



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

“ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y RIESGO POR PROCESOS DE
REMOCIÓN EN MASA EN CARRETERAS DEL PROYECTO GEOPARQUE
COMARCA MINERA HIDALGO Y DEL MUNICIPIO DE PACHUCA DE SOTO”

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ANGEL JAHUDIEL CERVANTES PINA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN CARLOS MORA CHAPARRO

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

CIUDAD UNIVERSITARIA CD. DE MÉXICO, AGOSTO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



U N A M - Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DEDERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el contenido en esta tesis esra protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de video, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y debera citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi padre celestial por darme fortaleza y sabiduría para concluir un logro mas en mi carrera profesional, por ayúdame a superarme y por bendecir a mi hermosa familia.

A mi familia por su apoyo incondicional, Rosi, Chava, Mari, Mago, Eri, Laura, a mis cuñados y en especial a mi mamá que tanto amo. Siempre estas en mi corazón mama.

A mi director y tutor de tesis el Dr. Juan Carlos Mora Chaparro por la oportunidad de trabajar a su lado, por su conocimientos, paciencia y apoyo para realizar este trabajo de investigación.

A mis amigos de la maestría que siempre me han apoyado, a Daniel, Royer, Mildred, Rodrigo y Cesar, gracias por ser verdaderas personas con espíritu y humildad.

A las grandes personas que colaboran en el Geoparque, a Erika, Veni, Alondra y Miguel.

A la UNAM por y al Posgrado de Ciencias de la Tierra por ser la institución que a través del equipo técnico y los profesores son una gran casa de estudios.

Gracias a mi hermosa Mari que tanto amo, por el apoyo en este trabajo y por la fuerza, coraje y garra para concluir.

Papá esto es para ti.

“Haz de tu vida un sueño, y de tu sueño una realidad”

Antonie de Saint

Resumen:

Las vialidades de la región del Proyecto Geoparque Comarca Minera, Hidalgo son afectadas por diferentes mecanismos de procesos de remoción en masa, los cuales se relacionan con la inestabilidad del terreno; año con año dichos movimientos cierran parcialmente, bloquean y destruyen las carreteras que conectan a las diferentes regiones; esta problemática dio origen a la presente investigación, en la cual se analizó la susceptibilidad regional, con la finalidad de utilizarla de base en el desarrollo del mapa de riesgo de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto perteneciente a dicho proyecto, esto se realizó a través de la implementación de sistemas de información geográfica y verificación en campo.

El análisis se llevó a cabo en dos etapas y varias escalas geográficas, primero se elaboró un mapa de susceptibilidad regional, utilizando el método de información ponderada, el cual se basa en la estadística de correlación de los procesos de remoción en masa y las clases de los factores que propician la inestabilidad. Posteriormente se analizó la relación que existe entre la susceptibilidad (muy baja, baja, media, alta o muy alta) y la infraestructura vial de carácter federal y estatal. Por último se realizó trabajo de campo, en el cual se implementó un formato evaluador que abarcó desde las condiciones geológicas en los taludes hasta el estado de las obras de prevención y el flujo vehicular que transita en las carreteras. La evaluación realizada en diferentes puntos de verificación delimitó zonas con peligro bajo, medio y alto dentro del municipio, utilizando de base la susceptibilidad obtenida de manera regional.

Los resultados de este estudio han demostrado los diferentes niveles de susceptibilidad regional en cuanto a su infraestructura vial, en la cual se tiene el 56.36% en susceptibilidad muy baja, 23.62% en susceptibilidad baja, 9.11% en susceptibilidad media, 10.05% en susceptibilidad alta y 0.86% en susceptibilidad muy alta; mientras que en el mapa de riesgo del municipio de Pachuca de Soto se muestran 76.85 km de carreteras estatales en peligro bajo, 7.40 km en peligro medio y 15.63 km en peligro alto. En carreteras federales se determinó que 1.69 km se encuentran en peligro alto por inestabilidad de laderas. La metodología utilizada en esta investigación permitió identificar de manera secuencial, analítica y descriptiva los tramos en peligro por procesos de remoción en masa que presentan cortes de talud, así como su vulnerabilidad física asociada. Esta investigación es en sí una importante herramienta para la toma de decisiones en materia de protección civil y gestión del riesgo.

Abstract:

The roads in the region of Geoparque Comarca Minera, Hidalgo Project are affected by different mechanisms of mass removal processes, which are related to the instability of the terrain; year by year, these movements partially close, block and destroy the roads that connect the different regions; this problem gave origin to the present investigation, in which the regional susceptibility was analyzed, with the purpose of using it as a base in the development of the risk map of the communication roads of Pachuca de Soto city, belonging to this project. Made through the implementation of geographic information systems and field verification.

The analysis was carried out in two stages and different geographic scales, first a regional susceptibility map was elaborated, using the weighted information method, which is based on the correlation statistics of mass removal processes and classes of the factors that lead to instability. Subsequently, the relationship between susceptibility (very low, low, medium, high or very high) and the freeways and interstate roads infrastructure were analyzed. Finally, fieldwork was carried out, in which an evaluation format was implemented, ranging from the geological conditions in the slopes to the state of the prevention works and the traffic flowing on the roads. The evaluation carried out at different checkpoints delimited areas with low, medium and high danger within the city, based on the susceptibility obtained in a regional way.

The results of this study have demonstrated the different levels of regional susceptibility in terms of road infrastructure, which had 56.36% in very low susceptibility, 23.62% in low susceptibility, 9.11% in average susceptibility, 10.05% in susceptibility high and 0.86% in very high susceptibility; while the risk map of Pachuca de Soto city shows 76.85 km of state highways in low danger, 7.40 km in medium danger and 15.63 km in high danger. On freeways roads, it was determined that 1.69 km are in high danger due to instability of slopes. The methodology used in this research allowed us to identify, in a sequential, analytical and descriptive way, the sections in danger by mass removal processes that present slope cuts, as well as their associated physical vulnerability. This research is in itself an important tool for decision-making in civil protection and risk management.

Índice

Capítulo I Introducción	8
1.1 Antecedentes	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Justificación	10
1.4 Área de estudio	11
1.4.1 Localización	11
1.4.2 Marco geomorfológico.....	12
1.4.3 Clima y vegetación.....	12
1.4.4 Uso de suelo	14
1.5 Marco Geológico	14
1.5.1 Estratigrafía general de la zona de estudio	16
1.6 ¿Qué es un Geoparque?.....	18
1.6.1 Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo	19
Capítulo II Marco teórico.....	20
2.1 Los procesos de remoción en masa.....	20
2.1.1 Factores que controlan los procesos de remoción en masa.....	26
2.1.1.1 Factores intrínsecos	27
2.1.1.2 Factores desencadenantes.....	30
2.2 El inventario de procesos de remoción en masa	31
2.3 Definición de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo	33
2.4 Métodos de análisis para la inestabilidad de laderas.....	35
2.4.1 Método estadístico bivariado.....	36
2.5 Comparación de las diferentes metodologías.....	40
2.6 Obras de mitigación ante procesos de remoción en masa	42

Capítulo III Materiales y método	46
3.1 Primera etapa	46
3.1.1 Inventario de procesos de remoción en masa	47
3.1.2 Información base	55
3.1.3 Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo.....	70
3.1.4 Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo.....	71
3.2 Segunda etapa.....	73
3.2.1 Mapa de peligro	73
3.2.2 Mapa de vulnerabilidad	85
3.2.3 Mapa de riesgo	86
Capítulo IV Resultados	86
4.1 El inventario de los procesos de remoción en masa del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo	86
4.2 Factores que controlan la susceptibilidad por procesos de remoción en masa del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo	86
4.3 Susceptibilidad por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo	92
4.4 Mapa de peligro por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.....	102
4.5 Mapa de vulnerabilidad de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto	103
4.6 Mapa de riesgo por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto	104
Capítulo V Discusión.....	106
Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones	108
Bibliografía.....	111
Anexos.....	117

Capítulo I Introducción

En los últimos años ha surgido un aumento en el interés científico internacional sobre los Procesos de Remoción en Masa (PRM) ya que a menudo estos fenómenos están atribuidos a otras causas naturales tales como sismos, lluvias torrenciales o actividad volcánica, dejando daños que ascienden a millones de dólares anualmente afectando principalmente a zonas urbanas y carreteras.

El conocimiento científico sobre el origen de los PRM y de sus impactos adversos, genera una conciencia en la sociedad sobre el riesgo que se adquiere al construir en terrenos susceptibles a este fenómeno, ejemplo de ello es el aumento de áreas urbanas en zonas de mayor susceptibilidad o de peligro sin una adecuada planeación, como poblados que se encuentran en regiones montañosas, lomeríos y cerca de las barrancas o cauces principales a lo largo de todo el territorio. Ante esto los gobiernos y comunidades tienen la necesidad de invertir en infraestructura vial y otros servicios para el desarrollo económico, lo cual origina deforestación, construcción de taludes y pavimentación, estos cambian el régimen hidráulico del terreno y las propiedades intrínsecas de las laderas, los cuales provocan que el terreno se altere y como resultado se tenga un mayor número de procesos de remoción. Por otro lado muchas de las laderas son potencialmente inestables, de manera que los PRM pueden iniciar con facilidad, esto se debe a diferentes factores tales como: los sistemas de debilidad como diaclasas, fallas y fracturas, a los que el terreno puede estar sujeto, lo que implica una inestabilidad latente; o bien la exposición a factores externos, tales como la erosión fluvial, la cual juega un papel importante en el desequilibrio del terreno. En este marco radica la importancia de fomentar una cultura acerca de la prevención y del uso de mapas de susceptibilidad y riesgo, los cuales constituyen herramientas que permiten a la población y a las autoridades competentes actuar de manera oportuna para prevenir desastres.

El resultado de esta investigación es una herramienta fundamental para la toma de decisiones por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), autoridades estatales y municipales; así como de información base para acciones en materia de protección civil y gestión del riesgo. El análisis del riesgo por PRM en las vías de comunicación a nivel municipal podría prevenir considerablemente costosos daños, destrucción y reconstrucción de diferentes tramos de carretera que se encuentran dentro del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo (PGCMH), por ello este trabajo muestra la propuesta metodológica aplicada al municipio de Pachuca de Soto.

1.1 Antecedentes

Durante los años 1970 a 2013 se tiene registro en el estado de Hidalgo de 122 eventos relacionados con la inestabilidad de las laderas, dichos registros se encuentran contenidos en la página de Desinventar (<http://www.desinventar.org/es/>). Los cuales exhiben los daños a las vías de comunicación; así como los bloqueos parciales o totales, dejando poblados incomunicados y damnificados, daños a viviendas dentro del PGCMH en los poblados de Metztlán, Mineral del monte, Pachuca de Soto, Huasca de Ocampo entre otros. Estas afectaciones fueron provocadas por lluvias prolongadas, tormentas tropicales y huracanes. El paso de fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Hidalgo detona diferentes mecanismos de movimiento como caída de rocas, derrumbes, deslizamientos y además provoca inundaciones que afectan directamente a la población. Los huracanes que han causado daños considerables en el estado son el huracán Paulina el 11 de octubre de 1997 con una precipitación de 320 mm / 24 hrs, Juliette el 30 de septiembre del 2001 con una precipitación de 261 mm / 24 hrs, Lorenzo el 28 de septiembre del 2007 con una precipitación de 326 mm / 24 hrs, la tormenta Barre el 22 de junio del 2013 con una precipitación de 250 mm / 24 hrs, Ingrid y Manuel en el 2013 con una precipitación de 412 mm / 24 hrs y recientemente la tormenta Earl en el 2016 con una precipitación de 265 mm / 24 hrs.

Existen numerosas causas naturales o antrópicas que determinan un incremento en el desencadenamiento de PRM, por ello en zonas cercanas al área de estudio se han realizado varias investigaciones y trabajos desde distintos puntos de vista geológicos: Hernández (2008) caracteriza el riesgo geológico en la porción oriental del Valle de Mezquital asociado a zonas de colapso y deslizamientos. Cruz (2009) investiga el riesgo por deslizamientos en el poblado de Metztlán relacionados a una falla activa. Priego (2011) realiza un estudio en las colonias Nueva Estrella, La Española, Santiago, Alcantarilla, Cerro del Cristo, Minerva, Guadalupe y El Arbolito de la ciudad de Pachuca de Soto en los cuales se determinó peligro por hundimiento y caída de rocas. Maruri (2012) presenta un estudio geotécnico de un colapso al NW de la ciudad de Pachuca de Soto, en el cual determina los factores implicados en este fenómeno. Arango *et al.*, (2007) estudian las zonas vulnerables por colapso mediante tomografía eléctrica en la ciudad de Pachuca de Soto. Silba (2006) analiza el riesgo por hundimientos en la ciudad de Pachuca de Soto en el que evalúa inmuebles con daños, relacionados con los procedimientos constructivos. La Secretaría de Desarrollo Agrario y Urbano (SEDATU) en el 2012 presenta la actualización del atlas de

riesgos naturales del municipio de Mineral de la Reforma, en el cual se identifican derrumbes, caída de rocas y bloques sueltos, estos están asociados a procesos de intemperismo, que por su ubicación ladera arriba se consideran como áreas de riesgo para las viviendas de las colonias Lomas de Chacón, Fraccionamiento Colinas de Plata, Ampliación Saucillo y Fraccionamiento Los Ángeles. SEDATU en el 2013 presenta el atlas de riesgos naturales del municipio de Pachuca el cual contempla la identificación de los peligros geológicos, hidrometeorológicos y antropogénicos que afectan a la población, este estudio demuestra que, el factor principal para la inestabilidad en la zona norte del municipio es la presencia de sistemas de debilidad como diaclasas, fracturas y fallas asociados al Grupo Pachuca, por otra parte las colonias de Cerro los Cubitos y la Nueva Estrella, entre otras se encuentra con un alto potencial de sufrir daños por caída de rocas y derrumbes.

1.2 Objetivos

El objetivo general es determinar la susceptibilidad regional por PRM del PGCMH para realizar el mapa de riesgo de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

Los objetivos particulares son:

- Analizar las diferentes metodologías para realizar mapas de susceptibilidad a PRM.
- Utilizar una metodología para realizar el mapa de susceptibilidad regional a PRM del PGCMH.
- Analizar la susceptibilidad regional por PRM de las vías de comunicación del PGCMH utilizando un SIG.
- Analizar la susceptibilidad local de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.
- Realizar el mapa de peligro, vulnerabilidad y riesgo del municipio de Pachuca de Soto.

1.3 Justificación

Una de las razones que motivan a la realización de esta investigación, se fundamenta en que no existe un estudio de susceptibilidad regional y riesgo por PRM en el PGCMH enfocado particularmente a las carreteras. Por otro lado, con la denominación de Geoparque por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), se vuelve necesario realizar este análisis en dicho territorio, ya que albergará turismo Nacional e Internacional y por tal motivo esta investigación puede dotar de herramientas básicas para la toma de decisiones por parte de la SCT, autoridades municipales y estatales para prevenir futuros desastres.

1.4 Área de estudio

El nombre del proyecto se debe a la región conocida como Comarca Minera de Hidalgo, donde hubo una gran actividad minera que consistía en la extracción de metales preciosos y metales base, la cual duró 500 años aproximadamente. Esta actividad minera dejó un legado en la cultura, gastronomía y tradiciones, por lo que estas actividades junto con el paisaje, la biodiversidad y la geología hacen de este territorio un lugar favorable para la creación de un Geoparque, que pretende incorporarse a la Red Global de Geoparques, la cual es una distinción otorgada por la UNESCO que tiene como objetivo la conservación, educación y desarrollo sustentable de una determinada región.

1.4.1 Localización

El PGCMH se localiza entre $19^{\circ}52'$ – $20^{\circ}27'$ de latitud norte y los $98^{\circ}21'$ – $98^{\circ}51'$ de longitud oeste (figura 1) con una extensión de $\sim 1910 \text{ km}^2$, que corresponde a nueve municipios del estado de Hidalgo (Epazoyucan, Huasca de Ocampo, Mineral de la Reforma, Mineral del Chico, Mineral del Monte, Omitlán de Juárez, Pachuca, Atotonilco el Grande y Singuilucan).



Figura 1. Municipios que conforman el PGCMH (Dossier, 2015).

El proyecto limita al norte con los municipios de Metztitlán, San Agustín Metztitlán, Huayacocotla, al este con los municipios de Acatlán, Tulancingo de Bravo, Santiago Tulantepec y Cuautepec de Hinojosa, al sur con los municipios de Tepeapulco, Tlanalpa y

Zempola, al oeste con los municipios de Actopan, El Arenal, San Agustín Tlaxiaca y Zapotlán de Juárez. El PGCMH cuenta con un aeropuerto en la ciudad de Pachuca de Soto que brinda servicio al tráfico aéreo nacional. Es posible acceder al territorio por vía terrestre desde la Ciudad de México por la carretera México-Pachuca en un tiempo estimado de 1 hora y 10 min, recorriendo aproximadamente 90 km, además se tienen cuatro vías que llevan hacia la Ciudad de Valles, San Luis Potosí, Tampico, Tamaulipas, Tuxpan, Veracruz y Puebla.

1.4.2 Marco geomorfológico

La morfología del relieve va desde los 1300 msnm a los 3200 msnm compuesta principalmente por 5 grandes unidades geomorfológicas, de las cuales la Unidad de Sierra está constituida por montañas, peñas y laderas con un alto grado de pendiente ($>50^\circ$) en una dirección principal de NW-SE, estas ocupan el 38%, la Unidad de Lomeríos está compuesta por cerros con pendientes suaves a moderadas ($20^\circ - 40^\circ$) con el 18%, la Unidad de Cañon tiene vertientes y escarpes pronunciados, los cuales ocupan el 9%, la Unidad de Llanura sobresale por el terreno plano abarcando el 31% y la Unidad de Meseta con el 4% del total del territorio respectivamente (figura 2; INEGI, 2009). La diversidad de vegetación dentro del área de estudio se debe a los rasgos geomorfológicos que predominan ya que estos tienen una gran influencia en la hidrología, el microclima, la formación de suelos y la distribución de flora y fauna.

1.4.3 Clima y vegetación

Las condiciones climáticas de la región están determinadas por la influencia de los vientos húmedos del Golfo de México y de los efectos de los ciclones tropicales, así como los fenómenos de condensación orográfica que se desarrollan en las laderas de las sierras. En el territorio del PGCMH predomina el clima templado en el sector NW, centro y SE, asociado principalmente a los lomeríos y sierras, donde la temperatura media anual oscila entre los 12° C y lo 18° C ; el clima semiárido se localiza en la porción NE y SW, vinculando a las llanuras y mesetas; el clima árido en cañones; y el clima semifrío únicamente se encuentra en el Cerro de las Navajas (figura 3). La temperatura mínima del mes más frío, enero, es de 4° C y la máxima en abril y mayo en promedio es de 27° C . La lluvia se presenta en verano en los meses de junio a septiembre, la precipitación media es de 800 mm anuales (INEGI 2016). La zona de estudio tiene 10 áreas naturales protegidas las cuales tienen una gran importancia, ya que se consideran hábitats de un conjunto de ecosistemas frágiles (figura 4, tabla 1).

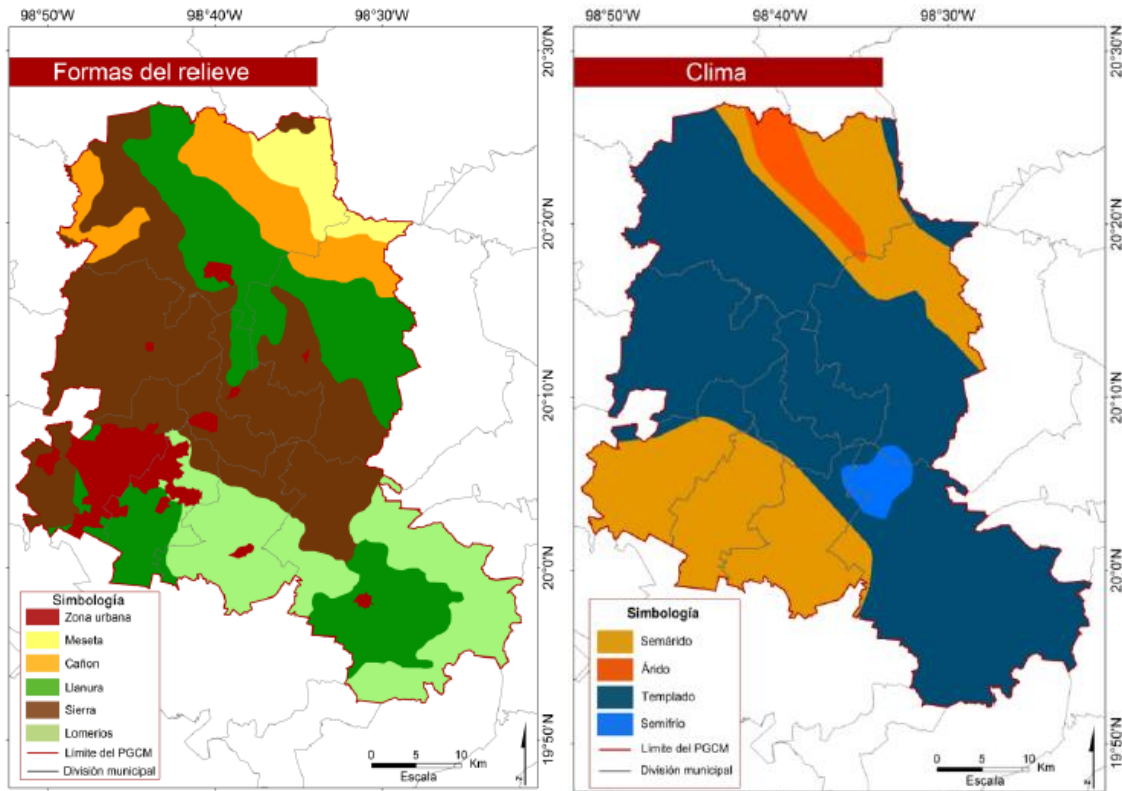


Figura 2. Formas del relieve del PGCMH (Dossier, 2015).

Figura 3. Climas del PGCMH (Dossier, 2015).

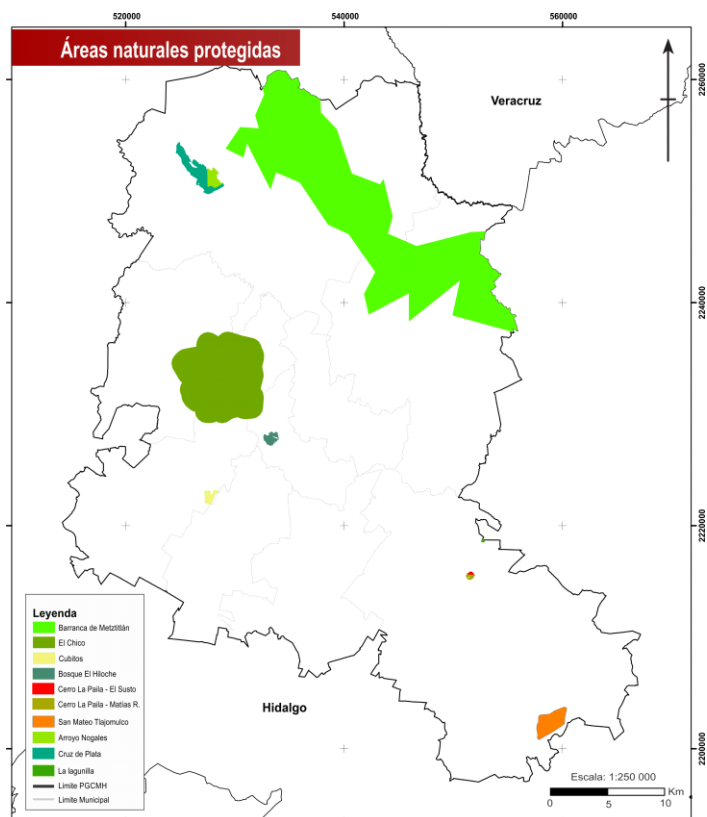


Figura 4. Áreas naturales protegidas del PGCMH.

La zona arbórea dentro del área de estudio contempla siete tipos de vegetación, entre los que se encuentran: bosque aciculifolios (pinar), bosque mixto de acuil-coriacifolios (pino-encino), bosque bajo de escuamifolios (juniperus), matorral alto espinoso con crasicuales, matorral alto subnerme, pastizal y selva baja caducifolia, también gran variedad de cactáceas de origen autóctono o endémico que se encuentran a la orilla del río Tulancingo (González e Hiriart., 1978).

Tabla 1. Áreas naturales protegidas dentro del territorio del PGCMH (Dossier, 2015); CONANP: Comisión Nacional de Áreas Protegidas, SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Denominación	Nombre	Organismo	Año de decreto	Superficie (Km ²)
Reserva de la biosfera	Barranca de Metztitlán	UNESCO	2006	173.60
Parque nacional	El chico	CONANP	1982	27.39
Parque estatal	Cubitos	SEMARNAT	2002	0.90
	Bosque El Hiloche		2004	1.00
Zona de preservación ecológica de los centros de población	Cerro La Paila - El Susto		2005	0.12
	Cerro La Paila - Matías Rodríguez		2005	0.24
	San Mateo Tlajomulco		2007	4.48
	Arroyo Nogales		2008	1.64
	Cruz de Plata		2008	4.00
	La Lagunilla		2004	0.28

1.4.4 Uso de suelo

La actividad agrícola de temporal en la región se basa en cultivos de maíz, cebada, tomate rojo y avena en su mayoría. Los bosques presentes son de pino - encino, pino, oyamel, táscate y mezquite. Los matorrales contemplan crasicuale (nopales) y flora desértico rosetófilo (agaves y cactaceas). Existen cuerpos agua, los cuales son lugares donde se almacena de manera natural o artificial como la presa San Antonio. Los pastizales inducidos dominan con especies de gramíneas o graminoides que aparecen por consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación. La vegetación secundaria que se tiene se refiere a un tipo de vegetación eliminada o alterada por diversos factores humanos o naturales teniendo como resultado una comunidad vegetal significativamente diferente a la original y con estructura y composición florística heterogénea, esta puede ser herbácea, arbustiva o arbórea. La zona urbana se refiere a el lugar donde existe una densidad de población con una extensión geográfica (INEGI, 2009).

1.5 Marco Geológico

Geológicamente el proyecto se encuentra situado entre dos provincias de México: la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana, los procesos geológicos influenciados por los cambios climáticos, han modelado el paisaje en esta zona (figura 5). La Sierra Madre

Oriental es una unidad fisiográfica con más de 800 Km de longitud y de 80 a 100 Km de amplitud, está provincia se encuentra representada con el 3% del total del territorio del PGCMH con secuencias de edad Cretácica (Albiano). Estas secuencias se originaron en ambientes marinos someros que favorecieron el desarrollo de rocas de plataforma carbonatada, la creación de arrecifes y sedimentación que originó rocas terrígenas de ambientes marinos y que por efectos de la transgresión del mar durante el Albiano se desarrolló la plataforma de Actopan en condiciones de perimarea, que posteriormente con la actividad orogénica asociada a la subducción sostenida de la placa oceánica Farallón, debajo del borde occidental de América del Norte a finales del Cretácico, causó el plegamiento y fallamiento inverso de las secuencias sedimentarias, acortamientos en su eje horizontal, aumentando el espesor de las secuencias, causando la elevación del relieve y regresión del mar hacia el este; la erosión y la exposición de estas secuencias Cretácicas aportan sedimentos a la cuenca del Golfo (Valencia, *et al.*, 2011).

La Faja Volcánica Transmexicana es un arco magmático continental de edad Neógeno, construido sobre el margen meridional de la Placa de Norteamérica, el cual presenta características peculiares como una gran variedad de estilos volcánicos y de composición química en su parte central y oriental de la trinchera, así como a lo ancho del arco. Esta provincia va desde el Pacífico hasta el Golfo de México, con una extensión aproximada de 1000 Km (Ferrari, 2000).



Figura 5. Dominios Geológicos (Dossier, 2015).

1.5.1 Estratigrafía general de la zona de estudio

Es posible agrupar la estratigrafía general con base en tres diferentes episodios que abarcan las eras Cenozoica y Mesozoica. El primero comprende el periodo Cretácico y se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias carbonatadas y terrígenas; el segundo comienza en el Paleógeno con depósitos de conglomerados polimíctico y posteriormente un vulcanismo básico y ácido, cortada por intrusivos del Mioceno y Plioceno. El último episodio, es durante el Cuaternario el cual se caracteriza por unidades máficas que van de basaltos a traquitas, que son localmente cubiertas por material aluvial (figura 6). Las formaciones geológicas que se encuentran presentes son de la base a la cima:

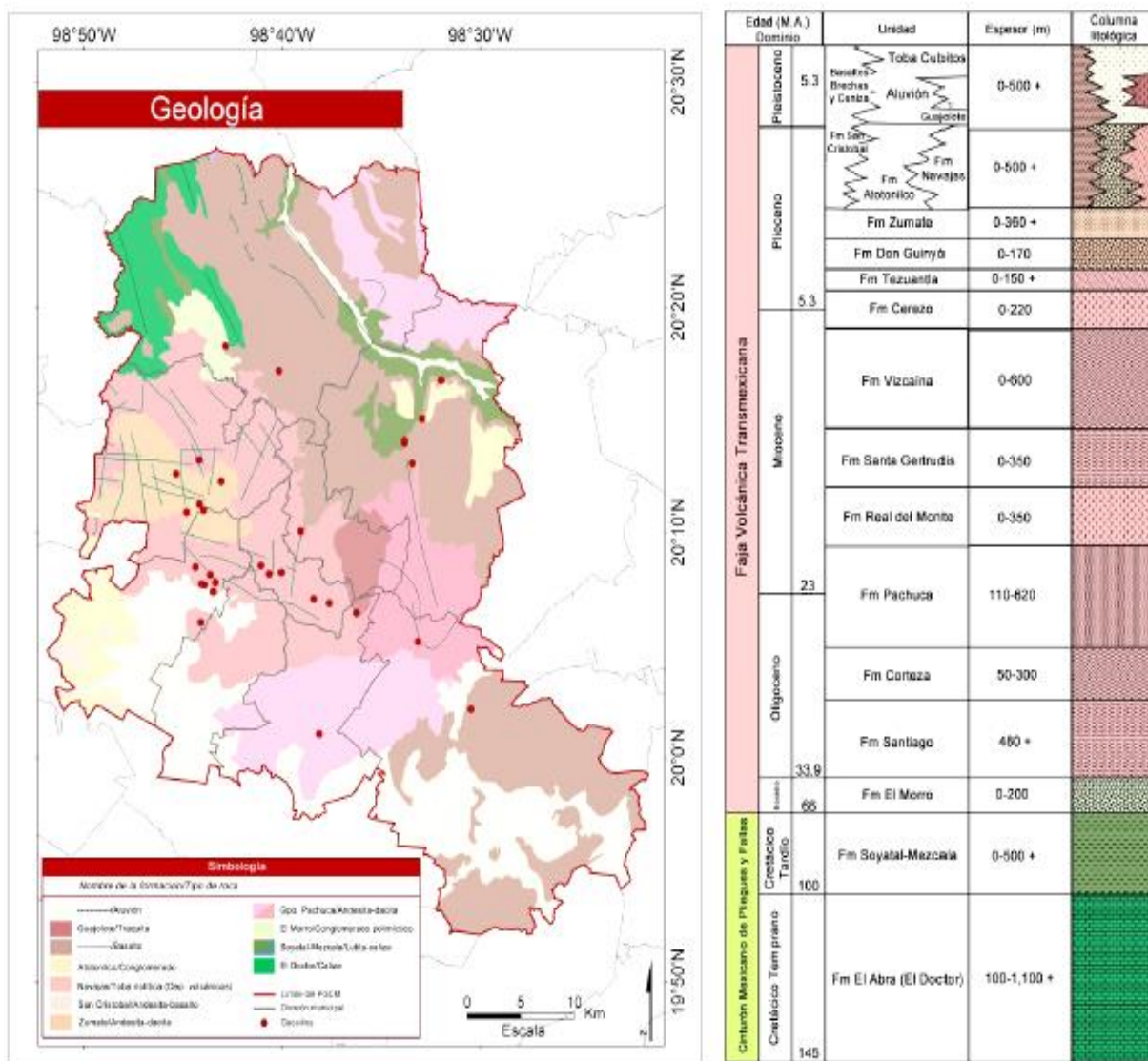


Figura 6. Geología simplificada del PGCMH (Dossier, 2015).

- 1) La Formación El Doctor (Albiano – Cenomaniano; KiCz) son paquetes de calizas bien estratificadas de color gris claro con espesores que van desde los centímetros a estratos masivos de varios metros, correlacionada con las Formaciones El Abra, Peña Azul, Orizaba, Morelos y la Caliza Sierra Madre de Chiapas (Wilson, *et al.*, 1955; Mendoza, 1990).
- 2) La Formación Soyatal (Turoniano Medio - Santoniano; KsCzLu) contempla paquetes de rocas calizas, calizas margosas, margas, areniscas y lutitas calcáreas que se intercalan localmente con bancos de brecha calcáreos. Se correlaciona con las Formaciones Agua Nueva, San Felipe y Cuautla (López, 2002; Gonzales, 1998, en Yussim-Guarneros, 2004).
- 3) La Formación El Morro (Eoceno – Oligoceno; TeoCgp) la cual es un conglomerado bien consolidado y compuesto por guijas y guijarros con formas angulares a subangulares de caliza, marga y lutita en una matriz arenosa (Simons y Mapes 1957; Carrillo-Martínez, 1991; Segerstrom, 1962).
- 4) Grupo Pachuca (Oligoceno - Plioceno; TopIA-Da) está compuesto por un grupo de rocas volcánicas (basaltos, andesitas, dacitas, tobas) muy falladas, con intrusiones, alteradas hidrotermalmente y mineralizadas. Contempla ocho formaciones en un espesor de 200 m. Las cuales de la base a la cima son: la Formaciones Santiago, Corteza, Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis, Vizcaína, Cerezo y Tezuantla (Segerstrom, 1961; Geyne, *et al.*, 1963).
- 5) Formación Don Guinyó (Plioceno Inferior; Tpl / Tr-TDa) cubre discordantemente al Grupo Pachuca y está compuesta por rocas de brechas riolíticas, dacitas y tobas riolíticas bien consolidadas (Segerstrom, 1961).
- 6) Formación Zumate (Plioceno; TplA-Da) compuesta por derrames, brechas, aglomerados y rocas epiclásticas de composición andesítica y dacítica (Geyne, *et al.*, 1963).
- 7) Formación San Cristóbal (Plioceno; TplA-B) constituida por tobas y lavas basálticas, conglomerados de andesitas y riolitas, esta unidad es contemporánea a las Formaciones Atotonilco – Tarango y Navajas (Segerstrom, 1961; Geyne A. *et al.*, 1963).
- 8) Formación Navajas (Plioceno Superior; TplIR-TR) está constituida por una secuencia riolítica y andesítica de derrames lávicos con intercalaciones de brechas soldadas y no soldadas de cenizas vítreas, con fragmentos líticos, pumíticos y obsidiana (Geyne, *et al.*, 1963; De Cserna, *et al.*, 1987).

9) Formación Atotonilco (Plioceno Superior; Tpl/ Cgp) esta comprende areniscas, limo-areniscas, conglomerados, grauvacas líticas, litoarenitas, limolitas, margas y depósitos volcánicos (Segerstrom, 1961).

10) Basaltos Indiferenciados de edad Cuaternaria (Pleistoceno; QB) esta unidad está conformada por derrames de lava, conos de escoria, conos cineríticos y domos de composición basáltica, se relaciona con el campo Volcánico Apan - Tezontepec y con el Grupo Chichinautzin (García-Palomo, *et al.*, 2002).

11) Traquita Guajolote de edad Cuaternaria (Holoceno; QTq) está constituida por un derrame de lava vesicular máfico con minerales de timidita y cristobalita (Dossier, 2015).

12) Depósitos Aluviales (Holoceno al reciente; QAl), estos depósitos son materiales no consolidados, constituidos por partículas arenosas, limosas y de arcilla en abanicos aluviales y sobre llanuras de inundación que cubren extensas porciones en laderas de los flancos de altos topográficos y sierras (Dossier, 2015).

1.6 ¿Qué es un Geoparque?

Un Geoparque se define como un territorio que cuenta con un patrimonio geológico en términos de calidad científica, rareza, valores estéticos y educacionales de importancia internacional, el cual es el eje fundamental de una estrategia para promover el desarrollo sostenible de las comunidades locales basado en la educación, el turismo y la cultura.

Un Geoparque tiene como base tres principios:

1. La existencia de un patrimonio geológico destacado.
2. La puesta en marcha de iniciativas de geoconservación, educación y divulgación.
3. La creación de un proyecto de desarrollo local con valor socioeconómico y cultural.

El programa de Geoparques tiene como objetivo, promover una red mundial de parques científicos con especialistas partidarios y de varias organizaciones no gubernamentales, para la preservación del patrimonio geológico, el cual servirá para conseguir modelos óptimos para establecer normativas y estrategias de desarrollo económico a nivel local , de manera que se fomenta el intercambio de experiencias y se garantizan unas exigencias de calidad. Los Geoparques constituyen un ejemplo de como la geología se considera un recurso que, convenientemente gestionado, puede servir para potenciar el desarrollo de una región (Carcavilla y García, 2014).

Hasta el 2015 se tienen registrados 120 Geoparques en 31 países alrededor del mundo, entre los que destacan 33 Geoparques en China, 11 Geoparques en España, 10 Geoparques en Italia y 8 en Japón, los cuales fueron nombrados en diferentes fases del proyecto de la Red mundial de Geoparques desde el 2004. En América solo se han designado cuatro Geoparques, dos de ellos en Canadá (Stonehammer y Tumbler Ridge Geopark), uno en Brasil (Araripe Geopark) y otro en Uruguay (Grutas del Palacio Geopark).

1.6.1 Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

El territorio posee una gran diversidad paisajística y cultural, así como una amplia gama de actividades capaces de satisfacer las necesidades del turismo que busca descanso, aventura, esparcimiento cultural y conocimiento científico. La riqueza geológica está representada por geformas de origen volcánico como peñas, calderas, domos, prismas y rocas carbonatadas del Cretácico. Actualmente el PGCMH se encuentra en una etapa de desarrollo y crecimiento en la promoción turística a nivel mundial, por ello se espera un incremento en el número de visitantes nacionales e internacionales exhortándolos a conocer principalmente el patrimonio geológico asociado a la minería (figura 7).



Figura 7. Legado paisajístico, geológico, cultural y arquitectónico que se encuentran en los Geositos del PGCMH; a) Peñas cargadas, b) Barranca de Metztlán; c) Cerro San Cristóbal, d) Real del Monte, e) Cerro las Navajas, f) Prismas Basálticos, g) Parque Nacional el Chico, h) Convento de Epazoyucan (Dossier, 2015).

Capítulo II Marco teórico

2.1 Los procesos de remoción en masa

Existen diferentes términos con los cuales se hace referencia a la inestabilidad de laderas, dichas expresiones se utilizan en distintas disciplinas involucradas en su estudio de los PRM. Ayala (2000) señala que los procesos de ladera son igualmente denominados procesos gravitacionales, PRM, o en sentido general, se conocen también como deslizamientos de tierra. Estas terminologías son empleadas ampliamente para indicar que una ladera no es estable y que puede ocurrir algún tipo de proceso de remoción. La terminología empleada en español para estos tipos de procesos ha heredado las confusiones originadas en el idioma inglés, las cuales se refieren principalmente a la inconsistencia de agrupar a los diferentes tipos de procesos de remoción bajo el término landslide, el cual, tanto en español como en inglés, refleja un mecanismo bien definido de movimiento, es decir, un deslizamiento (Ayala, 2000).

El origen del término “landslide” fue definido por Sharpe (1938) quien describió que este término hacía referencia a un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de proceso de remoción o desprendimiento. Terzaghi (1950) explica que un proceso de remoción es un desplazamiento rápido de una masa de roca, suelo residual o sedimentos de ladera en la cual actúa un centro de gravedad logrando desplazarse hacia abajo o hacia fuera, posteriormente, Varnes (1958) especifica que este movimiento es hacia abajo de los materiales formadores de las laderas y puede incluir materiales naturales y artificiales. Más tarde Bates y Jackson (1987) definen que un proceso de remoción es el transporte de material rocoso debido a la acción de la gravedad y más recientemente una publicación de del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS (2004) explica que el término “deslizamiento” describe una amplia variedad de PRM que resultan pendiente abajo o hacia el exterior de los materiales que conforman una pendiente incluyendo roca, suelo, relleno artificial o combinación de estos. Por ello en esta investigación se usará el término “PRM” el cual está relacionado con diversos mecanismos de movimiento donde interviene la inestabilidad de laderas y consecuentemente por la acción de la gravedad ocurre un desplazamiento de una masa rocosa (suelo, roca o material de relleno) pendiente abajo.

- **Clasificación de los procesos de remoción en masa**

Las clasificaciones existentes de los procesos de remoción utilizan distintos parámetros como base, por ejemplo: el tipo de material involucrado (roca, suelo, detritos), la velocidad (lenta o rápida), el contenido de agua y mecanismos de rotura. Con base en estos parámetros se han identificado varios tipos.

La clasificación utilizada en esta investigación fue hecha en Europa, la cual formó parte del programa “la ocurrencia temporal y pronóstico de deslizamientos en la comunidad europea” desarrollada por el proyecto EPOCH (1993), que a partir de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) se elaboró una tabla para la clasificación de los PRM. De acuerdo con esta clasificación los diferentes mecanismos de movimiento (desprendimientos o caídas, vuelcos o desplomes, deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales, flujos, expansiones laterales y movimientos complejos) se subdividen de acuerdo con los materiales formadores, los cuales pueden ser rocas, detritos y suelos (tabla 2).

Tabla 2. Clasificación simplificada de los PRM (EPOCH, 1993).

Mecanismo de movimiento	Tipo de material involucrado		
	Rocas	Detritos	Suelos
Desprendimientos o caídas	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de detritos	Caída o desprendimiento de suelo
Vuelco o desplome	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de detritos	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamiento rotacional	Individual, múltiple, sucesivo	Individual, múltiple, sucesivo	Individual, múltiple, sucesivo
Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento traslacional de suelos
Flujos	Flujo de rocas	Flujo de detritos	Flujos de tierra, arena o suelo
Expansión laterales	Expansiones laterales en roca	Expansiones laterales en detritos	Expansiones laterales en suelos
Movimientos complejos	Desplome de flujo de tierra con caída de rocas y detritos	Compuesto, parte rotacional y parte traslacional, con un flujo de suelo	

- **Desprendimientos o caída de rocas**

Los desprendimientos o caídas de rocas, detritos o suelo pueden ser de cualquier tamaño con movimientos abruptos de fragmentos aislados que se originan en pendientes fuertemente inclinadas, de tipo natural o artificial. El movimiento es prácticamente de caída libre, rodando, rebotando o deslizándose ladera abajo. Pueden ocasionar la caída de suelos producto de la erosión; generalmente los desprendimientos se relacionan con la existencia de discontinuidades estructurales como grietas, planos de estratificación o fracturamiento, los cuales pueden ocurrir en una escala ilimitada (Ayala, 2000). La distinción importante en la caída de rocas o desprendimientos son los fragmentos individuales que se mueven como cuerpos rígidos independientes que interactúan con el sustrato por medio de impactos episódicos (Evans y Hungr, 1993). La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, el desprendimiento o caída es precedido por deslizamiento o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta (figura 8a; Cruden y Varnes, 1996).

- **Vuelcos o desplomes**

Los vuelcos o desplomes son similares a una caída en muchos aspectos, normalmente implican una acción de un pivote determinado por su centro de gravedad en lugar de una separación completa de base, la acción se ve reflejada en caídas de bloques rocosos con giro hacia adelante (Ayala, 2000). Frecuentemente estos movimientos ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares. Estas estructuras tienden a la vertical y se generan por la separación del bloque principal, la cual involucra inclinación o basculamiento, pero no colapso (Cruden y Hu, 1992; figura 8 b).

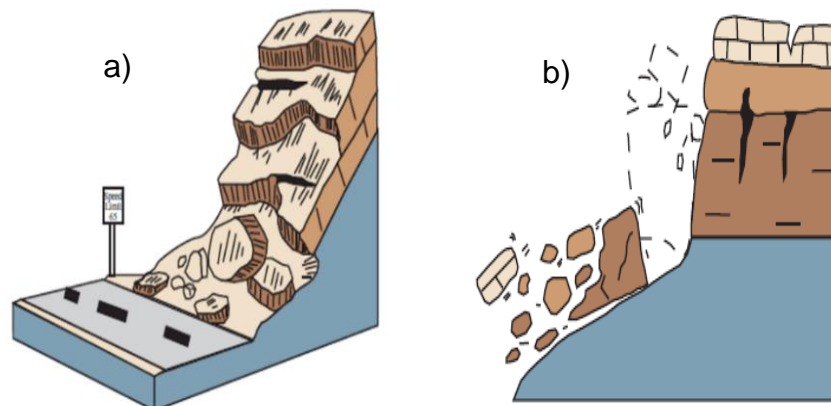


Figura 8. Movimientos en masa. a) Desprendimiento o caída de rocas b) Vuelco o desplome. En ambos casos se observa la caída y desplome de rocas (USGS, 2004).

- **Deslizamientos**

Los deslizamientos son movimientos relativamente rápidos de una porción de talud o ladera, debido a la existencia de una zona de debilidad que separa el material más inestable del estable el cual le subyace. Esta superficie es conocida como plano de ruptura, el cual puede ser plano o cóncavo y se clasifican en deslizamientos rotacional y traslacional (USGS, 2004).

- **Deslizamiento rotacional**

Este tipo de deslizamiento tiene una zona de ruptura, la cual forma una curva cóncava en forma de cuchara; el movimiento que ocurre es girando en el eje paralelo a la superficie del terreno y transversal a través del deslizamiento (USGS, 2004). Los deslizamientos rotacionales tienden a moverse a velocidades lentas o moderadas debido a la auto-estabilización de las fuerzas gravitacionales, la roca débil bajo tensión cortante la que tiende a fallar de una manera dúctil (Hungr y Evans, 2004). El comportamiento dúctil de estos deslizamientos es pobremente conocido, pero se asocia principalmente como consecuencia a una pre-falla prosigue una deformación progresiva donde se destruye la cohesión general, este movimiento es activo ya que tiene una tensión superficial abierta (Hungr, *et al.*, 2013; figura 9 a).

- **Deslizamiento traslacional**

Estos deslizamientos son una masa de suelo y/o fragmentos de rocas que se desplazan hacia afuera y abajo sobre una pendiente, como una masa relativamente coherente. Este movimiento se extiende a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con un poco o nada de movimiento de rotación. Usualmente se determinan deslizamientos traslacionales someros en suelos y/o están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, zonas de diferente alteración o meteorización de rocas o bien con echado propicio al deslizamiento; la masa en movimiento consta de una sola unidad o pocas unidades estrechamente relacionadas, dando a conocer las propiedades de resistencia de las discontinuidades (Hungr, *et al.*, 2013; USGS, 2004). Este proceso al igual que los deslizamientos rotacionales deja marcas perceptibles tanto en la ladera de origen como en el lugar de depósito (Hutchinson, 1988; figura 9 b y c).

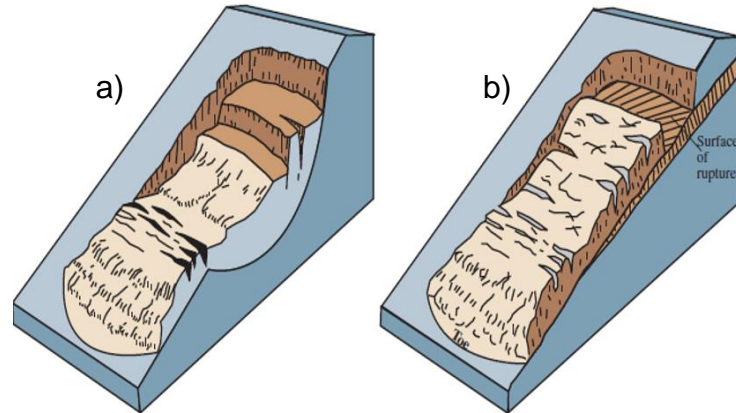


Figura 9. Tipos de deslizamientos. a) Deslizamiento rotacional; b) Deslizamiento traslacional (USGS, 2004).

▪ Flujos

Los flujos son movimientos espacialmente continuos, con superficies de cizalla muy próxima, de poca duración y, por consiguiente difícil de observar; el movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular (Ayala, 2000). Los flujos envuelven todos los materiales disponibles y se clasifican con base en su contenido de partículas, estos se dividen en flujos de rocas y tierra, arena o suelo y existe otra variedad que son los lahares, los cuales se producen en ambientes volcánicos activos por la influencia de agua de lluvia, estos se describen de la siguiente manera (Ayala, *et al.*, (2008):

- ✚ Lahar: flujo de suelos y detritos que se origina en las laderas de un volcán generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua (Figura 10a).
- ✚ Flujos de detritos o roca: este es un movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan partículas sueltas, fragmentos de roca y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que circula pendiente abajo. Estos movimientos también son conocidos como flujos de escombros (Figura 10b).
- ✚ Flujos de tierra, arena o suelo: es masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, que contiene por lo menos 50% de granos de arena, limo y partículas arcillosas (Figura 10c).

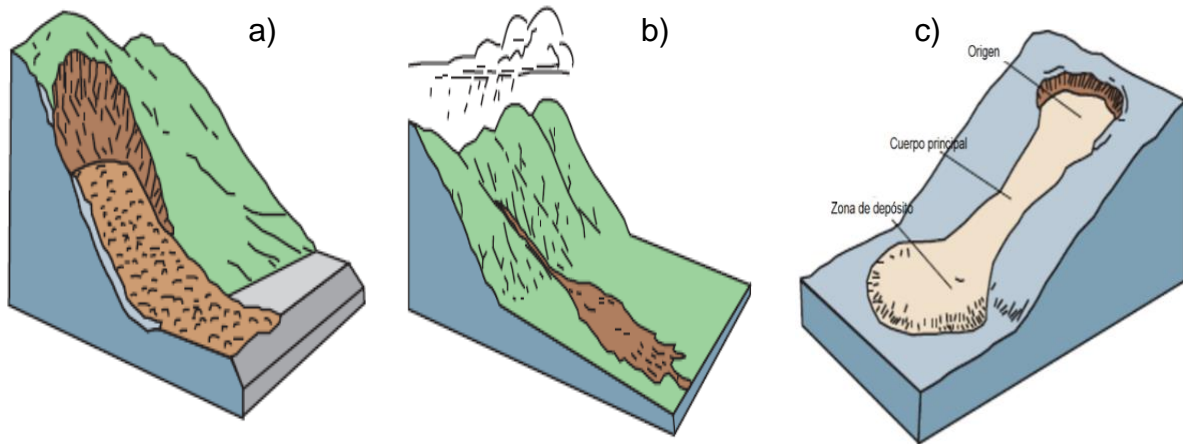


Figura 10. Tipos de Flujos. a) Lahar; b) Flujo de detritos o roca; c) Flujo de tierra, arena o suelo (USGS, 2004).

- **Expansiones o deslizamientos laterales**

Estos movimientos son resultado del fracturamiento y expansión de suelos o masas de roca compactados, que debido a la licuefacción del material subyacente se desestabiliza. Ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos en tamaños de bloque y gravas están inmersos en una matriz más fina como arcillas. La superficie de cizallamiento no está bien definida y la masa rocosa involucrada se mueve rápido y retrogresivamente, con una duración de algunos minutos. Estos movimiento ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad (Ayala, 2000; figura 11).

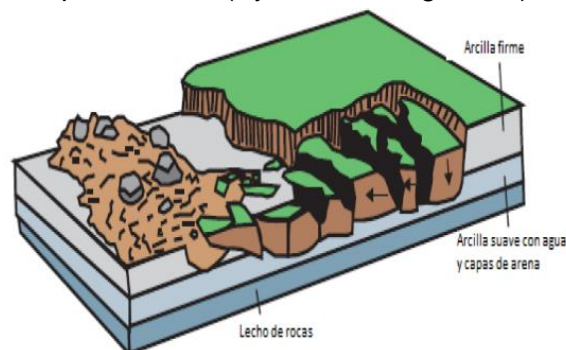


Figura 11. Expansiones laterales (USGS, 2004).

- **Movimientos complejos**

Los movimientos complejos ocurren cuando un movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo; entre los más importantes cabe destacar las avalanchas de rocas y flujos. El desplome de flujo de tierra son resultado del colapso repentino de una gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas (Ayala, 2000).

2.1.1 Factores que controlan los procesos de remoción en masa

La ocurrencia de los PRM está condicionada por una serie de factores que son capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (Terzaghi, 1950). Los factores externos ocasionan un incremento en los esfuerzos o acciones que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de fuerzas motoras actuantes, mientras que los factores internos reducen la resistencia de los materiales, disminuyendo la concentración de fuerzas resistentes como se muestra en la figura 12 (Ayala, *et al.*, 2008).

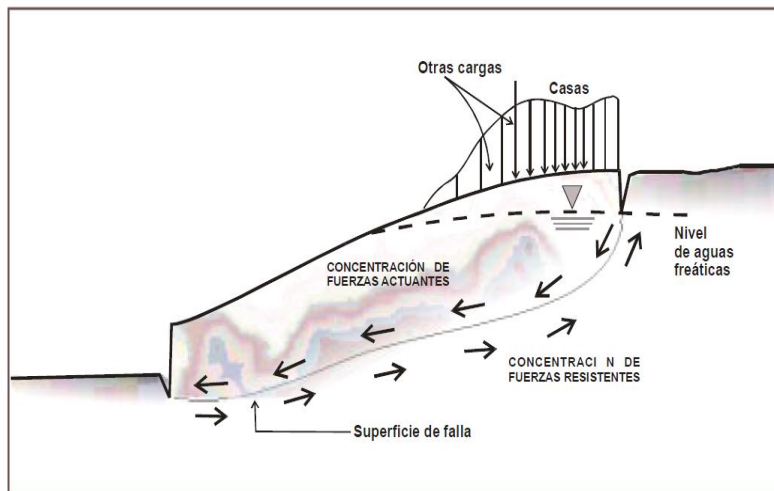


Figura 12. Se aprecia la relación que existe entre las fuerzas que originan la inestabilidad y las fuerzas que se ejercen en el interior de la misma ladera, las cuales mantienen el equilibrio (Ayala, *et al.* 2008).

La inestabilidad de las laderas está controlada principalmente por factores geológicos y geométricos, considerándolos como factores condicionantes o pasivos y son intrínsecos en los materiales naturales, por ejemplo los suelos, la litología, la estratigrafía y las condiciones hidrológicas, las cuales determinan las propiedades resistentes y el comportamiento de una ladera. Por otro lado, existen factores detonantes o activos que provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones; estos últimos son los factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características, propiedades y las condiciones de equilibrio (Vallejo, *et al.*, 2002). A medida que se conozcan y se entienda como afectan estos factores a la estabilidad o inestabilidad de una ladera, se tendrán medidas de prevención o mitigación (Ayala, *et al.*, 2008). Para realizar mapas de susceptibilidad asociados a los PRM es importante la identificación y el mapeo de los factores que intervienen en la estabilidad (Aleotti y Chowdhury, 1999). A continuación, se describen los principales factores internos y externos que están asociados a la inestabilidad de laderas y los procesos de remoción.

2.1.1.1 Factores intrínsecos

- **Pendiente**

La pendiente tiene una gran influencia en la susceptibilidad a que ocurran PRM, ya que al aumento de la inclinación se correlaciona con una mayor probabilidad de ocurrencia (Dai y Lee, 2002). Para cuantificar la frecuencia relativa de los procesos de remoción en diferentes grados de pendiente es necesario tener en cuenta la distribución de las categorías de inclinación de la pendiente utilizando un modelo digital de elevación disponible (Dai y Lee, 2002). La relación entre la ocurrencia por inestabilidad y la pendiente es innegable de tal manera que cuando el ángulo de pendiente aumenta también incrementa la tensión en el suelo o del material no consolidado de la ladera, por ende, pendientes con alto ángulo son más susceptibles a presentar estos fenómenos. Este factor es considerado para hacer mapas de susceptibilidad por diversos autores clasificando los grados de pendiente en clases (ej. Yalcin, 2008; Hervás y Cano, 2001; Villacorta *et al.*, 2012; Carrion *et al.*, 2012).

- **Orientación de la pendiente**

Este factor se relaciona con parámetros tales como: la exposición de la ladera a la luz solar, los vientos, precipitaciones y discontinuidades que pueden afectar la ocurrencia de PRM (Yalcin, *et al.*, 2011). La orientación en un punto se define como el ángulo existente entre el vector que señala el Norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto y es una variable en una distribución circular (Soriano, 2009). En el SIG la orientación se mide en sentido a las agujas del reloj en grados de 0 a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo (figura 13).

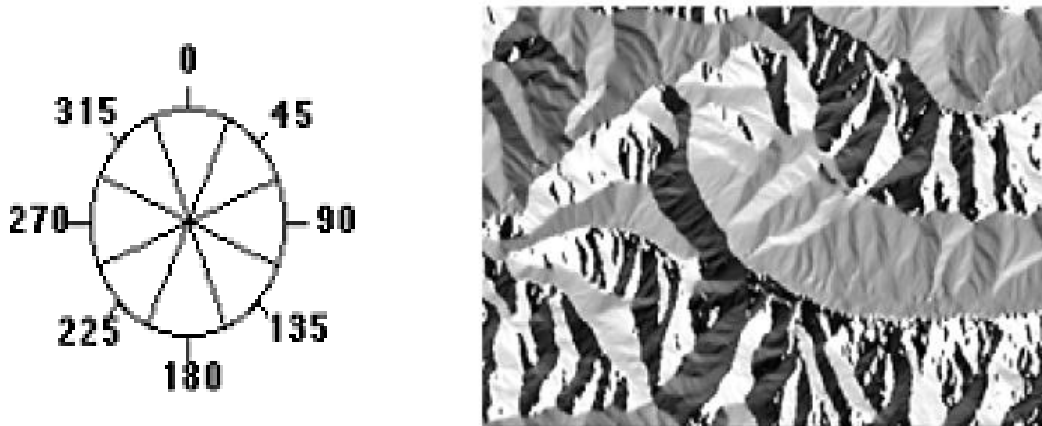


Figura 13. Distribución circular de la orientación de la pendiente y ejemplo (Tomado de Soriano, 2009).

- **Curvatura de la pendiente**

Este factor influye como variable en los fenómenos de escorrentía superficial, canalización de taludes, la erosión y los flujos en general asociados a PRM (Felicísimo, 1994). También esta característica se asocia con la retención de humedad reflejando una vegetación distinta, que a su vez puede destacar la resistencia del suelo, así como la susceptibilidad a deslizamientos (Dai y Lee, 2002). La cantidad de lluvia que cae sobre una pendiente puede variar en función de su aspecto (Wieczorek, *et al.*, 1997). En un SIG la curvatura de la pendiente en perfil es paralela a la pendiente e indica la dirección máxima. Si la curvatura de la pendiente es convexa la corriente se desacelerará, si es cóncava la corriente se acelerará y cuando es plana la corriente es lineal, esto debido a la acción de la gravedad (figura 14).

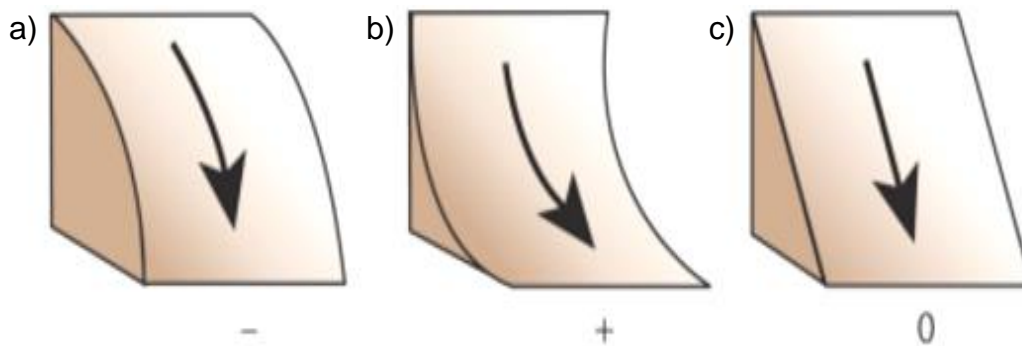


Figura 14. La curvatura de la pendiente en perfil en el SIG: a) Indica que la superficie es convexa hacia arriba en la celda, b) Un perfil positivo que indica que la superficie es cóncava arriba en esa celda, c) Un valor cero indica que la superficie es lineal.

- **Uso de suelo**

El uso de suelo se refiere a la manera en la cual los objetos biofísicos, que se encuentran en la cubierta terrestre, son utilizados por el hombre para satisfacer sus necesidades materiales, los cuales se encuentran limitados por factores ambientales, como las características del suelo, el clima, la topografía y la vegetación. Dentro del uso de suelo se tiene el efecto de la cubierta vegetal, esta se observa en el cambio de la hidrología mediante el aumento de la intercepción de la lluvia, infiltración y la evapotranspiración, la cual disminuye la cantidad de agua que llega al suelo y al subsuelo, donde se almacena. La vegetación reduce la susceptibilidad de erosión al igual que aumenta la resistencia del suelo dando una propiedad mecánica a través del refuerzo y de la carga de la ladera, ya que la raíz tiene un gran potencial para disminuir la tasa de ocurrencia de deslizamientos superficiales (Yalcin, *et al.*, 2011).

- **Geomorfología.**

Al realizar un estudio de manera regional, la geomorfología implica representar unidades homogéneas que caracterizan la morfometría y morfografía del drenaje, génesis, cronología de materiales y procesos, los cuales están intrínsecamente relacionados con el origen de los PRM y que geomorfológicamente son representados con líneas, colores y sombreados. Desafortunadamente no hay un sistema de clasificación universal geomorfológico aceptado (Van Westen, *et al.*, 2005). El relieve juega un papel definido, ya que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan algunos procesos de remoción, por ejemplo, las regiones montañosas se consideran las más propensas a generar PRM (Vallejo, *et al.*, 2002).

- **Litología.**

Es ampliamente aceptado que la litología influye significativamente en la aparición de PRM, ya que las variaciones litológicas a menudo conducen a una diferencia en la fuerza de carga y la permeabilidad de las rocas (Yalcin, *et al.*, 2011). La naturaleza del material que forma una ladera está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que puede sufrir, presentado diferentes litologías distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de PRM, considerando aspectos como la alternancia de diferente litología, competencia y grado de alteración, o la presencia de capas de material blando o de estratos duros que controlan los tipos y la disposición de las superficies de rotura (Vallejo, *et al.*, 2002).

- **Estructuras**

Las estructuras incluyen características de falta de homogeneidad y discontinuidad en las rocas o suelos a diferentes escalas, interpretando diferentes secuencias estratigráficas, cambios abruptos en la litología y/o fallas, por lo que este factor tiene igual de importancia que la litología ya que se pueden presentar planos orientados que favorecen la inestabilidad de una ladera o un nivel de fracturamiento asociado a fallas jugando un papel importante en la inestabilidad del terreno (Varnes, 1984). El sistema de fallas o fracturas, estratificación y foliación propician la inestabilidad, ya que dependiendo del grado puede presentarse o no una disposición de una superficie de rotura (Capra, *et al.*, 2006). A mayor distancia de las estructuras, la frecuencia de los deslizamientos decrece indicando una relación entre las estructuras y la frecuencia de los PRM (Lee y Tu, 2005).

2.1.1.2 Factores desencadenantes

- **Precipitación**

El desencadenamiento de PRM está relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones, la cantidad de agua que se infiltra al terreno depende de la intensidad y duración de las lluvias, tamaño de la cuenca de aporte, contenido previo de agua en el terreno (posición del nivel freático y grado de saturación), de su permeabilidad, transmisividad, de la topografía y otras características de la ladera como la presencia de vegetación (Vallejo, *et al.*, 2002). Las precipitaciones intensas durante horas o días pueden desencadenar movimientos superficiales, como deslizamientos, flujos de derrubios, desprendimiento de bloques o reactivaciones de antiguos deslizamientos. El desencadenamiento de nuevos deslizamientos profundos o de gran magnitud no están relacionados con fenómenos meteorológicos estacionales, sino que obedece a condiciones climáticas de largo plazo, con regímenes de precipitación y condiciones de humedad suficientes que son capaces de modificar de forma sustancial los niveles freáticos y el contenido de agua en el terreno, siendo la elevación del nivel freático por la infiltración neta de agua el mecanismo para desarrollar movimientos de las laderas (Vallejo, *et al.*, 2002;).

- **Actividad humana**

Las actividades humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas, por ejemplo, las excavaciones, la construcción de presas y embalses, la carga de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o escombros sobre la ladera, entre otros factores que modifican los estados tenso-deformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generan inestabilidades. Entre las principales causas de desestabilización son los cambios de geometría, los cambios en las condiciones hidrológicas y las fuerzas estáticas externas y en menor medida las cargas dinámicas y excavaciones subterráneas bajo las laderas (Fattorelli y Fernández, 2011). Las excavaciones superficiales para vías de comunicación desequilibran las laderas y pueden desencadenar movimientos, dependiendo de otros factores condicionantes, como la estructura geológica, la resistencia o el contenido de agua del terreno; en las laderas con inestabilidad natural activa o antigua, o en condiciones cercanas al equilibrio límite, la excavación de taludes frecuentemente provoca la reactivación o aceleración de los movimientos siendo las que realizan al pie de la ladera las más desfavorables, situación frecuente en la construcción de vías de comunicación (Vallejo, *et al.*, 2002).

2.2 El inventario de procesos de remoción en masa

El inventario de procesos de remoción es muy importante para desarrollar mapas de susceptibilidad, su preparación se basa en los siguientes conocimientos (Yalcin, 2008; Guzzetti, *et al.*, 2012):

Los PRM dejan signos perceptibles en el terreno, la mayoría de los cuales pueden ser reconocidos, clasificados y delimitados a través de la interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitales o representaciones digitales de la superficie. La mayoría de los rasgos son geomorfológicos y se refieren a cambios en la forma, posición y apariencia que presentan en la topografía de la superficie del terreno, estos reflejan distintas litologías y en diferentes usos de suelo (figura 15).

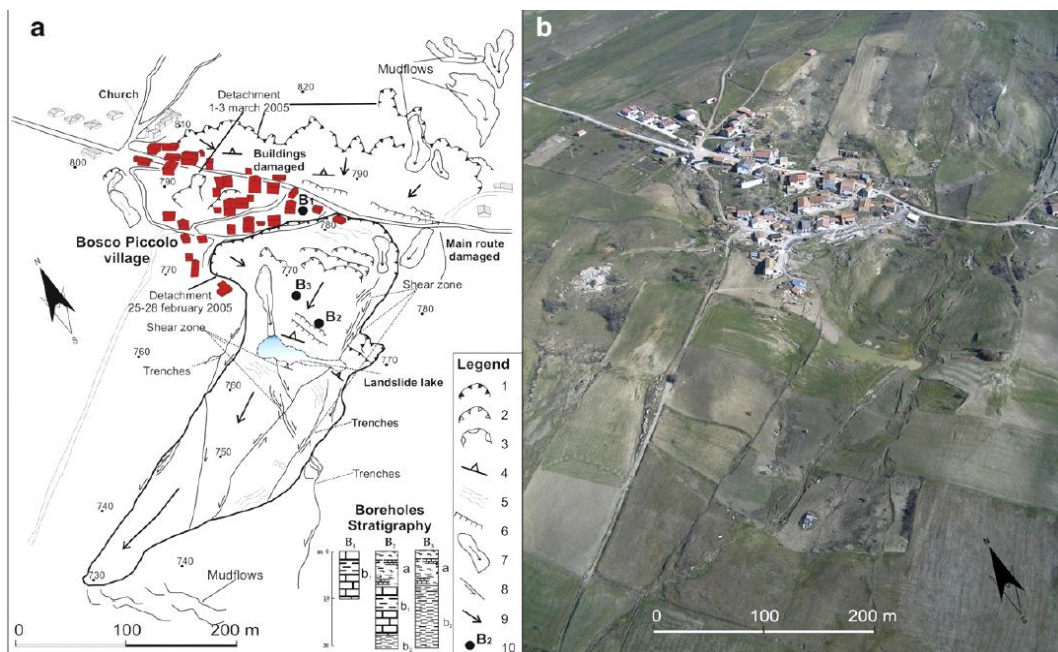


Figura 15. Caracterización geomorfológica de un deslizamiento en Basilicata al sur de Italia, a) Esquema, b) Imagen satelital (Naudet *et al.*, 2008).

La forma de un mecanismo de movimiento depende del tipo (ej. caída de rocas, flujos, deslizamientos o movimientos complejos) y de su velocidad de movimiento. En general el mismo tipo resulta con los mismos signos. Los geomorfólogos pueden interpretar el grado de pendiente e inferir el tipo de movimiento desde el aspecto visual, además dan información cualitativa sobre el grado de actividad, edad e inferir sobre la profundidad de la falla en la pendiente (ej. Zinck, *et al.*, 2001; Naudet *et al.*, 2008). Una nomenclatura para describir las partes del terreno afectado por un PRM ha sido propuesta por Suárez (1988), la cual a continuación se describe (Figura 16):

- **Escarpe principal.** Una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causada por el desplazamiento del material fuera del terreno original.
- **Escarpe secundario.** Superficie inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- **Cabeza.** Partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Cima.** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Corona.** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- **Superficie de falla.** Área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado.
- **Pie de la superficie de falla.** Línea de intersección entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- **Base.** Área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña.** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- **Costado o flanco.** Un lado del movimiento.
- **Superficie original del terreno.** Superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- **Derecha e izquierda.** Deben utilizarse estas palabras refiriéndose al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

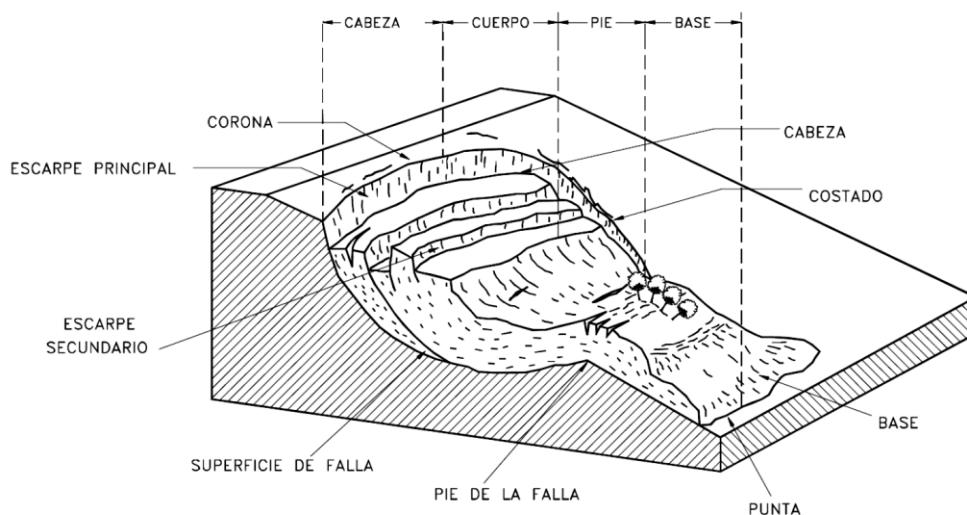


Figura 16. Partes que componen una ladera afectada por un proceso de remoción (Suárez, 1998).

Los avances tecnológicos de software especializado en SIG para caracterizar y visualizar en un mapa una gran cantidad de PRM se han modernizado (Guzzetti, *et al.*, 2012); existen nuevos métodos y plataformas que ayudan a detectar y mapear PRM sobre grandes áreas, estas tecnologías pueden ser agrupadas en tres categorías: 1) Modelos digitales de elevación de alta resolución, 2) Imágenes satelitales, incluyendo imágenes pancromáticas, multiespectrales y de apertura sintética de radar y 3) El uso de nuevas herramientas para facilitar el mapeo cartográfico como lo es el sistema de posicionamiento global (Guzzetti, *et al.*, 2012; ej. figura 17).

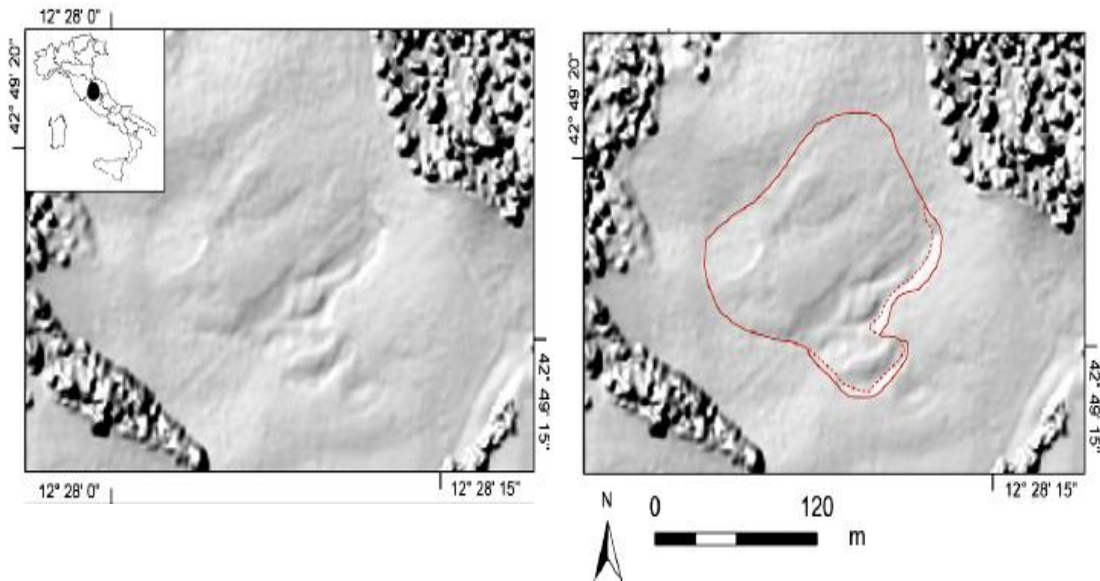


Figura 17. Caracterización geomorfológica de un deslizamiento por medio de un MDE capturado por un laser de mapeo terrestre aerotransportado en Umbría, Italia (Guzzetti *et al.*, 2012).

2.3 Definición de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo

Los procesos de remoción son sucesos naturales que conllevan a un riesgo geológico muy importante, estos fenómenos presentan antecedentes particulares que acontecen cuando existen ciertas características en el terreno, por ello es importante conocer las particularidades del marco conceptual del riesgo, el cual abarca:

La susceptibilidad a PRM hace referencia a la predisposición del terreno de que ocurran movimientos de ladera y no implica el aspecto temporal del fenómeno (Santacana, 2001). Los mapas de susceptibilidad de este fenómeno identifican áreas potencialmente inestables, en ellos no figura la totalidad de zonas predisuestas, ni predicen cuando ocurrirán los procesos analizados (Ayala, *et al.*, 2002). Estos mapas son de gran importancia ya que destacan las zonas donde se necesita realizar estudios más específicos para categorizar las áreas críticas (Villacorta, *et al.*, 2012).

El peligro (P) es la probabilidad de que un fenómeno natural con una cierta extensión, intensidad y duración, se produzca con consecuencias negativas afectando a la población; según el fenómeno, el hombre puede influir en esta probabilidad (Llasat, 2012).

La vulnerabilidad (V) son las características y circunstancias de una comunidad o sistema que los hacen susceptibles a los efectos dañinos del peligro (UNISDR, 2009). Existen diversos aspectos de la vulnerabilidad que surgen de varios factores, tales como físicos, sociales, económicos y ambientales, los cuales varían considerablemente dentro de una comunidad y en transcurso del tiempo; esta característica es de los elementos de interés y es independiente de su exposición (UNISDR, 2009).

El riesgo (R) es la combinación de la probabilidad de que se produzca un fenómeno natural que afecte a la población con consecuencias negativas; el riesgo por un desastre se define como la posible pérdida de vidas humanas, así como las condiciones de salud, los medios de sustento, los bienes y servicios, que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad en particular durante un periodo específico en el futuro. Una forma usual de calcular el riesgo y de generar mapas de riesgo, es considerarlo como el producto del peligro por la vulnerabilidad (ecuación 1; Llasat, 2012).

$$R = V \times P \quad (1)$$

- **Uso de SIG's para el análisis de inestabilidad de laderas**

La cuantificación del riesgo tiene una gran importancia en muchas disciplinas, incluyendo las ciencias de la tierra. La literatura en PRM muestra un gran desarrollo durante la última década gracias a los avances computacionales y SIG's. (Valerio, 2010; Van Westen, *et al.*, 2005; Lee, *et al.*, 2003; Baeza y Corominas, 2001; Luzi, *et al.*, 2000). Con el estudio de los PRM se han mostrado las diferentes formas y tamaños de los diferentes mecanismos, así como su variabilidad y complejidad, por ello la introducción de los SIG's han tenido relevancia en el análisis de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo por dichos procesos. El estudio del terreno con un SIG permite obtener una variabilidad de datos que se pueden integrar y visualizar en una amplia gama de mapas temáticos que son elaborados a partir de una base de datos georeferenciados.

2.4 Métodos de análisis para la inestabilidad de laderas

Debido a los obstáculos y a que no existe un acuerdo específico por parte de los expertos sobre cual enfoque y método es el más adecuado para la zonificación cartográfica de la susceptibilidad por inestabilidad de laderas, parte del presente subcapítulo se centra en el análisis de los diferentes métodos de integración de información que pueden ser empleados para producir mapas de susceptibilidad, tales métodos identifican las causas que potencializan la inestabilidad de laderas mediante la determinación de factores que han causado PRM en el pasado y de ser posible pueden predecir donde y cuando podrían ocurrir eventos futuros (Aleotti y Chowdhury, 1999). Es difícil establecer todos los factores implicados y sus relaciones, por ello se tiene que tener cuidado en el estudio de los elementos que intervienen en la causa-efecto de los PRM, por tal motivo es importante distinguir entre factores predisuestos (intrínsecos) y factores detonantes (Vaunat *et al.*, 1992; Siddle *et al.*, 1991).

Cada metodología se centra en la selección de información útil para un análisis en particular, el cual depende del tipo de mecanismo de movimiento presente en la región, la extensión de la zona de estudio, el objetivo y la escala, así como la fiabilidad y precisión de las fuentes de información; el primer paso para seleccionar una metodología es la recolección de datos, así como su revisión y actualización, teniendo en cuenta las siguientes reglas fundamentales para poder ingresarlas a un SIG (Leroi, 1996):

- ✚ La información debe ser homogénea, es decir, debe tener la misma escala geográfica y sistema de proyección.
- ✚ La información tiene que ser organizada en mapas temáticos.

Además, se debe de incluir información básica como (Chowdhury y Flentje, 1996):

- ✚ Un inventario de PRM existentes, incluyendo su naturaleza, tamaño, ubicación e historia.
- ✚ Toda la información disponible en las investigaciones anteriores del sitio (fotografías aéreas, análisis de campo e imágenes satelitales).
- ✚ Los datos de instrumentación instalada (pluviómetros, piezómetros, termómetro, psicrómetro, entre otros).

La continúa elaboración de metodologías para realizar mapas de susceptibilidad por PRM ha llevado a los expertos de todo el mundo a decretar que cada metodología tiene sus ventajas y desventajas. La elección de un método y su aplicabilidad depende del objetivo

de estudio, la escala de trabajo y la disponibilidad de datos, por tal motivo se clasifican los principales métodos para la evaluación de la susceptibilidad por PRM en dos grandes grupos: métodos cualitativos y cuantitativos (Aleotti y Chowdhury, 1999; figura 18). Dentro de los métodos cualitativos se encuentran el método geomorfológico y heurístico, mientras que en los métodos cuantitativos se encuentran el método estadístico bivariado, estadístico multivariado, el determinístico y el de análisis de redes neuronales. El primer grupo está basado principalmente en la experiencia de expertos con la susceptibilidad, los cuales determinan directamente o indirectamente los factores que intervienen en la inestabilidad de laderas mediante un análisis subjetivo. Mientras que el segundo grupo tiene un enfoque matemático-estadístico, los cuales utilizan factores cuantificables, analizando su relación con los demás factores que intervienen con la inestabilidad de laderas.

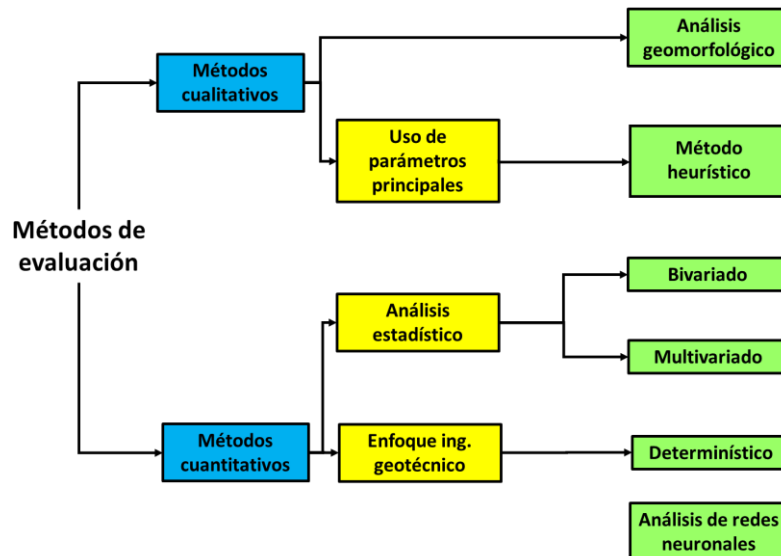


Figura 18. Clasificación propuesta para métodos de evaluación (Tomado y modificado de Aleotti y Chowdhury, 1999).

2.4.1 Método estadístico bivariado

El enfoque estadístico bivariado requiere la selección y cartografía de los factores significativos que intervienen en la inestabilidad y su clasificación para analizar de manera individual las clases respecto al mapa de PRM creando una ponderación, las cuales son determinadas por la densidad de PRM de cada clase de cada factor; para llevar a cabo este análisis es indispensable cierta información que se obtiene mediante (Aleotti y Chowdhury, 1999):

- ✚ Selección y cartografía de los factores significativos y su clasificación
- ✚ La cartografía de los PRM.

- ✚ Superposición de capas de cada factor y los PRM.
- ✚ Determinar la densidad de PRM en cada factor, clase y ponderación de valores.
- ✚ Asignación de valores a los diferentes factores en mapas temáticos.
- ✚ Sobreposición final y cálculo de la susceptibilidad final.

El análisis estadístico bivariado tiene un enfoque cuantitativo en la evaluación de la susceptibilidad con un grado de subjetividad en la ponderación de pesos y la selección de factores (Leroi, 1996). Los modelos generados con este enfoque están basados en una serie de curvas empíricas o tablas de frecuencia, donde se relacionan dos factores significativos con la frecuencia de los PRM, con ello se determinan las condiciones críticas de la estabilidad de laderas (Meinhardt, *et al.*, 2015). Algunos autores utilizan factores como el uso de suelo, pendiente, curvatura de la ladera, la distancia a ríos, densidad de drenaje, vías de comunicación (Yalcin, 2008), orientación de la pendiente, litología, unidades geomorfológicas, tipo de suelo (Zézere, *et al.*, 2008), precipitación y elevación (Zhou, *et al.*, 2002) para determinar la susceptibilidad.

El método de información ponderada (W_i) se define como un enfoque estadístico bivariado con un logaritmo natural donde la densidad de procesos en cada clase es dividida por la densidad de los procesos de todo el mapa (Van Westen, 1997; Yalcin 2008). Este método aventaja en comparación con las demás metodologías (geomorfológico, método heurístico, estadístico multivariado y de redes neuronales) para realizar mapas de susceptibilidad ya que reduce considerablemente la subjetividad de la ponderación de pesos en las clases de cada factor que controla la ocurrencia de los PRM. Los factores que intervienen en la inestabilidad de laderas en la estadística bivariada no son independientes y pueden o no mostrar una alta o baja correlación (Leroi, 1996).

El método W_i está basado en la estadística de correlación (mapa de cruce) de los procesos inventariados y las clases de los diferentes factores que controlan la inestabilidad de una ladera. El método está dividido en un proceso de seis pasos: 1) Realizar el inventario de los PRM que acontecen en la zona de estudio y la selección y cartografía de los factores significativos disponibles que controlan la inestabilidad de las laderas en la región, así como la clasificación de los factores en una serie de clases. 2) Cálculo del peso de cada clase utilizando la estadística de correlación entre la densidad de los procesos de remoción y cada clase, teniendo como resultado una tabla de factores. 3) Reclasificación de las clases en mapas de peso. 4) Realizar un algebra de mapas de los mapas de peso. 5) Obtención del mapa de puntaje (resultado del algebra de mapas). 6) Reclasificación del mapa de

puntaje en clases para generar el mapa preliminar de la susceptibilidad a PRM. 6) Sobreposición del inventario y el mapa preliminar de susceptibilidad para ajustar y obtener el mapa de susceptibilidad final (figura 19).

Análisis estadístico bivariado

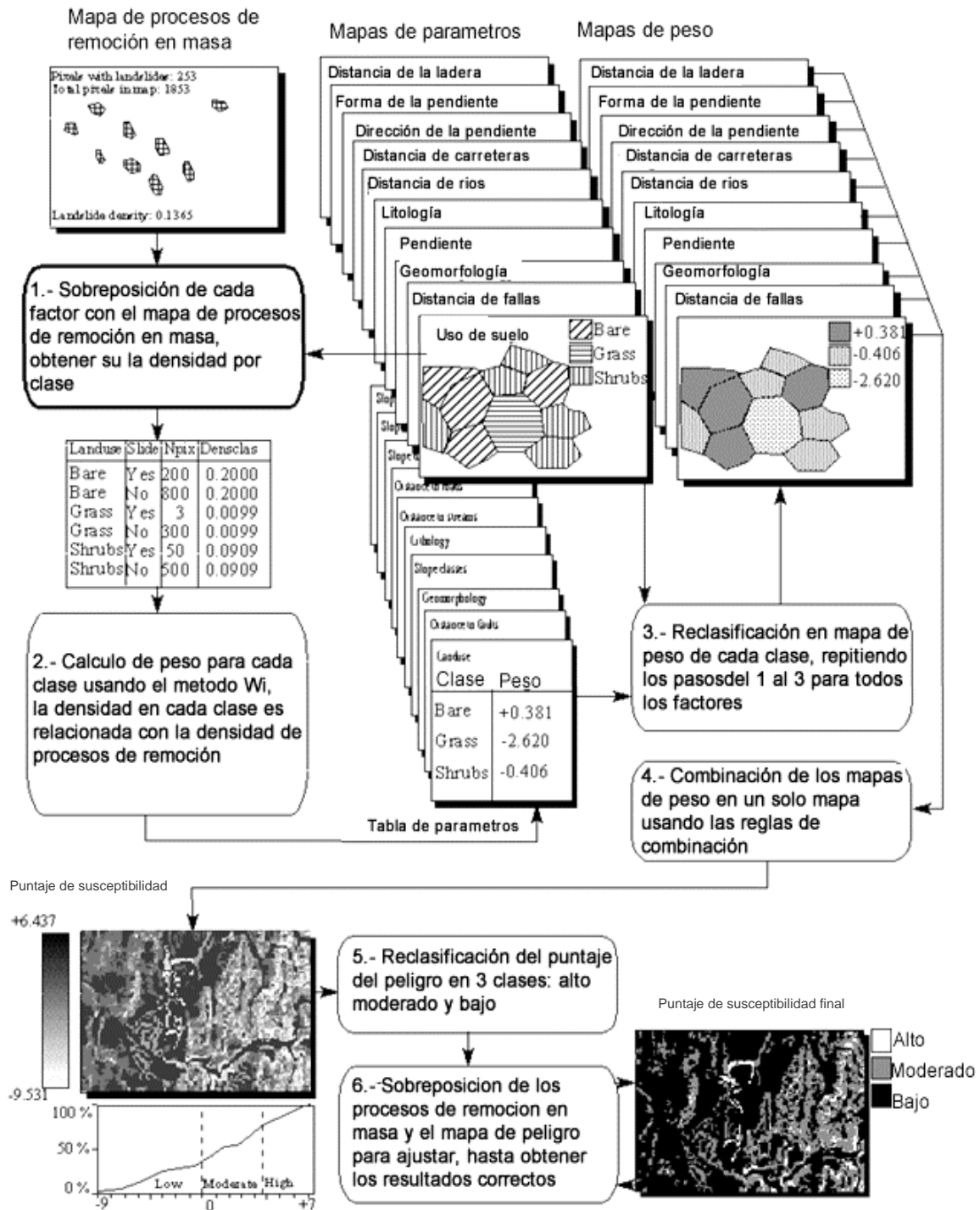


Figura 19. Esquema para realizar un análisis estadístico bivariado (Van Westen, 1997).

La siguiente ecuación da una visión general de esta metodología (ecuación 2).

$$\ln W_{in} = \ln \left(\frac{\text{Densclas}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Npix}(S_i)}{\text{Npix}(N_i)}}{\frac{\sum \text{Npx}(S_i)}{\sum \text{Npix}(N_i)}} \right) \quad (2)$$

Donde:

- W_{in} : es el peso dado a cierta clase de factor.
 Densclas: densidad de pixeles de procesos de remoción dentro de cada clase de factor.
 Densmap: densidad de pixeles del factor en todo el mapa.
 Npix (Si): número de pixeles, que contienen procesos de remoción en cada factor.
 Npix (Ni): número de pixeles totales de una cierta clase.

El logaritmo natural implementado en esta fórmula se utiliza para dar pesos negativos cuando la densidad de los PRM es inferior a la normal y positivo cuando la densidad de PRM sea más alta de la normal (Yalcin, 2008), es decir que:

$W_i < 0$ = la presencia del factor contribuye a la ausencia de los PRM.

$W_i = 0$ = el factor no es relevante.

$W_i > 0$ = la presencia del factor contribuye a la presencia de los PRM.

Como resultado de esta fórmula se obtiene una tabla de parámetros, la cual es el cálculo de la densidad de los PRM respecto a cada clase de cada factor y muestra su correlación (tabla 3).

Tabla 3. Parámetros del método W_i utilizado para las variables de pendiente y PRM; Npix (Ni)= número de pixeles totales de una cierta clase; Npix (Si)= número de pixeles, que contienen procesos de remoción en cada parámetro Densclas= densidad de pixeles de procesos de remoción dentro de cada clase de cada factor; Densmap= densidad de pixeles del factor en todo el mapa (tomado y modificado de Van Westen, 1997).

Pendiente	Npix (Ni)	Npix (Si)	Densclas	Densmap	In W_i
0-10°	168691	1659	0.0098	0.0158	-0.47151253
10-20°	110363	1283	0.0116	0.0158	-0.30423275
20-30°	90429	2028	0.0224	0.0158	0.35282617
30-40°	44987	1320	0.0293	0.0158	0.62159927
40-50°	16122	407	0.0252	0.0158	0.4712142
50-60°	4424	172	0.0389	0.0158	0.90303603
60-70°	857	18	0.021	0.0158	0.28727494
70-80°	594	0	0	0.0158	0
80-90°	552	0	0	0.0158	0
Total	437019	6887			

Utilizando y combinando dos o más resultados ponderados se puede generar un mapa de susceptibilidad y para ello se necesita una normalización de los valores y una clasificación de rangos por medio del valor del W_i . Las restricciones de este método se establecen cuando no se tiene información confiable y no se realiza un exhaustivo análisis de los factores y/o las escalas de la información son diferentes, limitando esta metodología a una escala regional. El análisis bivariado no solo muestra las características generales de los mecanismos de movimiento y su relación con el entorno, sino que revela la variación espacial de tales relaciones. Con este método se reduce considerablemente la subjetividad de las clases que intervienen en la inestabilidad de laderas, por ello se considera rápido y efectivo para realizar mapas de susceptibilidad.

2.5 Comparación de las diferentes metodologías

Durante la investigación de las diferentes metodologías se recopilaron los aspectos de cada una de ellas, las cuales fueron elaboradas por especialistas en susceptibilidad y SIG's; se realizó la actualización de la tabla propuesta por Aleotti y Chowdhury (1999), como resultado se obtuvieron dos tablas comparativas, las cuales señalan sus ventajas, desventajas, factores utilizados y sus resultados a escala regional mayores a 1: 20 000 (anexo 1) y a escala local menor a 1:20 000 (anexo 1), así como los factores utilizados (anexo 2). La elaboración de las tablas facilita la comparación y el análisis de las diferentes metodologías que existen para realizar mapas de susceptibilidad por PRM, las cuales se describen a continuación de manera general:

- Los métodos geomorfológicos se basan en la determinación de las condiciones de inestabilidad de laderas mediante técnicas geomorfológicas, cartográficas y de zonificación de los PRM. La principal ventaja es la validez y detalle del análisis, así como el mapa resultante, en el caso de ser realizados por un experto. El inconveniente de este método es el alto grado de subjetividad, la cual depende de la experiencia del investigador. La información recopilada de este método para la elaboración de la tabla comparativa se encuentra en los trabajos de Leroi (1996); Aleotti y Chowdhury (1999); Zinck, *et al.*, (2001); Naudet *et al.*, (2008); Guzzetti, *et al.*, (2012); Borgomeo, *et al.*, (2014).
- Los métodos heurísticos se basan en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de procesos

de remoción. El principal inconveniente de este método radica en el mayor de los casos, en el conocimiento disponible entre los factores que se relacionan con la inestabilidad de las laderas y los PRM, de tal manera que el análisis es inadecuado y subjetivo ya que depende de la experiencia del investigador. El uso y la información recopilada de este método para la elaboración de la tabla comparativa puede ser encontrado en los trabajos de Stevenson (1977); Van Westen (1994); Aleotti y Chowdhury (1999); Soters y Van Westen (1996); Temesgen, *et al.*, (2001); Chau, *et al.*, (2004); Enrique, *et al.*, (2008); Muñiz, *et al.*, (2012); Villacorta, *et al.*, (2012); Carrion, *et al.*, (2012).

- Los métodos estadísticos bivariados y multivariados dependen de la veracidad y resolución de la información que se utilice para su análisis, estas metodologías ayudan a extraer la información que podría ser evidente, donde utilizar un SIG es de vital importancia para determinar las clases de los factores que intervienen en la inestabilidad de laderas y los PRM, reduciendo considerablemente la subjetividad de ponderación de las clases que intervienen para realizar los mapas de susceptibilidad. Los métodos bivariados están basados en las relaciones observadas entre cada clase de cada factor y la distribución de los PRM, estos métodos se utilizan cuando abunda la información tanto cualitativa como cuantitativa, siendo este método el más útil para investigar las relaciones que tienen los PRM y los factores que los controlan en la región del PGCMH, el uso de esta metodología cumple con el objetivo de estudio que se plantea en esta investigación. El uso y la información recopilada del método estadístico bivariado para la elaboración de la tabla comparativa puede ser encontrado en los trabajos de Leroi (1996); Van Westen (1997); Aleotti y Chowdhury (1999); Zhou, *et al.*, (2002); Yalcin (2008); Zézere, *et al.*, (2008); Meinhardt, *et al.*, (2015) y para el modelo multivariado se recopiló información de los trabajos de Aleotti y Chowdhury (1999); Van Westen (2000); Hervás y Cano (2001); Roa, (2006); Muñiz y Hernández, (2012).
- Los métodos determinísticos se utilizan para el análisis de estabilidad de una ladera o un talud en concreto; se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos tendiendo, una base física y matemática, las cuales representan una gran ventaja respecto a las demás metodologías. Los datos de entrada son realizados por ensayos de laboratorio y se utilizan para determinar el factor de seguridad de una ladera. Su principal inconveniente es el tiempo que se invierte en la zonificación y su extrapolación a áreas regionales. El uso y la

información recopilada del método para la elaboración de la tabla comparativa puede ser encontrado en los trabajos de Aleotti y Chowdhury (1999) Mark y Van Westen (1995); Vallejo, *et al.*, (2002).

- Los análisis de redes neuronales son una compleja estructura matemática que se utiliza cuando se desconoce por completo el área de estudio, los factores que están relacionados con la inestabilidad de laderas y los PRM. Este método permite al investigador desarrollar un modelo de datos procesados capaz de predecir los diferentes mecanismos de movimiento. El principal inconveniente del método radica en su expansión a otras áreas inestables ya que su aplicación es en zonas muy concretas. El uso y la información recopilada del método para la elaboración de la tabla comparativa puede ser encontrado en los trabajos de Garrett, (1994); Lee, *et al.*, (2003); Pradhan y Lee (2009).

2.6 Obras de mitigación ante procesos de remoción en masa

Estas son obras de ingeniería que se realizan para prevenir y mitigar los peligros existentes por PRM en las vías de comunicación, la ejecución de estas obras, como cualquier obra de infraestructura pueden generar un impacto negativo sobre el medio ambiente, por ello se debe de tener en cuenta recomendaciones técnicas a fin de evitar, reducir, corregir o compensar tales impactos (COPECO 2013). Existe una gran variedad de obras de mitigación, los siguientes ejemplos se encuentran dentro del proyecto.

Terraceo: las terrazas tienen por objetivo el control del agua de escorrentía, cuando se construyen terrazas, el talud queda dividido en varios bloques de comportamiento independiente, dando lugar a la estabilidad (figura 20).

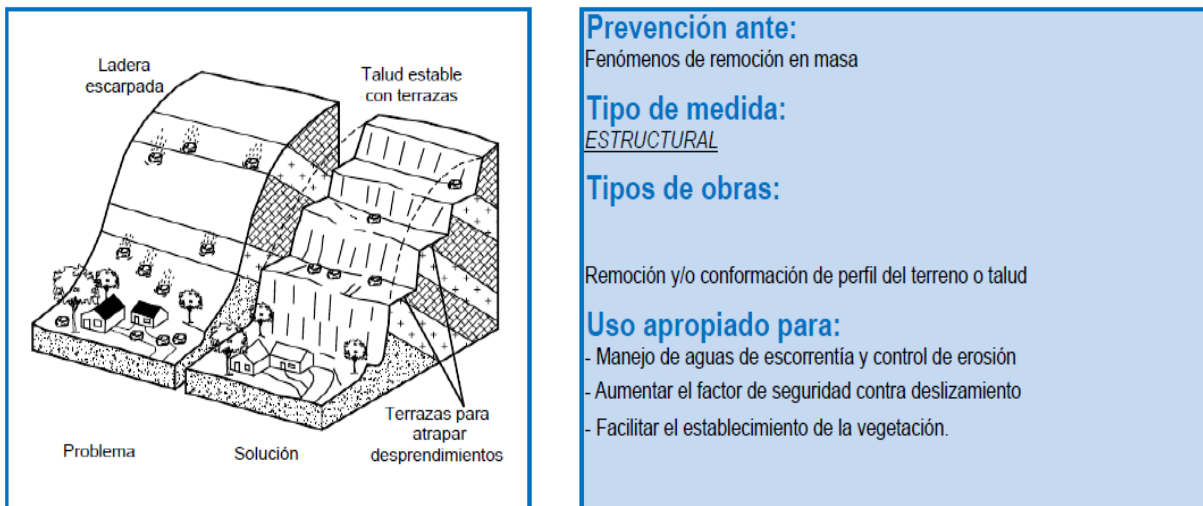


Figura 20. Principales características del terraceo (COPECO, 2013).

Zanjas de coronación: están ubicadas en la corona o en la parte alta del talud y son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas de lluvia, evitando su paso por el talud. Esta zanja no debe construirse muy cerca al del borde superior del talud, para evitar que se convierta en una guía de deslizamiento en cortes recientes o en una nueva superficie de falla o se produzca falla en la corona del talud o escarpe (figura 21).

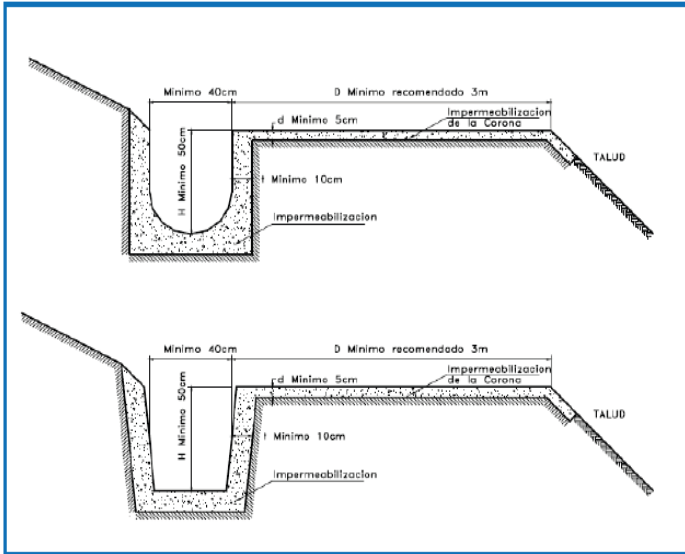


Figura 21. Principales características de las zanjas de coronación (COPECO, 2013).

Prevención ante:

Fenómenos de remoción en masa

Tipo de medida:

ESTRUCTURAL

Tipos de obras:

Control de drenaje e infiltración de aguas superficiales

Uso apropiado para:

- Estabilidad de taludes abatiendo el nivel freático.

Drenes horizontales: los drenes horizontales de penetración transversal constituyen un sistema de subdrenaje, que consiste en la introducción de tuberías agujeradas e insertadas transversalmente en los taludes y eventualmente en terraplenes para aliviar presiones de poros (figura 22).

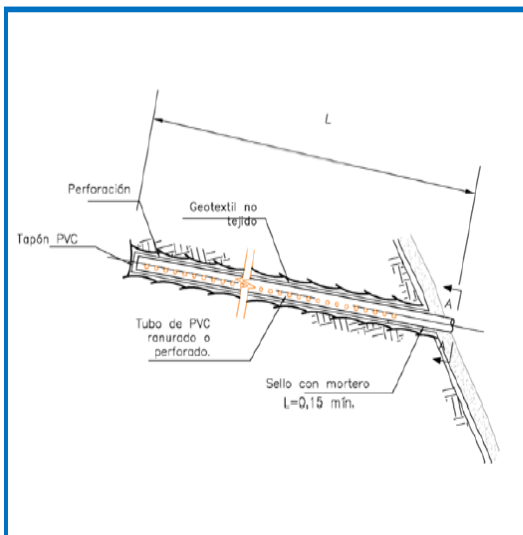


Figura 22. Principales características de drenes horizontales (COPECO, 2013).

Prevención ante:

Fenómenos de remoción en masa

Tipo de medida:

ESTRUCTURAL

Tipos de obras:

Control de drenaje e infiltración de aguas subsuperficiales

Uso apropiado para:

- Estabilidad de taludes abatiendo el nivel freático.
- Control de escorrentía superficial.
- Sacar el agua del talud disminuyendo la presión de poros.

Muro de contención: es una estructura sólida hecha a base de concreto reforzado que está sujeta a flexión por tener que soportar empujes horizontales de diversos materiales, es una estructura continua de forma activa o pasiva que produce un efecto estabilizador sobre una masa de terreno (figura 23).



Prevención ante:

Fenómenos de remoción en masa

Tipo de medida:

ESTRUCTURAL

Tipos de obras:

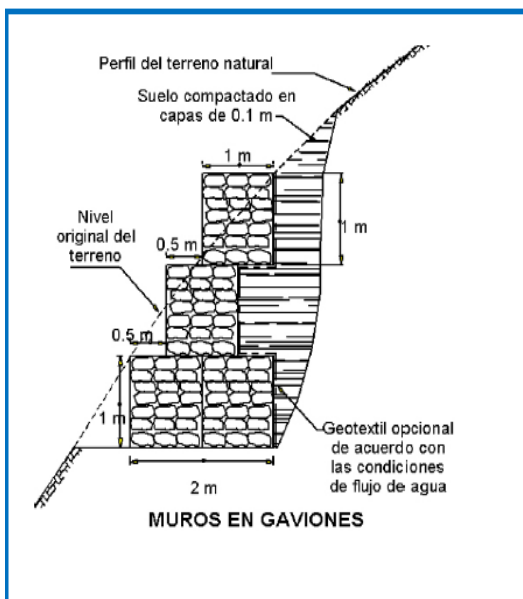
Estructura de contención

Uso apropiado para:

- Reducir el empuje horizontal de tierras
- Corregir movimientos de pequeña magnitud
- Controlar movimientos en taludes empinados en la base
- Disminuir la extensión de la falla de grandes masas
- Soportar lateralmente los rellenos para bermas
- Controlar deslizamientos superficiales
- Limitar zonas de relleno

Figura 23. Principales características del muro de contención (COPECO, 2013).

Muro en gaviones: esta es una estructura de gravedad que consiste en una capa de forma rectangular de malla hexagonal de tiple torsión elaborada con alambre galvanizado. Los gaviones se rellenan con piedra de cantero o cualquier material similar que se pueda obtener del terreno próximo a la obra (figura 24).



Prevención ante:

Fenómenos de remoción en masa y erosión

Tipo de medida:

ESTRUCTURAL

Tipos de obras:

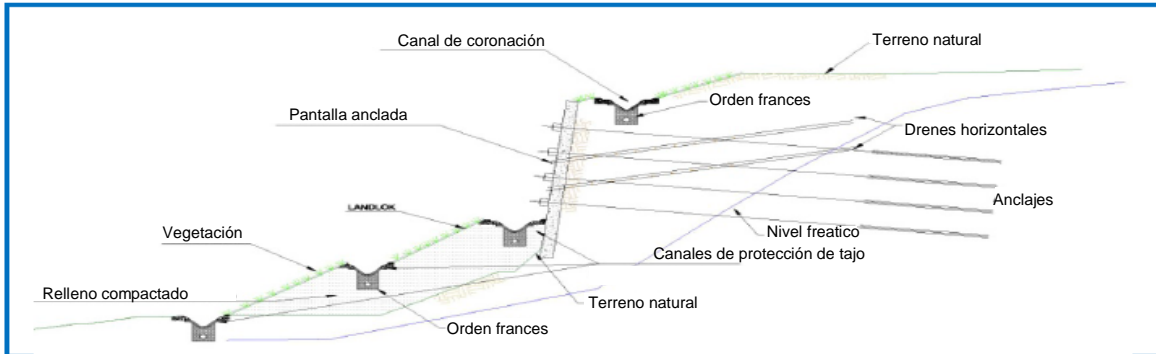
Estructura de contención

Uso apropiado para:

- Estabilización de taludes
- Prevenir la erosión en la ribera de los ríos
- Muro de contención en vías donde el corte del terreno es inestable y presenta algunos niveles de agua de escorrentía.
- Difíciles condiciones de construcción, ya que el armado por módulos permite que se disponga el muro de diferentes forma.
- Estabilizar terraplenes
- Problemas de infiltración y/o suelos no cohesivos

Figura 24. Principales características de muros en gaviones (COPECO, 2013).

Muros anclados: es un sistema constructivo de muros de retención con anclajes activos o pasivos utilizados para el aseguramiento de cortes en excavaciones o la estabilización de taludes. Los anclajes son utilizados para limitar el desplazamiento de la masa de suelo que pueda ocasionar daños a estructuras próximas. El anclaje resiste la carga de tensión por medio de la fricción entre la lechada de inyección del anclaje y el terreno (figura 25).



Prevención ante:
Fenómenos de remoción en masa

Tipo de medida:
ESTRUCTURAL

Tipos de obras:
Estructura de contención

Uso apropiado para:

- Estabilización de cortes de taludes para ampliación de vías
- Reparación de fallas de borde de vías
- Excavaciones para sótanos de edificios en zonas urbanas
- Terraceo y nivelación del terrenos en la zona urbana con topografía irregular.
- Rehabilitación estabilización de estribos de puentes.

Figura 25. Principales características de muros anclados (COPECO, 2013).

Enmallado: este tipo de obra es empleada para la estabilización de taludes la cual consta de una malla de alambre de acero de alta resistencia a la tracción con un sistema de placas de fijación y anclajes (figura 26).



Prevención ante:
Fenómenos de remoción en masa y Erosión

Tipo de medida:
ESTRUCTURAL

Tipos de obras:
Estructura de Contención para suelos

Uso apropiado para:

- Es utilizado en condiciones de inestabilidad cercanas a la superficie. Si el subsuelo está propenso a la meteorización se necesitara tomar medidas adicionales para evitar el aflojamiento y la erosión.
- Es aplicable a taludes de tierra así como a taludes de roca suelta o meteorizada con alto grado de desintegración superficial.

Figura 26. Principales características del enmallado (COPECO, 2013).

Capítulo III Materiales y método

La metodología de este trabajo consistió en 2 etapas; en la primera se generó el mapa de susceptibilidad regional del PGCMH utilizando el método de información ponderada (Wi), que posteriormente se empleó para determinar la susceptibilidad de las vías de comunicación del PGCMH implementando un SIG; la segunda etapa utilizó de base el mapa regional de susceptibilidad obtenido previamente para corroborar los diferentes niveles de susceptibilidad que tienen las vías de comunicación, que de forma secuencial y analítica se utilizó para realizar los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo para carreteras, en conjunto esta metodología se realizan en el municipio de Pachuca de Soto.

El software utilizado es el Arcgis versión 10.1, en sus módulos de ArcMap y ArcCatalog pertenecientes a la empresa ESRI en una computadora con Windows 7, con un procesador Inter ® Core ™ i5-3210M con 2.50 GHz y una memoria RAM de 12 Gb en un sistema operativo de 64 Bits. La información utilizada en esta metodología tiene un datum WGS84, en un sistema coordinado UTM con un tamaño de pixel de 30 metros y varias escalas de visualización; para la vista regional se tiene una escala 1:250 000 del territorio del PGCMH y hasta de 1:50 000 para los mapas municipales, así como escalas variadas para las vialidades locales y el trabajo de campo, las cuales son menores a 1:20 000.

3.1 Primera etapa

La metodología diseñada para realizar la obtención del mapa de susceptibilidad a PRM del PGCMH se basó en el método Wi, desarrollado en un SIG, el cual consistió primero, en el análisis del contenido de imágenes satelitales de la plataforma Google Earth para realizar el inventario cartográfico de los procesos de remoción que se encuentran presentes en la zona de estudio. Posteriormente se buscó y recolectó la información cartográfica existente de los factores que controlan los procesos en la base de datos de dependencias gubernamentales tales como Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los datos obtenidos fueron variados en proyecciones geográficas, escalas y disposiciones y para manejarlos dentro de un SIG, fue necesario tomar en cuenta las reglas fundamentales, homogenizando la información en un mismo estándar por medio de procesos digitales (digitalización, cambio de datum, georreferenciación, actualización y corrección) generalizando en formato raster con un tamaño de pixel de 30 m debido a la resolución del MDE, el cual sirvió de base para realizar subproductos temáticos. Una vez

obtenidos los PRM inventariados y los factores que propician la inestabilidad en el PGCMH se aplicó el método Wi para obtener el mapa de susceptibilidad regional, que posteriormente se utilizó para mostrar la relación entre las vías de comunicación y la susceptibilidad. A continuación se describen los materiales utilizados en esta etapa.

- **La plataforma de Google Earth**

Las imágenes que utiliza Google Earth son escenas procedentes de los satélites Landsat y Spot para las vistas panorámicas que abarcan el globo terráqueo o su disco orbital; y de los satélites de alta resolución QuickBird e Ikonos para los de zoom a detalle (Pérez y Muñoz, 2006). Adicionalmente esta plataforma tiene fotografías a nivel de calle o carretera en 360° de movimiento horizontal y 290° en movimiento vertical, la cual se conoce como Google Street View. Para la región del PGCMH el Google Earth mostró imágenes del satélite Spot 5 con fecha de toma de Noviembre de 2011 y Junio de 2012 así como fotografías de alta resolución QuickBird (Digital Globe) con fechas de toma de Noviembre de 2004 y Julio de 2009 (figura 27 y 28).

3.1.1 Inventario de procesos de remoción en masa (Inv)

El inventario consistió en un análisis visual detallado con vistas aéreas de 1 y 2 km de altura sobre todo el territorio y fotografías panorámicas de las vías de comunicación en las que se tienen problemas de inestabilidad, esto a través de la plataforma de Google Earth. Se consideraron los criterios y rasgos geomorfológicos descritos por Suárez (1998) y Guzzetti, *et al.*, (2012) para delimitar los procesos de remoción en polígonos cerrados. En el área de estudio se identificaron caídas de rocas, deslizamientos, flujos y movimientos complejos, los cuales se describen a continuación de manera general para ejemplificar las zonas en las que se tienen estos tipos de procesos. Los polígonos fueron procesados e incorporados a un SIG en formato vectorial de los cuales se presenta una tabla de atributos asociados a este inventario (coordenadas, tipo de mecanismo, perímetro y área; anexo 3), posteriormente fueron transformados en formato raster para homogenizar con las demás capas temáticas para su análisis con el método Wi. Debido a las limitaciones en la investigación, a la extensión del área de estudio y a la accesibilidad de los PRM no fue posible trabajar en campo para identificar y analizar los materiales involucrados en los diferentes mecanismos de movimiento, es por ello que la realización del inventario está limitado a las imágenes que despliega la plataforma de Google Earth (figura 29).

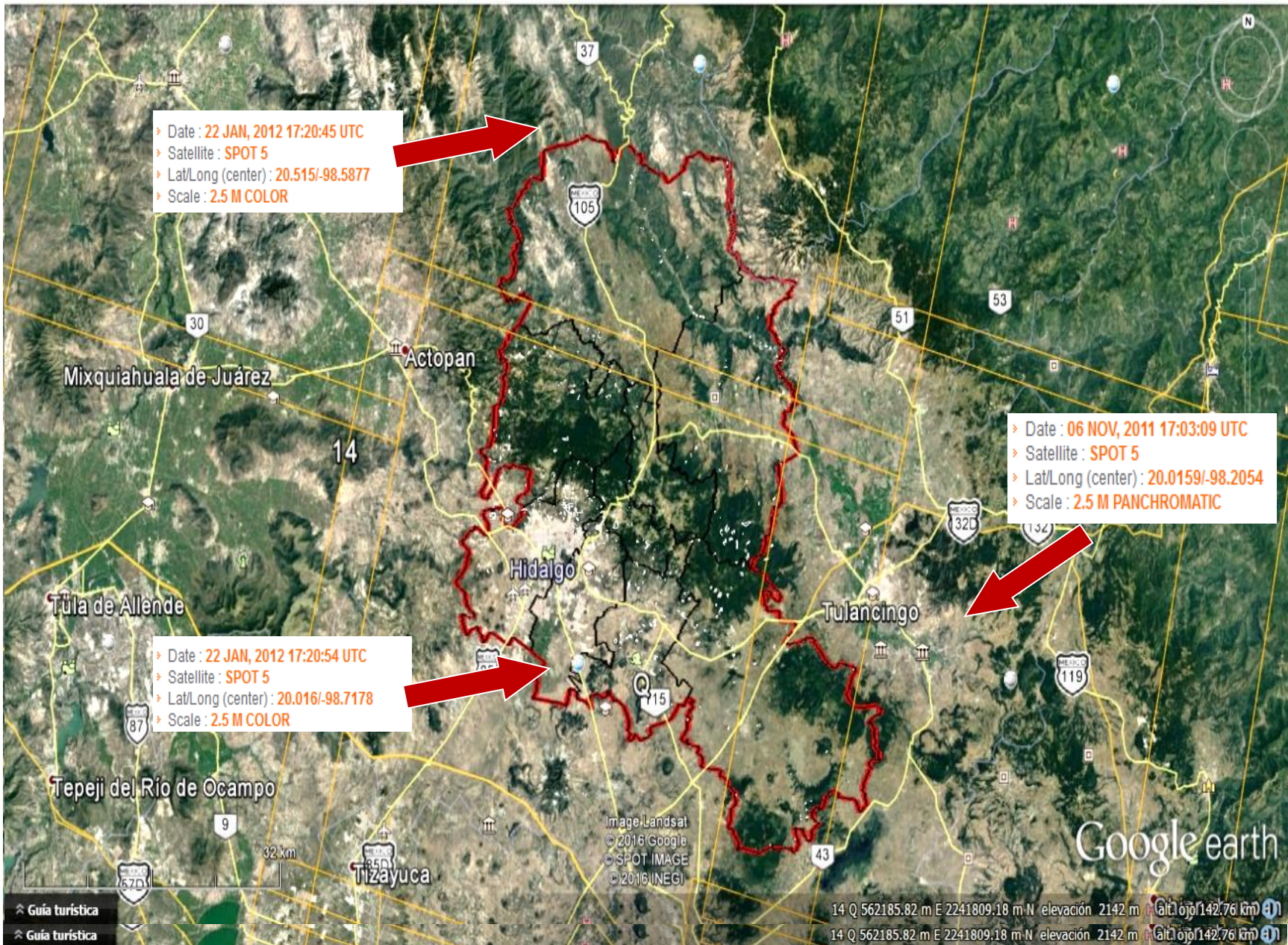


Figura 27. Imágenes Spot 5 (recuadros de color naranja) que se encuentran en la plataforma de Google Earth para el área del PGCMMH (en color rojo), estas imágenes muestran un traslape para cubrir todo el territorio (fuente: Google Earth).

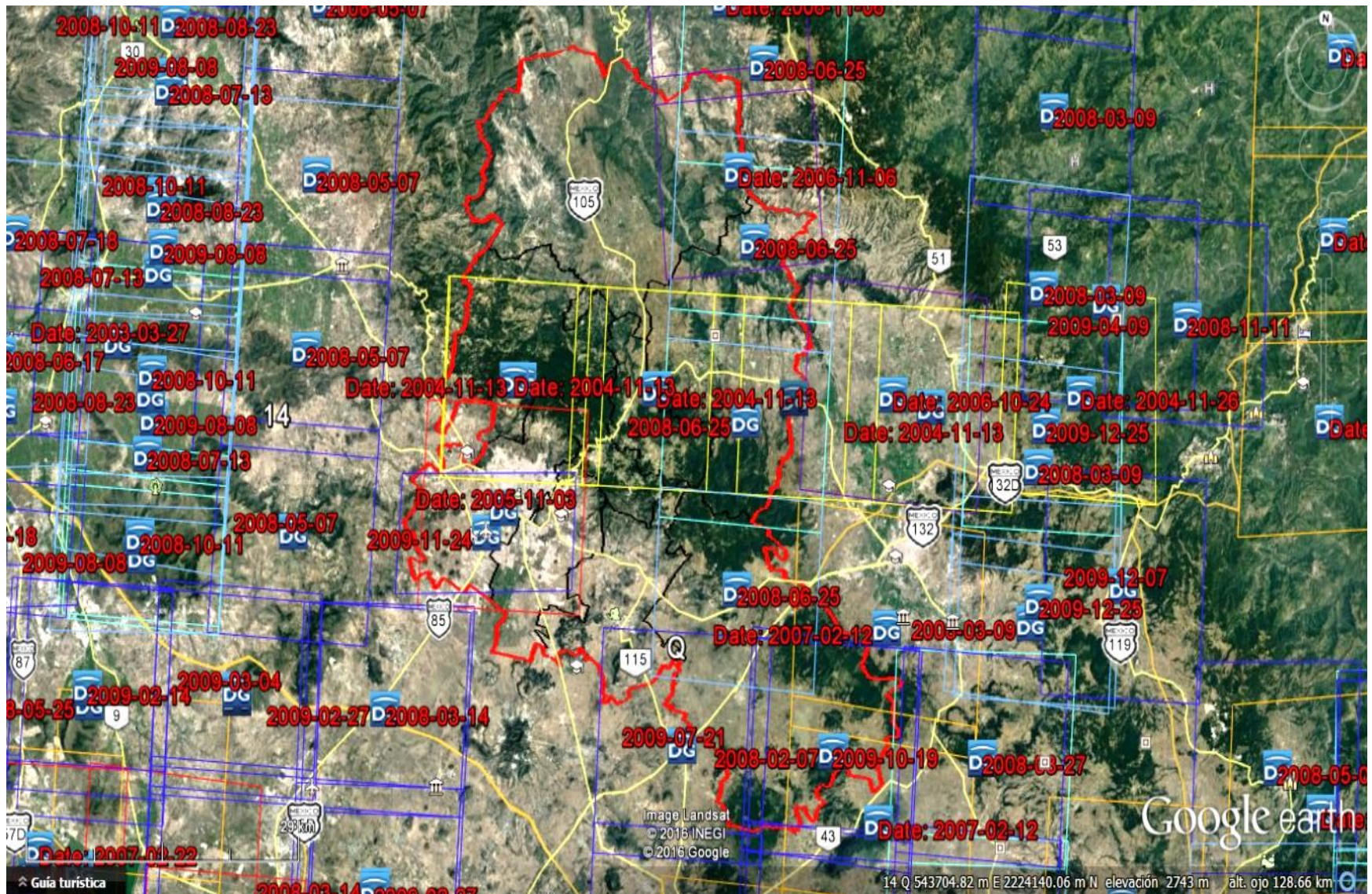
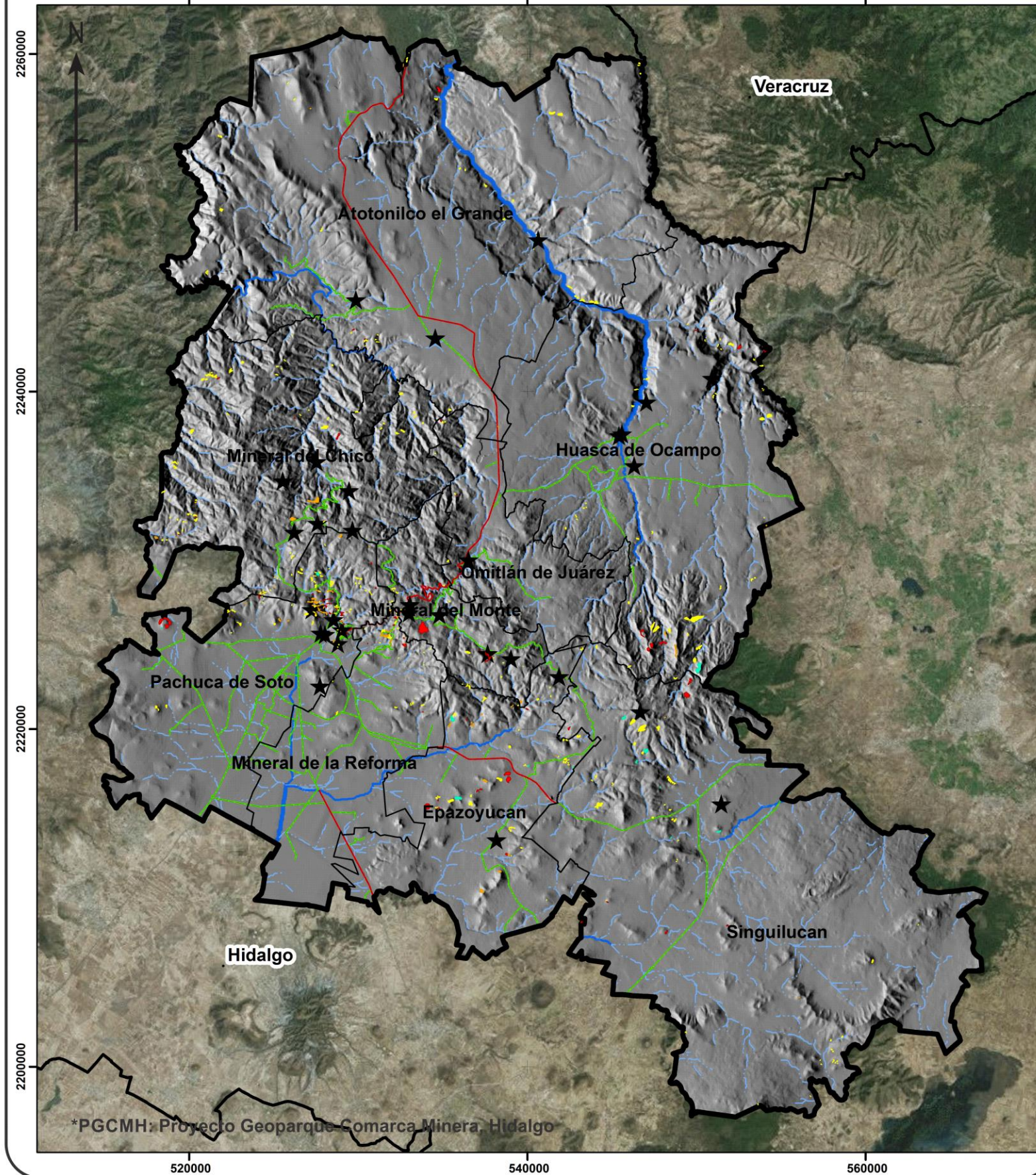


Figura 28. Galeria de imágenes Digitalglobe para el territorio del PGCMH (se muestra el PGCMH con un contorno rojo), las cuales son imágenes de alta resolución pertenecientes a los satélites QuickBird e Ikonos, las áreas dentro de los recuadros de color amarillo representan una imagen con fecha de toma del 2004, las de color rojo una fecha de toma del 2005, las de color morado imágenes con fecha de toma del 2006, las de color naranja imágenes con fecha de toma del 2007 y las de color azul varían en la fecha de toma que van desde el 2008-2009 (fuente: Google Earth).

Mapa de procesos de remoción en masa del PGCMH



Simbología

Limites Políticos

- Área del PGCMH*
- Municipios
- Estados
- Zona urbana
- Geositios

Hidrología

- Corriente intermitente
- Corriente perenne

Vías de comunicación

- Carretera federal
- Carretera estatal

Procesos de remoción en masa

- Caída de rocas
- Deslizamientos
- Flujos
- Complejos

Escala: 1:250 000



Fuente: INEGI 2013

Fecha edición: 2017

*PGCMH: Proyecto Geoparque Comarca Minera, Hidalgo



Figura 29. Mapa de procesos de remoción en masa en el que se muestran los diferentes mecanismos de movimiento que se tiene en el PGCMH.

▪ Caída de roca

Las zonas que presentaron este tipo de PRM en el PGCMH se observaron principalmente en escarpes, peñascos, acantilados y cortes de talud realizados para las vías de comunicación. En la vista área sobre la sierra de Pachuca y en la barranca de Metztitlán se asociaron a zonas con fuerte pendiente ($>40^\circ$) a lo largo de una altitud más o menos constante, en la cima de las laderas regularmente se tiene una escasa cubierta arbórea y en la base se aprecian fragmentos de roca de diferentes tamaños. Las áreas en las que se generan caída de rocas dentro del proyecto se identificaron por que el relieve se interrumpe abruptamente en su continuidad del paisaje con una gran altura y una rugosidad de color gris (figura 30).

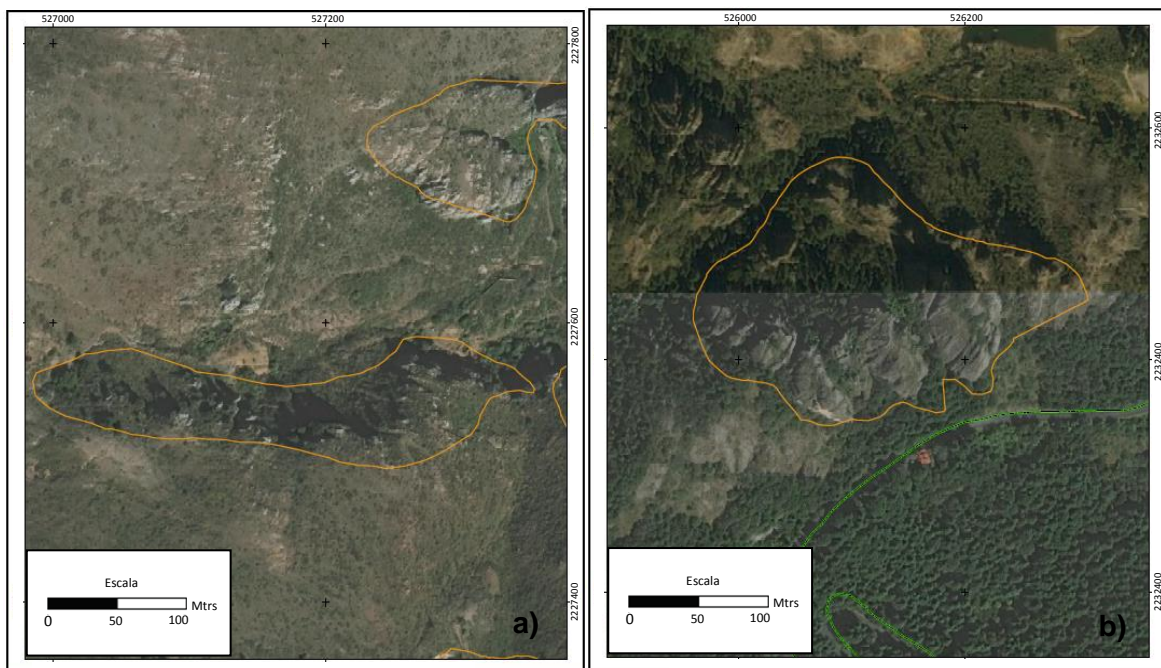


Figura 30. Zonas con caída de rocas. a) Zonas en la que se tienen depósitos de caída de rocas a la base, b) Se muestra una zona que se encuentra muy cercana a la vía de comunicación Pachuca - Mineral del Chico marcada en verde.

En las vías de panorámicas se apreciaron cortes de talud con alturas variadas desde 1 m hasta 15 m en las que se tienen caídas de rocas de diferentes tamaños relacionadas con distintos tipos de litologías, estas zonas regularmente en la vista área no presentaron una cubierta arbórea sobre el talud. Ocasionalmente se observó que existen zonas con diferentes obras de ingeniería para mitigar el problema que se tiene por caída de rocas que en la vista área estas tienen una tonalidad gris claro, por ello se delimitaron estas como zonas de inestabilidad (figura 31).

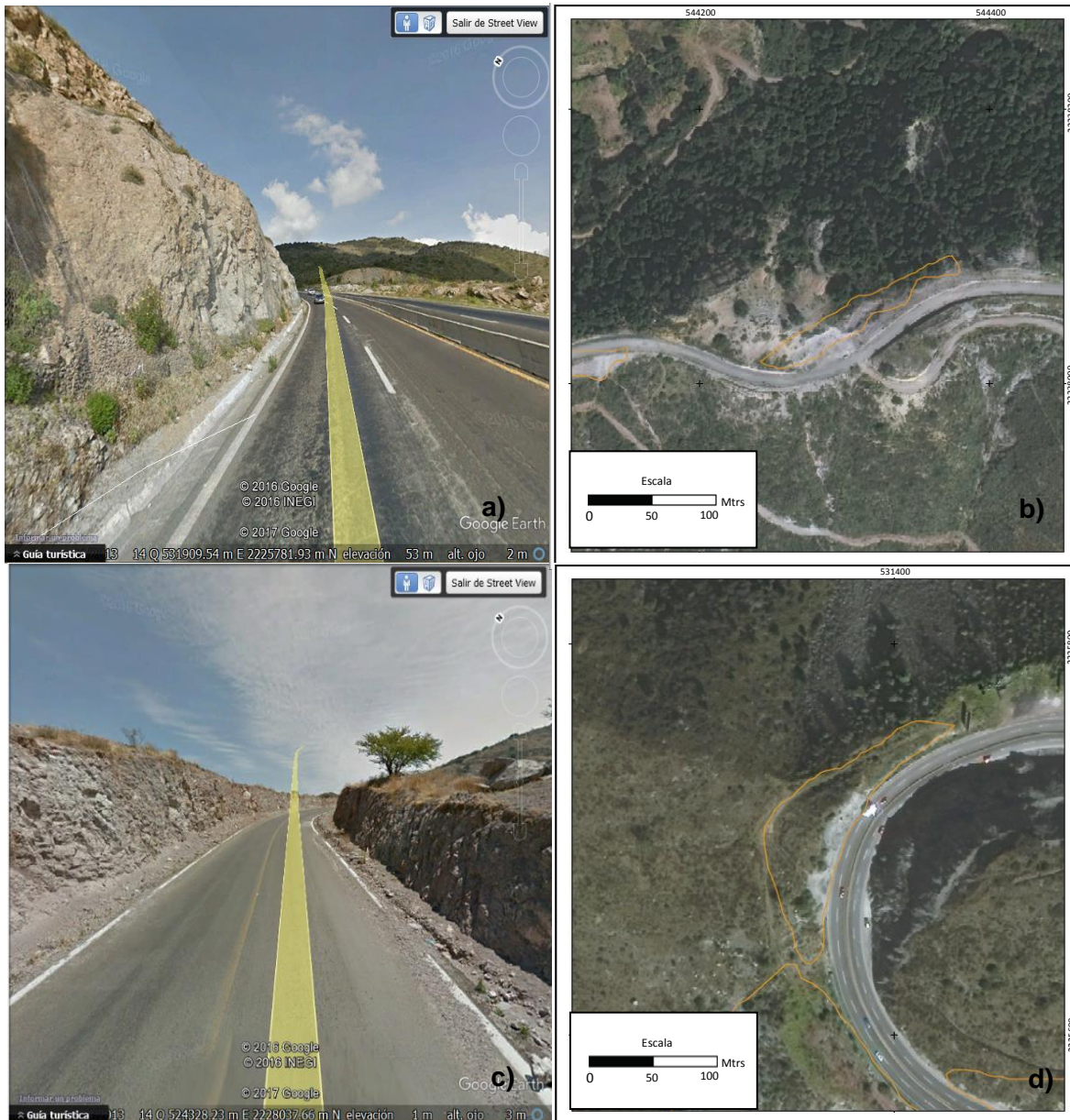


Figura 31. Zonas con caída de roca. a) y b) se observa la vista panorámica y su vista aérea en un tramo de la carretera Pachuca-Tampico, c) y d) vista panorámica y su vista aérea en un tramo de la Avenida Sonora.

▪ Deslizamientos

Con la vista aérea en la región del PGCMH se apreciaron deslizamientos con distintas áreas de cobertura, con elementos bien definidos de las características de este mecanismo de movimiento como la cima, corona de deslizamiento, escarpes, flancos y una zona de depósito. Estos movimientos se lograron identificar por medio del cambio morfológico de la pendiente reflejado en la rugosidad del terreno y de la cobertura arbórea que se tiene

alrededor. En algunas ocasiones estos se encontraron muy cerca de las vías de comunicación y de pequeñas manchas urbanas, que con la ayuda de las fotografías panorámicas en algunos casos se lograron corroborar. También se determinaron zonas con deslizamientos antiguos, con la vista aérea estos presentan una ligera rugosidad, con distinta vegetación y con elementos característicos como sus flancos y su zona de depósito, en la porción norte de la Sierra de Pachuca se tiene urbanización asentada sobre estas áreas consideradas como zonas críticas (figura 32).

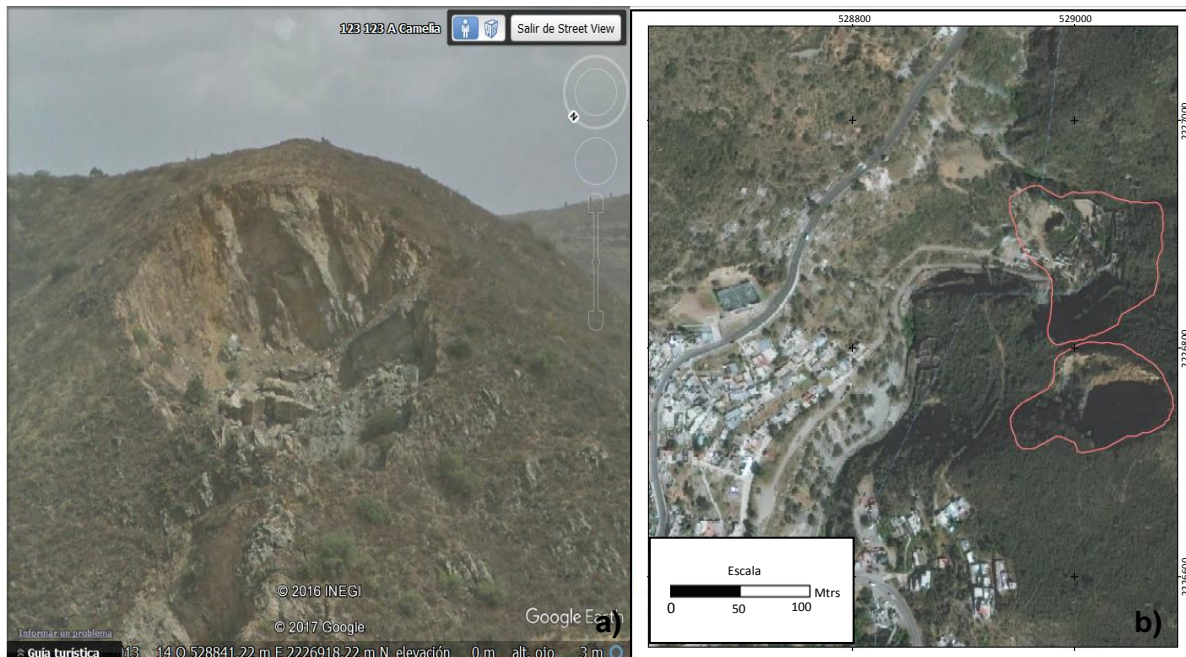


Figura 32. Con un deslizamiento a) Deslizamiento observado en vista panorámica, b) Deslizamiento observado en vista aérea sobre la carretera Pachuca – Estanzuela - Las Palmas.

▪ Flujos

Estos mecanismos de movimiento abarcaron diferentes dimensiones que van desde los 10 m hasta los 100 m de largo, estos se observaron en la vista aérea con formas bien definidas, a la cima con una cicatriz mayor que caracteriza su origen de forma cóncava, tienen un cuerpo principal alargado y en ocasiones ancho siguiendo el drenaje natural del relieve, también se observaron lóbulos en la zona de depósito, los cuales tienen una forma convexa, además en todo el cuerpo de estos movimientos no se tiene vegetación. Estas zonas se asociaron principalmente con el uso de suelo agrícola de temporal y se originaron en zonas deforestadas sobre las partes altas de las laderas, estos depósitos tienen tonalidades que varían de color café claro a gris con una ligera rugosidad en su extensión contrastando con las áreas de alrededor. Se encontraron regularmente en la barranca de Metztitlán, en la sierra de Pachuca y algunas partes de los lomeríos (figura 33).

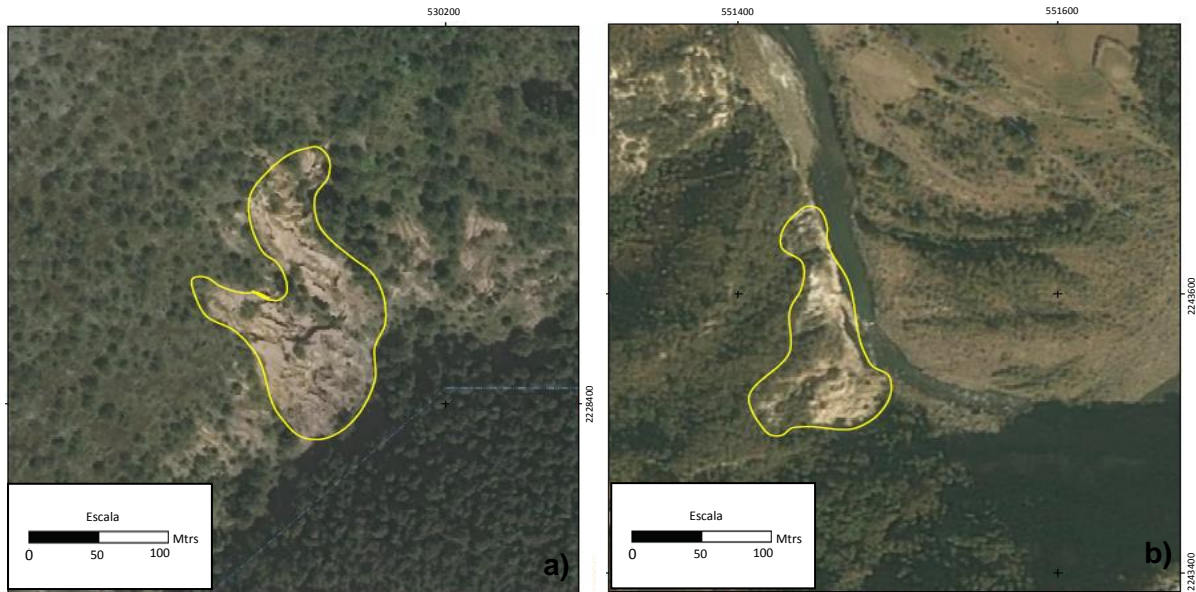


Figura 33. Flujos en vista aérea. a) Se observa un flujo con una cima irregular de tonalidad café con una ligera rugosidad, b) Se observa un flujo con tonalidades de café y gris, en las que se tiene movimiento de material hacia la parte baja en donde circula el río Venados de la Barranca de Metztlán.

▪ Complejos

De acuerdo a sus características estos movimientos ocurren cuando se tiene dos o más mecanismos de movimiento en la misma zona. En el PGCMH se observaron zonas de deslizamientos en las que una porción se tiene como flujo; en otros lugares como los peñascos donde se tiene caída de rocas se encuentran flujos de color gris sin una cobertura arbórea ladera arriba (figura 34).

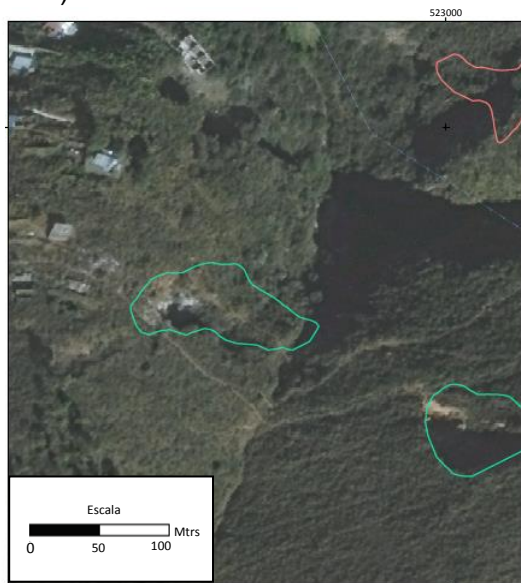


Figura 34. En la vista aérea se observan dos movimientos complejos en contorno azul, los cuales se caracterizan presentar un deslizamiento y flujos.

3.1.2 Información base

- **Modelo Digital de Elevación (MDE)**

El MDE para la región del PGCMH tiene fecha de edición de 2013 y se encuentran en la base de datos del INEGI, este modelo tiene una cobertura territorial conforme al formato cartográfico mexicano a escala estatal con una resolución espacial de 15 m, 30 m, 60 m, 90 m y 120 m en una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y un datum ITRF92 (figura 35). Fue necesario hacer un procesamiento digital al modelo original con una resolución de 15 m que consistió extraer el área de estudio, realizar un remuestreo (resampling) del tamaño del pixel a 30 m x 30 m y transformar el datum a WGS84, esto con el fin de corregir los errores y homogenizar en el mismo sistema coordinado los subproductos con el resto de mapas que se utilizaron para determinar la susceptibilidad.

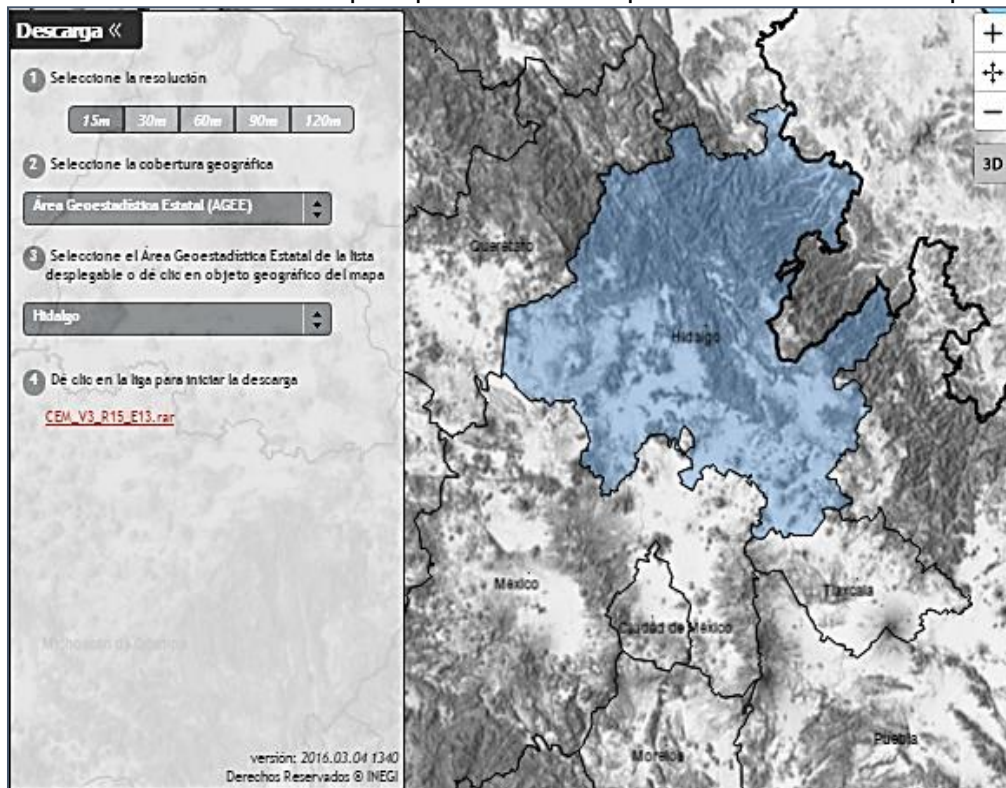


Figura 35. Se muestra la base de datos de INEGI del catálogo de MDE por estado con las opciones de descarga de las diferentes escalas, en azul se observa la selección para el estado de Hidalgo con una resolución de 15 m (Fuente: <http://www.inegi.org.mx/> INEGI, 2016).

Las características del MDE utilizado en este estudio son: formato raster, resolución espacial de 30 x 30m de cada pixel, 1776 columnas y 2157 filas, proyección UTM, datum WSG84. Este modelo se utilizó para generar los mapas de pendiente, orientación de la pendiente y curvatura de la pendiente de la región (figura 36).

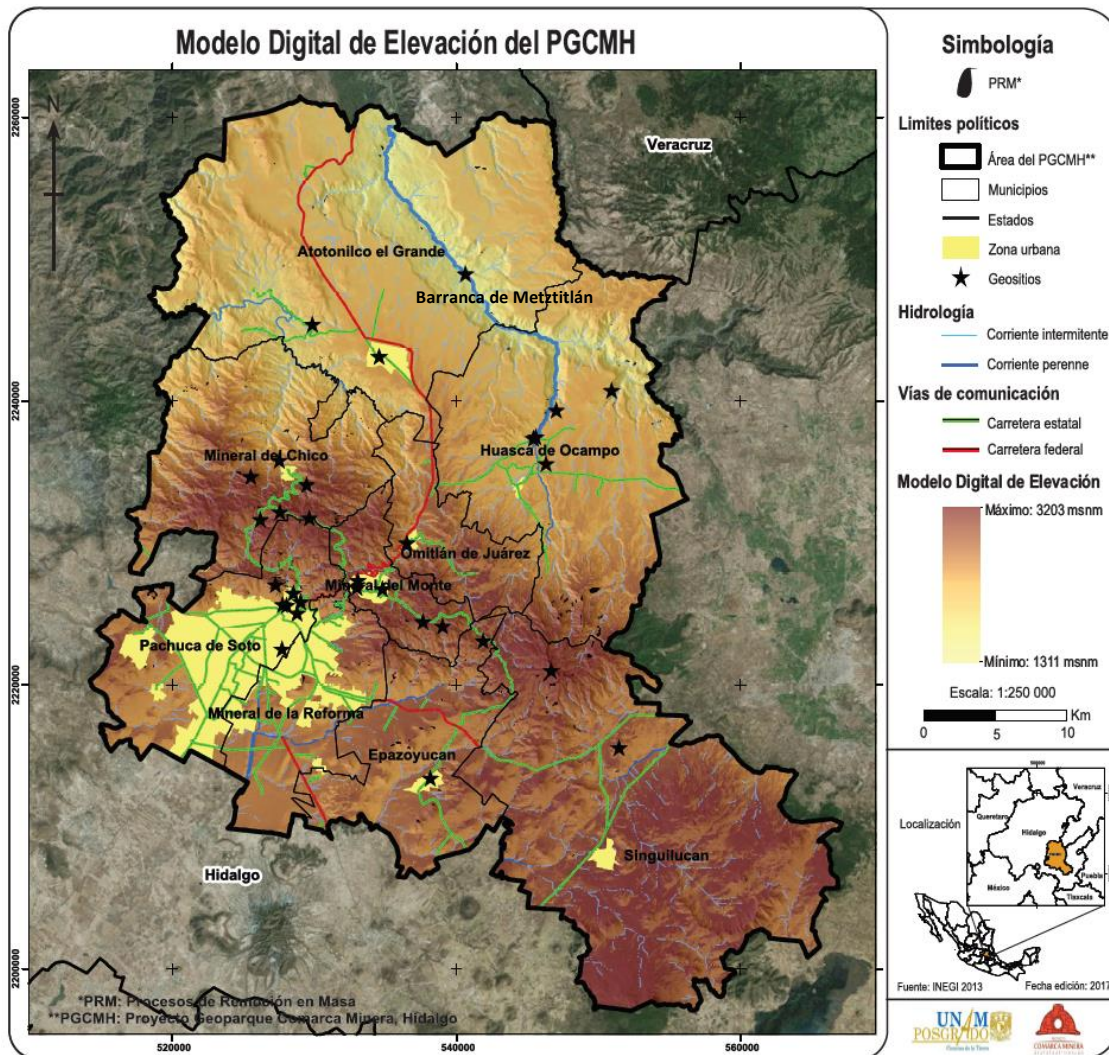


Figura 36. El Modelo Digital de Elevación muestra del PGCMH.

▪ **Mapa de pendiente del PGCMH (Pen)**

El mapa de pendiente se originó a través del MDE, el cual se dividió en seis clases en el SIG, teniendo en cuenta el error proveniente (Yalcin et al. 2008; Villacorta, 2007). De acuerdo al análisis visual y la sobreposición de las categorías de pendiente a través de las imágenes satelitales en la plataforma de Google Earth, para la zona se describen de la siguiente manera: 1) Pendiente <math><10^\circ</math>: comprende terreno plano asociado a valles, llanuras y terrazas fluviales, estas zonas se consideran como áreas de acumulación de detritos de partes altas del relieve. Se presentan urbanización asentada en esta clase de pendiente, tal es el caso de la ciudad de Pachuca de Soto, Singuilucan, Epazoyucan y Atotonilco el Grande. 2) Pendiente

cubierta vegetal y es usada para la agricultura y ganadería. 3) Pendiente 20° - 30°: esta clase se presenta mayormente a los márgenes de los ríos y arroyos, también se encuentra en gran parte del pie coluvial de la Sierra de Pachuca y en los márgenes de la Unidad geomorfológica de Cañon. 4) Pendiente 30°- 40°: esta clase se encuentra en lomeríos y zonas de montañas, se presentan principalmente en el centro, SE del PGCMH y en las partes medias de la barranca de Metztitlán. 5) Pendiente 40°- 50°: esta clase se presenta principalmente en las barrancas y en la sierra del PGCMH, por lo regular se encuentra desprovista de una cubierta vegetal al norte de la ciudad de Pachuca y a los alrededores de la comunidad del Mineral del Monte. 6) Pendiente > 50°: esta clase presenta pendientes pronunciadas y escarpadas, también se observan taludes con cortes verticales, principalmente en la parte media y alta de la Sierra de Pachuca y en los acantilados de las barrancas (figura 37).

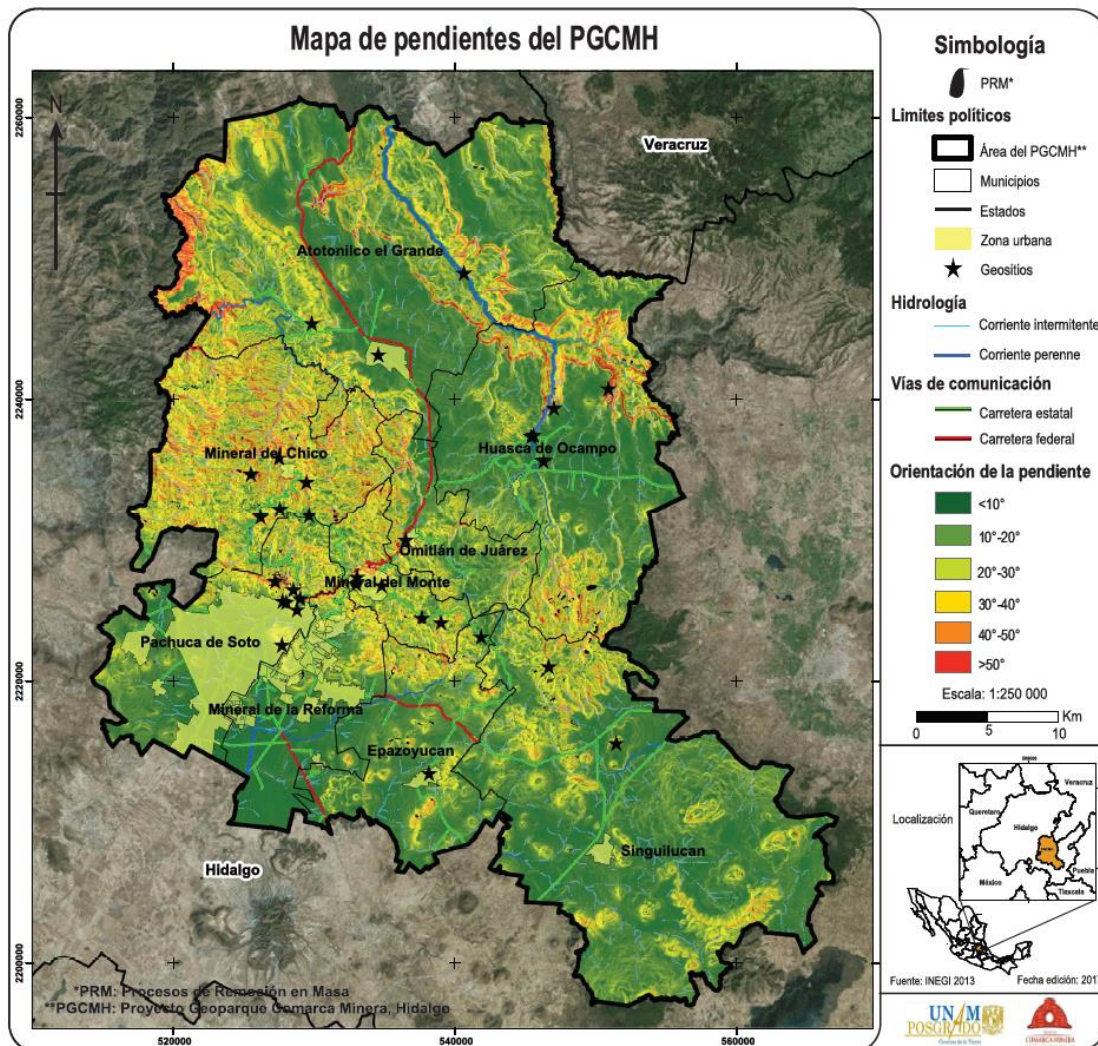


Figura 37. Mapa de pendientes del PGCMH.

▪ **Mapa de orientación de la pendiente del PGCMH (Ori)**

El mapa de orientación de la pendiente se generó a partir del MDE en el SIG. Para definir las clases de este factor se utilizó el criterio de Temesgen, *et al.*, (2001) el cual considera dividir este factor en cuatro clases de acuerdo a su orientación respecto al norte; adicionalmente se contempló una clase extra, la cual hace referencia al terreno plano que no tienen dirección de pendiente: 1) Terreno plano sin orientación. 2) N-E, laderas que van de los 0°-90°. 3) S-E, laderas que van desde los 90°-180°. 4) S-W, laderas que van de los 180°-270° y 5) N-W laderas que van desde los 270°-360° (figura 38).

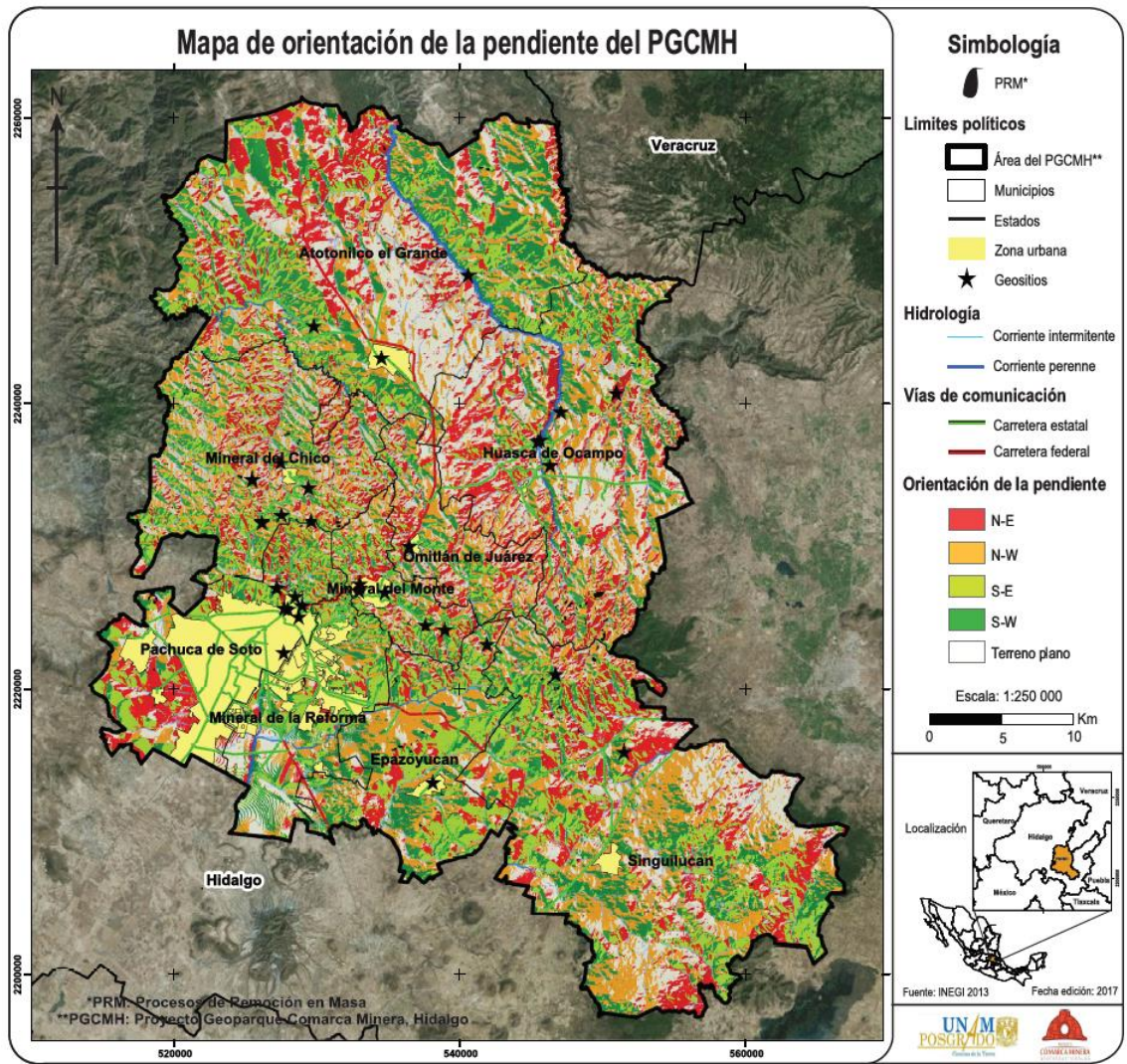


Figura 38. Mapa de orientación de la pendiente del PGCMH.

▪ **Mapa de curvatura de la pendiente del PGCMH (Cur)**

El mapa de curvatura de la pendiente se generó a partir del MDE en el SIG, el cual permitió la clasificación de este factor de acuerdo a un perfil paralelo a la dirección máxima de la pendiente, resultando tres valores: 1) Un valor negativo indica que la superficie es convexa en esa celda y la corriente se desacelerará. 2) Un valor positivo indica que la pendiente es cóncava en esa celda y la corriente acelerará. 3) Valores de cero se refiere a pendientes lineales o planas (figura 39).

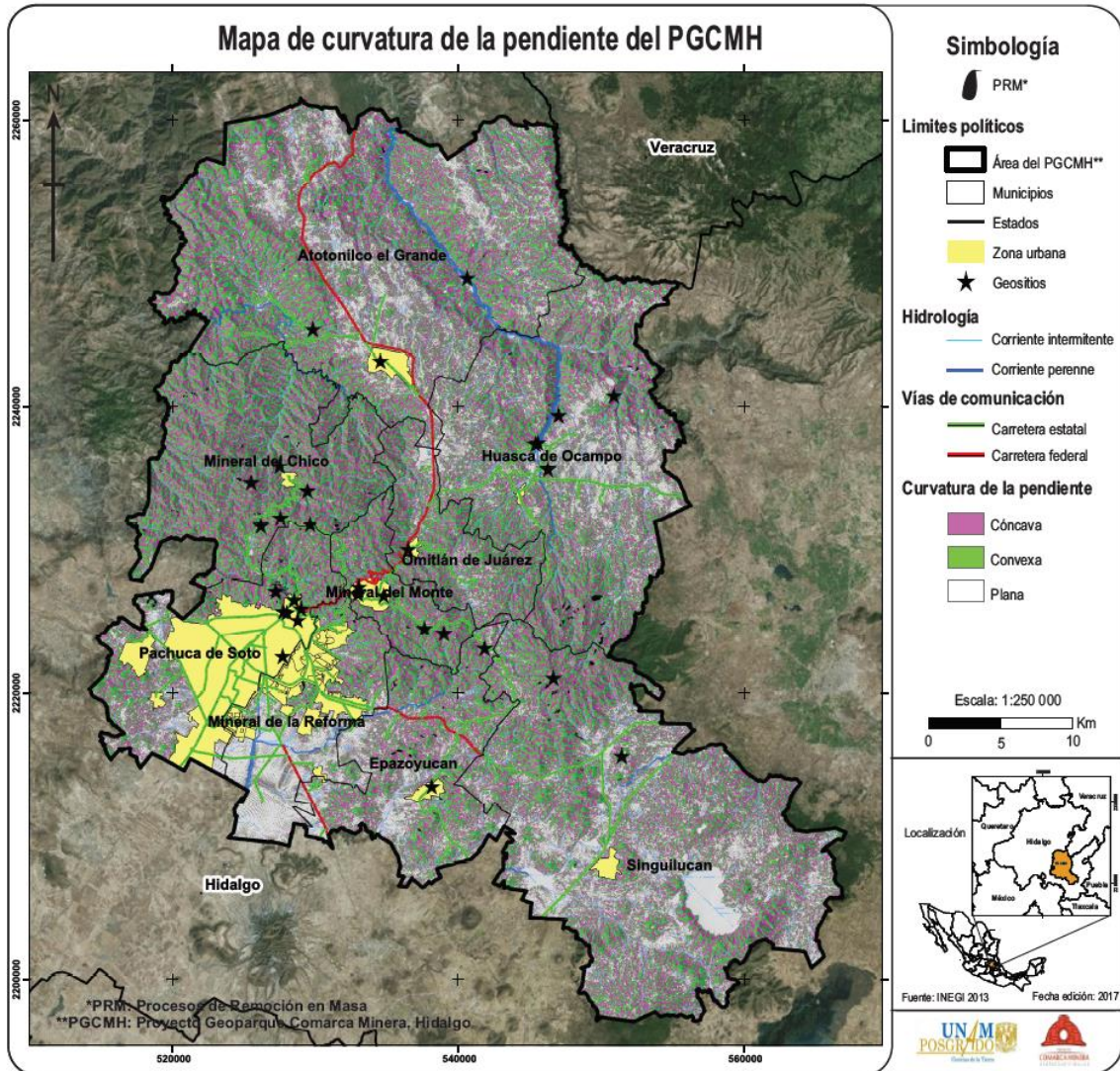


Figura 39. Mapa de curvatura de la pendiente del PGCMH.

▪ **Mapa de uso de suelo del PGCMH (Usu)**

Este mapa se elaboró con la información disponible en la base de datos de INEGI (2009), la cual está dividida en ocho clases: 1) Agricultura de temporal, 2) Bosque, 3) Matorral, 4) Desprovisto de vegetación, 5) Cuerpo de agua, 6) Pastizal inducido, 7) Vegetación secundaria y 8) Zona urbana. La presencia de algún tipo de vegetación en el terreno juega un papel importante en la ocurrencia o no de los procesos de remoción (figura 40).

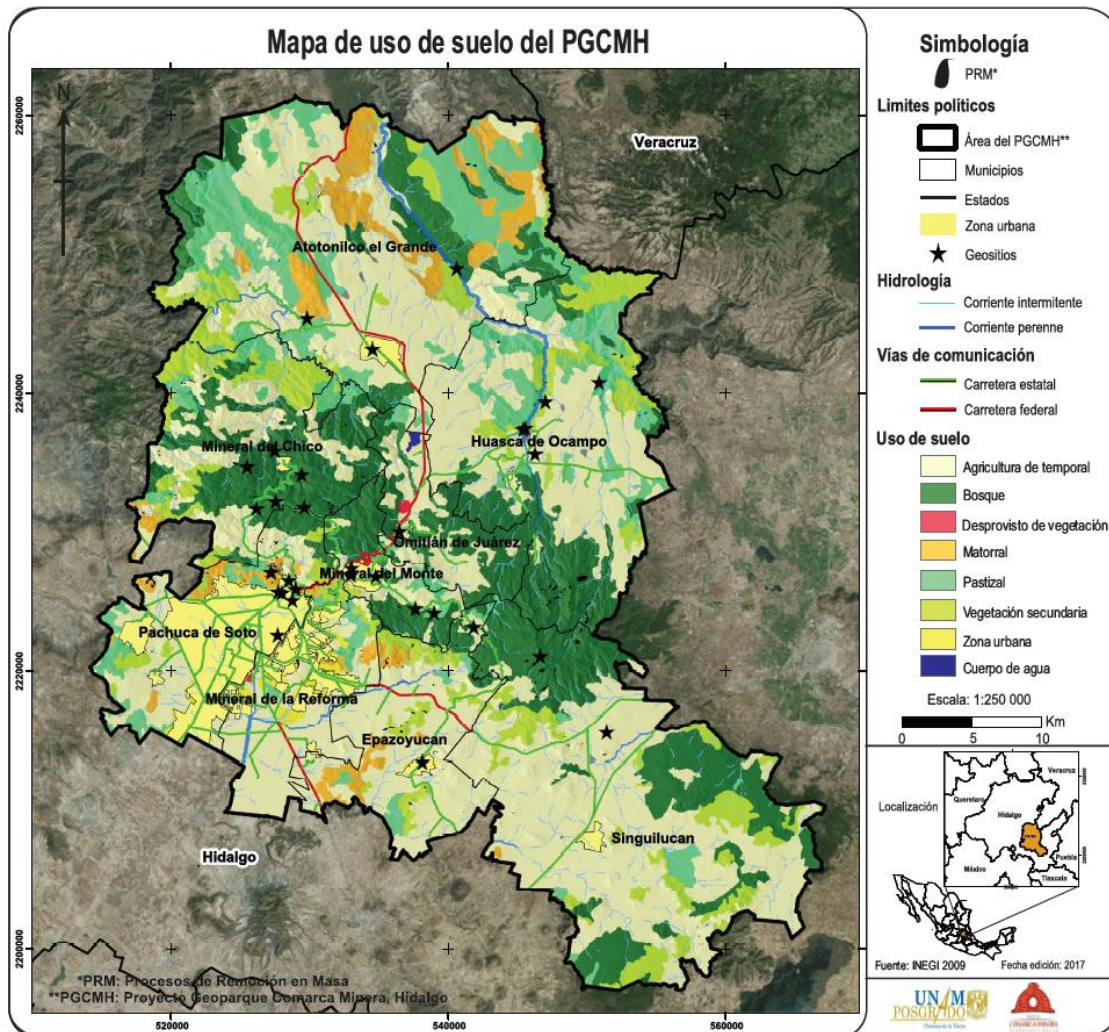


Figura 40. Mapa de uso de suelo del PGCMH.

▪ **Mapa Geomorfológico del PGCMH (Geo)**

Para realizar el mapa geomorfológico se tomó, revisó y modificó la cartografía geomorfológica de INEGI (2009), donde se dividen cinco grandes unidades del relieve dentro del PGCMH, las cuales contempla: Cañón, Llanura, Lomeríos, Meseta y Sierra. La unidad de sierra se caracterizó por que se compone principalmente de la Sierra de Pachuca,

la cual se localiza al norte de la ciudad de Pachuca de Soto, en esta unidad se tiene cubierta arbórea importante, como el parque Nacional El Chico, así como también zonas deforestadas que han sufrido intensos procesos de intemperismo y erosión, que han dejado geoformas caprichosas que han sido utilizadas por los pobladores para su desarrollo económico y social, tales como: Las Monjas, Las Cebadas, La Peña del Cuervo (esta última tiene una altura de 2,770 msnm), entre muchas otras, la unidad geomorfológica de cañón contempla principalmente la reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, esta geoforma presenta una topografía accidentada, con pendientes pronunciadas y escarpadas teniendo en la parte más baja un valle, la unidad de Llanura se caracteriza por no tener fuertes desniveles en el terreno siendo este un terreno plano, la unidad de Meseta que se encuentra en el área es una porción de la meseta central que se caracterizó por tener pendientes muy suaves y la unidad de lomeríos se distingue por tener zonas o porciones del terreno de poca altura que conectan a la sierras o montañas con las llanuras, esta unidad es utilizada para cultivos de temporal (figura 41).

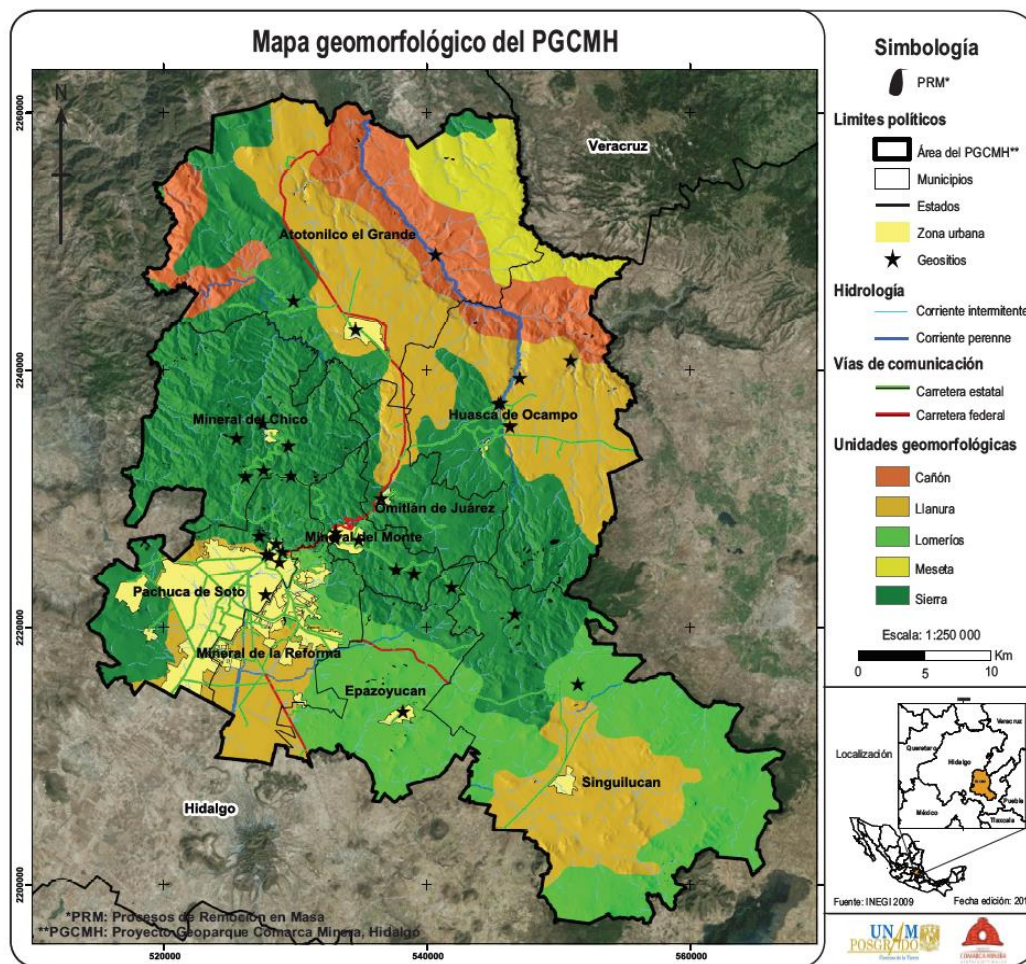


Figura 41. Mapa geomorfológico del PGCMH.

▪ **Mapa de geológico del PGCMH (Lit)**

La información geológica y estructural fue obtenida de las cartas geológico mineras del SGM 1:250 000 con los nombres de F14-11 “Pachuca” con fecha de edición de 1997, E14-2 “Ciudad de México” con fecha de edición del 2002, E-14-1 “Morelia” con fecha de edición de 1998. y 1:50 000 con los nombres F14-D71 “Actopan” con fecha de edición 1995 y F14-D81 “Pachuca” con fecha de edición 2007. De estas cartas se digitalizaron las litologías y las estructuras geológicas (fallas y lineamientos), las cuales se encuentran dentro de diferentes distritos mineros, como son los distritos mineros Capula - Arevalo, Pachuca-Real, del Monte y Mineral del Chico. Se utilizó un buffer de un 1 km como radio de influencia a la inestabilidad en las que pueden presentarse disposiciones de superficies de rotura, esta se clasifica en seis rangos (figura 42 y 43; Lee y Tu, 2005).

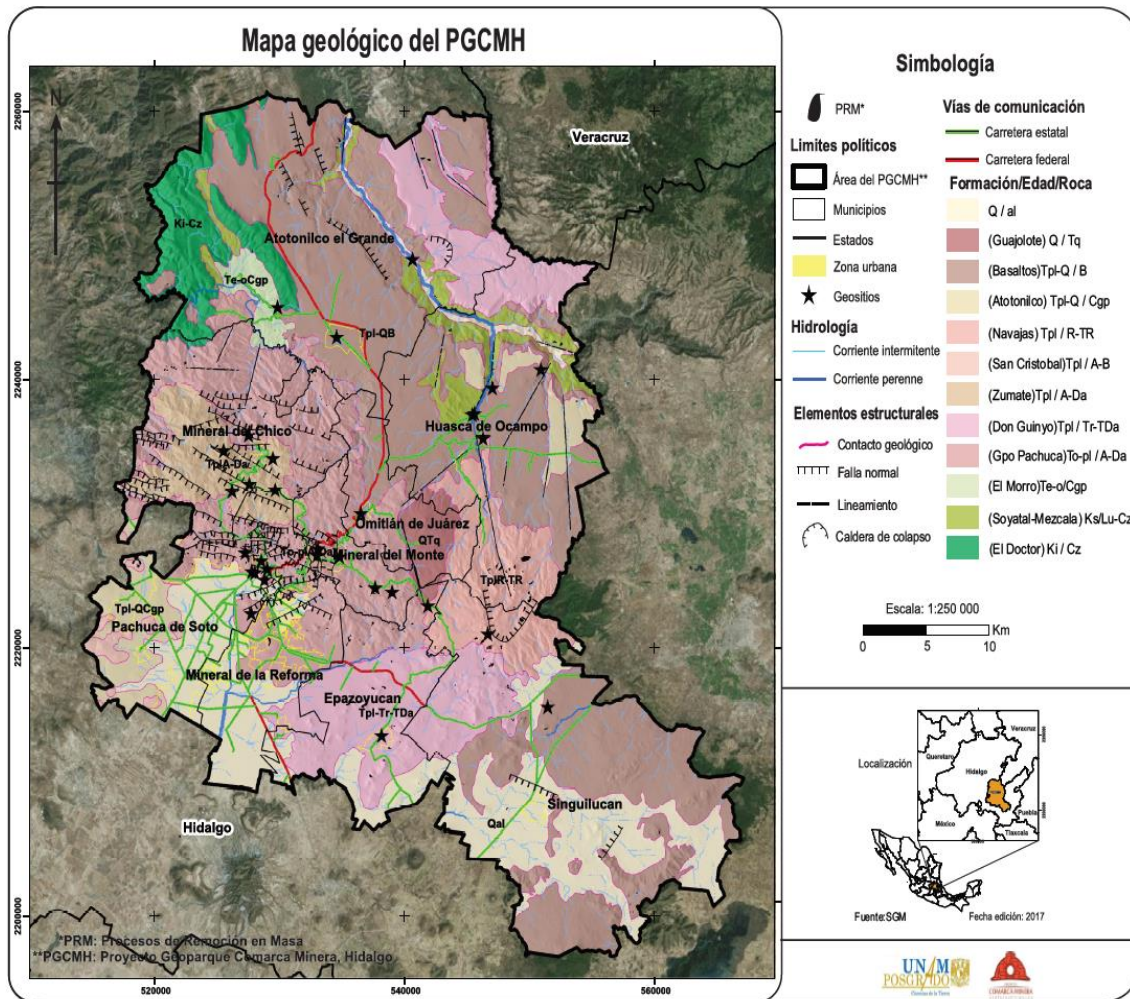


Figura 42. Mapa geológico del PGCMH.

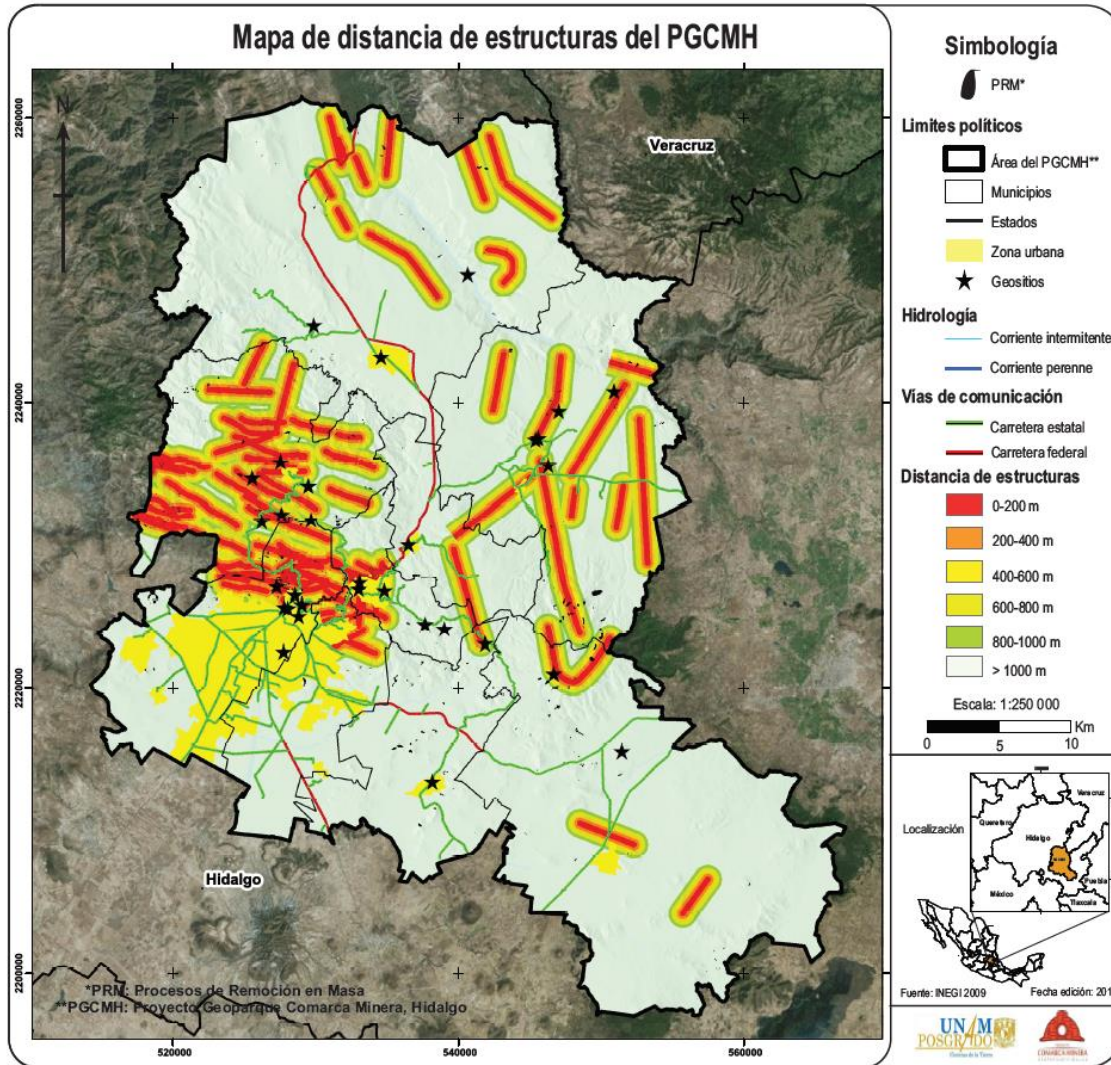


Figura 43. Mapa distancia de estructuras del PGCMH.

▪ **Mapa de densidad de drenaje del PGCMH (Den)**

La densidad de drenaje se define como la longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida por el área total de drenaje. Los valores altos de densidad de drenaje reflejan generalmente áreas con suelos fácilmente erosionables o relativamente impermeables, con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal. Las densidades de drenaje bajas ocurren en sitios donde los materiales del suelo son resistentes a la erosión o muy permeables y la pendiente es baja, por lo que el número de densidad de drenaje expresa la capacidad para desalojar un volumen de agua dado y se determina por medio de la ecuación 3. Las partes más bajas de las sierras, lomeríos y barrancas son las áreas en las que se tiene mayor densidad de drenaje (figura 44):

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (3)$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje por km

L: Longitud del cauce por Km

A: Área en Km²

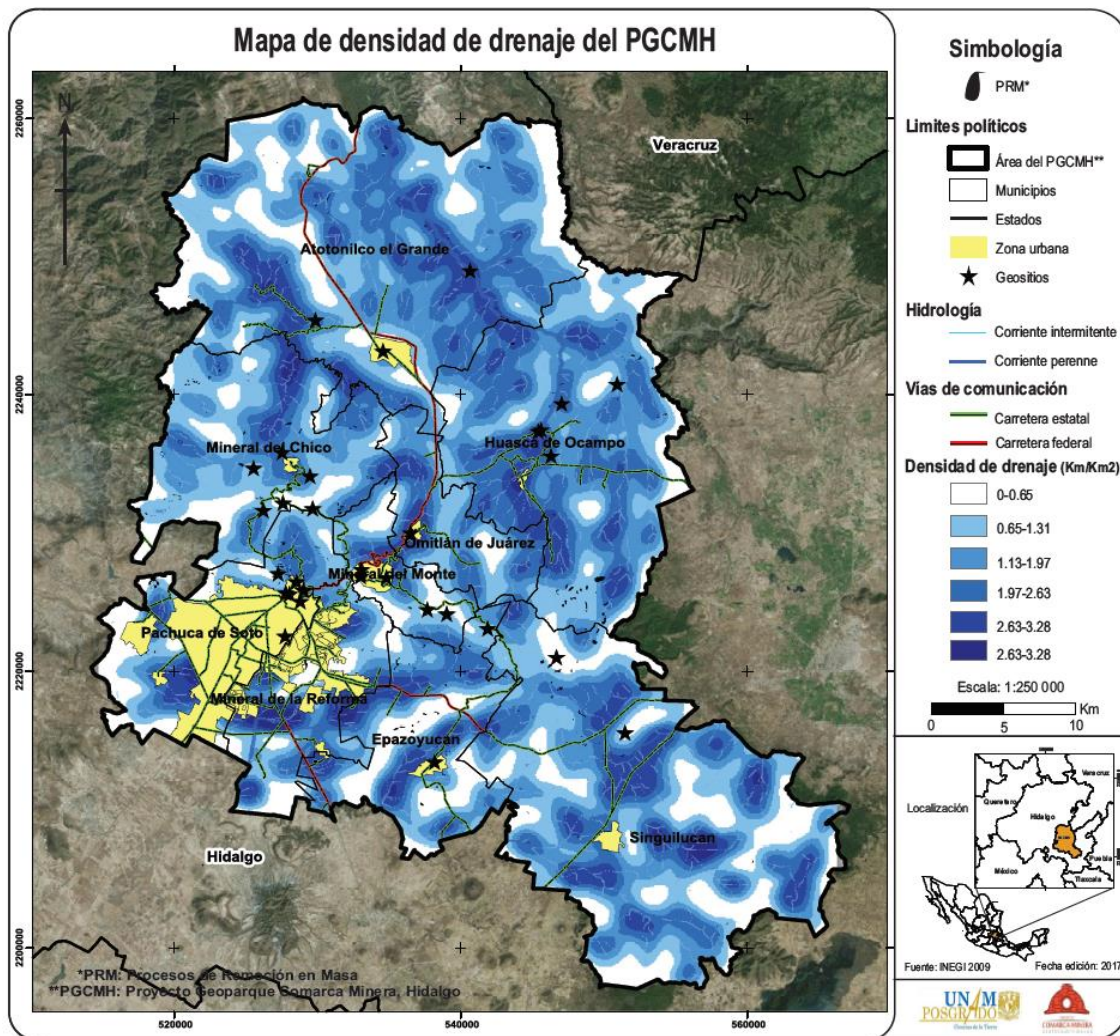


Figura 44. Mapa de densidad de drenaje del PGCMH.

▪ **Mapa de precipitación máxima del PGCMH (Pre)**

Para calcular la precipitación máxima en un área, es necesario analizar los datos de precipitación disponibles, al menos por 30 años, de las estaciones meteorológicas existentes dentro de la zona de estudio y periferia, a partir de dicha información se puede ponderar la aportación espacial de cada sitio (Fattorelli y Fernández, 2011).

Para el caso de estudio del PGCMH se utilizaron las normales de precipitación máxima de 1950 a 2010 de CONAGUA de 35 estaciones (tabla 4; figura 45), realizando una interpolación del tipo spline en el SIG, la cual determinó las isoyetas a partir de la información registrada durante los últimos 50 años, esta característica se relacionó con el desencadenamiento de los PRM debido a la intensidad de lluvia y su distribución (Vallejo, et al., 2002).

Tabla 4. Normales de precipitación máxima utilizadas para realizar el mapa de precipitación.

#	X	Y	Z	Nombre	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Máx
13001	516530	2214778	2440	Acoyuca	58	41	59	103	157	214	215	152	128	116	51	41	215
13017	527856	2235480	2351	El Chico	111	110	102	197	215	530	678	462	610	487	151	67	678
13020	530100	2213198	2340	Nopalapa	56	38	77	84	156	178	164	131	225	121	53	20	225
13028	562349	2197605	2550	San Miguel Allende	69	46	53	132	149	215	287	224	175	119	86	33	287
13029	573522	2210221	2768	San Lorenzo Sayula	86	56	64	136	147	250	175	270	311	285	81	33	311
13030	567442	2196640	2536	San Rafael Mazatepec	48	101	88	160	228	237	271	285	266	162	124	39	285
13031	566058	2216524	2179	Santiago Tulantepec	71	78	91	160	140	179	290	225	291	246	47	35	291
13032	545125	2200658	2650	Santo Tomas	88	67	61	208	159	201	324	257	187	152	67	31	324
13033	550949	2207651	2650	Singuilucan	71	84	74	123	186	158	255	177	216	192	81	55	255
13043	534567	2202109	2450	Zempoala	57	34	71	151	145	144	224	156	161	90	56	32	224
13059	558469	2227257	2812	Acatlán	29	38	61	82	132	186	161	159	221	121	56	20	221
13060	506091	2241576	1955	Actopan	57	67	49	107	136	226	166	175	260	167	56	20	260
13061	557596	2236722	2112	Alcholoya	48	66	84	113	131	265	302	197	280	228	67	44	302
13067	544420	2260261	1300	Los Alamos	29	17	52	52	124	271	183	113	267	130	19	23	271
13071	533752	2262696	1383	El tajo	40	28	41	73	98	296	144	178	388	77	32	40	388
13079	549550	2208785	2420	Presa El Giron	90	96	58	112	141	157	405	155	227	201	57	69	405
13082	568490	2218747	2210	Presa la Esperanza	85	80	71	152	158	190	262	276	239	334	88	51	334
13095	566975	2249913	2200	Agua Blanca	64	50	64	85	164	596	286	512	479	187	81	59	596
13096	535502	2242688	2112	Atotonilco	48	100	77	131	142	233	440	301	422	217	69	25	440
13098	544108	2234776	2100	Huasca	56	83	59	134	230	210	308	281	515	215	100	32	515
13099	570997	2237909	2156	Metepec	50	61	78	71	137	245	270	298	306	246	60	36	306
13100	536949	2230640	2417	Omitlán	71	189	75	89	177	542	405	366	530	352	123	35	542
13109	503536	2253595	2000	Santiago de Anaya	63	129	43	131	527	165	312	208	284	244	91	30	527
13116	546241	2229187	2310	El Zembo	58	99	53	84	275	255	309	291	393	227	93	33	393
13121	527315	2247407	1692	Santa Ma. Amajac	51	85	67	213	100	183	271	185	405	191	44	21	405
13127	570543	2206520	2610	El Aserrader	83	102	64	119	142	284	351	208	347	237	59	50	351
13128	511992	2224580	2355	San agustin Tlaxiaca	93	70	51	75	100	165	250	142	164	143	71	18	250
13129	529517	2197428	2370	San Agustin Zapotlan	61	76	83	83	131	172	262	168	190	106	64	22	262
13131	508631	2209793	2430	Santiago Tlajomulco	237	88	54	85	101	234	186	124	219	100	32	37	237
13133	525754	2205322	2490	San pedro Tlaquilpan	79	64	67	128	116	206	259	196	238	146	49	46	259
13150	527953	2229486	2759	El Cerezo	68	72	58	93	165	210	264	176	370	175	66	33	370
13150	508287	2260913	2092	El Encino	49	94	54	69	109	225	276	201	230	194	55	25	276
13154	514008	2244440	2506	Magdalena	76	63	49	130	142	182	212	342	430	300	147	42	430
13160	513411	2228332	2360	Tornacuxtla	2	83	44	62	81	102	237	79	255	185	29	9	255

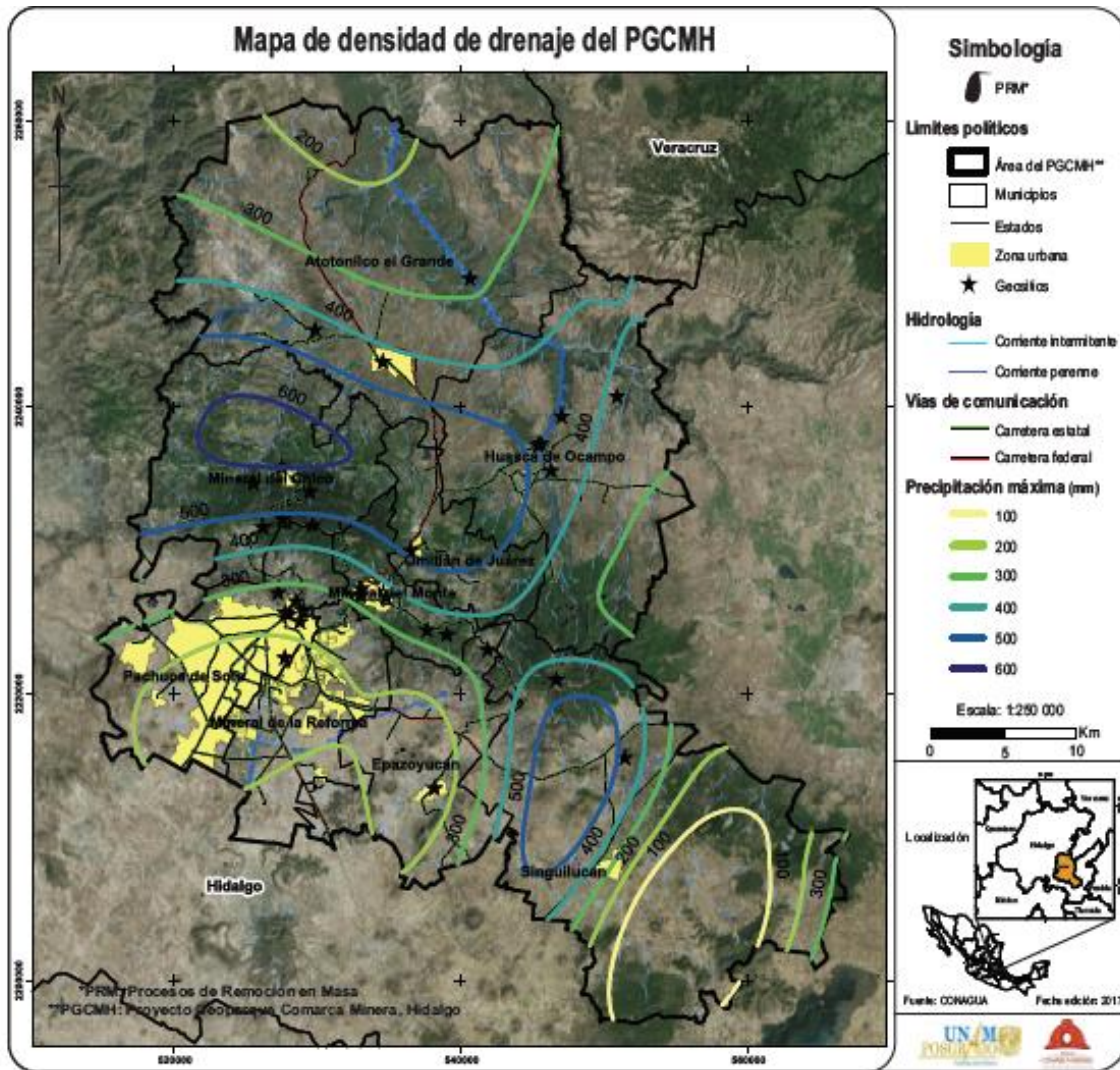


Figura 45. Mapa de precipitación máxima del PGCMH.

Método Wi

El método de información ponderada (Wi) está basado en la estadística de correlación (mapa de cruce) de los procesos inventariados (Inv) y las clases de los diferentes factores (Pen, Ori, Cur, Lit, Est, Usu, Den y Pre) que controlan la inestabilidad de una ladera; para ello se emplearon diferentes herramientas en el SIG. Una vez que la información ya se encuentra homogenizada en el SIG el método aplicado al PGCMH está dividido en un proceso de seis pasos (figura 46):

1. Cálculo del peso de cada clase de cada factor utilizando la estadística de correlación entre la densidad de los procesos de remoción usando la ecuación 2, en este paso se utilizaron las herramientas de extracción y zonal statistics en el SIG, teniendo como resultado una tabla de parámetros con el valor $\ln Wi$.

2. Reclasificación, en esta etapa se utilizó el valor de $\ln W_i$ para reclasificar los mapas temáticos de los factores en mapas de peso.
3. Algebra de mapas.
4. Obtención del mapa de puntaje.
5. Reclasificación del mapa de puntaje en clases para generar el mapa preliminar de la susceptibilidad y ajuste.
6. Sobreposición y análisis de la infraestructura vial del PGCMH, en esta etapa se determinó la susceptibilidad asociada a las diferentes carreteras, la cual mostró los diferentes niveles de susceptibilidad y su kilometraje correspondiente, esta evaluación se realiza y se divide por límites geopolíticos.

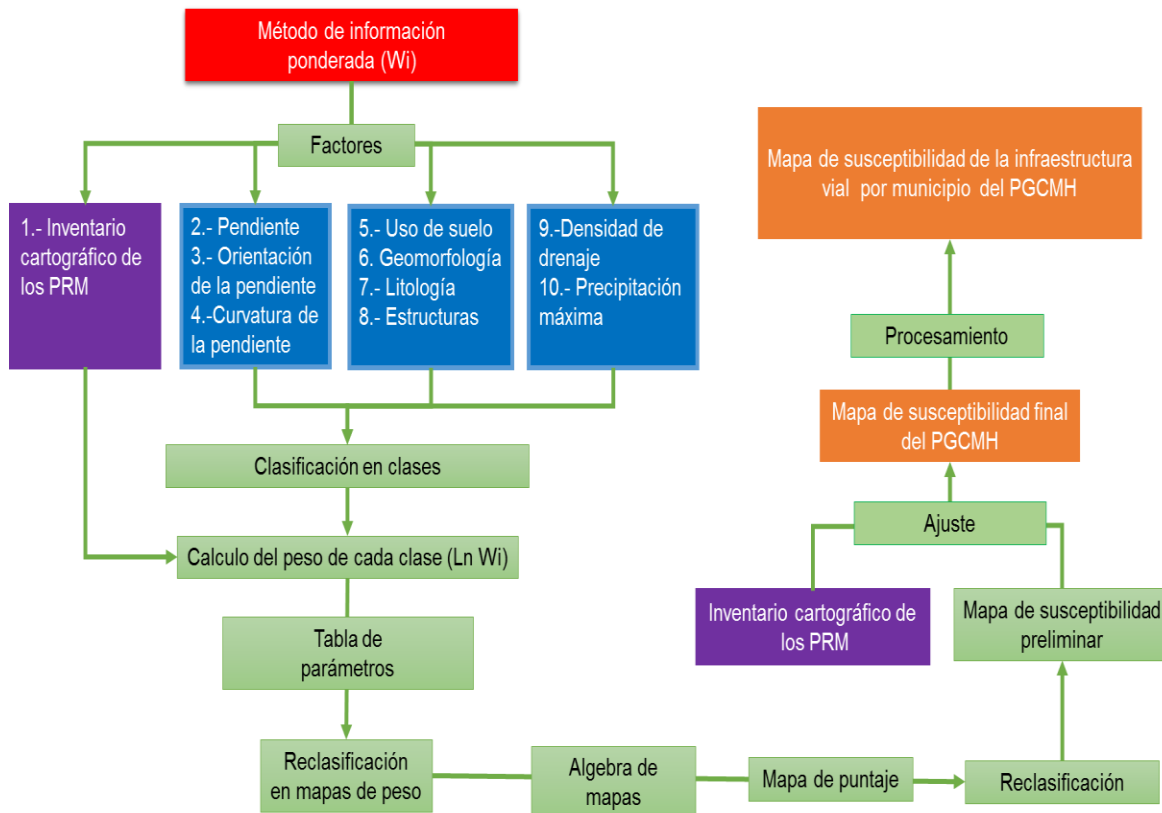


Figura 46. Esquema del método Wi aplicado al PGCMH (tomado y modificado de Van Westen (1997).

▪ Cálculo de peso

La tabla de parámetros es resultado de la etapa 2 del método Wi con un SIG (Tabla 5).

Tabla 5. Tabla de parámetros muestra la relación con las capas temáticas y los PRM dando resultados valores del $\ln W_i$ de cada clase, donde: $N_{pix} (N_i)$ = número de pixeles totales de una cierta clase; $N_{pix} (S_i)$ = número de pixeles, que contienen procesos de remoción en cada parámetro, $Densclas$ =densidad de pixeles de procesos de remoción dentro de cada clase de parámetros; $Densmap$ =densidad de pixeles del factor en todo el mapa.

Fuente	Factores	Clases	$N_{pix} (N_i)$	$N_{pix} (S_i)$	$Densclas$	$Densmap$	$\ln W_i$
Procesamiento	Pendiente	0° - 10°	1318232	569	0.0004	0.0027	-1.82
		10° - 20°	448924	2008	0.0045	0.0027	0.52
		20° - 30°	254400	1606	0.0063	0.0027	0.87
		30° - 40°	88832	965	0.0109	0.0027	1.41
		40° - 50°	15212	401	0.0264	0.0027	2.30
		> 50°	1189	100	0.0841	0.0027	3.46
		Densidad Total	2126789	5649			
	Orientación de la pendiente	Plano	521714	950	0.0018	0.0027	-0.38
		N-E	409203	1184	0.0029	0.0027	0.09
		S-E	352372	1278	0.0036	0.0027	0.31
		S-O	404500	1171	0.0029	0.0027	0.09
		N-O	439000	1066	0.0024	0.0027	-0.09
		Densidad Total	2126789	5649			
	Curvatura de la pendiente	Cóncavo	787207	2259	0.0029	0.0027	0.08
		Plano	464250	181	0.0004	0.0027	-1.92
Convexo		875332	3209	0.0037	0.0027	0.32	
Densidad Total		2126789	5649				
INEGI	Uso de suelo	Bosque	466915	2308	0.0049	0.0027	0.62
		Matorral	99516	695	0.0070	0.0027	0.97
		Desprovisto de vegetación	3594	0	0.0000	0.0027	0.00
		Cuerpo de agua	2755	0	0.0000	0.0027	0.00
		Pastizal	249945	421	0.0017	0.0027	-0.46
		Agricultura de temporal	1017929	1292	0.0013	0.0027	-0.74
		Vegetación secundaria	207773	797	0.0038	0.0027	0.37
		Zona urbana	78619	136	0.0017	0.0027	-0.43
		Total	2127046	5649		0.0027	
	Geomorfología	Cañón	193643	609	0.0031	0.0027	0.17
		Sierra	809109	3709	0.0046	0.0027	0.55
		Meseta	91388	122	0.0013	0.0027	-0.69
		Lomeríos	381560	813	0.0021	0.0027	-0.22
		Llanura	651233	396	0.0006	0.0027	-1.47
	Densidad Total	2126933	5649				
SGM	Litologías	Aluvión	339276	72	0.0002	0.0027	-2.53
		Fm. Don Guinyó	251940	654	0.0026	0.0027	-0.02
		Fm. El doctor	92029	112	0.0012	0.0027	-0.78
		Fm. Soyatal	71624	306	0.0043	0.0027	0.48
		Basaltos Indiferenciados	662004	379	0.0006	0.0027	-1.53
		Grupo Pachuca	353586	2160	0.0061	0.0027	0.83
		Fm. El morro	23639	26	0.0011	0.0027	-0.88
		Fm. Atotonilco	81014	74	0.0009	0.0027	-1.07
		Fm. Zumate	86152	384	0.0045	0.0027	0.52
		Fm. Navajas	122199	1299	0.0106	0.0027	1.39
		Fm. San Cristóbal	13329	183	0.0137	0.0027	1.64
		Fm. Guajolote	30384	0	0.0000	0.0027	0.00
		Densidad Total	2127176	5649			
	Distancia de Estructuras	<200	136852	892	0.0065	0.0027	0.90
		200 - 400	123448	808	0.0065	0.0027	0.90
		400 - 600	111897	598	0.0053	0.0027	0.70
		600 - 800	104845	236	0.0023	0.0027	-0.17
		800 - 1000	93332	383	0.0041	0.0027	0.44
		>1000	1556673	2732	0.0018	0.0027	-0.41
	Densidad Total	2127047	5649				
Procesamiento	Densidad de drenaje	< 0.6	429849	190	0.0004	0.0027	-1.79
		0.6 - 1.3	589059	754	0.0013	0.0027	-0.73
		1.3 - 1.9	477583	1356	0.0028	0.0027	0.07
		1.9 - 2.6	399371	1733	0.0043	0.0027	0.49
		2.6 - 3.2	199888	1285	0.0064	0.0027	0.88
		3.2 - 3.9	31025	331	0.0107	0.0027	1.39
		Densidad Total	2126775	5649			
CONAGUA	Precipitación máxima	< 100	127964	55	0.0004	0.0027	-1.82
		100-200	325391	485	0.0015	0.0027	-0.58
		200-300	496229	1265	0.0025	0.0027	-0.04
		300-400	446873	1995	0.0045	0.0027	0.52
		400-500	353348	724	0.0020	0.0027	-0.26
		500-600	333563	974	0.0029	0.0027	0.09
		600-700	43679	151	0.0035	0.0027	0.26
	Densidad Total	2127047	5649				

- **Reclasificación**

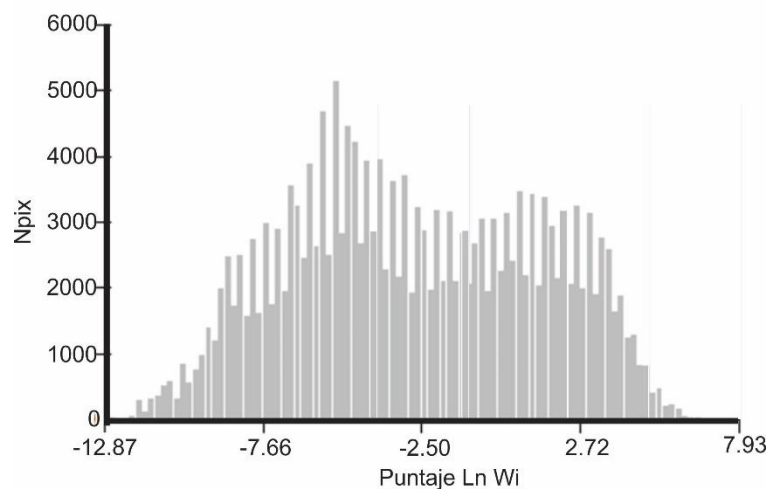
El valor del $\ln W_i$ resultante del análisis estadístico bivariado es asignado a los mapas temáticos de los factores que contienen las clases que contribuyen a la formación de los PRM, para ello se utilizó el módulo de reclassify de la caja de herramientas de ArcMap. Esta herramienta asigna y reclasifica los valores de las celdas originales a valores alternativos, de modo que los valores puedan usarse en relación con otros.

- **Algebra de mapas**

Para obtener el mapa de puntaje fue necesario realizar un procesamiento digital de los mapas de peso el cual consistió en realizar una sumatoria de dichos mapas, para ello se utilizó algebra de mapas con la herramienta raster calculator. Esta herramienta es simple y poderosa, a través de ella se pueden realizar operaciones y funciones del análisis espacial en espacios geográficos.

- **Mapa de puntaje**

El mapa de puntaje es el resultado de la sumatoria de los mapas de peso, el cual se utilizó por medio de una reclasificación para realizar el mapa de susceptibilidad del PGCMH. El mapa de puntaje arroja un valor máximo de 7.93 y un valor mínimo de -12.87, en estos valores convergen todas las clases de los factores que intervienen en la inestabilidad de las laderas dentro del área de estudio, este se considera como mapa preliminar de susceptibilidad (gráfica 1; figura 47).



Gráfica 1. Histograma resultante del algebra de mapas, el cual pertenece al mapa de puntaje.

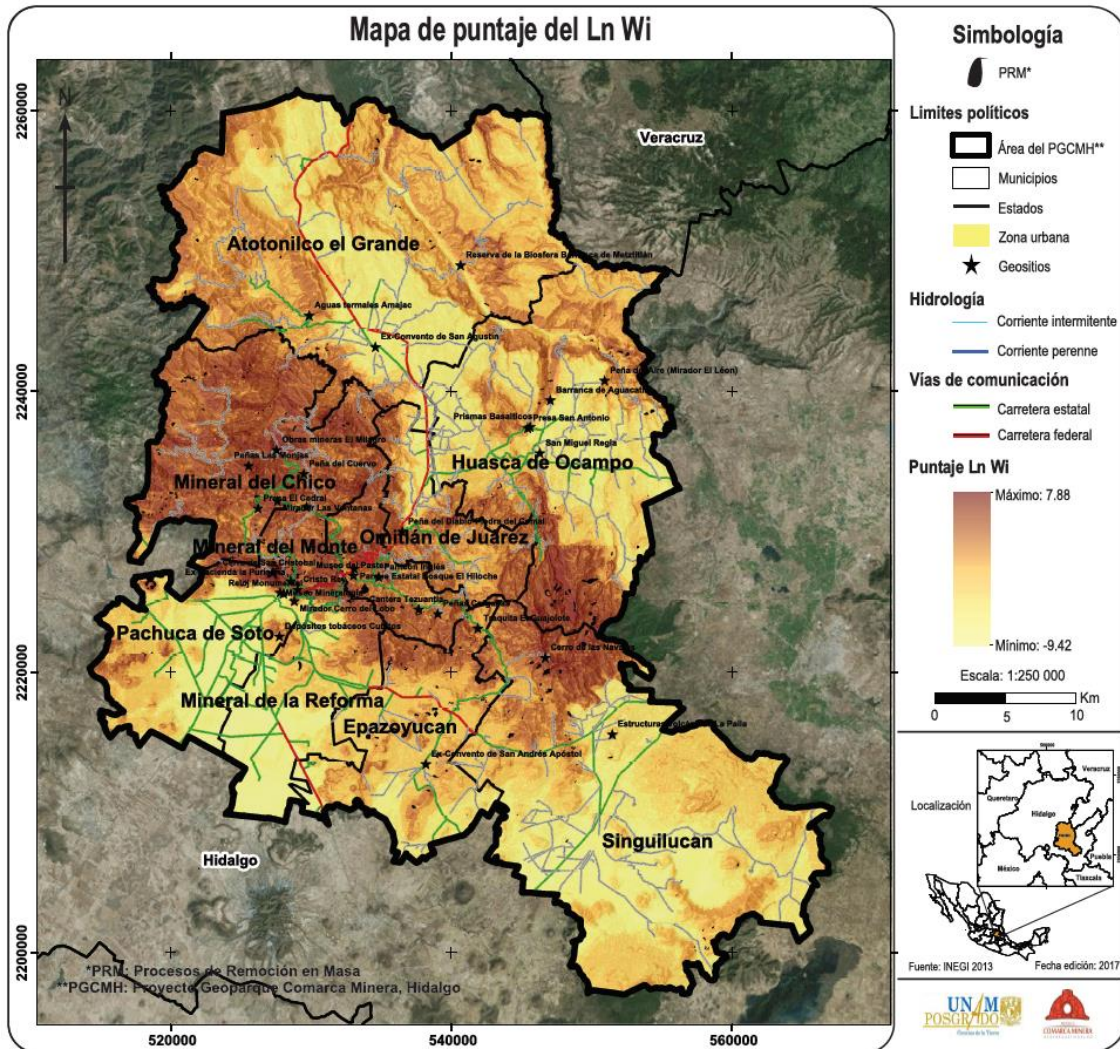


Figura 47. Mapa de puntaje Wi del PGCMMH, el cual es el mapa preliminar de la susceptibilidad.

3.1.3 Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

Varios autores para realizar mapas regionales de susceptibilidad a PRM, dividen en cinco clases la susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta, basándose en la relación de los principales factores (intrínsecos y detonantes) que contribuyen a la formación de los procesos de remoción. Yalcin, (2008) utilizó la desviación estándar del histograma del mapa de puntaje para dividir en 5 clases la susceptibilidad para el método de información ponderada, el cual se ajusta de acuerdo al inventario, por lo que este criterio fue utilizado para realizar el mapa de susceptibilidad del PGCMMH (figura 48).

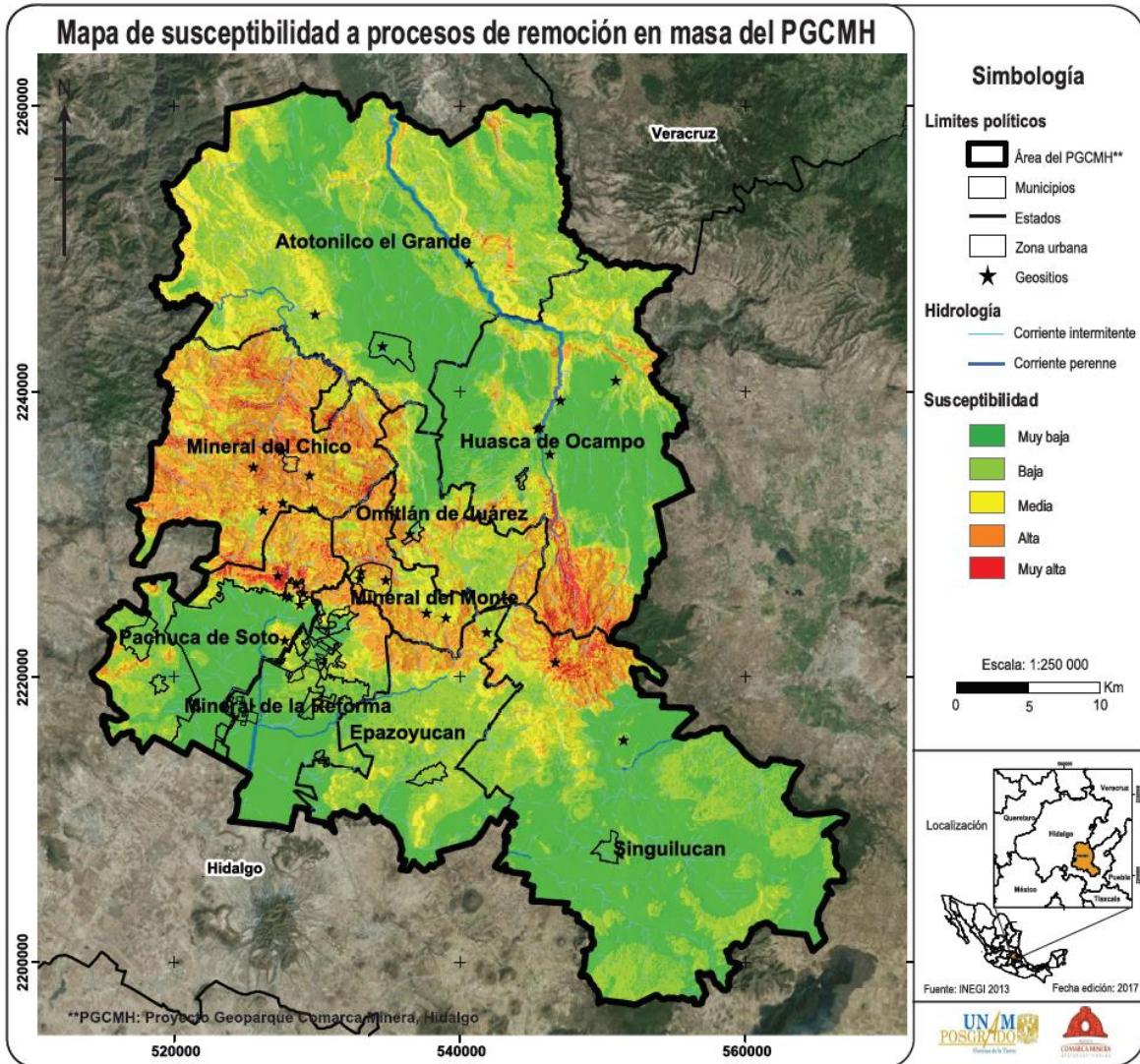


Figura 48. Mapa de susceptibilidad del PGCMH.

3.1.4 Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

Para determinar la susceptibilidad carreteras del PGCMH fue indispensable realizar el mapa de susceptibilidad general y obtener la cartografía la infraestructura vial para el estado de Hidalgo (INEGI, 2009). La cartografía de las vías de comunicación fue revisada, corregida, actualizada e ingresada a un SIG donde se realizó el análisis de la susceptibilidad de los 9 municipios. El procesamiento consistió en utilizar la herramienta resampling para convertir la susceptibilidad en píxeles de 1 m x 1 m y la herramienta de extract para establecer la relación que se tiene con las vías de comunicación. El resultado de este análisis comprendió 754.67 km de caminos de terracería y 426.8 km de vías de

comunicación asfaltadas de los cuales 69 Km son de carácter federal y 357.85 Km de carácter estatal. El análisis de susceptibilidad de las vías de comunicación se trabajó a nivel municipal con el objetivo de puntualizar las principales vías de acceso de cada uno de los 9 municipios de carácter federal, estatal y caminos de terracería (tabla 6; figura 49).

Tabla 6. Kilometraje analizado de los nueve municipios que conforman el PGCMMH.

	Vías de comunicación en Km			
	Asfaltados	Federal	Estatal	Terracería
Atotonilco	60.2	29.9	30.3	184.8
Epazoyucan	41.5	13.6	27.9	44
Huasca	43.6	0.17	43.4	181.5
Mineral del Chico	21.4	0	21.4	84.1
Mineral del Monte	30.1	7.3	22.8	10.1
Mineral de la Reforma	73.9	6.3	67.6	2.35
Omitlán de Juárez	22.06	9.9	12.16	54.3
Pachuca de Soto	91.03	1.69	89.34	12.74
Singuilucan	42.77	0	42.77	180.69

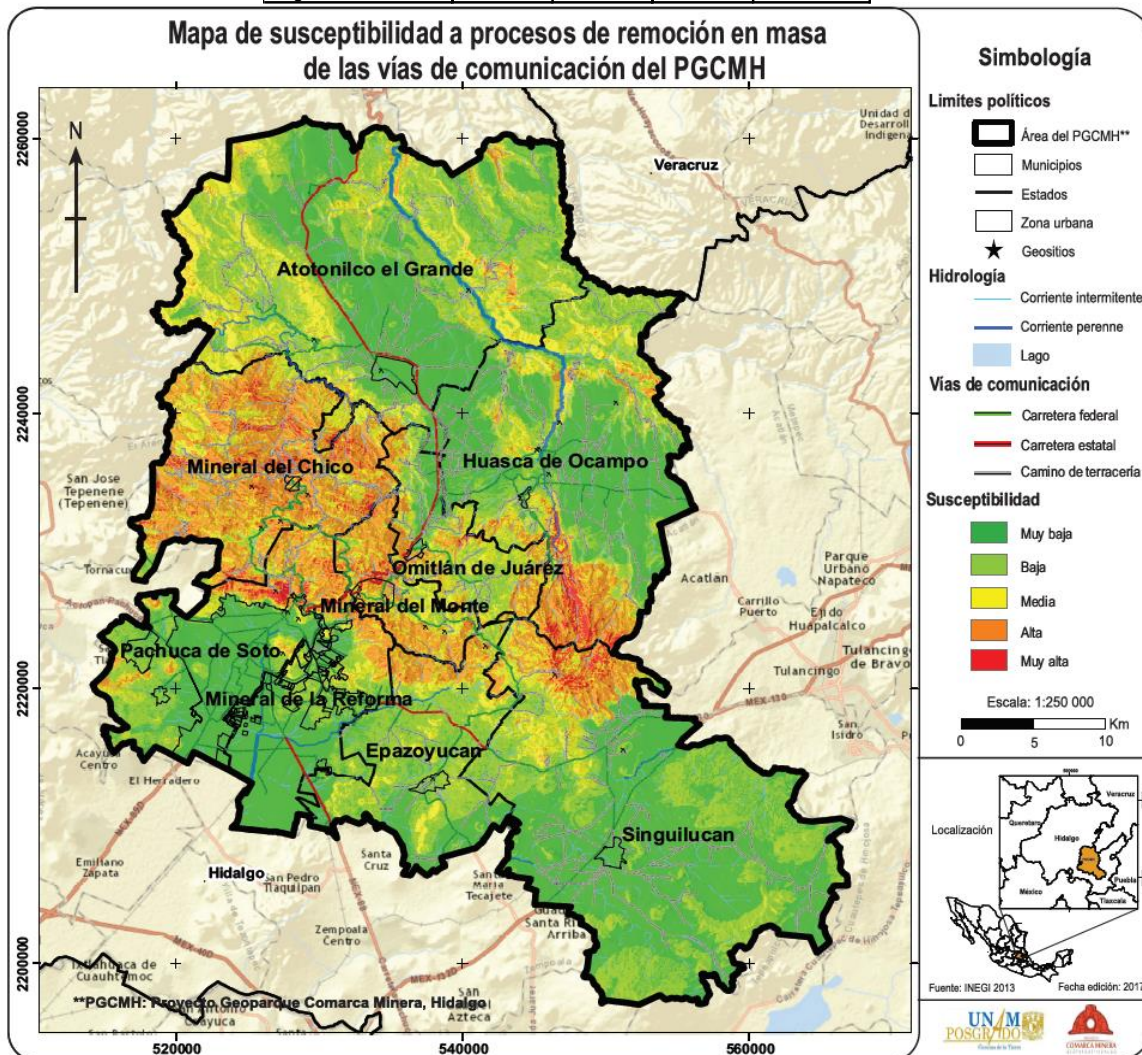


Figura 49. Mapa de susceptibilidad a PRM de las vías comunicación del PGCMMH.

3.2 Segunda etapa

En la segunda etapa se validó la susceptibilidad procedente del método Wi para obtener el mapa de peligro; esta se corroboró en campo a través de puntos de verificación sobre las vías de comunicación en las que se encuentran taludes que, debido a su desarrollo y construcción alteraron la estabilidad natural del terreno, los cuales aceleraron o dispararon procesos de remoción.

En los puntos de verificación se aplicó un formato evaluador para determinar zonas de susceptibilidad que pueden convertirse en zonas de peligro por inestabilidad. Dicho formato asigna una puntuación asociada al peligro por inestabilidad del terreno y PRM, el cual es resultado de la ponderación de las clases de los factores analizados en campo, contemplando 11 características de los taludes. Como resultado de la validación de la susceptibilidad se desarrolló el mapa de peligro por PRM. Para la obtención del mapa de vulnerabilidad, en los tronques de los diferentes tramos de carretera se analizó el flujo vehicular, el cual determina la vulnerabilidad física. Los mapas de peligro y vulnerabilidad fueron utilizados para realizar el mapa de riesgo, en el cual se identificaron tramos en peligro diferenciados en niveles con distintos mecanismos de movimiento que se suscitan y la vulnerabilidad física expuesta.

El área para llevar a cabo la validación de esta metodología es el municipio de Pachuca de Soto, esto debido a su importancia económica, conectividad con los diferentes Geositos distribuidos la región y su gran desarrollo carretero en el que se tienen diferentes niveles de susceptibilidad; este lugar resulta ser el más idóneo dentro del PGCMH para realizar dicha propuesta; las vías de comunicación analizadas son de carácter federal y estatal (figura 50).

3.2.1 Mapa de peligro

Para realizar el mapa de peligro se recorrieron las diferentes vías de comunicación que se encuentran en el municipio de Pachuca de Soto con el fin de verificar y observar los diferentes grados de susceptibilidad que se obtuvieron previamente con el método Wi. A continuación se describe la secuencia del análisis que se utilizó para realizar el mapa de peligro, el cual contempla puntos de verificación, trabajo de campo y análisis de la información.

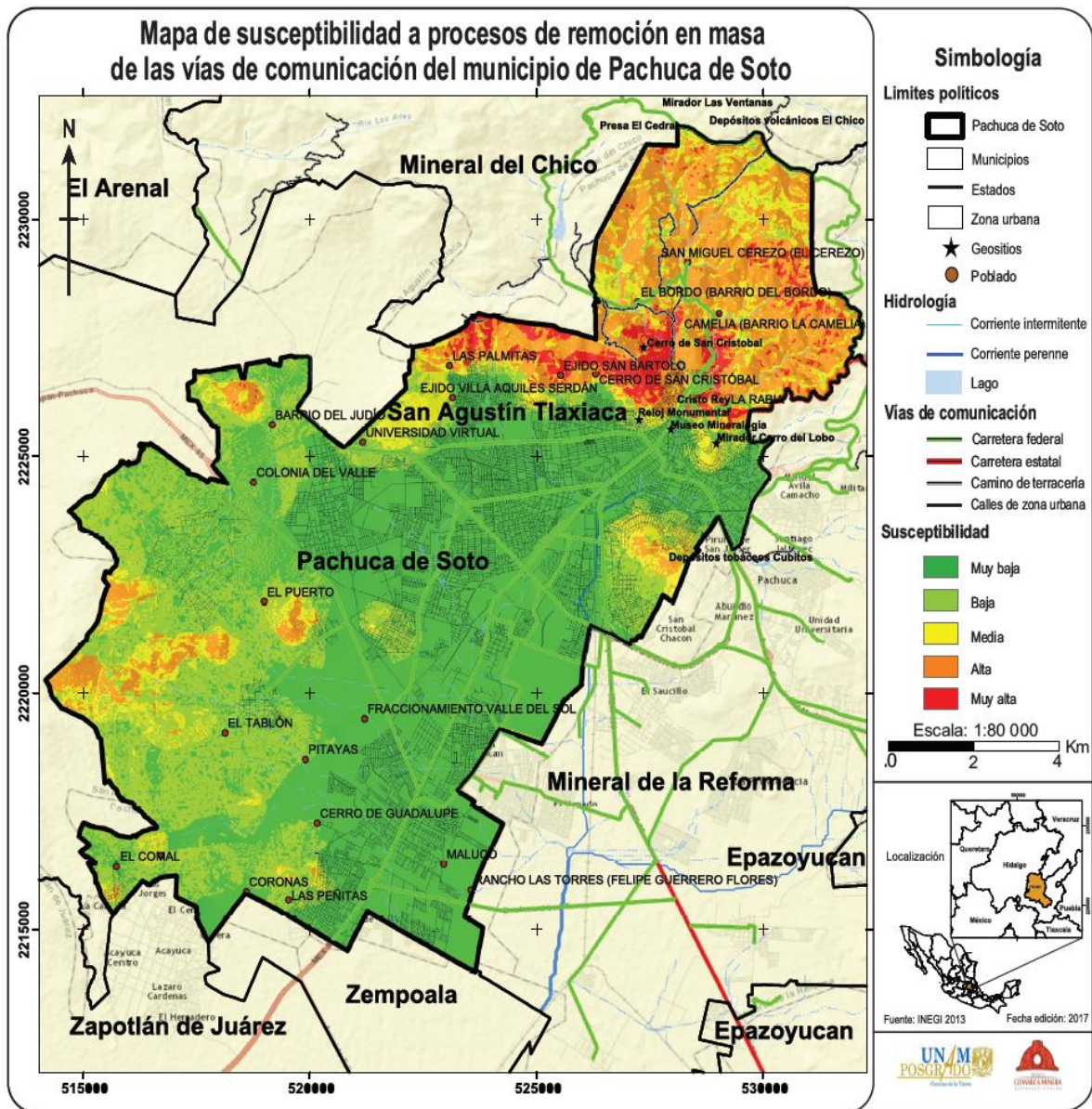


Figura 50. Mapa de susceptibilidad a PRM del municipio de Pachuca de Soto.

▪ **Puntos de verificación**

Se realizó trabajo de gabinete para la planificación de los recorridos en campo considerando el kilometraje de las vías de comunicación del municipio y la susceptibilidad obtenida mediante el método Wi, posteriormente se realizaron mapas a detalle de las vías de comunicación, donde se determinó la planeación y distribución de los puntos de verificación. Esta etapa se realizó para el municipio de Pachuca de Soto, el cual tiene una longitud total de 91.03 Km de vías de comunicación, de los cuales 1.69 Km son de carácter federal y 89.34 Km de carácter estatal.

Las vías que tiene el municipio son: un tramo de la carretera federal denominada 105 Pachuca-Tampico y 24 tramos de carretera o vialidades de carácter estatal entre las que se encuentran la carretera 85 México-Pachuca, la 88 Pachuca-Cd. Sahagún, la 85 Pachuca-Cd. Valles y la 130 Pachuca-Tulancingo. Para la verificación en campo de las diferentes vías de comunicación se le asignó un código de estudio con el fin de facilitar la recopilación de información que posteriormente fue analizada para realizar el mapa de peligro de cada vía.

- **Trabajo de campo**

Para sistematizar toda la información sobre los tramos de carretera y el levantamiento de datos en campo se propuso utilizar el formato evaluador que se presenta en esta investigación, el cual contempla factores que intervienen en la inestabilidad de las laderas. El formato que muestra en esta investigación es el resultado del análisis de la información recopilada en el trabajo de campo, este considera y almacena características generales del punto de verificación, así como una descripción y evidencia fotográfica, que son incorporados al SIG e incluye datos como: fecha de toma de datos, código de estudio, punto de verificación, poblado, número de foto, aforo vehicular, coordenadas, nivel de susceptibilidad asociado al punto, presencia de asentamientos urbanos (urbanización), inclinación del talud, altura del talud, existencia de peligro, tipo de peligro, tipo de material del talud (tipo de litología), calidad de la roca, nivel de fracturamiento, tamaño de los bloques, existencia de obra de mitigación, tipo de obra de mitigación, estado de la obra de mitigación (mantenimiento) y componentes de la carretera (figura 51).

En total se tomaron 100 puntos de verificación distribuidos en las 25 vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto, de los cuales se muestran a continuación los tramos de carretera Pachuca-Tampico (FP1), Avenida Sonora (EP2), Boulevard Rojo Gómez (EP8), Libramiento a Tampico (EP14) para ejemplificar la realización de los mapas locales, la distribución de los puntos de verificación, la asociación que existe entre la susceptibilidad y las vías de comunicación, la toma de datos con el formato evaluador y en general el trabajo de gabinete y de campo realizado en esta investigación.

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			SI	No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales				
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
Fotografía									

Figura 51. Formato evaluador del peligro por PRM, el cual fue empleado para el levantamiento de la información en campo de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

- **Pachuca – Tampico (FP1)**

La vía de comunicación Federal Pachuca – Tampico tiene una longitud de 1.69 Km de los cuales 0.08 Km son de susceptibilidad baja, 0.42 km de susceptibilidad media, 0.86 km de susceptibilidad alta y 0.33 Km de susceptibilidad muy alta a que sucedan PRM (figura 52). Se tomaron siete puntos de verificación distribuidos a lo largo de los diferentes niveles de susceptibilidad, los cuales corresponden a: un punto de verificación en la susceptibilidad baja (FP1b; anexo 4), un punto de verificación en la susceptibilidad media (FP1a; anexo 5), dos puntos de verificación en la susceptibilidad alta (FP1d y FP1g; anexos 6 y 7) y 3 puntos de verificación en la susceptibilidad muy alta (FP1c, FP1e y FP1f; anexos 8, 9 y 10).

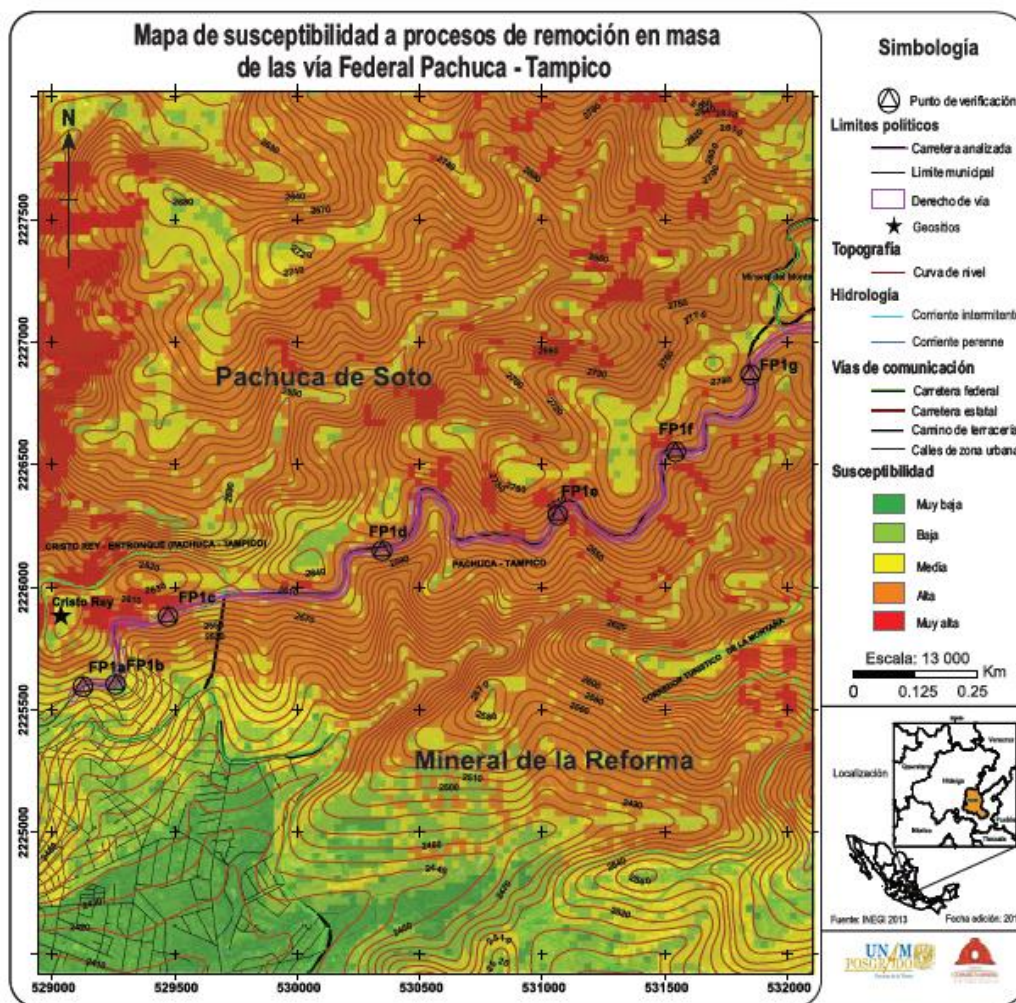


Figura 52. Mapa de susceptibilidad a PRM de la vía federal Pachuca -Tampico.

- **Avenida Sonora (EP2)**

La vía de comunicación Avenida Sonora tiene una longitud de 4.66 km, de los cuales 1.87 km se encontraron con susceptibilidad muy baja, 0.3 km en susceptibilidad baja, 0.9 km en susceptibilidad media, 1.1 km en susceptibilidad alta y 0.52 km en susceptibilidad muy alta a que sucedan PRM (figura 53). Se tomaron 13 puntos de verificación distribuidos en los diferentes niveles de susceptibilidad, los cuales corresponden a: dos puntos en la susceptibilidad muy baja (EP2a y EP2b; anexos 11 y 12), dos puntos de verificación en la susceptibilidad baja (EP2c y EP2f; anexos 13 y 14), dos puntos de verificación en la susceptibilidad media (EP2d y EP2h; anexos 15 y 16), cuatro puntos de verificación en la susceptibilidad alta (EP2e, EP2g, EP2i y EP2l; anexos 17, 18, 19 y 20) y tres puntos de verificación de susceptibilidad muy alta (EP2j, EP2k y EP2m; anexos 21, 22 y 23).

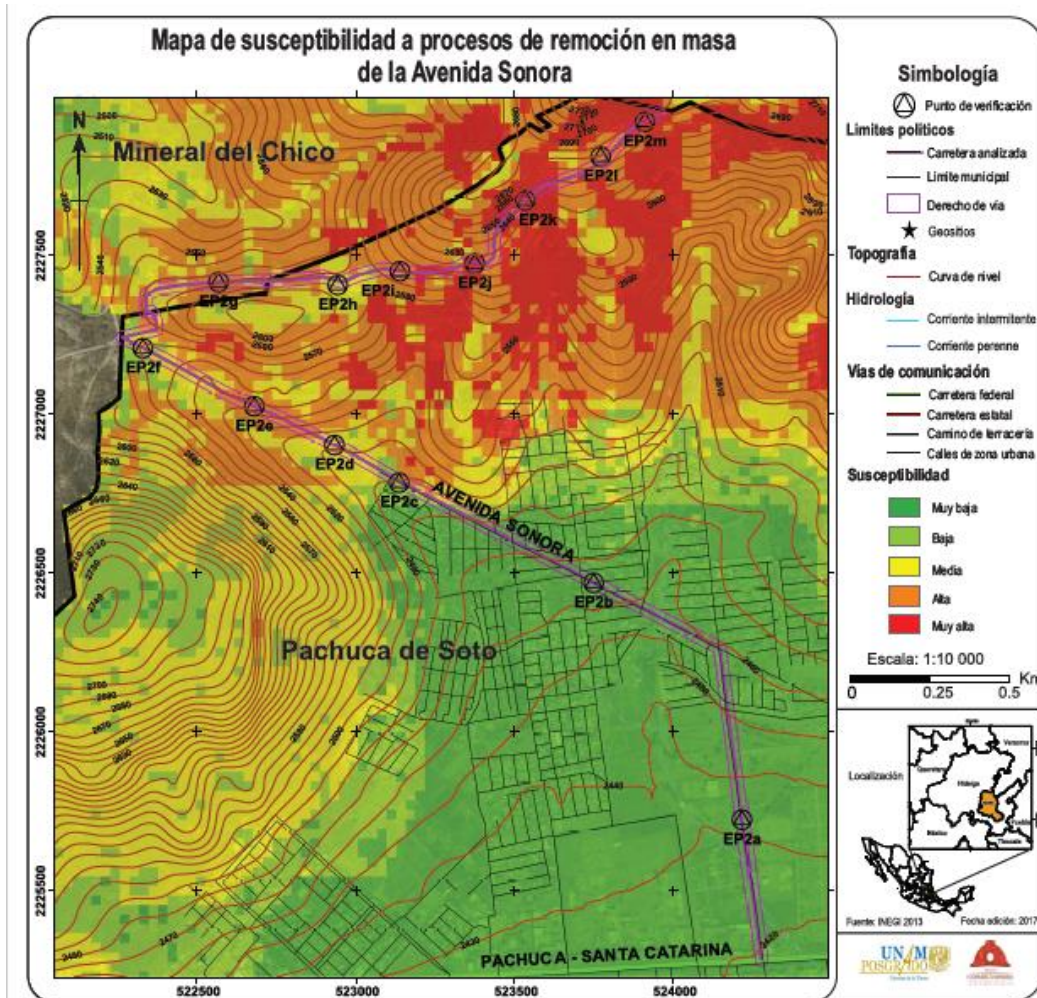


Figura 53. Mapa de susceptibilidad a PRM de la Avenida Sonora.

- **Boulevard Rojo Gómez (EP8)**

La vía de comunicación Boulevard Rojo Gómez tiene una longitud de 1.22 km de los cuales 1.02 km son de susceptibilidad muy baja y 0.2 km son de susceptibilidad baja (figura 54). Se tomó un punto de verificación en la susceptibilidad muy baja (EP8a; anexo 24) y otro punto de verificación en la susceptibilidad baja (EP8b; anexo 25).

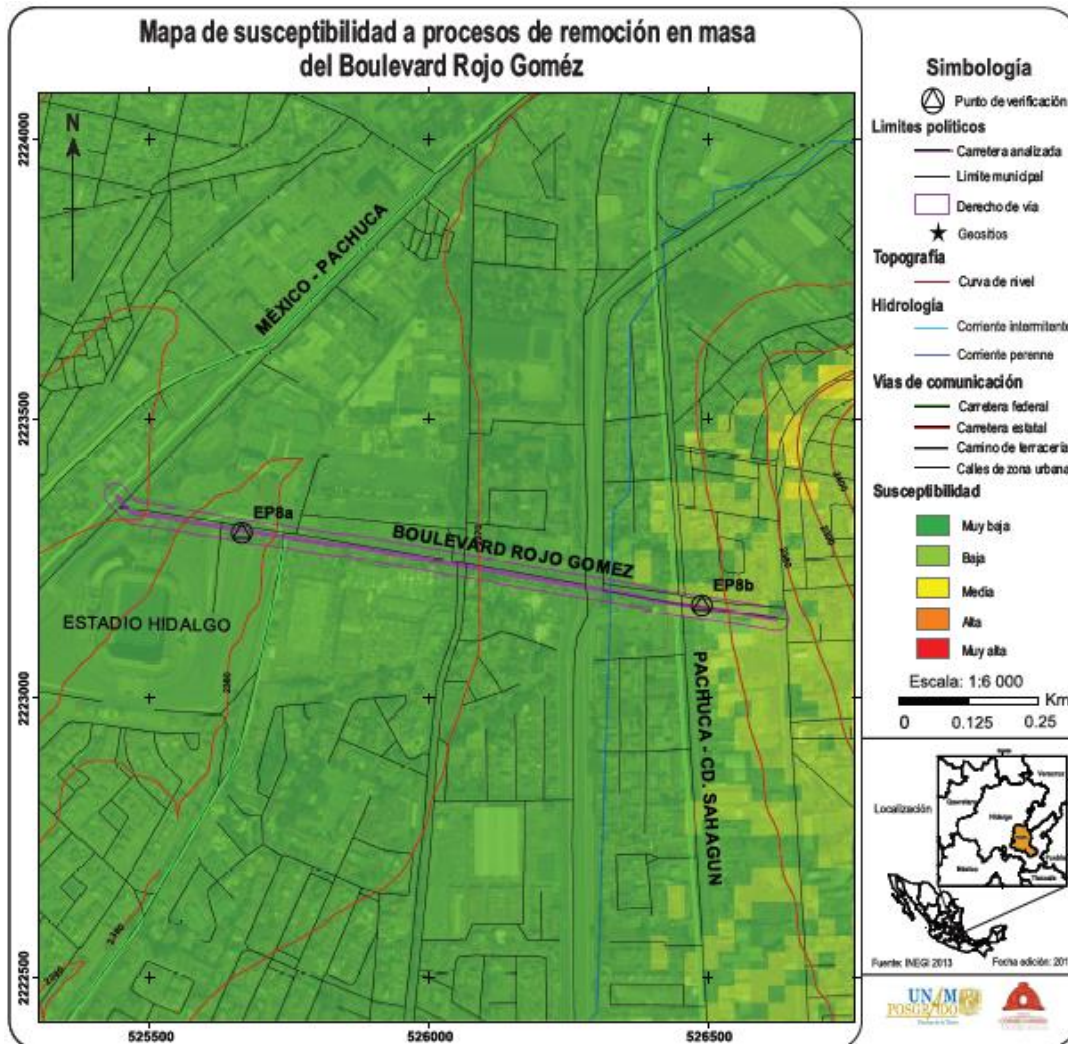


Figura 54. Mapa de susceptibilidad a PRM del Boulevard Rojo Gómez.

- **Libramiento a Tampico (EP14)**

La vía de comunicación Libramiento a Tampico tiene una longitud de 2.18 Km de los cuales 0.48 Km son de susceptibilidad muy baja, 0.66 km son de susceptibilidad baja, 0.97 Km son de susceptibilidad media y 0.07 Km son de susceptibilidad alta a que sucedan PRM (figura 55). Se tomaron seis puntos de verificación distribuidos en la vía de los diferentes niveles de susceptibilidad, los cuales corresponden a: dos puntos de verificación muy baja (EP14a y EP14d; anexos 26 y 27), dos puntos de verificación en la susceptibilidad baja (EP14b y EP14f; anexos 28 y 29), un punto de verificación en la susceptibilidad media (EP14e; anexo 30) y 1 punto de verificación en la susceptibilidad alta (EP14c; anexo 31).

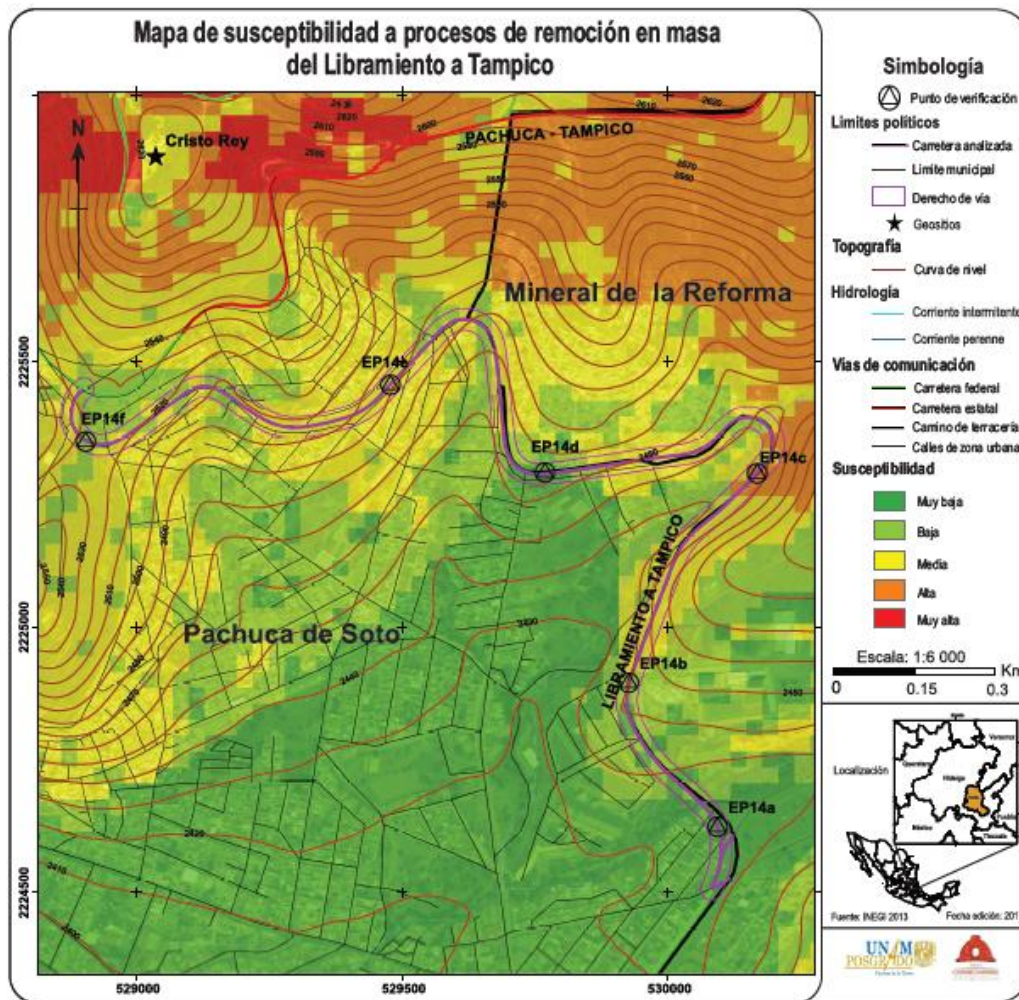
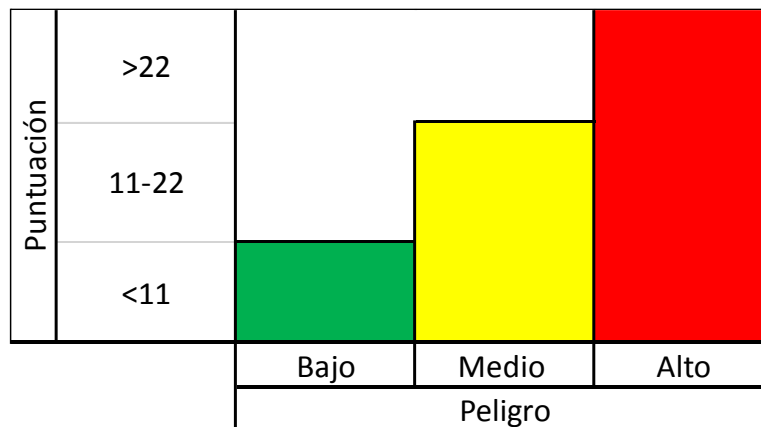


Figura 55. Mapa de susceptibilidad a PRM de la carretera Libramiento a Tampico.

- **Análisis del peligro**

Con la información y las observaciones de campo se asignó valores a cada clase de cada factor del formato evaluador que asocia un nivel de peligro a la ocurrencia de procesos de remoción, proponiendo 3 categorías: peligro bajo con un valor de 1, peligro medio con un valor de 2 y peligro alto con un valor de 3, en algunos casos los factores no disponen de valores de peligro medio y solo se determina peligro bajo y alto. Los factores considerados son: urbanización, inclinación del talud, altura del talud, tipo de peligro, tipo de material en el talud, calidad de la roca, nivel de fracturamiento, tamaño de los bloques, obras de mitigación, estado de la obra de mitigación y componentes de carretera, los cuales se describen a continuación. La sumatoria de las puntuaciones numéricas que se otorgaron a cada clase de cada factor se utilizó para determinar el nivel de peligro asociado al tramo de carretera. Las puntuaciones resultantes de la información recopilada del formato evaluador arrojaron un valor máximo de 33 puntos y dadas las condiciones idóneas se tiene una puntuación mínima de 11 puntos. Por ello se utilizó una distribución normal para definir las diferentes clases de peligro asociado a los PRM que se presentan en esta investigación, siendo las clases: peligro bajo con una puntuación de <11, peligro medio con una puntuación entre 11 – 22 y peligro alto con una puntuación > 22 (gráfica 2). Para el uso y fines prácticos de las autoridades competentes en materia de análisis y gestión de riesgo, el mapa de peligro se clasificó en tres categorías: peligro bajo, peligro medio y peligro alto, en el cual se identificaron gráficamente las zonas en que necesitan realizarse estudios más específicos. En este trabajo se muestran 31 de los 100 puntos de verificación analizados (anexos 4 al 31), los puntos restantes se resumen en el mapa de peligro.



Gráfica 2. Puntuación para determinar el nivel de peligro en el punto de verificación por medio del formato evaluador.

- **Urbanización:**

Se asignó un nivel de peligro alto a la zona urbana que se encuentra dentro del derecho de vía y un nivel de peligro bajo a las zonas donde no se presenta urbanización dentro del derecho de vía.

- **Inclinación del talud**

Las observaciones en campo mostraron que las pendientes que van de 0° a 30° contribuyen en menor medida a los procesos de remoción por ello se le asigna un valor de peligro bajo, las pendientes de 30° a 40° muestran una moderada asociación a los PRM, considerando a esta clase con un peligro medio, mientras que las pendientes mayores a 40° contribuyen en mayor medida a los PRM, a esta clase se le asignó un valor de peligro alto.

- **Altura del talud**

Este factor asoció los cortes de talud y su posible afectación a la vía de comunicación a causa de un PRM, en el recorrido de campo se observaron que los taludes que tienen una altura menor o igual a un metro se mantienen estables, esta clase presenta un peligro bajo, los taludes que miden entre un metro y tres metros, al ocurrir algún proceso de remoción, por lo regular en la zona de estudio caída de rocas y derrumbes, estos obstruyen parcialmente la carretera, por ello se le asigna un peligro medio, mientras que los taludes mayores a tres metros cuando ocurre caída de rocas o derrumbes, estos llegan al asfalto y ponen en peligro a los usuarios de la carretera, por lo que a esta clase se le asigna un valor de peligro alto.

- **Tipo de peligro**

Este criterio señaló de manera general los tipos de PRM que acontecen en el tramo carretero, siendo caída de rocas, derrumbes, deslizamientos, flujos, expansiones y complejos los principales peligros. El nivel de peligro asociado a la presencia de cualquier tipo es alto mientras que la ausencia de cualquier proceso tiene una asociación de peligro bajo.

- **Tipo de material en el talud**

Este factor contempló las características litológicas del talud. Se clasificó la litología en: depósitos sedimentarios, depósitos volcánicos, rocas ígneas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias. Los depósitos sedimentarios más importantes considerados son: suelo, aluvión, coluvión y lacustres; El suelo se consideró como material no consolidado de la superficie terrestre y en general los depósitos sedimentarios comúnmente carecen de

cohesión y de compactación debido a que son depósitos muy recientes y no han sufrido un proceso importante de diagénesis, estos son muy fáciles de erosionar y por consecuencia son terrenos inestables, debido a estas características se le asocio un nivel de peligro alto.

Los depósitos volcánicos son producto de una actividad volcánica, generalmente explosiva que cubren una porción del terreno cerca de su origen, estos comprenden material homogéneo de forma masiva, en capas o bloques, regularmente se consideran como material sin consolidar, semi compactos y fáciles de erosionar por la acción el agua, debido a estas características el nivel de peligro asociado a estos depósitos es de nivel medio. Las rocas sedimentarias, ígneas (intrusivas o extrusivas) y las rocas metamórficas se consideran por su génesis como rocas compactas, con buena cohesión y resistentes a la erosión y fungen como un terreno estable por ello se le asigna un nivel de peligro bajo.

- **Calidad de la roca:**

Esta característica se asoció a la cohesión de la roca que aflora por medio de observaciones en campo y a su estabilidad. Las rocas compactas hace referencia a paquetes litológicos bien consolidados y homogéneos, los cuales obtuvieron un nivel de peligro bajo, las rocas con media compactación son aquellas rocas homogéneas y consolidadas que tienen intemperismo físico o químico moderado valorándose con un peligro medio, mientras que la roca sin compactar se asocia la roca alterada e intemperizada que ha perdido su confinamiento original, por ello se consideran con peligro alto.

- **Nivel de fracturamiento:**

Este factor se empleó para referirse a las superficies discretas que segmentan o dividen en bloques a las rocas que afloran en los taludes y laderas, en donde se encuentran diferentes niveles de cohesión asociandos al comportamiento quebradizo de los materiales. En campo se observó que entre mayor es el número de familias de fracturas, las rocas se fragmentan en más bloques por lo que es más peligroso. Por otro lado con el análisis de la información de se definieron que las rocas que afloran y se encuentran fracturadas con una familia tienen un nivel de peligro bajo, si las rocas tienen dos familias de fracturas o fallas se considera con un nivel de peligro medio y por ultimo si la roca contiene tres o más familias de fracturas y fallas, estas rocas se consideraron con un nivel de peligro alto.

- **Tamaño de los bloques:**

Esta característica contempló el tamaño de los bloques de roca presentes en los taludes, los cuales pueden sufrir desprendimientos o vuelcos, de acuerdo a las observaciones en campo sus tamaños pueden afectar la carretera cuando presenta algún proceso de remoción. En el trabajo de campo se observó que los bloques < 20 cm en caída de rocas y derrumbes suelen depositarse al pie del talud y no llegan al asfalto por lo que no ponen en peligro directo a los usuarios de la carretera, por ello se consideran con un nivel de peligro bajo, también se analizaron los bloques entre 20 cm y 70 cm en caída de rocas y derrumbes estos pudieron depositarse en el asfalto. Para la evaluación del peligro se consideró el siguiente criterio; si la carretera no cumple con ciertas características constructivas o medidas de mitigación como zonas de amortiguamiento, fondo o cuneta, ponen en peligro a los usuarios de la carretera, por ello se le asignó un nivel de peligro medio, por último los bloques > 70 cm en caída de rocas y derrumbes pueden depositarse sobre el asfalto y accionar accidentes mortales para usuarios que circulan sobre la carretera, además los bloques con este tamaño pueden obstruir parcial o totalmente la carretera y ocasionar un nivel de daño considerable al asfalto carretero, por lo que este tamaño de bloque es mas peligroso y se asocia a un nivel de peligro alto.

- **Obra de mitigación:**

Son obras de ingeniería que se realizaron para la prevención y la mitigación de peligros existentes por procesos de remoción, la ejecución de estas obras, como cualquier obra de infraestructura puede generar un impacto negativo sobre el medio ambiente, por lo que se deben de tener en cuenta recomendaciones técnicas a fin de evitar, reducir, corregir o compensar tales impactos. Se observó en campo que cuando se haya una obra de mitigación el peligro asociado es bajo, ya que esta mitiga el peligro existente y en caso contrario si no existe una obra y se halla algún proceso de remoción en masa a esta zona se le asociara un peligro alto. Entre las obras de mitigación presentes en el PGCMH son: enmallado, muros de contención, muro gavión, cemento lanzado, muros anclados, cunetas, contracuetas o zanjas de coronación, drenes horizontales y terraceo.

- **Estado de la obra:**

Esta característica midió la operatividad y mantenimiento de la obra de mitigación, es decir si la obra de mitigación no presenta daños se dice que su estado es bueno y tiene un nivel de peligro asociado bajo, si la obra de mitigación presenta algunos problemas con algún PRM y en su continuidad general existe algún daño parcial pero con un continuo mantenimiento,

entonces se considera esta obra con un peligro medio, mientras que aquella obra de mitigación que se encuentra en mal estado sin mantenimiento y con problemas parciales o totales por algún proceso de remoción, esta se considera inoperable ante el peligro que se está tratando de mitigar, por ello esta clase se considera con un nivel de peligro alto.

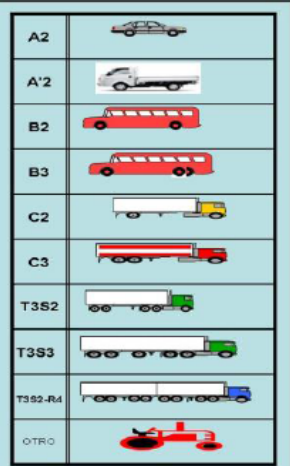
- **Componentes de la carretera:**

Para determinar la influencia de esta característica se considera la existencia de zonas de acotamiento o fondo con peligro bajo, mientras que la ausencia de estas obras se considera con un peligro alto. Esto debido a que se observó que estas estructuras sirven como zona de acumulación para la caída de rocas y derrumbes principalmente.

3.2.2 Mapa de vulnerabilidad

El análisis de la vulnerabilidad en las vías de comunicación consistió en un conteo sistemático de los vehículos que circulan por la carretera, el cual se obtuvo durante el levantamiento de la información en campo con el fin de conocer la vulnerabilidad física, es decir determinar el flujo vehicular que transita por la carretera y su clasificación de acuerdo a la tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de vehículos y características.

CLASIFICACIÓN DEL VEHÍCULO	CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO	
A	MENOR DE 3 TONELADAS	
B	TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS	
C2	MAYOR DE 3 TONELADAS Y CON 2 EJES	
C3	MAYOR DE 3 TONELADAS Y CON 3 EJES	
T3S2	MAYOR DE 3 TONELADAS, CON 3 EJES Y REMOLQUE DE 2 EJES	
T3S3	MAYOR DE 3 TONELADAS, CON 3 EJES Y REMOLQUE DE 3 EJES	
T3S2R4	MAYOR DE 3 TONELADAS, CON 3 EJES, REMOLQUE DE 2 EJES Y SEMIRREMOLQUE DE 4 EJES.	

Para conocer el tránsito se realizaron aforos vehiculares en los entronques de los tramos de carretera analizados. Este procedimiento consistió en un censo sistemático en intervalos de tiempo de 30 minutos de los vehículos que circulaban por el tramo de carretera en ambos sentidos. A partir de este levantamiento se obtuvo la variación y comportamiento de

volúmenes de circulación vehicular promediados y utilizados en esta investigación. El mapa de vulnerabilidad física se dividió en zona conurbada y en zona urbana, esta última tiene una gran actividad vehicular dentro del municipio por lo que no se realizó un conteo sistemático.

3.2.3 Mapa de riesgo

Para elaborar el mapa de riesgo se utilizó el mapa de peligro y el de vulnerabilidad, en cual se identificaron tramos en peligro diferenciados en niveles para las diferentes vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto, así como los mecanismo de movimiento que se suscitan y su vulnerabilidad física expuesta.

Capítulo IV Resultados

4.1 El inventario de los procesos de remoción en masa del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

En total se identificaron 579 PRM en el proyecto. Estadísticamente dentro de los nueve municipios que conforman el PCHMH el municipio de Pachuca de Soto obtuvo el mayor número de procesos de remoción con 130, seguido por el municipio de Mineral del Chico con 91, mientras que los demás municipios cuentan con menos procesos como se muestra en la tabla 8.

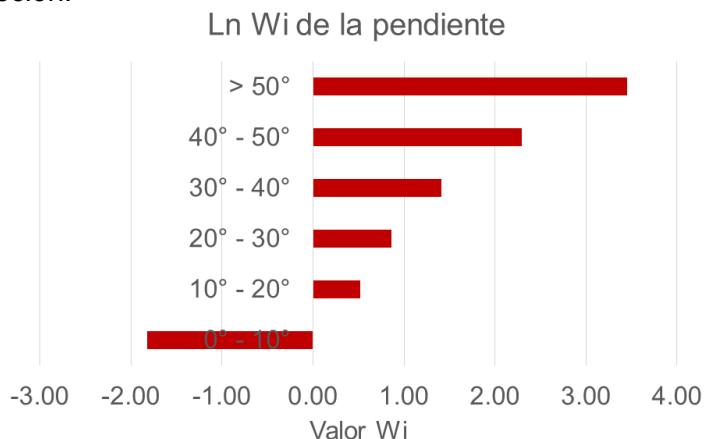
Tabla 8. Se muestran los municipios, el porcentaje, el numero y los tipos de PRM.

Municipio	% de PRM	# de PRM	Tipo de PRM			
			Caída de rocas	Flujo	Deslizamiento	Complejo
Pachuca de Soto	22.5	130	30	61	34	5
Mineral del Chico	15.7	91	11	73	7	
Epazoyucan	13.1	76	11	50	11	4
Huasca de Ocampo	11.4	66	5	50	10	1
Singuilucan	11.4	66	3	52	4	7
Mineral de la Reforma	9.5	55	17	32	6	
Atotonilco el Grande	9.2	53	6	43	4	
Mineral del Monte	6.0	35	5	20	10	
Omitlán de Juárez	1.2	7		5	2	
Total	100.0	579	88	386	88	17

4.2 Factores que controlan la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en el Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

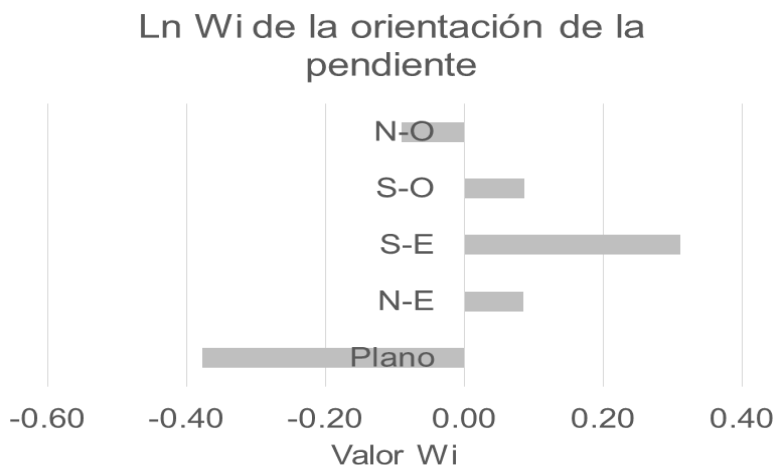
El Ln Wi aplicado en el PGCMH reveló la asociación de las clases de cada factor con la ocurrencia de los PRM, las cuales son descritas de la siguiente manera: 1) Pendiente. 2) Orientación de la pendiente. 3) Curvatura de la pendiente. 4) Uso de suelo. 5) Geomorfología. 6) Litología. 7) Distancia de estructuras. 8) Precipitación máxima y 9) Densidad de drenaje:

1) Pendiente: la relación que existe entre las distintas clases de pendiente y los PRM en el PGCMH es evidente como se muestra en la gráfica 3, a mayor inclinación de la ladera se tiene una afinidad positiva a presentar inestabilidad y decrece a medida que disminuye el grado de pendiente, siendo la clase de 0°-10° con afinidad negativa a que sucedan algún proceso de remoción.



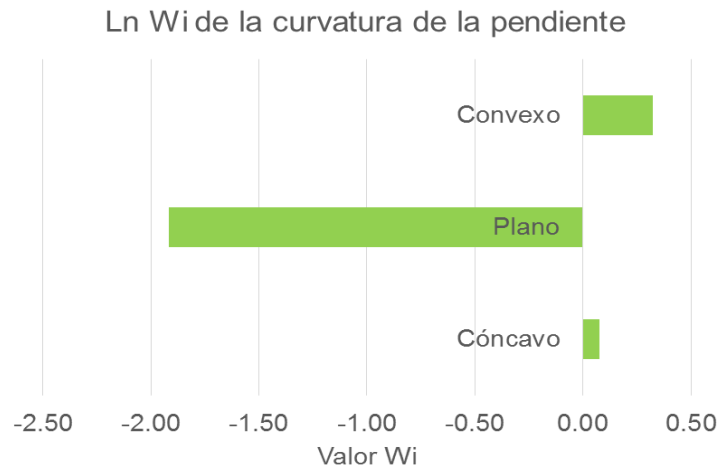
Gráfica 3. Ln Wi de la pendiente del PGCMH que muestra las clases que contribuyen a los proceso de remoción.

2) Orientación de la pendiente: la relación que existe entre las distintas clases de orientación de la pendiente y los PRM se muestra en la gráfica 4. Las pendientes con una orientación SE (90°-180° respecto al norte) son las más afectadas por los procesos de remoción, las pendientes con una orientación N-E (0°-90° respecto al norte) y S-O (180°- 270° respecto al norte) contribuyen en menor proporción, mientras que las pendientes N-O (270°- 360° respecto al norte) y el terreno plano que no presenta una orientación no influye en la inestabilidad.



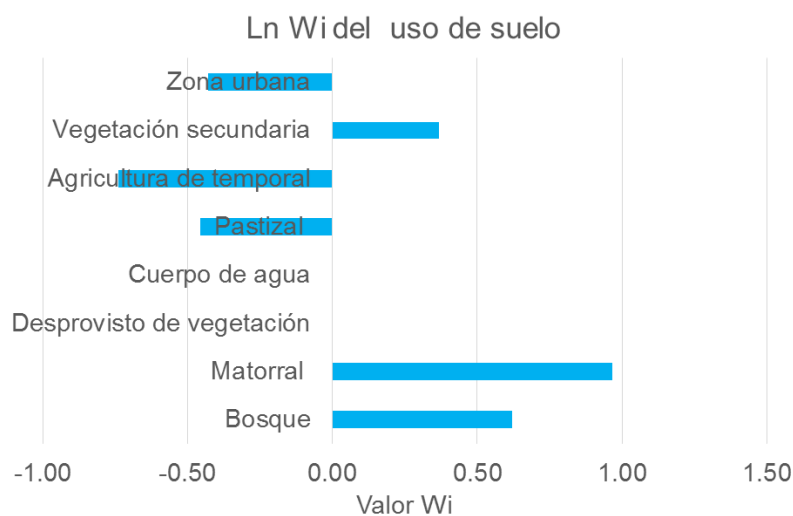
Gráfica 4. Ln Wi de la orientación de la pendiente del PGCMH.

3) Curvatura de la pendiente: la relación que existe entre la curvatura de la pendiente y los PRM se muestran en la gráfica 5. Las pendientes que más afinidad tienen a presentar PRM son con curvatura cóncava y en menor medida las pendientes con una curvatura convexa, mientras que, las laderas planas o sin curvatura no contribuyen a la presencia de los procesos de remoción.



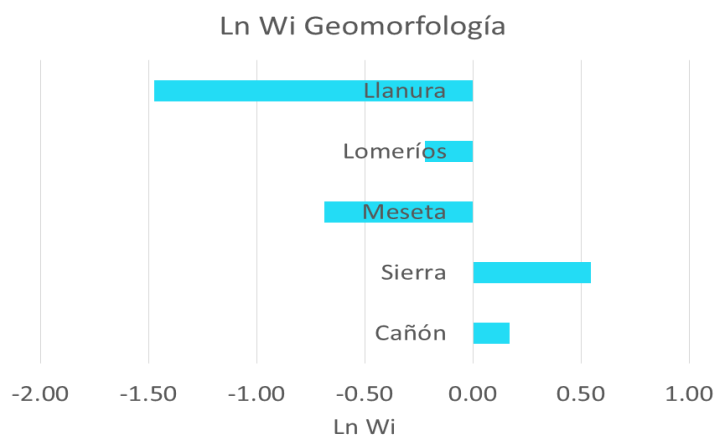
Gráfica 5. Ln Wi de la orientación de la pendiente del PGCMH.

4) Uso de suelo: las clases de este factor que contribuyen a la ocurrencia de PRM se muestran en la gráfica 6. Las más afines son matorral que contemplan plantas como los nopales, agaves y cactáceas, seguido de bosque que son de pino-encino, oyamel, pino, oyamel, táscate, mezquite y la vegetación secundaria la cual contempla un espacio geográfico alterado por factores antrópicos; por otro lado con una afinidad negativa se tienen las clases de zona urbana, agricultura de temporal y pastizal.



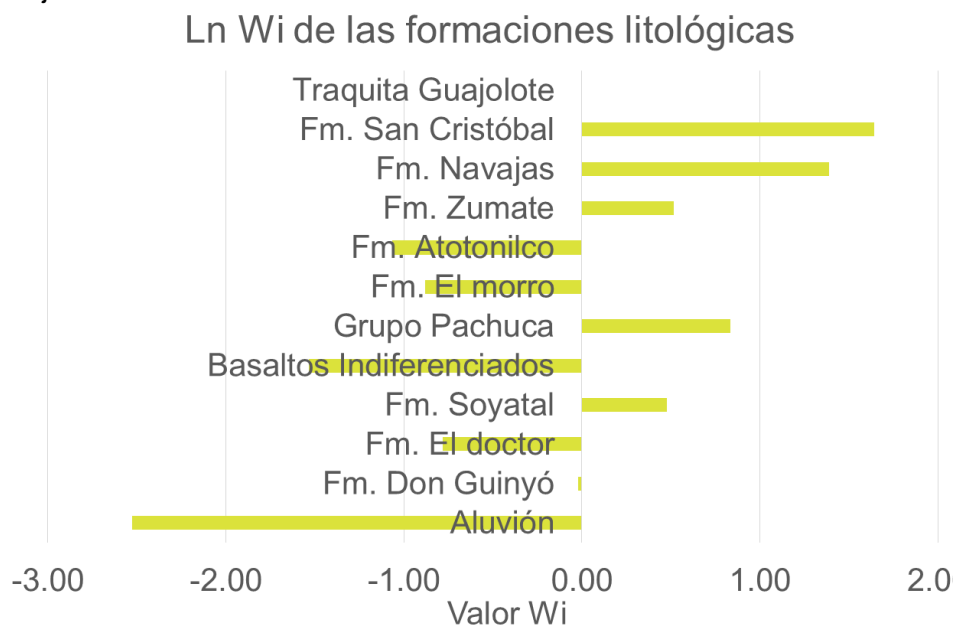
Gráfica 6. Ln Wi del uso de suelo que muestra las clases que contribuyen a los PRM.

5) Geomorfología: la relación que existe entre las unidades geomorfológicas y los PRM se muestra en la grafica 7. En la cual las unidades mas afines a que sucedan procesos son Sierra y Cañón, ya que ambas se relacionan con una topografía accidentada, con pendientes pronunciadas y escarpadas, mientras que no existe relación entre las Llanuras, Lomeríos y la Meseta y los procesos de remoción.



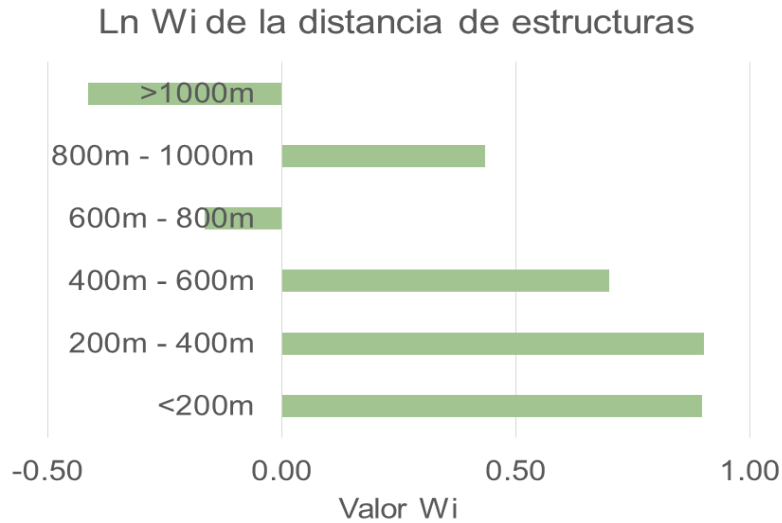
Gráfica 7. Ln Wi de la Geomorfología que muestra las clases que contribuyen a los PRM.

6) Formaciones litológicas: la relación existente entre las distintas formaciones litológicas y los PRM se muestra en la gráfica 8. En la cual se observa que la formación San Cristóbal y la formación Navajas son las mas afines que ocurran PRM junto con el Grupo Pachuca y en menor medida la Formación Zumate y la Formación Soyatal, entre las formaciones litológicas menos a fines a que sucedan procesos de remoción se tienen los depósitos aluviales y los basaltos indiferenciados, así como las Formaciones Atotonilco, El Morro Don Guinyó y la Traquita Guajolote.



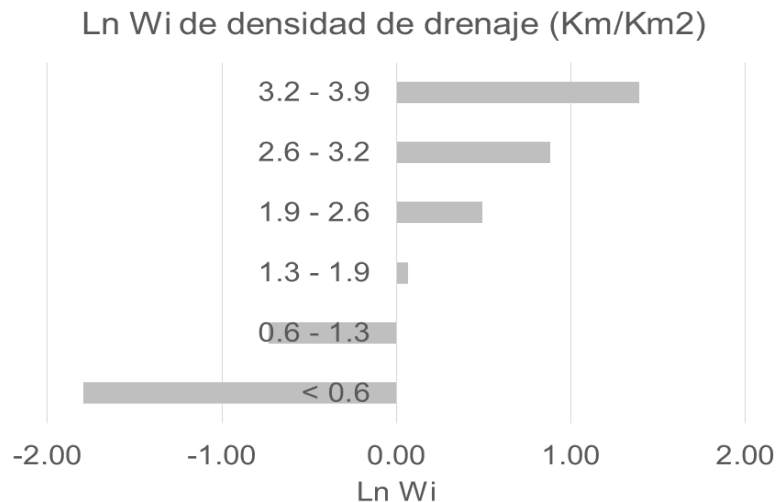
Gráfica 8. In Wi de las formaciones litológicas que intervienen en los PRM.

7) Distancia de estructuras: la relación que existe entre las distintas distancias de las estructuras y los PRM dentro del PGCMH se muestra en la gráfica 9. En la cual se observa que dentro de los primeros 400 m existe una relación muy fuerte con los PRM, decreciendo a la distancia de los 400 m a 600 m, mientras que de los 600 m a los 800 m se muestra una afinidad negativa, posteriormente a los 800 m y los 1000 m se tiene una influencia considerable y a distancias mayores a 1000 m de las estructuras no contribuyen en la inestabilidad de las laderas mostrando una afinidad negativa.



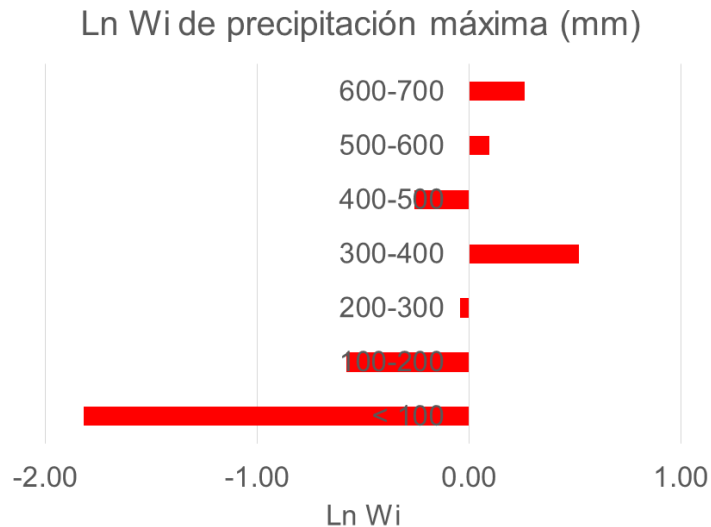
Gráfica 9. Ln Wi de distancia de estructuras del PGCMH.

8) Densidad del drenaje: la relación que existe entre densidad de drenaje y los PRM se muestran en la gráfica 10. Las zonas con mayor concentración de densidad de drenaje tienen una afinidad mayor a presentar procesos de remoción, mientras que aquellas zonas donde se tiene una menor densidad de drenaje tienen una afinidad negativa.



Gráfica 10. Ln Wi de densidad de drenaje del PGCMH.

9) Precipitación máxima: las zonas que tienen una precipitación máxima entre 300 mm - 400 mm, 500 mm – 600 mm, 600 mm – 700 mm tienen una afinidad mayor a presentar procesos de remoción, mientras que las zonas con precipitaciones máximas entre 400 - 500, 200 - 300, 100 - 200 y 0 - 100 no contribuyen a la presencia de los PRM como se muestra en la grafica 11.



Gráfica 11. Ln Wi de precipitación máxima del PGCMH .

El mapa resultante del método Wi aplicado al PGCMH se clasifico en cinco clases de susceptibilidad: muy alta, alta, media, baja y muy baja donde analizaron 191,433 hectareas. Estas se describen de la siguiente manera:

Susceptibilidad muy alta ocupan el 1.7% del total del territorio, esta clase tiene pendientes fuertes a escarpadas (>50°), se encuentra dentro de la unidad geomorfológica de Sierra y algunas zonas de la unidad de Cañón, con un uso de suelo de bosque, se relaciona estructuralmente dentro de los primeros 400 m de las fallas y lineamientos regionales, geológicamente se encuentra en las Formaciones de Navajas, Zumate y Grupo Pachuca.

Susceptibilidad alta ocupan el 14.9% del total del territorio, esta clase corresponde a zonas con pendientes fuertes (30° a 50°), se ubica principalmente en las unidades geomorfológicas de Sierra y Cañón teniendo un uso de suelo de vegetación secundaria, matorrales y bosques, encontrándose dentro o muy cerca (400 -600 m) de los sistemas de estructuras, geológicamente se ubica en las Formaciones Navajas, San Cristóbal y con Grupo Pachuca.

Las áreas con susceptibilidad media abarcan el 15.4% del total del territorio, esta clase tiene pendientes moderadas (de 20° a 30°), dentro de las unidades geomorfológicas de Sierra,

Cañón y Lomeríos, con un uso de suelo de bosque, pastizal, vegetación secundaria y agricultura de temporal, esta clase se encuentra estructuralmente dentro y fuera del rango definido de 1 km, geológicamente ocupan las Formaciones de Navajas, Zumate, Grupo Pachuca, Don Guinyó, Guajolote, Soyatal y El Doctor.

Las áreas con susceptibilidad baja ocupan el 27.5% del total del territorio con pendientes suaves (de 10° a 20°), dentro de las unidades geomorfológicas de Lomeríos, Cañón, Meseta y una pequeña porción de Sierra, con un uso de suelo de agricultura de temporal, pastizal, bosque, vegetación secundaria, desprovisto de vegetación y parte de zona urbana, estructuralmente se encuentra fuera del rango de 1 km, geológicamente ocupan las de Formaciones Don Guinyó, Atotonilco, El Morro, Soyata, los Basaltos Diferenciados y Aluviones.

Las áreas con susceptibilidad muy baja ocupan el 40.5% con pendientes muy suaves (<10°) en un terreno plano con un uso de suelo principalmente de zona urbana y agricultura de temporal, geomorfológicamente se encuentra en la Meseta y en Llanura, estructuralmente se ubica fuera del rango de 1 km, las litologías que se encuentran en esta clase son los Basaltos Diferenciados y Aluvión y las Formaciones El Morro, Atotonilco, Don Guinyó.

4.3 Susceptibilidad por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del Proyecto Geoparque Comarca Minera Hidalgo

El resultado de este análisis comprendió 754.7 Km de caminos de terracería y 426.8 Km lineales de las vías de comunicación asfaltadas de las cuales 69 Km son de carácter federal y 357.8 Km de carreteras estatales (tabla 9). Los kilometrajes analizados en el SIG a nivel municipal corresponden a los nueve municipios que conforman el PGCMH y se desglosan de la siguiente manera:

Tabla 9. Susceptibilidad de las vías de comunicación para la región del PGCMH.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	41.53	60.19	199.05	55.63	407.8	54.03
Baja	12.14	17.59	88.70	24.79	173.3	22.97
Media	3.63	5.26	35.24	9.85	92.6	12.27
Alta	10.12	14.67	32.77	9.16	73.8	9.78
Muy alta	1.58	2.29	2.08	0.58	7.2	0.95

- **Pachuca de Soto**

Este municipio tiene una longitud total de 91.03 Km de vías de comunicación asfaltadas de los cuales 1.69 Km son de carácter federal, 89.34 Km de carreteras estatales y 12.74 Km son caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	0.08	4.62	67.78	75.86	0.01	0.08
Baja	0.43	25.35	8.17	9.15	1.46	11.45
Media	0.85	50.41	5.72	6.40	4.19	32.91
Alta	0.33	19.62	6.74	7.55	5.98	46.93
Muy alta	0.00	0.00	0.93	1.04	1.10	8.63

El resultado del análisis de la susceptibilidad y las vías de comunicación en el municipio de Pachuca de Soto con el SIG, se muestra en la tabla 11. Este análisis muestra por carretera los kilometrajes que se tienen en los diferentes niveles de susceptibilidad.

Tabla 11. Susceptibilidad a PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto; FPn = Federal Pachuca, EPn = Estatal Pachuca, MB = susceptibilidad muy baja, B= susceptibilidad baja, M = susceptibilidad media, A = susceptibilidad alta, MA = susceptibilidad muy alta.

Tipo de vía de comunicación	Número Federal	Código de estudio	Nombre	Km	Susceptibilidad (Km)					
					MB	B	M	A	MA	
Federal	105	FP1	Pachuca - Tampico	1.69		0.08	0.42	0.86	0.33	
Estatal		EP1	Antigua carretera México-Pachuca	1.14	1.14					
		EP2	Avenida Sonora	4.66	1.87	0.3	0.87	1.1	0.52	
		EP3	Benito Juárez-La Concepción-Entronque (a Tilcuautla)	0.25	0.2	0.05				
		EP4	Boulevard Las Torres	2.38	2.38					
		EP5	Boulevard Luis Donald Colosio	7.95	7.78	0.17				
		EP6	Boulevard Nuevo Hidalgo	6.38	6.03	0.35				
		EP7	Boulevard Ramón G. Bonfil	8.05	7.81	0.24				
		EP8	Boulevard Rojo Gomez	1.22	1.02	0.2				
		EP9	Cristo Rey-Entronque (Pachuca-Tampico)	1.23		0.04	0.14	0.66	0.39	
		EP10	El Cerezo-Entronque (Pachuca-Estanzuela-Las Palmas)	0.46			0.26	0.2		
		EP11	El Húixmi-Santa Gertrudis-Entronque (Pachuca-Cd. Valles)	2.84	1.87	0.97				
		EP12	El Venado-Entronque (México-Pachuca)	1.15	1.15					
		EP13	La Paz - Entronque (México-Pachuca)	2.59	2.59					
		EP14	Libramiento a Tampico	2.18	0.48	0.66	0.97	0.07		
		EP15	Mineral del Chico-Entronque (Pachuca-Tampico)	7.48	1.66	0.7	0.31	4.72	0.09	
		85	EP16	México-Pachuca	1.65	1.65				
		88	EP17	Pachuca-Cd. Sahagun	3.10	2.52	0.58			
		85	EP18	Pachuca-Cd. Valles	8.41	7.81	0.6			
			EP19	Pachuca-Estanzuela-Las Palmas	6.20	0.14	1.95	3.66	0.45	
			EP20	Pachuca-Santa Catarina	9.61	7.15	2.46			
		130	EP21	Pachuca-Tulancingo	2.38	2.38				
			EP22	Santiago Tlapacoya – Entronque (Colonias-Santa Catarina)	1.63	0.59	1.04			
			EP23	Tilcuautla-Entronque (Pachuca-Santa Catarina)	2.42	1.17	1.25			
			EP24	Viaducto Nuevo Hidalgo-Mineral del Chico	3.97	0.82	0.37	1.28	1.45	0.05

▪ **Atotonilco el Grande**

Este municipio tiene una longitud total de 60.2 Km de vías de comunicación asfaltados de los cuales 29.9 Km son de carácter federal, 30.3 Km de carreteras estatales y 184.8 Km de caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 12 y en la figura 56.

Tabla 12. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Atotonilco el Grande.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	24.98	83.48	14.98	49.42	90.77	49.12
Baja	4.11	13.73	10.09	33.29	63.28	34.24
Media	0.80	2.67	4.24	13.98	26.60	14.39
Alta	0.04	0.13	1.00	3.31	4.00	2.17
Muy alta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.08

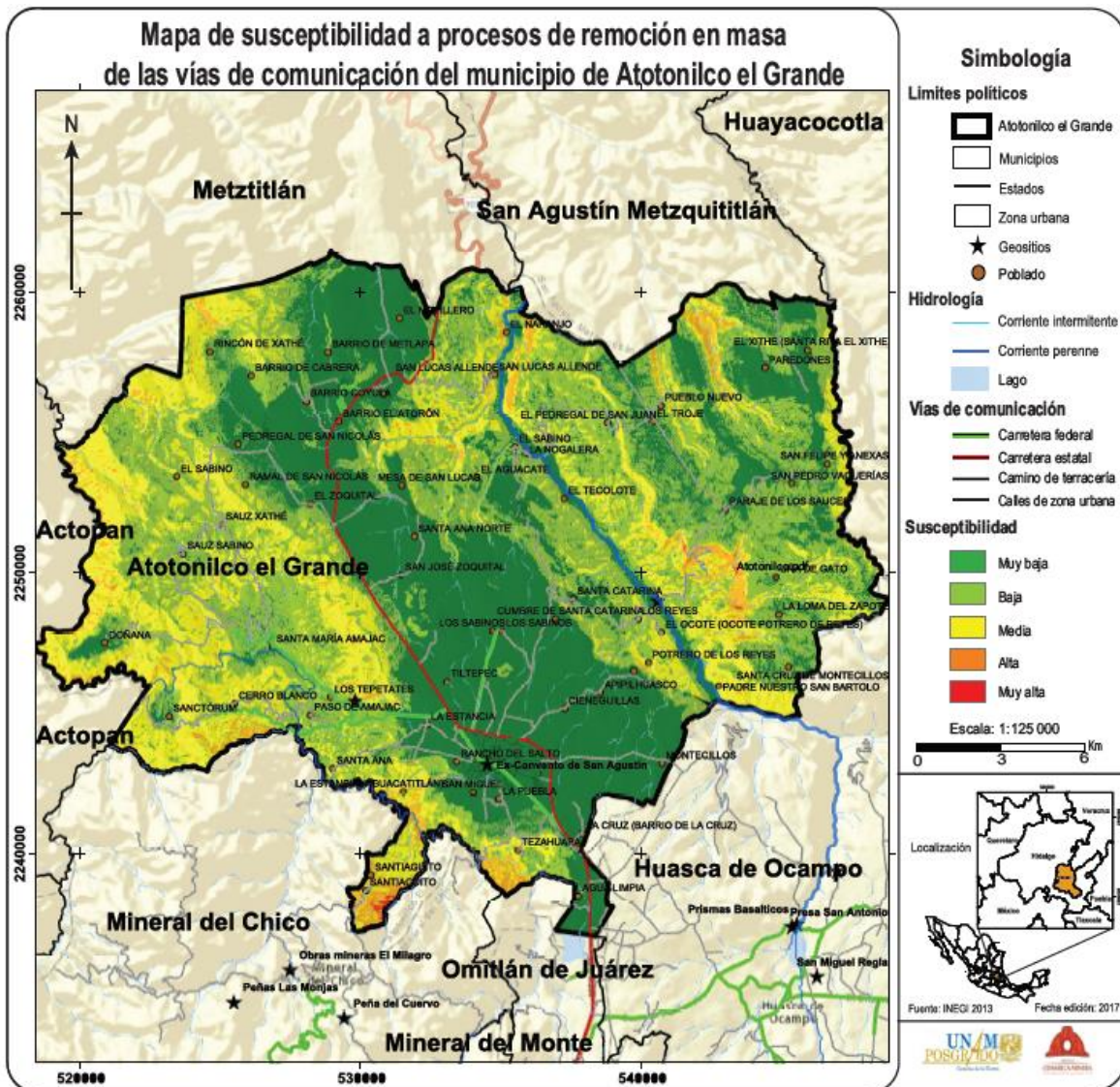


Figura 56. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Atotonilco el Grande.

▪ **Epazoyucan**

Este municipio tiene una longitud total de 41.5 Km de las vías de comunicación asfaltadas de los cuales 13.6 Km son de carácter federal, 27.9 Km de carreteras estatales y 44.0 Km de caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 13 y en la figura 57.

Tabla 13. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Epazoyucan.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	6.90	50.47	8.68	31.09	20.28	46.02
Baja	6.59	48.15	11.18	40.04	21.84	49.56
Media	0.19	1.38	6.33	22.68	1.41	3.20
Alta	0.00	0.00	1.73	6.19	0.46	1.03
Muy alta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.19

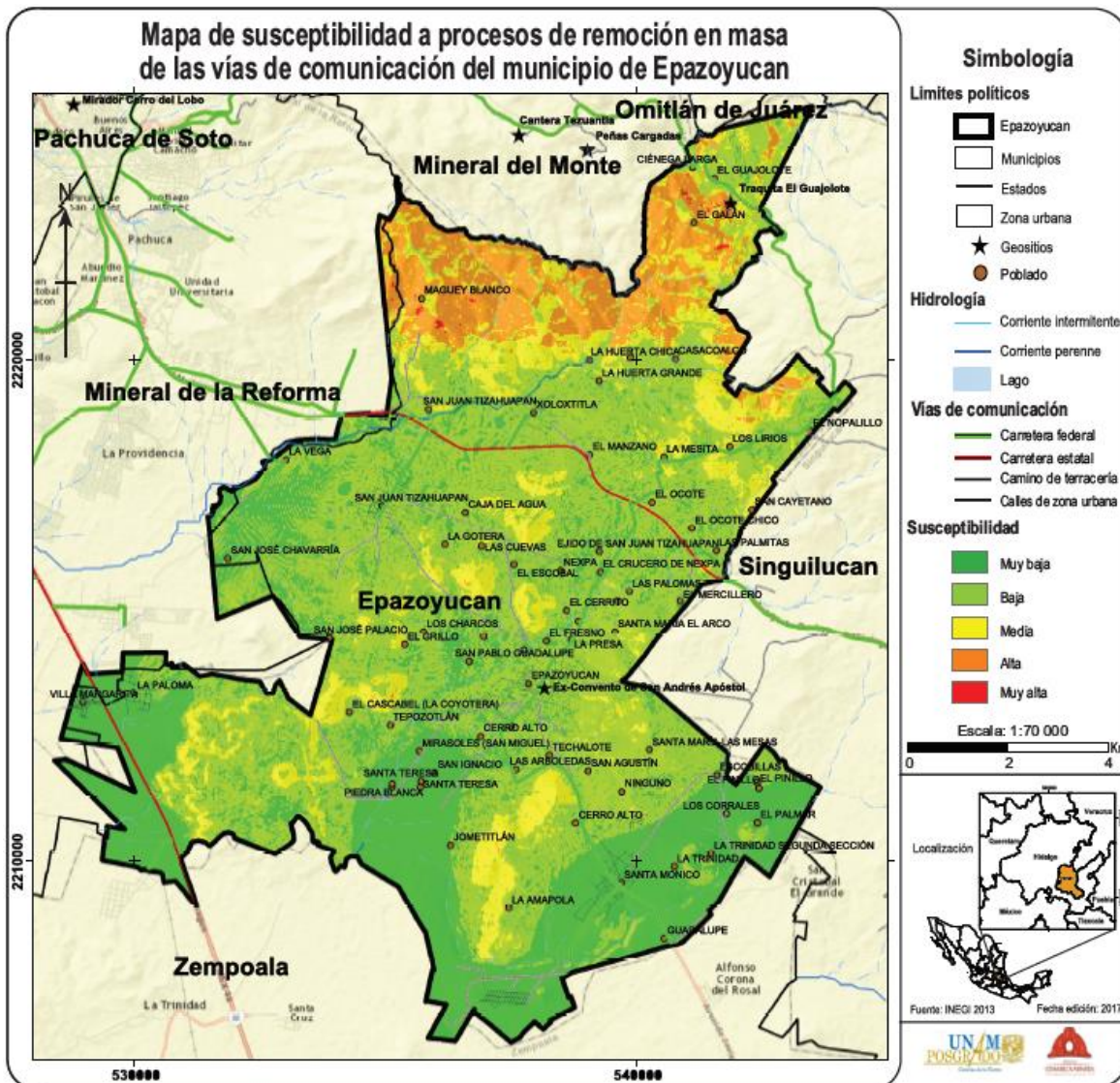


Figura 57. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Epazoyucan.

▪ **Huasca de Ocampo**

Este municipio tiene una longitud total de 43.6 Km de vías de comunicación asfaltadas, de los cuales 0.17 Km son de carácter federal, 43.4 Km de carreteras estatales y 181.5 Km son caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 14 y en la figura 58.

Tabla 14. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Huasca de Ocampo.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	0.17	100.00	26.54	61.09	124.16	68.41
Baja	0.00	0.00	13.49	31.04	37.62	20.73
Media	0.00	0.00	2.46	5.67	14.60	8.04
Alta	0.00	0.00	0.83	1.91	4.96	2.73
Muy alta	0.00	0.00	0.12	0.28	0.16	0.09

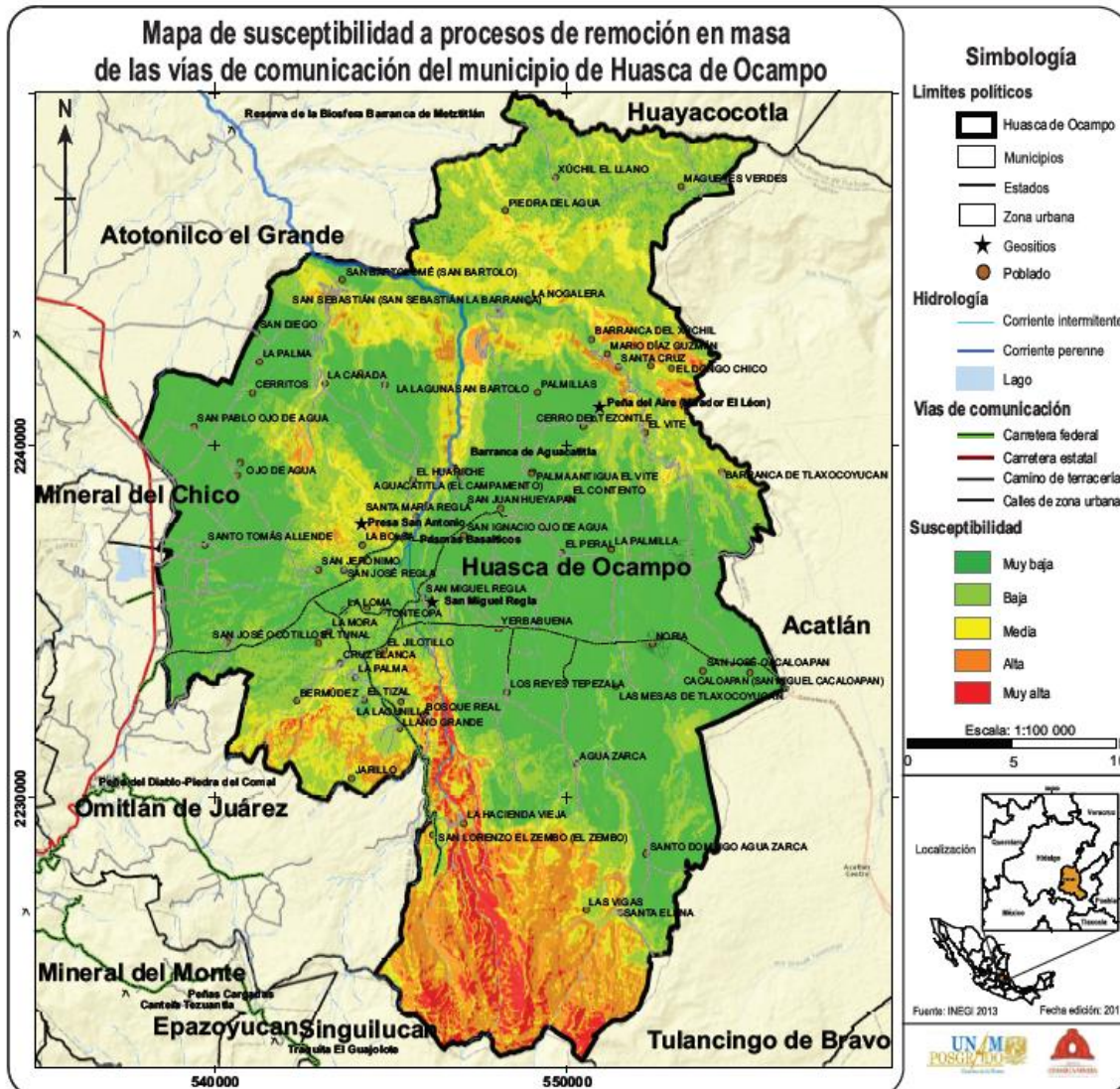


Figura 58. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Huasca de Ocampo.

▪ **Mineral del Chico**

Este municipio tiene una longitud total de 21.4 Km de vías de comunicación asfaltadas de carácter estatal y 84.1 Km de caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 15 y en la figura 59.

Tabla 15. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral del Chico.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	0.00	0.00	0.13	0.63	0.05	0.06
Baja	0.00	0.00	4.37	20.39	6.59	7.83
Media	0.00	0.00	5.55	25.91	24.66	29.31
Alta	0.00	0.00	10.85	50.68	48.42	57.56
Muy alta	0.00	0.00	0.52	2.43	4.40	5.24

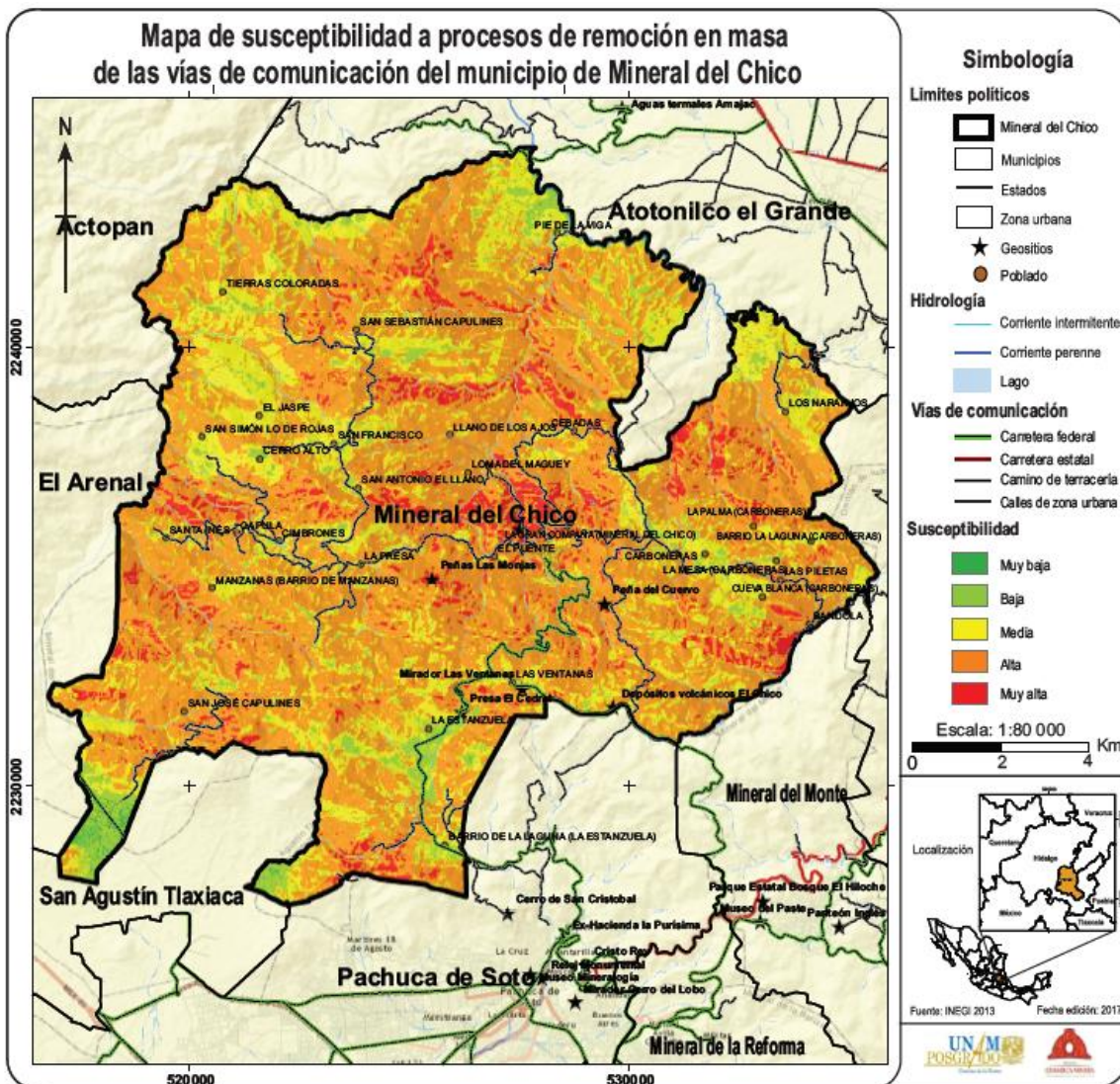


Figura 59. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral del Chico.

▪ **Mineral del Monte**

Este municipio tiene una longitud total de 30.1 Km de vías de comunicación asfaltadas de los cuales 7.3 Km son de carácter federal, 22.8 Km de de carreteras estatales y 10.1 Km son caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 16 y en la figura 60.

Tabla 16. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral del Monte.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	7.30	100.00	13.93	61.09	6.91	68.41
Baja	0.00	0.00	7.08	31.04	2.09	20.73
Media	0.00	0.00	1.29	5.67	0.81	8.04
Alta	0.00	0.00	0.44	1.91	0.28	2.73
Muy alta	0.00	0.00	0.06	0.28	0.01	0.09

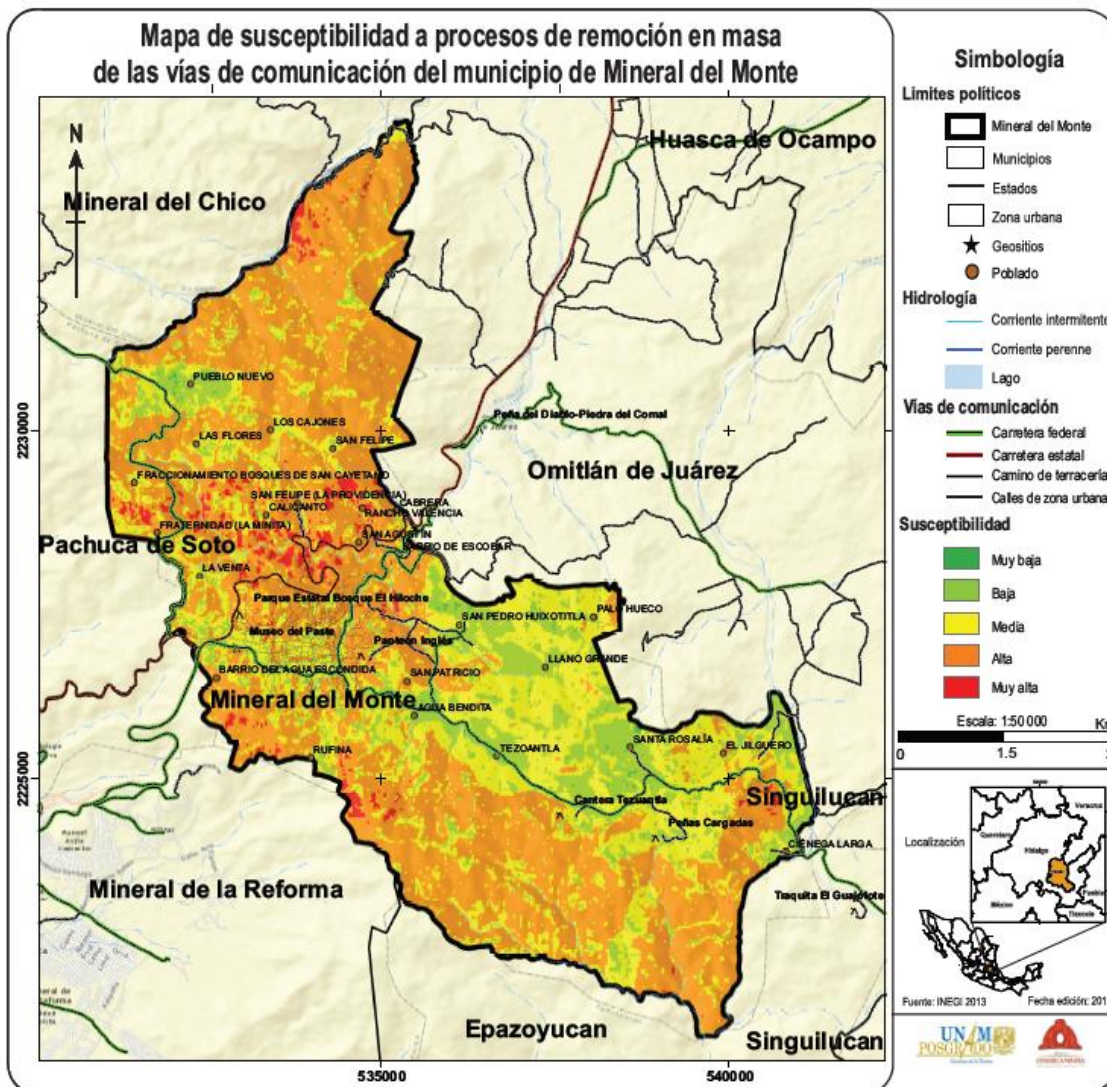


Figura 60. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral del Monte.

▪ **Mineral de la Reforma**

Este municipio tiene una longitud total de 73.9 Km de vías de comunicación asfaltados de los cuales 6.3 Km son de carácter federal, 67.6 Km estatal y 2.3 Km son caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 17 y en la figura 61.

Tabla 17. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral de la Reforma.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	3.24	51.13	44.95	66.47	0.95	40.37
Baja	0.14	2.20	16.89	24.97	0.86	36.49
Media	0.27	4.25	2.89	4.28	0.28	12.09
Alta	2.42	38.20	2.77	4.09	0.26	11.05
Muy alta	0.27	4.21	0.12	0.18	0.00	0.00

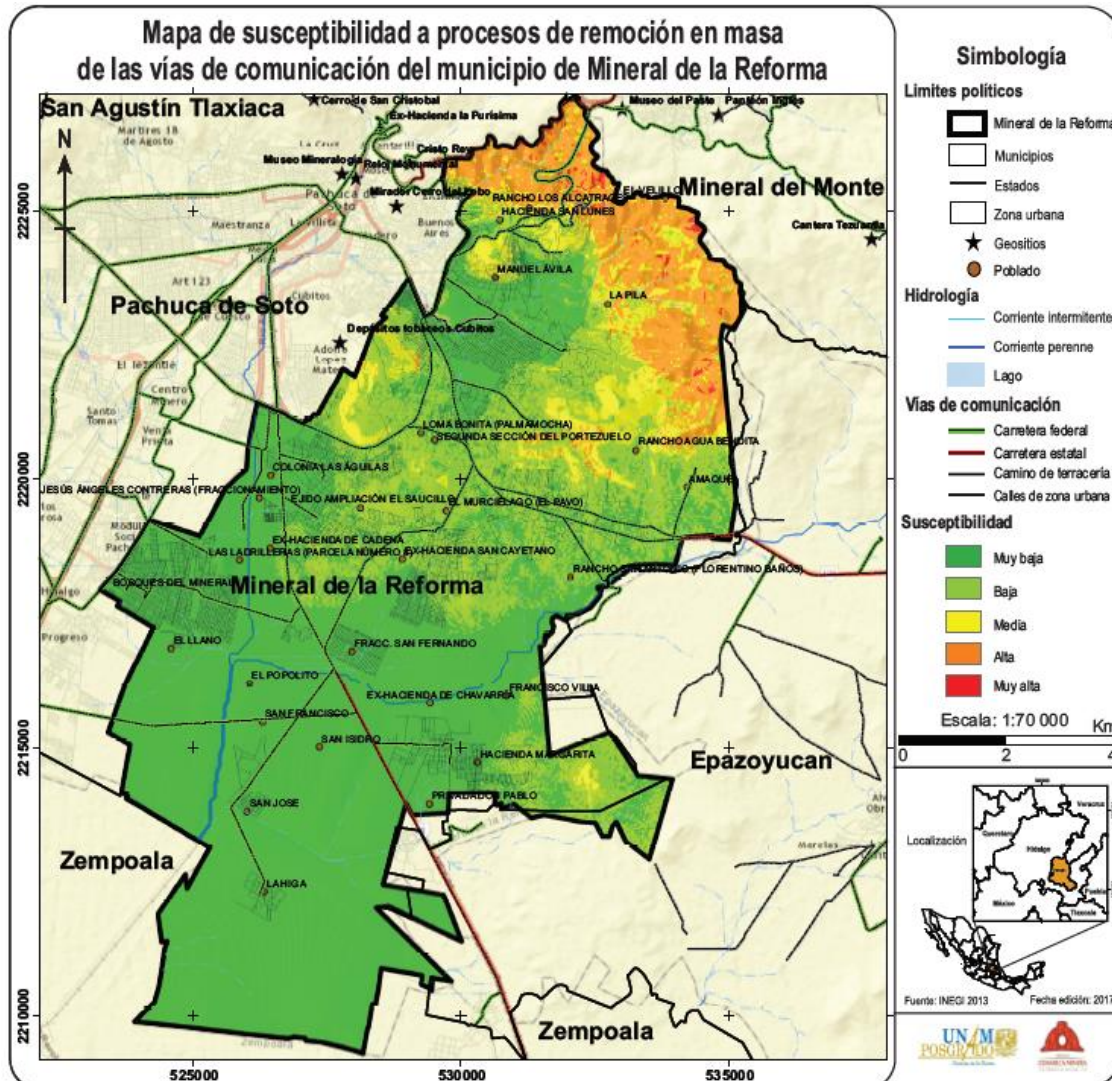


Figura 61. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Mineral de la reforma.

▪ **Omitlán de Juárez**

Este municipio tiene una longitud total de 22.05 Km de vías de comunicación de los cuales 9.9 Km son de carácter federal, 12.1 Km de carreteras estatales y 54.3 Km son caminos de terracería .La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 18 y en figura 62.

Tabla 18. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Omitlán de Juárez.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	6.31	63.74	2.64	21.74	17.1	9.3
Baja	1.03	10.38	4.59	37.76	21.6	11.7
Media	0.93	9.37	2.93	24.08	12.2	6.6
Alta	1.64	16.51	1.91	15.72	3.4	1.8
Muy alta	0.00	0.00	0.09	0.70	0.0	0.0

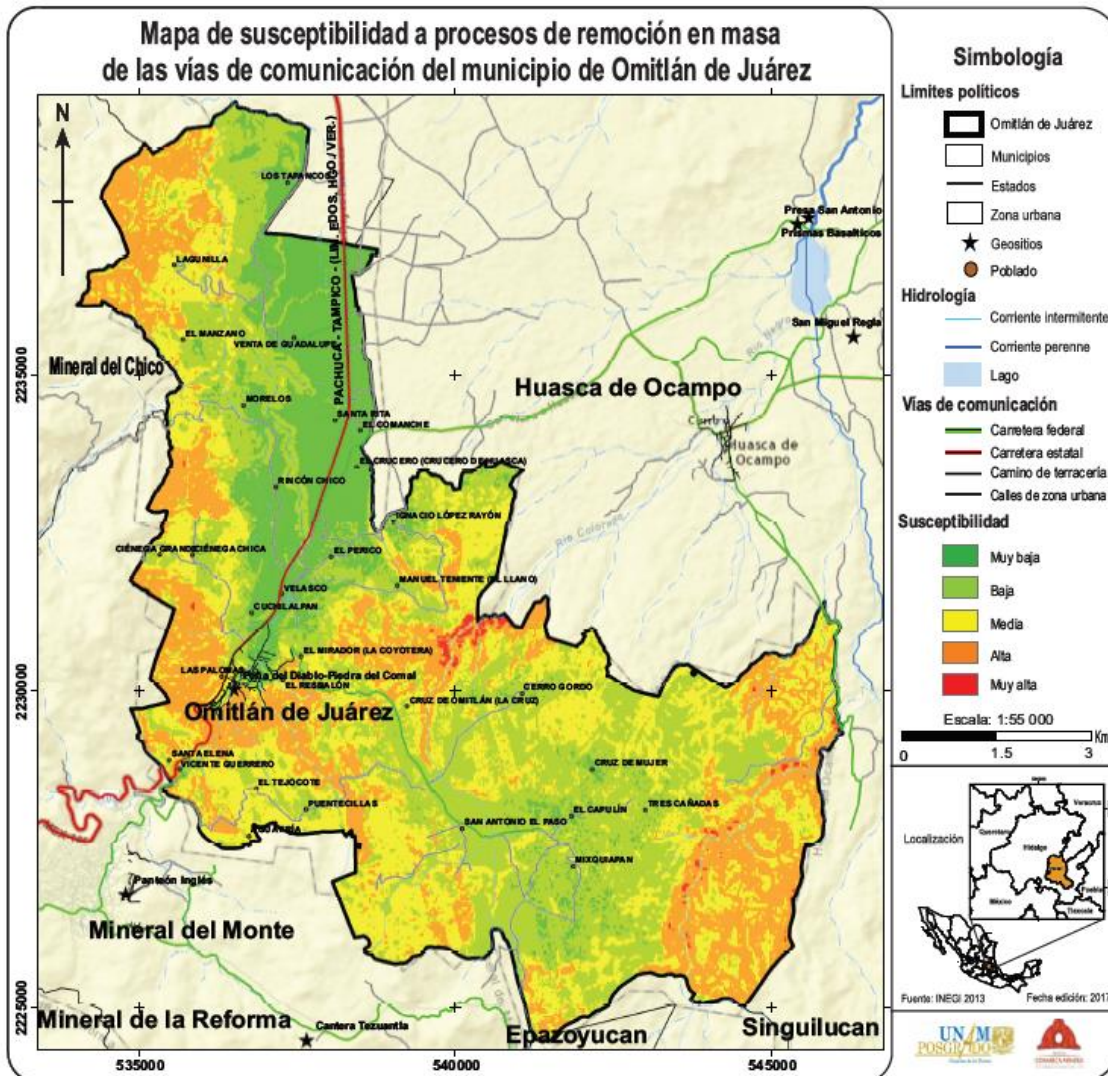


Figura 62. Susceptibilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Omitlán de Juárez.

▪ **Singuilucan**

Este municipio tiene una longitud total de 42.7 Km de vías de comunicación asfaltadas de carácter estatal y 180.6 Km de caminos de terracería. La susceptibilidad asociada a los tramos de carretera del municipio se muestra en la tabla 19 y en la figura 63.

Tabla 19. Susceptibilidad de PRM de las vías de comunicación del municipio de Singuilucan.

SUSCEPTIBILIDAD	FEDERAL		ESTATAL		TERRACERÍA	
	Km	%	Km	%	Km	%
Muy baja	0.00	0.00	31.27	73.11	154.35	85.43
Baja	0.00	0.00	8.14	19.04	17.73	9.81
Media	0.00	0.00	2.68	6.28	5.69	3.15
Alta	0.00	0.00	0.67	1.57	2.02	1.12
Muy alta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.50

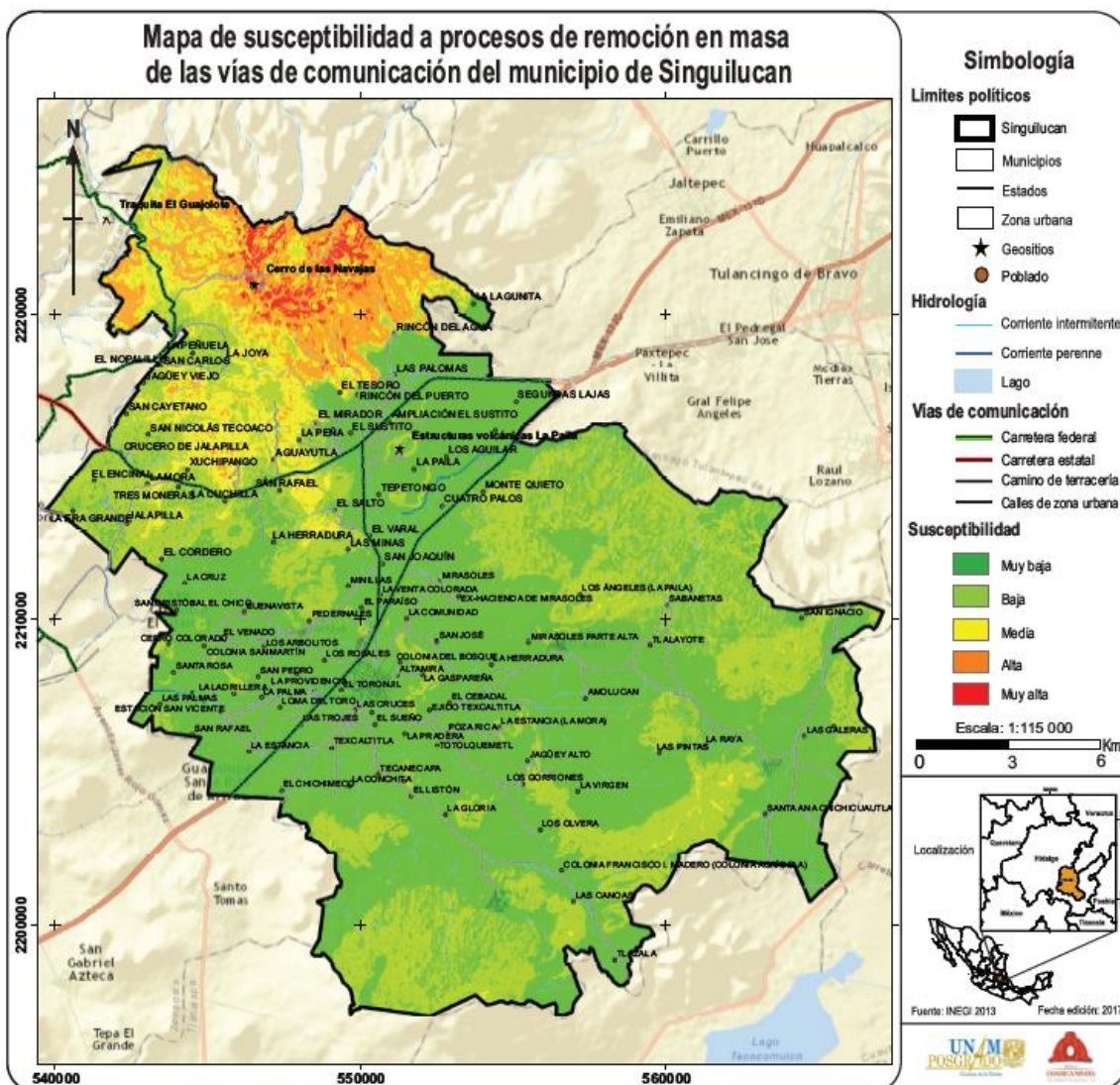


Figura 63. Susceptibilidad de PRM de las vías de comunicación del municipio de Singuilucan.

4.4 Mapa de peligro por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto

El mapa de peligro por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto mostró las zonas que potencializan la ocurrencia de PRM, su localización y los mecanismos de movimientos. Durante la investigación se analizaron tramos de carretera aledaños correspondientes a los municipios de Mineral de la Reforma, Mineral del Chico y Mineral del Monte, los cuales comprenden 10.54 km de carreteras estatal de los tramos EP2, EP6 y EP15. Estos valores se muestran en la tabla 20 y en la figura 64.

Tabla 20. Kilometraje en peligro por PRM en las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

Peligro	Federal		Estatal	
	Km	%	Km	%
Bajo	0	0	76.85	77%
Medio	0	0	7.42	7%
Alto	1.69	100	15.63	16%

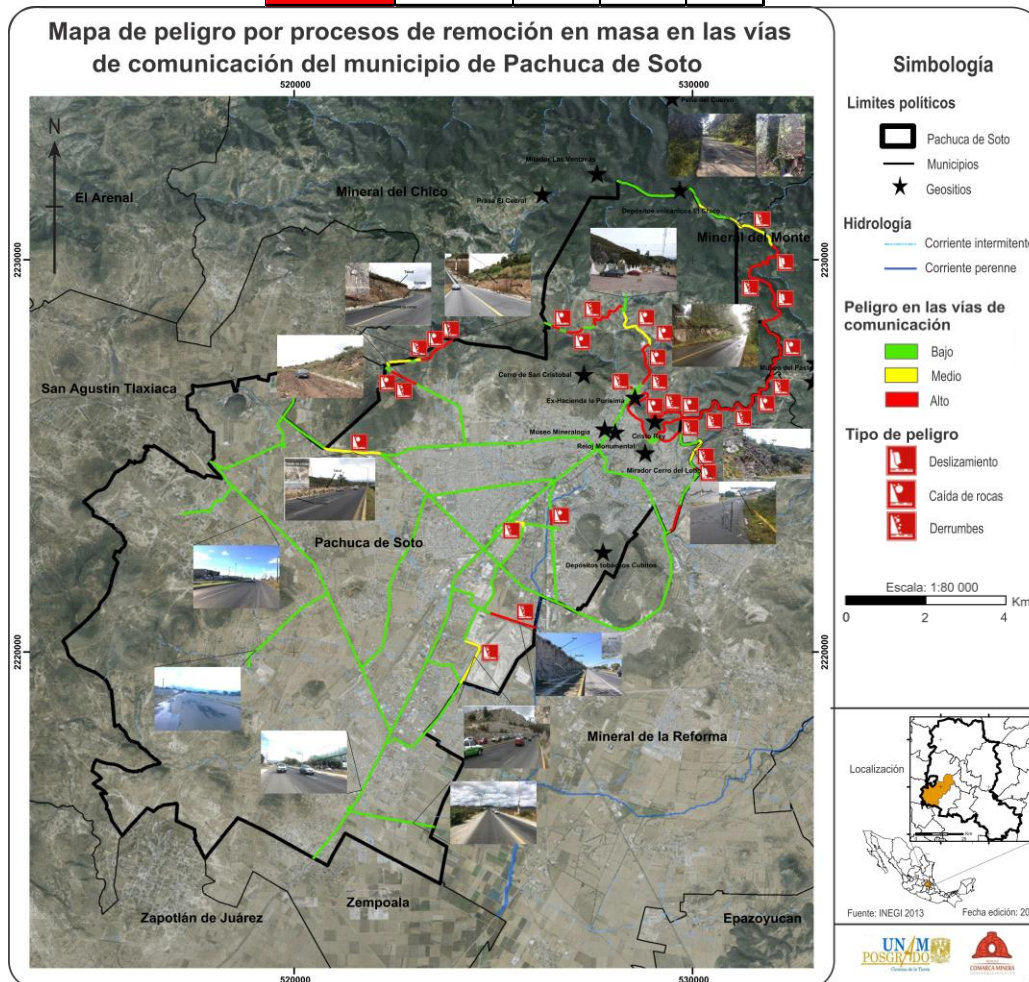


Figura 64. Mapa de peligro por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

4.5 Mapa de vulnerabilidad de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto

El mapa de vulnerabilidad física se dividió en zona conurbada y en zona urbana, esta última tiene una gran actividad vehicular dentro del municipio. Los entronques en los que se tomaron flujos vehiculares se muestran en la tabla 21 y se observan en la figura 65.

Tabla 21. Kilometraje en peligro por PRM en las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

Código de estudio	Nombre	Aforo vehicular	Clasificación del vehículo						
			A	B	C2	C3	T352	T353	T3S2R4
FP1	Pachuca-Tampico	146	137	8	1				
EP1	Antigua carretera México-Pachuca	Zona urbana							
EP2	Avenida Sonora	29	29						
EP3	Benito Juárez-La concepción- Entronque (a Tilcuatla)	Zona urbana							
EP4	Boulevard Las Torres	130	125			4	1		
EP5	Boulevard Luis Donaldo Colosio	Zona urbana							
EP6	Boulevard Nuevo Hidalgo	Zona urbana							
EP7	Boulevard Ramón G. Bonfil	Zona urbana							
EP8	Boulevard Rojo Gómez	Zona urbana							
EP9	Cristo Rey-Entronque (Pachuca- Tampico)	19	18	1					
EP10	El Cerezo-Entronque (Pachuca- Tampico)	18	15	3					
EP11	El Huixmi-Santa Gertrudis- Entronque(Pachuca-Cd. Valles)	54	48	6					
EP12	El Venado-Entronque (México- Pachuca)	Zona urbana							
EP13	La Paz - Entronque (México- Pachuca)	Zona urbana							
EP14	Libramiento a Tampico	24	17	7					
EP15	Mineral del Chico-Entronque (Pachuca-Tampico)	69	65	4					
EP16	México-Pachuca	Zona urbana							
EP17	Pachuca-Cd. Sahagún	Zona urbana							
EP18	Pachuca-Cd. Valles	Zona urbana							
EP19	Pachuca-Estanzuela-Las Palmas	64	52	12					
EP20	Pachuca-Santa Catarina	Zona urbana							
EP21	Pachuca-Tulancingo	Zona urbana							
EP22	Santiago Tlapacoya-Entronque (Colonias- Santa Catarina)	56	51	4		1			
EP23	Tilcuautla-Entronque (Pachuca- Santa Catarina)	Zona urbana							
EP24	Viaducto Nuevo Hidalgo-Mineral del Chico	190	167	22		1			

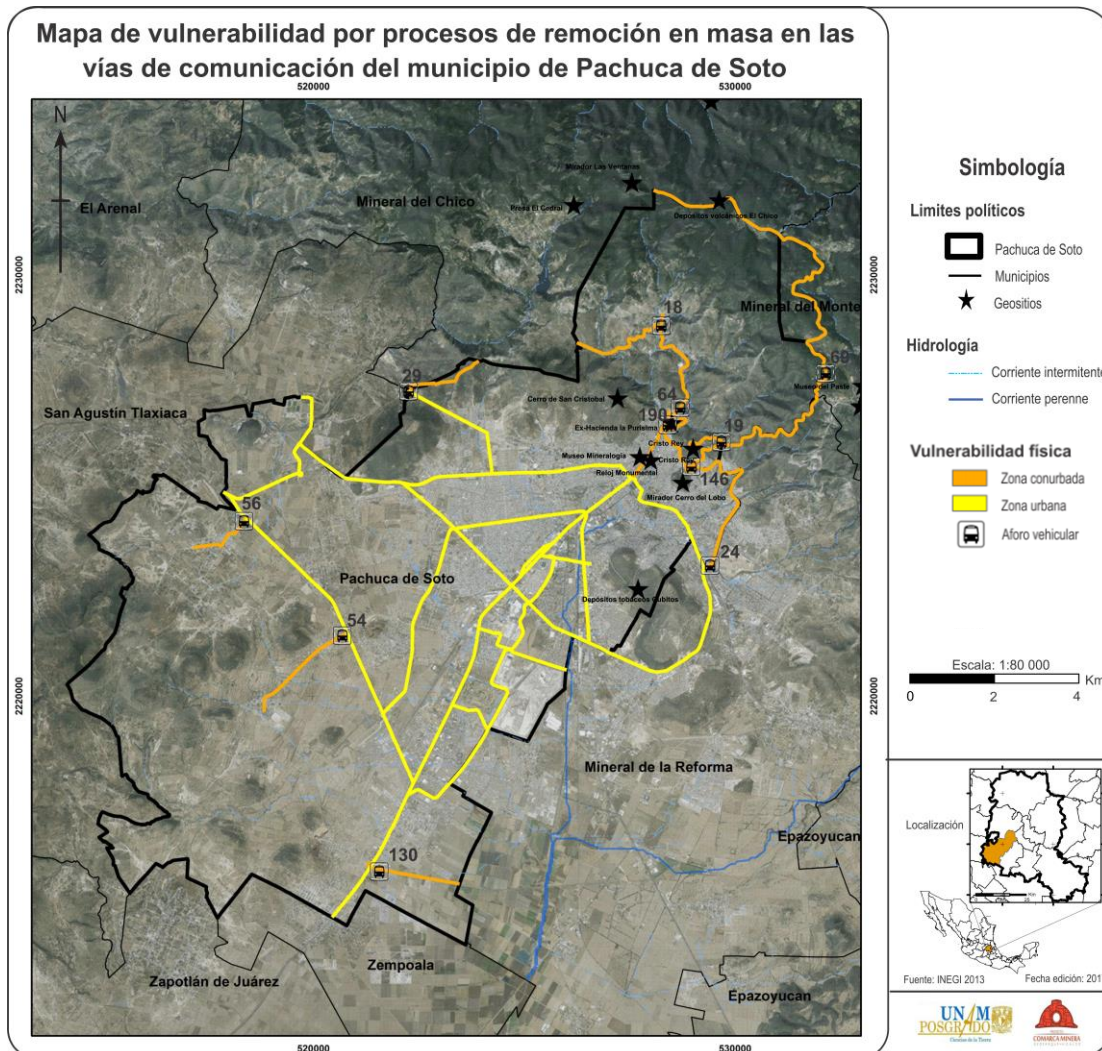


Figura 65. Mapa de vulnerabilidad por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

4.6 Mapa de riesgo por procesos de remoción en masa de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto

El mapa de riesgo por PRM mostró las zonas en peligro de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto y su vulnerabilidad física asociada en los diferentes tramos carreteros. Las vías de comunicación más afectadas y con peligro alto son: la carretera Pachuca Tampico, Avenida Sonora, Boulevard Nuevo Hidalgo, Cristo Rey – Entronque (Pachuca – Tampico), La Paz – Entronque (México – Pachuca), Libramiento a Tampico, Mineral del Chico – Entronque (Pachuca – Tampico), Pachuca – Estanzuela – Las Palmas, Viaducto Nuevo Hidalgo – Mineral del Chico, mientras que en peligro medio se encuentra la vialidad Pachuca – Santa Catarina, estas vías de comunicación son afectadas por deslizamientos, caída de rocas y derrumbes principalmente (figura 66; tabla 22).

Mapa de riesgo por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto

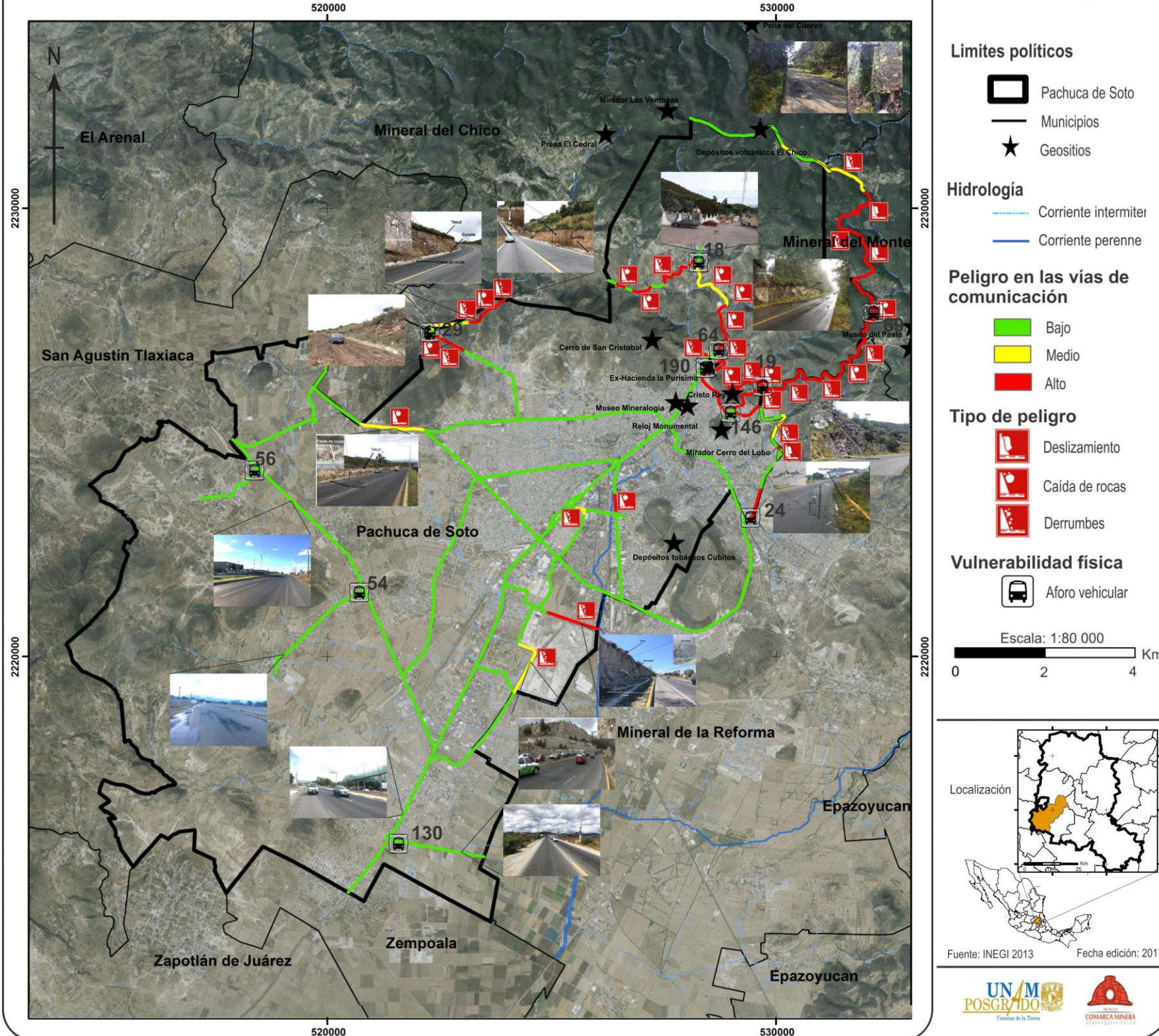


Figura 66. Mapa de riesgo por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

Tabla 22. Tabla del riesgo por PRM de las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto.

Código de estudio	Nombre	Aforo vehicular	Km	Peligro (Km)		
				Bajo	Medio	Alto
FP1	Pachuca-Tampico	146	1.69			1.69
EP1	Antigua carretera México-Pachuca	Zona urbana	1.14	1.14		
EP2	Avenida Sonora	29	5.18	2.8	0.75	1.63
EP3	Benito Juárez-La concepción-Entronque (a Tilcuatla)	Zona urbana	0.25	0.25		
EP4	Boulevard Las Torres	130	2.38	2.38		
EP5	Boulevard Luis Donald Colosio	Zona urbana	7.95	7.27		0.68
EP6	Boulevard Nuevo Hidalgo	Zona urbana	11.41	9.93	1.48	
EP7	Boulevard Ramón G. Bonfil	Zona urbana	8.05	8.05		
EP8	Boulevard Rojo Gómez	Zona urbana	1.22	1.04	0.18	
EP9	Cristo Rey-Entronque (Pachuca-Tampico)	19	1.23	0.22		1.01
EP10	El Cerezo-Entronque (Pachuca-Tampico)	18	0.46	0.46		
EP11	El Huixmi-Santa Gertrudis-Entronque(Pachuca-Cd. Valles)	54	2.84	2.84		
EP12	El Venado-Entronque (México-Pachuca)	Zona urbana	1.15	1.15		
EP13	La Paz - Entronque (México-Pachuca)	Zona urbana	2.59	1.42		1.17
EP14	Libramiento a Tampico	24	2.18	1.01	0.58	0.59
EP15	Mineral del Chico-Entronque (Pachuca-Tampico)	69	12.48	5.67	1.66	5.15
EP16	México-Pachuca	Zona urbana	1.65	1.65		
EP17	Pachuca-Cd. Sahagún	Zona urbana	3.1	3.1		
EP18	Pachuca-Cd. Valles	Zona urbana	8.41	8.41		
EP19	Pachuca-Estanzuela-Las Palmas	64	6.20	1.55	1.37	3.28
EP20	Pachuca-Santa Catarina	Zona urbana	9.61	8.23	1.38	
EP21	Pachuca-Tulancingo	Zona urbana	2.38	2.38		
EP22	Santiago Tlapacoya-Entronque (Colonias- Santa Catarina)	56	1.63	1.63		
EP23	Tilcuatla-Entronque (Pachuca-Santa Catarina)	Zona urbana	2.42	2.42		
EP24	Viaducto Nuevo Hidalgo-Mineral del Chico	190	3.97	1.85		2.12

Capítulo V Discusión

Es importante conocer las características, ventajas y desventajas de las diferentes metodologías para realizar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción, que dependiendo del objetivo de estudio, la escala de trabajo y la fiabilidad de la información disponible son aplicables a cualquier área de estudio. En este marco el método estadístico bivariado de información ponderada resultó ser el más adecuado y por ello se utilizó para esta investigación debido a que cumplió con el objetivo de estudio.

Con las imágenes satelitales contenidas en la plataforma Google Earth se identifican en el área de estudio diferentes mecanismos de movimiento, tales como caída de rocas, flujos, deslizamientos y movimientos complejos sin poder determinar el tipo de material involucrado, teniendo como resultado el inventario de PRM existentes, hasta el 2012, el cual se utilizó para generar el mapa de susceptibilidad del PGCMH con el método Wi sin considerar cada mecanismo de movimiento. Por otro lado, las imágenes satelitales de la plataforma de Google Earth evidencia que las unidades geomorfológicas de Sierra y Lomeríos tienen zonas de deforestación y cambios en el uso de suelo, las cuales para el 2009 poseen un suelo de matorral y bosque, lo cual indica que existen nuevas condiciones que propician la inestabilidad del terreno

La relación espacial que tienen las precipitaciones máximas y factores que propician la inestabilidad es compleja, ejemplo de ello tenemos la región este de la Sierra de Pachuca, donde convergen las mayores precipitaciones entre 600 mm - 500 mm con distinto uso de suelo y variaciones de pendiente, con rocas volcánicas del Grupo Pachuca y las rocas terrígenas de la Formación Atotonilco, las cuales tienen distinta afinidad a que sucedan procesos de remoción. Para el Grupo Pachuca las características geológicas que se tienen hacen a esta clase más inestable y guardan una relación intrínseca con las precipitaciones entre 300 mm - 400 mm en la porción centro de la Sierra de Pachuca, mientras que en otras zonas más estables al NW y al SE se tienen rocas carbonatadas de la Formación El Doctor, conglomerados bien consolidados de la Formación El Morro, Basaltos Indiferenciados, lutitas y areniscas de la Formación Soyatal en las cuales se muestran una afinidad negativa a que sucedan PRM. Dado los objetivos de la investigación estas relaciones no se detallaron y pueden ser retomadas en futuros trabajos relacionados con los PRM en el PGCMH.

La metodología implementada en esta investigación para realizar mapas de riesgo considera la susceptibilidad regional por procesos de remoción como mapa preliminar de peligro, la cual

se utilizó para el trabajo de campo en el municipio de Pachuca de Soto. Este sirve de guía, ya que las áreas con distinto grado de susceptibilidad guardan una relación espacial en algunos casos con el peligro a lo largo de los tramos carreteros. Por otro lado el formato evaluador que se utilizó en esta investigación determina el peligro en los taludes sobre las vías de comunicación de manera analítica y descriptiva a partir de información recopilada en campo contemplando factores que intervienen en la inestabilidad de laderas, valorando de forma rápida y efectiva el peligro ante procesos de remoción en los cortes de talud realizados para las vías de comunicación. El formato puede seguir enriqueciéndose por medio de aportaciones de especialistas de en seguridad y conservación de carreteras.

Dentro del municipio de Pachuca de Soto las obras de mitigación que se encuentran a lo largo de los taludes no son suficientes para estabilizar las laderas, ya que el peligro por caída de rocas y derrumbes persiste; los bloques que caen se depositan en el asfalto y dañan o cierran parcialmente la carretera y por consiguiente pueden afectar a los automovilistas que circulan dentro de los tramos, tal es el caso de las carreteras Pachuca – Tampico, Boulevard Luis Donald Colosio, Cristo Rey – Entronque (México- Pachuca), Pachuca – Estanzuela – Las Palmas y Viaducto Nuevo Hidalgo-Mineral del Chico.

Para evaluar adecuadamente las obras de mitigación es necesario realizar una inspección detallada sobre el talud, la cima de la ladera y el derecho de vía, además de considerar el tiempo de vida de la obra, las características constructivas, el estado y su mantenimiento, también es importante determinar si realmente la obra de mitigación contine el peligro sin efectos secundarios, tales como deformidades en las laderas o grietas de tensión sobre la cima, las cuales pueden detonar algún PRM. Desde este punto de vista es necesario colaborar con la SCT, ya que esta dependencia cuenta con información adicional respecto a las obras de mitigación que en esta investigación no se consideraron.

En las vías de comunicación, la tendencia a presentar procesos de remoción es fuertemente correlacionada con las modificaciones antropogénicas al alterar el equilibrio de las condiciones naturales del terreno con una mala planeación en los cambios de geometría de las laderas, excavaciones y falta de obras de mitigación en los lugares más susceptibles a presentar dichos procesos. En el municipio de Pachuca de Soto, algunas zonas de las vías de comunicación como La Paz – Entronque (México – Pachuca), Boulevard Rojo Gómez y Boulevard Luis Donald Colosio tienen actividad antrópica muy fuerte debido a cortes de talud y urbanización sobre depósitos de jales mineros convirtiéndose estos tramos en zonas de peligro medio y alto por derrumbes principalmente, mientras que por factores geológicos

(calidad de la roca, nivel de fracturamiento y tamaño de los bloques) y antrópicos (urbanización, inclinación, altura del talud, obras de mitigación, estado de las obras y componentes de carretera) algunas zonas de las vías de comunicación de Pachuca -Tampico, Avenida Sonora, Cristo Rey – Entronque (Pachuca – Tampico), Libramiento a Tampico, Mineral del Chico – Entronque (Pachuca – Tampico), Pachuca – Estanzuela – Las Palmas y Viaducto Nuevo Hidalgo – Mineral del Chico tienen un peligro medio y alto por deslizamientos, derrumbes y caída de rocas principalmente.

De acuerdo a los resultados y la verificación en campo sobre las vías de comunicación, las susceptibilidades en nivel muy bajo y bajo para el municipio de Pachuca de Soto guardan una alta correlación ya que se comprobó que no existen PRM en esta clase de susceptibilidad, salvo en algunas zonas en las que se tienen modificaciones antropogénicas del terreno como los depósitos de jales mineros y cortes de talud sobre los mismos, mientras que en clases de susceptibilidad media, alta y muy alta varía el peligro, categorizándose en bajo, medio y alto. De manera que no se puede considerar los mapas de susceptibilidad como mapas de peligro ante procesos de remoción.

Debido a que no existen antecedentes en análisis del peligro por PRM que afecten las vías de comunicación y para uso y fines prácticos de las autoridades competentes en materia de análisis y gestión de riesgo, el mapa de peligro por proceso de remoción de las vialidades del municipio de Pachuca de Soto se clasifica en tres clases: bajo, medio y alto, con el cual se identifica gráficamente en el mapa, zonas con problemas con diferentes mecanismos de movimiento, en las que necesitan realizarse estudios más específicos y a detalle.

Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones

Las imágenes satelitales de la plataforma de Google Earth sirven de base para identificación y mapeo de los diferentes mecanismos de movimiento, que para el PGCMH se delimitaron 579 PRM de los cuales 88 son caída de rocas, 386 flujos, 88 deslizamientos y 17 movimientos complejos.

El método estadístico bivariado de información ponderada y los SIG permitió identificar zonas susceptibles a presentar procesos de remoción a partir del análisis de factores que intervienen en la inestabilidad del terreno y del inventario de los PRM en la región del PGCMH el cual tiene ~1910 km², determinando que el 40.5% tiene susceptibilidad muy baja, el 27.5%

susceptibilidad baja, el 15.4% susceptibilidad media, el 14.9% susceptibilidad alta y 1.7% susceptibilidad muy alta.

En las vías de carácter federal se tiene que el 60% se encuentran en susceptibilidad muy baja, el 18% en susceptibilidad baja, el 5% en susceptibilidad media, 15% en susceptibilidad alta y el 2% en susceptibilidad muy alta, mientras que en las vías de carácter estatal se tiene que el 55% se encuentran en susceptibilidad muy baja, 25% en susceptibilidad baja, el 10% en susceptibilidad media, el 9% en susceptibilidad alta y el 1% en susceptibilidad muy alta y que en los caminos de terracería se tiene el 54% en susceptibilidad muy baja, el 23% en susceptibilidad baja, el 12% en susceptibilidad media, el 10% en susceptibilidad alta y el 1% en susceptibilidad muy alta por PRM, estos resultados son fiables y corresponden a las condiciones naturales que se tienen del terreno a lo largo del PGCMH.

La mayor peligrosidad que se tiene en las vías de comunicación del municipio de Pachuca de Soto se debe a las rocas del Grupo Pachuca, la mala planeación de los cortes de talud y la falta de obras de mitigación para los diferentes mecanismos de movimiento que se tienen. En la carretera Mineral del Chico – Entronque (Pachuca-Tampico) se necesita hacer estudios más específicos sobre la clase de peligro alto ya que podrían ocurrir en un futuro, deslizamientos, los cuales pueden detonarse por la vibración ocasionada por el tráfico de vehículos o una precipitación extraordinaria, ya que los suelos en los que está construida la carretera lo permite.

En esta investigación la vulnerabilidad física se limitó al considerar el flujo vehicular que transitaba sobre las carreteras, la cual se realizó en intervalos de treinta minutos durante la recopilación de la información en campo de los diferentes entronques de vías. Por ello resulta importante colaborar con la SCT para determinar con mayor fiabilidad el tránsito automovilístico dentro de la región, ya que esta dependencia cuenta con contabilizadores en estaciones permanentes para registrar volúmenes de tránsito que circulan en las principales carreteras.

La metodología diseñada para desarrollar mapas de riesgo por PRM que afectan las vías de comunicación a nivel municipal permite identificar de manera secuencial, analítica y descriptiva el peligro que se presenta en los cortes de talud de las carreteras y la vulnerabilidad física que se tienen en los diferentes tramos.

El mapa de riesgo por PRM del municipio de Pachuca de Soto es el resultado de la metodología propuesta en esta investigación, siendo útil para identificar de manera gráfica y analítica los kilometrajes de las vías de comunicación que se encuentran con diferentes peligros y su vulnerabilidad física. Este mapa evidencia la mala planeación que tienen las vías de comunicación de la región del proyecto, en las cuales no se realizó un análisis previo de inestabilidad de laderas para su construcción y desarrollo, tampoco se adoptaron las medidas preventivas necesarias para garantizar la seguridad de los usuarios que circulan en las carreteras.

Esta investigación es una herramienta fundamental para la toma de decisiones por parte de la SCT, autoridades estatales y municipales; así como de información base para acciones en materia de protección civil y gestión del riesgo a nivel municipal. El análisis del riesgo por PRM en las vías de comunicación a nivel municipal podría prevenir considerablemente costosos daños, destrucción y reconstrucción de diferentes tramos de carretera que se encuentran dentro del PGCMH.

Se recomienda utilizar el mapa de susceptibilidad de esta investigación para conocer y determinar el peligro por inestabilidad de laderas en áreas urbanas y sus alrededores, así como realizar visitas después de lluvias extraordinarias o sismos, para evaluar el comportamiento de los factores analizados que intervienen en la estabilidad, ya que estos pueden detonar PRM en dichas zonas. Se necesita una mayor interacción de protección civil con la ciudadanía que se ubica cerca de las vías de comunicación en las que se encontraron peligro, a fin de dar a conocer a la población las características de las zonas en que habitan y el riesgo que los procesos implican.

Se aconseja para futuros proyectos de infraestructura vial dentro del PGCMH considerar esta investigación a fin de evitar y/o modificar zonas con susceptibilidad a presentar inestabilidad, las cuales pueden desarrollar PRM, logrando así anticipar problemas futuros asociados a los diferentes mecanismos de movimiento del terreno que pueden poner en peligro a los usuarios que circulan por las diferentes carreteras de la región.

Bibliografía

- Aleotti P., Chowdhury R., 1999. Landslide hazards assessment: summary review and new perspective, *Bulletin of Engineering Geology of the Environment*, num. 58, 21-44 p.
- Arango Galvan, Chavez Segura, Tejero Andrade, Urbieta Gómez, Cifuentes Nava, (2007). Estudio de zonas vulnerables por colapso mediante tomografía eléctrica en Pachuca, Hgo. *Estudios geológicos y geofísicos de riesgos naturales* vol. 27, N. 1, 14p.
- Ayala I. 2000. Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 9 p.
- Ayala I. -Carcedo, F.J y Olcinas, J. 2002. *Riesgos Naturales*. Editorial Ariel, Colección Ciencia, 1304 p.
- Ayala I., Salinas C. López M., Espinoza J., Conde T., Salvidar S. 2008. *Inestabilidad de laderas*, CENAPRED, p. 39.
- Baeza C, Corominas J., 2001. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surf Process and Land* num. 26, 1251-1263 pp.
- Bates R.L., Jackson J.A., 1987: *Glossary of Geology*, American Geological Institute. Falls Church, Virginia.
- Borgomeo E., Hebditch K., Whittaker A., Lonergan L. 2014. Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology*, num 226, 148-161 p.
- Capra L., Hubp L.J y Zamorano O., 2006. La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México, *Boletín de la Sociedad Geológica, mexicana*, n. 2, 205-214 p.
- Carcavilla U.L., Garcia C.A., 2014. *Geoparque. Significado y Funcionamiento*, Instituto Geológico y Minero de España, 7 p.
- Carrillo-Martínez, M., 1991, *Geología Regional del Área Limítrofe de los Estados de Querétaro e Hidalgo, en la región de Zimapán (resumen)*, en Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Convención sobre la Evolución Geológica de México: Pachuca, Hgo., Rubinovich, R., Carreño, A.L. (eds.), 27-28 p.
- Carrion B., Malena R., Leon S. 2012. Susceptibilidad a los movimientos en masa en la región Cajamarca, norte de Perú y el deslizamiento de Rodeopampa del 22 de febrero del 2010. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* n. 69(3) 407-417 p.
- Chau K.T., Szr Y.L., Fung M.K, Wong W.Y., Fong E.L, Chan L.C.P. 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS, *Computers Geosciences*, n. 30, 429-443 p.
- Chowdhury RN, Flentje PN. 1996. Geology and land instability mapping using a GIS package as a building block for the development of a risk assessment procedure. In: *Proc VII Int Symp on Landslides*, Trondheim, June 1996, 1: 177–182 p.
- COPECO 2013, *Manual de Obras de mitigación*, Unidad de Medio Ambiente y Gestión de Riesgo del PNUD, Honduras, 60 p.
- Cruden D. M. y Varnes D. J., 1996. "Landslides types and processes", in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*, Transport Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., 33-75 p.

- Cruden D., Hu X., 1992. Rock mass movements across bedding in Kananaskis country, Alberta, Canadian Geotech Journal n. 29, 675-685 p.
- Cruz Gómez, 2009. Determinación del riesgo geológico en el poblado de Metztlán, Hidalgo. Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, 145 p.
- Dai F.C., Lee C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, Geomorphology 42, 213-228 p.
- De Cserna, Z. De la Fuente D., Palacios N. Triay L., Palomino M. 1987. Estructura geológica, gravimétrica y sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: Boletín del Instituto de Geología, n. 104, 73 p.
- Desinventar, Sistema de inventario de efectos de desastres, consultado el 30 de agosto del 2017. <http://www.desinventar.org/es/>
- Dossier, 2015, Dossier de Candidatura Proyecto Geoparque Comarca Minera, 49 p.
- Enrique A., Abella C. Western V. 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study San Antonio del Sur, Guatánamo, Cuba. Geomorphology n.94, 453-466 p.
- EPOCH (European Community Programme; 1993), temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flageollet, J.C. (ed). 3 volumes, Contract no. 90 0025.
- Evans S.G., Hungr O. 1993. The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. Canadian Geotech Journal n.30, 620-636 p.
- Fattorelli S., Fernández P., 2011. Diseño Hidrológico. Instituto Regional del Agua, Centro Regional Andino, 2ed., 531 p.
- Felicísimo, A. M. 1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio, Universidad de Oviedo. Pentalfa ed. Oviedo, España. 219 p.
- Ferrari L., 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana v. LIII, 84-92 p.
- García-Palomo, A., Macías, J. L., Tolson, G., Valdez G., Mora, J. C., 2002, Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Geofísica Internacional, Vol. 41, Num. 2, 133-150 p.
- Garrett J. 1994. Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering. Journal of Computing Civil Engineering n.8, 129–130 p.
- Geyne, A.R., Fries, Jr. C., Segerstrom, K., Black, R.F., Wilson, I.F., 1963, Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Publicación 5 E, 222 p.
- González Medrano, f. y p. Hiriart Valencia. (1978). La vegetación de la cuenca del río Metztlán, Resúmenes de los trabajos del VII Congreso Mexicano de Botánica, Sociedad Botánica de México, México, 88-89 p.
- Guzzetti F., Cesare A., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K. 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth Science Reviews 112, 42- 66 p.
- Hernandez Avenilo, 2008. Caracterización geológica y petrológica de la estructura circular Mezquital (Estado de Hidalgo) y su posible riesgo geológico. Instituto Politécnico Nacional, 177 p.

- Hervás D., Cano B., 2001, Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, Teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación al Barranco de Tirajana, Gran Canaria, Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas inestables, Madrid, 12 p.
- Hungr O, Evans SG, 2004. The occurrence and classification of massive rock slope failure. Felsbau, Vienna, Austria, n. 22, 16-23p-
- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., 2013. The varnes classification of landslides types, an update. Landslides (2014) 11: 67-194 p.
- Hutchinson J., 1988. "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology" in Bonnard, C. (ed), Proceedings, A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, 3- 35 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2013, Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo: México, INEGI, 583 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009a, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Atotonilco el Grande: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009b, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Epazoyucan: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009c, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Huasca de Ocampo: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009d, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Mineral del Chico: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009e, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Mineral del Monte: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009g, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Omitlán de Juárez: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009h, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Pachuca de Soto: México, INEGI, 9 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009i, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Singuilucan: México, INEGI, 9 p.
- Lee S, Ryu J-H, Min K, Won J-S, 2003, Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial natural network. Earth Surf Process and Land num. 28(12), 1361-1376 p.
- Lee S., Tu N., 2005. Probabilistic landslide susceptibility mapping in the Lai Chau province of Vietnam: focus on the relationship between tectonic fractures and landslides. Environment Geology vol. 48, 778-787 p.
- Leroi E., 1996. Landslide hazard – Risk maps at different scales: objectives, tools and developments. In: Proc VII Int Symp Landslides, Trondheim, June 1996, 1:35–52 p.

- Llasat B. 2012 Riesgos naturales: clasificación, conceptos y cuestiones., Actuario n. 31°, Universidad de Barcelona., 7-11 p.
- López D. 2002. Estudios estratigráficos y deposicionales de la Formación Soyatal (Turoniano) en la Sierra de Álvarez y la Sierra del Coro, porción centro occidental del estado de San Luis Potosí (resumen) en XVI Convención Geológica Nacional, Puerto Vallarta, Jalisco: México D.F. Sociedad Geológica Mexicana, 335-336 p.
- Luzi L, Pergali F. Terlien MTJ, 2000, Slope vulnerability to earthquakes at sub regional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. Engineering Geologists num. 58, p 313-398.
- Mark T.J., Van Westen., 1995. Deterministic modelling in GIS-Based landslide hazard assessment. Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, 55-77 p.
- Maruri Zamora, 2012, Estudio Geotecnico de un terreno colapsado en la zona sub-urbana al NW de la capital del estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 48 p.
- Meinhardt M., Fink M., Tünschel H. 2015. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics, Geomorphology n.243. 80-97 p.
- Mendoza Rosales. 1990. Estructura del sector Xajha (Cabalgadura el Doctor) Estados de Hidalgo y Querétaro, Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 64 p.
- Muñiz J. y Hernandez M. V., 2012, Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. v.29, núm. 1, 103-114 p.
- Naudet V. Lazzari M., Perrone A., Loperte A., Lapenna V. 2008. Integrated geophysical and geomorphological approach to investigate the snowmelt-triggered landslide of Bosco Piccolo village (Basilicata, southern Italy), Engineering Geology, n.98, 156-167 p.
- Pérez G., Muñoz A., 2006. Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. pp. 343.
- Pradhan B. and Lee S., 2009, Landslide risk analysis using artificial neural network model focusing on different training sites, International Journal of Physical Sciences, v.4(1),1-15 p.
- Priego Zapata, 2011. Riesgos antropogenicos en la zona metropolitana de Pachuca de Soto, Estado de Hidalgo, Convención internacional de Minería, 653 – 663 p.
- Roa J., 2006. Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. ISSN 1316-7790, 45-83 p.
- Santacana, N., (2001), *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca del Río Llobregat* Tesis para obtener el grado de Doctor Ingeniería del terreno y Cartografía. Universitat. Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- SEDATU 2012. Actualización del atlas de riesgo del municipio de Mineral de la Reforma, 146 p.
- SEDATU 2013. Atlas de riesgos naturales del municipio de Pachuca de Soto, 151 p.
- Segerstrom K. 1961. Geología del SW del Edo. Hidalgo y del NE del Edo de México. Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., XIII 3 y 4 p.

- Segerstrom, K., 1962, Geology of south-central Hidalgo and northeastern Mexico: United State Geological Survey Bulletin, 1104-C, 87–162 p.
- Sharpe C. F.S., 1938. Landslides and related phenomena, Columbia University Press, New York.
- Siddle HJ, Jones DB, Payne HR., 1991. Development of a methodology for landslip potential mapping in the Rhondda Valley. In: Proceedings of the Conf “Slope stability engineering developments and applications”, 15–18 April 1991, Isle of Wight, 121–126 p.
- Silba Badillo, 2006. Comportamiento estructural por hundimientos de edificaciones ubicadas en distintas zonas en la ciudad de Pachuca, Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 121 p.
- Simons, F.S., Mapes-Vázquez, E., 1957, Geología y yacimientos minerales del distrito minero de Zimapán, Hidalgo: Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, Boletín 40, 270 p.
- Soriano F.D. 2009. Identificación y análisis de corrientes de derrubios en el macizo de Montserrat mediante Google Earth y SIG. Tesina de Especialización. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 205 p.
- Soters R., Van Westen C.J., 1996. Slope stability: recognition, analysis and zonation. In: Turner AK. Shuster RL (eds) “Lanslides: investigation and mitigation”. Transportation Research Board -National Research Council, Special Report 247, 129 -177 p.
- Suarez Diaz, 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, 1-30p.
- Temesgen B., Mohammed M., Korne T., 2001. Natural Hazard Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslide in the Wondogenet Area, Ethiopia, Phys. Chem, Earth Vol. 26, 665-675 p.
- Terzaghi K. 1950, Mechanisms of landslide, The Geological Society of America. Volume, 83-123 p.
- UNISDR, 2009. UNISDR terminology on disaster risk reduction http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf.
- USGS, 2004. Ladslides Types and Process. The U.S. Geological Survey Landslide Program Fact Sheet 2004-3072. US Department of interior Geological Survey.
- Valencia-Moreno, Ortega-Rivera, Amabel. 2011, Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México—evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide), in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 7, 7 p.
- Valerio C. V., 2010, Procesos de remoción en masa en rocas volcánicas, porción SO de la Cuenca de México, Tesis Doctoral, UNAM., 248 p.
- Vallejo L., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C., 2002, Ingeniería Geológica, Pearson Educación, 744 p.
- Van Westen, 1997, Zonificación determinística de peligros de deslizamientos, ITC, 13 p.
- Van Westen, 2000. The Modelling of Landslide Hazards Using GIS. Surveys in Geophysics, vol. 21, issue 2. 241-255 p.
- Van Westen, C. J., 1994, GIS in landslide hazard Zonation: a review with examples from the Andes of Columbia. In Mountain Environment and Geographic Information Systems, edited by M.F. Price and D.I. Heywood. (London: Taylor & Francis), 135 – 166 p.

- Van Westen, C.J., Van Asch T.W.J. and Soeters R., 2005, Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?, *Bulling Engineering Geologist Environment.*, num. 65, 167-184 p.
- Varnes D.J. 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*. n.3 UNESCO, 63 p.
- Varnes, D.J., 1958, Landslides types and processes”, in Eckel, E. B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*, Highway Res. Board Special Report 29, 20-47 p.
- Varnes, D.J., 1978, Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krixek RJ (eds) *Landslides, analysis and control*, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, D.C. 11-33 p.
- Vaunat J, Leroueil S, Tavenas F (1992) Hazard and risk analysis of slope instability. In: Proc First Canadian Symposium on Geotechnique and Natural Hazards (Geohazard '92), Vancouver, May 6–9 1992, 397–404 p.
- Villacorta S., Fidel L. y Zavala C., 2012, Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú, *Revista de la Asociación Geológica de Argentina* 69 (3), 393-399 p.
- Wieczorek, G.F., Mandrone, G., DeCola, L., 1997. The influence of hillslope shape on debris-flow initiation. In: Chen, C.L. (Ed.), *Debris-flow hazards mitigation: mechanics, prediction, and assessment*. American Society of Civil Engineers, New York, 21– 31 p.
- Wilson B.W, Hernandez J.P., Meave E. 1955. Un banco de calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 18, 1-10 p.
- Yalcin A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena* n.72, 1-12 p.
- Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A., Yomralioglu T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivaviate staistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* n.85, 274-287p.
- Yussim-Guarneros, S., 2004, Análisis geométrico y fractal de las fracturas rellenas en San Joaquín, Querétaro: México, D.F., Instituto de Geología, UNAM, tesis de maestría, 98 p.
- Zézere J. Garcia R. Oliveira S. Reis E., 2008. Probabilistic landslide risk analysis considering direct cost in the area north of Lisbon (Portugal), *Geomorphology* n. 94, 467-495 p.
- Zhou C.H, Lee C.F, Li. J., Xu. Z.W. 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, v. 43, 197-207 p.
- Zinck, J. A.; J. Lopez; G. I. Metternicht; D. P. Shrestha and Vazquez – Selem, 2001, Mapping and modeling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 13 p

Anexo 1

Tabla comparativa de los métodos aplicables a escalas regionales y locales (*Factores anexo 2)

Escala Regional					
Método	Ventajas	Desventajas	Factores*	Resultados	Role of Gis
Geomorfológico	1. Evaluación rápida (múltiples variables)	1. Análisis subjetivo	1, 2, 10, 11, 14, 19, 27	Mapa de PRM	Cartografía de los PRM
	2. Utiliza herramientas para la cartografía de los PRM	2. Dificil comparación entre investigadores		Mapa de susceptibilidad	
	3. Los especialistas infieren señales geomorfológicas antes de un PRM	3. Reglas implícitas 4. Incertidumbre en áreas potenciales		Caracterización de los PRM	
Heurístico	1. Evaluación rápida y efectiva	1. Largas operaciones involucradas (áreas grandes)	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 16, 19, 20, 23, 27	Mapa de susceptibilidad	Algebra de mapas
	2. Se consideran múltiples variables subjetivas	2. Subjetividad de la ponderación en cada factor			
	3. Automatización para la identificación de la susceptibilidad	3. Dificultad para extrapolar los datos para generar modelos			
	4. Reduce el problema de omisión de reglas del método geomorfológico				
Estadístico bivariado	1. Reduce la subjetividad de los métodos cualitativos	1. Subjetividad en la selección de los factores	1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 19, 20, 21, 27	Correlación de variables	Análisis de su distribución espacial
	2. Muestra la variación espacial de los PRM en relación con los factores involucrados	2. La reclasificación puede afectar los resultados 3. La falta de información limita a este método		Mapa de susceptibilidad	
	3. Efectivo para identificar la correlación de las variables	4. Necesita un inventario de los PRM		Estadística de los deslizamientos	
Estadístico multivariado	1. La identificación de las relaciones entre variables se considera eficaz	1. Asignación de pesos y clasificación de factores subjetivas	1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 14, 18, 19, 21, 27, 28	Mapa de susceptibilidad	Análisis
	2. Resulta útil donde no se disponen datos geotécnicos	2. La extrapolación de los modelos a otras áreas puede ser difícil o imposible			
Escala Local					
Método	Ventajas	Desventajas	Factores*	Resultados	Role of Gis
Enfoque Ingenieril Geotécnico	1. La aplicación de una clasificación geomecánica resulta fácil y sencilla para determinar la calidad de un talud	1. Largas jornadas de trabajo de campo y gabinete para plantear un modelo aceptable	3, 7, 10, 11, 12, 13, 22, 28, 29, 30	Mapa de susceptibilidad	Análisis
	2. Resulta útil donde no se disponen datos geotécnicos	2. La toma de datos se basan en la experiencia		Mapa de peligro Factor de seguridad	
Análisis de redes neuronales	1. La red con un adecuado entrenamiento la red entiende correctamente la estructura de lo datos	1. Problemas en la construcción de la red	2, 6, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25	Mapa de susceptibilidad	Análisis
		2. Variables insuficientes o falsas			
	2. No requiere conocimiento teórico sobre los aspectos físicos que controlan los deslizamientos	3. Falta de experiencia del investigador en identificar PRM, resultados equívocos			
		4. Dificil extrapolación a otras áreas			

Anexo 2

Tabla de factores que intervienen en las diferentes metodologías para realizar mapas de susceptibilidad.

Grupo de factores	Número	Lista de Factores	1	2	3	4	5	6
Geomorfología	1	Unidades geomorfológicas	1	2	3	4		
	2	Inventario de deslizamientos	1	2	3	4		6
	3	Energía del relieve (elevación)		2	3	4	5	
	4	Disección del relieve				4		
Topografía	5	Modelo digital del terreno		2				
	6	Mapa de pendientes		2	3	4		6
	7	Longitud de la pendiente		2	3	4	5	
	8	Orientación de la pendiente			3			6
	9	Curvatura de la pendiente			3	4		6
Geología	10	Unidades litológicas	1	2	3	4	5	6
	11	Distancia de estructuras	1	2	3	4	5	6
	12	Planos y zonas de debilidad					5	
	13	Grado de alteración					5	
Suelo y Vegetación	14	Uso de suelo	1	2	3	4		6
	15	Tipo de suelo			3			6
	16	Tipo de vegetación		2				
	17	Espesor del suelo						6
	18	Índice de vegetación (NDVI)				4		6
Hidrología	19	Densidad de drenaje	1	2	3	4		6
	20	Precipitación		2	3			6
	21	Distancia del drenaje			3	4		6
	22	Nivel freático					5	
	23	Tipo de drenaje		2				6
Factores antrópicos	24	Diametro de los arboles						6
	25	Edad de los arboles						6
	26	Deforestación	1					
	27	Vías de comunicación		2	3	4		
	28	Asentamiento urbano				4	5	
	29	Cambio en las condiciones hidrológicas					5	
	30	Variaciones en la geometría de la ladera					5	

Método	Color	Clave
Geomorfológico	1	1
Heurístico	2	2
Estadístico bivariado	3	3
Estadístico multivariado	4	4
Enfoque ingenieril geotécnico	5	5
Análisis de redes neuronales	6	6

Anexo 3 Inventario de PRM

FID_	Tipo	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)	FID_	Tipo	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)
1	Flujo	549873	2226537	2.6952	0.1882	71	Flujo	531992	2227578	0.2807	0.0040
2	Caída	531954	2224969	0.1835	0.0012	72	Caída	530649	2230839	0.2162	0.0034
3	Flujo	533230	2221536	0.3253	0.0046	73	Flujo	527239	2228929	0.2701	0.0022
4	Caída	518048	2231351	0.6780	0.0162	74	Flujo	525993	2230433	0.2783	0.0025
5	Flujo	535720	2233950	0.2916	0.0043	75	Caída	528954	2231449	0.6665	0.0224
6	Caída	528511	2228123	0.1746	0.0013	76	Deslizamiento	529173	2226224	0.1318	0.0009
7	Flujo	528439	2228721	0.5514	0.0127	77	Flujo	532009	2228317	0.3415	0.0058
8	Caída	528296	2228197	0.6949	0.0158	78	Deslizamiento	529132	2226234	0.1092	0.0005
9	Flujo	528418	2228598	0.5470	0.0111	79	Complejo	523645	2227374	0.1295	0.0009
10	Caída	528471	2228173	0.1576	0.0016	80	Flujo	532148	2228331	0.3084	0.0059
11	Deslizamiento	529325	2226952	0.1301	0.0011	81	Flujo	532187	2226313	0.4050	0.0088
12	Caída	528448	2229009	0.2243	0.0021	82	Flujo	530154	2228902	0.4076	0.0078
13	Flujo	528479	2228105	0.0752	0.0003	83	Complejo	529013	2226274	0.1282	0.0012
14	Flujo	524798	2228230	0.2545	0.0018	84	Flujo	529936	2228946	0.5118	0.0104
15	Flujo	528392	2228486	0.3352	0.0046	85	Flujo	532292	2228084	0.4902	0.0064
16	Flujo	527725	2227556	0.1705	0.0018	86	Flujo	532070	2228183	0.1891	0.0016
17	Flujo	528036	2230912	0.2685	0.0025	87	Flujo	530037	2228640	0.2427	0.0024
18	Flujo	527444	2227277	0.4959	0.0106	88	Caída	529065	2226256	0.1595	0.0013
19	Flujo	528171	2228140	0.1992	0.0020	89	Flujo	530146	2228470	0.2868	0.0039
20	Deslizamiento	528499	2226856	0.1521	0.0016	90	Deslizamiento	529012	2226877	0.4737	0.0131
21	Deslizamiento	528502	2228203	0.2026	0.0012	91	Deslizamiento	529022	2226415	0.1482	0.0009
22	Deslizamiento	528303	2227439	0.1861	0.0024	92	Caída	529279	2226965	0.1368	0.0011
23	Deslizamiento	527939	2227607	0.2489	0.0010	93	Caída	528975	2225528	0.1862	0.0015
24	Deslizamiento	527806	2227594	0.2722	0.0018	94	Deslizamiento	529125	2226900	0.1674	0.0018
25	Deslizamiento	527980	2227657	0.2137	0.0022	95	Deslizamiento	529017	2226756	0.4041	0.0096
26	Deslizamiento	527949	2227647	0.0617	0.0002	96	Caída	525348	2226469	0.6985	0.0132
27	Deslizamiento	528122	2227424	0.2064	0.0014	97	Caída	528540	2225177	0.2754	0.0053
28	Deslizamiento	528289	2227712	0.3382	0.0046	98	Caída	527785	2226970	0.4432	0.0062
29	Deslizamiento	528125	2227679	0.1368	0.0009	99	Caída	528941	2226401	0.3060	0.0030
30	Deslizamiento	528031	2227686	0.2384	0.0030	100	Complejo	528911	2226325	0.1833	0.0016
31	Deslizamiento	528170	2227700	0.1360	0.0010	101	Flujo	528789	2224862	0.1607	0.0015
32	Deslizamiento	528419	2227731	0.2695	0.0017	102	Caída	527481	2226849	0.2930	0.0047
33	Deslizamiento	528411	2227431	0.1751	0.0014	103	Flujo	526935	2226819	0.7507	0.0194
34	Flujo	527427	2229077	0.3850	0.0038	104	Caída	529034	2226353	0.3994	0.0056
35	Deslizamiento	528207	2227444	0.1222	0.0010	105	Flujo	528851	2225008	0.1861	0.0024
36	Caída	527315	2227332	0.3180	0.0054	106	Flujo	528781	2225885	0.2025	0.0018
37	Caída	527953	2227203	0.4075	0.0062	107	Caída	528587	2225261	0.1874	0.0020
38	Flujo	528630	2226869	0.3604	0.0024	108	Flujo	525104	2226232	0.1875	0.0008
39	Caída	527752	2227348	0.9840	0.0164	109	Flujo	527306	2226308	0.5914	0.0103
40	Deslizamiento	528089	2227272	0.5094	0.0105	110	Flujo	526071	2227358	0.2218	0.0029
41	Flujo	527480	2229284	0.3341	0.0037	111	Caída	527659	2227129	0.4361	0.0076
42	Caída	528029	2226872	0.8309	0.0216	112	Caída	527481	2226805	0.1400	0.0009
43	Flujo	528625	2227247	0.2322	0.0023	113	Flujo	535798	2225959	0.1177	0.0005
44	Flujo	528816	2227062	0.2632	0.0029	114	Flujo	527483	2226736	0.3345	0.0073
45	Deslizamiento	527311	2228015	0.2726	0.0054	115	Caída	527681	2227046	0.2942	0.0045
46	Caída	527378	2227711	0.8147	0.0224	116	Flujo	527387	2226933	0.3371	0.0036
47	Flujo	528729	2227309	0.3868	0.0056	117	Flujo	532092	2225927	0.1396	0.0010
48	Deslizamiento	528837	2227153	0.1323	0.0012	118	Flujo	525082	2226243	0.1122	0.0006
49	Deslizamiento	528323	2226874	0.4149	0.0086	119	Flujo	525068	2226229	0.1862	0.0005
50	Caída	527521	2228221	0.3172	0.0044	120	Flujo	525013	2226222	0.2275	0.0017
51	Deslizamiento	528721	2227145	0.2748	0.0035	121	Flujo	525036	2226267	0.1521	0.0014
52	Caída	527510	2227504	0.7316	0.0283	122	Flujo	532336	2225957	0.2574	0.0036
53	Flujo	527397	2228747	0.2175	0.0026	123	Caída	525855	2226415	0.3500	0.0062
54	Flujo	528766	2227211	0.5480	0.0055	124	Flujo	525049	2226217	0.2393	0.0008
55	Caída	527172	2227543	0.8101	0.0193	125	Flujo	531893	2227040	0.2838	0.0029
56	Deslizamiento	527657	2228124	0.2696	0.0050	126	Flujo	529551	2227103	0.3072	0.0058
57	Flujo	527478	2228512	0.4392	0.0072	127	Flujo	530719	2228073	0.5955	0.0065
58	Flujo	527688	2229272	0.3291	0.0064	128	Flujo	530441	2228209	0.3214	0.0032
59	Flujo	527469	2228410	0.2679	0.0040	129	Flujo	529485	2226952	0.2355	0.0038
60	Flujo	527696	2228173	0.3908	0.0057	130	Flujo	522609	2227017	0.6901	0.0102
61	Flujo	527267	2228865	0.1900	0.0014	131	Deslizamiento	522529	2226737	0.1368	0.0012
62	Flujo	526554	2229282	0.8013	0.0182	132	Flujo	522374	2226986	0.2729	0.0031
63	Flujo	527252	2228800	0.1778	0.0011	133	Flujo	522293	2226993	0.4884	0.0082
64	Flujo	527451	2228688	0.1809	0.0020	134	Flujo	522969	2226239	0.8345	0.0178
65	Flujo	527203	2228991	0.2131	0.0023	135	Caída	523348	2227475	0.3238	0.0041
66	Flujo	526643	2229462	0.4277	0.0093	136	Flujo	523442	2227849	0.0653	0.0003
67	Flujo	527820	2229071	0.4465	0.0077	137	Flujo	539451	2221404	0.2337	0.0037
68	Flujo	531871	2227529	0.1642	0.0016	138	Complejo	535578	2220617	1.0498	0.0486
69	Flujo	527249	2228905	0.1257	0.0010	139	Flujo	536146	2222664	0.1706	0.0011
70	Complejo	527600	2229200	0.6956	0.0249	140	Caída	535425	2220266	0.7191	0.0172

FID_	Tipo	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)
141	Flujo	537448	2221792	0.8805	0.0286
142	Flujo	536428	2222610	0.5330	0.0090
143	Flujo	536576	2222490	0.5729	0.0133
144	Caida	537276	2220875	0.4374	0.0071
145	Caida	539092	2221368	0.4169	0.0061
146	Flujo	543277	2224773	0.3160	0.0055
147	Caida	536689	2220377	0.2614	0.0048
148	Deslizamiento	534651	2214763	0.2285	0.0032
149	Flujo	540615	2221764	0.4747	0.0090
150	Caida	536682	2220230	0.2507	0.0034
151	Flujo	543180	2224717	0.3219	0.0057
152	Caida	535784	2226043	0.1536	0.0006
153	Deslizamiento	539987	2221192	0.3734	0.0065
154	Flujo	539492	2219953	0.2165	0.0025
155	Caida	536792	2220246	0.6142	0.0105
156	Flujo	546350	2219133	0.4898	0.0143
157	Flujo	546691	2226983	0.2062	0.0024
158	Complejo	547001	2218713	1.1145	0.0474
159	Flujo	518174	2221159	0.3686	0.0041
160	Flujo	546805	2218605	0.4204	0.0120
161	Flujo	518043	2221315	0.4811	0.0143
162	Flujo	535066	2228508	0.3202	0.0039
163	Deslizamiento	551835	2208366	0.3873	0.0078
164	Deslizamiento	534723	2215788	0.2770	0.0042
165	Deslizamiento	535836	2233869	0.2700	0.0044
166	Flujo	552120	2208368	0.2136	0.0023
167	Complejo	545713	2220680	0.7693	0.0302
168	Flujo	518649	2221356	0.4773	0.0118
169	Flujo	548435	2215217	0.3900	0.0073
170	Deslizamiento	548213	2207964	0.6297	0.0155
171	Flujo	544671	2209854	0.1535	0.0015
172	Caida	548147	2220704	0.2017	0.0023
173	Flujo	546228	2220436	0.9896	0.0542
174	Flujo	535595	2228254	0.0911	0.0004
175	Flujo	544100	2224878	0.5398	0.0137
176	Flujo	547739	2220059	0.7657	0.0292
177	Flujo	519140	2235819	0.5709	0.0103
178	Complejo	551315	2213933	0.6744	0.0196
179	Flujo	519009	2235802	0.2613	0.0034
180	Deslizamiento	543204	2208566	0.3592	0.0071
181	Deslizamiento	544737	2209754	0.3150	0.0051
182	Flujo	519337	2235783	0.1420	0.0013
183	Flujo	558210	2200236	0.2031	0.0024
184	Flujo	519113	2235623	0.1422	0.0014
185	Flujo	518461	2234059	0.5554	0.0099
186	Flujo	519229	2235764	0.1431	0.0009
187	Flujo	519170	2235506	0.7372	0.0125
188	Flujo	558334	2200185	0.1286	0.0008
189	Flujo	553639	2197771	0.2242	0.0033
190	Flujo	558067	2200899	0.2434	0.0032
191	Flujo	560412	2206257	0.5205	0.0140
192	Flujo	536640	2215582	0.7953	0.0341
193	Flujo	558089	2200411	0.1462	0.0010
194	Caida	556024	2204072	0.1744	0.0018
195	Deslizamiento	549436	2222027	1.0376	0.0732
196	Caida	556094	2204108	0.1092	0.0006
197	Deslizamiento	538812	2217368	1.0497	0.0575
198	Flujo	557990	2201017	0.2998	0.0042
199	Flujo	538346	2217027	0.9372	0.0349
200	Flujo	536662	2216054	0.3693	0.0080
201	Flujo	558064	2200277	0.2827	0.0025
202	Flujo	542329	2219352	0.3331	0.0070
203	Deslizamiento	537048	2216351	0.4656	0.0097
204	Caida	537491	2216949	0.6856	0.0268
205	Deslizamiento	538881	2217011	1.0335	0.0624
206	Flujo	542455	2218190	0.1155	0.0008
207	Deslizamiento	537243	2216439	0.3966	0.0089
208	Caida	537303	2210409	0.7347	0.0346
209	Flujo	542438	2217892	0.2860	0.0036
210	Flujo	543113	2219592	0.3167	0.0036

FID_	Tipo	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)
211	Flujo	542138	2219364	0.3514	0.0089
212	Complejo	542707	2217728	0.2370	0.0039
213	Flujo	542215	2218191	0.1708	0.0016
214	Flujo	558318	2200321	0.2505	0.0033
215	Flujo	542307	2218093	0.1902	0.0023
216	Flujo	542288	2218196	0.1659	0.0019
217	Flujo	542175	2218206	0.1709	0.0009
218	Flujo	542994	2219571	0.4772	0.0131
219	Flujo	542292	2218265	0.1770	0.0021
220	Flujo	539649	2212970	0.3268	0.0065
221	Flujo	542262	2218026	0.3120	0.0046
222	Flujo	542416	2217998	0.2133	0.0020
223	Flujo	542150	2218053	0.4499	0.0062
224	Flujo	539823	2217849	0.1227	0.0009
225	Flujo	534763	2215995	0.5009	0.0065
226	Flujo	539981	2217817	0.1451	0.0015
227	Flujo	542214	2218258	0.1331	0.0010
228	Flujo	542377	2218167	0.1832	0.0014
229	Flujo	539880	2217874	0.2114	0.0022
230	Flujo	538908	2214074	0.2138	0.0023
231	Complejo	540058	2217825	0.3295	0.0066
232	Flujo	541846	2218381	0.2086	0.0018
233	Flujo	539789	2217834	0.0777	0.0004
234	Caida	541674	2218420	0.1396	0.0009
235	Flujo	542240	2218247	0.1496	0.0011
236	Deslizamiento	538763	2212588	0.4703	0.0145
237	Flujo	538992	2213996	0.4117	0.0096
238	Flujo	539052	2212497	0.1169	0.0010
239	Flujo	541136	2209874	0.1663	0.0017
240	Caida	538898	2212539	0.3979	0.0087
241	Flujo	519285	2235714	0.1647	0.0014
242	Flujo	534641	2215916	0.4042	0.0079
243	Flujo	539086	2214162	0.8272	0.0178
244	Flujo	535480	2215756	0.8709	0.0372
245	Flujo	563116	2208408	0.2050	0.0023
246	Complejo	535905	2215922	1.0368	0.0582
247	Deslizamiento	534742	2215312	0.3757	0.0069
248	Flujo	519313	2232421	0.2909	0.0045
249	Flujo	520107	2232737	0.1823	0.0022
250	Flujo	541339	2222467	0.2140	0.0026
251	Flujo	519963	2232736	0.3913	0.0085
252	Deslizamiento	520409	2232569	0.2361	0.0027
253	Flujo	520347	2232650	0.3354	0.0038
254	Flujo	519647	2232283	0.3181	0.0044
255	Caida	519841	2232317	0.1905	0.0027
256	Flujo	520346	2232698	0.3948	0.0028
257	Caida	538349	2211562	0.5586	0.0171
258	Flujo	520440	2232641	0.1906	0.0016
259	Flujo	520283	2232664	0.3185	0.0035
260	Flujo	520441	2232442	0.4276	0.0058
261	Flujo	520386	2232367	0.3783	0.0053
262	Flujo	518808	2233594	0.2095	0.0023
263	Flujo	520316	2232398	0.1921	0.0020
264	Flujo	548726	2214604	0.5647	0.0140
265	Flujo	548578	2214655	0.3449	0.0075
266	Flujo	524366	2228199	0.2779	0.0023
267	Flujo	524541	2228097	0.2124	0.0016
268	Caida	524309	2228050	0.3392	0.0024
269	Flujo	524220	2228071	0.4025	0.0045
270	Caida	525073	2229052	0.1140	0.0007
271	Flujo	525208	2228940	0.2626	0.0018
272	Flujo	524420	2228114	0.1658	0.0009
273	Caida	525007	2228418	0.1360	0.0012
274	Caida	531535	2225529	1.2082	0.0362
275	Caida	531388	2225703	0.3391	0.0035
276	Flujo	531915	2225422	0.3970	0.0097
277	Flujo	531800	2225475	0.6609	0.0150
278	Caida	531661	2225825	0.3222	0.0066
279	Flujo	531468	2225843	0.7716	0.0215
280	Caida	531841	2225803	0.5134	0.0054

FID_	Tipo	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)
281	Flujo	548452	2216938	0.3079	0.0047
282	Flujo	532395	2224239	0.0917	0.0005
283	Flujo	532366	2224214	0.1350	0.0008
284	Caída	531735	2225592	0.4900	0.0057
285	Caída	531534	2225573	0.4537	0.0044
286	Flujo	532741	2225468	0.1669	0.0012
287	Deslizamiento	532693	2225405	0.2205	0.0030
288	Deslizamiento	532725	2224975	0.7298	0.0282
289	Caída	532730	2225081	0.2193	0.0024
290	Flujo	530377	2225931	0.2383	0.0015
291	Flujo	533873	2223813	0.1748	0.0018
292	Flujo	548706	2216780	0.3753	0.0070
293	Deslizamiento	536428	2220620	0.0810	0.0003
294	Deslizamiento	536399	2220623	0.1322	0.0012
295	Deslizamiento	536413	2220548	0.2623	0.0035
296	Caída	524115	2228015	0.1644	0.0011
297	Flujo	524396	2228020	0.1408	0.0008
298	Flujo	524434	2228011	0.0886	0.0003
299	Flujo	524481	2228097	0.1881	0.0019
300	Caída	525029	2228403	0.2094	0.0018
301	Flujo	558616	2201772	0.3818	0.0077
302	Flujo	548908	2213398	0.2409	0.0017
303	Complejo	548485	2213564	0.3189	0.0046
304	Flujo	548597	2216842	0.3231	0.0069
305	Flujo	525062	2229000	0.2430	0.0018
306	Flujo	518410	2231200	0.3245	0.0057
307	Flujo	518670	2231211	0.2385	0.0034
308	Flujo	548504	2216889	0.3382	0.0059
309	Caída	519232	2231352	0.2668	0.0043
310	Flujo	519616	2231816	0.3731	0.0036
311	Flujo	563623	2213682	0.1486	0.0014
312	Flujo	558131	2200360	0.2295	0.0024
313	Deslizamiento	519389	2231525	0.2345	0.0019
314	Flujo	548400	2217013	0.4933	0.0164
315	Flujo	519362	2231618	0.3504	0.0046
316	Flujo	548116	2215519	0.2018	0.0026
317	Flujo	548333	2217153	0.4543	0.0092
318	Complejo	547867	2216565	0.2394	0.0035
319	Complejo	546476	2218126	0.2606	0.0050
320	Complejo	546436	2218033	0.3881	0.0080
321	Flujo	557319	2200388	0.1726	0.0014
322	Flujo	557381	2200140	0.2240	0.0027
323	Flujo	556741	2198246	0.2060	0.0014
324	Flujo	549333	2202034	0.1374	0.0008
325	Flujo	549387	2202036	0.2569	0.0024
326	Flujo	548854	2212269	0.1604	0.0015
327	Flujo	548817	2212165	0.1798	0.0020
328	Flujo	538459	2223095	0.3576	0.0047
329	Flujo	547409	2214763	0.3368	0.0081
330	Flujo	534694	2215362	0.1374	0.0014
331	Flujo	534588	2215354	0.2706	0.0040
332	Flujo	545049	2216786	0.2617	0.0027
333	Flujo	545034	2216687	0.1661	0.0014
334	Deslizamiento	537759	2224217	0.3971	0.0116
335	Flujo	543842	2216933	0.1179	0.0008
336	Flujo	543803	2216974	0.2121	0.0020
337	Flujo	534979	2238174	0.3510	0.0069
338	Deslizamiento	537582	2224441	0.3762	0.0069
339	Flujo	544061	2217200	0.4000	0.0069
340	Flujo	543994	2217058	0.1015	0.0007
341	Deslizamiento	537619	2224063	0.8213	0.0127
342	Deslizamiento	537677	2224397	0.3670	0.0073
343	Deslizamiento	547248	2231347	0.1807	0.0021
344	Deslizamiento	537843	2224290	0.1997	0.0020
345	Deslizamiento	537197	2224706	0.2392	0.0035
346	Deslizamiento	537519	2224512	0.3473	0.0041
347	Deslizamiento	534885	2238278	0.3369	0.0063
348	Deslizamiento	532198	2226604	0.5083	0.0134
349	Flujo	534551	2236340	0.2111	0.0023
350	Deslizamiento	537707	2224310	0.2512	0.0032

FID_	Name	X	Y	Perímetro (Km)	Área (Km2)
351	Flujo	536073	2236793	0.2385	0.0041
352	Flujo	518847	2232541	0.2471	0.0027
353	Flujo	520408	2233568	0.3530	0.0043
354	Caída	520385	2233433	0.2855	0.0044
355	Flujo	526059	2229147	0.3098	0.0038
356	Flujo	533203	2221558	0.2107	0.0016
357	Flujo	533112	2221483	0.4637	0.0053
358	Flujo	532531	2227081	0.1458	0.0014
359	Caída	532342	2226687	0.5771	0.0100
360	Flujo	532260	2226857	0.1325	0.0010
361	Flujo	533865	2224830	0.0882	0.0005
362	Caída	531447	2227321	0.3674	0.0064
363	Caída	531835	2225099	0.1900	0.0010
364	Caída	534063	2221023	0.0948	0.0005
365	Deslizamiento	533819	2221022	0.1587	0.0018
366	Flujo	532181	2221289	0.2445	0.0042
367	Flujo	531278	2225114	0.2008	0.0022
368	Flujo	533874	2224543	0.2147	0.0025
369	Caída	532076	2227112	0.3428	0.0026
370	Flujo	532270	2221282	0.2119	0.0030
371	Caída	531885	2225211	0.2862	0.0020
372	Deslizamiento	535162	2226037	0.2205	0.0032
373	Caída	534900	2226228	0.0918	0.0006
374	Flujo	546792	2219948	0.8629	0.0308
375	Caída	538280	2237801	0.2217	0.0011
376	Caída	538240	2237943	0.0990	0.0007
377	Caída	538279	2237895	0.1378	0.0012
378	Flujo	545987	2223686	0.3273	0.0027
379	Flujo	546098	2223724	0.2288	0.0019
380	Caída	528956	2225785	0.1097	0.0007
381	Flujo	546080	2223752	0.1630	0.0011
382	Deslizamiento	546834	2225851	0.4707	0.0126
383	Deslizamiento	546708	2225792	0.3305	0.0082
384	Deslizamiento	546797	2225586	0.8653	0.0127
385	Deslizamiento	547341	2224960	0.7751	0.0362
386	Flujo	541384	2221946	0.2823	0.0027
387	Deslizamiento	547153	2224727	0.6274	0.0278
388	Flujo	539732	2223728	0.1275	0.0008
389	Flujo	533365	2221812	0.1156	0.0008
390	Flujo	534252	2224744	0.1623	0.0016
391	Deslizamiento	530761	2229819	0.2810	0.0058
392	Deslizamiento	530546	2225069	0.1438	0.0014
393	Flujo	530358	2217738	0.1378	0.0011
394	Flujo	528718	2220970	0.2240	0.0022
395	Flujo	528721	2220889	0.3288	0.0041
396	Caída	530690	2224494	0.0523	0.0002
397	Flujo	528774	2221013	0.2216	0.0027
398	Caída	530654	2224474	0.0928	0.0004
399	Flujo	528483	2222835	0.1535	0.0017
400	Caída	531954	2225246	0.4748	0.0056
401	Caída	531922	2225081	0.0756	0.0003
402	Complejo	518363	2225991	0.2343	0.0038
403	Deslizamiento	518676	2226089	0.8816	0.0400
404	Deslizamiento	518321	2226386	0.9593	0.0499
405	Deslizamiento	518736	2226404	1.4416	0.0634
406	Flujo	524353	2227509	0.1931	0.0020
407	Flujo	524320	2227846	0.1808	0.0014
408	Flujo	523620	2227541	0.0898	0.0005
409	Flujo	522497	2225712	0.1883	0.0018
410	Flujo	527764	2229260	0.2267	0.0034
411	Flujo	528276	2229505	0.2016	0.0015
412	Complejo	550119	2223624	1.5961	0.1067
413	Caída	548766	2224738	1.2133	0.0367
414	Caída	548773	2224343	0.4523	0.0087
415	Caída	548155	2225668	0.6061	0.0172
416	Flujo	542262	2231903	0.3458	0.0078
417	Flujo	550901	2245389	0.3030	0.0038
418	Flujo	552037	2242801	0.7964	0.0304
419	Deslizamiento	552534	2242634	0.7564	0.0334
420	Flujo	550982	2239657	0.2731	0.0039

FID	Tipo	X	Y	Perimetro (Km)	Área (Km2)
421	Flujo	551005	2239754	0.2912	0.0049
422	Flujo	551147	2239872	0.3653	0.0042
423	Flujo	546435	2240118	0.5554	0.0092
424	Flujo	547011	2241335	0.1999	0.0026
425	Flujo	553905	2240168	0.1870	0.0018
426	Caída	547033	2240690	0.1962	0.0025
427	Flujo	547101	2240755	0.5789	0.0120
428	Flujo	546238	2239136	0.4419	0.0110
429	Flujo	553992	2240128	0.0547	0.0002
430	Flujo	546904	2240732	0.2211	0.0015
431	Flujo	553949	2240070	0.1505	0.0013
432	Flujo	551397	2243097	0.2007	0.0024
433	Flujo	548834	2223037	0.1747	0.0022
434	Flujo	548727	2223013	0.3820	0.0073
435	Flujo	549492	2225624	0.3831	0.0062
436	Flujo	541459	2256505	0.8737	0.0352
437	Flujo	521877	2255114	0.3912	0.0103
438	Flujo	541949	2256426	0.7670	0.0361
439	Flujo	546624	2259453	0.3527	0.0078
440	Flujo	521734	2255164	0.3349	0.0056
441	Flujo	546590	2259332	0.3212	0.0044
442	Flujo	546687	2258845	0.2567	0.0047
443	Flujo	539154	2251314	0.3627	0.0074
444	Flujo	528468	2241567	0.3034	0.0063
445	Flujo	531349	2237818	0.3658	0.0067
446	Deslizamiento	531019	2228350	0.2601	0.0038
447	Flujo	532240	2226403	0.1548	0.0016
448	Deslizamiento	532089	2226159	0.2996	0.0056
449	Deslizamiento	532969	2258898	0.2956	0.0037
450	Flujo	532870	2259594	0.3734	0.0078
451	Flujo	525831	2258277	0.2918	0.0027
452	Caída	532665	2259342	0.4042	0.0040
453	Flujo	532891	2259755	0.2864	0.0049
454	Flujo	532994	2260069	0.1082	0.0004
455	Caída	527173	2256770	0.2365	0.0038
456	Flujo	526216	2257326	0.3635	0.0057
457	Flujo	521899	2250769	0.6361	0.0249
458	Flujo	521074	2247077	0.5766	0.0063
459	Flujo	521002	2247043	0.5550	0.0043
460	Flujo	522280	2238677	0.5093	0.0052
461	Flujo	527973	2232297	0.3373	0.0038
462	Deslizamiento	541941	2250700	0.2569	0.0030
463	Flujo	540779	2249199	0.1059	0.0006
464	Flujo	540526	2249230	0.1260	0.0010
465	Flujo	540379	2248440	0.1302	0.0009
466	Flujo	531162	2243362	0.1949	0.0019
467	Flujo	531121	2243358	0.1113	0.0003
468	Flujo	531148	2242945	0.4702	0.0056
469	Flujo	531032	2243081	0.2831	0.0037
470	Deslizamiento	529703	2243667	0.4125	0.0070
471	Flujo	529576	2243474	0.2651	0.0036
472	Flujo	546523	2231280	0.4619	0.0101
473	Flujo	527816	2249582	0.5448	0.0123
474	Deslizamiento	534769	2257889	0.8401	0.0371
475	Flujo	534599	2257332	0.6140	0.0175
476	Caída	536420	2255062	0.1768	0.0013
477	Flujo	543333	2233095	0.2970	0.0039
478	Flujo	542876	2232630	0.4118	0.0050
479	Flujo	542931	2232431	0.2639	0.0027
480	Flujo	525210	2241478	0.3744	0.0047
481	Flujo	525453	2241350	0.2537	0.0036
482	Flujo	525174	2241004	0.4092	0.0075
483	Flujo	525647	2241852	0.3359	0.0036
484	Flujo	520803	2240719	0.5446	0.0158
485	Flujo	521010	2240729	0.3878	0.0093
486	Flujo	521349	2240941	0.6989	0.0179
487	Deslizamiento	521729	2240796	0.4961	0.0101
488	Flujo	521553	2240904	0.6135	0.0177
489	Flujo	521168	2240998	0.5018	0.0118
490	Flujo	521240	2241111	0.1296	0.0011
491	Flujo	521337	2241123	0.2205	0.0031
492	Flujo	521020	2240955	0.4336	0.0074
493	Flujo	520157	2237646	0.7759	0.0364
494	Flujo	527074	2238902	0.2029	0.0030
495	Flujo	526570	2238614	0.3115	0.0036
496	Deslizamiento	526242	2238433	0.2902	0.0048
497	Flujo	547386	2231710	0.2231	0.0025
498	Flujo	547392	2231629	0.3049	0.0026
499	Flujo	543482	2233142	0.2088	0.0023
500	Flujo	543463	2233382	0.2327	0.0023

FID	Name	X	Y	Perimetro (Km)	Área (Km2)
501	Flujo	544082	2245277	0.7044	0.0278
502	Flujo	543804	2245327	0.6830	0.0237
503	Flujo	543259	2245407	0.8089	0.0272
504	Flujo	542969	2245553	0.3710	0.0087
505	Flujo	542836	2245651	0.3318	0.0076
506	Flujo	542580	2246135	0.3499	0.0047
507	Flujo	542433	2246231	0.3915	0.0084
508	Flujo	549468	2243992	0.2357	0.0022
509	Deslizamiento	549982	2243635	0.4901	0.0063
510	Flujo	550500	2243029	0.2911	0.0030
511	Flujo	551449	2242510	0.2086	0.0030
512	Flujo	551279	2242734	0.3896	0.0039
513	Flujo	553411	2241898	0.3649	0.0063
514	Flujo	553848	2241529	0.5525	0.0110
515	Deslizamiento	554032	2242395	0.5175	0.0083
516	Flujo	535128	2238205	0.2766	0.0036
517	Flujo	533293	2238759	0.3344	0.0068
518	Flujo	533369	2238539	0.4368	0.0063
519	Flujo	533819	2238134	0.2922	0.0049
520	Flujo	545988	2227493	0.4164	0.0111
521	Flujo	532525	2239875	0.6126	0.0186
522	Flujo	532336	2240594	0.1029	0.0005
523	Flujo	531515	2238105	0.3791	0.0050
524	Flujo	535386	2227567	0.2786	0.0043
525	Flujo	534003	2221735	0.1108	0.0008
526	Flujo	536005	2253224	0.3278	0.0059
527	Flujo	536319	2253138	0.3126	0.0057
528	Deslizamiento	530383	2243110	0.2509	0.0037
529	Flujo	530494	2243031	0.3511	0.0067
530	Flujo	530380	2243021	0.1694	0.0021
531	Flujo	530372	2242959	0.1695	0.0012
532	Flujo	530418	2242704	0.1883	0.0019
533	Flujo	526101	2243311	0.1500	0.0016
534	Flujo	535202	2227385	0.2364	0.0036
535	Flujo	532628	2237673	0.6649	0.0192
536	Flujo	532294	2237536	0.6824	0.0107
537	Flujo	549891	2224088	0.7016	0.0361
538	Flujo	550151	2224841	1.1708	0.0378
539	Flujo	538688	2250268	0.9013	0.0197
540	Flujo	538477	2250728	0.3934	0.0097
541	Flujo	537527	2252206	0.5253	0.0127
542	Flujo	523161	2241742	0.5068	0.0155
543	Flujo	522458	2241236	0.8562	0.0264
544	Deslizamiento	534066	2215420	1.0961	0.0877
545	Flujo	535674	2220855	0.8155	0.0142
546	Flujo	538961	2218957	0.4488	0.0146
547	Caída	539619	2221628	0.4773	0.0144
548	Deslizamiento	548019	2225104	1.2010	0.0426
549	Flujo	547616	2225935	1.1298	0.0597
550	Flujo	547410	2226103	1.1335	0.0360
551	Flujo	536478	2224556	0.7150	0.0272
552	Flujo	548400	2225839	0.6437	0.0250
553	Flujo	546779	2220077	1.4032	0.0696
554	Deslizamiento	549614	2222830	0.9684	0.0363
555	Deslizamiento	542463	2220040	0.5645	0.0147
556	Deslizamiento	524145	2227850	0.7372	0.0089
557	Caída	526125	2232455	0.9433	0.0473
558	Deslizamiento	528794	2237351	1.0386	0.0317
559	Flujo	528005	2237890	1.3292	0.0510
560	Caída	554130	2232064	0.2293	0.0038
561	Flujo	553273	2228853	0.4728	0.0096
562	Flujo	553454	2228963	0.2621	0.0048
563	Flujo	553881	2238385	0.7524	0.0361
564	Flujo	551419	2228387	0.5805	0.0113
565	Flujo	554311	2238571	0.8406	0.0470
566	Flujo	528208	2238404	0.3719	0.0057
567	Flujo	533813	2221431	0.4678	0.0095
568	Flujo	554003	2232529	0.1767	0.0018
569	Flujo	529909	2238802	0.4793	0.0119
570	Flujo	535416	2238921	0.4652	0.0140
571	Flujo	538008	2224231	0.1984	0.0025
572	Flujo	538569	2223938	0.2097	0.0024
573	Flujo	544350	2215532	0.6833	0.0263
574	Flujo	544141	2215481	1.1802	0.0451
575	Flujo	526103	2230189	0.6198	0.0107
576	Caída	527392	2233562	1.8782	0.0921
577	Flujo	535306	2229970	0.4344	0.0098
578	Flujo	557937	2201561	0.5056	0.0037
579	Deslizamiento	535416	2238921	0.4652	0.0140

Anexo 4

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	FP1	FP1b	Pachuca de Soto	1140	146		529246	2225607	2567
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización	> 20 m		< 20 m						
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°	> 40°					
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m		> 3 m				
Tipo de peligro			Si			No			
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos	<p>En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 77° de inclinación de hasta 3 m de altura, en donde aflora una roca con un color de intemperismo café claro altamente fracturada, en la que se observan derrumbes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro en la que se tiene una alteración propilítica moderada, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N73/73°, N315/53° y N185/73°, estas estructuras generan bloques de hasta 75 cm, los cuales se están depositando al pie del talud en donde se tiene una cuneta como obra de mitigación, no se observan componentes de carretera.</p>			
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales				
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si					
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si		No			
Acotamiento		Fondo							




Anexo 5

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación												
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z			
01-nov-16	FP1	FP1a	Pachuca de Soto	1140	146		529064	2225556	2551			
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	<p>En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de hasta 5 m de altura, en donde aflora una roca con un color de intemperismo gris claro altamente fracturada, en la que se observan derrumbes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30% de fenocristales de plagioclasas de hasta 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales, los cuales perteneces a un fracturamiento con una orientación preferencial de N260/76°, N350/84° y N195/52°, estas estructuras generan bloques de hasta 45 cm, los cuales se están depositando al pie del talud en donde se tiene una cuneta como obra de mitigación de estado medio, no se observan componentes de carretera.</p>						
Urbanización			> 20 m	< 20 m								
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°							
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m							
Tipo de peligro			Si							No		
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos							
Tipo de material en el talud												
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios									
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias								
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales							
			Aluvión									
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar								
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas								
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava							
	Intrusiva											
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita							
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar							
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado							
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm							
Obra de mitigación				Si	No							
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados							
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado										
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo							
Componentes de carretera				Si	No							
Acotamiento		Fondo										



Anexo 6

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	FP1	FP1d	Pachuca de Soto	512-513	146		530356	2226152	2621
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si			No			
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas			Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
 <p>La imagen muestra un talud de roca con un derrumbe reciente. Se observan líneas de mitigación (cunetas) instaladas a lo largo del pie del talud. Una carretera asfaltada con una línea amarilla centralizada se ve en primer plano. Las etiquetas 'Talud' y 'Derrumbe' indican las áreas de interés.</p>									

Anexo 7

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación											
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z		
01-nov-16	FP1	FP1g	Pachuca de Soto	512-513	146		530356	2226152	2621		
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción					
Urbanización		> 20 m		< 20 m							
Inclinación del talud		0° - 30°		30° - 40°		> 40°		En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de hasta 13 m de altura, en donde aflora una roca con un color de intemperismo de café marrón altamente fracturada, en la que se observan derrumbes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 3 mm, 15% de minerales máficos de 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca, se observa una alteración argílica fuerte. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N245/64° y N325/82°, estas estructuras generan bloques de hasta 11 cm, los cuales se están depositando al pie del talud, no se tiene obra de mitigación y tampoco se observan componentes de carretera.			
Altura del talud		< 1 m		1 - 3 m		> 3 m					
Tipo de peligro		Si			No						
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos						
Tipo de material en el talud											
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios								
Rocas ígneas		Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias						
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales					
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar						
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas							
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava						
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita						
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar						
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado						
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm						
Obra de mitigación				Si	No						
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados						
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado									
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo						
Componentes de carretera				Si	No						
Acotamiento		Fondo									



Anexo 8

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación													
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z				
01-nov-16	FP1	FP1c	Pachuca de Soto	1224	146		529462	2225875	2597				
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	<p>En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de hasta 4 m de altura, en donde aflora una roca con un color de intemperismo de gris verdoso claro altamente fracturada, en la que se observan derrumbes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 3 mm, 15 % de minerales máficos de 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca, se observa una alteración propilítica moderada. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N100/73°, N325/38° y N310/86°, estas estructuras generan bloques de hasta 75 cm, los cuales se están depositando al pie del talud donde se tiene una cuneta como obra de mitigación, no se observan componentes de carretera.</p>							
Urbanización	> 20 m		< 20 m										
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°		> 40°								
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m		> 3 m								
Tipo de peligro			SI							No			
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos								
Tipo de material en el talud													
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios										
Rocas ígneas			Rocas metamórficas							Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres					Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar								
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas									
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita								
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar								
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado								
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm								
Obra de mitigación				Si						No			
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados								
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado											
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo								
Componentes de carretera				Si		No							
Acotamiento		Fondo											



Anexo 9

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas			
01/11/2016	FP1	FP1e	Pachuca de Soto	534	146	X	Y	Z	
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si			No			
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos					Depósitos sedimentarios				
Rocas ígneas			Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si			No		
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si			No		
Acotamiento		Fondo							

En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de hasta 12 m de altura, en donde aflora una roca con un color de interperismo de gris verdoso claro altamente fracturada, en la que se observan desplomes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 3 mm, 15% de minerales máficos de 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca, se observa una alteración propilitica moderada. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N135/82°, N55/80 y N233/47°, estas estructuras generan bloques de hasta 80 cm, los cuales se están depositando al pie del talud, en donde se tiene una cuneta como obra de mitigación de calidad media, no se observan componentes de carretera.


La imagen muestra un talud de roca que se inclina sobre una carretera asfaltada. Se han etiquetado tres elementos clave: 'Talud' (la ladera de roca), 'Cuneta' (la zanja de mitigación al pie del talud) y 'Caída de rocas' (un punto donde se han caído bloques de roca). Una línea amarilla indica la trayectoria de la carretera que curva a la izquierda.

Anexo 10

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación										
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z	
01/11/2016	FP1	FP1f	Pachuca de Soto	156	146		531523	2226550	2447	
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	<p>En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de hasta 12 m de altura, en donde aflora una roca con un color de intemperismo de gris verdoso claro altamente fracturada, en la que se observan derrumbes y caída de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30% de fenocristales de plagioclasas de hasta 3 mm, 15 % de minerales máficos de 2 mm inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, clasificando a la roca de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) perteneciente al Grupo Pachuca, se observa una alteración propilitica moderada. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N110 /77°, N220/84° y N55/76°, estas estructuras generan bloques de hasta 1.1 m, los cuales se están depositando al pie del talud, no se tiene obra de mitigación, no se observan componentes de carretera.</p>				
Urbanización	> 20 m		< 20 m							
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°	> 40°						
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m	> 3 m						
Tipo de peligro		Si			No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos					
Tipo de material en el talud										
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios							
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias						
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales					
			Aluvión							
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar						
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas						
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava					
	Intrusiva									
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita					
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar					
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado					
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm					
Obra de mitigación				Si	No					
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados					
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado								
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo					
Componentes de carretera				Si	No					
Acotamiento		Fondo								



Anexo 11


Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2a	Pachuca de Soto	1145	29		524206	2225731	2448
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión		Lacustres	Jales			
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
									

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.


Anexo 12

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2b	Pachuca de Soto	1159	29		523737	2226484	2477
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización	> 20 m		< 20 m						
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°		> 40°				
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m		> 3 m				
Tipo de peligro	Si		No						
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos					Depósitos sedimentarios				
Rocas ígneas			Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar Muy fracturado				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media					
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.



Anexo 13


Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2c	Pachuca de Soto	1213	29		523140	2226780	2495
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias				
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión		Lacustres	Jales			
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
									

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el tramo no se encuentra asfaltado y está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.

Anexo 14

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2f	Pachuca de Soto	1254	29		522272	2227237	2569
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión		Lacustres	Jales			
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							


En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, la vía no se encuentra asfaltada y está situada en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.



Anexo 15

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2d	Pachuca de Soto	1219	29		522904	2226902	2509
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							


En esta vía de comunicación no se observó urbanización dentro del derecho de vía, en este punto la vía se encuentra como camino de terracería en el que se observan cortes de talud a 90° de una altura de 2.3 m en la que se observan derrumbes, el material que se observa en el talud es un suelo de color café claro sin compactar, la roca en este tramo no aflora, el tamaño de los bloques asociado a los derrumbes son menores a 20 cm, no existen obras de mitigación ni componentes de carretera.



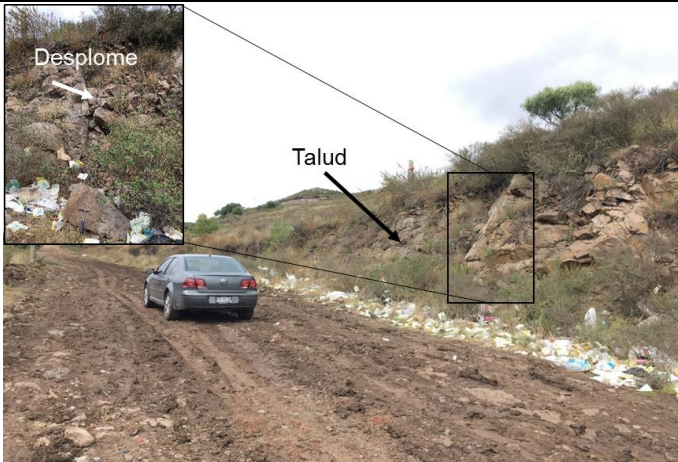
Anexo 16

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2h	Pachuca de Soto	131	29		523008	2227425	2600
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión		Lacustres	Jales			
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, se tiene una cuneta como obra de mitigación, no se observa ningún componente de carretera.

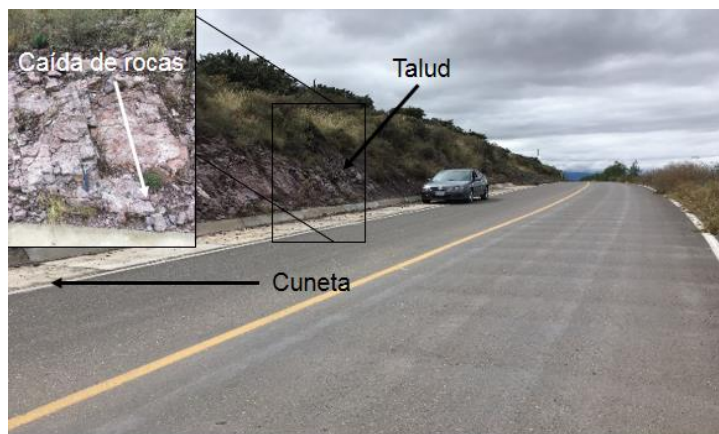


Anexo 17

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación													
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z				
01-nov-16	EP2	EP2e	Pachuca de Soto	1225-1226	29		522695	2227006	2533				
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción							
Urbanización			> 20 m	< 20 m									
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°								
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m								
Tipo de peligro			Si	No									
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos	En esta vía de comunicación se tienen cortes de talud que varían de 78° a 90° de inclinación y 5 m de altura, donde aflora una roca con un color de intemperismo café claro, altamente fracturada presentando colapsos y caídas de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 5 mm con 15 % de cristales máficos de 1 mm de largo y 1 % de cristales de cuarzo, inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca, presentando una alteración propilítica débil. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fallamiento normal dextral con una dirección de N295/57° y fracturas con una orientación preferencial de N25/68° y N85/70° las cuales tienden a la vertical, se caracteriza a la roca como de media compactación y muy fracturada, en su conjunto estas estructuras provocan colapsos parciales del talud, caída de rocas y bloques que varían desde los 10 cm hasta los 60 cm, en este tramo no se tienen obras de mitigación ni componentes de carretera.							
Tipo de material en el talud													
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios										
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias									
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales								
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar									
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas									
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita								
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar								
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado								
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm								
Obra de mitigación				Si	No								
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados								
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado											
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo								
Componentes de carretera				Si	No								
Acotamiento		Fondo											
 <p>The photograph shows a dirt road cut through a hillside. A dark car is driving on the road. The hillside is rocky and shows signs of erosion. An inset image in the top left corner shows a close-up of a rock mass with the word 'Desplome' (collapse) written over it. An arrow points from the word 'Talud' (slope) to the main image. A black box highlights a specific area on the slope.</p>													

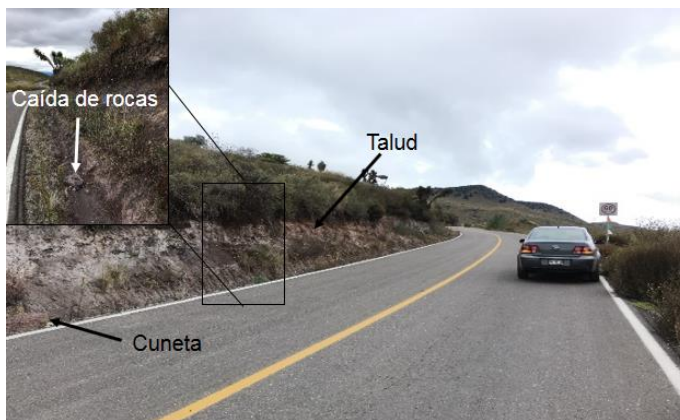
Anexo 18

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2g	Pachuca de Soto	115	29		522694	2227414	2598
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°	En esta vía de comunicación se tienen cortes de talud que varían de 80° inclinación y 5 m de altura, donde aflora una roca con un color de intemperismo gris claro, altamente fracturada presentando caídas de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 5 mm con 15 % de cristales máficos de 1 mm de largo y 1 % de cristales de cuarzo, inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fallamiento normal dextral con una dirección preferencial de N295/85° y fracturas con una orientación preferencial de N25/68°, N82/76°, las cuales tienden a la vertical. Se caracteriza a la roca como de media compactación y muy fracturada, en su conjunto estas estructuras provocan colapsos parciales del talud, caída de rocas y bloques que varían desde 10 cm hasta los 30 cm, en este tramo se tiene como obra de mitigación cuneta al pie del talud, donde se están depositando las rocas caídas, la cual está en buen estado, no se observaron componentes de carretera.			
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							



Anexo 19

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2i	Pachuca de Soto	141-143	29		523253	2227454	2615
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°	En esta vía de comunicación se tienen cortes de talud que varían de 85° a 90° inclinación y 3 m de altura, donde aflora una roca con un color de intemperismo café claro, altamente fracturada presentando caídas de rocas. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 5 mm con 15 % de cristales máficos de 1 mm de largo y 1 % de cristales de cuarzo, inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de un origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales de fracturas con una orientación preferencial de N35/62° y N80/72° las cuales tienden a la vertical, estas estructuras caracterizan a la roca como de media compactación y muy fracturada, en su conjunto provocan caída de rocas y bloques que varían desde los 10 cm hasta los 40 cm, en este tramo se tiene como obra de mitigación cuneta al pie del talud, donde se están depositando las rocas caídas, el cual se caracteriza como medio, no se tienen componentes de carretera.			
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							



Anexo 20

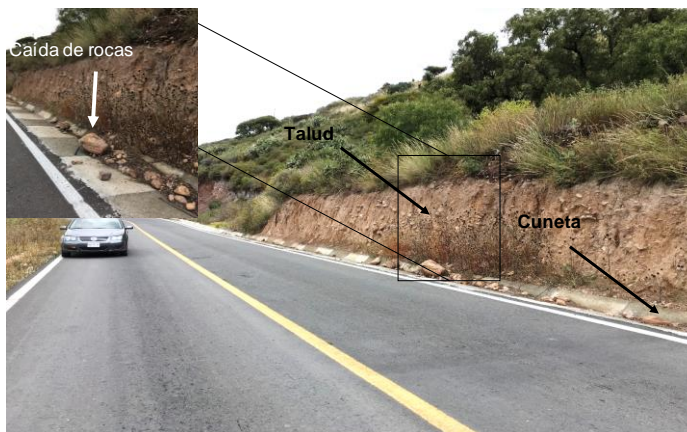
Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación													
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z				
01-nov-16	EP2	EP2I	Pachuca de Soto		29		523770	2227811	2626				
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	<p>En esta vía de comunicación se tienen cortes de talud que varían de 90° inclinación y 3 m de altura, donde aflora una roca con un color de intemperismo marrón, racturada presentando bloques sueltos. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 30 % de fenocristales de plagioclasa de 5 mm a 7 mm, con 15 % de cristales máficos de 1 mm de largo y 1 % de cristales de cuarzo, inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro, debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N25/66°, N82/80° y N235/65°, se caracteriza a la roca como de media compactación y muy fracturada, los bloques sueltos que varían desde los 70 cm hasta los 1 m, en este tramo se tiene como obra de mitigación cuneta al pie del talud, la cual se encuentra en buen estado y no se tienen componentes de carretera.</p>							
Urbanización	> 20 m		< 20 m										
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°		> 40°								
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m		> 3 m								
Tipo de peligro	SI		No										
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos								
Tipo de material en el talud													
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios										
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias									
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales								
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar									
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas									
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava								
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita								
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar								
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado								
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm								
Obra de mitigación				Si	No								
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados								
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado											
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo								
Componentes de carretera				Si	No								
Acotamiento		Fondo											

Anexo 21

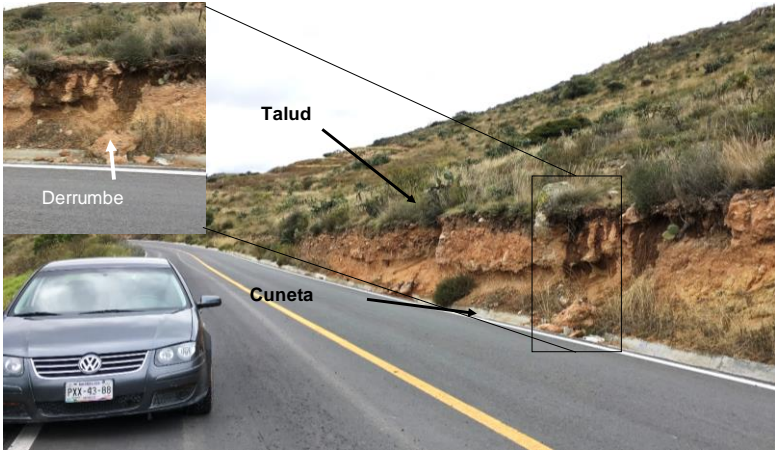
Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2j	Pachuca de Soto	152-200	29		523410	2227480	2626
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
<p>En esta vía de comunicación, se tienen cortes de talud a 90° de inclinación de 4m de altura, en el cual se observa depósitos sedimentarios aluviales de color gris, asociando caída de rocas, estos depósitos se encuentran sin compactar y en general se observan sin cohesión, se tienen cantos de angulosos a redondeados de tamaños variables de composición andesítica, los cuales se encuentran inmersos en una matriz del tamaño de las arenas, se observa una gradación normal de diferentes eventos. Se tiene cunetas al pie del talud como obra de mitigación en los que existen la caída de rocas que varían en el tamaño de los 10 cm a los 20cm, se tiene una cuneta al pie del talud como obra de mitigación se encuentra en general de medio a buen estado, no se tienen componentes de carretera</p>									

Anexo 22

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2k	Pachuca de Soto	203	29		53253	222767	2628
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales	En esta vía de comunicación, se tienen cortes de talud a 83° de inclinación de 3 m de altura, en el cual se observa depósitos sedimentarios de suelos color café, asociando caída de rocas, estos depósitos se encuentran sin compactar y en general se observan sin cohesión, no se observa agrietamiento. Se tienen cunetas al pie del talud como obra de mitigación en las que existen caída de rocas que varían en el tamaño de gravas hasta bloques de 42 cm, se tiene una cuneta al pie del talud como obra de mitigación, las cuales se encuentran en general de medio a buen estado, no se tienen componentes de carretera			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							



Anexo 23

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP2	EP2m	Pachuca de Soto	240	29		52391	222767	2628
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales				
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
									

En esta vía de comunicación, se tienen cortes de talud a 90° de inclinación de 3 m de altura, en el cual se observa depósitos sedimentarios de suelos color café, asociando a pequeños derrubes, estos depósitos se encuentran sin compactar y en general se observan sin cohesión, se observa una gran actividad de las raíces de los arboles. Se tienen cunetas al pie del talud como obra de mitigación en los que existen la caída de rocas que varían en el tamaño de gravas hasta bloques de 50 cm, la cuneta como obra de mitigación se encuentra en general de medio a buen estado, no se tienen otros componentes de carretera

Anexo 24


Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP8	EP8a	Pachuca de Soto	206-213	Zona urbana		525614	2223304	2379
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización	> 20 m		< 20 m						
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°	> 40°					
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m	> 3 m					
Tipo de peligro	Si			No					
Caída	Desplome	Flujo	Deslizamiento	Expansiones					
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias				
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales				
		Aluvión							
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Medio fracturado	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

Esta vía de comunicación tiene urbanización dentro del derecho de vía y en general está situada en un terreno plano, se tienen cortes de talud a 73° de inclinación con una altura de 12 m, existiendo un peligro por derrumbes, el tipo de material que compone el talud son depósitos de jales, las cuales tienen un color de intemperismo gris claro, el material tiene tamaño de arenas finas, se encuentra sin una cohesión y es muy deleznable. Los tamaños de los bloques asociados a los derrumbes son menores a 20 cm, también se observan vestigios de una obra de mitigación del tipo enmallado y concreto lanzado, estos se encuentran en mal estado. La vía presenta un fondo el cual es usado por peatones. Las siguientes fotografías muestran las condiciones en este tramo de carretera: a) La vía de comunicación con un corte de talud de 73° y con un fondo, el cual es usado por peatones, b) Se observa un derrumbe asociado a un una obra de mitigación de enmallado en mal estado, también se observa el concreto lanzado, c) Se observa el mal estado en el que se encuentra el concreto lanzado con fracturamiento, d) Se observa el tamaño de los bloques asociado al derrumbe.

Anexo 25

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP8	EP8b	Pachuca de Soto	221	Zona urbana		526537	222162	2383
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caida	Derrumbe	Flujo	Flujo de lodos	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión		Lacustres				
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / filitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							


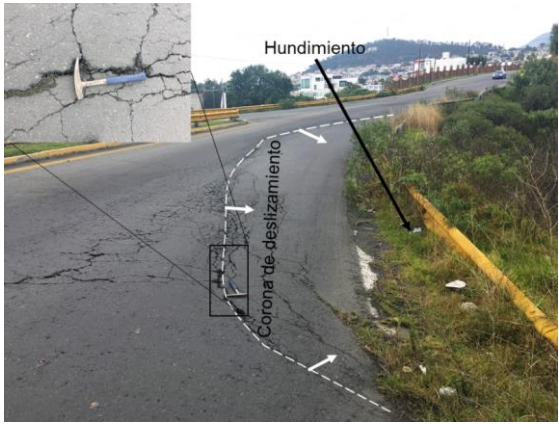
En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.




Anexo 26

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP14	EP14a	Pachuca de Soto	144	Zona urbana		530015	2224717	2445
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización	> 20 m		< 20 m						
Inclinación del talud	0° - 30°		30° - 40°		> 40°				
Altura del talud	< 1 m		1 - 3 m		> 3 m				
Tipo de peligro			SI		No				
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias				
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres		Jales			
			Aluvión						
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Medio fracturado	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, sin cortes de talud, la vía se encuentra en un terreno en general plano, no se observan peligro por procesos de remoción en masa y se tiene cunetas como componente de carretera; sobre un puente se identificó una corona de deslizamiento con orientación de N255 buzando al NW en el cual se observa grietas de tensión y un salto de 5mm sobre el asfalto, la guarnición de la vía ya tiene un hundimiento parcial de 10cm el cual ya se encuentra al nivel del asfalto. El material sobre el cual está construido el puente a la base presenta material no consolidado de color café claro con clastos subredondeados que van de 3 cm a 20 cm depositados en un gradación normal, estos clastos corresponden a una roca del tipo andesita; sobre este material se observa un suelo de color café más claro compuesto por clastos que varían en tamaño de las gravas con una matriz de arenas, en el cual se está desarrollando suelo de color café oscuro, en su conjunto estos materiales componen la ladera y mide 7 m de altura con una inclinación de 42°, para el paso de la corriente fluvial se tiene un puente de 3 m de altura y 2.5 m de ancho.

Anexo 27


Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP14	EP14d	Pachuca de Soto	330	Zona urbana			529729	2225291
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si No						
Caída	Desplome	Flujo de lodos	Flujo	Expansiones					
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos					Depósitos sedimentarios				
Rocas ígneas			Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
									

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.


Anexo 28

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01-nov-16	EP14	EP14b	Pachuca de Soto	223	Zona urbana		530015	2224717	2445
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si	No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.



Anexo 29

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
01/11/2016	EP14	EP14f	Pachuca de Soto	330	Zona urbana		528967	2225356	2521
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			Si		No				
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos					Depósitos sedimentarios				
Rocas ígneas			Rocas metamórficas			Rocas sedimentarias			
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión		Lacustres	Jales			
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos			Lahar				
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
									

En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, no se observaron cortes de talud, el asfalto está situado en un terreno plano, no se observa ningún tipo de peligro por procesos de remoción en masa, no se observa la roca en la que está situada la vía, tampoco se observa ningún componente de carretera.

Anexo 30

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas			
03-nov-16	EP14	EP14d	Pachuca de Soto	340	Zona urbana	X	Y	Z	
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	Notas y descripción			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del Talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			SI	No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos	<p>En esta vía de comunicación se tiene urbanización dentro del derecho de vía con cortes de talud a 85° de inclinación de 1.5 m de altura en la que aflora una roca con un color de intemperismo café claro y marrón, altamente fracturada en la que se observa caída de rocas y bloques sueltos. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con un 35 % de fenocristales de plagioclasas de hasta 3 mm, 5% de cuarzo inmersos en una matriz microcristalina máfica, debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de un origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N195/73°. N270/83° y N45/64°, estas estructuras generan bloques que van desde 20 cm hasta los 65 cm, los cuales se están depositando al pie del talud, donde se tiene una cuneta como obra de mitigación, no se presentan otros componentes de carretera</p>			
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva	Básica	Intermedia	Acida	Lava				
	Intrusiva								
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquistos	Gneis	Marmol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							

Anexo 31

Formato evaluador del peligro por procesos de remoción en masa en las vías de comunicación									
Fecha	Código de estudio	Punto de verificación	Poblado	Foto	Aforo vehicular	Coordenadas	X	Y	Z
04-nov-16	EP14	EP14f	Pachuca de Soto	228-241	Zona urbana			530203	2225346
Nivel de susceptibilidad	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	<p>En esta vía de comunicación no se tiene urbanización dentro del derecho de vía, se observan cortes de talud a 90° de inclinación de 12 m de altura donde aflora una roca con un color de intemperismo gris claro, en la que se observan colapsos y caídas de roca. La roca en muestra de mano se observa con una textura porfídica con 35% de fenocristales de plagioclasas, 15% de cuarzo inmersos en una matriz microcristalina de color oscuro debido a las proporciones de estos minerales y a la textura de esta roca se clasifica como de un origen ígneo extrusivo de composición básica (Andesita) pertenecientes al Grupo Pachuca, se observa una alteración propilitica moderada. Se tomaron datos estructurales, los cuales pertenecen a un fracturamiento con una orientación preferencial de N245/78°, N185/26° y N65/74° y un plano de una falla normal destal de N180/71°, estas estructuras generan bloques de hasta 80cm, no se observan obras de mitigación y se tiene un fondo como componente de carretera.</p>			
Urbanización			> 20 m	< 20 m					
Inclinación del talud			0° - 30°	30° - 40°	> 40°				
Altura del talud			< 1 m	1 - 3 m	> 3 m				
Tipo de peligro			SI	No					
Caída	Derrumbe	Deslizamiento	Flujo	Expansiones	Complejos				
Tipo de material en el talud									
Depósitos volcánicos			Depósitos sedimentarios						
Rocas ígneas		Rocas metamórficas		Rocas sedimentarias					
Depósitos sedimentarios	Suelo	Fluvial	Coluvión Aluvión	Lacustres	Jales				
Depósitos volcánicos	Cenizas	Flujos piroclásticos		Lahar					
Rocas sedimentarias	Calizas	Lutitas	Areniscas	Conglomerado / brechas					
Rocas ígneas	Extrusiva Intrusiva	Básica	Intermedia	Ácida	Lava				
Rocas metamórficas	Pizarras / fillitas	Esquisto	Gneis	Mármol	Cuarcita				
Calidad de la roca			Compacta	Compactación media	Sin compactar				
Nivel de fracturamiento			Fracturado	Fracturación media	Muy fracturado				
Tamaño de bloques			< 20 cm	20 - 70 cm	> 70 cm				
Obra de mitigación				Si	No				
Terraceo	Zanjas de coronación (contracunetas)	Drenes horizontales	Muro de contención	Muro en gavión	Muros anclados				
Enmallado	Cunetas al pie de talud	Concreto lanzado							
Estado de la obra (mantenimiento)			Bueno	Medio	Malo				
Componentes de carretera				Si	No				
Acotamiento		Fondo							
