica e impredecible durante agosto de 2002
Contingencia Climatológica	Hidrometeorológico	Heladas	14/05/2010	09/01/2010	10/01/2010	Helada atípica
Desastre	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	06/09/2021	21/08/2021	21/08/2021	Huracán Grace
Emergencia	Hidrometeorológico	Ciclón Tropical	06/09/2021	21/08/2021	22/08/2021	Huracán Grace. Lluvia severa e inundación fluvial

Tabla 21 Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2023

Fuente: Elaboración propia, con información de CENAPRED 2024,

http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visualizacion-datos.html

4.3. Metodología de Mora-Vahrson

Las causas de los PRM de tierra se pueden dividir en dos amplias categorías denominadas: factores condicionantes y factores desencadenantes, para este trabajo se utilizó la metodología de Mora- Vahrson (1994) y se adaptó para elaborar un mapa de las zonas de susceptibilidad a PRM, considerando factores condicionantes utilizando datos recopilados de distintas fuentes, así como el uso de sistemas de información geográfica. El modelado, análisis y elaboración de cartografía para la presentación de los datos se realizó en el software ArcGIS 10.8 y QGis 3.1.4.

El análisis de los factores se realizó en una escala 1:150,000 para tener a mayor detalle información de cada uno. Con toda la información obtenida de cada factor se ha realizado un mapa de zonificación final basado en la Ecuación 1.

4.3.1. Uso de suelo

El uso de suelo en México se encuentra establecido en las leyes y reglamentos que rigen la planificación territorial y urbana, este cambio hace referencia a la transformación de la cubierta vegetal que tienen los suelos para que puedan ser empleados con otra función.

Para este caso, el uso de suelo permite identificar las áreas naturales y artificiales en el municipio, a partir de lo cual se puede definir las zonas urbanas, áreas de cultivos o de agricultura, zonas con mayor cubierta vegetal y sin cubierta vegetal.

El análisis de uso de suelo en el municipio se determinó con la implementación de NDVI, usando una imagen satelital Sentinel 2, y mediante el software ArcGis 10.8 y QGis 3.1.4. se han realizado las correcciones atmosféricas y posteriormente se han combinado las bandas 8 y 4, obteniendo en NDVI.

Finalmente se ha realizado una clasificación no supervisada para obtener un mapa que permita observar el uso de suelo y vegetación correspondiente al municipio de Xicotepec, considerando 5 clases.

Uso de suelo	Valor Asignado
Sin vegetación	1
Zonas urbanas	2
Poca vegetación	3
Media vegetación	4
Alta vegetación	5

Tabla 22 Clasificación para uso de suelo y vegetación

Fuente: Elaboración propia

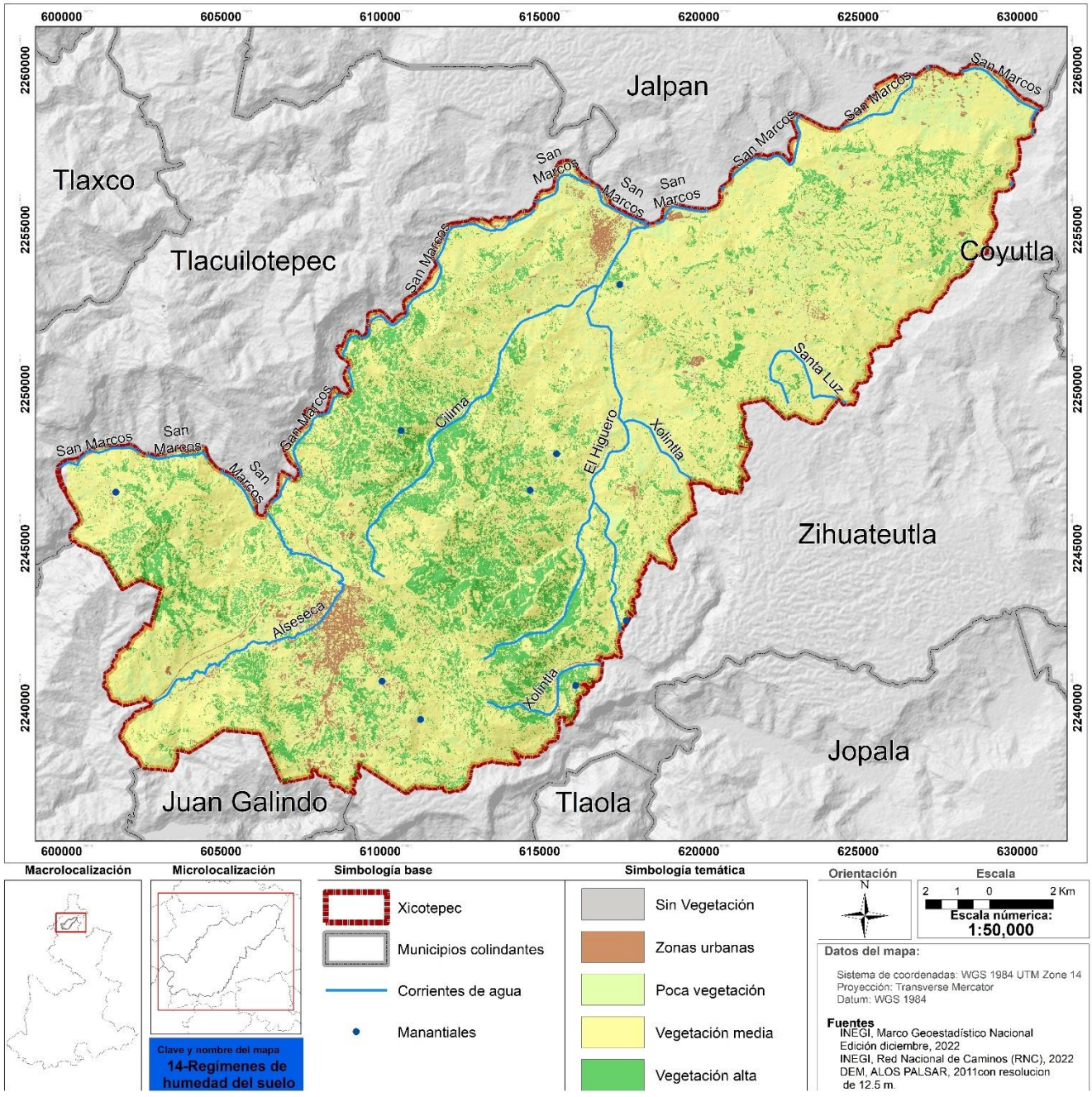


Figura 20 Uso de suelo de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Pendiente

El municipio de Xicotepec se caracteriza por tener pendientes abruptas, en este caso, para la obtención de rangos de pendientes (grados) se utilizó una imagen satelital descargada de forma gratuita en el servidor de COPERNICUS, usando la clasificación antes mencionada, con siete rangos

Rango de pendientes (grados)	Valor asignado	Descripción	Porcentaje %
0-2	1	Plano o casi completamente	3%
2-4	2	Inclinación suave	6%
4-8	3	Pendientes inclinadas	16%
8-16	4	Modelo escarpado	21%
16-35	5	Escarpado	44%
35-55	6	Muy escarpado	9%
>55	7	Extremadamente escarpado	1%

Tabla 23 Rangos de pendientes

Fuente: Tomado de Van Zuidam (1986)

El valor de la pendiente se evalúa usando el parámetro de relieve relativo (Rr), que se define como la diferencia de elevación por km^2

En la siguiente figura se observa que las zonas urbanas con aquellas con menor rango de pendiente, y aquellas que corresponden a las zonas con mayor vegetación, son las de mayor rango de pendientes.

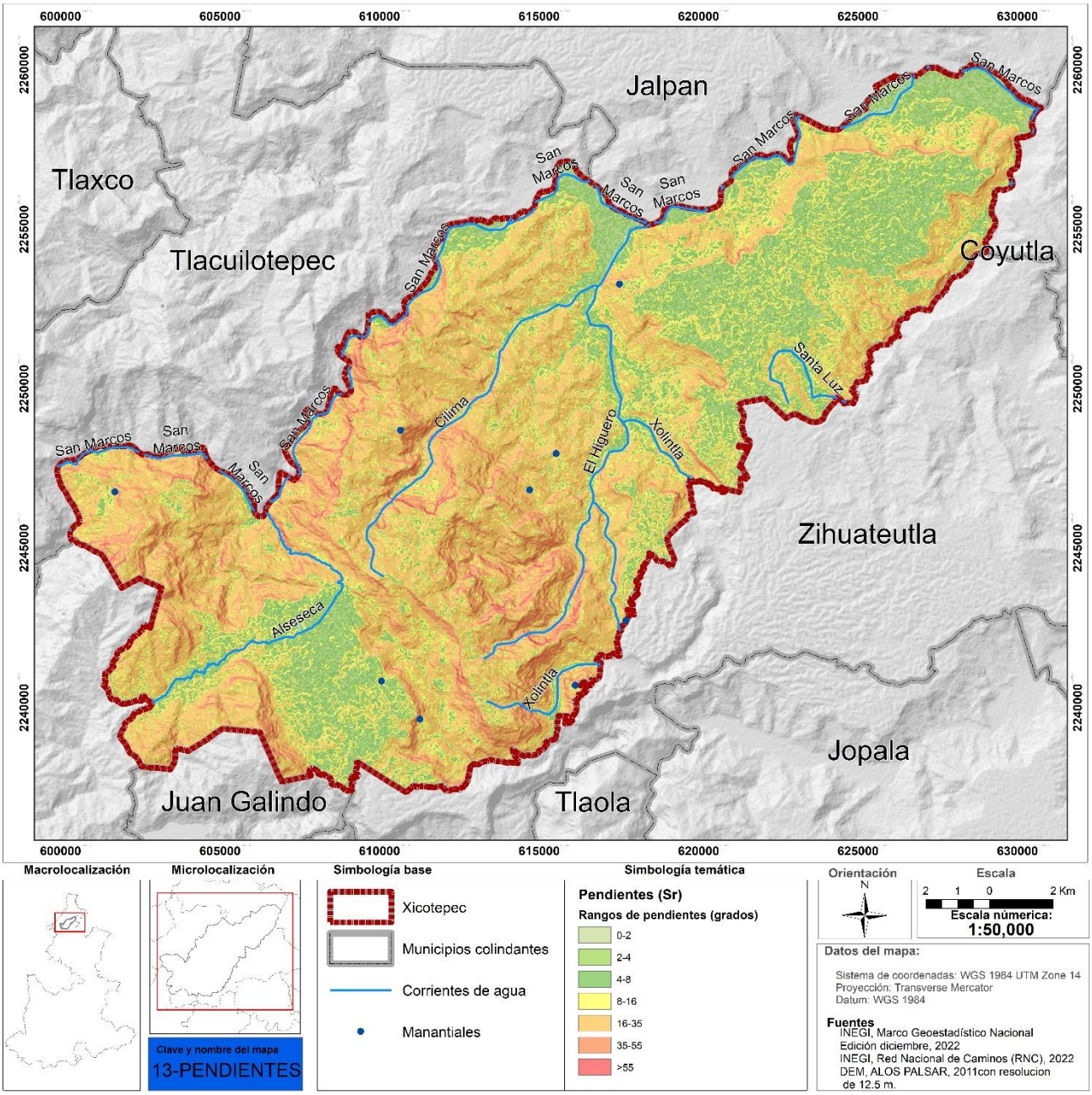


Figura 21 Pendientes en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia mediante el empleo de imagen satelital del servidor Copernicus

4.3.3. Litología

Para la determinación del factor litológico, se utilizó la información cartográfica disponible de dos cartas geológico mineras obtenidas del Servicio Geológico Mexicano (SGM), con clave F14-83 Pachuca y F14-12 Poza Rica, se observa de manera superficial, la presencia de rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico, pertenecientes a estructuras de tipo Flysh, (intercalaciones rítmicas de lutitas- areniscas) y rocas más recientes provenientes del Terciario, como basaltos, areniscas, tobas.

En específico, el municipio de Xicotepec se encuentra predominado por rocas de tipo sedimentario, en específico por intercalaciones de Caliza-lutita que corresponde al 36.4% de la superficie municipal, así como Arenisca- Lutita con el 31.3% de la superficie. Además de la importancia de las rocas de tipo Ígneas, en específico Extrusivas, de tipo Basalto, que tienen el 27.1% de correspondencia del municipio.

Litología	Roca	Clave	Formación	Superficie (Hectáreas)	Valor asignado	Porcentaje de superficie
Arenisca-Lutita	Sedimentaria	TpaTe(ar-lu)	Chicontepec	100.1	5	31.3%
Limolita-Conglomerado poligénico	Sedimentaria	Jm(lm-cgp)	Cahuasas	12.9	4	4.1%
Basalto	Extrusiva	TplQpt(B)	Indeterminado	86.1	3	27.1%
Caliza-Lutita	Sedimentaria	KbeKce(cz-lu)	Tamaulipas indiferenciada	116.4	5	36.4%
Lutita-Caliza	Sedimentaria	Ks(lu-cz)	Soyatal	3.6	3	1.10%

Tabla 24 Factor litológico

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la figura 26 que las zonas urbanas del municipio se encuentran en zonas con rocas de tipo ígneas, en específico basalto y aquellas con mayor vegetación y zonas agrícolas, son áreas con rocas de tipo sedimentario.

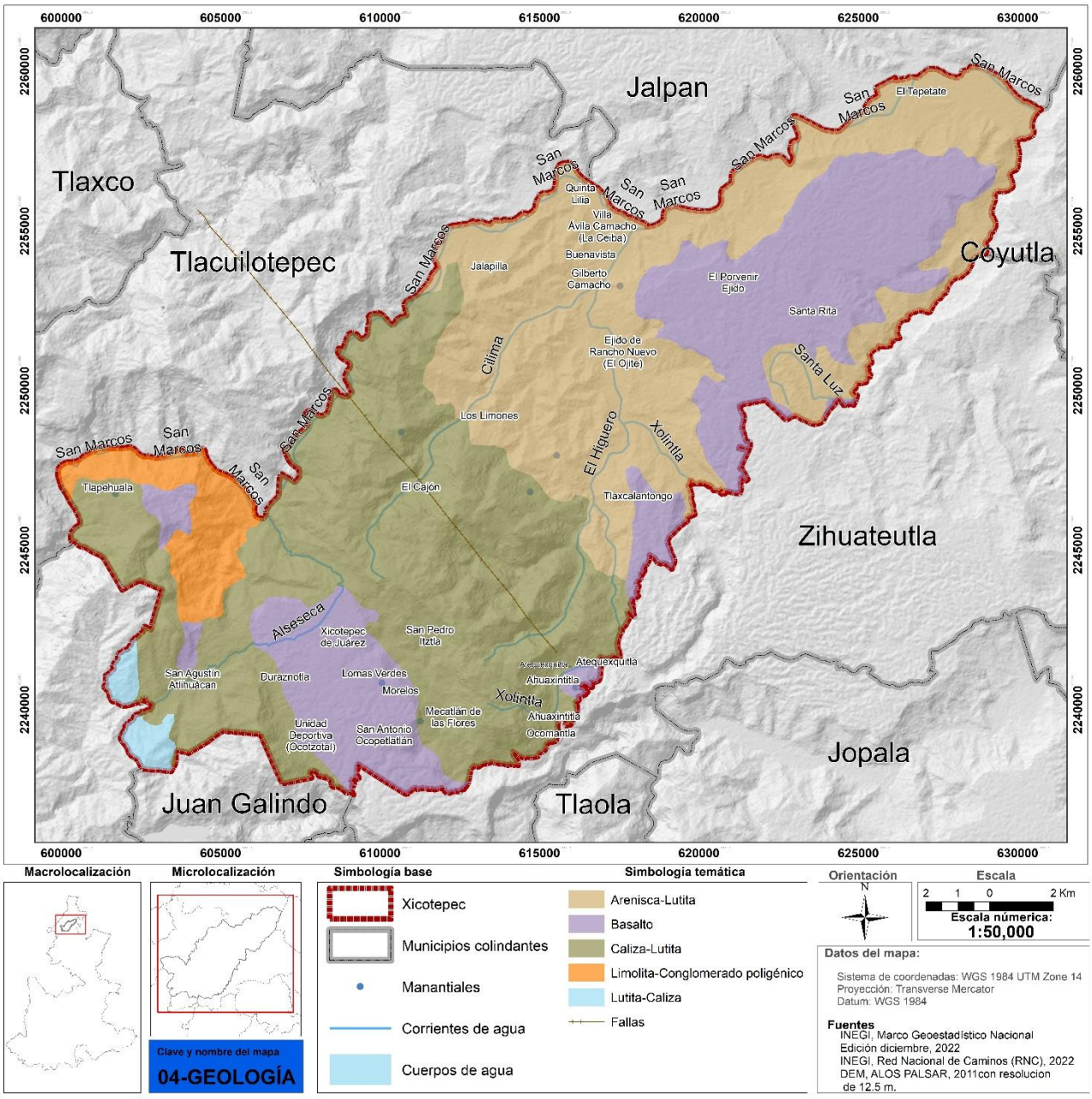


Figura 22 Litología en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Intensidad sísmica

La intensidad sísmica es importante puede influir en la causa de los procesos de remoción en masa, para este caso, el municipio no se encuentra cerca de alguna zona sísmica, sin embargo, considerando la Escala de Mercalli (modificada en 1931 por H. O. Wood y F. Neuman), se encuentran categorizadas dos tipos, IV y V, que de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017) indica lo siguiente:

"…IV. Sacudida sentida durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como de un carro pesado chocando contra un edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.

V. Sacudida sentida casi por todo el mundo; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen relojes de péndulo…"

Escala de Mercalli Intensidad (MM)	Calificación	Valor asignado
III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Considerable	6
IX	Importante	7

X	Fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

Tabla 25 Clasificación de intensidad sísmica

Fuente: Mora y Vahrson (1994).

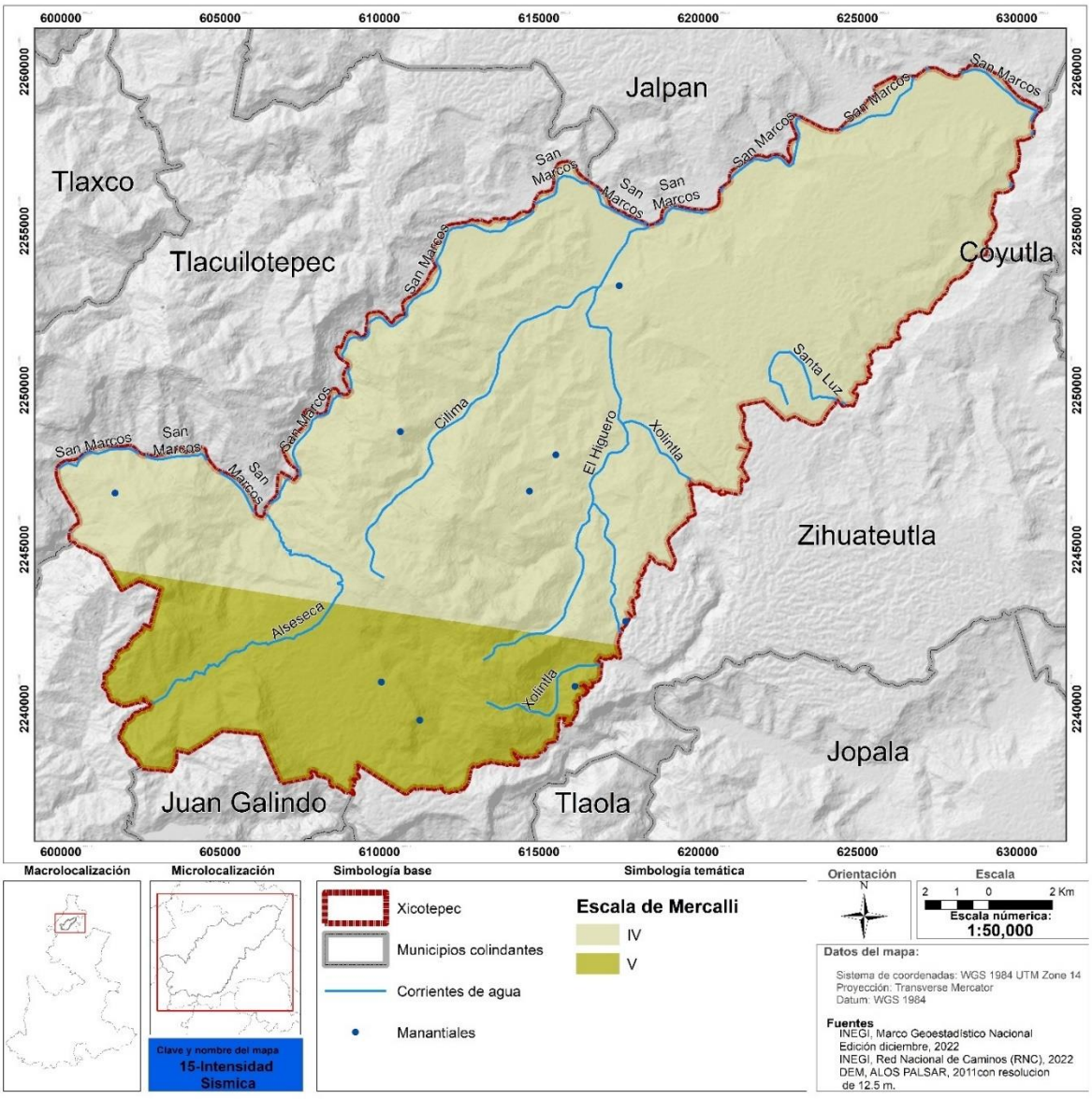


Figura 23 Intensidad sísmica en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia

4.3.5. Intensidad de precipitación

El municipio de Xicotepec es una zona con altos rangos de precipitación, en este caso se han usado los valores de precipitación media anual disponibles, de los cuales, se observa que el municipio tiene tres rangos en un periodo anual, con rangos que van de los 1500 a 2000 mm/año, 2000 a 2500 mm/año y de 2500 a 4000 mm/año.

Precipitación media anual	Clasificación	Valor asignado
1500 a 2000 mm/año	Medio alto	5
2000 a 2500 mm/año	Alto	6
2500 a 4000 mm/año	Muy alto	7

Tabla 25 Precipitación media anual

Fuente: Elaboración propia

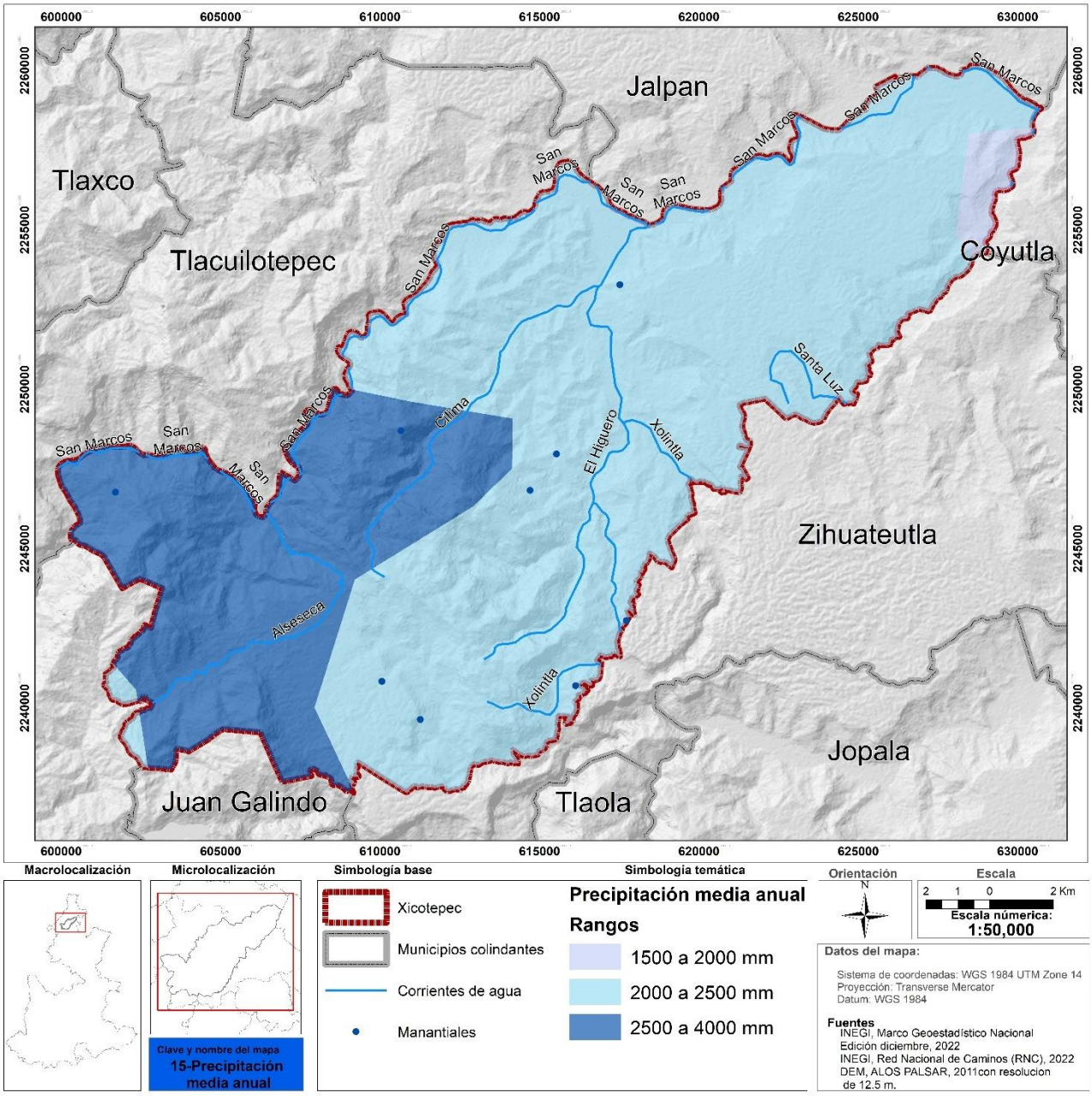


Figura 24 Intensidad de precipitación en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia

Considerando que el municipio es una zona con alta vegetación y valores de precipitación elevados, y considerando los regímenes de humedad del suelo de acuerdo con la versión simplificada del Departamento de Agricultura de los EE. UU. que emplea el segundo sistema de clasificación climática de Thornwaite, además de tomar en cuenta características de hidrología, topografía y vegetación (CONABIO, 2002). Este sistema reconoce los siguientes regímenes en el territorio Mexicano: Arídico, Xérico, Ústico, Udico y Ácuico.

Para el caso de la zona de estudio, se identifican dos tipos de humedad, correspondientes al régimen Udico, en la siguiente tabla se puede observar el porcentaje de superficie territorial al que corresponde cada uno de los regímenes en el municipio:

Régimen de humedad del suelo	**Porcentaje de superficie**
Udico con 270 a 330 días de humedad	12.70%
Udico con 330 a 365 días de humedad	87.30%

Tabla 26 Régimen de humedad

Fuente: Elaboración propia

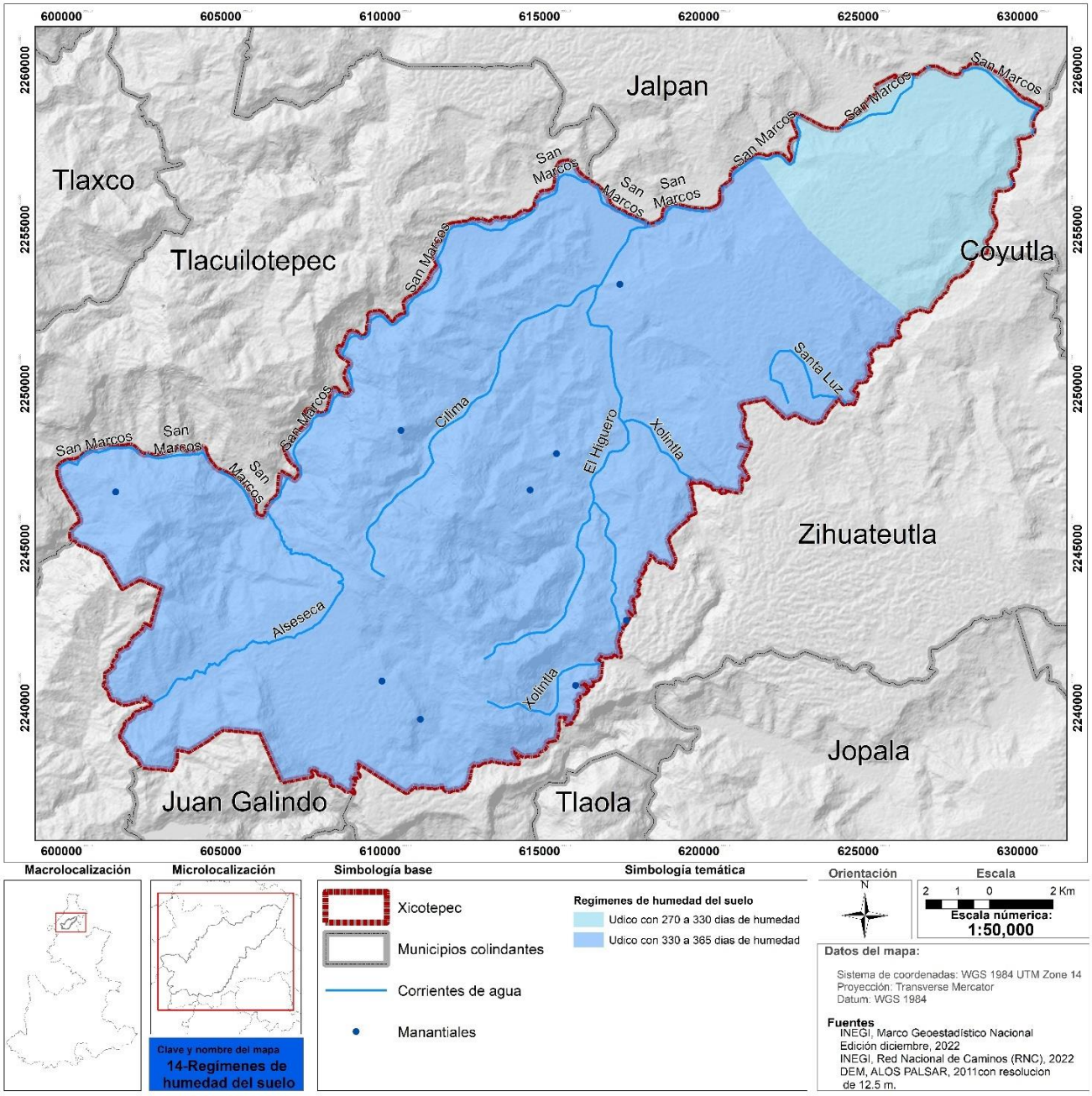


Figura 25 Regímenes de humedad

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5 Resultados y discusiones

5.1 Inventario de PRM

Con base en la información obtenida mediante procesos de identificación y en los datos publicados por CENAPRED e INEGI, en el municipio se registran 204 eventos relacionados con procesos de remoción en masa. Algunos de estos se encuentran vinculados a carreteras, principalmente por cortes inadecuados de taludes.

Año	Registros	Área (ha)
2004	5	11.63
2006	1	0.56
2008	2	1.66
2009	7	9.02
2010	10	7.72
2011	57	102.97
2012	29	67.88
2013	13	12.89
2014	21	18.98
2019	14	24.21
2020	45	33.01
Total	204	290.57

Tabla 27 Inventario de PRM

Fuente: Elaboración propia

El año con mayor registro de procesos de remoción en masa, es el 2011 con el 27.9% del total de los registros y los años con menor número de registros fueron 2006 y 2008. (Ver figura 26)

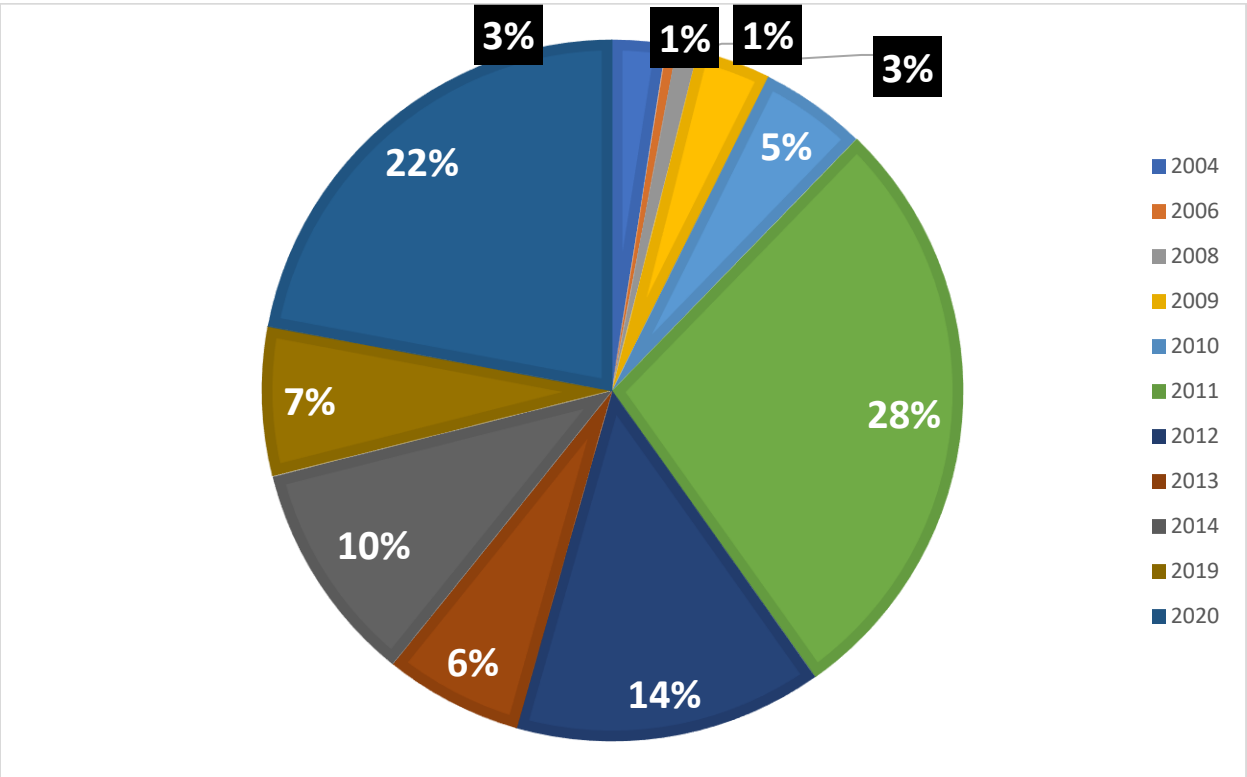


Figura 26 Registros de PRM

Fuente: Elaboración propia

Así mismo se puede observar en el siguiente gráfico, que la mayor parte de los PRM se han presentado en zonas con rocas de tipo sedimentaria, y solo el 19% corresponde a rocas ígneas.

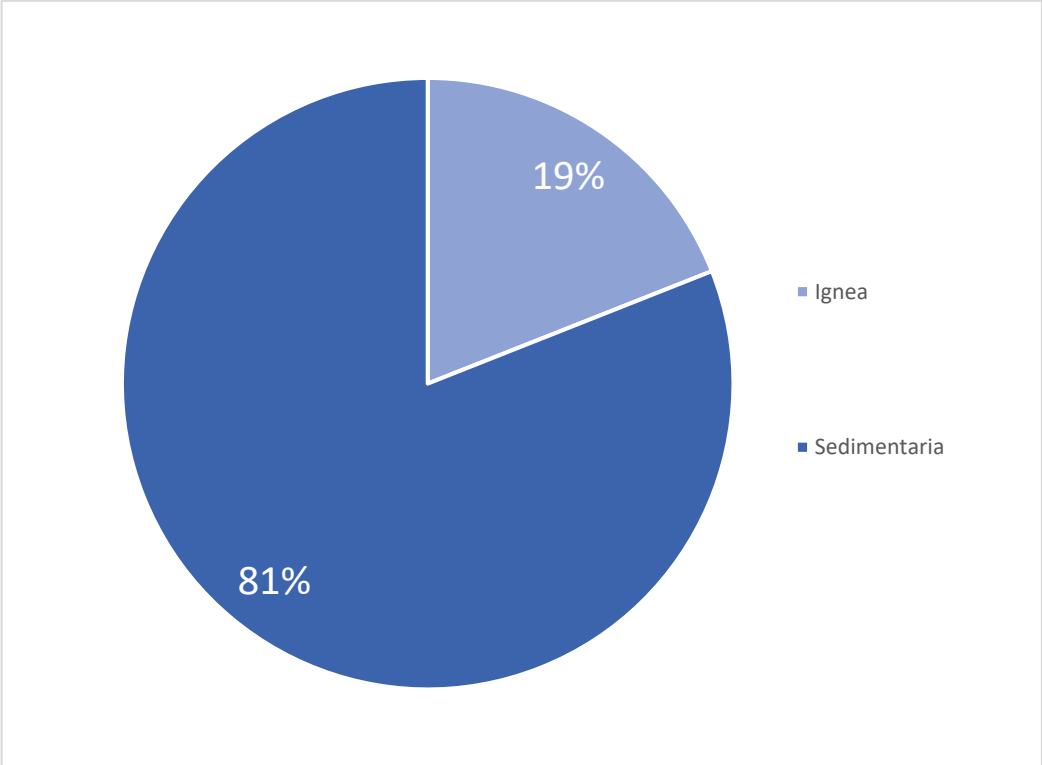


Figura 27 Tipo de roca afectada por los PRM

Fuente: Elaboración propia

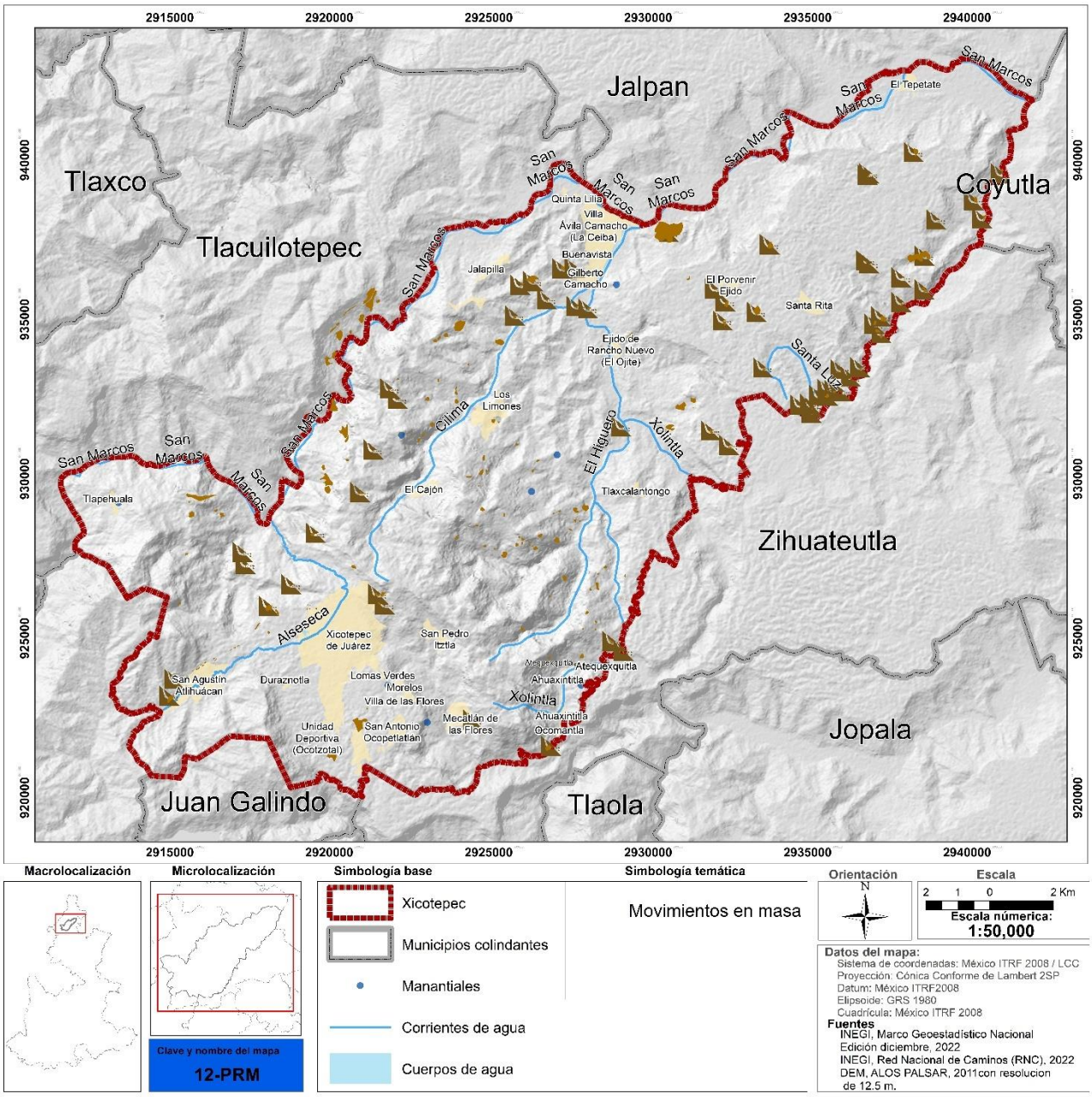


Figura 28 PRM identificados en el municipio de Xicotepec

Fuente: Elaboración propia

5.2. Mapa de susceptibilidad

Considerando la información obtenida, que corresponde a los factores condicionantes, se elaboró el mapa de susceptibilidad a PRM, considerando los factores que indica la metodología de Mora-Varhson. En la siguiente tabla se observan los valores obtenidos para cada factor y su porcentaje del área municipal.

Factor	Valor de asignado							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Litología			64.6%	4.1%	31.3%			100%
Pendiente	3%	6%	16%	21%	44%	9%	1%	100%
Uso de suelo	0.20%	2.20%	10.30%	64.70%	21.60%			100%
Sismicidad				77.50%	22.50%			100%
Precipitación					1.60%	70.40%	28%	100%

Tabla 28 Resultados de susceptibilidad

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede observar que en el caso de los datos de “precipitación” se enfocan en los valores de susceptibilidad más altos, debido a los rangos de precipitación altos en el municipio.

Considerando los valores obtenidos para cada factor de susceptibilidad se elaboró un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masas para el municipio de Xicotepec (Figura 30)

En la tabla 28 Se muestra la distribución de área de acuerdo con la clasificación potencial de susceptibilidad a PRM en el municipio de estudio.

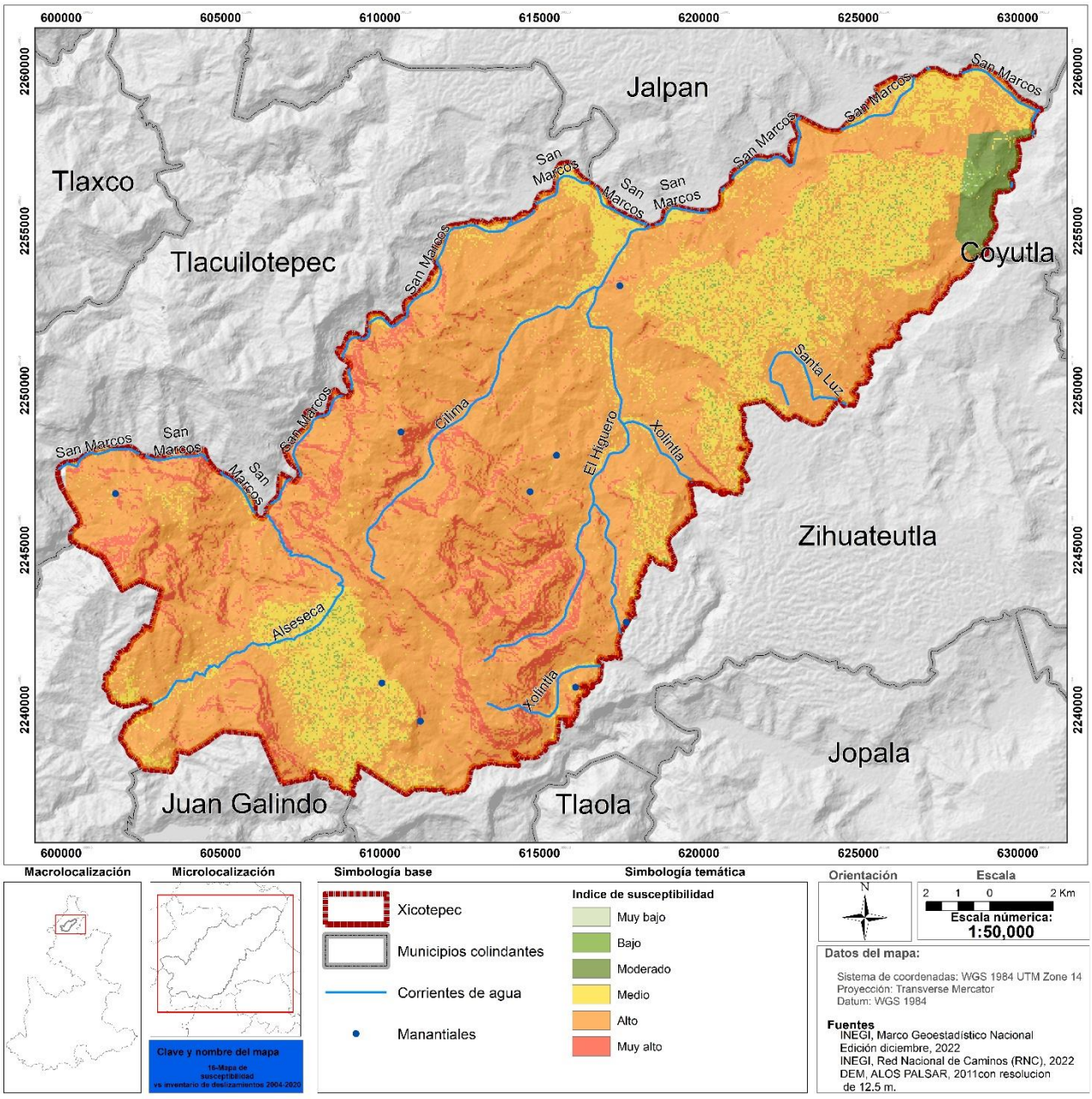


Figura 29 Mapa de susceptibilidad

Fuente: Elaboración propia

Índice de susceptibilidad a PRM	Clasificación	Potencial a PRM	Porcentaje
0-6	I	Muy bajo	0.02%
7-32	II	Bajo	1.48%
33-162	III	Moderado	1.34%
163-512	IV	Mediano	17.84%
513-1250	V	Alto	70.74%
>1250	VI	Muy alto	8.58%

Tabla 29 Índice de susceptibilidad a PRM

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se puede observar que los rangos principales corresponden a valores medios y altos, el rango con mayor influencia en el municipio corresponde a alto potencial con el 70.74%, en segundo rango de importancia tenemos al valor mediano con 17.84% de importancia, mientras que las zonas de menor rango representan un valor menor a 2%.

Lo anterior se puede asociar a lo establecido por CENAPRED (2020), en el cual se indica que las zonas con efectos más probables para el municipio se asocian a:

1. Caminos, carreteras, puentes
2. Viviendas
3. Daños a infraestructura

5.3. Inventario de PRM de 2004-2020 en comparativa con el modelo de susceptibilidad

Del mismo modo, se realizó una comparación entre el modelo obtenido y el inventario de PRM obtenido, de los años 2004-2020. Esto para validar que la clasificación obtenida tenga relevancia en zonas previamente afectadas y zonas a futuro. Donde se puede observar que los eventos ocurridos en los años 2004- 2020 se mantienen en los niveles de susceptibilidad previamente identificados: muy bajo, bajo, moderado, medio, alto, y muy alto.

Así mismo se observa que las corrientes de agua (ríos) podrían ser particularmente sensibles a fenómenos como desbordamientos o erosión, también los manantiales están identificados mediante puntos azules, lo que resalta la importancia hídrica de esta región. Es importante considerar que estos podrían estar en riesgo debido a fenómenos asociados con la alta susceptibilidad del terreno,

Finalmente se observa que los PRM ocurridos se encuentran cerca de algunas localidades e inclusive a la cabecera municipal, lo cual incrementa la vulnerabilidad de la población, daños a la infraestructura y servicios.

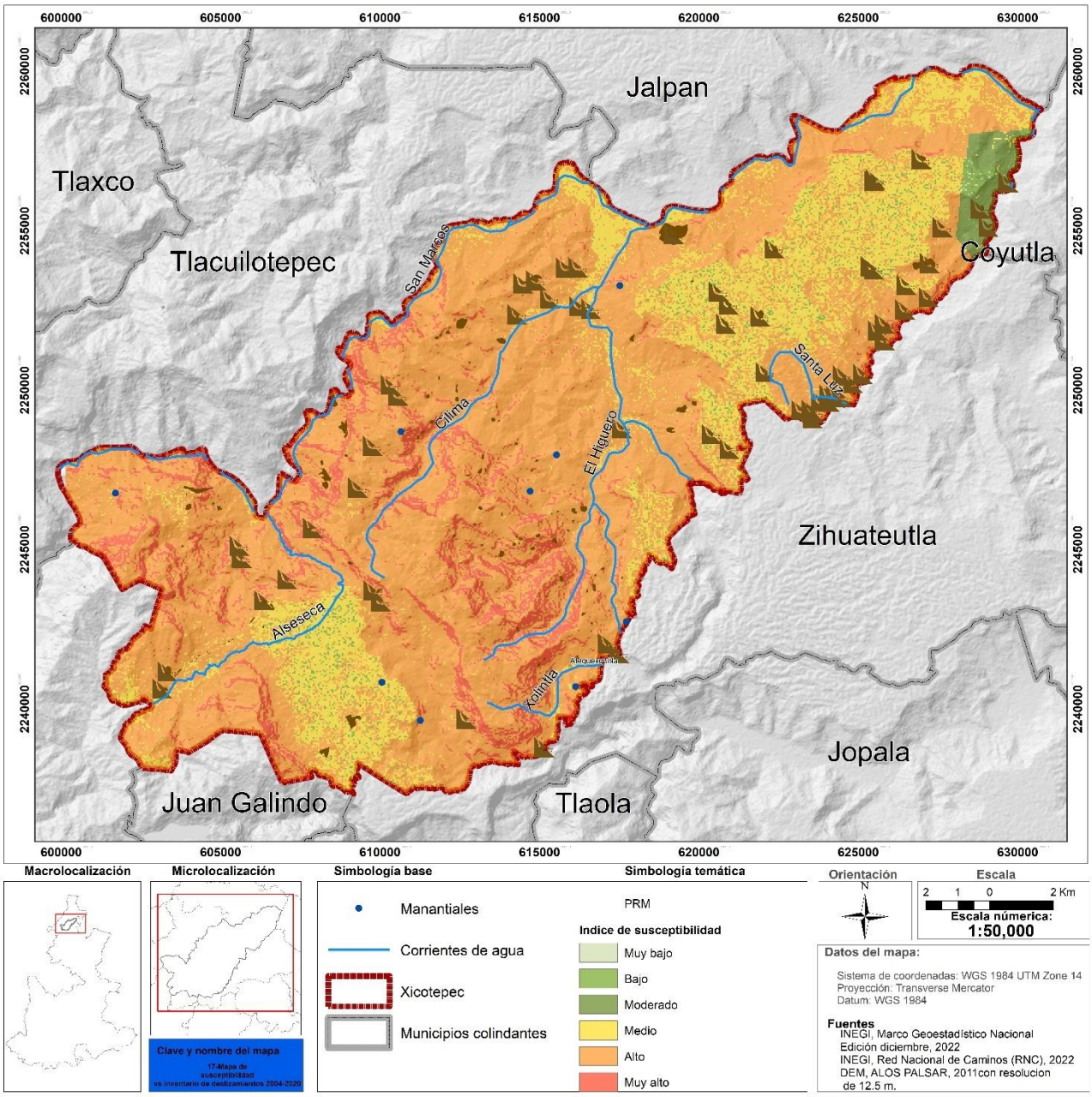


Figura 30 Inventario de PRM de 2004-2020 en comparativa con el modelo de susceptibilidad

Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Modelo de calibración

Un modelo de calibración es un procedimiento estadístico que se ajusta a los parámetros de un modelo de predicción, en este caso, se usarán los datos obtenidos con el inventario de PRM, y los obtenidos a través del mapa de susceptibilidad, con el objetivo de mejorar la precisión del modelo, y validar que sea un modelo funcional. En este caso, se utilizó un modelo de calibración de regresión logística, el cual, permite verificar, ajustar y validar que los valores de susceptibilidad a PRM, en verdad correspondan a la ocurrencia real. La regresión logística proporciona métricas de validación objetivas, como la curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) y el AUC (*Área Bajo la Curva*), que permiten cuantificar la capacidad del modelo para discriminar correctamente entre zonas con y sin eventos de remoción. Para la obtención de dicho modelo se realizó lo siguiente:

- Además de los 204 registros de PRM obtenidos en el inventario, se anexaron 296 puntos, para tener un total de 500 datos, a los cuales, se asignó un valor de susceptibilidad entre 0 (ausencia) y 1(presencia).
- Se entrenó una regresión logística con: variable independiente: susceptibilidad y variable dependiente: presencia
- Se determinó TP (True Positives), FP (False Positives), TN (True Negatives), FN (False Negatives): Métricas para evaluar cuántas veces el modelo acertó o falló al clasificar, para obtener TPR, que se obtiene de la siguiente manera: $TPR = \frac{TP}{TP+FN}$
- **Se calculo FPR (False Positive Rate)**: Proporción de ausencias reales que el modelo clasificó incorrectamente como presencia, de la siguiente manera: $FPR = \frac{FP}{(FP+TN)}$
- Se obtuvo **Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*)** y **AUC (*Área Bajo la Curva*)** que permiten cuantificar la capacidad del modelo para discriminar correctamente entre zonas

con y sin eventos de remoción. Estos indicadores no solo permiten evaluar el desempeño del modelo, sino también compararlo con otras metodologías.

- AUC mide la **capacidad del modelo para distinguir** entre casos positivos (donde ocurrió un proceso de remoción en masa) y negativos (donde no ocurrió). Los valores típicos se interpretan así:

AUC	Interpretación
0.90-1.00	Excelente
0.80-0.89	Buena
0.70-0.79	Aceptable
0.60-0.69	Débil
0.50-0.59	Muy Pobre
≤ 0.50	No Funcional

Tabla 30 Valores de AUC

Fuente: Hosmer et al., 2013

- Resultados:

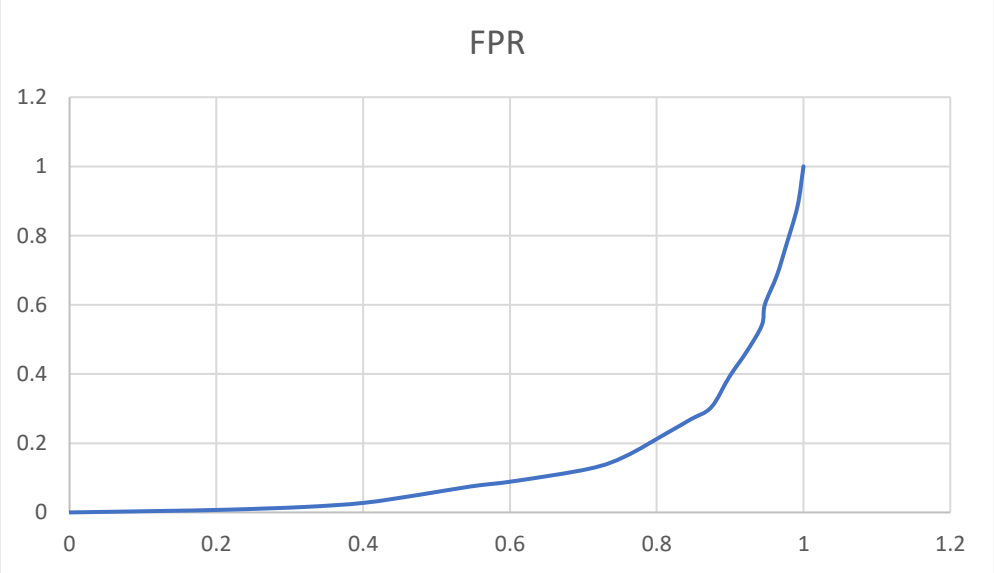


Figura 31 FPR (False Positive Rate) del modelo

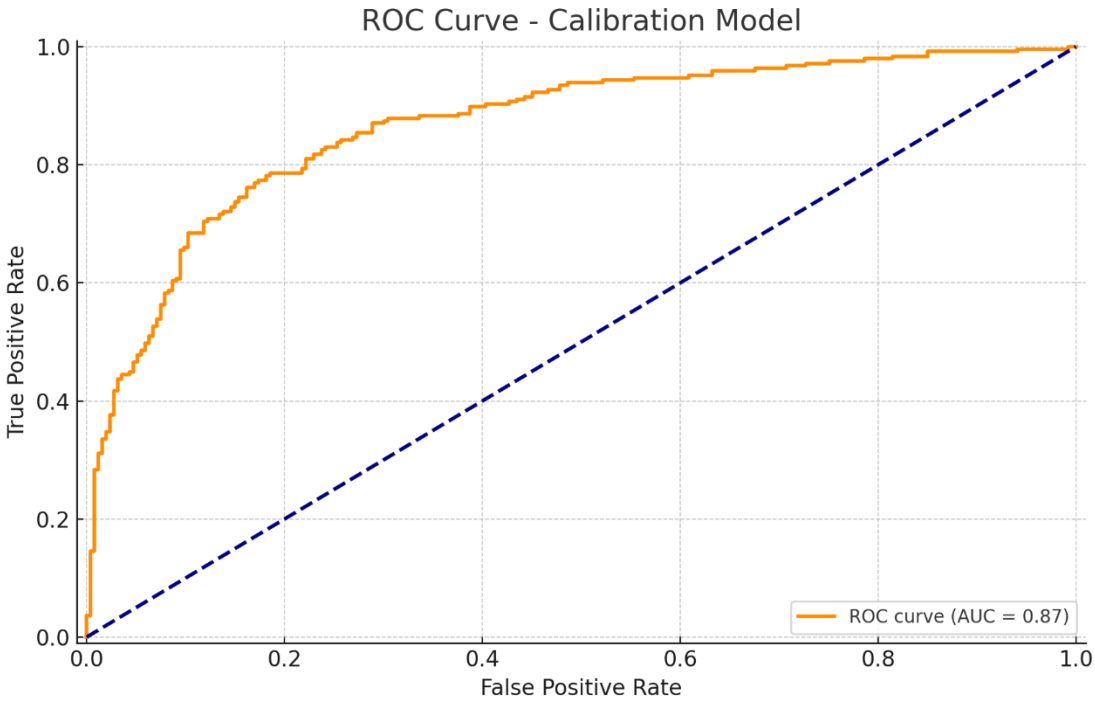


Figura 32 Curva ROC del modelo calibrado

La curva ROC del modelo calibrado, compara la tasa de verdaderos positivos (TPR) con la tasa de falsos positivos (FPR) para diferentes umbrales de decisión:

- La curva está por encima de la línea diagonal aleatoria (línea punteada), lo que confirma que el modelo tiene buen rendimiento, es decir, el modelo logra una **alta tasa de verdaderos positivos con una baja tasa de falsos positivos**, lo cual es deseable.
- Un área bajo la curva (AUC) de aproximadamente **0.86** indica una **alta capacidad discriminativa,** es decir, con alta capacidad para distinguir entre clases positivas y negativas.

5.4. El mapa nacional de susceptibilidad en comparativa con el modelo de susceptibilidad obtenido

Para validar el modelo obtenido, se comparó con el Mapa Nacional de Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas elaborado por CENAPRED en 2024. Este mapa clasifica la susceptibilidad en cinco categorías:

- Muy baja
- Baja
- Media
- Alta
- Muy alta

Los resultados muestran una coincidencia en las áreas de alto y muy alto riesgo, reforzando la validez del modelo municipal. Las zonas de mayor susceptibilidad están claramente definidas en ambos estudios, lo que respalda la precisión del análisis local.

Derivado de lo anterior, se procedió a realizar un análisis comparativo entre ambos modelos, lo cual permitirá validar de otra forma el modelo propuesto, resaltando que las escalas de trabajo son totalmente diferentes.

Se observa en la clasificación de CENAPRED, el índice de susceptibilidad, con áreas claramente definidas en cinco niveles: Muy bajo (verde claro), Medio (amarillo), Alto (naranja), y Muy alto (rojo). Estas categorías están claramente distribuidas a lo largo del municipio.

Para este caso, los análisis de susceptibilidad a nivel municipal se llevaron a cabo por CENAPRED a partir del cruce de información de polígonos de Alta y Muy Alta propensión a PRM (mayores a 0.25 km2), del Mapa Nacional de Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas (2015), con la Cartografía Geoestadística Urbana Rural Amanzanada, del Inventario Nacional de Viviendas

2016, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); de tal manera que el nivel de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas de cada municipio cumple con este requisito. Como resultado de este proceso, se concluyó que 1 765 municipios de un total de 2 465 que componen el territorio nacional tienen asentamientos humanos en zonas de alta y muy alta propensión a PRM.

Se obtuvo lo siguiente para el municipio:

Susceptibilidad	Área Km²	Porcentaje %
Muy baja	86.28	27.84%
Baja	6.14	1.98%
Media	48.01	15.49%
Alta	147.81	47.7%
Muy Alta	21.67	6.99%

Tabla 31 Área y porcentaje del municipio que ocupa cada categoría del mapa nacional de susceptibilidad a la inestabilidad de laderas

Fuente: Obtenida de Mapa Nacional de susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas, disponible en http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/

Los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad se presentan en la Tabla 28, indican:

- **Muy bajo (0.02%)** y **Bajo (1.48%)**: Estas categorías representan un porcentaje mínimo del territorio, indicando que la mayoría del municipio no presenta condiciones de baja susceptibilidad.
- **Moderado (1.34%) y Mediano (17.84%)**: Aunque son valores significativos, siguen siendo menores en comparación con las categorías de alto y muy alto riesgo.

- **Alto (70.74%) y Muy alto (8.58%)**: Estas categorías representan la mayor parte del municipio, lo que indica una situación de riesgo elevado.

Estos resultados muestran una clara tendencia a la alta susceptibilidad, con más del 79% del territorio municipal en los rangos de mayor riesgo.

Mientras que en la tabla 29 se encuentra lo siguiente:

- **Muy baja (27.84%)**: Representa una proporción significativa del municipio, concentrada en zonas menos susceptibles, como el norte del territorio.
- **Alta (47.7%) y Muy alta (6.99%)**: Estas categorías juntas abarcan el 54.69% del área total, destacando que la mayoría del municipio se encuentra en un riesgo elevado.

Comparativamente, las categorías de riesgo alto y muy alto en este modelo son coherentes con las áreas identificadas en la Tabla 28, lo que valida la consistencia de ambos estudios.

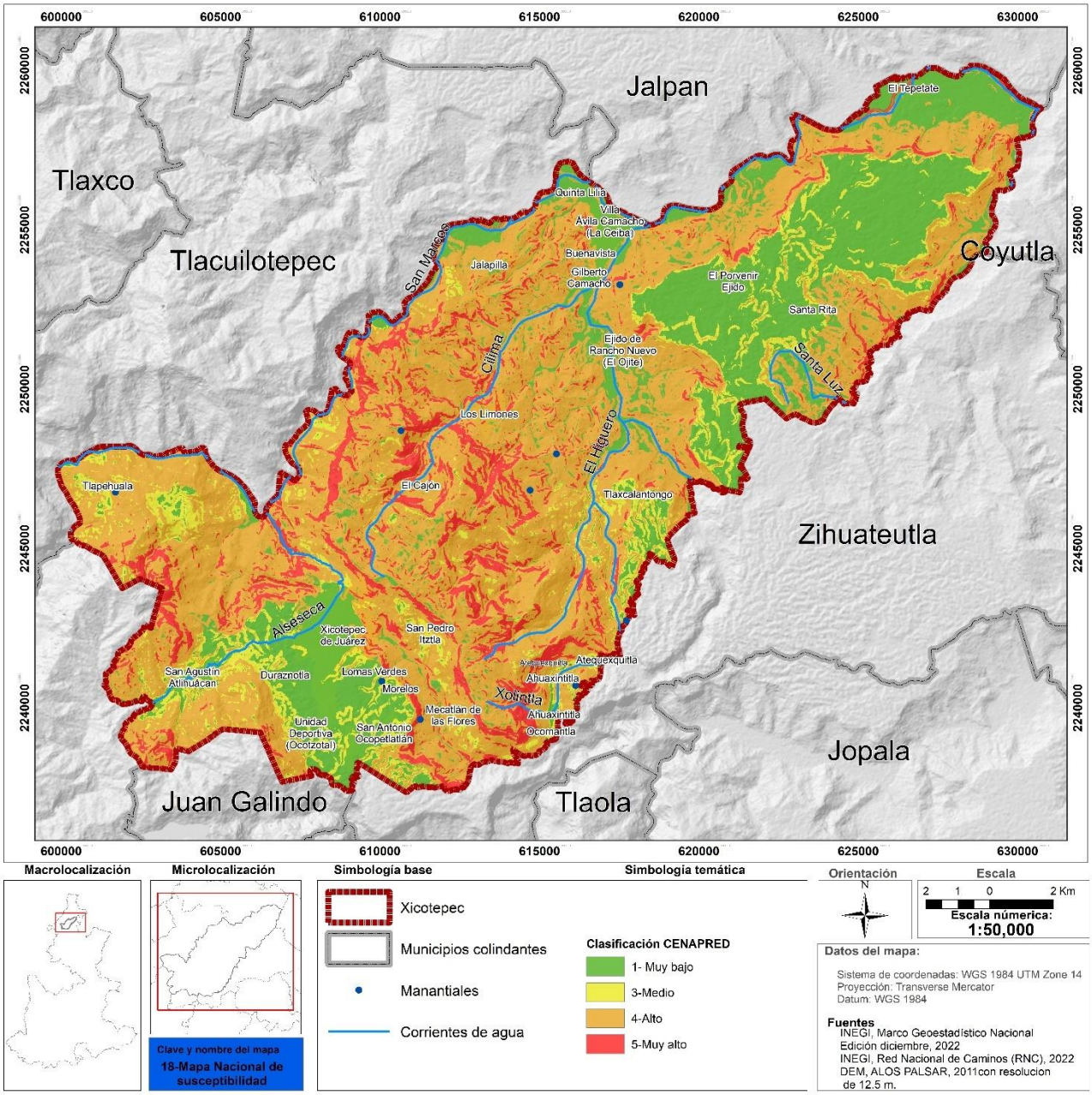


Figura 33 Susceptibilidad de laderas CENAPRED 2024

Fuente: Elaboración propia y con datos de CENAPRED 2024, Mapa nacional de susceptibilidad de laderas

6. Conclusiones

El análisis de inventario de PRM en el municipio de Xicotepec, basado en información de CENAPRED e INEGI, evidencia la presencia significativa de procesos de remoción en masa, con un total de 204 registros entre los años 2004 y 2020. El año 2011 presentó el mayor número de PRM (27.9% del total), lo que sugiere la posible influencia de factores climáticos y geológicos específicos durante ese periodo. Además, se identificó que la mayor parte de estos eventos ocurrieron en terrenos compuestos por rocas sedimentarias, con solo un 19% afectando rocas ígneas.

Las corrientes de agua y manantiales del municipio sugieren una posible relación entre la susceptibilidad y las condiciones hidrogeológicas. Además, que las áreas cercanas a las corrientes de agua podrían estar más expuestas a PRM de tierra o erosión.

El mapa de susceptibilidad elaborado con base en la metodología de Mora-Varhson confirma que el 70.74% del territorio municipal presenta un alto potencial de PRM, mientras que un 17.84% se encuentra en la categoría de susceptibilidad media. Este patrón de distribución concuerda con las condiciones geológicas, topográficas y climáticas del municipio, donde la pendiente y la precipitación juegan un papel clave en la estabilidad del suelo. Además, la infraestructura vial y urbana está en riesgo, con caminos, viviendas y servicios públicos potencialmente afectados.

Para validar y reforzar la precisión del modelo, se implementó un modelo de calibración mediante regresión logística, utilizando 500 puntos de datos (204 con PRM conocidos y 296 adicionales para control). Esta calibración permitió contrastar los valores de susceptibilidad con la presencia real de eventos, usando métricas objetivas como la curva ROC y el AUC (Área Bajo la Curva), logrando determinar la capacidad del modelo para distinguir adecuadamente entre zonas con y sin eventos.

Los resultados del AUC de 0.86 situaron el modelo dentro del rango de buena a excelente capacidad predictiva, lo cual confirma que los valores asignados de susceptibilidad tienen correlación con la realidad observada en campo y en los inventarios históricos. La coincidencia con el mapa nacional de CENAPRED reafirma la utilidad del modelo para la planificación del uso de suelo, prevención de desastres y diseño de estrategias de mitigación en zonas vulnerables

La comparación entre el modelo de susceptibilidad obtenido y el inventario de PRM entre 2004 y 2020 valida la confiabilidad del modelo, ya que los eventos pasados coinciden con las zonas de mayor susceptibilidad identificadas. Asimismo, se destaca la vulnerabilidad de cuerpos de agua, como ríos y manantiales, que podrían estar sujetos a procesos erosivos y desbordamientos derivados de la inestabilidad del terreno.

Finalmente, al comparar el modelo municipal con el Mapa Nacional de Susceptibilidad a la Inestabilidad de Laderas de CENAPRED 2024, se observa una correlación significativa en la distribución espacial de las categorías de riesgo. Aproximadamente el 47.7% del municipio se encuentra en la clasificación de alta susceptibilidad, mientras que un 6.99% está en la categoría de muy alta susceptibilidad. Esto refuerza la importancia de implementar medidas preventivas y de mitigación en las áreas más propensas a PRM, priorizando el monitoreo de zonas habitadas y la planificación adecuada de infraestructura en regiones de alto riesgo.

En conclusión, el municipio de Xicotepec presenta una alta susceptibilidad a PRM, con impactos potenciales sobre la infraestructura y la población. La identificación y el monitoreo continuo de áreas de riesgo, así como la implementación de estrategias de gestión del riesgo, resultan esenciales para reducir los efectos adversos de estos fenómenos.

Este trabajo sirve como base a insumos de trabajo posteriores que se enfoquen al peligro. Además de resaltar la necesidad de una coordinación regional para gestionar los riesgos ambientales

con los municipios aledaños, así como para la planeación urbana, el manejo de desastres naturales, la construcción de infraestructura y la conservación ambiental. Siendo clave para priorizar acciones de prevención en las zonas más vulnerables y áreas urbanizadas o densamente pobladas las cuales deben considerarse prioritarias para estrategias de mitigación.

7. Recomendaciones

- En zonas susceptibles a PRM de mediano a alto impacto, es necesario realizar acciones que permitan prevenir y concientizar a la población para disminuir las actividades que favorecen la susceptibilidad de laderas.
- Realizar una identificación en sitio de zonas con hundimientos y agrietamientos en el municipio.
- Mejorar las acciones de restauración forestal, en las zonas de mediana y alta susceptibilidad.
- Asignar planes de acción para la evacuación ante altas precipitaciones.
- Difundir y concientizar a la población de las actividades que aumentan la susceptibilidad de laderas, como la deforestación, así como actividades que favorecen su estabilidad.
- Vigilar las zonas susceptibles a PRM en épocas de lluvia.
- Focalizar los recursos para atender de manera inmediata zonas que manifiesten síntomas de inestabilidad.
- Realizar estudios en sitio que identifiquen las áreas con mayor susceptibilidad a PRM, incluyendo caminos, ríos y asentamientos.
- Implementar sistemas de canalización y drenaje en áreas de pendiente para reducir la acumulación de agua en el suelo, minimizando la saturación que contribuye al colapso.
- En pendientes críticas, utilizar tuberías de drenaje subterráneo para evacuar el agua subterránea y disminuir la presión en los taludes.

- Después de eventos de lluvias intensas, realizar evaluaciones para detectar daños en infraestructuras y riesgos adicionales, así como establecer rutas de evacuación claras y zonas seguras en caso de emergencia. Estas rutas deben mantenerse libres y señalizadas.
- Estas estrategias, combinadas con el uso de tecnologías de monitoreo y una planificación territorial adecuada, ayudarán a mitigar los riesgos en zonas de alto impacto por remoción en masa.

Bibliografía

Alcantara Ayala , I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Investigaciones geográficas(41). Retrieved Marzo de 2023, from https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n41/n41a2.pdf

Alva, M., y León, A. (2014). Diseño e implementación de un catálogo de objetos geográficos para la cobertura de la tierra usando leyenda Corine Land Cover, para el departamento de Anash. *Memorias VI Simposio internacional Selper 2014*, 1-8.

Aristizábal, E., y Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. *Dyna, 73*(149), 5-16. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614902

ASE. (2024). Auditoria Superior de la Federacion: https://www.auditoriapuebla.gob.mx/

ASE, A. S. (2022). *Auditoria Superior del Estado (ASE)*. https://www.auditoriapuebla.gob.mx/sujetos-de-revision-2/cuentas-publicas/ayuntamientos/item/xicotepec

Beraud Macias, V. (2018). 84 años de políticas de uso del suelo en México: reflexiones para la conservación de la biodiversidad. *Nova scientia, 10*(20), 592-629. https://doi.org/https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1177.

Brabb, E., y Harrods, B. (1989). Landslides. Extend and Economic Significance. Balkema, Rotterdam.

Brunsden, D. (1979). Mass movements. En *Progress in Geomorphology* (pp. 130-186).

Burrough, P. (1998). Principles of geographic information systems for land resources assessment. (Oxford, Ed.)

Campa Uranga, M. (1985). The Mexican thrust belt. Tectonostratigraphic terranes of the circum-Pacific region,. En *Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston, Texas: Earth Science* (pp. 299-313). Howell, D.G.

Carrarra , A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reinchenbach, P., y Otros. (1995). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards. *Kluwer Academic Publishers*, 135-175.

Carter, J. (1989). On defining the geographic information system. En *Fundamentals of geographic information systems: a compendium.* W.J. Ripple.

CEiGEP, C. E. (2023). *CEiGEP*. http://ceigep.puebla.gob.mx/informacion_basica_municipio.php

CENAPRED. (2001). *Programa Especial de Prevención y Mitigación del Riesgo de Desastres.* Secretaría de Gobernación.

CENAPRED. (2008). *Inestabilidad de laderas.* Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. https://www.gob.mx/cenapred/articulos/vulnerabilidad-o-susceptibilidad-a-la-inestabilidad-de-laderas

CENAPRED. (2020). http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/

CENAPRED. (2024). *Atlas Nacional de Riesgos.* Retrieved 2024, from http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?&NOM_ENT

CONABIO, C. N. (2011). *Biodiversidad en Puebla.* Gobierno del Estado de Puebla, Benemerita Universidad Autónoma de Puebla.

CONAGUA. (2024). *Actualizacion de la disponibilidad media anual de agua en el acuifero Poza Rica (3001), Estado de Veracruz.* CONAGUA.

CONAPO. (09 de Mayo de 2024). *Consejo Nacional de Población*. (C. N. Población, Editor, y C. N. Población, Productor) Retrieved 01 de Agosto de 2024, from

https://www.gob.mx/conapo/documentos/reconstruccion-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-1990-2040

CONAPO. (09 de Mayo de 2024). *Reconstrucción y proyecciones de la población de los municipios de México 1990-2040*. https://www.gob.mx/conapo/documentos/reconstruccion-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-1990-2040

Coraminas, J. (2006). El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Revista C&G, 89*(113), 20(3-4). http://tierra.rediris.es/CuaternarioyGeomorfologia/images/vol20_3_4/Corominas.pdf

Cruden, D. M., y Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. Washington D.C.: Turner, A. K. y R. L.

Deuker, K., y Kjerne, D. (1989). “Multipurpose Cadastre Terms and Definitions. En *Proceedings of the American Society for Photography and Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping* (p. 12).

DOF, D. (2012). Ley General de Protección Civil. Ciudad de México, Estados Unidos Mexicanos: Última Reforma DOF 21-12-2023.

EPOCH. (1993). Temporal occurrence and forescasting of landslides In the European Communiiy Flageollet. J.C.

Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletin de la Sociedad Geologica Mexicana, LIII*, 84-92. http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca03/5301/ferrari.pdf

FONDEN. (2023). Fideicomiso Fondo de Desastres Naturales.

FONDEN. (2023). *Fideicomiso Fondo de Desastres Naturales (Fonden)*. (F. d. Naturales, Editor) https://www.gob.mx/segob/documentos/fideicomiso-fondo-de-desastres-naturales-fonden

Highland, L., y Bobroswky, P. (2008). *The landslide handbook—A guide to understanding landslides* (1325 ed.). Reston, Virginia, U.S.: Geological Survey Circular 1325.

Hosmer, D., Lemeshow, S., y Sturdivant, R. (2013). *Applied Logistic Regression. .*

Hutchinson, J. (1988). General report morphological and geotecnical parameters of landslides in relation to Geology. *Proceedings of the fith International Symposium on Landslides, I*, 3-35.

INECC. (2021). (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático., Editor) https://gaia.inegi.org.mx/sicc/resources/archivosPDF/10_2023_Sistema_Indicadores_PNCC_201023.pdf

INEGI. (2011). *INEGI*. https://www.inegi.org.mx

IPCC. (2007). *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* https://www.ipcc.ch/

López Ramos, E. (1979). *Geología de México.* Ciudad de México: Edicion Escolar.

Lugo-Hubp, J. (2001). Los conceptos geomorfológicos en la obra de Ezequiel Ordóñez (1867-1950). *Revista Mexicana de Ciencias Geológica, 18*(1), 89-102. Retrieved 2023, from https://www.redalyc.org/pdf/572/57218105.pdf

Mora, S., y Vahrson, W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulleting of the Association of Engineering and Geologist, 31*(1), 49-58.

Moreno Cuesta, E., y Otero Pastor, I. (2001). Caracterizacion del paisaje y su posible impacto ambiental a partir de la clasificacion de usos de suelo Corine Land Cover y la utilización de sistemas de información geográfica. *Informes de la construcción, 53*(476), 11-20.

Oporto Gallardo, R. (2006). Estudio de Fenómenos de Remoción en Masa. Sector Niebla-San Ignacio Comuna de Valdivia X° Región. Valdivia, Chile.

Ordoñez, E. (1941). Provincias Fisiograficas de México. *Rev. de Geografia de IPGH, 1*(2).

Penck, A. (1894). Morphologie der Erdobefflache. *2*, 471-696.

Secretaría de Planeación y Finanzas . (2024). *Portal de Planeación para el Desarrollo del Estado de Puebla*. https://planeader.puebla.gob.mx/regionalizacion

SEDATU. (2014). *Aspectos Susceptibles de Mejoras del Programa Prevención de Asentamientos Humanos.* Secretaría de Desarrollo Urbano Agrario y Ordenamiento Territorial.

SGM, S. (15 de enero de 2017). *Servicio Geologico Mexicano*. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html

Sharpe , C. (1938). Landslides and related phenomena. (C. U. Press, Ed.)

SINA, S. (2023). *Sistema Nacional de Información del Agua*. https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/

SITEP. (2023). *Sistema de Información Territorial del Estado de Puebla*. (S. d. Territorial, Editor) https://dduia.puebla.gob.mx/SITEP/inicio.html

Smith, T., Menon, S., Star, J., y Otros. (1987). Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. *International Journal of Geographic Information Systems, 1*(1), 13-31.

SMN, S. M. (2023). *Reporte Anual del Clima en México .* Coordinación General del Servicio Meteorológico.

Soeters , R., y Van Westen , C. (1996). Slope Instability Recognition Analysis and Zonation. In: Turner K.T. and Schuster, R.L. *Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report*, 129-177.

Sosa N., L. (2016). Análisis de susceptibilidad a los peligros geológicos por movimientos en masa poblados de Pampamarca y Acobamba, región Huánuco. Puno, Perú: Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano. Facultad de ingeniería geológica y metalúrgica escuela profesional de ingeniería geológica. .

Suárez , J. (2009). Zonificación de Susceptibiliddad Amenza y Riesgo. En J. Suárez, *Deslizamientos:Analisis Geotecnico* (pp. 527-581).

Suárez, J. (2008). *Deslizamientos. Análisis Geotécnico.* (Vol. 1).

USGS, U. (2004). *Landslide Types and Processes.* https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf

Van Zuidam, R. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. 442. Retrieved Abril de 2023.

Vargas , R. (2002). *Evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos Municipio de La Celia, Departamento de Risaralda.* Pereira, Colombia. https://www.carder.gov.co/intradocuments/webDownload/susceptibilidad-a-deslizamientos-la-celia

Varnes, D. (1958). *Landslides types and processes.* Landslides and Enginnering Practice.

Varnes, D. (1978). Slope movements, types and processes. *Landslides: Analysis and control, transportation research board*, 11-33.

Ward, W. (1990). The stability method for reporting a landslide. *Bulletin of the international Association of Engineering Geology, 41*, 5-12.