



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE GEOFÍSICA

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DEL FENÓMENO PERTURBADOR DE
INESTABILIDAD DE LADERAS DEL MUNICIPIO DE HUAUCHINANGO PUEBLA**

Tesina

Para obtener el grado de licenciatura en:

INGENIERÍA GEOFÍSICA

Presenta:

Alfonso Salomón Villalobos Graniel

Director de tesina:

M.C. Julio César González Hernández

Puebla, Puebla

Octubre de 2019



BUAP

Oficio D-SA 2314/2019

C. ALFONSO SALOMÓN VILLALOBOS GRANIEL
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
GEOFÍSICA
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Experiencia Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el reporte denominado:

“ANÁLISIS DE SUCEPTIBILIDAD DEL FENÓMENO PERTURBADOR DE INESTABILIDAD DE LADERAS DEL MUNICIPIO DE HUAUCHINANGO PUEBLA”.

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como asesor al M. C. Julio César González Hernández.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z. a 13 de septiembre de 2019

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

M'FDLH/M'JAJT/BARV
C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo

M. en I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: M.C. Julio César González Hernández, Asesor del reporte de experiencia profesional:

“ANÁLISIS DE SUCEPTIBILIDAD DEL FENÓMENO PERTURBADOR DE INESTABILIDAD DE LADERAS DEL MUNICIPIO DE HUAUCHINANGO PUEBLA”.

Presentada por el C. Alfonso Salomón Villalobos Graniel, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. D-SA 2314/2019 con fecha de emisión 13 de septiembre de 2019, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 22 de octubre de 2019


M. C. Julio César González Hernández
Asesor

M'JCGH/BARV
C.c.p. Archivo

Dedicatoria

A mis padres

Alfonso Villalobos S. y Yolanda E. Graniel G., por su confianza, apoyo y amor

A mis hermanos Gilberto y Yolanda por el cariño que me brindan

A mi hijo Arturo por ser el motor que me impulsa

A mis tíos Edgar y Beatriz por ser pilares importantes en mi vida

“Ora, lege, relege, labora et invenies”

Agradecimientos

A mis padres por la oportunidad que me dieron para poder realizar mis estudios.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por ser mi alma máter.

A la compañía Sistemas de Información Geográfica S. A. de C. V., y a mis amigos Erika, Sheila Judith, Diego, Karina, Juan, y Enrique por compartirme conocimientos, herramientas e información para realizar el presente documento.

Al M. C. Julio C. González Hernández por ser mi director de tesis.

Al M. C. José Serrano Ortiz y al Ing. Manuel Conrado Uribe Arriaga por el tiempo y consejos.

A mis profesores, en especial al Ing. Melesio, base de mis conocimientos, a quienes agradezco infinitamente por brindarme sus enseñanzas y experiencias.

A mis amigos de generación Alejandra, Luz, Karina, Magia, Alan, Héctor, Leonardo, Alberico, y Silverio por los buenos momentos que compartimos en la etapa universitaria.

A mi familia y amigos por el apoyo incondicional.

Índice

<i>Dedicatoria</i>	<i>IV</i>
<i>Agradecimientos</i>	<i>V</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>VIII</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>IX</i>
<i>Resumen</i>	<i>10</i>
<i>Introducción</i>	<i>11</i>
<i>CAPÍTULO I</i>	<i>12</i>
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Alcances	13
1.5 Limitaciones	13
<i>CAPÍTULO II</i>	<i>14</i>
2.1 Localización y descripción del área de estudio	14
<i>CAPÍTULO III</i>	<i>15</i>
3.1 Marco teórico	15
3.1.1 Deslizamientos de ladera	15
3.1.2 Factores condicionantes y desencadenantes	16
3.1.3 Clasificación de los deslizamientos de ladera	17
3.1.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	20
3.1.5 Evaluación Multicriterio (EMC)	22
<i>CAPÍTULO IV</i>	<i>24</i>
4.1 Metodología	24
4.1.1 Evaluación de la susceptibilidad	24
4.1.2 Construcción de jerarquías	24
4.1.3 Relación de factores condicionantes	25
<i>CAPÍTULO V</i>	<i>30</i>
5.1 Cartografía	30
5.1.1 Pendientes	30
5.1.2 Litología	31
5.1.3 Geomorfología	34
5.1.5 Uso de suelo y vegetación	36
5.1.6 Fallas y fracturas	39
5.1.7 Intensidad de cobertura de vegetación	41

<i>CAPÍTULO VII</i>	<i>42</i>
7.1 Resultados	42
<i>CAPÍTULO VIII</i>	<i>44</i>
8.1 Conclusiones	44
8.2 Recomendaciones	45
<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	<i>46</i>
<i>ANEXO A Levantamiento en campo</i>	<i>50</i>
<i>ANEXO B Mapas</i>	<i>54</i>

Lista de figuras

Figura 1 <i>Mapa base topográfico estatal</i>	14
Figura 2. <i>Esquemas de factores de inestabilidad</i>	17
Figura 3. <i>Mecanismos de deslizamientos de ladera</i>	20
Figura 4. <i>Tipos de datos, raster y vectoriales</i>	22
Figura 5. <i>Factores condicionantes pendientes</i>	31
Figura 6. <i>Factores condicionantes litología</i>	33
Figura 7. <i>Factores condicionantes geomorfología</i>	34
Figura 8. <i>Factores condicionantes edafología</i>	36
Figura 9. <i>Factores condicionantes uso de suelo</i>	38
Figura 10. <i>Factores condicionantes fallas y fracturas</i>	40
Figura 11. <i>Factores condicionantes intensidad de vegetación</i>	41
Figura 12. <i>Mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas</i>	43

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Escala de velocidades de los movimientos de ladera</i>	15
<i>Tabla 2. Escala de comparación pareada</i>	25
<i>Tabla 3. Matriz de comparación</i>	26
<i>Tabla 4. Formato para la estimación de la susceptibilidad</i>	28
<i>Tabla 5. Clasificación de intervalos de pendientes</i>	31

Resumen

La elaboración del análisis de susceptibilidad concerniente al fenómeno perturbador de inestabilidad de laderas del municipio de Huauchinango, a partir de análisis de información geoespacial bajo un Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante herramientas de evaluación multicriterio (EMC), facilita la evaluación de la susceptibilidad del municipio ante posibles deslizamientos, permitiendo conocer e identificar las amenazas naturales ante las que está expuesta la población, proporcionando un panorama amplio de cualquier posible contingencia.

El presente estudio permitió generar un mapa cartográfico en donde se representan los diversos índices de susceptibilidad de acuerdo a una escala cromática establecida por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2001). De esta manera se identificaron las zonas más propensas a sufrir deslizamientos dentro del municipio, determinando que el índice que predomina corresponde a una alta susceptibilidad y que representa el 60.92 % de la extensión municipal, ocupando un área de 152.50 km².

El mapa de índice de susceptibilidad constituye un instrumento en la toma de decisiones pertinentes para salvaguardar a la población y su patrimonio, de tal manera que el estado en conjunto con el municipio posean herramientas firmes que ayudarán a regular y mejorar acciones de planeación y ordenamiento territorial para el desarrollo sustentable de los asentamientos humanos en Huauchinango.

Introducción

La presente tesina es el resultado de parte del trabajo realizado en la compañía Sistemas de Información Geográfica S. A. de C. V. (SIGSA) para el desarrollo de los Atlas de Riesgos del estado de Puebla, quien facilitó herramientas e información para el desarrollo de este escrito, cabe mencionar que las figuras van numeradas de acuerdo a su aparición respecto a la tesina, omitiéndose algunas que no fueron de interés del documento original, por lo que se debe hacer caso omiso a la numeración incluida en las figuras de la cartografía, de igual manera, para una mejor visualización de la cartografía se recomienda ver la sección de **ANEXO B**.

Partiendo de los datos históricos, se sabe que en el estado de Puebla muchos de sus municipios son amenazados año con año por diversos fenómenos naturales. El Sistema Nacional de Protección Civil ha adoptado la clasificación basada en el tipo de agente perturbador que los produce. Se distinguen así las amenazas de origen geológico e hidrometeorológico.

Los de origen geológico se centran en deslizamiento de laderas, sismos y erupciones volcánicas, por otra parte, los fenómenos de origen hidrometeorológicos corresponden a inundaciones, tormentas de granizo y temperaturas extremas.

El fenómeno perturbador identificado de mayor impacto en el municipio de Huauchinango es el de inestabilidad de laderas, puesto que se encuentra catalogado por el CENAPRED en su Atlas Nacional de Riesgos con un grado de Susceptibilidad "Alto" y "Muy Alto". Tomando como referencia este criterio, se realizó el estudio de manera local para el municipio con la finalidad de detallar más la información.

CAPÍTULO I

1.1 Planteamiento del problema

La frecuencia e intensidad de los desastres provocados por fenómenos naturales impactan de manera directa sobre la población, economía y los ecosistemas. La zona de Huauchinango se caracteriza por tener condiciones geomorfológicas y geológicas favorables a deslizamientos, e históricamente presenta importantes eventos en procesos de remoción en masas.

1.2 Justificación

En las concepciones actuales de Protección Civil se reconoce que la manera más eficaz y económica de mitigar los desastres es la prevención y planificación de las respuesta ante una emergencia; siendo esto el significado y utilidad del análisis de fenómenos geológicos municipal, para coadyuvar a contar con un sentido de prevención, de estudios de investigación de amenazas para que en medida de lo posible se puedan evitar o mitigar los efectos destructivos de la naturaleza.

La presente tesina no solo contribuye al entendimiento de las condiciones actuales del municipio de Huauchinango, sino que constituye una herramienta de análisis de zonas susceptibles a un deslizamiento que sirve para establecer estrategias y programas de largo alcance enfocados a prevenir y reducir sus efectos, así, como para la toma de decisiones en el necesario manejo de alguna emergencia.

1.3 Objetivos

Objetivo general

Generar información geoespacial del municipio de Huauchinango para obtener un mapa de índice de susceptibilidad de deslizamientos a partir de técnicas de EMC que permitan prevenir y mitigar posibles afectaciones y pérdidas tanto materiales como humanas.

Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis basado en el método de evaluación multicriterio de los factores condicionantes concernientes al fenómeno perturbador de inestabilidad de laderas

presente en el municipio de Huauchinango, con la finalidad de tener un panorama general y actualizado de las zonas que presenten mayor afectación.

- Realizar estudios de campo a partir de levantamientos geológicos para validar la capa final de susceptibilidad.
- Localizar las zonas propensas a sufrir deslizamientos a partir del análisis de la capa de susceptibilidad para identificar las áreas de asentamientos humanos que requieran ser monitoreados.

1.4 Alcances

La generación de un mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas permite definir políticas de desarrollo urbano, para prevenir y evitar asentamientos humanos en sitios catalogados como inadecuados y representen cierta amenaza.

Un documento de esta naturaleza es solo el principio de una acción permanente de actualización y revisión, que se enriquecerá con los avances de investigación en la materia, pero también de manera fundamental, con la experiencia y colaboración de todos los sectores involucrados que tendrán la finalidad de salvaguardar la integridad física de la población y sus bienes.

1.5 Limitaciones

Los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa, si bien identifican áreas donde se puede generar potencialmente tales procesos, en ellos no figura la totalidad de zonas a ser afectadas, ni predicen cuando ocurrirán los procesos analizados.

El mapa de susceptibilidad se debe emplear como una guía para las autoridades correspondientes del municipio, que muestra las zonas en las que existe una posible inestabilidad del terreno, de igual manera, se debe reconocer que los límites de susceptibilidad señalados deben considerarse referenciales y no como valores absolutos.

CAPÍTULO III

3.1 Marco teórico

3.1.1 Deslizamientos de ladera

El deslizamiento de ladera es un término general que implica el movimiento talud abajo de rocas, suelo o materia orgánica por acción de la gravedad (Cruden, 1991), tal como se puede apreciar en la **Tabla 1**, algunos movimientos pueden tomar segundos mientras que otros pueden ocurrir en lapsos de tiempo considerable.

Tabla 1. Escala de velocidades de los movimientos de ladera

Clase y descripción	Probable significado destructivo	Velocidad
7. Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia; edificios destruidos por el impacto de material desplazado	> 5 m/s
6. Muy rápido	Perdida de vidas. Gran destrucción	3 m/min – 5 m/s
5 Rápido	Estructuras destruidas, se puede evacuar	1.8 m /h – 3 m/min
4. Moderado	Estructuras bien construidas pueden sobrevivir	13 m /mes – 1.8 m /h
3. Lento	Si se da mantenimiento constante a estructuras, pueden sobrevivir	1.6 mm/año – 13 m /mes
2. Muy lento	Estructuras dañadas por agrietamientos pueden ser reparadas	16 mm/ año – 1.6 mm/año
1 Extremadamente lento	Imperceptible, no hay daño a estructuras	< 16 mm / año

Fuente: WP/WLI [International Geotechnical Societies's UNESCO Working Party for World Landslide Inventory] (1995). Velocity classes for landslides, Bulletin International Association of Engineering Geology.

3.1.2 Factores condicionantes y desencadenantes

El que una ladera se mantenga estable o inestable dependerá de múltiples factores que en conjunto pueden representar una amenaza inminente a las comunidades y/o poblaciones cercanas a éstas (CENAPRED, 2001). De acuerdo a Martínez y Balaguer (1988) y Cuanalo *et al.*, (2011), los factores que controlan la estabilidad del terreno se dividen en dos tipos: internos (condicionantes) y externos (desencadenantes) y tienen que ver directamente con los esfuerzos actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de deslizamiento.

Los primeros están relacionados con las características físicas de la ladera, así como de los materiales térreos que la componen (pendiente, litología, geología, topografía), mientras que los segundos se componen de los agentes que las perturban (precipitaciones extraordinarias, sismos, vulcanismo).

La intervención de forma conjunta de dichos factores alteran directamente el equilibrio de laderas y facilitan deslizamientos y desprendimientos (Ojeda *et al.*, 2007 y Cruz, 2015). En otras palabras, los factores externos ocasionan un incremento de las fuerzas actuantes que se dan en la ladera, mientras que los factores internos, disminuyen la concentración de fuerzas resistentes (**Figura 2**).

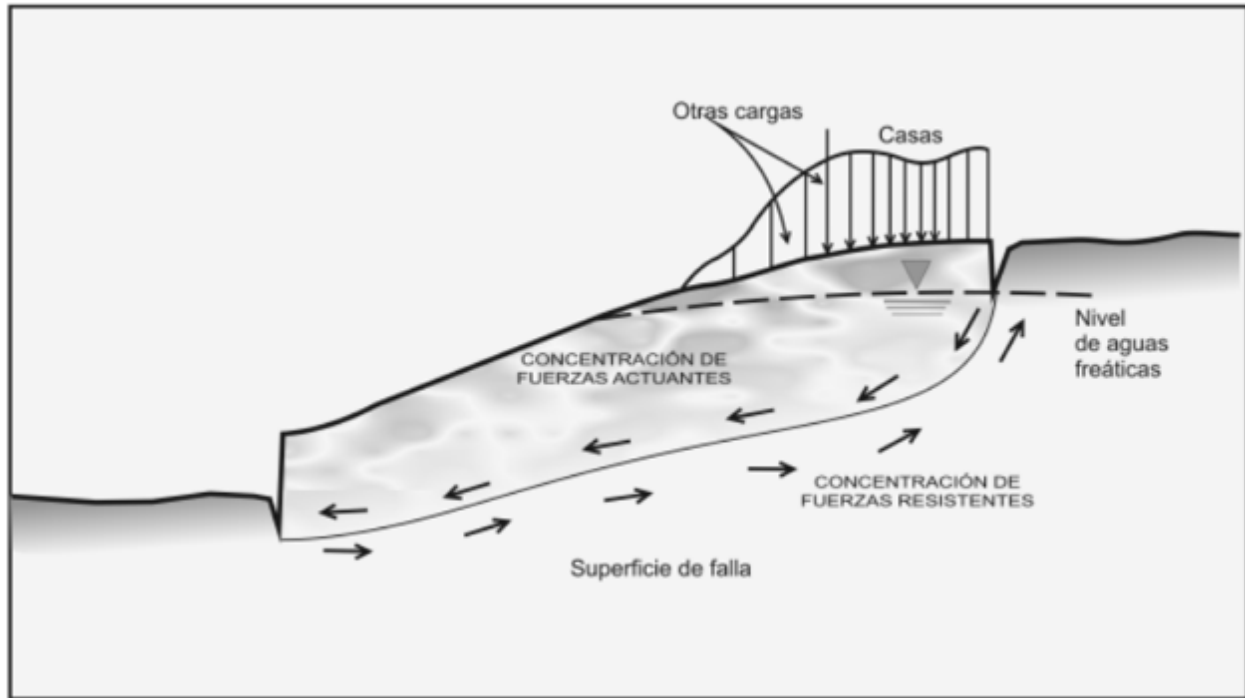


Figura 2. Esquemas de factores de inestabilidad. Fuente: CENAPRED, 2001.

3.1.3 Clasificación de los deslizamientos de ladera

Los términos utilizados para categorizar los deslizamientos de ladera siguen la clasificación de Varnes (1978) al enfatizar en el tipo de movimiento y el tipo de material, de tal manera que se debe describir el material desplazado en el deslizamiento de tierra antes de que fuera desplazado. Por ejemplo, el término caída de rocas, implica que la masa de desplazamiento era una masa de rocas al inicio del deslizamiento de tierra.

En consecuencia, cualquier deslizamiento de tierra puede clasificarse y describirse mediante dos sustantivos: el primero describe el tipo de movimiento y el segundo describe el material (e.g., derrumbes de rocas, flujo de escombros).

Sobre la clasificación de Varnes (1978), los tipos de movimientos se han dividido en cinco: caídos, derrumbes, deslizamientos, expansiones y flujos, mientras que los tipos de materiales son: roca y suelo.

3.1.3.1 Tipos de materiales

Según Shroder (1971) y Vames (1978), el material contenido en un deslizamiento de tierra puede describirse como:

- a) **Roca:** Se refiere a una masa dura o firme que estaba intacta y en su lugar natural antes del inicio del movimiento.
- b) **Suelo:** Consiste en un agregado de partículas sólidas, generalmente de minerales y rocas, que fueron transportadas o formadas por el desgaste de la roca en el lugar. A su vez, se subdivide en tierra y escombros.
 - **Tierra:** Es el material en el que el 80 % o más de las partículas son más pequeñas que 2 mm.
 - **Escombros:** Se constituyen entre un 20 a 80 % partículas mayores a 2 mm, y el resto son menores de 2 mm.

3.1.3.2 Tipos de movimientos

El tipo de movimiento describe los mecanismos internos de cómo es desplazada la masa de material (**Figura 3**). Se distinguen los siguientes términos:

- a) **Caídos:** Desprendimiento de tierra o roca de una pendiente empinada, el material desciende principalmente por el aire al caer, rebotar o rodar, por lo que el movimiento es muy rápido a extremadamente rápido.
- b) **Derrumbes:** Un derrumbe se reconoce como la rotación hacia delante de una pendiente de una masa de tierra o roca alrededor de un punto o eje debajo del centro de gravedad de la masa desplazada.
- c) **Deslizamientos:** Movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, se produce en superficies de ruptura o en zonas relativamente delgadas donde existen intensos esfuerzos cortantes, se subdividen en:
 1. Rotacionales. El deslizamiento se mueve sobre una superficie que es curva y cóncava, por lo cual el terreno experimenta un giro en torno al eje que se encuentre situado sobre el centro de gravedad de la masa deslizada.

2. Traslacionales. La masa se desplaza sobre una superficie de ruptura plana u ondulada, deslizándose sobre la superficie de la ladera. Este tipo de deslizamiento puede avanzar distancias considerables si la superficie de ruptura está suficientemente inclinada.
- d) **Extensión lateral:** Movimientos repentinos de masas térreas que ocurren en pendientes muy suaves, que dan como resultado desplazamientos casi horizontales. Con frecuencia son causados por licuefacción.
- e) **Flujos:** Movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas ladera abajo, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos. Se distinguen los siguientes:
1. Flujos de lodo. Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50 % de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
 2. Avalancha de escombros. Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan partículas sueltas, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua atrapados, formando una masa viscosa o francamente fluida que se mueve pendiente abajo. También se conocen como flujos de escombros.
 3. Lahar. Flujo de suelos o detritos que se originan en el talud de un volcán, generalmente accionado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino, actividad volcánica y/o por la ocurrencia de sismos.

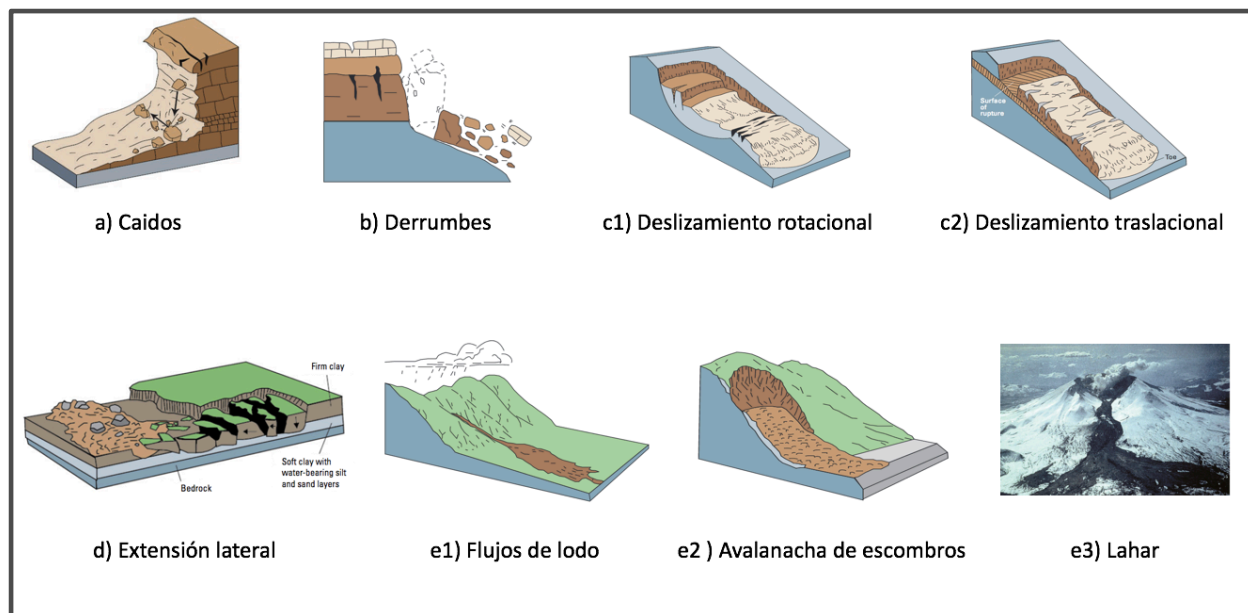


Figura 3. Mecanismos de deslizamientos de ladera. Fuente: Modificado de Highland y Bobrowsky, 2008.

3.1.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG es una herramienta diseñada para soportar una amplia gama de técnicas de análisis espacial, incluyendo procesos para crear nuevas clases de objetos espaciales, analizar las ubicaciones y atributos de los objetos así como las relaciones entre ellos (Mark *et al.*, 1989). Por otro lado, Smith *et al.* (1987) definen un SIG como "un sistema de base de datos en el que la mayoría de los datos están indexados espacialmente, y sobre el cual opera un conjunto de procedimientos para responder consultas sobre entidades espaciales en la base de datos".

Estos sistemas se ocupan del manejo de datos geográficos, que son aquellos datos espaciales que resultan de la observación o medición de fenómenos terrestres, los cuales pueden ser referenciados individual o colectivamente respecto a una ubicación.

Los adelantos tecnológicos en computación, cartografía y fotogrametría en las décadas de 1940 y 1950 sentaron las bases para el desarrollo del SIG, que comenzó en la década de 1960. El marco conceptual dentro del cual se implementaron los SIG iniciales involucró a personas de una gran variedad de disciplinas, quienes se dieron cuenta de la necesidad

de que las computadoras integraran, manipularan y analizaran datos de diversas fuentes, los cuales proporcionarían resultados que podrían utilizarse como parte de una decisión (Smith *et al.*, 1987).

Como resultado de los avances en tecnología informática y el aumento en la disponibilidad de datos de referencia espacial en formato digital, se han desarrollado una amplia variedad de SIG, principalmente para la planificación del uso del suelo y la gestión de los recursos naturales en los niveles de gobierno urbano, regional, estatal y nacional, pero también, para solicitudes de servicios públicos y corporaciones privadas.

La mayoría de estos sistemas se basan en datos de mapas existentes o en datos que pueden procesarse fácilmente para proporcionar la información de ubicación requerida (Shelton & Estes, 1979). Los dos tipos principales de datos que deben considerarse son datos ráster de sensores remotos en satélites y aeronaves y datos vectoriales de mapas.

Los datos ráster, consisten en matrices bidimensionales de números, cada elemento de la matriz corresponde a un píxel de imagen, por otro lado, los datos vectoriales, que comprenden puntos, líneas y polígonos, se construyen a partir de conjuntos de pares de coordenadas (x, y), junto con los códigos de atributo asociados (**Figura 4**).

La integración de estos dos formularios de datos generalmente se logra ya sea convirtiendo los datos vectoriales a formato ráster y trabajando con los conjuntos de datos ráster combinados, o viceversa (Mason, 1988). El poder del SIG proviene de su capacidad de manipular objetos espaciales y sus atributos para generar nueva información que no se almacena explícitamente en la base de datos.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó ArcMap® en su versión 10.5, que es la aplicación principal de la paquetería ArcGIS® propiedad de la compañía ESRI. ArcMap® permite visualizar y explorar información tanto vectorial como raster, del mismo modo, permite asignar símbolos y crear diseños de mapa para imprimir o publicar.

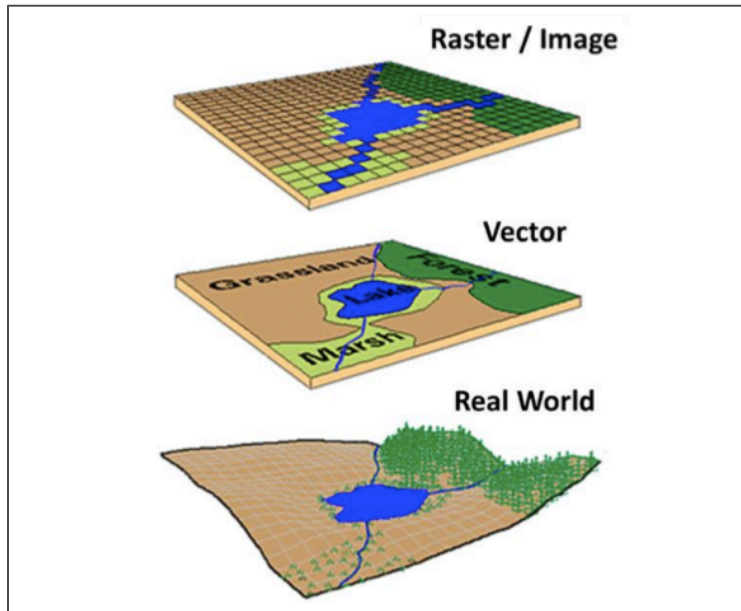


Figura 4. Tipos de datos, raster y vectoriales. Fuente: INEGI, 2014.

3.1.5 Evaluación Multicriterio (EMC)

De acuerdo a diferentes autores (Pullar, 1999 y Gómez y Barredo, 2005) cuando se consideran más de un criterio en la toma de decisiones, es preciso emplear técnicas como la evaluación multicriterio (EMC) que permiten estudiar un número finito de criterios con múltiples alternativas, jerarquizándolas de acuerdo a su grado de conveniencia.

En esencia, el método EMC es una herramienta analítica que permite la clasificación explícita de criterios tangibles e intangibles entre sí con el fin de seleccionar prioridades.

El proceso implica estructurar un problema a partir de jerarquías de decisiones que incluyan los criterios implicados en la toma de decisiones (Ouma *et al.*, 2011). En este caso, quien toma las decisiones elige una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión de acuerdo a la contribución que tenga sobre cada criterio, pudiendo expresarse a través de una matriz cuadrada **A**.

$$A = (a_{ij}) \quad (1)$$

Donde a_{ij} es el valor numérico de las comparaciones entre los criterios i y j a evaluar.

Dentro del método de EMC existen diferentes procedimientos para resolver problemas que involucren el análisis de criterios, entre los que se encuentran: lógica difusa, sumatoria lineal ponderada (SLP), análisis de concordancia, de jerarquías analíticas (AHP), y el método de la Sumatoria Lineal Ponderada ordenada (OWA), (Mendes y Satoro, 2001). En el presente estudio, se utilizó el procedimiento de las Jerarquías Analíticas (AHP) propuesto por Saaty (1980) y la Suma Lineal Ponderada (OWA).

El primero consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico. En este caso, el analista elige una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión de acuerdo a la contribución que tenga sobre cada criterio. De tal manera que en la matriz **A** se compara la importancia de cada uno de los criterios con los demás (Saaty, 1980), es decir, enfrentar todos los criterios de dos en dos, con la finalidad de obtener los valores de entrada de la matriz de comparación.

En el procedimiento OWA, los factores de evaluación son combinados multiplicando cada valor de referencia para un intervalo o categoría por un factor de peso que expresa la importancia de cada factor (Lamelas *et al.*, 2012 y Marinoni, 2005).

Considerando a Saaty, (2008) y Lamelas (2007), algunas de las ventajas que presentan los métodos AHP y OWA son:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite desglosar y analizar un problema por partes.
- Permite la participación de diferentes personas o grupos de interés y genera un consenso.
- Permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.
- Fácil implementación en sistemas de información geográfica.

CAPÍTULO IV

4.1 Metodología

Esta tesina se ha realizado con base en los lineamientos y criterios para la identificación de las zonas susceptibles siguiendo las bases publicadas por la Secretaria de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU, 2016) y el CENAPRED (2001).

4.1.1 Evaluación de la susceptibilidad

La evaluación de la susceptibilidad se realizó en dos etapas, la primera de ellas consistió en trabajo en gabinete para procesar los datos, y la segunda en campo con levantamiento a nivel municipal en puntos estratégicos para obtener un estudio más completo y robusto.

Dentro de la primera etapa se aplicó técnicas de EMC, la cual comprende la evaluación y combinación de criterios aplicando reglas de decisión, basadas en el análisis y jerarquización de factores (Saaty, 1980, Barredo, 1996, Maximiliano *et al.* 2015) permitiendo dar valores numéricos a las preferencias dadas por el analista. Para el municipio se seleccionaron los siguientes factores condicionantes:

1. Clasificación de vegetación y uso de suelo
2. Edafología
3. Fallas y fracturas
4. Geomorfología
5. Intensidad de vegetación
6. Litología
7. Pendientes

4.1.2 Construcción de jerarquías

Una vez establecidos los factores que condicionan un fenómeno de inestabilidad de laderas, se estructuró una matriz de comparación, ordenándose de manera jerárquica los factores de acuerdo a la importancia relativa de los elementos iniciando desde la parte superior hacia la inferior para determinar las filas, siguiendo el mismo orden jerárquico para las columnas empezando de izquierda a derecha.

4.1.3 Relación de factores condicionantes

El proceso de Saaty (1980) permite asignar valores numéricos a las preferencias dadas por el analista, logrando determinar el peso de preferencia del usuario en un par enfrentado. El objetivo de la ponderación es el de llegar a expresar en términos cuantitativos, la importancia de los distintos elementos, si bien, es frecuente asignar pesos a los criterios, la especificación de los mismos es una cuestión en la que no existe un método generalmente aceptado para su determinación pudiéndose considerar este proceso como un aspecto que puede crear controversias acerca de la asignación de dichos pesos (Barredo, 1996).

Esta ponderación o emisión de juicios son la base de la EMC y fundamentalmente son establecidos por información científica y técnica y por la experiencia y conocimientos del analista.

Para estas comparaciones, Saaty (1980) estableció la escala numérica que va desde el 1 hasta el 4 (**Tabla 2**) para calificar las preferencias relativas de dos elementos de la jerarquía.

Tabla 2. Escala de comparación pareada

Intensidad de importancia	Descripción
1	Igual importancia
2	Moderada importancia de un factor sobre el otro
3	Fuerte importancia
4	Muy fuerte importancia

Fuente: Saaty, T. (1980). The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill.

A partir de la escala de Saaty (1980), se completa la matriz de comparación (**1**), la cual se puede expresar como:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde a_{ij} es el elemento (i,j) de \mathbf{A} , para $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y $j = 1, 2, 3, \dots, n$. Decimos que \mathbf{A} es una matriz de comparaciones pareadas de n alternativas si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1, pues se está comparando la alternativa consigo misma.

El método de llenado de la matriz inicia al comparar los criterios filas contra los criterios columnas, naturalmente los valores de la diagonal principal estarán representados por un valor de 1, por lo que el siguiente paso será llenar la parte del triángulo superior derecho, mientras que el triángulo inferior de la diagonal principal quedará representado por el inverso de los valores sobre la diagonal superior. Dada esta propiedad recíproca, solo se necesitan $n(n-1)/2$ comparaciones reales para una matriz con n numero de factores.

Los valores asignados en la matriz se determinaron a partir de la **Tabla 2**, quedando de la siguiente manera:

Tabla 3. Matriz de comparación

	P	L	G	E	Cvs	Ff	I
Pendientes	1	3	3	3	3	4	3
Litología	1/3	1	2	2	2	2	2
Geomorfología	1/3	1/2	1	2	2	2	2
Edafología	1/3	1/2	1/2	1	2	1	2
Clasificación de vegetación y uso de suelo	1/3	1/2	1/2	1/2	1	2	2
Fallas y fracturas	1/4	1/2	1/2	1	1/2	1	2

Intensidad de cobertura de vegetación	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Fuente: Elaboración propia

Una vez completada la matriz de comparaciones **A** se determina el eigenvector principal **w** (Saaty, 2003), el cual supone el peso obtenido para cada factor. El eigenvector **w** es un vector columna que se puede lograr calculando un conjunto de pesos:

$$\mathbf{w}_j = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_n] \quad (3)$$

El cálculo de los pesos implica dos pasos:

- 1) Las entradas en la matriz **A** deben estar normalizadas (es decir, cada elemento de la matriz se divide por la suma total de su columna) a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada **N**.

Para **N**, cada elemento de entrada queda representado por \bar{a}_{ij} y se obtiene de:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (4)$$

- 2) El valor de los pesos normalizados del \mathbf{w}_j se calcula dividiendo la suma de las entradas en cada fila de la matriz normalizada **N** entre el número de elementos en esa fila.

$$w_j = \frac{\sum_{k=1}^n \bar{a}_{ik}}{n} \quad (5)$$

Posteriormente, para calcular el atributo relativo de cada clase que conforma cada factor (e.g. para litología, los tipos de roca; para pendientes, los grados de inclinación) se utilizó como base, el formato para la estimación de la susceptibilidad, elaborado por el CENAPRED (2001).

Tabla 4. Formato para la estimación de la susceptibilidad

Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo
Pendientes	> 45 ^a	2
	35° - 45°	1.8
	25° - 35°	1.4
	15° - 25°	1
Tipo de suelos o rocas	Suelos granulares medianamente compactos a sueltos. Suelos que se reblandecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas	1.5 – 2.5
	Rocas metamórficas (lutitas, pizarras y esquistos) de poco a muy intemperizadas	1.2 – 2
	Suelos arcillosos consistentes o arena limosos compactos	0.5 – 1
	Rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, etc.)	0.3 – 0.6
	Espesor de capa de suelo menor a 5 m	0.5
	Espesor de la capa de suelo de 4 a 10 m	1
	Espesor de la capa de suelo de 9 a 15 m	1.4
	Espesor de la capa de suelo de 14 a 20	1.8
Vegetación y uso de tierra	Zona urbana	2
	Cultivos anuales	1.5
	Vegetación intensa	0
	Vegetación moderada	0.8
	Área deforestada	2

Fuente: CENAPRED (2001). Inestabilidad de Laderas, Serie Fascículos (2 ed.). México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

El último paso del método de EMC es obtener el índice de susceptibilidad para cada factor realizando la suma lineal ponderada empleando la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (6)$$

Donde:

I = índice de susceptibilidad

w_j = peso del factor

x_{ij} = peso de la categoría del factor

n = número de categorías

Finalmente, para generar el mapa de susceptibilidad se utilizó el programa ArcMap® versión 10.5 de la paquetería ArcGis®. Una vez obtenido el mapa final, se procedió a cuantificar los datos con la escala que marca el CENAPRED (2001) de susceptibilidad (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto).

CAPÍTULO V

5.1 Cartografía

La información temática de los mapas de litología, fallas y fracturas, e intensidad de vegetación provienen de capas detalladas a partir de imágenes satelitales con una resolución de ± 10 m a través de SIG tomando como base información consultada del Servicio Geológico Mexicano escalas 1:50, 000 y 1:250, 000, logrando mejorar la escala de representación hasta 1:10, 000. En la representación cartográfica de los mapas temáticos geomorfología, uso de suelo y vegetación y edafología, se utilizó información actualizada del Instituto Nacional de Estadística y Geografía en escalas 1:250, 000 y 1:1, 000, 000.

La capa de pendientes fue generada a partir de información propia obtenida de vuelos fotogramétricos del año 2017 y 2018 que ayudaron a dar mayor detalle y calidad a los datos. A diferencia de las escalas que se pueden encontrar en fuentes de uso público, ésta cartografía presenta una escala de 1: 5, 000, con lo que se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) con equidistancias verticales a cada 5 metros.

5.1.1 Pendientes

La pendiente como factor condicionante es un parámetro importante en la evaluación de todo tipo de proceso de movimiento en masa, por ello, diversos autores consideran a esta variable como fundamental en el análisis de susceptibilidad (Restrepo & Velázquez, 1997; Mora & Vahrson, 1994; Van Westen & Terlien, 1996).

Como parte del análisis se generó cartografía escala 1:5, 000 con curvas de nivel cada 5 metros (**Figura 5**), del cual se confeccionó el mapa de pendientes por grados, las cuales reclasificadas en cuatro categorías de acuerdo con el criterio de CENAPRED para el análisis de susceptibilidad por inestabilidad de laderas (**Tabla 5**).

De acuerdo a la clasificación de las pendientes, las de mayor presencia que tiene el municipio corresponde al intervalo va de 16° a 30° con un 35.48 % de ocupación territorial, abarcando 88.94 km². En un área de 81. 24 km² (32.40 %) se registran pendientes de 0° a 15° .

Las pendientes de 31° a 45° se encuentran en menor proporción (24.92 %) en zonas donde el relieve es abrupto en partes del Norte, Oeste centro Este y Sureste del municipio dentro de un área de 62.49 km². Y las pendientes mayores de 45° se observan en el Norte, Oeste, Este y Sur del territorio dentro de un área de 18.00 km², es decir, ocupa el 7.18 % del territorio.

Tabla 5. Clasificación de intervalos de pendientes

Intervalo de pendientes
0° - 15°
16° - 30°
31° - 45°
> 45°

Fuente: CENAPRED, 2001

5.1.2 Litología

La litología es una de las principales variables ambientales que intervienen en la inestabilidad del terreno. Los tipos de rocas determinan en muchos casos la facilidad con que la superficie se degrada por la acción de la atmósfera o se desliza por algún otro factor externo. De acuerdo con Capra *et al.* (2003), resulta evidente como las características del tipo de suelo y/o roca determinan el tipo de fenómeno de remoción en masa. La litología que corresponde al municipio, se describe a continuación:

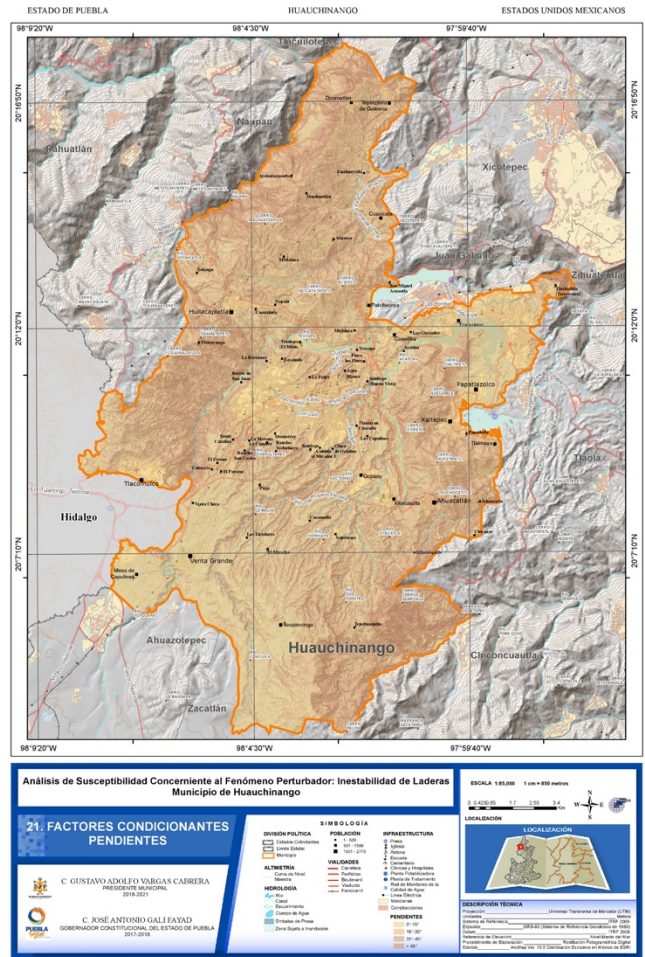


Figura 5. Factores condicionantes pendientes

Fuente: Elaboración propia con cartografía generada escala 1:5, 000 del año 2017

- **Aluvial.** Corresponden a son depósitos transportados por el agua en movimiento y depositados cuando la velocidad del agua ha disminuido; estos materiales pueden ser de origen fluvial o lacustre y pueden contener partículas finas, gruesas o entremezcladas. Ocupa 1.56 km² (0.62 %) y se encuentra al Noreste del municipio cercano a los cuerpos de agua presentes en esa zona.
- **Arenisca - Limolita.** Es la composición de dos rocas sedimentarias, que en particular presentan su constitución por los mismos minerales, pero en sus variaciones de granos cambian en tamaño, estas rocas proceden de la cementación y compactación de sus partículas, se encuentra sobre una extensión total de 17.17 km² (6.86 %), localizada al Noroeste del municipio.
- **Caliza - Lutita.** Asociación de rocas donde predomina la caliza, la cual esta constituida esencialmente por rocas carbonatadas, mientras que la lutita esta constituida por material terrígeno muy fino (arcillas) 1/256 mm. Abarca 41.06 km² de la extensión municipal (16.40 %). Situándose al Noreste al Noroeste del municipio.
- **Caliza - Marga.** Agrupación de rocas sedimentarias en donde predomina la caliza, mientras que la marga esta constituida por una mezcla proporcional de carbonato de calcio y minerales de arcilla (50 % y 50 %), ocupa una superficie de 2.47 km² (0.98 %). Se distribuye al Noreste en pequeñas porciones dentro del municipio.
- **Lutita - Arenisca.** Asociación de dos de las rocas más finas que existen. La primera esta constituida de material arcilloso, mientras que la segunda es arenosa, se presenta en un área total de 11.75 km² (4.69 %). Este tipo se presenta al Noroeste del municipio.
- **Lutita - Caliza.** Constituye una intercalación de dos rocas sedimentarias, se emplazan sobre una superficie de 22.77 km², equivalente al 9.10 % de la extensión total territorial al Noroeste.
- **Lutita - Limolita.** Asociación de sedimentos constituidos por material terrígeno muy fino entre 1/256 y 1/16 de mm, principalmente: cuarzo, plagioclasa y algunas micas, ocupa un área de 6.53 km² (2.61 %). Esta se localiza al Noroeste del territorio.
- **Lutita - Marga.** Agrupación descrita anteriormente, en cuyo caso predomina la lutita. Abarca un área de 1.94 km² (0.77 %), encontrándose al centro - Este del municipio.

siendo la de mayor extensión desde la parte central hacia el Sur del municipio con una superficie de 159.30 km², equivalente al 63.63 %.

- Sierra volcánica de laderas escarpadas. Este sistema coincide mucho con la anterior, aunque la diferencia se encuentra que el elemento sobresaliente del relieve es que la porción de la superficie terrestre se encuentra con pendientes abruptas y dentro del municipio de Huauchinango corresponde a la menor superficie con apenas 0.68 km² que equivalen al 0.27 % del territorio municipal.

El resto de la superficie faltante corresponde a los cuerpos de agua que integra el municipio con 1.35 %.

5.1.4. Edafología

El municipio de Huauchinango, está constituido principalmente por las siguientes unidades de suelo (**Figura 8**), que de acuerdo a la World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2007) presenta las siguientes características:

- Andosol (T). Suelos de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza, generalmente de colores oscuros, con una alta capacidad de retención de humedad. Ocupa un área total de 89.30 km² (35.67%).
- Cambisol (B). Estos suelos son jóvenes poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en las zonas áridas. Dentro del municipio representa el 5.8 % del territorio, equivalente a 14.52 km².
- Durisol (DU). Están asociados con superficies antiguas en ambientes áridos y semiáridos y acomodan suelos muy someros a moderadamente profundos. Ocupa una pequeña cobertura de 0.22 km² lo que representa el 0.09 %.
- Luvisol (L). Estos suelos se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas, cuenta con una vegetación generalmente de bosque o selva y se caracteriza por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Frecuentemente son de color rojo,

- Agricultura de temporal anual y permanente: Utilizan agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola, por lo que su definición se basa principalmente en la manera de cómo se realiza la aplicación del agua, por ejemplo, la aspersión, goteo, o cualquier otra técnica, es el caso del agua rodada. Se encuentra distribuido al Noreste y Suroeste con una superficie total de 9.97 km² (3.98 %).
- Agricultura de temporal anual: Posee como característica principal un suministro de agua por lluvia, y presenta una duración igual o menor a un año. Este tipo se dispersa al centro del municipio con un área de 2.89 km² que corresponde a 1.15 %.
- Bosque de Pino: Comunidades vegetales que se localizan en las cadenas montañosas de todo el país. Abarcando un área de 46.13 km² equivalente a 18.43 % distribuido de forma dispersa desde el Noreste, centro y Suroeste.
- Bosque de Pino – Encino: Este tipo de bosque es el ecosistema que alberga la mayor diversidad de especies de flora y fauna, algunos de sus elementos característicos de estos bosques son la fauna emblemática de México como el Quetzal y Pavón, mismos que se encuentran en peligro de extinción, además de varias especies de colibríes. Esta clasificación ocupa un área de 13.69 km² (5.46 %), predomina al Noroeste.
- Bosque mesófilo de montaña: Fase sucesional secundaria de la vegetación de bosque de Pino con predominancia de arbustos. Puede ser sustituida o no por una fase arbórea. Cubre una extensión de 24.34 km² que equivale a 9.72 % del total del territorio, concentrándose la mayor parte al Noroeste y parte del centro municipal.
- Cuerpo de agua: Son las extensiones de agua que se encuentran por la superficie del municipio. Cubren una extensión de 2.02 km² (0.81 %) y se localiza al Noreste.
- Pastizal cultivado: Se introduce por medio de labores de cultivo. Corresponde al 2.83 % con una superficie total de 7.09 km², localizándose en parte del centro y Noreste del territorio municipal.
- Pastizal inducido: Se desarrolla al eliminarse la vegetación original (bosque, selva, matorral), o en áreas agrícolas abandonadas. Este tipo se encuentra muy disperso por todo el territorio y en total cubre un área de 36.98 km² equivalente a 14.77 %.

- Sin vegetación aparente: Considera las áreas en donde no es visible o detectable alguna comunidad vegetal. Equivale en apenas al 0.70 % del territorio municipal.
- Vegetación hidrófila: Comunidades arbóreas, arbustivas o herbáceas que habitan en terrenos pantanosos o inundables de aguas salobres o dulces poco profundas, son comunidades muy diversas florísticamente hablando. Estas comunidades son parte de los llamados “Humedales”. Se encuentra muy marcado pegado a la zona de cuerpos de aguas ocupando un área de 1.12 km² y ubicado al Noreste.
- Vegetación secundaria arbórea de bosque de Pino: Fase sucesional secundaria de la vegetación de bosque de Pino con predominancia arbórea. Se localiza al Noreste con apenas 0.56 km² (0.22 %) de extensión territorial.
- Vegetación secundaria arbórea de bosque mesófilo de montaña: Este grupo vegetativo que aparece posterior a un fenómeno que afecta los cultivos o vegetación original de la zona, se esparce sobre 9.01 km² dispersa con el Bosque mesófilo de montaña, denotando la degradación de dicho ecosistema. Ocupa una superficie territorial de 66.43 km² que corresponde al 26.54 %.
- Vegetación secundaria arbustiva de bosque de Pino – Encino: Fase sucesional secundaria de la vegetación con predominancia de

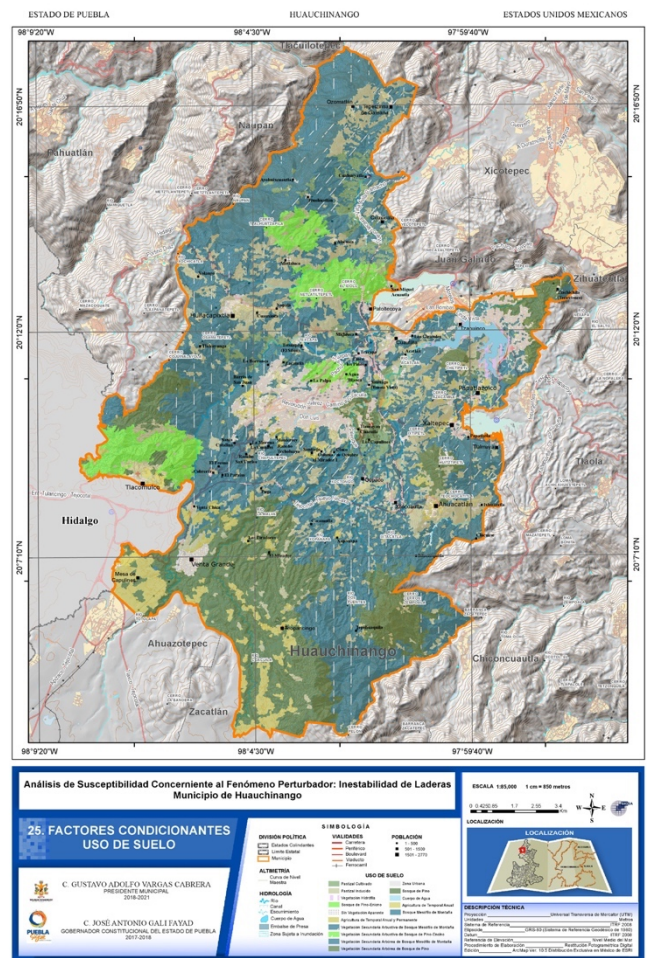


Figura 9. Factores condicionantes uso de suelo

Fuente: Elaboración propia, detalle de información a partir de imágenes satelitales, tomando como base datos vectoriales de INEGI, Serie VI, 2016.

arbustos. Puede ser sustituida o no por una fase arbórea. Con el tiempo puede o no dar lugar a una formación vegetal similar a la vegetación original, tiene presencia mixta de Pinos (*Pinus*) y Encinos (*Quercus*). Se concentra en un área de 0.64 km² (0.25 %), al Noreste del municipio.

- Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña: Similar a lo que ocurre con la vegetación secundaria arbórea, esta aparece posterior a fenómenos que hayan afectado el territorio. Representado al Noreste y parte central del municipio con un área de 22.13 km² equivalente a 8.84 % del total municipal

La zona urbana cubre un área total de 14.49 km² equivalente a 5.79 %.

5.1.6 Fallas y fracturas

El concepto de falla tectónica se refiere a aquellas roturas del terreno con desplazamientos, siendo desde un metro hasta centenares de kilómetros. Esto ocurre por la baja resistencia mecánica de los materiales a causa de incidencia de esfuerzos tectónicos regionales resultantes de la interacción de las placas tectónicas (Obando, s.f.).

Existen tres tipos de fallas principales, según sea la dirección del desplazamiento de las rocas que cortan:

1. Falla normal. Se generan por tensión horizontal. Las fuerzas inducidas en la roca son perpendiculares al acimut de la falla (línea de ruptura superficial), y el movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60° respecto a la horizontal. El bloque que se encuentra por encima del plano de la falla se denomina techo, y se desliza hacia abajo; mientras que el bloque que se encuentra por debajo del plano de la falla se denomina piso, y asciende.
2. Falla inversa. Se genera por compresión horizontal. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30° respecto a la horizontal. El bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso. Cuando las fallas inversas presentan un buzamiento (inclinación) inferior a 45°, éstas también toman el nombre de cabalgamiento.

3. Fallas transversales o de desplazamiento de rumbo. Se desarrollan a lo largo de planos verticales y el movimiento de los bloques es horizontal, son típicas de límites transformantes de placas tectónicas. Se distinguen dos tipos de fallas de desgarre: laterales derechas y laterales izquierdas. Laterales derechas o dextrales, son aquellas en donde el movimiento relativo de los bloques es hacia la derecha; mientras que en las laterales izquierdas o sinestrales, el movimiento es opuesto.

Por otro lado, las fracturas son discontinuidades aproximadamente planas que separan bloques de roca con desplazamiento perpendicular al plano de ruptura. Las fracturas pueden ser generadas por la concentración de esfuerzos en zonas de contraste composicional (contactos de capas, cambio de facies) por pérdida de volumen (compactación), o por enfriamiento durante deformación contraccional o extensional (Nelson, 2001).

Con base a la fotointerpretación de las imágenes satelitales del municipio, se identificaron 52 lineamientos marcados por el Servicio Geológico Mexicano de los cuales 13 son fallas inversas y 35 de tipo normal, la mayoría con dirección NW - SE y así como 4 fracturas.

Para su representación cartográfica se crearon buffers de 100, 500 y 1000 m de distancia acorde a las normas del CENAPRED (2001) (Figura 10).

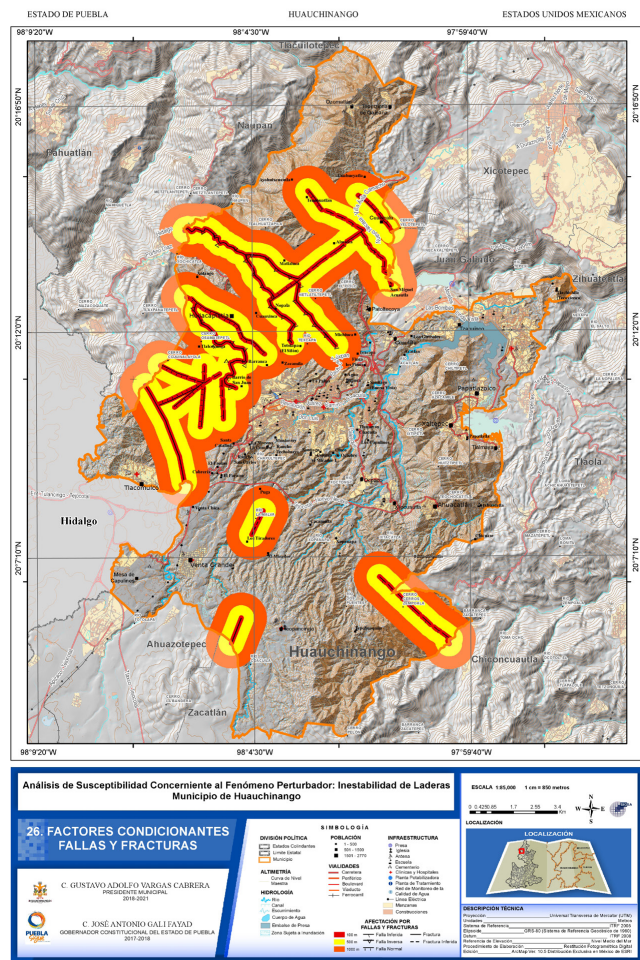


Figura 10. Factores condicionantes fallas y fracturas

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales

5.1.7 Intensidad de cobertura de vegetación

El efecto de la vegetación sobre la estabilidad del suelo se debe a que, en los horizontes más superficiales, el sistema conforma una malla densa de fibra resistentes que refuerza la capa de suelo manteniéndola en el sitio, o uniéndola a materiales más estables, mientras la raíz actúa como un anclaje en forma de columna que evita el desplazamiento de los horizontes más profundos. Sin embargo, el peso de vegetación en coberturas muy densas, en especial si se trata de árboles de gran altura y pendientes muy fuertes, pueden ser adversos y generar mayor propensión a los procesos de remoción en masa (Mujica, 2013), por lo que esta consideración particular fue tomada en cuenta para la asignación de valores a los atributos de esta variable.

En el municipio se clasificaron cuatro intervalos conforme a la densidad de vegetación (intensa, moderada, escasa y nula), predomina el tipo intensa con el 93.46 %, abarcando un área de 233.96 km², la vegetación moderada se presenta en las zonas de Oeste, centro, Suroeste, Sureste y Norte del municipio ocupando un área de 12.94 km² (5.17 %). Las zonas con una vegetación escasa se encuentran el Sur, Suroeste, Este y Norte del municipio dentro de un área de 2.37 km² (0.94 %) y por último la vegetación escasa ocupa el 0.41 % (1.03 km²).

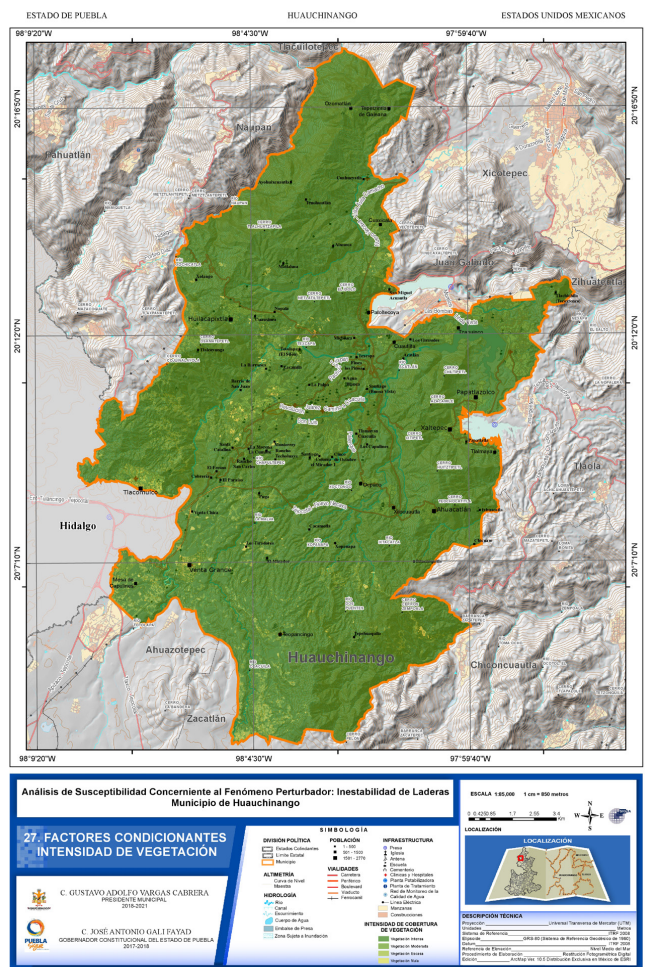


Figura 11. Factores condicionantes intensidad de vegetación

Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales.

CAPÍTULO VII

7.1 Resultados

Los resultados del análisis fueron representados en un mapa utilizando una escala cromática, la clasificación obtenida se menciona a continuación:

- **Muy alta susceptibilidad (código rojo):** Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas y discontinuidades desfavorables donde ha ocurrido deslizamientos o existe una alta posibilidad de que ocurran. Este rango de susceptibilidad se observa presente en el Norte, Este y Oeste del municipio dentro de un área de 15.53 km², lo que equivale al 6.20 % del total del territorio. Dentro de su distribución se aprecian a las localidades de Tenohuatlán, Tepetzintla de Galeana, Cuaxicala, Matlaluca, San Miguel Acuatla, Nopala y parte Oeste de la cabecera municipal (Huauchinango). Cabe mencionar que aunque la localidad de Xaltepec en su mayoría presenta un índice de susceptibilidad moderado, las particularidades del relieve en sus inmediaciones presentan características que ponderan la superficie con índices que van desde alta a muy alta susceptibilidad, lo cual se corrobora con los registros históricos de deslizamientos en esta región.
- **Alta susceptibilidad (código naranja):** Laderas que tienen zonas de fallas, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran. Las zonas donde se localiza este rango de susceptibilidad constituyen el 60.92 % de la extensión territorial (152.50 km²), las localidades que presentan una alta susceptibilidad son; Ozamatlán, Cuahueyatla, Ayohuixcuaatla, Alseseca, Huilacapixtla, Cuauxinca, parte Sur de Totolapa (El Sifón), Tlalcoyunga, centro de Tenango de las Flores, centro de Las Colonias de Hidalgo, Tlachichila (Tecoxtenco), Papatlatla, Ahuacatlán, Ixhuacatla, Tepehuaquila, Cuacuila, rodeando a Ocpaco, sobre el perimetro de Xilocuaatla, Cacamoatla, Puga, El Mirador, Teopancingo, y en Huauchinango principalmente el fraccionamiento Monterrey y la colonia La Morena. Del mismo modo, algunas vías de comunicación como la carretera Huauchinango – Xaltepec, México – Tuxpan y la carretera interserrana Huauchinango – Naupan.

CAPÍTULO VIII

8.1 Conclusiones

El manejo de una gran cantidad de información cartográfica puede ser optimizado gracias a los SIG, por otro lado, el método de EMC presenta un sustento matemático que permite desglosar y analizar un problema por partes. De igual manera permite la participación de diferentes personas o grupos de trabajo para generar un consenso.

Ya que el municipio de Huauchinango se caracteriza por presentar condiciones geológicas y geomorfológicas favorables a sufrir deslizamientos e históricamente remonta importantes eventos en procesos de remoción de masas, naturalmente se determinó que el índice que predomina corresponde a una alta susceptibilidad y que representa el 60.92 % de la extensión municipal, ocupando un área de 152.50 km², siendo las zonas Noroeste y Sureste del municipio donde se presentan estos niveles de susceptibilidad.

Debido a que en la cartografía de fallas y fracturas se generaron buffers a determinadas distancias, evidentemente las zonas más cercanas a estos lineamientos tendrán mayor peso que las más lejanas, por otro lado, existen zonas donde este factor no influye, debido a esto, el índice de muy alta susceptibilidad solo caracteriza el 6.20 % del total territorial (15.53 km²), pues corresponde a las zonas donde convergen todos los factores con los niveles ponderados más altos de susceptibilidad.

El índice de moderada susceptibilidad está íntimamente influenciado por la topografía de sierra volcánica de laderas tendidas, correlacionándose así, con los intervalos de pendientes que oscilan entre los 16° y 30° de inclinación. Al interactuar con todos los factores condicionantes constituyen el 28.04 % (70.20 km²) del municipio, ocupando principalmente la zona centro, extendiéndose de SW a NE.

Los valores de baja y muy baja susceptibilidad suman apenas el 4.82 % de la superficie territorial, el primero predomina a Suroeste cercano al valle intermontañoso de Ahuazotepec y Zacatlán y el último representa a la laguna de Tenango al Noreste.

8.2 Recomendaciones

- Realizar estudios geofísicos, fundamentalmente eléctricos y sísmicos en las áreas críticas para complementar el análisis con información tectónica y estructural.
- Formular programas, y proyectos de ordenamiento territorial para reducir la vulnerabilidad de la población ante posibles deslizamientos.
- Facilitar la información a la población que les permita conocer las condiciones actuales ante un posible deslizamiento de ladera.
- Generar cartografía más detallada empleando imágenes satelitales o fotografías aéreas de mayor resolución para mejorar la calidad del estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, E. & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica*, 73 (149), 5-16.
- Barredo, J. (1996). Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio, en la ordenación del territorio. Madrid: RA-MA.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Dávila, N. (2003). Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2, 95-106.
- CENAPRED (2001). Inestabilidad de Laderas, Serie Fascículos (2 ed.). México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado en marzo 2018, de <http://www.cenapred.unam.mx/>.
- Cruden, D. (1991). A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27-29.
- Cruz, M. (2015). *Análisis de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa, en la Subcuenca del Río San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México*. (Tesis de maestría). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C.
- Cuanalo, C., Oliva, G. & Gallardo, A. (2011). Inestabilidad de laderas influencia de la actividad humana. *Elementos*, 84, 39-46.
- García, M. (2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. (Tesis doctoral). Universidad de Alcalá. Departamento de Matemáticas.
- Gómez, M. & Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio. Madrid: RA-MA.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides*. Reston, VA, USA: US Geological Survey.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2004). Sistema de Información Geográfica.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). Compendio de Información Geográfica Municipal 2010, Huachinango, Puebla.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2015). Guía para interpretación de la cartografía, uso de suelo y vegetación.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2015). Tabulados de la Encuesta Intercensal 2015. Población.
- Instituto Registral y Catastral del Estado de Puebla [IRCEP]. (2017). Límites Catastrales.
- Lamelas, M. (2007) *Georesources and geohazards in the context of a sustainable development in the periphery of urban areas, exemplary of a part of the Ebro Basin in the surroundings of Zaragoza (Spain)*. Tesis doctoral. Technische Universität Darmstadt.
- Lamelas, M., Marinoni, O., & Hoppe, A. (2012). Comparison of Multicriteria Analysis Techniques for Environmental Decision Making on Industrial Location. En Chiang, J. (ed). *Decision Support Systems*. Rijeka, InTech.
- Marinoni, O. (2005). A stochastic spatial decision support system based on PROMETHEE. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(1), 51-68.
- Mark, D., Lauzon, J., & Cebrian, J. (1989). A review of quadtree-based strategies for interfacing coverage data with digital elevation models in grid form, *International Journal of Geographical Information Systems*, 3(1), 3-14.
- Martínez, G. & Balaguer C. (1998). Litología, aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la comunidad Valenciana. *Publicaciones de Divulgación Técnica. Colección "Cartografía Temática"*, 5.
- Mason, D., & Townshend, J. (1988). Research related to geographical information systems at the Natural Environment Research Council's Unit for Thematic Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 2(2), 121-141.
- Maximiliano, S.; Jiménez, L. & Pérez. H. (2015). Óptima ubicación de un relleno sanitario para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá empleando sistemas de información geográfica. *Ingenierías USBMed* 6(1), 38-45.
- Mendes, J. & Satoro, W. (2001). Urban Quality of life evaluation scenarios: The case of Sao Carlos in Brazil. *CTBUH*. 1, 13-23.

- Mora, S. & Vahrson W. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, 31(1), 49-58.
- Mujica S., & Pacheco H. (2013). Metodología para la generación de un modelo de zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa, en la cuenca de Río Camurí Grande, estado Vargas, Venezuela. *Revista de investigación*, 37(80), 215-243.
- Obando, T. (s.f.). Geología y Movimientos de Laderas en el Área de la Subcuenca Hidrográfica de Río Mayales (Chontales, Nicaragua) a Escala 1/50, 000.
- Ojeda, G., Lacreu H., & Sosa, G. (2007). Atlas de Recursos Geoambientales del municipio de Potrero de los Funes. Un aporte a la formación de los ciudadanos. Universidad Nacional de San Luis.
- Ouma, O., Kipkorir, C. & Tateishi, R. (2011). MCDA-GIS integrated approach for optimized landfill site selection for growing urban regions: an application of neighborhood-proximity analysis. *Annals of GIS*, 17(1), 43-62.
- Pullar, D. (1999). Using an allocation model in multiple criteria evaluation. *Journal of Geographic Information and Decision Analys.* 3, 9-17.
- Restrepo, C. & Velásquez, A. (1997). Resiliencia de los Ecosistemas Tropicales de Montaña Frente al Cambio: Biodiversidad, Procesos y Deslizamientos de Tierra. Cali: OSSO para COLCIENCIAS, *Propuesta*, 62.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. (2003). Decision-Making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research* 145, 85-9.
- Saaty, T. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1), 83-98.
- Scheidegger, A. (1998). Tectonic predesign of mass movements with examples from the Chinese Himalaya. *Geomorphology*, 26(1), 37-46.
- Secretaria de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU] (2016). Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y/o Riesgos 2016.

- Shelton, R. & Estes, J. (1979). Integration of remote sensing and geographic information systems. *Proceedings, 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. (Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute of Michigan).
- Shroder, J. (1971). Landslides of Utah. *Utah Geological and Mineralogical Survey*, 90 (50).
- Smith T., Menon, S., Star, J. & Estes. J. (1987). Requirements and principles for the implementation and construction of large scale geographic information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(1), 13-31.
- Soeters, R., & Van Westen, C. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C.
- Van Westen, C. & Terlien, M. (1996). An Approach Towards Deterministic Landslides Hazard Analysis in GIS. A Case Study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 853-868.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. *In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C.
- WP/WLI [International Geotechnical Societies's UNESCO Working Party for World Landslide Inventory] (1995). Velocity classes for landslides, Bulletin International Association of Engineering Geology.
- WRB. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

ANEXO A Levantamiento en campo

Con la finalidad de reforzar el análisis y resultados obtenidos en el estudio, se realizó una visita de campo al municipio de Huauchinango, donde gracias al apoyo del personal de Protección Civil y autoridades correspondientes, se obtuvieron evidencias del fenómeno perturbador que afecta al municipio. A continuación, se muestra una síntesis de las actividades que se realizaron.

- Fraccionamiento monterrey

Se localiza al SW de la ciudad de Huauchinango sobre una ladera, la cual se caracteriza por tener una pendiente de 41° , y una altura de aproximadamente 10 metros. La litología del lugar está conformada por rocas ígneas, principalmente basaltos bastante intemperizados y suelos sueltos de coloración rojiza que presentan una consolidación muy pobre y además se observan algunas fracturas. Se tiene presencia de granos finos, y un nivel de erosión e intemperismo alto debido a las abundantes lluvias que se presentan en la ciudad. Se presenta un echado favorable al deslizamiento y el tipo de fenómeno corresponde a flujos de lodo. La vegetación típica del lugar corresponde a bosque mesófilo de montaña, presenta densidad moderada puesto que se encuentran construcciones en gran parte del fraccionamiento.

El 25 de septiembre del año 2015 se registró un flujo de lodo, el cual cobró la vida de tres personas y una casa fue destruida. Este movimiento sucedió debido a que la calle que se encontraba en la parte superior no contaba con guarnición por lo que las fuertes lluvias y la pendiente pronunciada arrastraron grandes cantidades de lodo (Fotografía 1 y 2).



Fotografía 1



Fotografía 2

- Colonia La Morena

La colonia La Morena se sitúa en el Suroeste de la ciudad de Huauchinango, sobre una ladera que presenta una pendiente de 61° con una altura aproximada de 35 m. La vegetación se caracteriza principalmente por bosque mesófilo de montaña, y algunas áreas que se encuentran cubiertas por sembradíos.

Geológicamente, el sitio descansa sobre rocas ígneas donde se observan basaltos que corresponden a la era del Cenozoico dentro del periodo Neógeno - Cuaternario, además se contemplan algunos pequeños afloramientos de roca caliza. Se pudo observar que la matriz que se presenta es arcillosa y estas pueden presentar plasticidad y viscosidad diferente que combinada con el agua genere este tipo de deslizamientos. El echado que se observa es favorable al deslizamiento.

De acuerdo con los históricos que se recabaron el 6 de agosto del año 2016, se registró un evento sobre la ladera ubicada a un costado del preescolar (Fotografía 3), el cual generó daños materiales tanto a la escuela como a una casa que se encontraba a un lado del mismo, cobrando la vida de una persona.



Fotografía 3

- Localidad de Xaltepec

El registro que se realizó sobre esta ladera se encuentra ubicado en la zona Suroeste del poblado de Xaltepec, se identifica por presentar una pendiente abrupta con una inclinación de 68° . La estructura geológica que se observa está constituida principalmente por rocas sedimentarias, predominando rocas calizas con intercalaciones de roca lutita que pertenecen a la era Mesozoica del periodo Cretácico. Se observaron suelos intemperizados que presentan una coloración tonos café y rojizo (Fotografía 4).

Según los registros de la unidad municipal de Protección Civil de Huauchinango, el seis de agosto del 2016 debido a las lluvias por los remanentes de la tormenta tropical Earl

parte del cerro fue desgajado y a causa de ello 33 personas fallecieron y se registró 1 desaparecido (Fotografía 5). En el análisis que se realizó previamente se observa que el reconocimiento realizado en campo cae en una zona con muy alta susceptibilidad y con ello se reafirma el trabajo realizado en gabinete.



Fotografía 4



Fotografía 5

- Carretera Huauchinango - Xaltepec

La carretera que conecta la ciudad de Huauchinango con la localidad de Xaltepec ha presentado gran cantidad de deslizamientos, esto se debe a que la mayor parte de las rocas presentes son de origen sedimentario, principalmente calizas y lutitas, ambas con un alto grado de intemperismo, además de tener la presencia de suelos sueltos color rojizo. Las laderas que se pudieron observar presentan pendientes entre los 16° – 30° con echados favorables a deslizamientos. Durante la temporada de lluvias, los suelos se reblandecen generando grandes deslizamientos por flujos de lodo acompañado de grandes caídos (Fotografía 6 y 7).



Fotografía 6

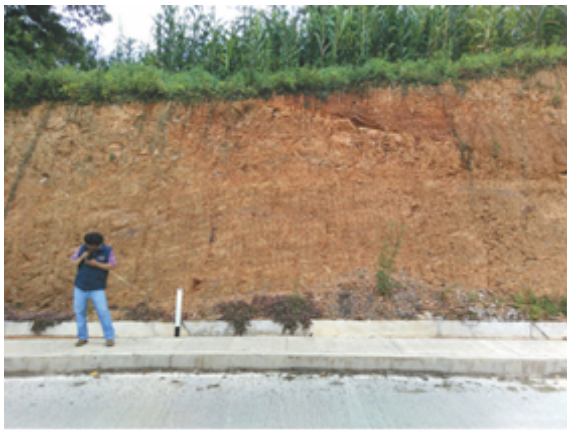


Fotografía 7

- Localidad de Cuauxinca

El punto fue levantado sobre la avenida principal de la comunidad de Cuauxinca en una ladera compuesta de rocas sedimentarias de tipo lutita intercalada con areniscas, con suelos de poca profundidad color café oscuro, presenta una vegetación escasa producto de la agricultura (Fotografía 8), sus coordenadas son 20°12'32" de latitud Norte y -98°4'32" longitud Oeste, se caracteriza por tener una altitud de 1,718 msnm, altura de 70 m, inclinación de la pendiente de 30° con dirección de NW – SE.

Tras las fuertes lluvias y la presencia de una falla de tipo lateral derecha, el Director de Protección Civil con testimonios de la localidad mencionaron que el día 01 de agosto de 2010 se produjo un movimiento en masa de bloques de tamaños considerables con flujo de lodos de aproximadamente 900,000 m³ de material deslizado que bloqueó en su totalidad la vía de acceso a la comunidad (Fotografía 9) y cobró la vida de 30 personas quienes venían a bordo de un camión de pasajeros que fue arrastrado por los escombros ladera abajo.



Fotografía 8



Fotografía 9

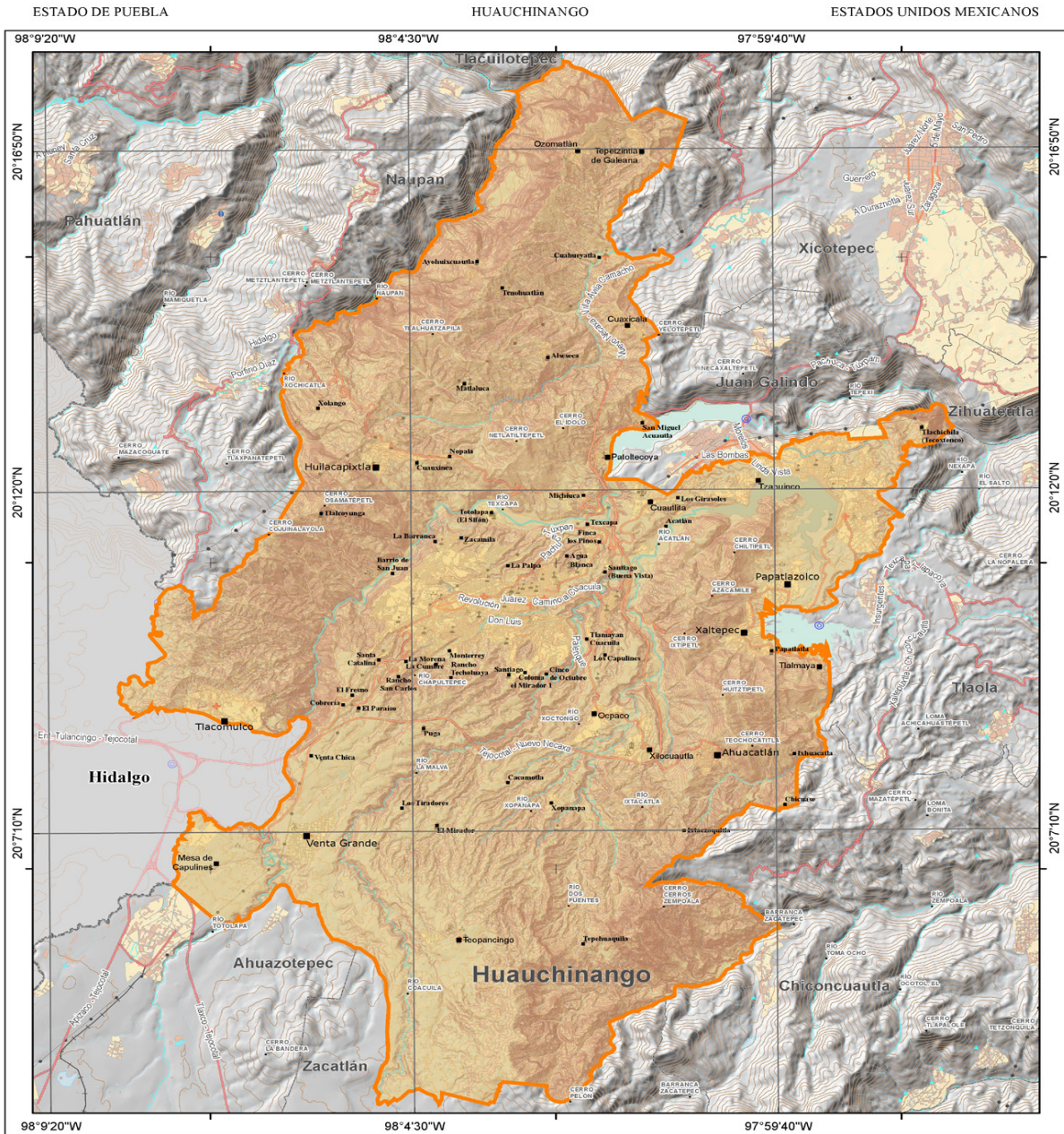


Figura 5. Factores condicionantes pendientes

Fuente: Elaboración propia con cartografía generada escala 1:5, 000 del año 2017

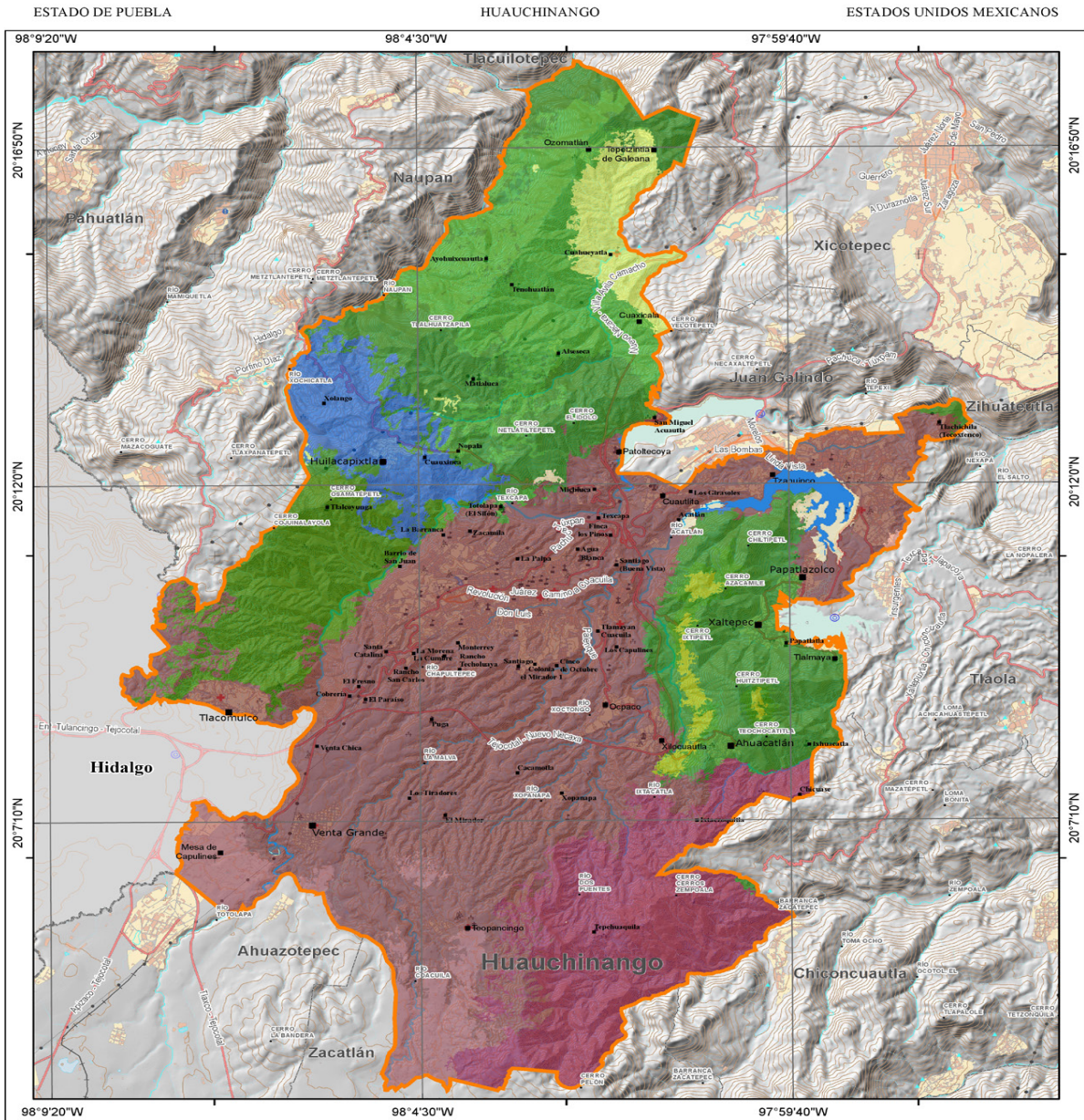


Figura 6. Factores condicionantes litología

Fuente: Elaboración propia, detalle de información vectorial a partir de imágenes satelitales tomando como base datos vectoriales de INEGI y SGM, Escala 1:50, 000, 2010

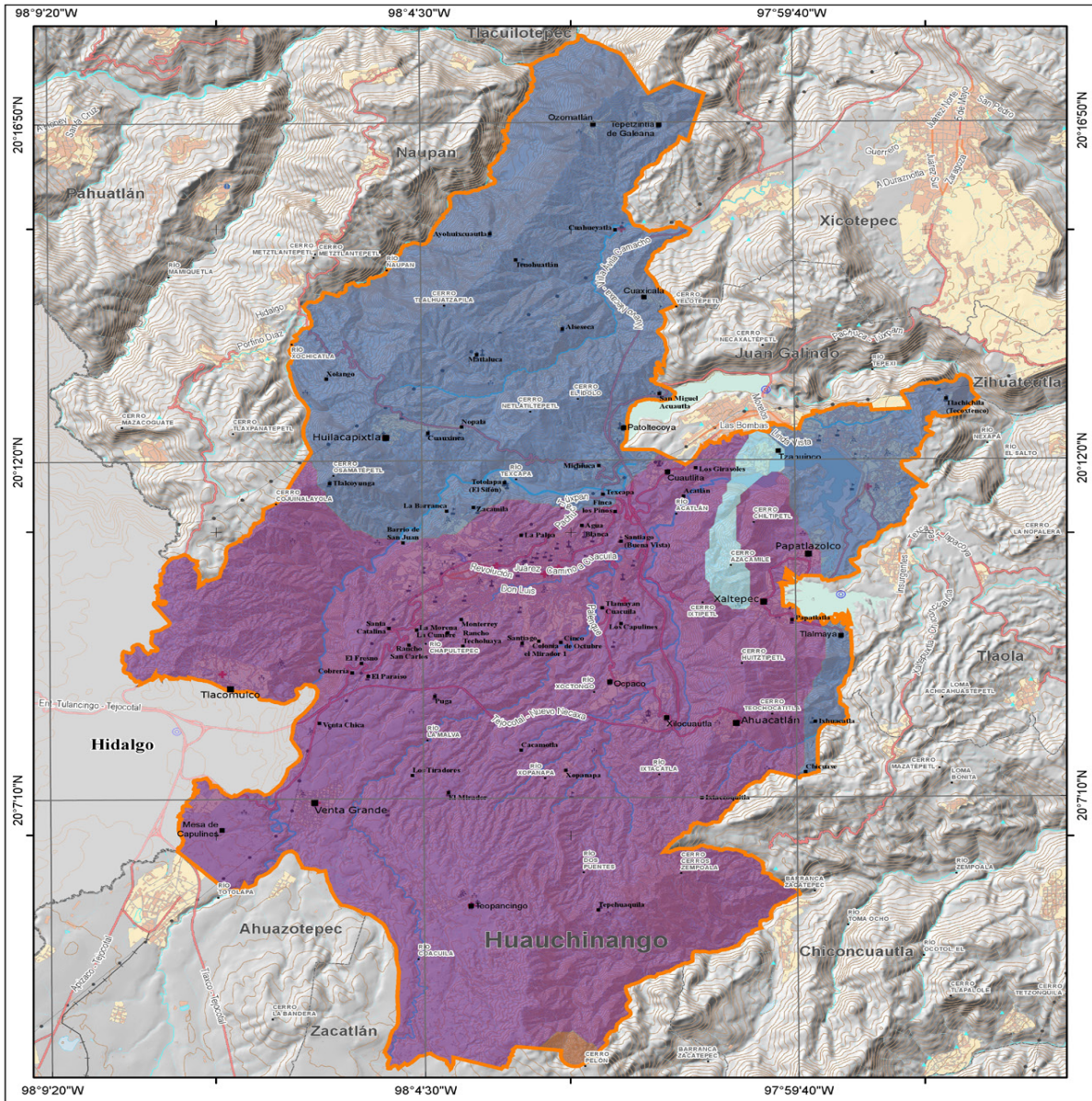


Figura 7. Factores condicionantes geomorfología
 Fuente: Elaboración propia con base en datos vectoriales, escala 1:1, 000, 000, Fisiografía, INEGI, 2010

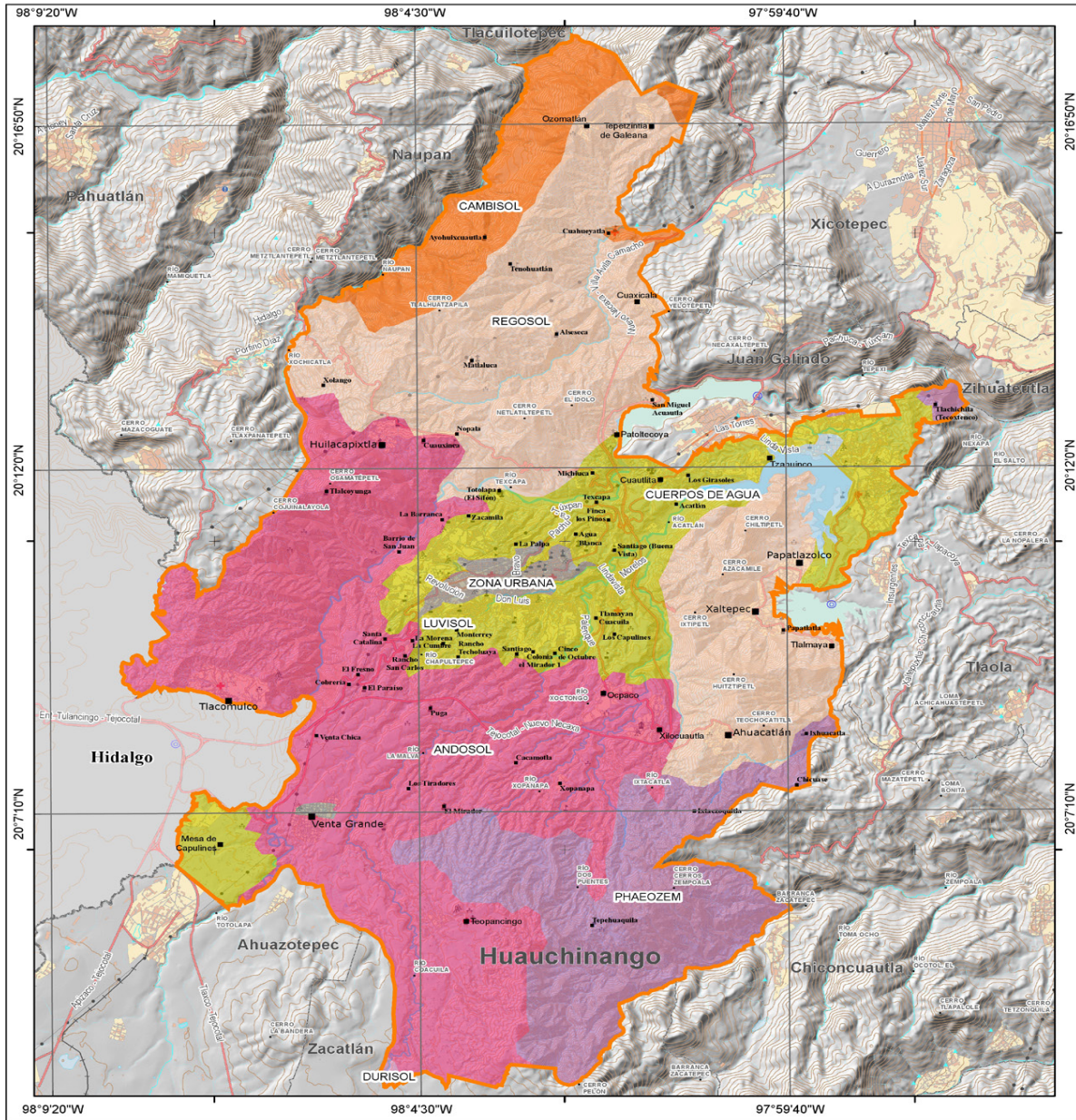


Figura 8. Factores condicionantes edafología

Fuente: Elaboración propia con cartografía generada escala 1:5, 000 del año 2017

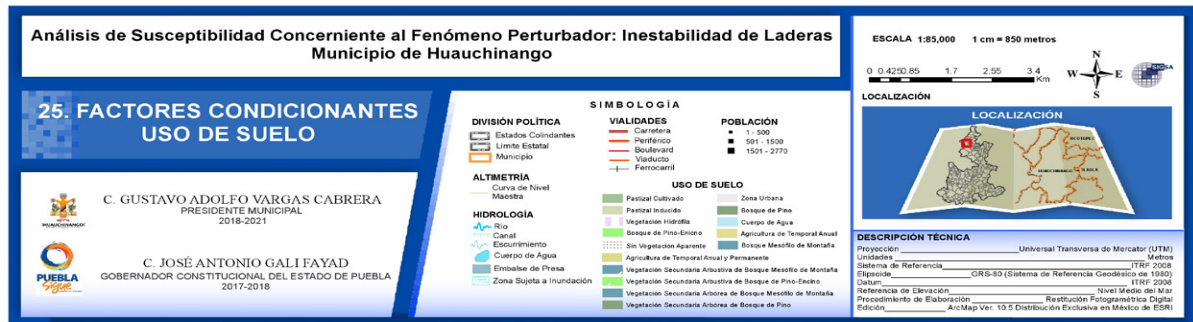
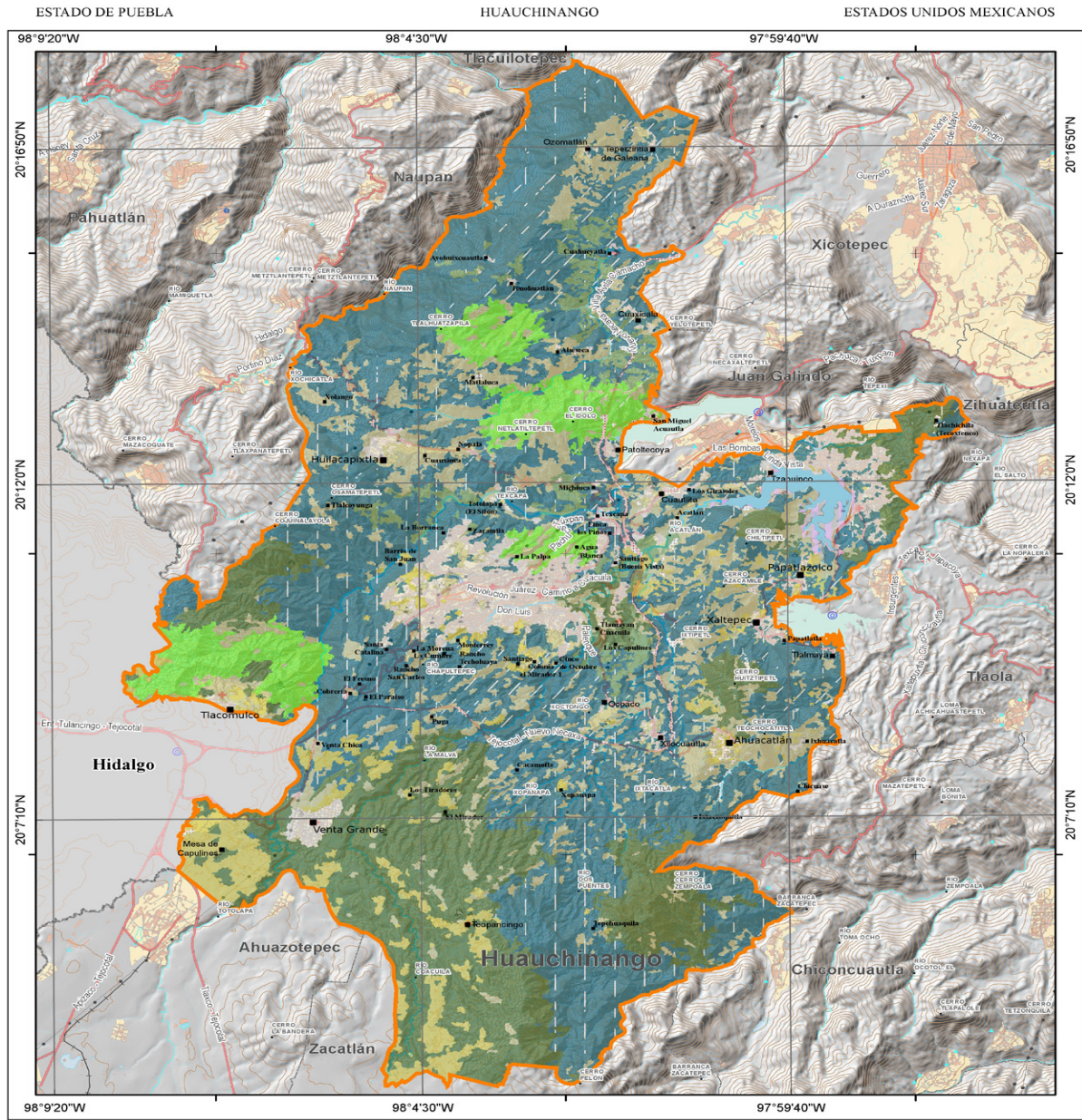


Figura 9. Factores condicionantes uso de suelo
 Fuente: Elaboración propia, detalle de información a partir de imágenes satelitales, tomando como base datos vectoriales de INEGI, Serie VI, 2016

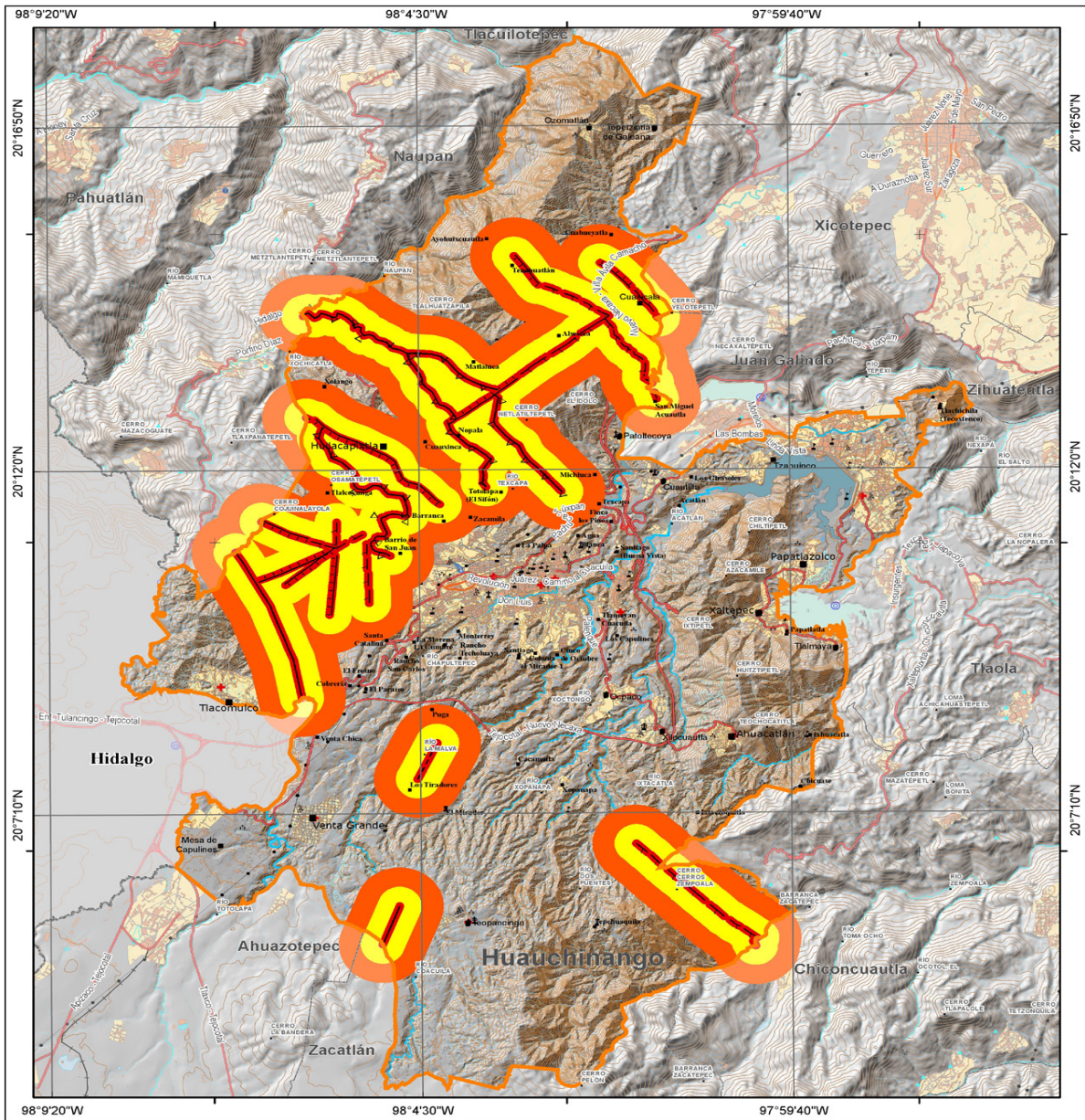


Figura 10. Factores condicionantes fallas y fracturas
 Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales

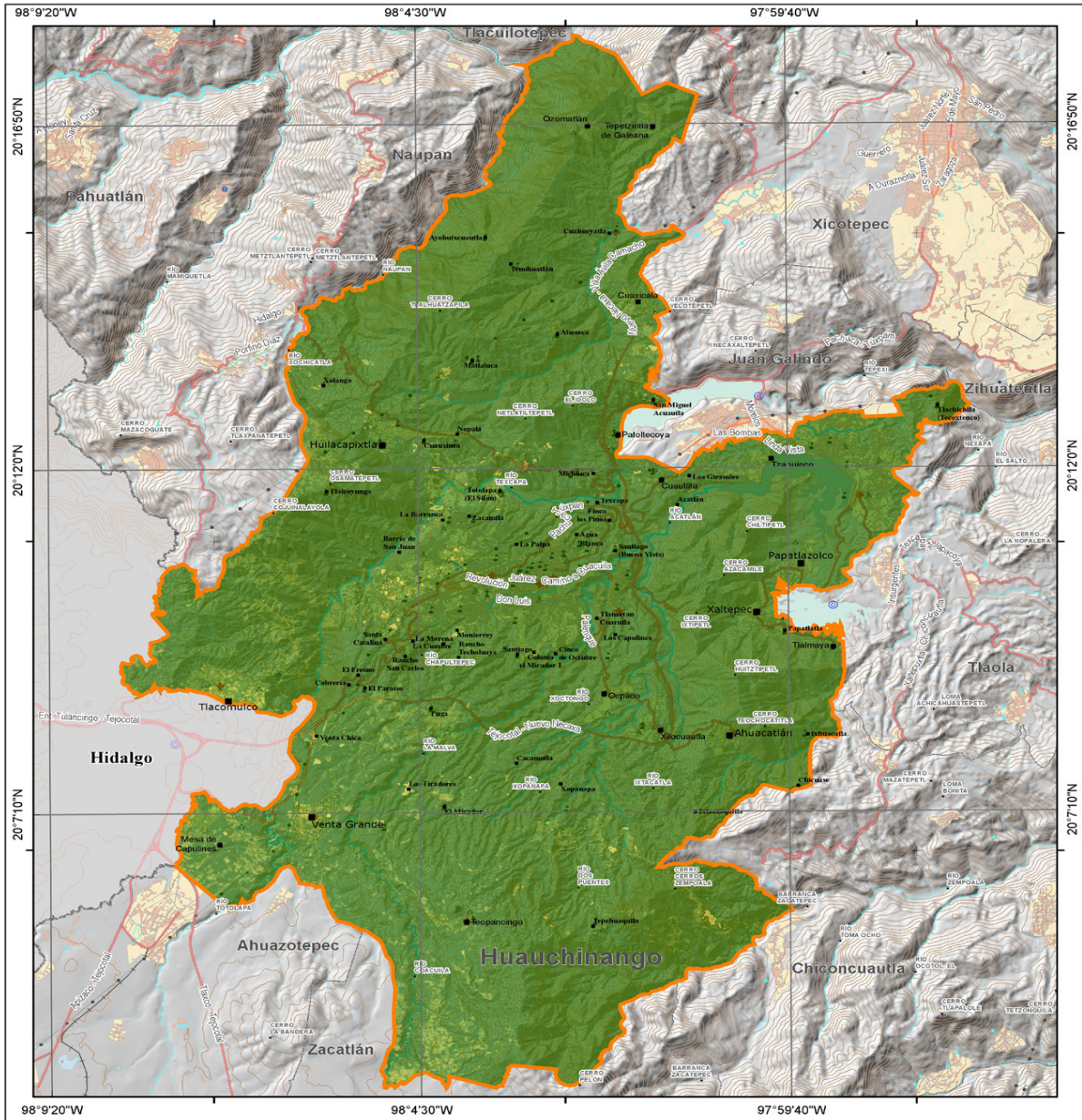


Figura 11. Factores condicionantes intensidad de vegetación
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales

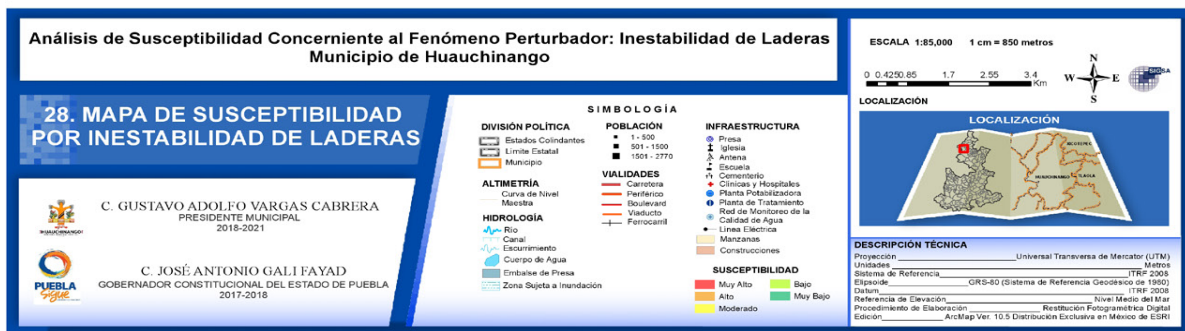
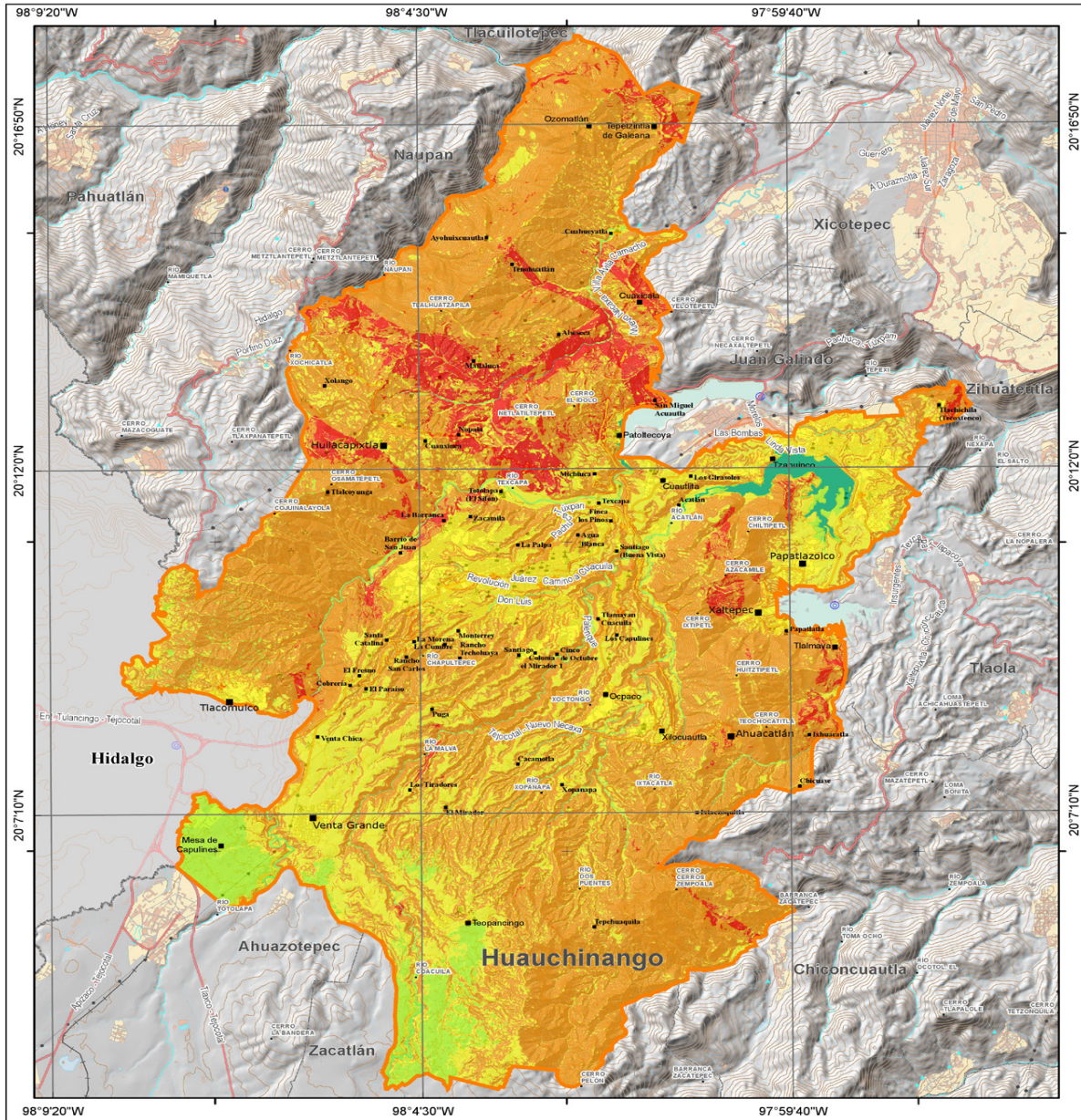


Figura 12. Mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas

Fuente: Elaboración propia