



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA**  
**GEOMÁTICA**

**ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DE LA CUENCA EL ZAGUÁN, ESTADO DE MÉXICO.**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRA EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA:**  
**MARIBEL CORRAL GARCÍA**

**DIRECTOR DE TESIS**  
**DR. GABRIEL LEGORRETA PAULÍN**  
**INVESTIGADOR, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.**  
**ABRIL 2021.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## COMITÉ TUTORAL

Dr. Gabriel Legorreta Paulín

Dr. Fernando Aceves Quesada

Dr. Rutilio Castro Miguel

Dr. Miguel Ángel Balderas Plata

Dr. Álvaro Gerardo Palacio Aponte

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por permitir formarme personal y profesionalmente para poder generar conocimiento.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), por el apoyo para realizar esta investigación.

Al Dr. Gabriel Legorreta Paulín, mi director de tesis, toda mi admiración, respeto y agradecimiento. Por los días de comprensión, paciencia, conocimiento compartido y revisión. Un ejemplo para mí.

Al equipo de trabajo de campo que me acompañó, me orientó y me compartió su conocimiento, gracias por todo su apoyo.

A mi honorable Jurado:

Dr. Gabriel Legorreta Paulín

Dr. Fernando Aceves Quesada

Dr. Rutilio Castro Miguel

Dr. Miguel Ángel Balderas Plata

Dr. Álvaro Gerardo Palacio Aponte

Por la orientación y apoyo siempre incondicional, gracias por confiar en mí.

A mis padres, a mis hermanas y a mi hijo que son mi motor, gracias por todas las muestras de apoyo y cariño.

A Marcos García, por la infinita paciencia, gracias por tu apoyo.

## DEDICATORIA

*“He aprendido que cuando un recién nacido aprieta con su pequeño puño, por primera vez el dedo de su padre, lo tiene atrapado por siempre...”*

*Gabriel García Márquez*

*A mis padres, que siempre me han enseñado el valor de la lealtad, el valor de la familia, siempre apoyándome, que con amor me han enseñado a trabajar para lograr mis objetivos. Gracias por tanto. Los amo...*

## ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS .....	2
	General.....	2
	Específicos .....	2
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	3
IV.	HIPÓTESIS .....	4
V.	ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....	5
	<b>V.1</b> Procesos de remoción en masa.....	5
	<b>a)</b> Definiciones.....	5
	<b>b)</b> Clasificaciones y tipos de movimiento.....	8
	<b>V.2</b> Susceptibilidad a procesos de remoción en masa y enfoques.....	16
	<b>a)</b> Enfoque heurístico.....	16
	<b>b)</b> Enfoque estadístico.....	18
	<b>c)</b> Enfoque determinístico .....	19
	<b>d)</b> Modelo de Regresión Logística Múltiple .....	20
	<b>V.3</b> Inventario de deslizamientos .....	27
	<b>a)</b> Tipos de Inventarios.....	27
	<b>b)</b> Criterios metodológicos para la construcción de un Inventario.....	29
	CAPITULO 1. AREA DE ESTUDIO: Marco geográfico y geológico.....	32
	<b>1.1</b> Límite y ubicación de la cuenca El Zaguán.....	32
	<b>1.2</b> Características físico-geográficas.....	34
	<b>a)</b> Clima.....	34
	<b>b)</b> Hidrología.....	36
	<b>c)</b> Edafología.....	38

d) Geología.....	41
e) Uso de suelo y Vegetación .....	45
f) Pendiente.....	47
g) Altitud.....	49
h) Actividades socioeconómicas.....	50
i) Población .....	50
<b>CAPITULO 2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A PRM EN LA CUENCA EL ZAGUÁN .....</b>	<b>52</b>
<b>2.1 Revisión y recopilación de información .....</b>	<b>53</b>
a) Delimitación del área de estudio .....	53
<b>2.2 Inventario de deslizamientos 2017-2018 .....</b>	<b>54</b>
a) Fotointerpretación y delimitación de deslizamientos. ....	54
b) Trabajo de campo y muestreo de deslizamientos.....	54
<b>2.3 Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos .....</b>	<b>57</b>
a) Modelo de Regresión Logística Múltiple (RLM).....	57
<b>CAPITULO 3. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA CUENCA EI ZAGUÁN. ....</b>	<b>62</b>
<b>3.1 Análisis del inventario .....</b>	<b>62</b>
<b>3.2 Evaluación del modelo estadístico de RLM.....</b>	<b>64</b>
<b>3.3 Evaluación del modelo espacial de susceptibilidad .....</b>	<b>70</b>
<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo 1.</b> Tabla de localización y atributos de los deslizamientos situados en el cauce del río que conforman el inventario.....	85
<b>Anexo 2.</b> Dimensiones y localización del deslizamiento de asentamiento profundo localizado fuera del cauce del río.....	88
<b>Anexo 3.</b> Puntos de verificación .....	89
a) Deslizamiento de escombros.....	89

<b>b)</b> Deslizamiento de escombros.....	89
<b>c)</b> Deslizamiento de asentamiento profundo .....	90
<b>d)</b> Deslizamiento de escombros.....	90
REFERENCIAS .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL DE ESCOMBROS .....	11
FIGURA 2. DESLIZAMIENTOS DE ESCOMBROS.....	12
FIGURA 3. DESLIZAMIENTO DE FLUJO DE ESCOMBROS .....	13
FIGURA 4. CAÍDA DE ROCA .....	14
FIGURA 5. DESLIZAMIENTO DE ASENTAMIENTO PROFUNDO.....	15
FIGURA 6. EJEMPLO DE CURVA ROC .....	23
FIGURA 7. FISIOGRAFÍA DE MÉXICO .....	32
FIGURA 8. MAPA DE UBICACIÓN DE LA CUENCA EL ZAGUÁN.....	33
FIGURA 9. MAPA DE UNIDADES CLIMÁTICAS .....	34
FIGURA 10. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL 1980-2016 .....	35
FIGURA 11. REGIONES HIDROLÓGICAS DEL ESTADO DE MÉXICO.....	36
FIGURA 12. HIDROLOGÍA .....	37
FIGURA 13. EDAFOLOGÍA.....	39
FIGURA 14. GEOLOGÍA .....	44
FIGURA 15. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN.....	46
FIGURA 16. PENDIENTE .....	48
FIGURA 17. ALTITUD.....	49
FIGURA 18. DESLIZAMIENTO DE ESCOMBROS EN LA COMUNIDAD DE SAN FRANCISCO PUTLA.....	51
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN POR GRUPOS DE EDAD EN LA LOCALIDAD DE SAN FRANCISCO PUTLA.....	51
FIGURA 20. METODOLOGÍA GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A PRM EN LA CUENCA EL ZAGUÁN. ....	52
FIGURA 21. MAPA DE RECORRIDO ALCANZADO POR SESIÓN EN CAMPO.....	57
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE LOS DESLIZAMIENTOS DENTRO DE LA CUENCA EL ZAGUÁN .....	63
FIGURA 23. MODELO ESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD A PRM DE LA CUENCA EL ZAGUÁN. ....	71
FIGURA 24. MODELO ESPACIAL CLASIFICADO QUE INDICA LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE SUSCEPTIBILIDAD A PRM. ....	72
FIGURA 25. MODELO ESPACIAL QUE INDICA EL USO DE SUELO EN EL ÁREA SUSCEPTIBLE DE LA CUENCA EL ZAGUÁN. ....	73
FIGURA 26. CURVA RECEIVER OPERATING CHARACTERISTIC (ROC) .....	74
FIGURA 27. ÍNDICE DE YAUDEN .....	75
FIGURA 28. SITIOS DE VERIFICACIÓN EN LA CUENCA EL ZAGUÁN. ....	79
FIGURA 29. PUNTO DE VERIFICACIÓN A .....	89
FIGURA 30. PUNTO DE VERIFICACIÓN B .....	89
FIGURA 31. PUNTO DE VERIFICACIÓN C .....	90
FIGURA 32. PUNTO DE VERIFICACIÓN D.....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TABLA DE CONTINGENCIA UTILIZADA PARA LA EVALUACIÓN DEL MODELO .....	26
TABLA 2. SUPERFICIE DE UNIDADES EDAFOLÓGICAS DE LA CUENCA EL ZAGUÁN .....	40
TABLA 3. SUPERFICIE DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA EL ZAGUÁN .....	43
TABLA 4. SUPERFICIE DE UNIDADES DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN DE LA CUENCA EL ZAGUÁN.....	46
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DE LA PENDIENTE, MORFOLOGÍA Y PROCESOS BÁSICOS.....	47
TABLA 6. VALORES EXTRAÍDOS DE LAS VARIABLES FÍSICAS USANDO LA HERRAMIENTA <i>SAMPLE</i> .....	59
TABLA 7. VALORES ESTADÍSTICOS DE COLINEALIDAD (TOLERANCIA Y VIF). .....	65
TABLA 8. CODIFICACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.....	65
TABLA 9. VALOR DE LOGARITMO DE LA VEROSIMILITUD (-2LL). .....	65
TABLA 10. CLASIFICACIÓN Y VALOR DEL PUNTO DE CORTE.....	66
TABLA 11. VALOR DE CHI-CUADRADO.....	67
TABLA 12. COEFICIENTES -2LL, R <sup>2</sup> DE COX Y SNELL, Y R <sup>2</sup> DE NAGELKERKE .....	68
TABLA 13. TABLA DE CLASIFICACIÓN. ....	68
TABLA 14. VARIABLES EN LA ECUACIÓN. ....	69
TABLA 15. VALORES DE SENSIBILIDAD Y ESPECIFICIDAD.....	75
TABLA 16. CONTINGENCIA, COMPARACIÓN DEL INVENTARIO VS MODELO. ....	76
TABLA 17. PRECISIÓN DEL PRODUCTOR, USUARIO Y EFICIENCIA DEL MODELO.....	77

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

FÓRMULA 1. REGRESIÓN LOGÍSTICA MÚLTIPLE .....	21
FÓRMULA 2. CÁLCULO DE LA MUESTRA.....	55

## I. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo el estudio de los Procesos de Remoción en Masa (PRM) ha retomado gran importancia debido a que su análisis y entendimiento son la base para la correcta planificación territorial. Estos estudios se han realizado a partir de diferentes enfoques y metodologías, las más comunes y utilizadas son aquellas que tienen un carácter geológico y geomorfológico. Algunas de estas investigaciones han abordado el tema desde un enfoque estadístico que buscan eliminar la subjetividad en la investigación y por ende obtener un modelo metodológico que pueda ser utilizado en diversas áreas con características diferentes (Legorreta *et al.*, 2015b; Aceves *et al.*, 2016).

En la cuenca El Zaguán existe una dinámica activa a la ocurrencia de deslizamientos que están condicionados por las características cualitativas y cuantitativas de la zona de estudio como litología, edafología, pendiente, altitud, uso de suelo y vegetación, etc. Identificar la relación entre estas características que intervienen en la estabilidad de laderas puede hacerse bajo un enfoque estadístico.

Los modelos con un enfoque estadístico permiten obtener y analizar información cualitativa y cuantitativa con la cual es posible calcular la probabilidad de presencia de deslizamientos en un área determinada. Estos modelos son sometidos a pruebas de confiabilidad para descartar o confirmar sobre-evaluaciones o sub-evaluaciones en sus resultados. Los niveles de confiabilidad que los modelos estadísticos muestran en sus resultados permite que sean considerados adecuados en el estudio de la susceptibilidad a deslizamientos (Legorreta *et al.*, 2015b; Aceves *et al.*, 2016).

Aunado a lo anterior el inventario de deslizamientos resulta ser la base principal para el estudio de susceptibilidad, ya que muestra una visión general de la distribución de los deslizamientos y permite la comparación final con el mapa de susceptibilidad obtenido del modelo estadístico (Legorreta *et al.*, 2015b; Aceves *et al.*, 2016).

## II. OBJETIVOS

### General

Cartografiar y modelar la susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa (PRM) en la cuenca El Zaguán, Estado de México mediante el uso de la Regresión Logística Múltiple (RLM).

### Específicos

- ▶ Caracterizar áreas afectadas por PRM en función de las características físicas del terreno.
- ▶ Elaboración del Inventario de deslizamientos.
- ▶ Aplicar modelo de RLM haciendo uso de las variables: Pendiente, uso de suelo y vegetación, edafología, litología y altitud.
- ▶ Evaluación del modelo de RLM.

### III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En el área de estudio existen algunos lineamientos generales sobre el análisis de deslizamientos, por ejemplo, el Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tenango del Valle CENAPRED (2013), aborda el tema de riesgos ante fenómenos de origen geológico (incluyendo los deslizamientos) de forma general. Sin embargo, este atlas general no permite tener un conocimiento sobre la distribución de los deslizamientos ocurridos en la cuenca, ni sobre el potencial existente en el terreno para la ocurrencia de PRM.

En la cuenca El Zaguán, existen las condiciones y características físicas (suelo, litología, clima, pendiente, vegetación y uso de suelo) para crear zonas susceptibles a presentar PRM. Así por ejemplo, en la cuenca se encuentran materiales como: lahares pumíticos, cenizas, material fluvial y paleosuelo que intervienen en la inestabilidad del terreno, sumado a ello la pendiente de las laderas es fuerte y está sujeta a precipitaciones extraordinarias en época de lluvias. Lo anterior genera una producción de sedimentos provenientes de los deslizamientos hacia el cauce del río El Zaguán, lo que pone en peligro a la comunidad de San Francisco Putla asentada hacia la desembocadura del río. A pesar de la importancia de los PRM en la cuenca El Zaguán no existe un inventario de deslizamientos que permita informar a la sociedad sobre la distribución espacial de los deslizamientos y sobre la dinámica actual de la cuenca. De la misma manera no hay estudios donde se aborde el tema de susceptibilidad a PRM y se involucre su modelado mediante métodos estadísticos como la RLM.

Esta falta de información sobre los PRM en la cuenca de El Zaguán (inexistencia de inventarios de deslizamientos, análisis y su modelado) son factores influyentes en la vulnerabilidad de la población de San Francisco Putla, pues esto impide tomar decisiones concretas en cuanto a la solución de daños por arrastre de escombros provenientes de deslizamientos. Ya que los análisis permiten conocer la situación sobre la dinámica de los PRM acontecidos en la cuenca y hacen posible reconocer áreas potencialmente susceptibles a estos procesos.

En este trabajo la elaboración de un inventario de deslizamientos permitirá proveer un panorama general e histórico sobre la distribución espacial de los deslizamientos y la relación con los factores que condicionan su ocurrencia. Su elaboración es el primer paso de nuestro estudio sobre susceptibilidad a PRM. El modelado estadístico de RLM usado para el análisis de susceptibilidad busca eliminar la subjetividad de la investigación al permitir obtener resultados de la probabilidad de deslizamientos. Esta metodología permite modelar las variables cualitativas y cuantitativas del área de estudio para caracterizar áreas susceptibles a PRM. La información obtenida a través del inventario y del modelado de la susceptibilidad será de gran utilidad para estudios posteriores de planeación y mitigación de los PRM.

#### **IV. HIPÓTESIS**

El uso del modelo de RLM empleando las variables físicas del área de estudio (litología, edafología, pendiente, altitud y uso de suelo y vegetación) permitirá evaluar la probabilidad de manera precisa y reproducible áreas susceptibles a presentar PRM. Así mismo, la validez y grado de precisión del modelo podrá ser demostrado estadísticamente mediante la comparación del modelo y el inventario de deslizamientos.

## V. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

### V.1 Procesos de remoción en masa

#### a) Definiciones

Existen varios términos para referirnos a los Procesos de Remoción en Masa (PRM) por ejemplo son igualmente denominados: procesos de ladera, procesos gravitacionales (Varnes 1958, 1978b), o de forma general se les conocen también como deslizamientos, que ocurren en laderas con pendiente considerable (Alcántara, 2000).

Los PRM se han definido como desplazamientos o movimientos evidentes y perceptibles, de una masa de tierra seca, roca, suelo, relleno artificial o una combinación de ellos, estos son materiales formadores de laderas (Sharpe, 1938; Varnes, 1978b); el movimiento se da través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento de los materiales que se pueden mover por caída, volcadura, extendiéndose o fluyendo bajo la fuerza de gravedad, sin la asistencia de un transporte fluido como el agua o hielo (Varnes, 1978a; Brunsden, 1979).

También son considerados como desplazamientos rápidos de suelo residual o sedimentos adyacentes de una pendiente en la que el centro de gravedad de la masa en movimiento avanza en dirección hacia abajo y hacia afuera (Terzaghi, 1950; Varnes, 1978b) sin intervenir ningún soporte activo o medio para movilizarlos ya que son impulsados por su propio peso, esto corresponde a una auto-traslación bajo la acción de la gravedad (Pedraza, 1996).

Así, el término PRM indica de forma generalizada que una ladera no es estable y describe el movimiento del material deslizado (rocas, suelo y materiales orgánicos) bajo los efectos de la gravedad (Alcántara, 2000; USGS,2008).

Actualmente en el ámbito académico el estudio de los PRM ha cobrado gran interés debido al daño potencial que puede suscitarse ante la ocurrencia de estos, por ello

existe una gran variedad de conceptos utilizados en estudios donde se involucran a los PRM de manera que resulta necesario definirlos y mencionarlos, por ejemplo se estudian desde un enfoque de:

1.- Susceptibilidad. Entendida como la propensión de una unidad de terreno para generar procesos gravitacionales y su expresión cartográfica es el mapa de susceptibilidad donde se expresa la probabilidad espacial de ocurrencia de deslizamiento dentro de un territorio (Guzzetti *et al.*, 2005; Regmi *et al.*, 2013; Conoscenti *et al.*, 2016). La susceptibilidad a los PRM expresa la mayor o menor tendencia del terreno a la generación de movimientos, entendida así como la condición general de estabilidad del terreno y un mapa de susceptibilidad es la evaluación de ocurrencia del mismo (Jiménez, 2005; Soldano, 2009).

En forma matemática, la susceptibilidad al deslizamiento es la probabilidad de la ocurrencia espacial de fallas en pendiente, dado un conjunto de condiciones geo-ambientales (Guzzetti *et al.*, 2005) por lo tanto se concluye que susceptibilidad a PRM es la propensión que existe en el terreno para generar deslizamientos bajo ciertas condiciones físicas como pueden ser: litología, edafología, uso de suelo, vegetación, pendiente etc.

2.- Vulnerabilidad. Considerada como una condición social, una medida de resistencia social o resistencia a los peligros (Blaikie *et al.*, 1994; Hewitt, 1997), la vulnerabilidad a los peligros ambientales significa la pérdida potencial o daño que puede causar la presencia de un fenómeno natural a la sociedad, de acuerdo con las condiciones de las personas o los lugares para hacer frente a los eventos naturales (Burton *et al.*, 1993; Anderson, 2000; Cutter *et al.*, 2003).

También es considerada como la incapacidad de una comunidad para enfrentar los efectos de un cambio en su medio ambiente (Romero y Maskrey, 1993), que para la comunidad signifique un riesgo. La vulnerabilidad determina la intensidad de los daños que produzca la ocurrencia del riesgo sobre la comunidad (Wilches, 1993),

pues es un factor de riesgo interno de un sujeto o un sistema expuesto a una amenaza correspondiente a su predisposición intrínseca a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño (Cardona *et al.*, 2005).

A groso modo es considerada como la condición en la que se encuentra un sujeto o una población que determina la capacidad para enfrentar daños de un factor de riesgo.

3.- Riesgo. Es la probabilidad de que un fenómeno de origen natural o humano ocurra y signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno (Wilches, 1993). Es también la contingencia o proximidad de un daño y el grado de probabilidad de que ocurra un evento amenazador que manifieste consecuencias negativas (Wilches, 1993).

Para la UNISDR (2017), el riesgo de desastre es la posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones o destrucción y daños en bienes a un sistema, una sociedad o una comunidad en un período de tiempo concreto, determinados de forma probabilística como una función de la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad.

El riesgo se forma por dos componentes principales que son la amenaza y la vulnerabilidad (Romero y Maskrey, 1993; Cardona, 2007). No hay riesgo si no existe una sociedad o individuos expuestos aunque exista una amenaza latente, la inexistencia de un grupo de población implica que no hay vulnerabilidad, de manera contraria si existe una población con alto grado de vulnerabilidad y no está expuesta a ningún peligro entonces no existirá situación de riesgo (Chaparro y Renard, 2005).

4.- Peligro. Es el riesgo o contingencia inminente de que suceda algún mal, correr peligro es estar expuesto a él (exposición al riesgo) (Wilches, 1993).

Es también un factor de riesgo físico externo a un elemento o grupo de elementos sociales expuestos, que se expresa como la probabilidad de que un fenómeno

natural se presente con cierta intensidad en un sitio, periodo de tiempo específico y que pueda afectar a la población (Cardona, 1993; García, 2002).

Para la UNISDR (2017), es la manifestación de una amenaza en un lugar concreto durante un período de tiempo específico. Los graves peligros pueden conducir a un desastre cuando se combina la existencia del peligro con otros factores de riesgo.

5.- Amenaza se entiende como un factor externo de un sistema, representado por un peligro latente que se asocia a un fenómeno físico de origen natural que puede manifestarse en un lugar y tiempo determinado produciendo efectos adversos a la sociedad y ambiente (Cardona, 1993; Blaikie, 1996). Es la probabilidad que se manifieste un evento natural (lluvias intensas, heladas, huracanes, sismo) con una cierta intensidad en un sitio y en un período de tiempo (Wilches, 1993).

La UNISDR (2017), considera que es un proceso, fenómeno o actividad humana que puede ocasionar muertes, lesiones u otros efectos en la salud, daños a los bienes, interrupciones sociales y económicas o daños ambientales. Las amenazas están asociadas predominantemente a procesos y fenómenos naturales. Algunas de origen atmosférico e hidrológico por ejemplo los ciclones tropicales, las inundaciones, incluidas las crecidas repentinas; la sequía; las olas de calor y de frío, los deslizamientos, los incendios forestales y erupciones volcánicas (UNISDR, 2017). La Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce 9 tipos de amenazas (naturales, antropógenas, socioculturales, múltiples, biológicas, ambientales, geológicas o geofísicas, hidrometeorológicas y tecnológicas). En este sentido los PRM son considerados una amenaza de origen geológico que pueden ocasionar daños en la estructura de las viviendas y pérdidas económicas importantes.

#### **b) Clasificaciones y tipos de movimiento**

Existen varias clasificaciones de deslizamientos propuestas con base en enfoques donde intervienen diversos factores. Estas clasificaciones toman en cuenta

aspectos morfológicos, tipo de movimiento, velocidad, tamaño y tipo de materiales asociados. En general las clasificaciones más distinguidas y empleadas son aquellas que toman en cuenta el tipo de movimiento. Algunas de las más reconocidas son:

Clasificación de **Sharpe (1938)**, esta clasificación toma en cuenta la velocidad del movimiento de los deslizamientos, desde lentos, hasta casi imperceptibles. En esta clasificación se señala que la cantidad de agua y hielo en la masa de roca o suelo, determina la velocidad del material deslizado.

Clasificación de **Cruden y Varnes (1996)**, basada en Varnes (1978a), tiene dos principales enfoques el primero de ellos describe el tipo de material involucrado y el segundo describe el tipo de movimiento. En este sentido los materiales que se toman en cuenta son: roca, tierra, suelo, barro y escombros, y con respecto al tipo de movimiento se refiere a caídas, vuelcos, deslizamientos y flujos.

Clasificación de **Hutchinson (1988)**, es más utilizada en las ciencias geotécnicas, pues está enfocada principalmente en la morfología de los movimientos de ladera. Su esquema de clasificación incluye el material (tierra o roca), movimiento (flujo o deslizamiento), la velocidad del movimiento y el contenido de hielo y agua en las masas.

Otra clasificación es la de **EPOCH (1993)**, está basada en Varnes (1978a) y Hutchinson (1988), es una clasificación europea, desarrollada por el Programa "Ocurrencia Temporal y Pronóstico de Deslizamientos en la Comunidad Europea" (EPOCH). La clasificación es simple y adecuada para las condiciones europeas. Esta clasificación utiliza los términos de caída, vuelco, deslizamiento (rotacional), deslizamiento (traslacional), extensión lateral, flujos y movimientos complejos (por ejemplo avalancha de roca), en la cual también se toma en cuenta el mecanismo de movimiento y el tipo de material involucrado, a diferencia de la anterior hace un ajuste en los mecanismos de los movimientos y materiales.

En México el Centro Nacional de Prevención de Desastres (**CENAPRED**), establece una clasificación de deslizamientos de acuerdo a la forma en que los materiales son transportados dividiéndolos en caídas o derrumbes, flujos y deslizamientos (CENAPRED, 2016), y maneja algunos conceptos básicos para abordar los temas de susceptibilidad y peligro, con el fin de tener una concepción más amplia de los problemas de inestabilidad que pueden presentarse en las laderas naturales. También muestra una descripción de los movimientos, la forma y el tipo de materiales o formaciones geológicas en los que son más frecuentes.

El Departamento de Recursos Naturales (DNR) de Washington (WS) en su protocolo de Zonificación de Peligro por Deslizamientos (LHZ), (**DNR-WS-LHZ**) (2006), ha establecido una guía para la clasificación de los deslizamientos, en función de los datos disponibles y recopilados en campo de cada uno de ellos (Legorreta *et al.*, 2014b). Esta clasificación define una estructura jerárquica. El primer nivel de jerarquía es la profundidad, ya que pueden ser superficiales o profundos. En el segundo nivel de jerarquía diferencia el tipo de movimiento, pueden ser flujos de escombros, deslizamientos de escombros, caídas o desprendimientos y avalanchas de nieve. Esta clasificación simplifica el sistema de Cruden y Varnes (1996), al listar sólo la clasificación primaria de un deslizamiento determinado (Legorreta *et al.*, 2014b).

En esta investigación para la clasificación de los deslizamientos se usa el protocolo DNR-WS-LHZ, empleada por Legorreta *et al.* (2014b), para estudios en México. Esta clasificación está desarrollada con el fin de proporcionar métodos prácticos y estandarizados para la construcción de inventarios de deslizamientos y su correcta clasificación, que conlleva a la producción de mapas de laderas inestables y contribuye de manera esencial en la elaboración de un mapa de susceptibilidad a PRM, que es el objetivo de la investigación.

De acuerdo con la clasificación (DNR-WS-LHZ) los tipos de movimientos observados en la cuenca El Zaguán son:

**1.- Deslizamientos superficiales.** Son fallas en laderas dentro de la zona de enraizamiento del bosque, generalmente tienen menos de tres metros de profundidad (Figura 1) y se encuentran por encima de la roca madre y sedimentos, incluyen suelo, coluvión, aluvión u otros sedimentos como lechos, el movimiento tiende a ser rápido o de corta duración (Washington, DNR, 2006). En esta clasificación se incluyen los deslizamientos de escombros, flujos de escombros y caídas o desprendimientos.



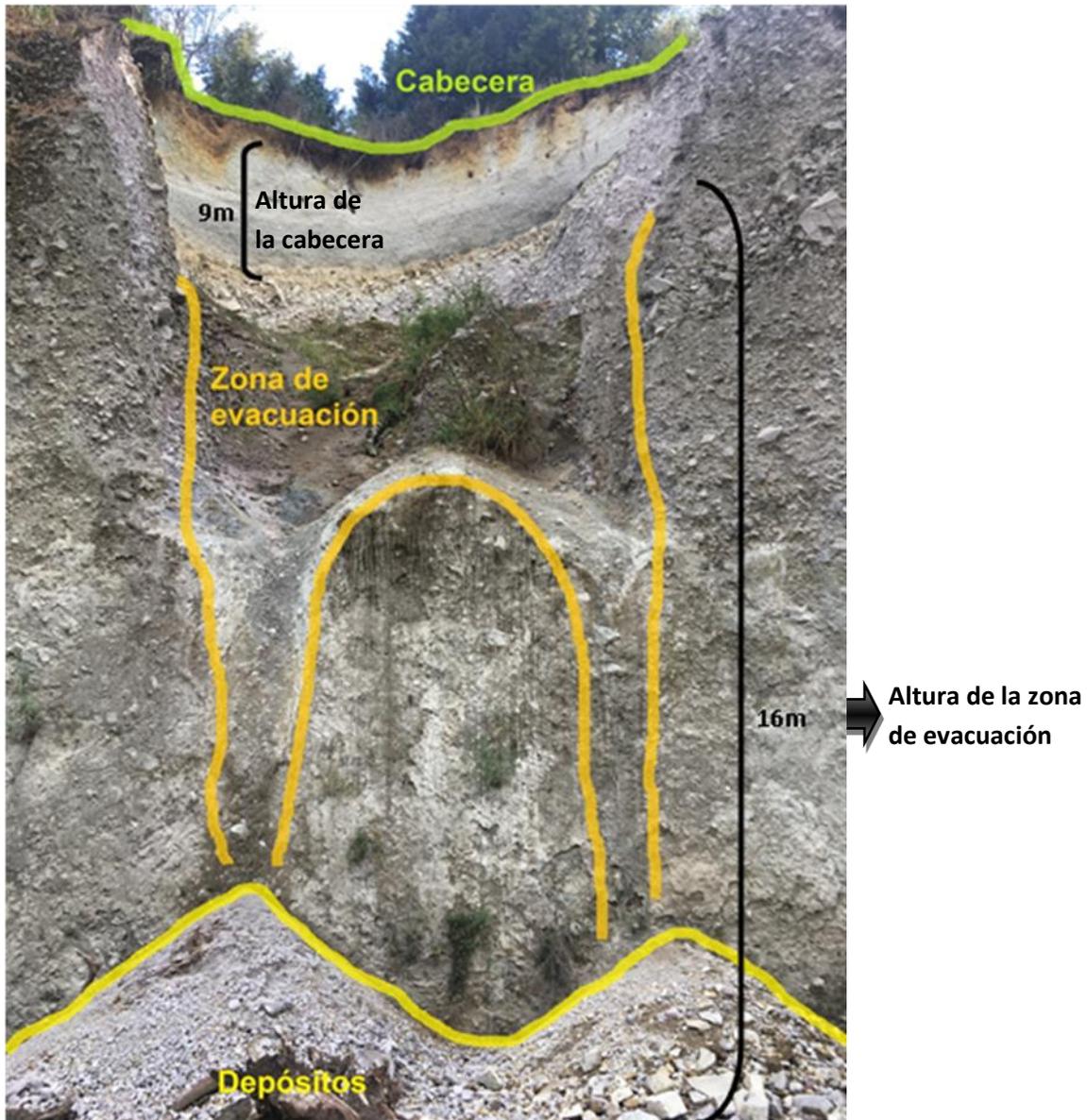
**Figura 1.** Deslizamiento superficial de escombros. Localizado a 3,306 m.s.n.m, en el margen izquierdo del cauce principal. El deslizamiento tiene 5 m de altura, 68 m de longitud y de entre 0.5 a 1.5 m de profundidad.

**1.1.- Deslizamientos de escombros.** Se forma a partir de la desagregación de materiales en una pendiente pronunciada (Figura 2a y b). Implica un movimiento rápido del suelo y del regolito sobre el lecho rocoso. En un deslizamiento de escombros queda la pared de la ladera expuesta (Washington, DNR, 2006).



**Figura 2.** Deslizamientos de escombros. a) Localizado a 3,130 m.s.n.m, en el margen derecho del cauce principal. El deslizamiento tiene 30 m de altura, 206 m de longitud y 2 m de profundidad; b) Localizado a 3,105 m.s.n.m, en el margen izquierdo del cauce principal. El deslizamiento tiene 40 m de altura, 330 m de longitud y 3 m de profundidad.

**1.2.- Flujo de escombros.** Es un deslizamiento poco profundo que fluye dentro de un canal formado por paredes de un valle con afluente de bajo orden o por diques propios. Consta de suelo, cantidades variables de agua y desechos leñosos (Figura 3). A menudo tiene un largo camino de salida, en esta categoría se consideran los flujos de lodo, torrentes de escombros, lodos hiper-concentrados y deslizamientos por rotura de presas (Washington, DNR, 2006).



**Figura 3.** Deslizamiento de flujo de escombros. Localizado a 3,195 m.s.n.m, en el margen derecho del cauce principal. El deslizamiento tiene 25 m de altura, 16 m de longitud y 2 m de profundidad.

**1.3.- Caídas y desprendimientos.** Son movimientos rápidos de bloques individuales de suelo o roca que se desprenden de una pendiente pronunciada (Figura 4). El suelo tiende a desintegrarse cuando caen, mientras que las rocas y los bloques al caer rebotan y ruedan un poco en pendientes suaves antes de detenerse. Se distinguen por la rotación hacia delante de bloques de suelo o roca bajo la acción de la gravedad y son comunes en zonas de montaña (Washington, DNR, 2006; García, 2017).



**Figura 4.** Caída de roca. Localizado a 2,969 m.s.n.m, en el margen izquierdo del cauce principal. El deslizamiento tiene 24 m de altura, 53 m de longitud y 2 m de profundidad.

**2.- Deslizamientos de asentamiento profundo.** Son aquellos en los que la mayoría del área del plano de deslizamiento o zona de falla se encuentra por debajo de la máxima profundidad de enraizamiento de los árboles, contienen regolitos rocas erosionadas y/o roca madre, así como suelos superficiales (pedogénicos) (Washington, DNR, 2006).

Estos deslizamientos abarcan grandes áreas (Figura 5) y se asocian comúnmente con debilidad geológica o materiales poco consolidados.

Un deslizamiento de asentamiento profundo puede persistir durante algunos años. Las prácticas forestales y el cambio de uso del suelo pueden tener un impacto en la actividad de los deslizamientos de asentamiento profundo al causar cambios en la morfología o hidrología de la pendiente y la construcción de carreteras puede aumentar el potencial de falla (Washington, DNR, 2006).



**Figura 5.** Deslizamiento de asentamiento profundo. Localizado a 2,829 m.s.n.m. El deslizamiento tiene 38 m de altura, 328 m de longitud y 3 m de profundidad. No en inventario.

En general todos estos deslizamientos (superficiales y de asentamiento profundo) se pueden desencadenar por varias razones; sacudidas sísmicas, presencia de humedad durante varios años, precipitación pluvial extrema que puede ir acompañada de humedad previa, carga hidrológica de la pendiente, peso adicional en el escarpe de la cabecera del deslizamiento y modificación de la pendiente (Washington, DNR, 2006).

En México se han realizado algunas investigaciones donde se ha empleado esta clasificación (DNR-WS-LHZ) para estudios sobre análisis de susceptibilidad a PRM,

inventarios multitemporales y zonación de peligros por procesos gravitacionales (Legorreta *et al.*, 2014a; Alanís, 2018). En la cuenca El Zaguán no se ha utilizado este protocolo, pero sí en cuencas aledañas al Zaguán, por ejemplo García (2017), en su estudio de susceptibilidad geomorfológica a deslizamientos en la cuenca la Ciénega, ha clasificado deslizamientos y elaborado su inventario utilizando este protocolo.

## V.2 Susceptibilidad a procesos de remoción en masa y enfoques

Como se mencionó anteriormente la susceptibilidad a deslizamientos ha cobrado un interés significativo en los últimos años al permitir analizar la predisposición del relieve a deslizarse. Esta predisposición está dada por los elementos que conforman el ambiente físico como la litología, pendiente, geomorfología y uso de suelo de un área.

En este sentido existen diferentes enfoques para llevar a cabo la evaluación de la susceptibilidad a PRM: 1) De forma cualitativa (Heurístico) es decir basado en el conocimiento empírico de los expertos; 2) Semi-cuantitativa, porque emplea la combinación de métodos cuantitativos estadísticos con la experiencia del investigador, buscando eliminar la subjetividad de la investigación; y 3) Cuantitativa, basada en modelos numéricos (Determinísticos) sin la intervención subjetiva del investigador (Guzzetti *et al.*, 2005; Krishnan *et al.*, 2005).

### a) Enfoque heurístico

Un enfoque Heurístico se refiere al conocimiento *a priori* sobre la utilización de reglas empíricas para el estudio de un tema o problema y su solución. En este enfoque, el análisis y las estrategias se basan principalmente en la experiencia y conocimiento del investigador.

La evaluación cualitativa (heurística) de los deslizamientos, involucra la comparación del propio conocimiento adquirido de las características físicas

(geomorfológicas, geológicas, etc.), antrópicas (cambio de uso del suelo, deforestación, etc.) y del trabajo de campo de una zona de estudio. Este enfoque es práctico para los deslizamientos causados por diferentes mecanismos, ya que los expertos realizan un análisis exhaustivo de los factores causales y su relación con el área de estudio (Aleotti y Chowdhury, 1999; Ruff y Czurda, 2008; Castellanos *et al.*, 2008).

El enfoque heurístico más común se basa en analizar el inventario de deslizamientos para identificar sitios con ocurrencia de los mismos, bajo sus características geológicas y geomorfológicas. Por ello los autores no recomiendan el uso de métodos heurísticos para la evaluación y zonación cartográfica del peligro, sino solo para la zonificación de la susceptibilidad (Krušić *et al.*, 2017).

Desafortunadamente los estándares específicos para la realización de un inventario de deslizamientos no existen, idealmente la técnica a emplear debe prepararse y acordarse antes de comenzar la cartografía. En la práctica la técnica a menudo cambia, es decir se afina sobre la marcha del trabajo ya que las clases de deslizamiento se agregan, eliminan, dividen o fusionan para ajustarse a los objetivos del inventario, es aquí donde retoma gran importancia la experiencia, habilidades y preferencias del investigador, y los recursos disponibles para completar el trabajo (Soeters y VanWesten, 1996; Guzzetti, 2006).

Por lo anterior, en esta investigación se considera que la construcción del inventario de deslizamientos, principalmente forma parte del enfoque Heurístico ya que en una primera instancia se realizó la interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite; y con técnicas de fotointerpretación se obtuvo una primera estimación de la susceptibilidad a PRM. Aunado a lo anterior, el inventario se complementó con el trabajo de campo para evitar la sobre-evaluación y la subjetividad de la investigación.

## b) Enfoque estadístico

Se refiere a una secuencia de procedimientos para el manejo de los datos cualitativos y cuantitativos de la investigación. Dicho manejo de datos tiene como propósito la comprobación de una parte de la realidad, de una o varias consecuencias verificables deducidas de la hipótesis general de la investigación (Reynaga, 2003).

Este enfoque asume que los deslizamientos pueden ser evaluados en una zona debido a que las mismas condiciones que produjeron deslizamientos en el pasado existen actualmente y seguirán existiendo en el futuro (Chung y Fabbri, 2005). Los modelos estadísticos son adecuados para determinar la presencia o ausencia de deslizamientos pues proporcionan estimaciones cuantitativas de "dónde" se espera que ocurran, se basan en información detallada sobre la distribución de deslizamientos pasados, en conjunto con información temática ambiental. El primero se convierte en la variable dependiente y el segundo en las variables independientes para el modelado estadístico (Carrara *et al.*, 1999; Guzzetti *et al.*, 2005; Hernández, 2008).

Ahora bien, cualquier modelo empleado en determinar la susceptibilidad al deslizamiento en una región necesita una validación adecuada, esta validación establece la calidad del modelo (con base en la confiabilidad, solidez, el grado de ajuste y la capacidad de evaluación) (Guzzetti *et al.*, 2005).

La calidad y confiabilidad del modelo de susceptibilidad al deslizamiento se determina utilizando pruebas estadísticas. Por lo anterior se considera que los métodos estadísticos son adecuados, debido al nivel de confiabilidad en los resultados y a las pruebas a las que deben someterse para poder ser considerados como modelos válidos. Algunos ejemplos de modelos estadísticos son los siguientes: Regresión Logística Múltiple (RLM), Regresión Lineal Simple (RLS) y Múltiple y aplicaciones de SIG como SINMAP (Legorreta *et al.*, 2010) y LOGISNET (Legorreta *et al.*, 2018).

### c) Enfoque determinístico

Los métodos determinísticos se asocian a prácticas de ingeniería debido al detalle y exactitud que requieren los datos al ser recabados, lo que eleva el costo y el tiempo en la recaudación de los datos (Cervi *et al.*, 2010; Ciurleo *et al.*, 2017).

Dado que los modelos deterministas o de base física se sustentan en las leyes físicas, los parámetros utilizados se pueden determinar en el campo o en el laboratorio y son específicos del sitio a estudiar, es decir su aplicación es adecuada en zonas reducidas debido a que demandan un gran número de datos y cálculos geotécnicos y solo son aplicables cuando las condiciones geomorfológicas y geológicas son homogéneas en toda en el área de estudio. Este tipo de trabajos se enfoca en analizar el desarrollo y modelado de un solo tipo de deslizamiento (Cervi *et al.*, 2010; Ciurleo *et al.*, 2017).

De tal modo que la aplicación de los modelos deterministas para la zonificación de áreas con deslizamiento en regiones grandes no ha tenido un desarrollo extenso, debido a la heterogeneidad regional de las variables geotécnicas ya que el cálculo de estas variables en áreas extensas implica un número extremadamente grande de cálculos y costos (Cervi *et al.*, 2010; Armas *et al.*, 2013; Ciurleo *et al.*, 2017).

Algunos ejemplos de los modelos determinísticos que se usan para elaborar mapas de riesgo y que son usados en el diseño de estructuras de ingeniería son: modelados hidrológicos, factor de seguridad de estabilidad de laderas, procesos de jerarquía analítica, índice de estabilidad y modelos de pendiente infinita (Cervi *et al.*, 2010; Armas *et al.*, 2013; Ciurleo *et al.*, 2017).

#### d) Modelo de Regresión Logística Múltiple

En la presente investigación se prefiere el uso del modelo de Regresión Logística Múltiple (RLM) que a continuación se describe.

De acuerdo con los enfoques de la estadística (inferencial y descriptiva), la RLM se basa en el enfoque inferencial, catalogada como una técnica de análisis multivariante, que es aplicada en el análisis de datos enfocados a describir la relación entre una variable dependiente y una o varias independientes. El modelo de regresión logística es utilizado para estudios en los que la variable dependiente es de tipo dicotómica es decir que solo corresponda a dos categorías y que además estos valores sean excluyentes entre sí, por ejemplo la presencia o ausencia de áreas con deslizamientos. Las variables independientes pueden ser categóricas o de razón (Wayne, 2004; Hair *et al.*, 2010; Castro, 2014).

La RLM es utilizada para explicar la relación entre una variable dependiente y una o varias explicativas, en efecto, la esencia del análisis es la forma de calcular el comportamiento de una variable (dependiente) con base en la evaluación de una o varias variables de probabilidad (independientes) (Field, 2009; Samaniego, 2014). Pues su objetivo es modelar la influencia de las variables independientes y establecer la probabilidad de ocurrencia de un suceso particular (deslizamientos) (Muñoz, 2017).

Previo al análisis de RLM se deben hacer pruebas de colinealidad entre variables independientes. La colinealidad existe cuando hay una fuerte correlación entre dos o más variables en un modelo de regresión. Pues indica el grado que puede ser explicada una variable mediante otra o bien que dos o más variables estén midiendo y explicando lo mismo. Si existe colinealidad será difícil interpretar los coeficientes de la regresión logística (Field, 2009; Hair *et al.*, 2010).

Si los datos de las variables evaluadas muestran valores de VIF mayor a 10 y de tolerancia inferior a 1 indicará un problema de colinealidad y motivo de preocupación para interpretar los resultados (Myers, 1990; Menard, 1995, Field, 2009).

Posteriormente se debe elegir el método para correr la RLM, por ejemplo el método paso a paso. Si se utiliza un método paso a paso, entonces el método de razón de verosimilitud hacia atrás es preferible al método hacia adelante. Esto se debe a que se compara el modelo base con el modelo resultante cuando se elimina una o varias variables independientes (Field, 2009).

El método de razón de verosimilitud hacia atrás comienza con todas las variables independientes incluidas. SPSS prueba si alguna de las variables puede eliminarse del modelo sin tener un efecto sustancial en la forma en que el modelo se ajusta a los datos observados.

La primer variable independiente que se eliminará será la que tenga el menor impacto en cómo el modelo se ajusta a los datos (Field, 2009). Pues si la eliminación de esa variable hace una diferencia significativa en la forma en que el modelo se ajusta a los datos observados, SPSS retiene esa variable (porque el modelo es mejor si se incluye la variable). Sin embargo, si la eliminación de la variable hace poca diferencia en el modelo, entonces SPSS rechaza esa variable (Field, 2009).

Este método de paso a paso se utiliza en situaciones en las que no existen investigaciones previas que indiquen que variables son buenas evaluadoras y que sirvan para elaborar el modelo espacial, en este caso, el de susceptibilidad a PRM (Agresti y Finlay, 1986; Menard, 1995; Field, 2009).

Para la elaboración del modelo espacial de la susceptibilidad a PRM se debe usar la fórmula [1] de RLM (Field, 2009).

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n)}} \quad [1]$$

La fórmula 1 expresa la probabilidad de que Y ocurra, pues hace referencia a la probabilidad de pertenencia a una clase; en este caso, Y indica la probabilidad de que un pixel pertenezca a la clase (deslizamientos). El valor resultante de la

ecuación varía entre 0 y 1. Un valor cercano a 0 significa que es muy poco probable que  $Y$  ocurra y un valor cercano a 1 significa que es probable que  $Y$  ocurra. Pues se calcula la probabilidad de que  $Y$  ocurra dados los valores conocidos de  $X_1$  ó  $X_n$  (Field, 2009).

Donde:

$b_0$  = es la constante del modelo

$b_1$  = es igual al coeficiente para la variable ( $X_1$ )

$X_1$  = es la variable espacial 1 (pendiente, edafología, etc...)

$b_2$  = es igual al coeficiente para la variable ( $X_2$ )

$X_2$  = es la variable espacial 2

$b_n$  = es igual al coeficiente para la variable ( $X_n$ )

$X_n$  = es igual a la variable espacial n (hasta llegar al número de variables incluidas en el modelo)

$e$  = es la base de logaritmos naturales.

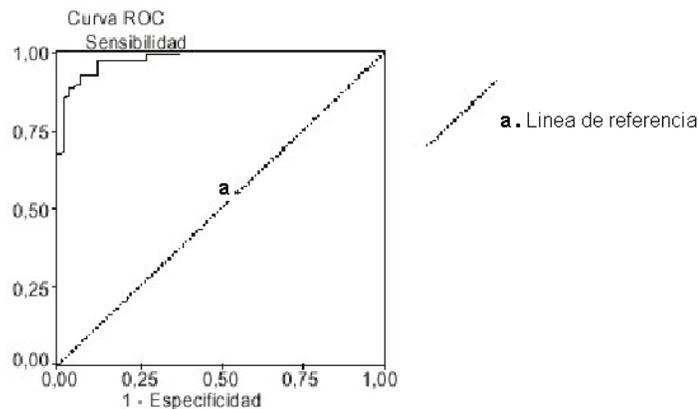
#### d.1) La curva COR

Una vez obtenido el análisis de RLM se debe realizar la evaluación del modelo. Para ello se utilizan pruebas de validación. Una de ellas es el análisis de la curva característica operativa del receptor (ROC, por sus siglas en inglés Receiver Operating Characteristic) (Gorsevski *et al.*, 2006; Frattini *et al.*, 2010).

La curva ROC muestra los valores estadísticos de la sensibilidad y especificidad (Figura 6).

El área bajo la curva ROC indica el rendimiento del modelo, cuanto mayor sea, mejor será la calidad del mismo, cuando la curva ROC se aleja de la línea de referencia (Figura 6) indica que el modelo es capaz de discriminar áreas susceptibles de las que no lo son, pues estará cerca de la esquina superior izquierda; en un caso contrario si la curva se acerca a la línea de referencia demostrará que el modelo no

es capaz de diferenciar áreas susceptibles. Si el modelo es perfecto, el área bajo curva en la gráfica tendrá un valor de 1, mientras que un valor cercano al 0.50 indica inexactitud en el modelo (Lee, 2005 y 2007; Fawcett, 2006; Frattini *et al.*, 2010; Günther *et al.*, 2014; Legorreta *et al.*, 2018).



**Figura 6.** Ejemplo de curva ROC (Receiver Operating Characteristic), Fuente; Domínguez y González (2002).

También la curva ROC permite indicar y comprobar el punto de corte más óptimo para discriminar áreas susceptibles tomando en cuenta la relación entre sensibilidad y la especificidad. Este valor se obtiene mediante el índice de Youden que se refiere al valor obtenido de:  $\text{sensibilidad} + (\text{especificidad} / -1)$ . Un valor de 1 o cercano a él indicará el punto de corte más óptimo discriminante (Cerdeña y Cifuentes, 2012).

#### d.2) Pruebas de precisión

Para que un modelo pueda ser aceptado debe cumplir con criterios de validez como su idoneidad y eficiencia (conceptual y matemática), deben describir el comportamiento del tema a estudiar, su robustez para poder hacer cambios en la entrada de los datos (es decir, la sensibilidad de los datos) y su precisión para evaluar los datos observados (Horning, 2004; Frattini *et al.*, 2010).

Algunas pruebas de precisión del modelo son: la precisión global del modelo (Overall accuracy), la precisión del productor (Producer's accuracies) y la precisión del usuario (User's accuracies). Estas pruebas se pueden realizar por medio de una tabla de contingencia (Horning, 2004).

La tabla de contingencia (Tabla 1) consiste en la comparación de los datos observados (inventario) y los resultados del modelo reclasificados en dos clases (presencia o ausencia). Pues estas estadísticas de precisión estiman si hay una sobre-evaluación en el modelo (Horning, 2004; Frattini *et al.*, 2010).

La sobre-evaluación en los modelos estadísticos como la RLM, se debe a que áreas "sin deslizamientos" se clasifiquen incorrectamente como áreas "con deslizamientos", pues los valores de las estadísticas de precisión están influenciados por la clase más común que usualmente es la clase "sin deslizamientos". Esto se debe a que en los modelos estadísticos que evalúan la susceptibilidad a PRM, el área cartográfica del inventario de deslizamientos es más pequeña en relación con toda el área de estudio (Legorreta y Bursik, 2009; Legorreta *et al.*, 2014b; Legorreta *et al.*, 2018).

En la literatura la sobre-evaluación es aceptable en los modelos estadísticos como la RLM pues los modelos son en sí una guía para calcular áreas con susceptibilidad a PRM. Una sobre-evaluación se da generalmente en áreas que tienen las condiciones necesarias para deslizarse en el futuro (Legorreta y Bursik, 2009; Legorreta *et al.*, 2014b; Legorreta *et al.*, 2018). Pues el límite aceptable de la sobre-evaluación en los modelos estadísticos para el cálculo de la susceptibilidad a PRM se estimará cuando el modelo se someta a diversas evaluaciones y se analice su comportamiento a diferentes escalas (Legorreta y Bursik, 2009).

A partir de los datos de la tabla de contingencia se pueden calcular las siguientes estadísticas de precisión:

**1.- Precisión global del modelo** (*Overall accuracy*). Se calcula mediante el número de píxeles correctamente clasificados en las dos clases (presencia o ausencia) entre el número total de píxeles (Horning, 2004; Lillesand *et al.*, 2007). Por ejemplo en la tabla 1 este valor se obtuvo sumando los píxeles de la clase verdaderos positivos (+/+) con los verdaderos negativos (-/-) entre el gran total de píxeles (E) de toda la cuenca;  $((+/+)+(-/-)/E)$ .

**2.- Precisión de los productores** (*Producer's accuracies*). La precisión del productor es una precisión basada en referencias pues se obtiene al observar el número de píxeles correctamente clasificados por clase entre el número total de píxeles verdaderos para esa clase (Horning, 2004; Lillesand *et al.*, 2007). Por ejemplo en la tabla 1 este valor se calculó tomando en cuenta los píxeles clasificados correctamente como inestables de la categoría verdaderos positivos (+/+) entre el total de píxeles verdaderos para esa categoría;  $((+/+)/C)$ .

**3.- Precisión del Usuario** (*User's accuracies*). La precisión del usuario es una precisión basada en mapas donde se obtiene al observar los datos de referencia de una categoría y determinar el porcentaje de datos correctos para cada categoría, pues se calcula con el número de píxeles clasificados correctamente como inestables entre el total de píxeles clasificados por el modelo para esa clase. Por ejemplo en la tabla 1 se calculó utilizando los píxeles de la clase verdaderos positivos (+/+) entre el total para esa clase;  $((+/+)/A)$ .

Cuando el modelo es estadísticamente perfecto estas métricas de precisión tienen un valor máximo de 1 o 100% pues el modelo puede evaluar correctamente el 100% de los casos (Lillesand *et al.*, 2007, Legorreta *et al.*, 2018).

**Tabla 1.** Tabla de contingencia utilizada para la evaluación del modelo. Fuente; Frattini et al. (2010).

Modelo	Inventario		
	Clase 1 (+) Con presencia o inestable	Clase 0 (-) Sin presencia o estable	TOTAL
Clase 1 (+) Con presencia o inestable	(+ +) Verdadero positivo TP	(+ -) Falso positivo FP Error de tipo I	A
Clase 0 (-) Sin presencia o estable	(- +) Falso negativo FN Error de tipo II	(- -) Verdadero negativo TN	B
TOTAL	C	D	Gran Total (E)

La aplicación del método de RLM se ha hecho en diferentes estudios, por ejemplo a nivel mundial el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) ha publicado los trabajos de Jager y Wieczorek (1994), donde se ha modelado la susceptibilidad a deslizamientos aplicando el modelo de RLM tomando como base el inventario de deslizamientos. En México destacan los estudios de Legorreta y Lugo (2014a); Castro (2014); Aceves et al. (2016); Legorreta et al. (2015a, 2015b, 2016 y 2018) donde se ha aplicado el modelo para estudios forestales y de susceptibilidad a deslizamientos, en el volcán Pico de Orizaba y en el estado de Oaxaca. En la cuenca El Zaguán no hay trabajos donde se involucre el modelo de RLM, pero sí en la cuenca aledaña, La Ciénaga, donde ya se ha aplicado el modelo (Castro y Legorreta, 2018).

### V.3 Inventario de deslizamientos

#### a) Tipos de Inventarios

El estudio de la susceptibilidad a deslizamientos generalmente se inicia mediante la cartografía del inventario de deslizamientos como base para la validación del mapa de susceptibilidad, ya que describe la ubicación, datos físicos (profundidad, altura, etc.,) datos de ocurrencia y los tipos de movimientos que han dejado rastros discernibles en un área (Chong, 2015).

Esencialmente un inventario se prepara de acuerdo con datos derivados de archivos históricos, investigaciones geológicas y geomorfológicas, recolección de datos en campo e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite (Guzzetti *et al.*, 2012; Miller y Degg, 2012).

La recopilación de datos históricos y la construcción de una base de datos espaciales de cada deslizamiento es el objetivo principal de un inventario ya que ayuda a comprender su distribución en el tiempo y espacio, (Washington DNR, 2006; Guzzetti *et al.*, 2012; Regmi *et al.*, 2013), dado que las ocurrencias de deslizamientos en el pasado y en el presente son claves para calcular la probabilidad de ocurrencia espacial futura (Steger *et al.*, 2016). Es por ello que la precisión posicional es considerada como un requisito mínimo y de mucha importancia (Petschko y Glade, 2015), pues permite estudiar la relación entre la distribución de deslizamientos y los factores que condicionan su ocurrencia (Guzzetti *et al.*, 2012; Youssef *et al.*, 2014; Lombardo *et al.*, 2015).

Los inventarios de deslizamientos son preparados bajo un enfoque empírico y las técnicas que se eligen para su construcción dependen de los objetivos, del tipo de investigación, así como de las características de la zona de estudio y de la información disponible para realizar el trabajo, pues determinan la precisión de los resultados en investigaciones posteriores y pueden ser de diferentes tipos (Guzzetti

*et al.*, 2012; Zieher *et al.*, 2016). De acuerdo con Galli *et al.*, (2008) existen tres tipos de inventarios (reconocimiento, geomorfológicos y multitemporales).

**Inventarios de reconocimiento**, aquí la cartografía está destinada a obtener información general sobre la distribución y los tipos de movimientos en el área de estudio. El inventario se prepara mediante la interpretación de deslizamientos observados en fotografías aéreas, esta interpretación puede ser asistida localmente por puntos de control en campo y por expertos. En este tipo de inventario se representa a los deslizamientos como puntos sin incluir sus partes y medidas. Los inventarios puntuales proporcionan conocimiento intuitivo sobre la distribución espacial de deslizamientos que son útiles para las estadísticas de distribución espacial en investigaciones posteriores, pero no hay información sobre aéreas y volúmenes (Chong, 2015).

**Inventario geomorfológico**, se caracteriza porque la interpretación la hacen los expertos geomorfólogos, pues relacionan la actividad de los deslizamientos con las características morfográficas, morfométricas y morfogenéticas del área de estudio. Los deslizamientos son obtenidos mediante la interpretación de imágenes satelitales y/o fotografías aéreas y trabajo de campo, y representados cartográficamente como polígonos que representan unidades o áreas homogéneas del paisaje. A diferencia del inventario de reconocimiento, los deslizamientos se identifican basándose en criterios de morfológicos y morfogenéticos (Galli *et al.*, 2008).

**Inventario multitemporal**, en este tipo se requiere la interpretación de varios conjuntos de fotografías aéreas de diferentes temporalidades (Galli *et al.*, 2008). Los deslizamientos atribuidos a una sola fecha se cartografían por separado es decir se obtiene una capa de información de deslizamientos por cada periodo de tiempo. La combinación de las diferentes capas representa en sí el mapa de inventario de deslizamientos multitemporal. En estos inventarios se puede hacer una clasificación

de los deslizamientos de acuerdo a su edad pues se puede hablar de deslizamientos jóvenes, viejos o antiguos (Galli *et al.*, 2008).

En general estos tipos de inventario (reconocimiento, geomorfológico y multitemporal) permiten la clasificación de los deslizamientos utilizando la versión simplificada de Varnes (1978a en Guzzetti y Cardinali, 1990; Antonini *et al.*, 2002).

#### **b) Criterios metodológicos para la construcción de un Inventario**

Como se ha mencionado, existe una variabilidad de metodologías empleadas para la construcción del inventario de deslizamientos. En este sentido Chong (2015), propone y describe algunos criterios metodológicos que deben seguirse para la preparación de inventarios de deslizamientos los cuales se explican a continuación:

**I.- Investigaciones de campo.** Este método fue ampliamente utilizado antes de que surgiera la tecnología de los SIG. Con base en observaciones de campo, los investigadores delimitan y ubican deslizamientos en cartografía topográfica, geológica u otra cartografía temática y así realizan mapas de deslizamientos asociados a la susceptibilidad (Harp *et al.*, 2011a). Este criterio resulta tener algunas limitaciones ya que el uso de cartas topográficas es adecuado para identificar deslizamientos de tamaños muy grandes y a menudo los deslizamientos pequeños son ignorados lo que resulta poco práctico para poderse usar en mapas de escala pequeña ya que se pueden obtener resultados incompletos y resulta difícil generar un inventario detallado.

**2.- Interpretación visual de imágenes de satélite y fotografías aéreas.** El tipo y la resolución de las imágenes de satélite o fotografías empleadas en el análisis dependen en gran medida del tamaño del área de estudio, de los sensores usados, del presupuesto para el proyecto y de los alcances de los objetivos en cada investigación (Harp *et al.*, 2011b; Chong, 2015).

Hoy en día entran en servicio una gran cantidad de satélites comerciales que ponen a disposición imágenes satelitales de alta resolución, por ello se han elaborado inventarios de deslizamientos utilizando imágenes de satélite y fotografías aéreas, este método permite determinar la ubicación geográfica y la distribución espacial de los deslizamientos, pues pueden ser manipuladas mediante los SIG (Chong, 2015).

El análisis de la textura y las diferencias de tono mediante el uso, procesamiento e interpretación visual de las imágenes de satélite y de las fotografías aéreas han ahorrado una gran cantidad de trabajo de campo y se ha convertido en el principal método para la preparación de inventarios (Chong, 2015).

**3.- Identificación y digitalización de deslizamientos.** Esta técnica acompaña a la interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas, es una etapa avanzada de los inventarios ya que con el uso los SIG los inventarios de deslizamientos se pueden digitalizar. Los inventarios digitales resultantes tienen un alto grado de utilidad, pues son la base de análisis posteriores de susceptibilidad, evaluación de riesgos y de deslizamientos (Chong, 2015).

Todos los deslizamientos deben ser cartografiados, siempre y cuando puedan ser reconocidos en imágenes o fotografías (Harp *et al.*, 2011a; Chong, 2015). Los límites de los deslizamientos deben ser delineados y ubicados ya que la precisión es esencial en la calidad del inventario. Con el uso de los SIG, se permite digitalizar las partes de un deslizamiento (cabeceras, las zonas de evacuación y depósitos). Finalmente, los deslizamientos deben ser cartografiados como polígonos que representen sus verdaderas formas (Harp *et al.*, 2011a; Chong, 2015).

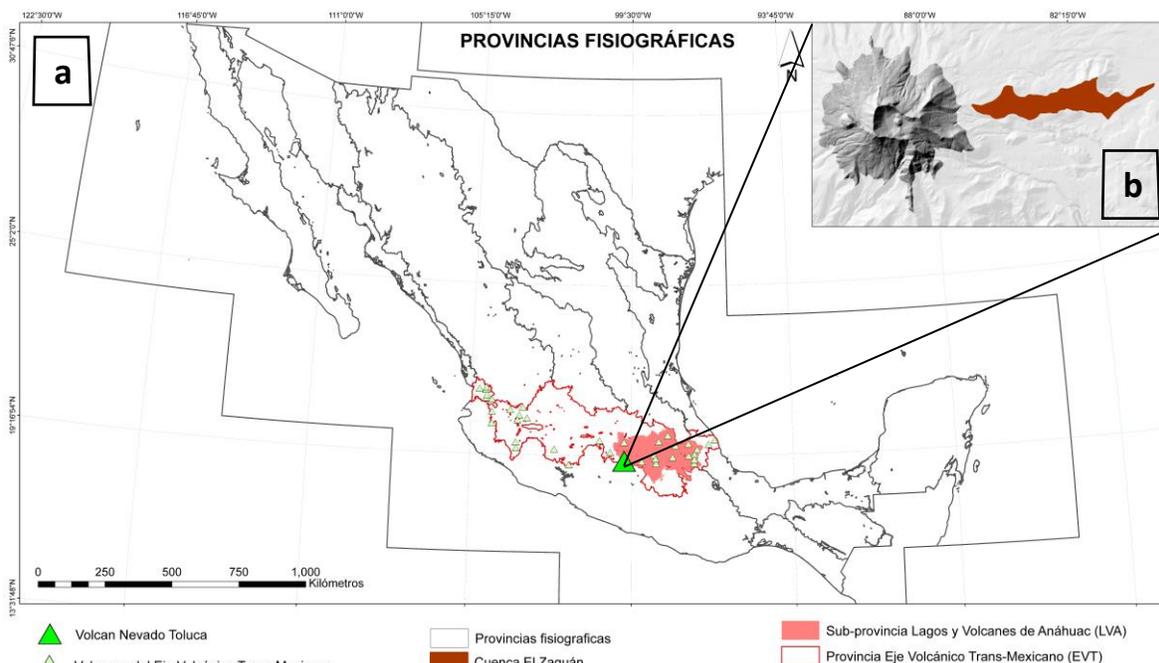
**4.- Construcción de la base de datos de atributos de deslizamientos.** Un inventario debe contener una base de datos de los atributos de los deslizamientos, como los geométricos (largo, altura y profundidad), su altitud, clasificación y otros datos recabados en campo y gabinete como: la fecha y hora de verificación, la edad aproximada del deslizamiento (antiguo, reciente o viejo), partes identificables del

deslizamiento, cuestiones temáticas de su alrededor como uso de suelo y vegetación, etc. Para aquellos con enfoque geomorfológico se pueden incluir aspectos como ángulo de la pendiente, aspecto de la pendiente, geometría de la ladera, forma del relieve, etc. (Galli *et al.*, 2008; Chong, 2015).

## CAPITULO 1. AREA DE ESTUDIO: Marco geográfico y geológico

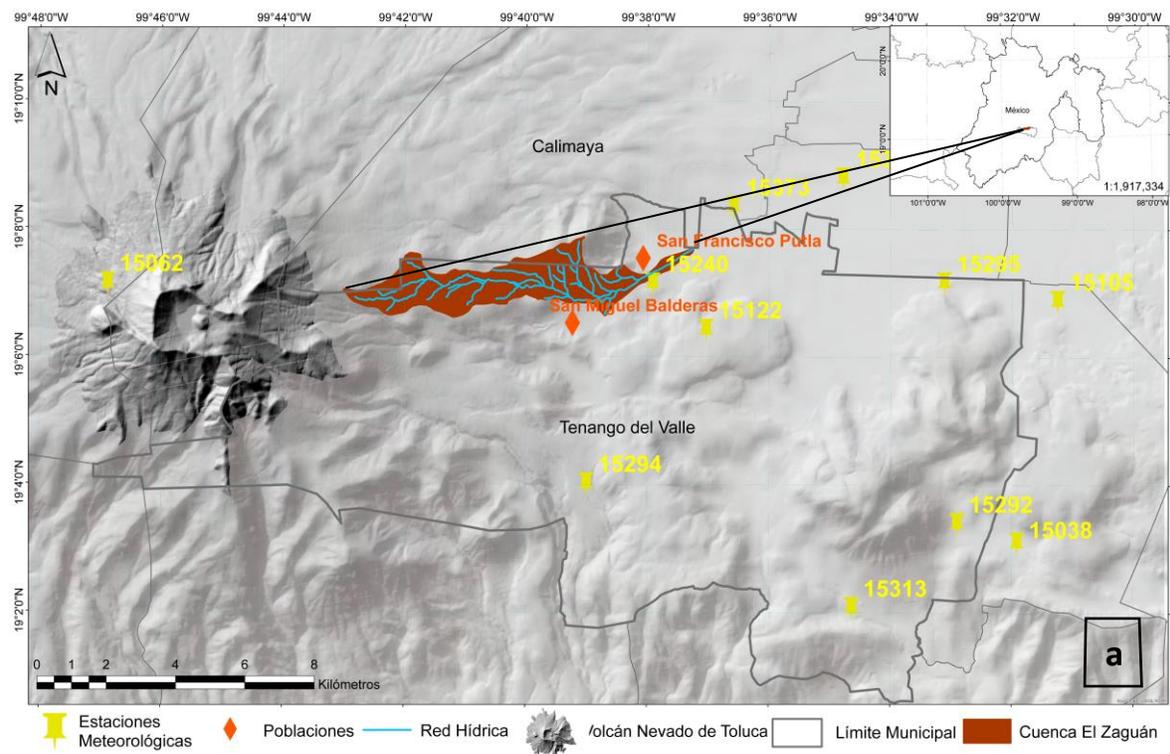
### 1.1 Límite y ubicación de la cuenca El Zaguán

El territorio Mexicano se ha dividido en 15 provincias fisiográficas (Figura 7a) (INEGI, 2001a) y estas en 85 sub-provincias (INEGI, 2001b) que son diferenciadas de acuerdo con su geología y topografía. Esta clasificación ofrece una visión general de las formas del relieve que caracterizan al territorio nacional. La cuenca El Zaguán está localizada al oeste de la sub-provincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac (LVA) dentro de la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Trans-Mexicano (EVT) (Figura 7a). El EVT es una cadena volcánica activa, se extiende aproximadamente 1,000 km de oeste a este a lo largo de la parte centro-sur de México desde el Océano Pacífico (Volcán de Colima) hasta el Golfo de México (Cofre de Perote y Pico de Orizaba) (Lugo y Córdova, 1992; Yarza, 2003). Por su parte, la subprovincia LVA se caracteriza por una serie de planicies escalonadas, campos monogenéticos y sierras volcánicas con estratovolcanes. Este sistema comprende principales elementos montañosos del país como el Volcán Nevado de Toluca (VNT) (Figura 7b) la cuarta elevación más importante de México (4,680 m.s.n.m) (Lugo y Córdova 1992; Yarza, 2003).



**Figura 7.** Fisiografía de México; **a)** Localización de la cuenca El Zaguán dentro de las Provincias Fisiográficas; **b)** Cuenca El Zaguán y Volcán Nevado de Toluca. Elaboración propia con base en INEGI (2001a y b).

La cuenca El Zaguán se ubica entre las coordenadas geográficas 19° 6' 30" y 19° 8' 0" de latitud Norte y 99° 37' 30" y 99° 43' 0" de longitud Oeste, sobre el flanco Este del VNT en el Estado de México. La zona de estudio pertenece en su mayoría al municipio de Tenango del Valle y limita hacia el Norte con el municipio de Calimaya (Figura 8a). La cuenca está orientada de Este a Oeste, su punto más alto (cabecera) es de 3,705 m y su punto más bajo (desembocadura) de 2,677 m de altitud (Figuras 8b), su longitud es de 10.1 km y tiene una superficie de 9.5 km<sup>2</sup> (950.7 ha) aproximadamente. Se sitúa a 18.1 km al sur de la Ciudad de Toluca y a 63.2 km al suroeste de la Ciudad de México.



**Figura 8.** Mapa de ubicación de la cuenca El Zaguán. **a)** Cuenca El Zaguán dentro del municipio de Tenango del Valle; **b)** Nivel altitudinal de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (2013).

## 1.2 Características físico-geográficas

### a) Clima

De acuerdo con la ubicación de la cuenca El Zaguán y con base en la clasificación de Wladimir Köppen (1936), modificada por García (1998), el clima predominante en el área de estudio es semifrío subhúmedo C(E)(w2)(w). Este clima está presente a partir de los 2,800 m hasta los 3,700 m de altitud y cubre el 90% del área total de la cuenca (Figura 9); este clima se caracteriza con porcentaje de precipitación invernal menor al 5 % del total anual, las temperaturas más elevadas se presentan antes del solsticio de verano y es característico de aquellas zonas con altitud de a partir de los 2,700 m (INEGI, 2008; CENAPRED, 2013).

Hacia la desembocadura del río se presenta el clima templado subhúmedo C(w2)(w) (Figura 9), presente a partir de los 2,677 m hasta 2,800 m de altitud; este clima presenta una precipitación invernal inferior al 5% del total anual y alta humedad (INEGI, 2008; CENAPRED, 2013).

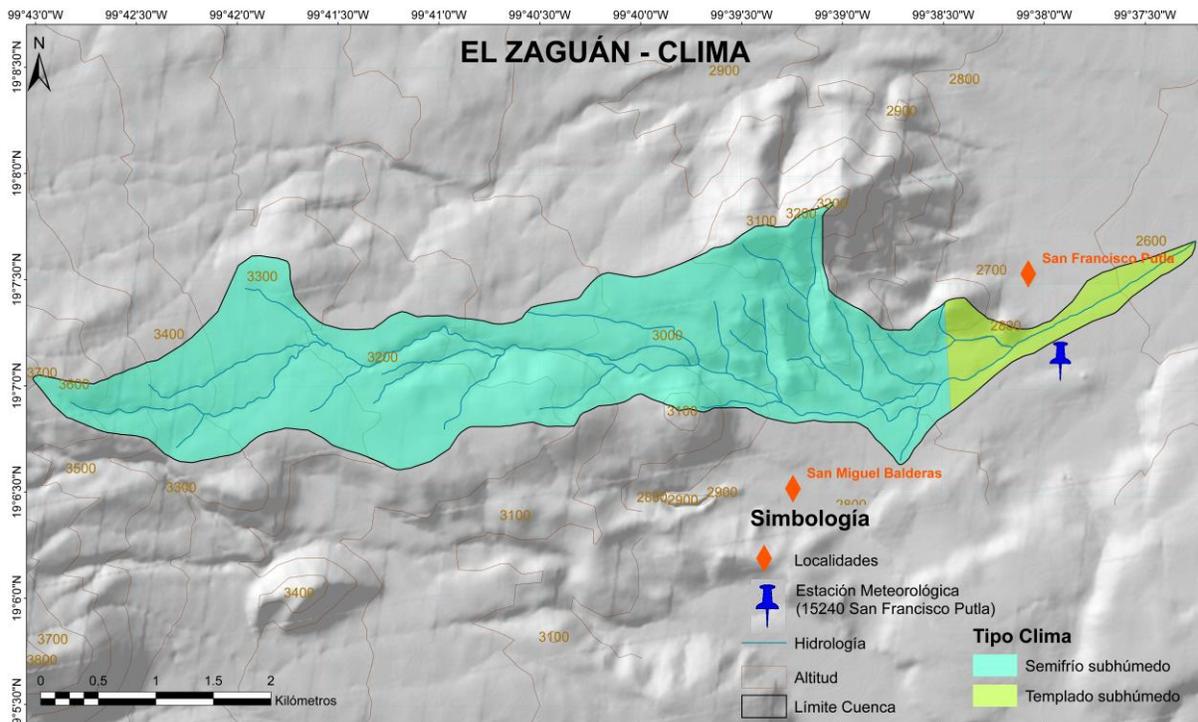
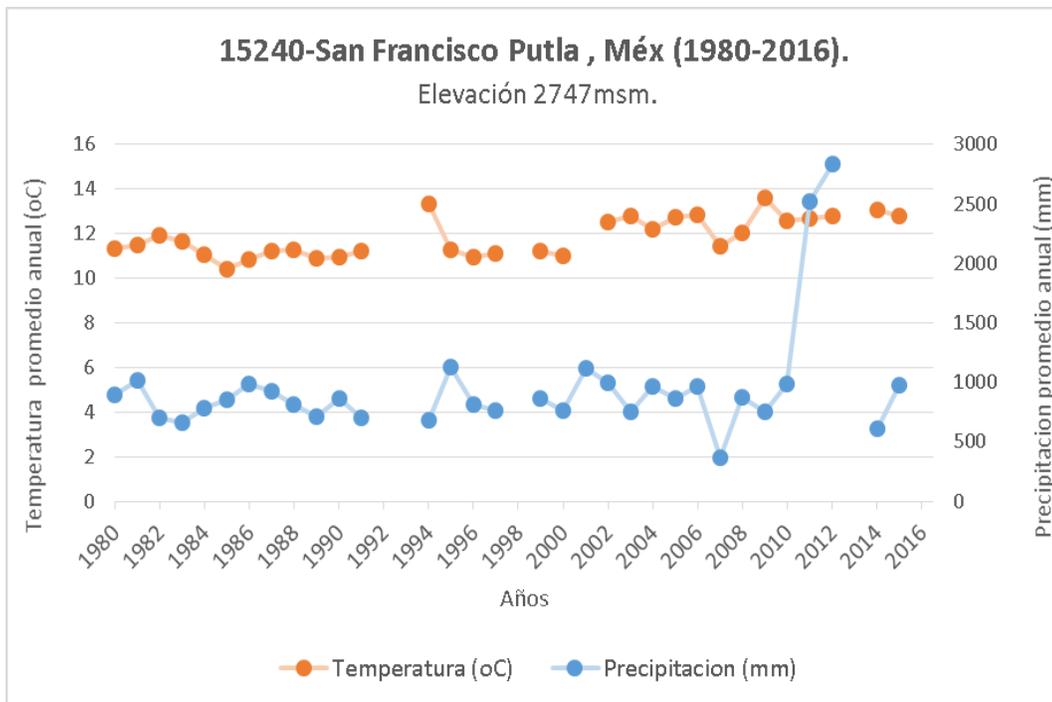


Figura 9. Mapa de unidades climáticas. Elaboración propia con base en INEGI (2008).

En el municipio de Tenango del Valle se encuentran 5 estaciones meteorológicas, la estación meteorológica 15240-San Francisco Putla es la más cercana a la cuenca El Zaguán, de la cual se obtuvieron para el periodo de 1980 a 2016 los siguientes datos de temperatura y precipitación (Figura 10).

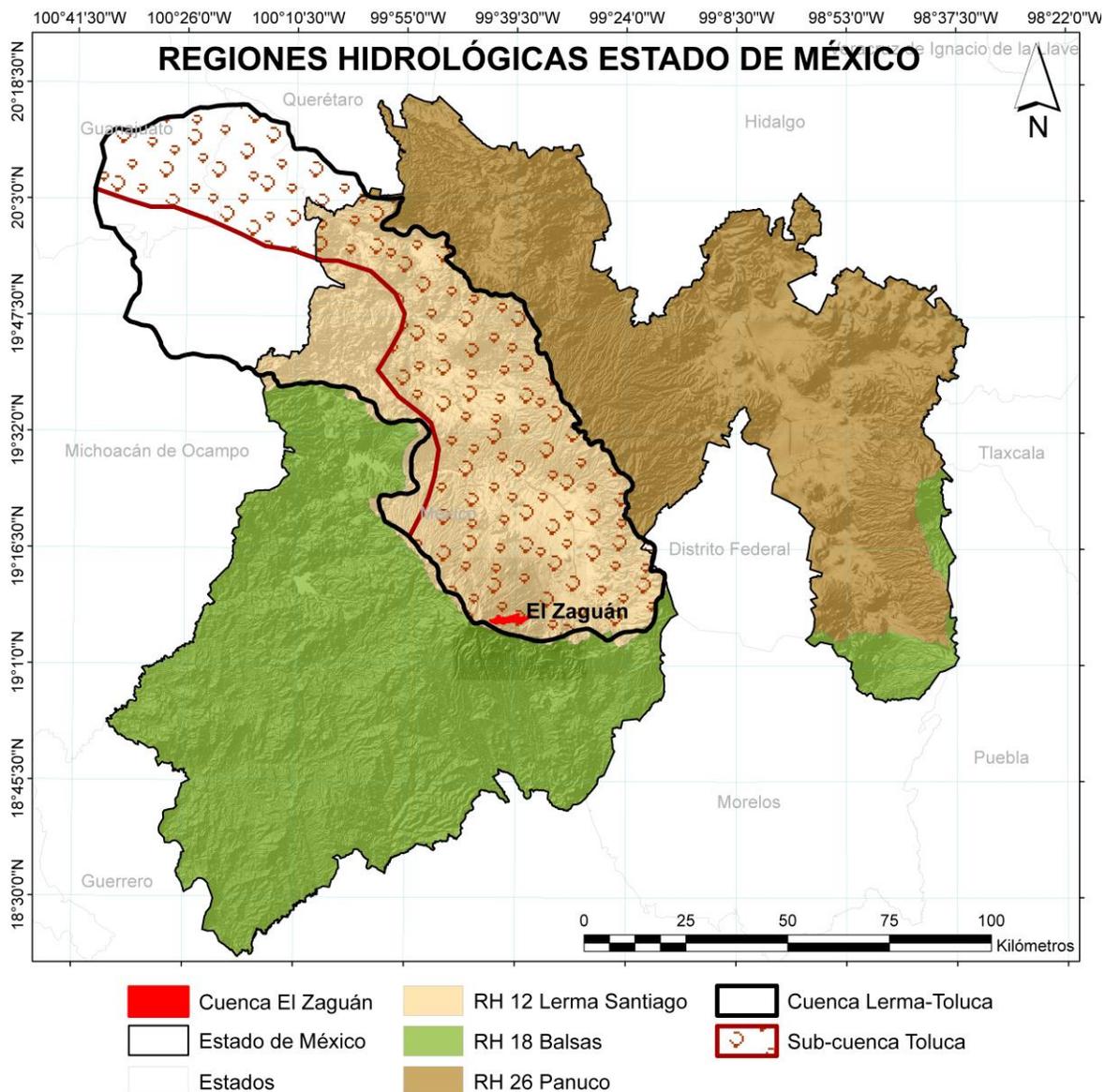
La temperatura promedio anual se da entre 11°C a 12°C, con temperaturas máximas entre 15°C y 20°C y mínimas entre 5°C y 7°C. La precipitación promedio anual se estima entre 900 mm y 1,000 mm siendo los meses de enero, febrero y marzo los más secos con una precipitación entre 15-20 mm (CICLOM, 2016).



**Figura 10.** Temperatura y precipitación promedio anual 1980-2016. Estación meteorológica 15240-San Francisco Putla. Elaboración propia con base en CICLOM (2016).

## b) Hidrología

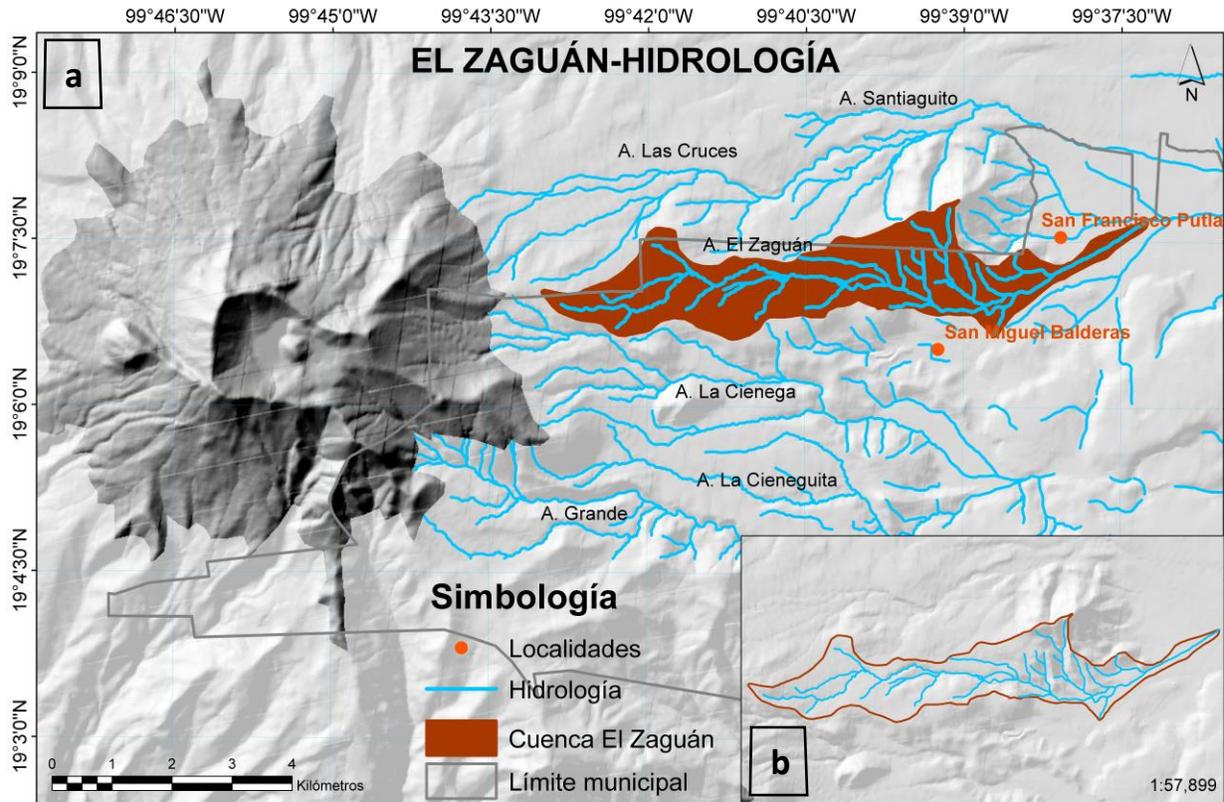
El territorio Mexicano se divide en 37 Regiones Hidrológicas (RH) que a su vez comprenden 731 cuencas y 3,115 sub-cuencas del País. Tres de las RH se sitúan en el Estado de México: la RH18 del Balsas al suroeste, RH12 Lerma Santiago al centro y al este del estado se ubica la RH26 Panuco (Figura 11). La cuenca El Zaguán está situada al sur de la RH12 Lerma Santiago (CONAGUA, 2007). La cuenca El Zaguán pertenece a la sub-cuenca de Toluca quien drena a su vez hacia la cuenca Lerma-Toluca (Figura 11) (CONABIO, 1998; CONAGUA, 1998).



**Figura 11.** Regiones hidrológicas del Estado de México. Cuenca Lerma- Toluca y Sub-cuenca de Toluca. Elaboración propia con base en CONABIO (1998) y CONAGUA (1998; 2007).

La cuenca El Zaguán está limitada al norte por las cuencas de Las Cruces y Santiago y al sur por La Ciénega y La Cieneguita (Figura 12a). Tiene un caudal de 0.6 litros por segundo aproximadamente pero durante los meses más húmedos (mayo a julio) se presentan precipitaciones intensas en las laderas del Volcán lo que da origen a la presencia de escurrimientos torrenciales de pocas horas de duración (Palacio, 1988; CENAPRED, 2013).

De acuerdo con el sistema de ordenación de ríos de Strahler (1957), en la cuenca El Zaguán existen ríos de primero y segundo orden (secundarios) y el río principal es de tercer orden (Figura 12b).



**Figura 12.** Hidrología. **a)** Corrientes superficiales; **b)** Hidrología de la cuenca El Zaguán.

### c) Edafología

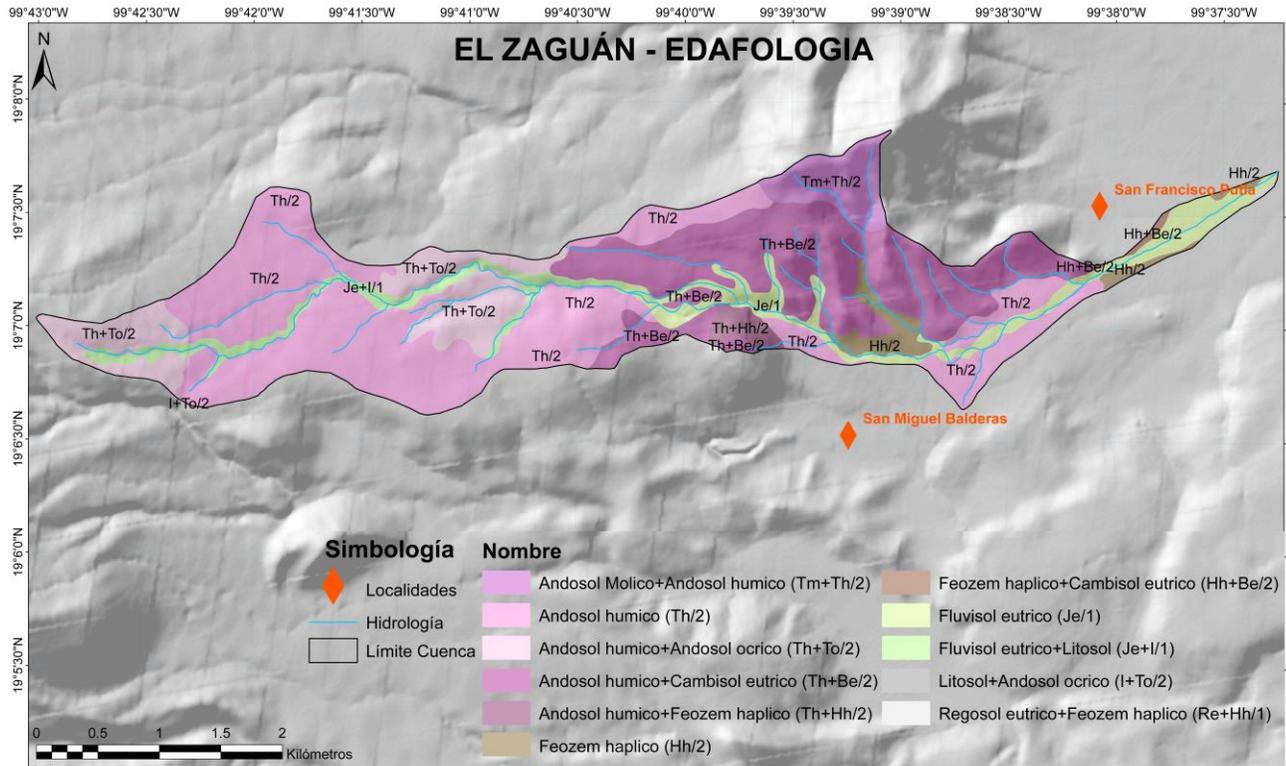
La clasificación del suelo es necesaria para entender su comportamiento e identificar limitantes que permitan tomar decisiones adecuadas de manejo en los ámbitos agrícola, forestal, urbano y ambiental (FAO, 2014).

De acuerdo con la carta edafológica de INEGI (1976), que retoma la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO-UNESCO (1970), en la cuenca El Zaguán se describen 5 unidades de suelo Predominantes (P) (Andosoles, Fluvisoles, Feozem, Regosoles y Litosoles), que a su vez forman 11 sub-unidades de suelo que incluyen el predominante + secundario (Figura 13).

El suelo P-Andosol está presente en un 84% del área total de la cuenca (Tabla 2). Este suelo oscuro es característico de ambientes montañosos de las regiones volcánicas de México. Son suelos derivados de productos volcánicos, principalmente de ceniza, pero también de tobas y piedra pómez. En cuanto a su uso y manejo tienen un alto potencial para la producción agrícola (FAO, 2014).

El suelo P-Fluvisol abarca el 12.7% de la cuenca (Tabla 2), y está presente en el cauce del río principal y en pequeñas secciones de los secundarios (Figura 13). Son suelos genéticamente jóvenes de depósitos fluviales, suelen encontrarse en llanuras de ríos, abanicos fluviales, valles y en depresiones lacustres, y en condiciones naturales se inundan periódicamente. En cuanto a su uso y manejo, la buena fertilidad natural los hace sitios atractivos para asentamientos agrícolas cercanos a los ríos (FAO, 2014).

El suelo P-Feozem abarca el 3.2% del área de la cuenca (Tabla 2) son suelos relativamente húmedos, oscuros, ricos en materia orgánica y se distribuyen predominantemente en regiones subhúmedas y bosque. En cuanto a su uso y manejo son suelos porosos, fértiles y excelentes tierras de cultivo (FAO, 2014).



**Figura 13.** Edafología. Mapa de unidades edafológicas de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (1976).

El Regosol es poco frecuente en la cuenca, pues ocupa 0.09% del área (Tabla 2). Son suelos poco desarrollados generalmente de grano fino. Estos suelos son muy extensos en tierras erosionadas y zonas de acumulación en terrenos montañosos y es mejor conservarlos como bosque (FAO, 2014). En cuanto a su uso y manejo tienen mínima importancia agrícola ya que la baja capacidad de retención de humedad de estos suelos obliga a aplicaciones frecuentes de agua de riego o son utilizados para pastoreo extensivo (FAO, 2014).

Los suelos Litosoles se encuentran en menor proporción en la cuenca, ocupando solo el 0.01% (Tabla 2). Son delgados, se encuentran en terrenos de elevada altitud y con fuerte pendiente topográfica, también son extremadamente pedregosos. En temporadas húmedas son un recurso potencial para el pastoreo pero también suelen ser terrenos forestales (FAO, 2014).

**Tabla 2.** Superficie de unidades edafológicas de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (1976).

No.	Predominante	Predominante + Secundario	Abreviación	Superficie en Hectáreas	Superficie en %
1	Andosol	Andosol humico	Th/2	383.7	40.4
2		Andosol humico+Cambisol eutrico	Th+Be/2	248.9	26.2
3		Andosol humico+Andosol ocrico	Th+To/2	108.6	11.4
4		Andosol Molico+Andosol humico	Tm+Th/2	42.7	4.4
5		Andosol humico+Feozem haplico	Th+Hh/2	14.1	1.5
<b>Total Andosol</b>				<b>798</b>	<b>84</b>
6	Fluvisol	Fluvisol eutrico	Je/1	78.5	8.3
7		Fluvisol eutrico+Litosol	Je+l/1	43.1	4.4
<b>Total Fluvisol</b>				<b>121.6</b>	<b>12.7</b>
8	Feozem	Feozem haplico	Hh/2	27.4	2.9
9		Feozem haplico+Cambisol eutrico	Hh+Be/2	2.8	0.3
<b>Toral Feozem</b>				<b>30.2</b>	<b>3.2</b>
10	Regosol	Regosol eutrico+Feozem haplico	Re+Hh/1	0.8	0.09
11	Litosol	Litosol+Andosol ocrico	l+To/2	0.1	0.01
<b>TOTAL</b>				<b>950.7</b>	<b>100</b>

#### d) Geología

El volcán Nevado de Toluca es un volcán compuesto andesítico-dacítico de la época del Plioceno tardío-Holoceno, ubicado el centro-este del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (Norini *et al.*, 2008), y se encuentra en la intersección de 3 sistemas de fallas que son: 1.- Sistema Taxco-Querétaro, 2.- Sistema San Antonio y 3.- Sistema Tenango (García *et al.*, 2000, 2002; Caballero y Capra, 2010).

En los últimos 50 Ka, el volcán Nevado de Toluca ha sufrido al menos tres colapsos en los flancos este, este-sureste y oeste debido al sistema de fallas antes mencionada (Norini *et al.*, 2008).

Los colapsos que se originaron en el sistema de fallas de Tenango dieron origen a depósitos volcanoclasticos sobre el cauce de los ríos Grande y El Zaguán y a su vez canalizaron los escombros a unos 5-9 km del volcán Nevado de Toluca (Norini *et al.*, 2008).

En la cuenca El Zaguán también existen depósitos de avalanchas de escombros producidos por el colapso del flanco oriental del volcán Nevado de Toluca que se produjo hace unos 28 Ka (Norini *et al.*, 2008; Caballero y Capra, 2010).

Algunos materiales litológicos se pueden apreciar por medio de las secciones litoestratigráficas situadas en las paredes del río principal y de algunos secundarios de la cuenca El Zaguán descritas por Palacio (1988).

Hacia la cabecera sobre el río principal entre los 3,700 – 3,450 m de altitud se encuentran secciones de clastos pumíticos de hasta 30 cm de diámetro correspondientes a la Formación de Pómez Toluca Superior (FPTS) (Figura14, punto A), el tamaño de los clastos se debe a la cercanía de la fuente emisora (Volcán Nevado de Toluca). Estos clastos se encuentran situados en zonas declaradas como brechas volcánicas y a su vez estas brechas volcánicas cubren una superficie

de 53.2 ha lo que representa el 5% de la superficie total de la cuenca (Tabla 3) (Palacio, 1988; INEGI, 2005).

Aguas abajo entre los 3,450 – 3,300 m de altitud en el río principal se encuentran secciones conformadas por una capa de arena roja no pumítica y materiales de la FPTS intercalados principalmente con material fluvial de la misma formación (Figura 14, punto B, C1 y D). Las secciones litoestratigráficas de los ríos secundarios (Puntos C2 Y C3) muestran las mismas características de la sección C1 (Palacio, 1988).

Entre los 3,300 – 3,280 m de altitud sobre el río principal se encuentran depósitos de lahares pumíticos derivados de la FPTS conformados por pequeñas secciones de paleosuelo y material fluvial (Figura 14, puntos E y F) (Palacio, 1988).

Entre los 3,280 – 3,170 m de altitud se aprecian lahares dacíticos, estos lahares se encuentran en sectores de hasta de 16 m de espesor dentro de las paredes del río principal, también se aprecian tefras correspondientes a la FPTS y material fluvial (Figura 14, puntos G Y H) (Palacio, 1988).

Entre los 3,170 – 2,750 m de altitud sobre el río principal se encuentra una secuencia de depósitos de lahares pumíticos derivados de la FPTS intercalados con tefra de la misma formación, cuyas características se prolongan por las paredes del río principal hasta la desembocadura (Figura 14, puntos I, J, L, N, O y P). Esta secuencia de depósitos de lahares pumíticos es interceptada por la presencia de lavas cubiertas por la FPTS presentes entre los 3,050 – 2,930 m de altitud (Figura 14, punto K). También sobre los ríos secundarios se encuentran secciones cuyo material predominante es la FPTS (Figura 14, puntos M) (Palacio, 1988).

Todas estas secciones se encuentran situadas en áreas donde la roca piroclástica toba es predominante pero también hay presencia de pequeñas secciones de suelo aluvial (Figura 14) (INEGI, 2005). Las tobas presentes en la cuenca El Zaguán

cubren una superficie de 690 ha lo que representa el 73% de la superficie total de la cuenca (Tabla 3), son de origen explosivo y se forman por material volcánico suelto o consolidado (INEGI, 2005).

Finalmente aguas abajo a partir de los 2,750 – 2,677 m de altitud, se encuentra el suelo aluvial desarrollado en la planicie y localizado al sur-este de la cuenca (Figura 14, punto Q) (Palacio, 1988). El suelo aluvial presente en la cuenca cubre una superficie de 96.8 ha lo que representa el 10% de la superficie total de la cuenca (Tabla 3).

**Tabla 3.** Superficie de unidades geológicas de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (1975).

	Unidades Geológicas	Abreviación	Superficie en Hectáreas (ha)	Superficie en %
1	Ígnea-Toba	T	690	73
2	Ígnea Extrusiva intermedia	Igei	110.7	12
3	Suelo Aluvial	al	96.8	10
4	Ígnea-Brecha Volcánica	Bv	53.2	5
<b>TOTAL</b>			<b>950.7</b>	<b>100</b>

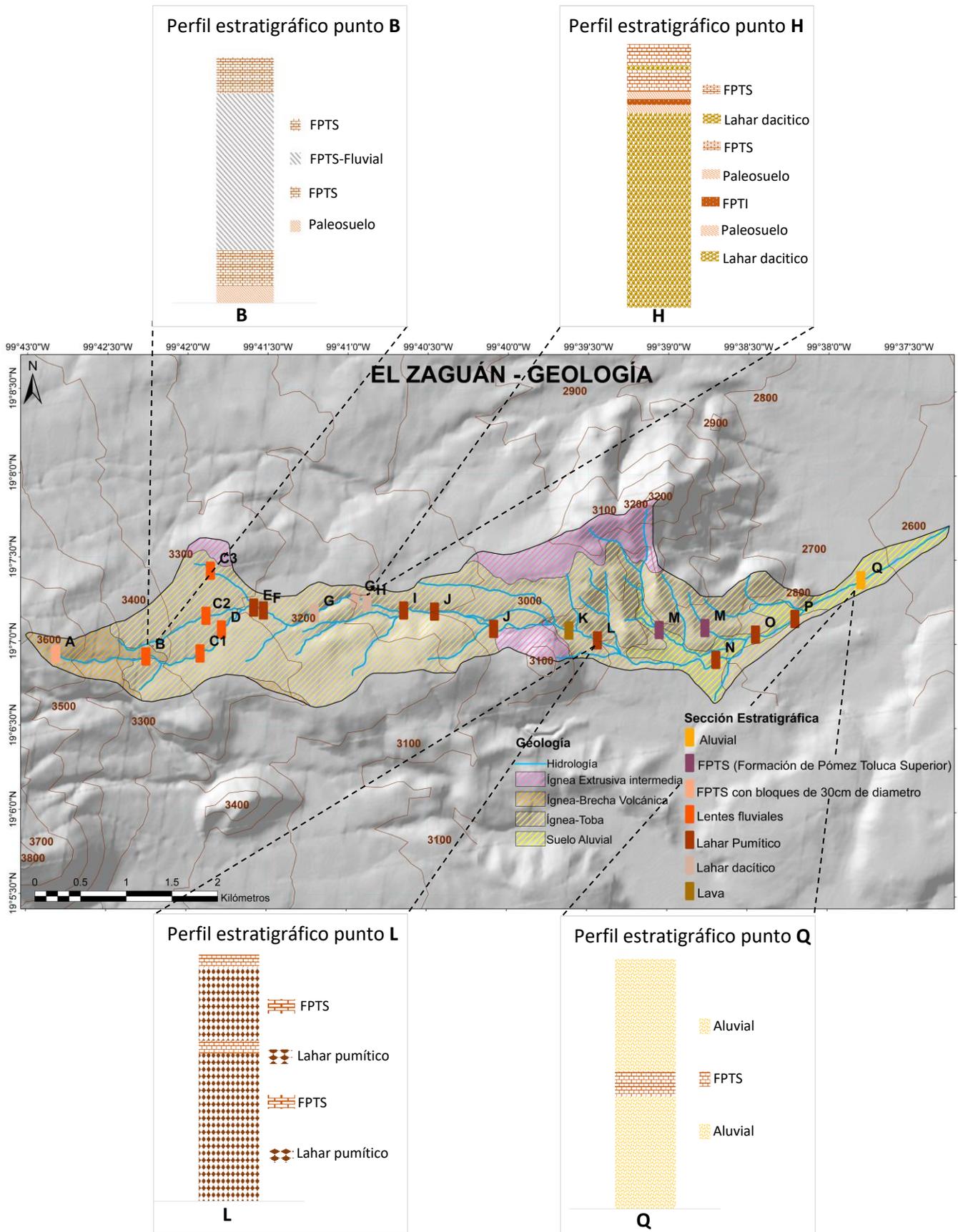


Figura 14. Geología. Mapa de unidades geológicas y secciones estratigráficas de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (1975) y Palacio (1988).

### e) Uso de suelo y Vegetación

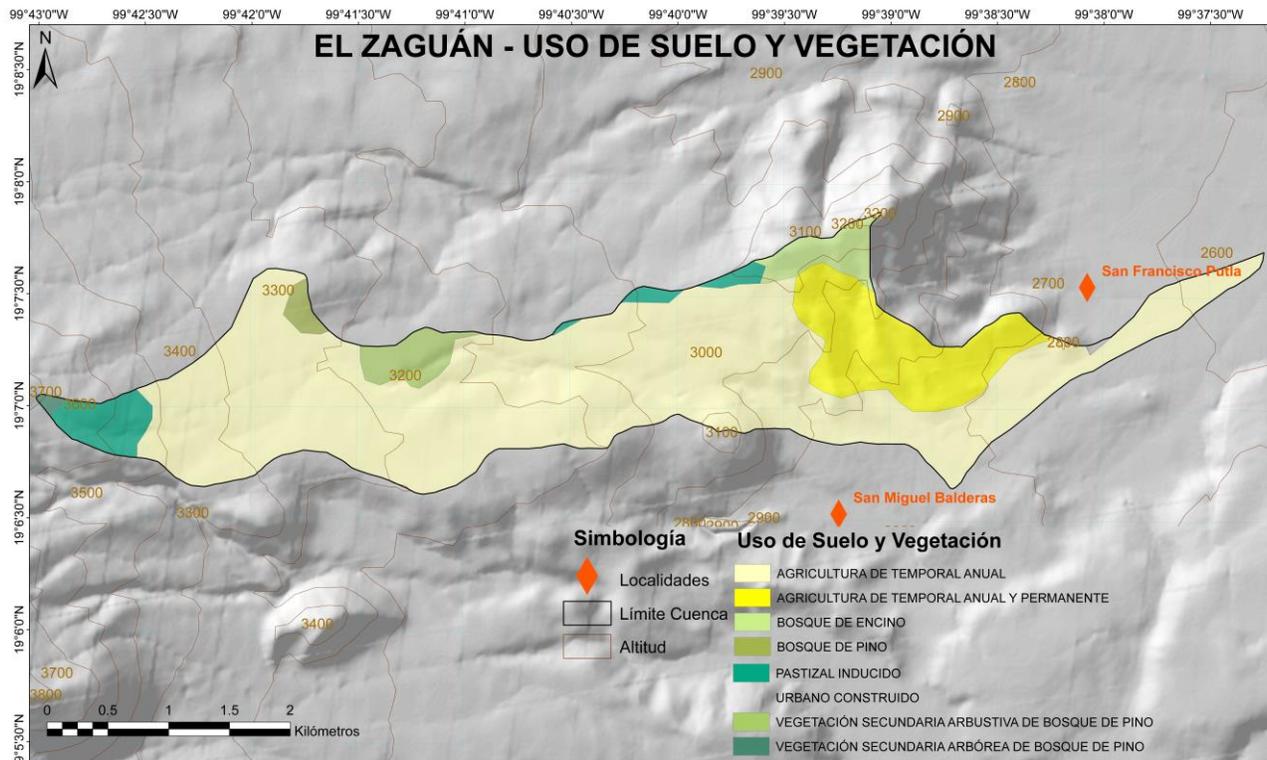
El uso de suelo y vegetación se refiere a las actividades humanas que se desarrollan en un lugar, de acuerdo con la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores socioeconómicos y culturales; esto representa las formas de ocupación, las prácticas específicas de manejo y las condiciones sociales, políticas y económicas que determinan el uso del territorio (Rosete *et al.*, 2009).

De acuerdo con la serie VI del conjunto de datos de uso de suelo y vegetación de INEGI (2017), en la cuenca El Zaguán se encuentran 8 unidades, la más predominante es agricultura de temporal anual (Figura 15 y Tabla 4). Esta actividad comprende 718 ha equivalente al 76% de la superficie total de la cuenca y se trata principalmente de cultivos de papa, haba y brócoli.

Hacia el lado Oeste (sobre la cabecera) y al Norte de la cuenca se encuentran unidades de pastizal inducido y zacates (Gramineae) presentes en 41 ha que representan el 4% del total del área (Tabla 4). La presencia de este tipo de vegetación implica la degradación o eliminación de la vegetación original por desmonte o bien producto de áreas incendiadas (CENAPRED, 2013).

El bosque de encino se encuentra hacia el Noreste de la cuenca y representa un 3% de la superficie, equivalente a 28 ha (Tabla 4). Los encinares tienen una distribución amplia, llegando a ocupar zonas templadas y semifrías, en la cuenca se localizan hacia el cerro de Putla donde predomina el clima semifrío subhúmedo (CENAPRED, 2013).

El bosque de pino comprende una superficie de 8.7 hectáreas, casi el 1% del área total (Tabla 4) y se sitúa al Noroeste de la cuenca. Generalmente el pino se encuentra entre los 2,350 – 4,000 m de altitud pero en la cuenca se sitúa entre los 3,200 – 3,400 m de altitud. A veces este tipo de bosque suele asociarse con especies de encino para formar bosques de pino-encino (CENAPRED, 2013).



**Figura 15.** Uso de Suelo y Vegetación. Mapa de unidades Uso de Suelo y Vegetación de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (2017).

En cuanto al uso urbano construido comprende una superficie de 1 hectárea, correspondiente al 0.1% del área total de la cuenca (Tabla 4). Estos asentamientos se sitúan en la parte baja de la cuenca (desembocadura o planicie) y pertenecen a la localidad de San Francisco Putla.

**Tabla 4.** Superficie de unidades de Uso de Suelo y Vegetación de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (2017).

Tipo	Superficie en Hectáreas (ha)	Superficie en %
1 Agricultura de temporal anual	718.5	76
2 Agricultura de temporal anual y permanente	123.8	13
3 Pastizal inducido	41.1	4
4 Bosque de encino	28	3
5 Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	27	2.8
6 Bosque de pino	8.7	0.9
7 Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	2.4	0.2
8 Urbano construido	1	0.1
<b>TOTAL</b>	<b>950.7</b>	<b>100</b>

## f) Pendiente

La pendiente del relieve es un factor que interviene en la inestabilidad del terreno que a su vez origina deslizamientos. En un mapa de pendiente se puede identificar la morfología más común de acuerdo con el grado de inclinación de la misma (Van Zuidam, 1986; Pedraza, 1996; Aceves *et al.*, 2016). Para ello se sugiere dividir a la pendiente en seis clases (Tabla 5).

**Tabla 5.** Clasificación de la pendiente, morfología y procesos básicos. Fuente: Van Zuidam (1986); Pedraza (1996); Aceves et al. (2016).

Pendiente	Morfología común y uso	Procesos básicos
<b>0° - 6°</b> Plano-suavemente inclinado	Llanuras aluviales, terrazas y fondos de valle, adecuados para cultivos y urbanización.	Pocos o ausencia de deslizamientos.
<b>6° - 12°</b> Inclinado	Valles en montañas, poco apto para infraestructura, cultivo imposible con pendiente a partir de los 7°.	Inicio de deslizamientos.
<b>12° - 20°</b> Muy inclinado	Laderas en montañas y escarpes. No adecuado para bosque y pastoreo.	Deslizamientos y caídas.
<b>20° - 30°</b> Moderadamente escarpado	Relieves tipo "hogbacks". No utilizable para agricultura.	Deslizamientos y caídas.
<b>30° - 45°</b> Escarpado	Acantilado y escarpes.	Deslizamientos caídas y avalanchas.
<b>&gt;45°</b> Muy escarpado	Escarpes.	Caídas en masa, deslizamientos y colapsos.

La pendiente de la cuenca El Zaguán va de los 0° a > 45°. El 34% del área de la cuenca se encuentra entre los 0 – 6° y de acuerdo con la tabla 5 corresponde a áreas planas y suavemente inclinadas que se encuentran principalmente hacia la desembocadura de la cuenca (Figura 16).

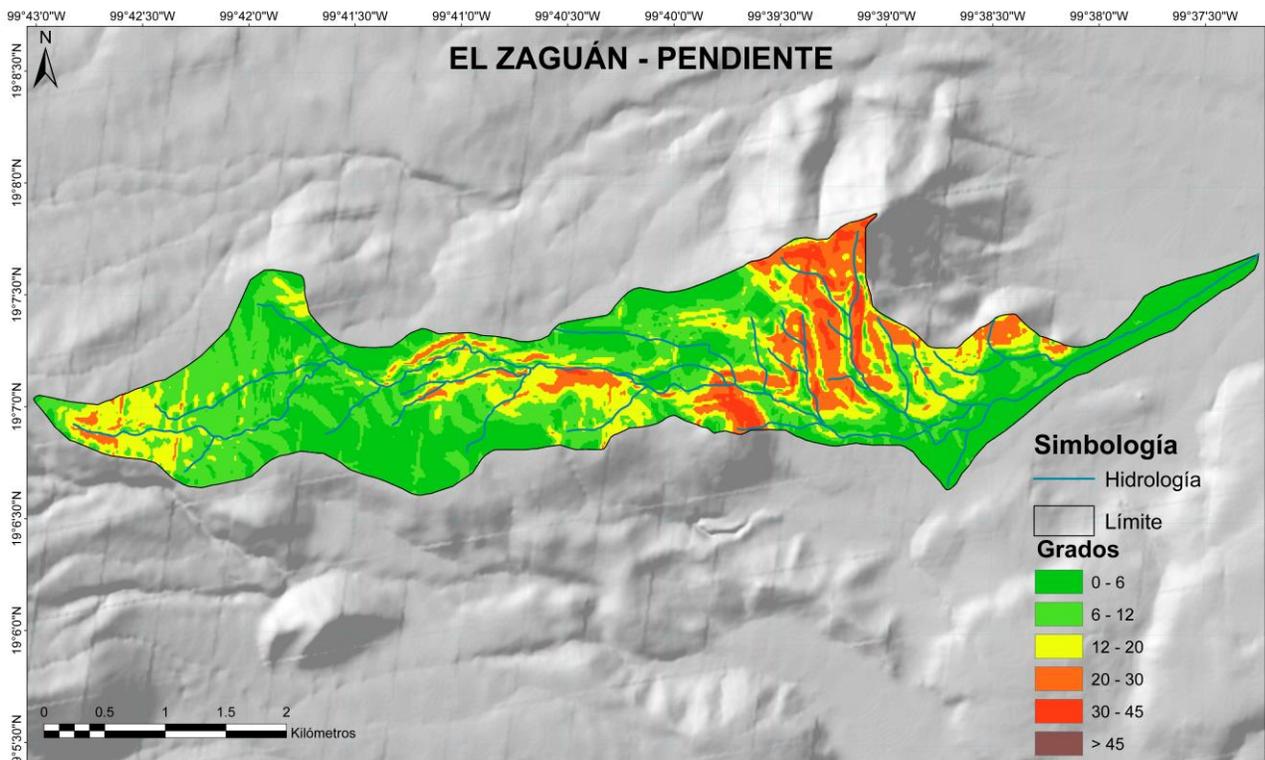
EL 31% del área corresponde a zonas que van de los 6 – 12° son zonas inclinadas y es donde frecuentemente se inician los deslizamientos, estas áreas se encuentran distribuidas a lo largo de la cuenca.

El 20% del área se encuentra entre los 12 – 20° en estas áreas el terreno es muy inclinado con frecuencia de deslizamientos y caídas de roca, estas zonas se encuentran cerca del río principal y secundarios.

El 12 % va de los 20 – 30° y son zonas moderadamente escarpadas con presencia de deslizamientos y caídas, estas áreas se localizan principalmente hacia el lado noreste de la cuenca.

El 2.9% va de los 30 – 45° esta zona se encuentra en la parte noreste y centro de la cuenca y se sitúa mayormente cerca de los ríos secundarios.

Y el 0.1% está por arriba de los 45° y esta zona se encuentra en la parte central de la cuenca, cerca del río principal (Figura 16).



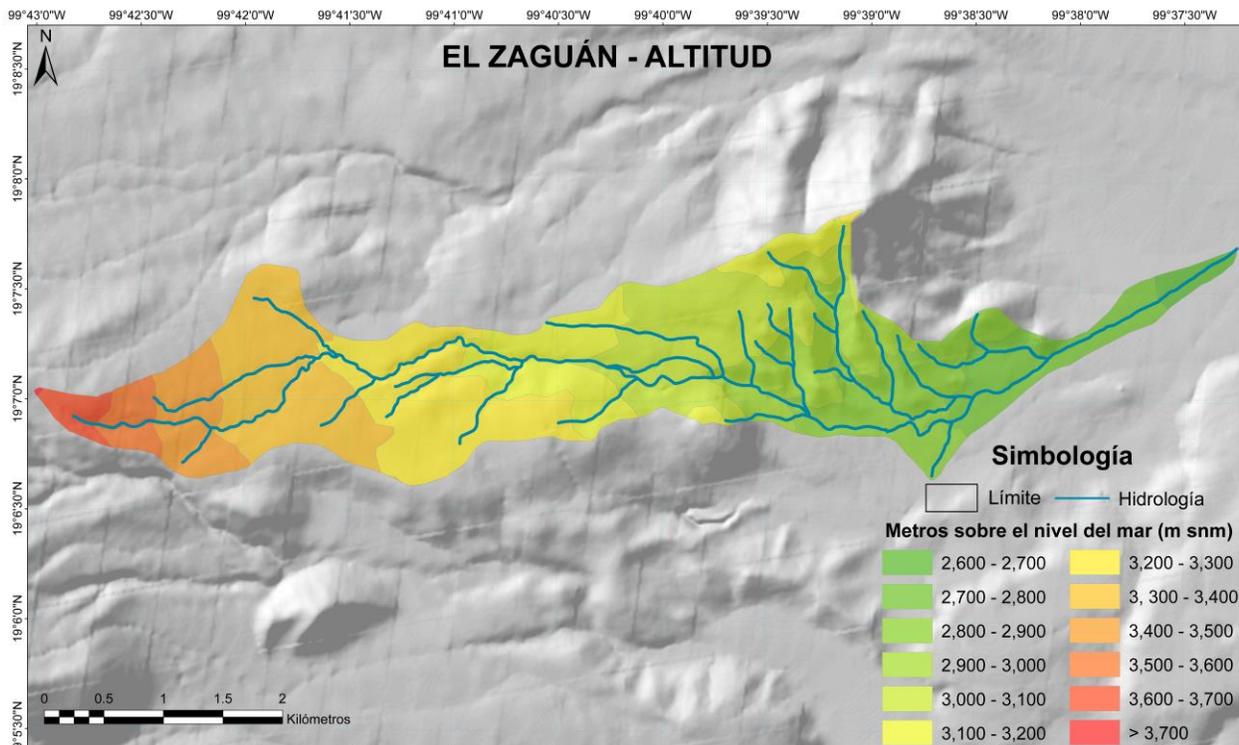
**Figura 16.** Pendiente. Clasificación de la pendiente de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (2016).

### g) Altitud

La altitud se entiende como la distancia vertical que existe entre un punto de la tierra con relación al nivel del mar, generalmente puede medirse en metros de ahí su terminación metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) (Pérez y Gardey, 2011).

La cuenca El Zaguán se encuentra situada entre los 2,600 – 3,700 m de altitud. Entre los 2,600 – 3,000 m de altitud se encuentra generalmente el pie de monte inferior, estas zonas se encuentran en la parte Este de la cuenca (Desembocadura).

Entre los 3,000 – 3,500 m de altitud se localiza el pie de monte superior, situado en la parte centro y oeste de la cuenca y a partir de los 3,500 se encuentran las zonas montañosas, estas áreas se encuentran al oeste de la cuenca (cabecera) (García, 2017) (Figura 17).



**Figura 17.** Altitud. Nivel altitudinal de la cuenca El Zaguán. Elaboración propia con base en INEGI (2016).

#### **h) Actividades socioeconómicas**

La población de San Francisco Putla localizada hacia la desembocadura de la cuenca, se dedica mayoritariamente a la agricultura de temporal anual y permanente, esta actividad abarca 54 ha (55.6%) de un total de 97 ha que comprenden a la localidad. Los principales sembradíos que se encuentran son cultivos de papa, haba y brócoli (INEGI, 2017; SAGARPA, 2017a). Los cultivos de papa se siembran en todo el municipio de Tenango del Valle pero en la comunidad de San Francisco Putla se da de forma intensiva. Se estima que el valor total de la producción municipal agrícola para el año 2017 de este cultivo (Papa) fue de \$131.2 MDP (SAGARPA, 2017a).

En cuanto a la actividad ganadera, se desarrollan las actividades de crianza de Bovinos, Porcinos, Ovinos y Caprinos y se estima que el valor total de la producción municipal ganadera para el año 2017 fue de \$18.4 MDP (SAGARPA, 2017b).

En la localidad la actividad económica terciaria se enfoca en la venta de insumos de primera necesidad como pan, tortilla, frutas y verduras (CENAPRED, 2013).

#### **i) Población**

La ubicación de la comunidad de San Francisco Putla hace que la población sea potencialmente afectada por la presencia de deslizamientos, pues el material de escombros es acarreado por el río hacia la comunidad y en algunas zonas cercanas al río principal se pueden observar asentamientos cerca de los deslizamientos (Figura 18).

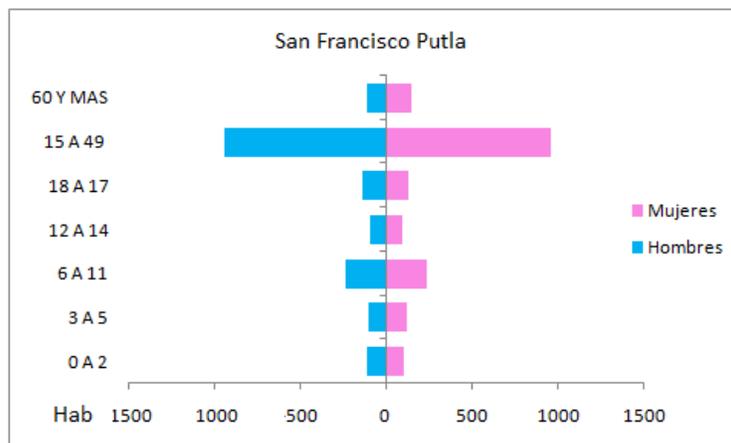
De acuerdo con el censo de población y vivienda de INEGI (2010), la localidad de San Francisco Putla cuenta con 3,433 habitantes (1,665 hombres y 1,768 mujeres) (Figura 19) y representa el 4% de la población total del municipio de Tenango del Valle. La población económicamente activa (PEA) es del 36%, aproximadamente

1,247 habitantes (308 mujeres y 939 hombres). En términos de salud el 42% (1,457 habitantes) no son derechohabientes.



**Figura 18.** Deslizamiento de escombros en la comunidad de San Francisco Putla. Localizado a 2,773 m.s.n.m, sobre el cauce principal correspondiente al margen izquierdo y presenta una altura de 3.6 m, 29.5 m de largo y 1 m de profundidad.

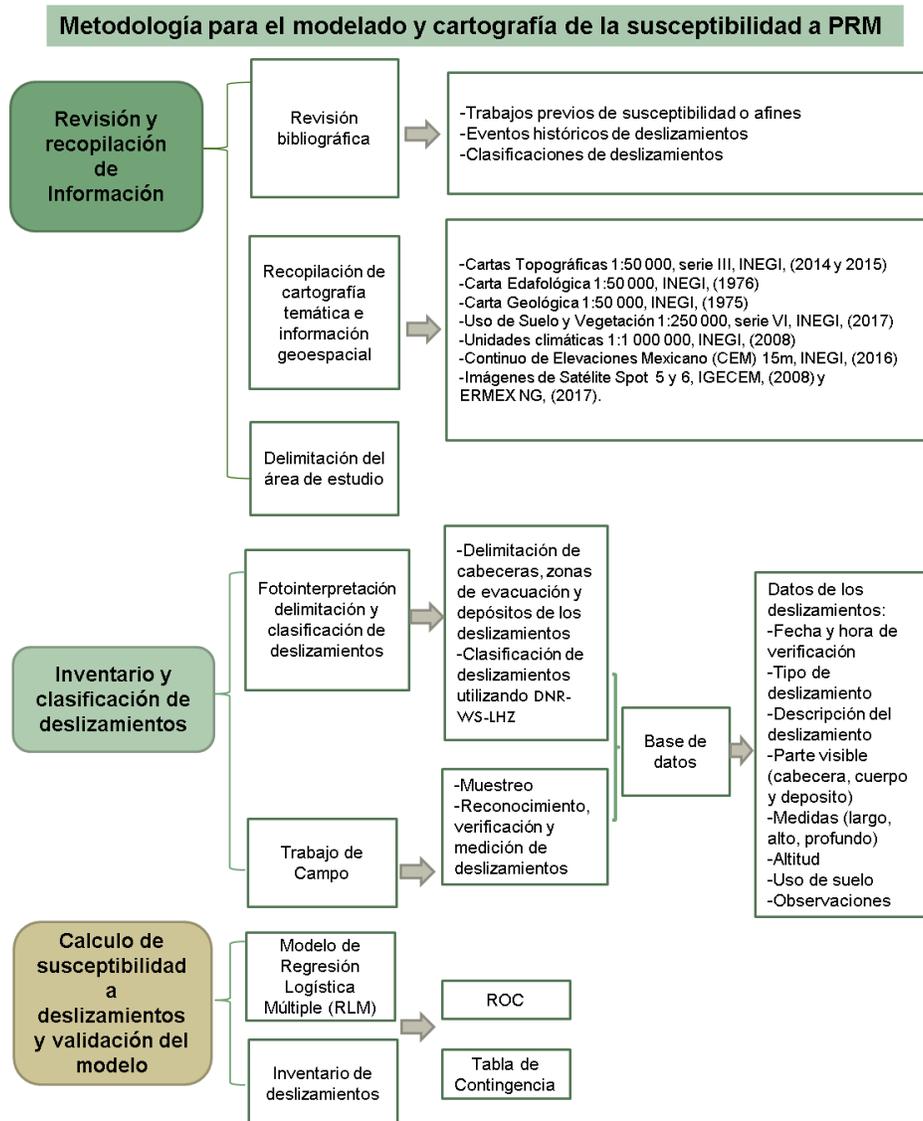
En cuanto a escolaridad se tienen registradas 241 personas analfabetas y 155 personas sin escolaridad. En total hay 765 viviendas particulares habitadas, de ellas 757 cuentan con electricidad, 753 tienen servicio de agua potable y 730 con drenaje (INEGI, 2010).



**Figura 19.** Distribución de la población por grupos de edad en la localidad de San Francisco Putla. Elaboración propia con base en INEGI (2010).

## CAPITULO 2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A PRM EN LA CUENCA EL ZAGUÁN

El desarrollo de esta investigación consiste en 3 etapas fundamentales de análisis para la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos (Figura 20). La primera consiste en la revisión, recopilación de la información y delimitación del área de estudio. En la segunda etapa se elaboró el inventario de deslizamientos y su clasificación. En la tercera etapa se calculó la susceptibilidad con el modelo estadístico de RLM, utilizando las variables físicas del área de estudio: litología, edafología, pendiente, altitud y uso de suelo y vegetación, además se realizó la comparación del modelo estadístico contra el inventario de deslizamientos.



**Figura 20.** Metodología general para el análisis de susceptibilidad a PRM en la cuenca El Zaguán.

## 2.1 Revisión y recopilación de información

En esta etapa se revisaron trabajos previos realizados en la cuenca El Zaguán donde se aborda el tema de susceptibilidad, así como estudios con enfoques geológicos y geomorfológicos, eventos históricos de deslizamientos en el área de estudio y de clasificaciones de deslizamientos. Se compiló toda la información disponible y se elaboró el marco teórico de la investigación.

Se recopiló la cartografía temática de las cartas E14A47 y E14A48, en escala de 1:50,000 de topografía (INEGI, 2014, 2015), edafología (INEGI, 1976) y geología (INEGI, 1975). Se adquirieron las unidades climáticas en escala 1:1,000,000 (INEGI, 2008). Para la vegetación y uso de suelo, se obtuvieron los datos vectoriales de la serie VI en escala de 1:250,000 (INEGI, 2017) y el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM) con resolución de 15m (INEGI, 2013).

Se obtuvieron imágenes de satélite; Pancromática Spot 5 del año 2008 con resolución espacial de 2.5m, del Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México (IGESEM) y Spot 6 con resolución espacial en pancromática de 1.5 metros y en multiespectral de 6 metros del año 2017 de la Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG).

### a) Delimitación del área de estudio

Con los insumos disponibles se realizó la delimitación de la cuenca El Zaguán, para ello se utilizaron las cartas topográficas, el CEM y el modelo de sombras de laderas que se deriva del CEM. La información del CEM se manejó en el módulo de *Hydrology* del SIG ArcMAP 10.5, para calcular las zonas de acumulación de flujo, direcciones de flujo y el punto de desfogue de la cuenca, también se utilizaron criterios topográficos como curvas de nivel, parte aguas y la red hídrica de las cartas topográficas, con ello se estableció el límite de la cuenca. El modelo de sombras

derivado del CEM permitió visualizar el relieve en 3D utilizando la herramienta *ArcScene* con el fin de validar y perfeccionar el límite del área de estudio.

## 2.2 Inventario de deslizamientos 2017-2018

### a) Fotointerpretación y delimitación de deslizamientos.

Para la construcción del inventario de deslizamientos se utilizaron las imágenes satelitales Spot 5 y 6, ambas imágenes fueron montadas en el SIG ArcMAP 10.5 y con técnicas de foto interpretación como tonalidades de color y textura de la imagen se delimitó la zona de la cabecera y la zona de evacuación de los deslizamientos identificados. Se reconoció un total de 100 deslizamientos que fueron digitalizados en el SIG con la herramienta *Editor* y se elaboró una base de datos preliminar de los movimientos, que posteriormente fue complementada con trabajo de campo. Se obtuvo un mapa vectorial con la información de los deslizamientos interpretados y se proyectó al sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) con los siguientes parámetros: Datum y esferoide WGS 1984, zona 14 Norte; esta proyección es la misma que se utilizó para los mapas temáticos usados en el análisis.

### b) Trabajo de campo y muestreo de deslizamientos

Para complementar el análisis realizado en gabinete se realizó el trabajo de campo, esto permitió la verificación de los deslizamientos interpretados en las imágenes de satélite, su clasificación y la medición de las partes (cabecera, zona de evacuación y en casos particulares el depósito) de cada uno de ellos.

En total se realizaron 3 salidas a campo. Las primeras 2 tuvieron como objetivo verificar y coleccionar datos de los deslizamientos. Una de ellas fue en noviembre del 2017 y la otra en abril del 2018 y la tercera salida sirvió para verificar la capacidad de evaluación del modelo.

Previo a la primera salida a campo se hizo el cálculo de la muestra y se eligió el tipo de muestreo a utilizar. Se consideró tomar una muestra grande, ya que mientras más grande y representativa sea, menor es el error de la muestra (Pineda *et al.*, 1994; Mata y Macassi, 1997; López, 2004).

De acuerdo con los 100 deslizamientos interpretados se calculó el tamaño de la muestra con la siguiente fórmula [2] Mata y Macassi (1997).

$$m = \frac{N}{(N-1) * K^2 + 1} \quad [2]$$

m= muestra

N= población o universo

K= margen de error

Los parámetros considerados son; margen de error admitido del 5% (K) y una población de 100 (N).

La muestra calculada fue de 80 deslizamientos para su verificación en campo. Y se prosiguió a realizar el Muestreo Probabilístico Sistemático (MPS). Este muestreo es recomendable en investigaciones cuantitativas o semi-cuantitativas pues los componentes de una población tienen la misma probabilidad de ser seleccionados para la muestra. El MPS se utiliza cuando el tamaño de la población es grande (mayor a 30 individuos), pues esta selección sistemática facilita la identificación de los componentes de la muestra, no es costoso y requiere de poco tiempo (Pineda *et al.*, 1994; López, 2004).

En la primera salida a campo el recorrido inició en la parte baja de la cuenca aproximadamente en los 2,740 m de altitud (Planicie, figura 21, punto A). A partir de este punto es donde se originan los deslizamientos. Para el reconocimiento y verificación de cada deslizamiento se empleó la clasificación del DNR-WS-LHZ (2006). Se reconocieron deslizamientos superficiales (escombros, flujo de escombros y caídas o desprendimientos) y de asentamiento profundo.

Al mismo tiempo de la clasificación se realizó la medición de las partes identificables y observables de los deslizamientos. Las medidas que se tomaron son: largo, alto y profundo, y se efectuaron con distanciómetro y cinta métrica. También se utilizó el sistema de posicionamiento global (GPS) con el fin de registrar aquellos deslizamientos recientes y superficiales que no fueron reconocidos en la fotointerpretación. El final del recorrido de esta sesión se registró aproximadamente en los 2,900 m de altitud (Figura 21, punto B). En total se recorrieron 4.0 km cubriendo el 40% de la longitud de la cuenca.

La segunda sesión en campo se inició en la parte alta de la cuenca (cabecera, figura 21, punto C) aproximadamente en los 3,350 m de altitud. Se realizaron los mismos procedimientos de la primera sesión para reconocer, clasificar y medir los deslizamientos. Se finalizó el trabajo de campo aproximadamente en los 2,900 m de altitud (Figura 21, punto D). En esta sesión se recorrió un total de 4.6 km. En las dos sesiones se recorrió un total de 8.6 km (85% de longitud de la cuenca). Posteriormente en gabinete se complementó la base de datos geo-espacial del inventario. El inventario y su base de datos incluye solo los atributos de los deslizamientos identificados sobre el cauce del río, como: Identificador del deslizamiento (ID), tipo, coordenadas, partes reconocibles, margen del río donde se encuentran situados, medidas y observaciones de cada deslizamiento (Anexo1).

De acuerdo con el tamaño de la muestra (80) y los recorridos en campo, se comprobó que el 80% de los deslizamientos coincidían con la interpretación en gabinete, el 20% restante no pudieron comprobarse debido a las condiciones del relieve. Así mismo en la verificación de campo se identificaron nuevos deslizamientos que no fueron interpretados en gabinete, se incluyeron en la base de datos y con esta información se construyó el inventario de deslizamientos.



Figura 21. Mapa de recorrido alcanzado por sesión en campo.

### 2.3 Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos

#### a) Modelo de Regresión Logística Múltiple (RLM)

Para el modelado se eligieron las variables de los aspectos físicos del área de estudio, que intervienen en la inestabilidad de laderas como: litología, edafología, pendiente, altitud, y uso de suelo y vegetación. Las cartas geológicas y edafológicas se georreferenciaron y a continuación se digitalizaron las unidades correspondientes de cada tema que se encuentran dentro de la cuenca, para ello se utilizaron las herramientas *Georeferencing* y *Editor* del SIG ArcMap. La pendiente se calculó a partir del CEM, con la herramienta *Slope* del módulo *Spatial Analyst Tools*. Los datos de altitud se tomaron del CEM y se cargaron los datos vectoriales de uso de suelo y vegetación.

Posteriormente se elaboró un mapa vectorial por cada categoría litológica, en la que el valor de cada categoría es de 1 y lo demás es 0. Por ejemplo, en la cuenca El Zaguán se encuentran 4 unidades litológicas (ígneas extrusivas intermedias, brechas

volcánica, toba y suelo aluvial) por lo que se obtuvieron 4 mapas. La información contenida en cada mapa es la presencia y ausencia de las categorías. Se hizo el mismo proceso con edafología y uso de suelo y vegetación. En total se obtuvieron 23 mapas (4 litológicos, 11 edafológicos y 8 de uso de suelo y vegetación). Solo se hizo este proceso con las variables cualitativas, las variables cuantitativas (pendiente y altitud) entran en el modelo sin ningún proceso previo.

Los mapas vectoriales se montaron en un mismo proyecto del SIG y se convirtieron en formato raster con la herramienta *Feature to Raster* del módulo *Conversion Tools*. Todos los mapas fueron creados con un tamaño del pixel de 15m a fin de unificar la información a la resolución del CEM.

Posteriormente se construyó una capa raster derivada del inventario de deslizamientos (máscara). La máscara tiene la misma forma del área de estudio y consiste en representar el mismo número de pixeles que contengan información sobre la presencia y ausencia de deslizamientos, el restante de la máscara contendrá valores nulos (9999) (Legorreta y Bursik, 2009).

Para la construcción de la máscara se tomó en cuenta la zona de las cabeceras y el área de evacuación de los deslizamientos identificados en el inventario (información vectorial) y se declararon como: a) zonas con presencia de deslizamientos, estas zonas se codificaron con el valor de 1 y b) zona con ausencia de deslizamientos, a estas zonas (el remanente de la cuenca) se les asignó el valor de 0 (Legorreta y Bursik, 2009).

La información vectorial de la máscara se convirtió en formato raster. En total se obtuvieron 368 pixeles con código 1 y 41,886 pixeles con código 0. De los 41,886 pixeles con código 0, se eligieron 368 pixeles (la misma cantidad de pixeles con código 1) para ser considerados áreas sin deslizamientos. El resto de pixeles fueron declarados con código nulo (9999), esto con la finalidad de tener la misma cantidad de pixeles con código 0 y 1 (Legorreta y Bursik, 2009).

Los 736 píxeles con código 0 y 1 se usaron para extraer los valores temáticos de los mapas raster (litológicos, edafológicos, uso de suelo y vegetación, altitud y pendiente) con la herramienta *Sample* del módulo *Spatial Analyst Tools*. Como resultado se obtuvo una tabla con los valores de las variables físicas de los 736 píxeles y posteriormente la tabla se exportó en formato dBASE Table (dbf). La Tabla 6 muestra una parte de la base de datos con los valores temáticos extraídos, obtenida de acuerdo con la metodología de Legorreta y Bursik (2009).

**Tabla 6.** Valores extraídos de las variables físicas usando la herramienta *Sample*.

Table							
EXTRACCION3							
	OID	MASCARA2 T	X	Y	ZAltitud	ZPendiente	Geolo1
▶	0	0	434537.399024	2114971.6124	2683	2.01868	0
	1	0	434552.399024	2114971.6124	2682	2.01868	0
	2	0	434312.399024	2114956.6124	2689	1.50491	0
	3	0	434327.399024	2114956.6124	2689	1.50491	0
	4	0	434507.399024	2114956.6124	2684	2.12778	0
	5	0	434522.399024	2114956.6124	2683	2.12778	0
	6	0	434537.399024	2114956.6124	2683	1.34609	0
	7	0	434507.399024	2114941.6124	2684	2.12778	0
	8	0	434522.399024	2114941.6124	2684	2.12778	0
	9	0	434042.399024	2114866.6124	2699	3.36199	0
	10	0	434057.399024	2114866.6124	2699	2.4257	0

La tabla dbf se importó al software SPSS y se corrieron las primeras pruebas de Tolerancia y Factor de Inflación de Varianza (VIF) del modelo para comprobar que no hubiera problemas de colinealidad entre las variables.

Posteriormente se modelaron las variables con RLM, utilizando la herramienta *Regression Binary Logistic* del módulo de *Analyze*, de SPSS, se asignó como variable dependiente la presencia y ausencia de deslizamientos y como variables independientes se asignaron los datos de los valores litológicos, edafológicos, altitud, pendiente, y uso de suelo y vegetación.

Se utilizó el método paso a paso hacia atrás del estadístico de razón de verosimilitud (Backward: LR). Pues este estudio sobre susceptibilidad en la cuenca El Zaguán es el primero en realizarse en esta modalidad sobre RLM, por lo tanto, no hay investigaciones anteriores que nos indiquen qué variables se esperan que sean evaluadoras confiables de susceptibilidad.

Después de obtener los resultados de la RLM se realizó su interpretación, misma que se explica en el capítulo 3).

De acuerdo con Legorreta y Bursik (2009), la elaboración del modelo espacial (mapa de susceptibilidad) se realizó aplicando la fórmula de la RLM en ArcGIS con la herramienta *Raster Calculator* del módulo *Spatial Analyst Tools*. Para ello se utilizaron los coeficientes  $b_1...b_n$  de las variables independientes del modelo y el valor de la constante de los resultados obtenidos en SPSS.

Una vez elaborado el mapa de susceptibilidad se reclasificó en dos clases de acuerdo con el punto de corte estadístico cuyo valor es de 0.5 y fue obtenido mediante la curva ROC, esto para facilitar la validación y la comparación numérica entre el inventario y el modelo. Se utilizó un esquema de dos clasificaciones (“presencia” y “ausencia”) tanto para el inventario como para el modelo (Legorreta *et al.*, 2018).

La curva ROC se calculó usando el programa SPSS considerando el 80% de píxeles del área de estudio y se definió trazando en un gráfico bidimensional los valores de sensibilidad y especificidad (Legorreta *et al.*, 2018).

Posteriormente se realizaron las pruebas estadísticas de precisión (Precisión global del modelo, precisión del productor y precisión del usuario) que evalúan el rendimiento del modelo de acuerdo con la tabla de contingencia propuesta por Horning (2004).

Como parte final, se realizó la tercera sesión en campo el 14 de Septiembre del 2019 con la finalidad de verificar algunos sitios piloto donde el modelo evaluó áreas susceptibles. Por lo que se comprobó la presencia de deslizamientos en los puntos verificados.

## CAPITULO 3. ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LA CUENCA EL ZAGUÁN.

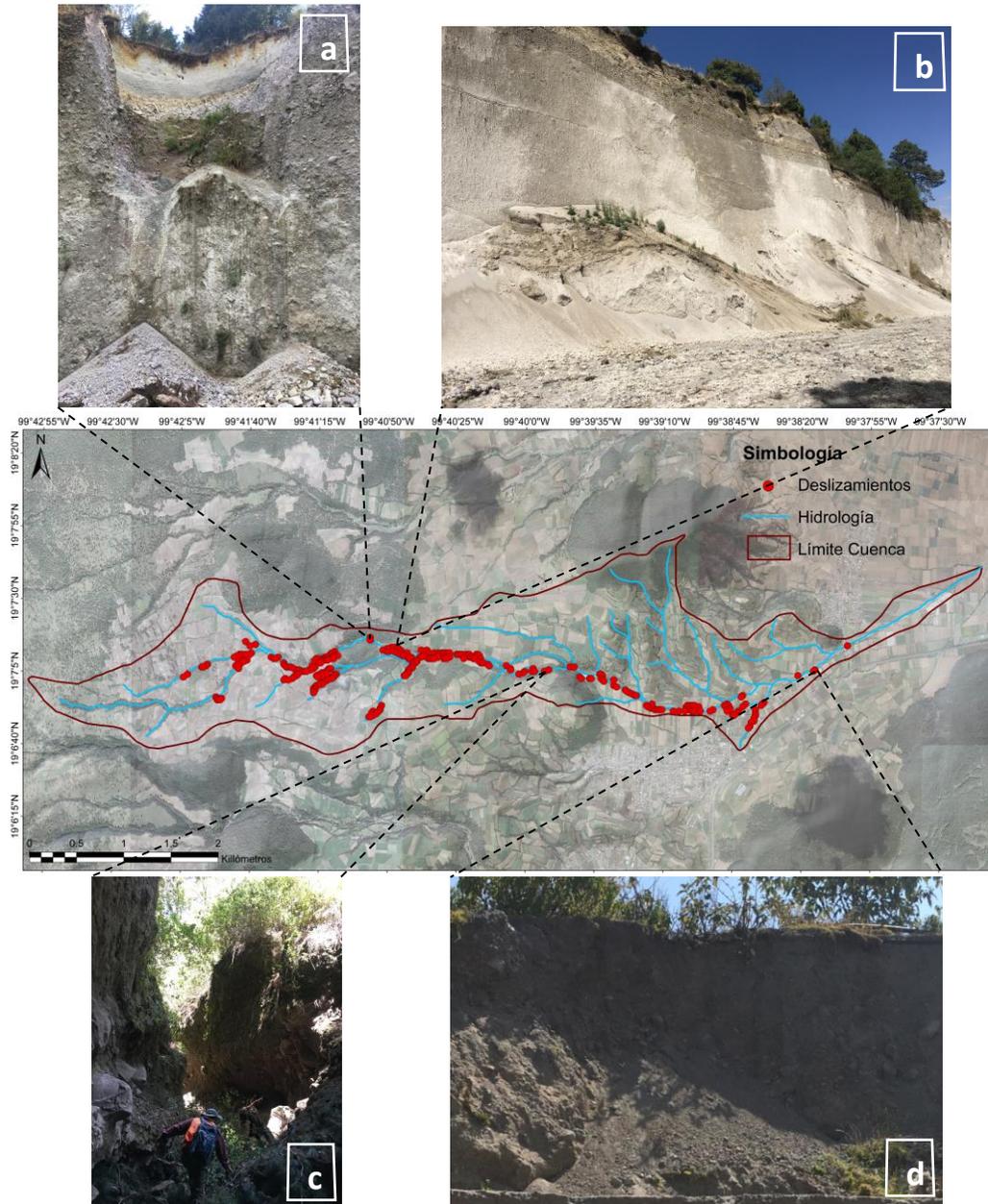
### 3.1 Análisis del inventario

En el inventario se identificaron 99 deslizamientos superficiales, todos ellos se encuentran en el cauce del río El Zaguán, de los cuales 90 son deslizamientos de escombros, 6 caída de roca y 3 flujos de escombros. En la figura 22 se muestra la distribución de los deslizamientos ejemplificando algunos tipos.

Las figuras 22 a y b muestran deslizamientos de flujo de escombros y de escombros. La diferencia entre ellos radica en la forma en que ocurren, el primero (Figura 22a) marca una cabecera bien definida dentro del terreno en forma de cazuela y la zona de evacuación toma una forma de canal, en este ejemplo el depósito del deslizamiento se encuentra visible pues en la mayoría de los deslizamientos el depósito suele ser arrastrado por el cauce del río. Por su parte el deslizamiento de escombros (Figura 22b) suele deslizarse sobre la zona de evacuación y deja visible la pared del cuerpo del deslizamiento donde el material de escombros se ha desprendido. La Figura 22c muestra caída de roca, aquí se puede apreciar que el cauce del río se ha reducido por la presencia de bloques dacíticos de hasta 2 m de diámetro que corresponden a la localización de rocas ígneas extrusivas declaradas por INEGI (1975). Las dimensiones de este deslizamiento son: 25 m de largo, 20 m alto y 3.0 de profundidad. La figura 22d muestra otro deslizamiento de escombros, se puede apreciar la presencia de depósitos constituidos por pómez y cenizas. Las dimensiones de este deslizamiento son: 3.5 m de largo, 1.5 m alto y 1.0 m de profundidad.

De los deslizamientos inventariados dentro del cauce del río (99), 57 se encuentran sobre el margen derecho y 42 en el margen izquierdo. Hay 7.3 hectáreas (ha) de deslizamientos de un total de 950.9 ha que comprende la cuenca El Zaguán. Los deslizamientos predominantes son de escombros y tienen entre 1-2 m de

profundidad, las medidas de cada deslizamiento (largo, alto y profundidad) se reportan en el anexo 1.



**Figura 22.** Distribución de los deslizamientos dentro de la cuenca El Zaguán. **a)** Flujo de escombros; **b)** Escombros; **c)** Caída de roca y **d)** Escombros.

De acuerdo con la litología de la cuenca, el 86% de los deslizamientos se encuentran sobre tobas (livianas y porosas), el 12% en suelo aluvial y el 2% en rocas ígneas extrusivas como la dacita. Las tobas se encuentran distribuidas en un 72.5% del área total de la cuenca entre los 2,900 – 3,300 m de altitud, donde se

practica principalmente la agricultura de temporal anual. En esta unidad se sitúan la mayoría de los deslizamientos. El suelo aluvial se encuentra en la parte baja de la cuenca entre los 2,677 – 2,900 m de altitud donde se originan algunos deslizamientos de escombros, y se practica la agricultura de temporal anual y permanente, hacia la desembocadura de la cuenca se sitúa la comunidad de San Francisco Putla.

En general los deslizamientos identificados en el cauce del río (escombros, flujos de escombros y caída de roca), se encuentran en áreas con pendientes que van de los 5° a los 32°.

### 3.2 Evaluación del modelo estadístico de RLM

Como se ha explicado anteriormente para el modelo de RLM se utilizaron las variables físicas del área de estudio (litología, edafología, pendiente, altitud, y uso de suelo y vegetación) como independientes. Los datos de las variables independientes fueron extraídos para 736 píxeles (368 con deslizamientos y 368 sin deslizamientos). El modelo se realizó con el software estadístico SPSS de los cuales derivan los siguientes resultados.

Las primeras pruebas que se corrieron fueron Tolerancia y Factor de Inflación de Varianza (VIF) con el fin de verificar que no existiera colinealidad entre las variables.

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos de Tolerancia y VIF de las variables cuantitativas pues SPSS no permite la entrada de datos cualitativos. Los datos no reportan problemas de colinealidad. Pues la tolerancia está por encima del 0.1 mínimo aceptado y el VIF es menor de 10 (Myers, 1990; Menard, 1995, Field, 2009).

**Tabla 7.** Valores estadísticos de colinealidad (Tolerancia y VIF).

Modelo	Estadísticas de colinealidad	
	Tolerancia	VIF
Pendiente	0.774	1.291
Altitud	0.463	2.160

Al correr el modelo de RLM utilizando el método paso a paso hacia atrás del estadístico de razón de verosimilitud (Backward: LR). SPSS primero muestra el modelo inicial, es decir indica cómo se codificó la variable dependiente, la tabla 8 simplemente indica que 0 = sin deslizamiento y 1 = con deslizamientos (Legorreta y Bursik, 2009).

**Tabla 8.** Codificación de la variable dependiente.

Valor original	Valor interno
Sin deslizamientos	0
Con deslizamientos	1

Al correr el modelo con el método paso a paso, éste empieza utilizando solo la constante en la ecuación de regresión. SPSS informa el valor del logaritmo de la verosimilitud cuando solo se incluye la constante (es decir, se omiten todas las variables de probabilidad). La tabla 9 indica que el valor de Logaritmo de la Verosimilitud (-2LL) es de 1020.313.

**Tabla 9.** Valor de logaritmo de la verosimilitud (-2LL).

Iteración		Logaritmo de la verosimilitud (-2LL)	Coefficientes Constante
Paso 0	1	<b>1020.313</b>	0.000

Logaritmo de la verosimilitud (-2LL) inicial: 1020.313

SPSS puede calcular la probabilidad de presencia o ausencia de deslizamientos por pixel. En la tabla 10 se utiliza solo la constante, aquí SPSS identifica que la mitad de los datos observados (368) corresponden a zonas con deslizamientos. El porcentaje correcto de clasificación del modelo para los casos con deslizamientos es del 100% y también SPSS sugiere a partir de estos datos el valor del punto de corte óptimo que es de 0.50.

**Tabla 10.** Clasificación y valor del punto de corte.

Variable dependiente observada		Variable dependiente pronosticada		
		Ausencia	Presencia	Porcentaje correcto
		0	1	
Ausencia	0	0	368	0
Presencia	1	0	368	100
Porcentaje global				50

a. La constante se incluye en el modelo.

b. **El valor de corte es 0.50**

Para validar el modelo estadístico se analizaron los coeficientes de Chi-cuadrado, Logaritmo de la verosimilitud (-2LL), el  $R^2$  de Cox & Snell y la  $R^2$  de Nagelkerke.

El estadístico chi-cuadrado del modelo indica cuanto mejoró la evaluación del modelo al incluir las variables independientes, pues cuanto mayor sea su valor, mayor será el ajuste del modelo. Se evalúa tomando en cuenta los valores de -2LL, midiendo la diferencia entre el modelo final donde se incluyen las variables independientes y el modelo inicial cuando solo se incluyó la constante. Es decir ( $1020.313 - 383.095 = 637.217$ ). En este caso el valor de chi-cuadrado es igual a 637.217, que se puede comprobar en la tabla 11, paso 5, lo cual indica que el modelo puede explicar al evento (ocurrencia de deslizamientos), dado que las variables independientes explican a la variable dependiente pues la significación de *b* (columna Sig *b*.) del modelo es menor a 0.05 (Tabla 11). Un valor de significancia menor a 0.05 es un buen indicador para contemplar al modelo como buen evaluador (Field, 2009).

**Tabla 11.** Valor de chi-cuadrado.

		Chi-cuadrado	Sig. b.
Paso 1	Paso	638.476	0.000
	Bloque	638.476	0.000
	Modelo	638.476	0.000
Paso 5 <sup>a</sup>	Paso	-0.785	0.376
	Bloque	637.217	0.000
	<b>Modelo</b>	<b>637.217</b>	<b>0.000</b>

a. Un valor negativo de chi-cuadrados indica que el valor de chi-cuadrado ha disminuido del paso anterior.

La tabla 12 muestra el valor del coeficiente  $-2LL$  cuando se han incluido las variables independientes. El valor de  $-2LL$  debe ser menor al valor obtenido cuando solo se incluye la constante en el modelo. Pues la reducción de este valor ( $-2LL$ ) indica que el modelo se ajusta mejor a los datos y por tanto evalúa a la variable dependiente con mayor precisión, es decir se considera al modelo como óptimo para la discriminación de áreas con susceptibilidad a deslizamientos. El valor inicial de  $-2LL$  es de 1020.313 cuando solo se incluye la constante (Tabla 9), y se redujo a 383.095 (Tabla 12) cuando se incluyen las variables independientes. Esta reducción indica que el modelo es adecuado para calcular la probabilidad de si un pixel presentará o no deslizamientos.

Los valores de  $R^2$  de Cox y Snell y  $R^2$  de Nagelkerke son medidas útiles que indican qué tan bien el modelo se ajusta a los datos. Puede variar entre 0, indicando que las variables independientes (evaluadoras) son inútiles para discriminar las clases de la variable dependiente y 1, lo que indica que el modelo diferencia las las clases de la variable dependiente perfectamente (Field, 2009).

Sin embargo, en SPSS la estadística de  $R^2$  de Cox y Snell nunca alcanza su máximo teórico de 1. Por lo tanto, se sugiere interpretar en RLM el valor de  $R^2$  Nagelkerke (Tabla 12) pues cuanto más alto es la  $R^2$  de Nagelkerke más explicativo es el modelo (Field, 2009). En ese caso los resultados muestran que el valor de  $R^2$  de

Nagelkerke (Tabla 12) es igual a 0.77 lo que indica que aproximadamente el 77% de los deslizamientos son explicados por las variables independientes utilizadas.

**Tabla 12.** Coeficientes -2LL, R<sup>2</sup> de Cox y Snell, y R<sup>2</sup> de Nagelkerke

Paso	-2 LL	R <sup>2</sup> de Cox y Snell	R <sup>2</sup> de Nagelkerke
1	381.837	0.58	0.77
5	383.095	0.57	0.77

La tabla 13 muestra el porcentaje correctamente clasificado para aquellos pixeles con probabilidad de presencia (1) y de ausencia (0) a deslizamientos. En el paso 5 la precisión para discriminar pixeles con probabilidad 0 es de 94.8% y de 84.8% para pixeles con probabilidad 1. El porcentaje de precisión global del modelo de RLM es de 89.8%, esto indica el número de pixeles que el modelo es capaz de evaluar correctamente con base en los datos observados (valores del inventario) (Field, 2009). Cuantos más pixeles clasifica correctamente (es decir coincide el valor evaluado con el valor observado) el modelo tiene una mayor capacidad para la clasificación de los casos, por lo tanto, el resultado de la tabla 13 indica que las variables independientes son buenas evaluadoras de la variable dependiente, porque tiene un 89% de clasificación correcta y el modelo es adecuado para discriminar áreas con presencia de deslizamientos, pues un modelo se acepta si clasifica correctamente más del 50% de los casos (Field, 2009).

**Tabla 13.** Tabla de clasificación.

	Variable dependiente observada		Variable dependiente pronosticada		
			Ausencia	Presencia	Porcentaje correcto
			0	1	
Paso 5	Ausencia	0	349	19	94.8
	Presencia	1	56	312	84.8
	Porcentaje global				89.8

En la tabla 14 se muestran los coeficientes ***b*** de las variables significativas en el modelo de RLM que son utilizadas en la construcción del modelo espacial. En este caso el modelo indica que Altitud, Pendiente, Litología (Toba), Edafología (Andosol humico+Cambisol eutrico, Andosol húmico, Andosol humico+Andosol ocrico, Feozem haplico, Fluvisol eutrico+Litosol), uso de suelo y vegetación (Urbano construido y Agricultura de temporal anual y permanente) son variables independientes que explican a la variable dependiente (deslizamientos) y que en general el modelo es mejor si solo se incluyen estos indicadores.

Los valores de ***b*** en la tabla indican la dirección de la relación entre la variable dependiente y las independientes. Un valor positivo en ***b*** indica que a más presencia de esa variable habrá mayor probabilidad de que suceda el evento (deslizamientos) (mayor sinergias entre variables). Así por ejemplo a mayor pendiente mayor probabilidad de presentarse un deslizamiento. Por otro lado, un valor negativo implica que si la variable evaluadora aumenta la probabilidad de que el resultado ocurra disminuye (antagonismo entre variables). Por ejemplo a mayor presencia de Andosol húmico menor probabilidad de deslizamientos.

**Tabla 14.** Variables en la ecuación.

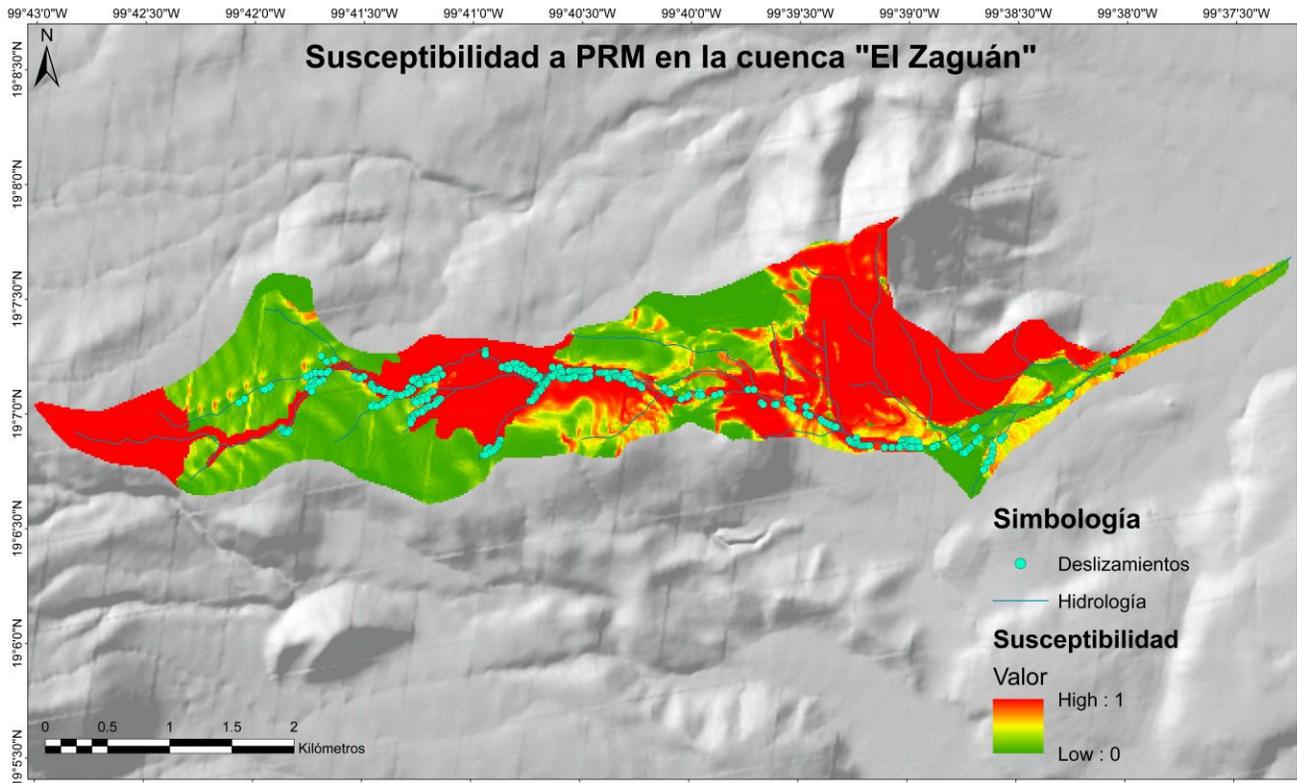
<b>Variables en la ecuación</b>	<b><i>b</i></b>
Altitud	<b>-0.003</b>
Pendiente	<b>0.34</b>
Ígnea-Toba	<b>4.22</b>
Andosol húmico + Cambisol eutrico	<b>-3.31</b>
Andosol húmico	<b>-1.87</b>
Andosol húmico + Andosol ocrico	<b>20.19</b>
Feozem haplico	<b>2.52</b>
Fluvisol eutrico+Litosol	<b>20.19</b>
Urbano construido	<b>22.55</b>
Agricultura de temporal anual y permanente	<b>22.59</b>

### 3.3 Evaluación del modelo espacial de susceptibilidad

Una vez evaluado el modelo estadístico se utilizaron los coeficientes ***b*** de las variables independientes o explicativas y el valor de la constante en la fórmula de RLM para obtener el mapa de susceptibilidad. El resultado de la fórmula es un modelo espacial (Figura 23) que indica aquellas áreas que de acuerdo con sus características físicas (pendiente, altitud, litología, edafología, y uso de suelo y vegetación) son susceptibles a presentar deslizamientos.

El modelo (Figura 23) muestra la susceptibilidad dentro de la cuenca El Zaguán con valores que van de 0 a 1. Los valores entre 0 y hasta 0.50 están representados por colores desde los verdes hasta los amarillos, estos indican zonas sin susceptibilidad a PRM (ausencia de deslizamientos). Los valores entre 0.50 y 1 son representados en colores naranjas y rojizos, indican áreas consideradas como susceptibles (presencia) a deslizamientos.

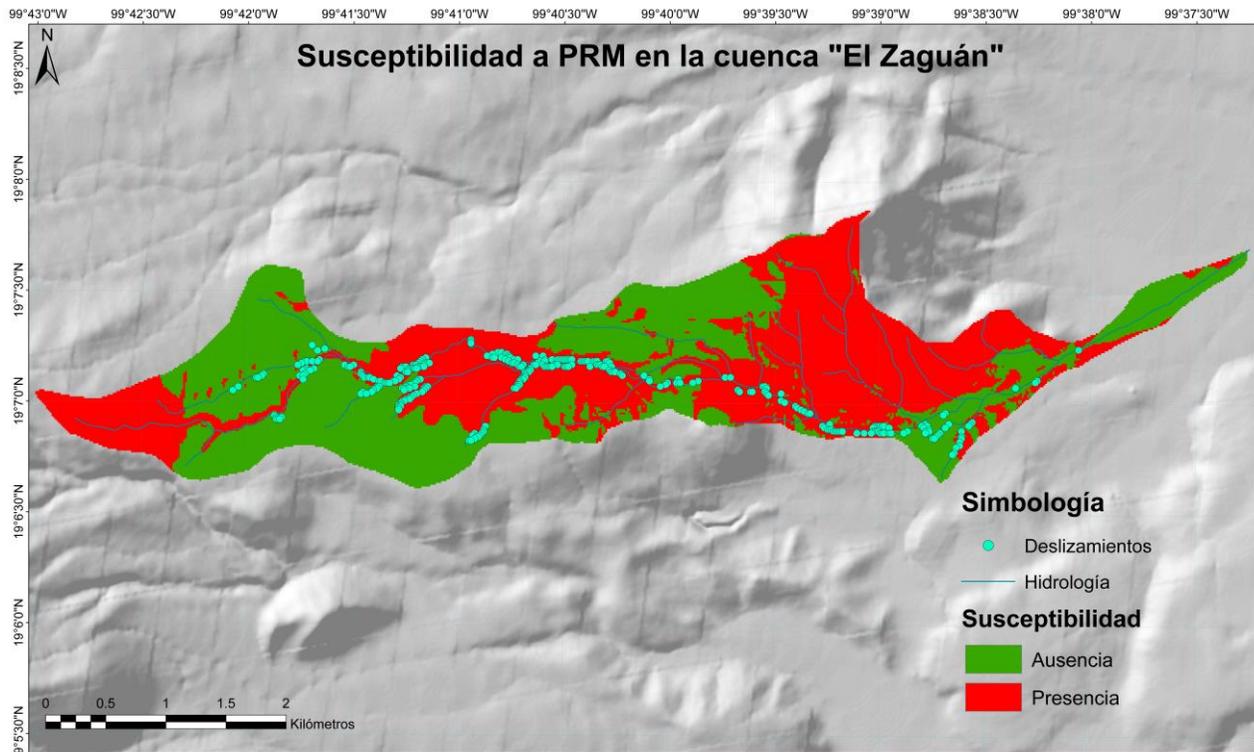
Las áreas susceptibles se encuentran a lo largo del río principal El Zaguán, en los ríos secundarios y se observan zonas importantes hacia la parte Noreste, Centro y Este de la cuenca (Figura 23). Son zonas que van desde los 10° hasta los 33° grados de pendiente, donde se encuentra establecida la agricultura de temporal anual y permanente que corresponden a sembradíos de papa, haba y brócoli. Son zonas con presencia de tobas.



**Figura 23.** Modelo espacial de susceptibilidad a PRM de la cuenca El Zaguán.

La figura 24 muestra la re-clasificación del modelo espacial de susceptibilidad tomando en cuenta el punto de corte. Esta reagrupación de los valores se hizo para facilitar el análisis cualitativo y cuantitativo del modelo. Se ha clasificado en 2 clases (presencia y ausencia) de deslizamientos. Las áreas de color verde indican zonas que no presentan susceptibilidad a deslizamientos y las zonas marcadas en rojo indican zonas susceptibles.

La cuenca El Zaguán tiene un área de 950 hectáreas de las cuales el 51% es susceptible a deslizamientos (486 ha). En la zona susceptible se encuentra el 80% de los deslizamientos identificados en el inventario y corresponde a deslizamientos de escombros, flujos de escombros y caída de roca. El 20% restante se localiza en zonas sin susceptibilidad (verde), donde se encuentra 1 tipo de deslizamientos (escombros) (Figura 24).



**Figura 24.** Modelo espacial clasificado que indica la presencia y ausencia de susceptibilidad a PRM.

Del 100% del área modelada como susceptible (Figura 25), el 82% corresponde a suelos agrícolas de temporal anual y permanente esto equivale a 398 ha (4.0 km<sup>2</sup>), estas zonas se encuentran distribuidas a lo largo de toda la cuenca, principalmente se trata de sembradíos de hortalizas (papa, haba y brócoli) donde antes se encontraban bosques de pino y encino, y en su mayoría corresponden a suelos con presencia de tobas.

El 10.9% corresponde a zonas forestales de bosque de pino-encino y de vegetación secundaria arbustiva y arbórea, estas áreas se encuentran en la parte noreste y centro de la cuenca, entre los 3,150 – 3,365 m de altitud y están compuestas por rocas ígneas extrusivas intermedias.

Un 6.3% corresponde a pastizal inducido, se encuentra principalmente en la aparte oeste de la cuenca entre los 3,110 – 3,680 m de altitud, equivalente a 31 ha, donde predominan las brechas volcánicas.

El 0.8% corresponde a urbano construido, se trata de asentamientos que pertenecen a la comunidad de San Francisco Putla situados entre los 2,730 - 2,754 m de altitud. Si bien, no toda la comunidad pertenece a la cuenca debido a los criterios que se tomaron en cuenta durante la delimitación de la misma, pero existe el potencial de afectación por el arrastre de escombros provenientes de todos aquellos deslizamientos que se forman a lo largo del cauce del río y que anteriormente han afectado a la comunidad.

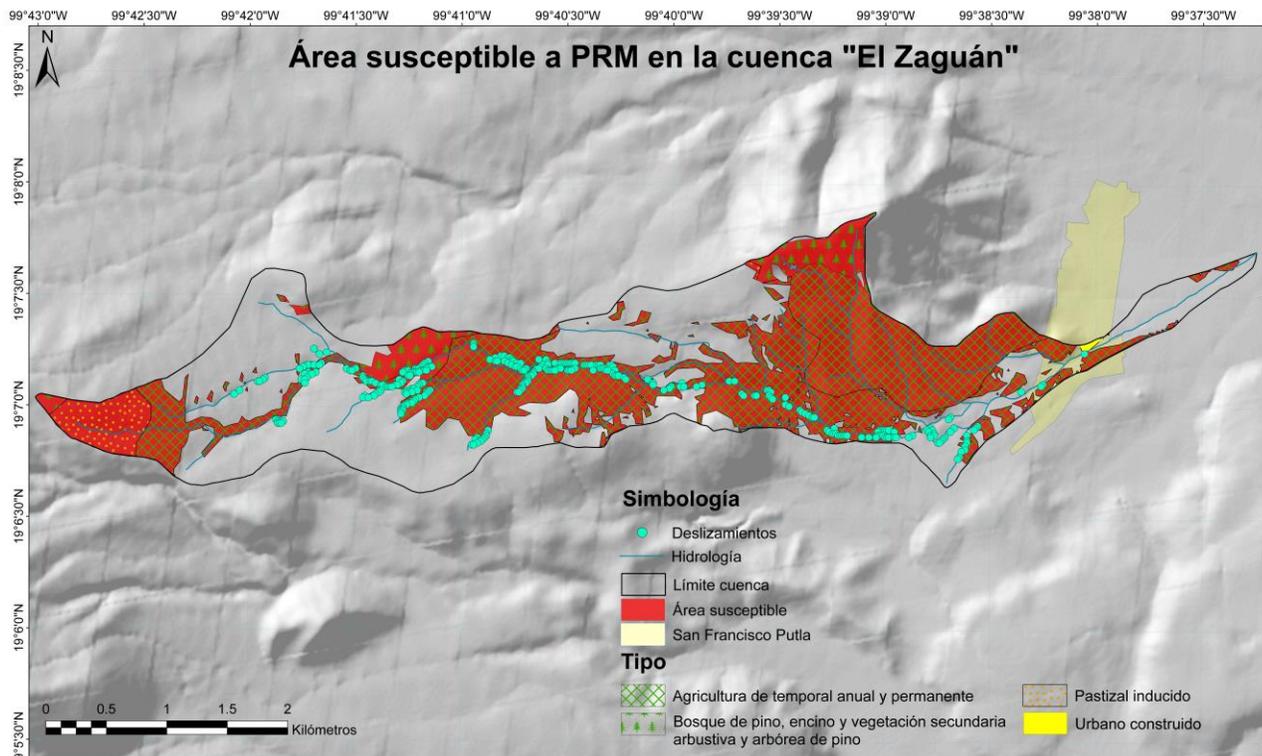


Figura 25. Modelo espacial que indica el uso de suelo en el área susceptible de la cuenca El Zaguán.

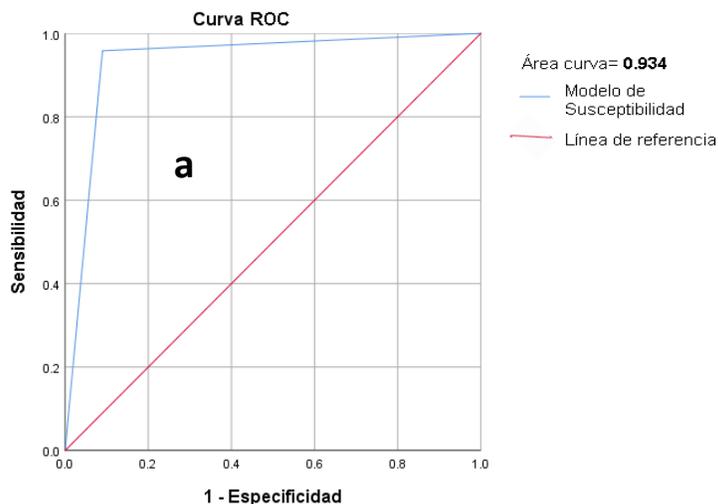
Durante el trabajo de campo se comprobó que en las paredes del cauce principal y secundarios el material predominante son los lahares pumíticos pero también había cenizas, arena y paleosuelo lo que fomenta el potencial a la formación de deslizamientos y caída de roca, debido a que se trata de material poco consolidado al tacto. También se pudo apreciar que la tala de bosque también promueve la inestabilidad del terreno debido al cambio de cobertura, de forestal a agrícola, pues debilita en gran medida la resistencia del suelo ante deslizamientos. Pues la

mayoría de los deslizamientos del inventario se observaron en áreas con estas características y también se observó la ausencia de ellos en áreas forestales.

Las técnicas cuantitativas como el análisis de la curva ROC y las pruebas realizadas mediante la tabla de contingencia (*Overall accuracy, Producer's accuracies y User's accuracies*) permitieron evaluar la eficiencia del modelo.

La curva ROC indicó una correcta clasificación de los casos (0 y 1) del modelo. Ya que los resultados arrojaron un área bajo la curva con valor estadístico de 0.93 (Figura 26).

El área bajo la curva muestra en un gráfico bidimensional los datos de sensibilidad (razón de pixeles verdaderos positivos) y especificidad (razón de pixeles falsos positivos) (Figura 26) que fueron interpretados mediante la línea de referencia. El espacio que hay entre la línea de referencia (rojo) y la línea del modelo de susceptibilidad (azul) indica que el modelo discrimina de manera eficiente los casos (0 y 1) ya que cuanto mayor sea el área bajo la curva, el modelo será mejor.

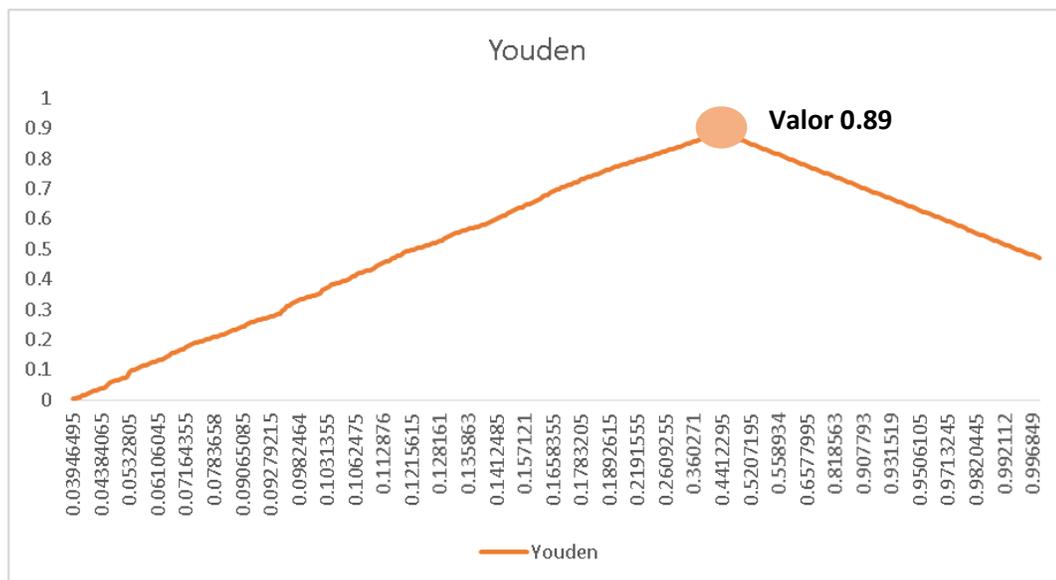


**Figura 26.** Curva Receiver Operating Characteristic (ROC). **a)** Área significativa bajo la curva ROC.

La tabla 15 muestra los valores de sensibilidad (0.95), especificidad (0.09), índice de Youden (0.89) y el punto de corte estadístico (0.50). La figura 27 muestra el gráfico de valores del índice de Youden, en su valor más óptimo (0.89) corresponde al corte 0.50. En ambos (tabla y gráfico) los valores indican el punto de corte óptimo para discriminar las zonas con susceptibilidad a deslizamientos. Los valores del índice de Youden y sensibilidad son aceptables cuanto más se acerquen a 1 y para especificidad cuanto más se acerque a 0, en este caso los resultados cumplen para ser considerados buenos para el modelo.

**Tabla 15.** Valores de sensibilidad y especificidad.

Sensibilidad	Especificidad	Índice de Youden	Punto de corte optimo
1.000	1.000	0	-1.0
<b>0.958</b>	<b>0.090</b>	<b>0.89</b>	<b>0.50</b>
0.000	0.000	0	2.0



**Figura 27.** Índice de Youden. Elaboración propia con base en Cerda y Cifuentes, (2012).

Para evaluar si hay sobre-evaluación o sub-evaluación en el modelo se calcularon las medidas de precisión del productor y del usuario así como la eficiencia del modelo.

Para estas pruebas se elaboró una tabla de contingencia (Tabla 16). Esta tabla se construyó tomando en cuenta el número total de píxeles de la cuenca El Zaguán (42,254) y se realizó la comparación del Inventario VS el Modelo.

La tabla 16 muestra una precisión global (*Overall accuracy*) de 49.5%, este valor se obtuvo al sumar en una diagonal verdaderos positivos y verdaderos negativos entre el total de valores  $(311) + (20,617) / 42,254$ . Este valor se explica porque se pondera más la categoría predominante. En este caso corresponde a la clase correctamente clasificada como "Ausencia", pues cuenta con 20,617 píxeles, mientras que la clase correctamente clasificada como "Presencia" con deslizamiento cuenta con tan solo 311 píxeles.

**Tabla 16.** Contingencia, comparación del inventario VS modelo.

		INVENTARIO		TOTAL
		Presencia (1)	Ausencia (0)	
M O D E L O	Presencia (1)	311	21,269	<b>21,580</b>
	Ausencia (0)	57	20,617	<b>20,674</b>
	<b>TOTAL</b>	<b>368</b>	<b>41,886</b>	<b>42,254</b>
<b>Precisión Global</b>		<b>49.5%</b>		

La precisión del productor (*Producer's accuracies*) indica que 311 de un total de 368 píxeles con presencia de deslizamientos del inventario fueron correctamente clasificados por el modelo como zonas con susceptibilidad. Por lo tanto, la precisión del productor indica que entre el inventario y el modelo de RLM existe una coincidencia del 85% (Tabla 17). Tener esta coincidencia permite pensar en una

sobre-evaluación del modelo porque es probable que las áreas con ausencia de deslizamientos se clasifiquen incorrectamente como áreas con presencia y esto se muestra por el bajo porcentaje en la precisión del usuario (1.4%) y los valores negativos en la eficiencia del modelo (*model efficiency*) (-56.9) (Tabla 17).

En este caso la precisión del usuario (*User's accuracies*) es del 1.4% (Tabla 17). Este porcentaje es relativamente bajo debido a que los 311 píxeles con presencia de deslizamientos son comparados con 21,580 píxeles que el modelo predijo como áreas con susceptibilidad a deslizamientos.

**Tabla 17.** Precisión del productor, usuario y eficiencia del modelo.

	<b>Presencia</b>	<b>Ausencia</b>
Precisión del productor	85%	49.2%
Precisión del usuario	1.4%	99.7%
Eficiencia del modelo	-56.9	

Los 21,580 píxeles que el modelo evalúa como zonas susceptibles son áreas en el inventario sin datos observados y recabados en campo. Esto interfiere significativamente en la precisión del usuario pues el inventario fue construido con los datos recabados en campo de los deslizamientos encontrados sobre el cauce del río y la fotointerpretación de imágenes de satélite, mejorar esta significancia implica un trabajo de campo exhaustivo de toda el área de la cuenca que requiere de tiempo y recursos.

Como etapa final se realizó una última salida a campo con el fin de verificar sitios donde el modelo calculo zonas con probabilidad a deslizamientos que no fueron documentadas en campo.

Para la selección de estos sitios de verificación se tomaron en cuenta los siguientes criterios: 1) La ubicación; que el sitio estuviera dentro de la zona que el modelo predijo como área susceptible a deslizamientos y que no fueran lugares lejanos a la población o con pocas rutas de entrada y salida; y 2) La accesibilidad y seguridad al sitio a visitar. Pues algunos de los sitios con vegetación densa y en zonas escarpadas son de difícil acceso; se evitaron aquellas áreas de uso privado como casas, granjas y sembradíos acorralados con malla, esto con la finalidad de no dañar o afectar las actividades de la población y que se viera comprometida la integridad física y moral del equipo de trabajo de campo.

En la figura 28 se muestran los puntos que se verificaron en campo. En el punto A (Figura 28 y Anexo 3-A) se identificaron deslizamientos de escombros de al menos 1 m de altura con presencia de material leñoso, en la zona de evacuación del deslizamiento se observó humedad en el suelo y material poco consolidado, y en sus alrededores presencia de actividad agrícola como sembradíos de papa y brócoli.

En el punto B (Figura 28 y Anexo 3-B) se muestra la presencia de deslizamiento de escombros, en este deslizamiento la zona de evacuación estaba comprendida con materiales poco consolidados como piedra pómez de color amarillo-rojizo junto con bloques de rocas de 20-30cm de diámetro, también se observó la presencia de depósitos de material leñoso.

En el punto C (Figura 28 y Anexo 3-C) se observó un deslizamiento de asentamiento profundo. Este se documentó con un vuelo de DRON con el fin de obtener imágenes y medidas del deslizamiento. A sus alrededores se observó gran influencia de agricultura principalmente sembradíos de papa y presencia de casas y granjas. Este deslizamiento se encuentra hacia el lado izquierdo de otro deslizamiento de asentamiento profundo que anteriormente se había documentado en Anexo 2. Lo que indica que se trata de una zona potencialmente susceptible ante la ocurrencia de deslizamientos. Aunado a lo anterior, en el pie de estos deslizamientos se encuentran casas que podrían ser afectadas tras el arrastre de sedimentos.

El punto D (Figura 28 y Anexo 3-D) muestra una serie de deslizamientos de escombros identificados a lo largo de un río secundario, de difícil acceso debido a la vegetación densa, presencia de humedad y caudal sobre el mismo río. Este sector se documentó con un vuelo de DRON. Se identificó material removido por el deslizamiento como raíces de árboles, material leñoso y presencia de bloques de roca de hasta 1 m de diámetro.

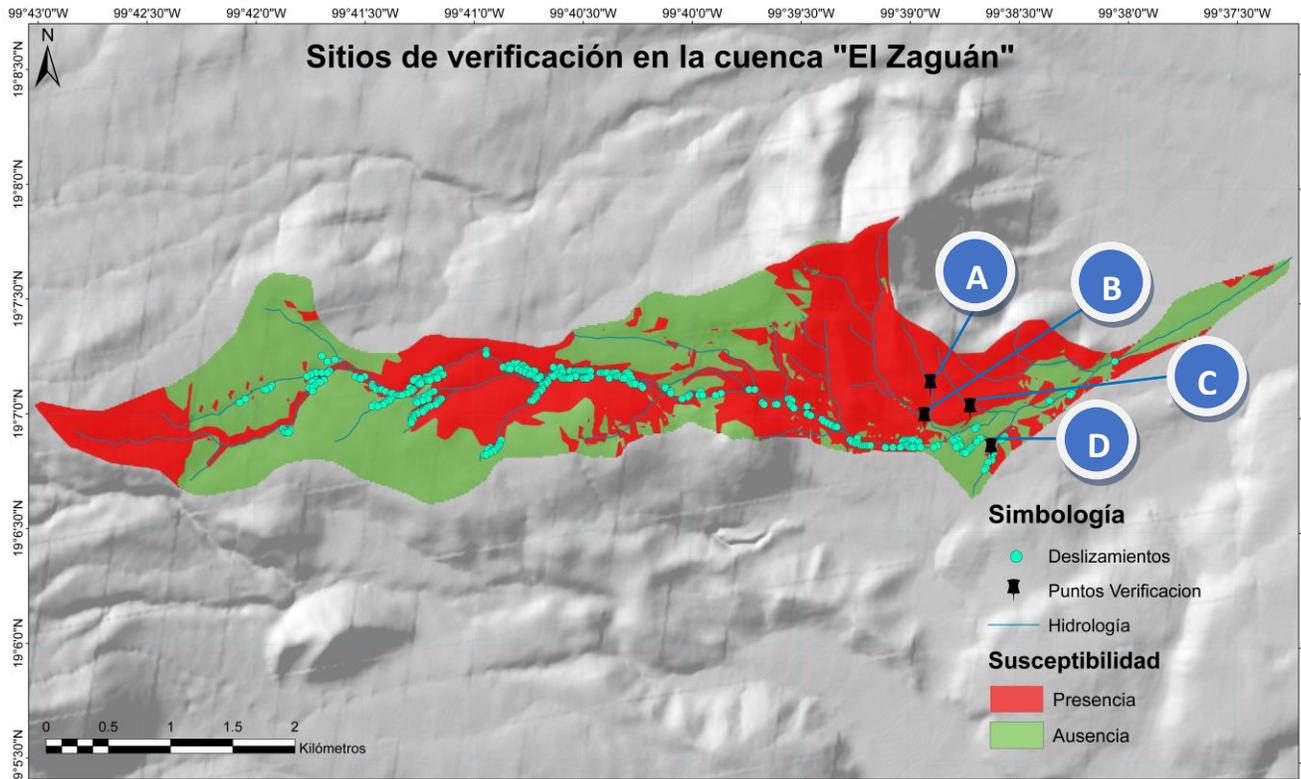


Figura 28. Sitios de verificación en la cuenca El Zaguán.

La presencia de deslizamientos en estos puntos de verificación indica que el modelo es buen evaluador para estimar la susceptibilidad a PRM tomando en cuenta las características físicas de la zona de estudio (litología, edafología, pendiente, altitud, uso de suelo y vegetación).

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La generación de información geoespacial sobre susceptibilidad a deslizamientos es de suma importancia para la toma de decisiones gubernamentales; pues sirve para canalizar de manera eficiente recursos que se asignen en la mitigación del riesgo a deslizamientos. Por consiguiente la información generada en este estudio sobre la distribución y el tipo de deslizamientos, así como la susceptibilidad de la cuenca El Zaguán sirve en gran medida para investigaciones futuras pues es considerada un fundamento principal en la realización de las primeras etapas de proyectos de carácter geográfico.

Generalmente en las investigaciones de susceptibilidad la falta de inventarios de deslizamientos limitan la evaluación de un modelado estadístico de susceptibilidad pues no existe una referencia de comparación. Esta limitante se vio reflejada en la cuenca El Zaguán pues no había inventarios de investigaciones pasadas que pudieran ser retomados, complementados y que sirvieran de referencia para un análisis estadístico. Es por ello que el trabajo de campo se consideró fundamental en toda la investigación ya que permitió comprobar la presencia de deslizamientos identificados en gabinete. El trabajo de campo se basó en el cálculo de una muestra representativa que sirvió para documentar, medir, fotografiar y clasificar a los PRM para realizar la construcción del primer inventario de deslizamientos de la cuenca que posteriormente se utilizó en la comparación contra el modelo. Además el trabajo de campo sirvió en la etapa final de la investigación para documentar áreas donde el modelo calculó la susceptibilidad y validar que existieran deslizamientos en los puntos de verificación.

Sin embargo aunque se cumplió con el recorrido del cauce principal de la cuenca El Zaguán, se recomienda complementar el inventario con más trabajo de campo para recorrer los ríos secundarios y visitar otras áreas accesibles de la cuenca con el fin de elaborar un inventario con más detalle. Tal actividad complementaria requiere principalmente de tiempo y recursos económicos y también dependerá del objetivo

del estudio. El hecho de realizar esta actividad implica varias ventajas, una de ellas es no sólo complementar el inventario y dar seguimiento a la evolución de la cuenca en estos procesos sino también potencialmente incrementar el grado de validez de las técnicas estadísticas de precisión del usuario y eficiencia del modelo ya que potencialmente se ampliaría el área con presencia de deslizamientos en el inventario que al final es comparada con el resto de la cuenca en la tabla de contingencia.

El inventario de deslizamientos permitió observar de forma cualitativa su distribución dentro de la cuenca El Zaguán pues el 80% de ellos se encuentra dentro de la zona susceptible declarada por el modelo y está fuertemente relacionada con la presencia de materiales deleznales, ligeros y porosos como la pómez. En su mayoría el río principal corta secciones estratigráficas de lahares pumíticos derivados de la Formación de Pómez Toluca Superior (FPTS). Los secundarios presentan secciones de material fluvial derivado de la FPTS. En el río principal y los secundarios las secciones están conformadas por pequeños sectores de paleosuelo, cenizas y arenas, la presencia de todos estos materiales poco consolidados favorecen a la ocurrencia de deslizamientos dejando expuestas algunas laderas con pendiente de hasta 33°. La poca vegetación que aún se encuentra cerca del cauce principal y secundarios en la cuenca, es de gran importancia ya que interviene en la estabilidad del terreno, pues retiene materiales propensos a deslizarse, así por ejemplo a lo largo del río se observa más vegetación del lado del margen izquierdo en comparación con el derecho y esto se ve reflejado en un menor número de deslizamientos sobre este lado.

El cambio uso de suelo de forestal a agrícola se considera un factor importante que promueve la inestabilidad del terreno pues casi la totalidad del área de la cuenca está sujeta a uso agrícola de temporal anual y permanente, esto permite explicar la susceptibilidad en la cuenca El Zaguán, debido a que la presencia de la mayoría de los deslizamientos se da en las zonas agrícolas y la ausencia de ellos en zonas de cobertura forestal. Lo anterior permite pensar en la importancia de la presencia de

raíces y arbustos en el suelo que aseguren la capacidad de retención del terreno en las zonas forestales.

En términos cuantitativos el modelo estadístico de RLM reportó una clasificación del 84.8% en áreas con presencia de deslizamientos utilizando solo 5 variables físicas del área de estudio (edafología, litología, pendiente, altitud, y uso de suelo y vegetación). Estas variables que se utilizaron para el modelo estadístico describieron el fenómeno (deslizamientos) y resultaron estadísticamente significativas como se observa en los resultados de la tabla 14 ya que reportaron una mayor relación con el proceso de deslizamientos por medio del método empleado hacia atrás del estadístico de razón de verosimilitud.

Para la evaluación estadística del modelo de RLM se utilizó la curva ROC y la tabla de contingencia. Por un lado la curva ROC permitió eliminar la subjetividad en el corte de los datos de los resultados de RLM con la finalidad de clasificar las áreas susceptibles de las que no lo son, mediante los valores de sensibilidad, especificidad y el índice de Youden.

La tabla de contingencia permitió evaluar la precisión del modelo (productor, usuario y la eficiencia del mismo). Los resultados permitieron calcular los niveles de precisión de que un pixel sea clasificado correctamente con probabilidad a deslizarse tomando en cuenta los datos observados en campo (inventario) y el modelo, esta coincidencia entre el inventario y el modelo fue del 85% (*Producer's accuracies*). También se pudo concluir que el modelo de RLM tiende a sobre-evaluar como lo muestra el valor negativo en la eficiencia del modelo (*Model efficiency*) y el porcentaje de 1.4% en la precisión del usuario (*User's accuracies*). Este bajo porcentaje en la precisión del usuario significa que se tendría una probabilidad del 1.4% de que si se seleccionara aleatoriamente un pixel de toda el área de la cuenca que represente un área con probabilidad a deslizamiento, dicha área corresponda efectivamente a un deslizamiento presente. En esta investigación se prefiere la sobre-evaluación del modelo pues representa áreas potenciales a deslizamientos futuros, porque las zonas declaradas por el modelo como

susceptibles se encuentran cerca de los cauces del río principal y secundarios donde se observaron la mayoría de los deslizamientos del inventario. Es evidente que el inventario por sí solo no evalúa futuras áreas con susceptibilidad a PRM por esta razón no es posible que tanto las zonas susceptibles declaradas por el modelo deban coincidir con el inventario, además pueden faltar algunos deslizamientos recientes. Por ejemplo en esta investigación se realizaron 3 sesiones en campo con diferencia de un mínimo de 5 meses entre ellas. En la tercera salida a campo se observaron nuevos deslizamientos en áreas que ya habían sido visitadas durante la primera salida. Además en la literatura los modelos que se han utilizado para el cálculo de susceptibilidad a PRM y que presentan una sobre-evaluación han sido aceptados, pues estos modelos son en sí una guía para evaluar áreas con susceptibilidad a PRM y para estimar el límite admitido en una sobre-evaluación, el modelo debe ser sometimiento a varias pruebas para evaluar su sub-evaluación y sobre-evaluación en diferentes escalas.

El modelo de RLM puede ser aún mejor si se aumenta el porcentaje en la precisión del usuario, realizando más trabajo de campo que permita equilibrar el área con presencia de deslizamientos entre el inventario y el modelo pues en este estudio el inventario se construyó tomando en cuenta solo los deslizamientos situados sobre el cauce del río.

La ventaja de usar el modelo de RLM es que permite incluir, discriminar y ajustar “*N*” cantidad de variables espaciales que se asocien con el proceso de susceptibilidad con fin de obtener aquellas que distinguen mejor el fenómeno. Pues de acuerdo con el principio de parsimonia de los modelos, lo ideal es que sea capaz de hacer una buena separación de casos con un menor número de variables.

En la cuenca el Zaguán se tomaron en cuenta 5 variables (cualitativas y cuantitativas), pues no existen investigaciones previas que permitan considerar a otras variables de referencia como buenas evaluadoras y que expliquen el fenómeno (deslizamientos). Aun así con solo esas 5 variables el modelo pudo

clasificar correctamente áreas susceptibles con una confiabilidad del 84.8% (Tabla 13). En un futuro se pueden considerar variables socioeconómicas que tengan relación con el proceso, que no fueron consideradas en este caso debido a la carencia de datos, pues existen algunos indicadores relacionados con actividades económicas, pero esta información está disponible de manera general para el municipio de Tenango del Valle.

En cuanto a la última salida a campo se comprobó la presencia de deslizamientos en los sitios piloto donde el modelo predijo susceptibilidad. En estos puntos se observaron deslizamientos de escombros recientes con la presencia de sus depósitos, originados por la existencia de humedad en el suelo, la presencia de sembradíos y además estas zonas estaban conformadas por material poco consolidado como pómez. La verificación de los 4 sitios piloto fue un ejercicio rápido para la comprobación de deslizamientos en campo, si bien, esta actividad no está dentro de los objetivos de esta investigación pero sirvió de nueva cuenta para comprobar la validez del modelo además de considerar estas zonas para complementar el inventario para estudios posteriores pues los deslizamientos observados se encontraron cerca de los ríos secundarios.

La información cartográfica que se utilizó en esta investigación fue retomada de las instituciones oficiales, esto implica que la base espacial cumple con los estándares de calidad de las instituciones correspondiente para que dicha información pueda ser utilizada en trabajos de investigación. Así mismo el modelo de RLM y su validación (tabla de contingencia) ya han sido utilizados en otras investigaciones sobre susceptibilidad. Entonces la metodología empleada en este trabajo puede ser retomada para cualquier lugar del país, incluso con diferente escala espacial y temporal, pues fue elaborada con datos abiertos disponibles para ser consultados y usados. Todos estos atributos hacen que la presente investigación pueda ser retomada como base para futuras investigaciones que soliciten contar con variables de referencia como buenas evaluadoras de la susceptibilidad.

## ANEXOS

### Anexo 1. Tabla de localización y atributos de los deslizamientos situados en el cauce del río que conforman el inventario

ID	Tipo	X	Y	Partes	Margen del río	Medidas (metros)			Observaciones
						Largo	Alto	Profundidad	
1	Escombros	433281.644	2114306.303	Cabecera	Derecho	3.5	1.5	1.0	Superficial somero
2	Escombros	433027.378	2114157.457	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	12.5	1.0	1.0	Superficial somero
3	Escombros	432937.247	2114045.626	Cabecera y cuerpo	Derecho	23.5	4.8	1.0	Superficial somero
4	Escombros	432778.082	2114005.775	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	29.5	3.6	1.5	Textura de Pómez vítrea y presencia de dacita
5	Escombros	432362.123	2113675.157	Cabecera y cuerpo	Derecho	93.0	10.6	2.0	Hay potencial de deslizamientos en margen izquierdo
6	Escombros	432206.657	2113726.022	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	52.0	11.2	2.0	Presencia de terraza de 1.34m de altura
7	Escombros	432210.110	2113661.111	Cabecera	Derecho	61.0	6.0	1.8	Deslizamiento en meandro
8	Escombros	432076.783	2113573.591	Cabecera	Derecho	109.9	14.0	2.0	Presencia de terraza de 3.6m de alto
9	Escombros	432034.394	2113676.803	Cabecera	Izquierdo	130.1	14.0	2.0	Presencia de terraza de 3.6m de alto
10	Escombros	432005.084	2113660.838	Cabecera	Derecho	85.2	14.0	2.0	Presencia de terraza de 3.6m de alto
11	Escombros	431865.659	2113636.356	Cabecera	Derecho	78.0	7.0	1.5	Se escaló gavión para llegar a este punto
12	Escombros	431653.666	2113680.796	Cabecera	Izquierdo	108.0	10.0	2.0	Polígono de deslizamiento
13	Escombros	431595.054	2113633.152	Cabecera	Derecho	267.0	12.0	4.0	Polígono de deslizamiento
14	Escombros	431240.256	2113645.023	Cabecera y cuerpo	Derecho	253.0	12.6	1.5	Polígono de deslizamiento
15	Escombros	431232.272	2113689.823	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	43.0	8.6	1.0	No hay presencia de depósito
16	Escombros	426829.231	2114137.271	Cabecera	Izquierdo	68.0	5.0	1.0	Polígono de deslizamiento
17	Escombros	426874.822	2114165.501	Cabecera	Izquierdo	40.0	7.5	1.0	Deslizamiento grande
18	Escombros	426839.426	2114060.426	Cabecera y cuerpo	Derecho	36.0	13.0	1.0	Deslizamiento activo de escombros
19	Escombros	426872.236	2114125.052	Cabecera	Derecho	85.0	30.0	1.0	Activo, sobre pómez.
20	Escombros	426924.582	2114198.898	Cabecera	Izquierdo	60.0	5.0	1.5	Activo, con pómez
21	Escombros	426939.103	2114174.751	Cabecera	Derecho	30.0	5.0	1.0	Escombros activo
22	Escombros	426978.381	2114217.369	Cabecera y cuerpo y Depósito	Derecho	25.0	6.0	2.5	Escombros activo, sobre pómez
23	Escombros	426968.801	2114228.409	Cabecera y cuerpo y Depósito	Izquierdo	40.0	3.5	1.0	Escombros activo, presencia de ceniza y pómez
24	Escombros	427107.002	2114259.829	Cabecera	Izquierdo	38.0	5.0	0.5	Sobre mezcla de cenizas y pómez
25	Escombros	427166.521	2114222.565	Cabecera y cuerpo	Derecho	35.0	8.2	2.5	Presencia de ceniza y pómez disperso

26	Escombros	427220.750	2114179.128	Cabecera y cuerpo	Derecho	92.0	14.5	1.0	Activo, presencia de depósitos, ceniza y pómez
27	Escombros	427246.587	2114219.372	Cabecera	Izquierdo	27.0	6.0	1.0	Inicia tramo estrecho de bloques de roca
28	Escombros	427343.795	2114163.406	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	25.0	9.0	1.0	Presencia de un depósito
29	Escombros	427565.746	2114046.063	Cabecera	Derecho	196.4	27.0	1.0	Activo, polígono de deslizamientos
30	Escombros	427341.805	2114100.797	Cabecera	Derecho	127.6	27.0	1.0	Activo, polígono de deslizamientos
31	Escombros	427617.789	2114097.561	Cabecera	Izquierdo	50.0	14.0	1.0	Deslizamiento activo, presencia de pómez
32	Escombros	427752.640	2114187.369	Cabecera	Izquierdo	240.0	22.0	3.0	Deslizamientos activos
33	Escombros	427752.640	2114187.369	Cabecera	Derecho	240.0	22.0	3.0	Deslizamientos activos
34	Escombros	428220.744	2114420.622	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	50.0	22.0	2.0	Activo, se observa dacita
35	Flujo de escombros	428219.117	2114308.147	Cabecera y zona de evacuación	Derecho	16.0	25.0	2.0	Presencia de pómez, paleosuelo y bloques rocosos
36	Flujo de escombros	428295.052	2114361.196	Cabecera y zona de evacuación	Izquierdo	16.8	14.0	1.0	Formación de canchales y zona de evacuación
37	Escombros	428337.435	2114293.569	Cabecera	Derecho	150.0	35.0	13.0	Presencia de depósito de 15m altura
38	Escombros	428208.699	2114562.368	Cabecera	Izquierdo	6.4	4.0	0.5	Presencia de material leñoso
39	Escombros	428068.477	2114545.072	Cabecera	Izquierdo	8.0	4.0	1.5	Presencia de material leñoso
40	Escombros	430578.381	2113968.727	Cabecera	Derecho	53.0	12.4	1.0	Deslizamiento activo
41	Escombros	430464.947	2113972.273	Cabecera	Derecho	40.0	13.4	1.0	Deslizamiento activo
42	Caída de roca	430376.282	2114096.908	Cabecera	Izquierdo	53.0	24.0	2.0	Presencia de rocas de 0.5m-1.5m
43	Escombros	430194.604	2114075.736	Cabecera	Derecho	30.0	18.0	2.0	Deslizamiento arriba de salto
44	Caída de roca	430079.970	2114066.190	Cabecera	Izquierdo	25.0	20.0	3.0	Caída de roca masiva
45	Caída de roca	430125.144	2114056.643	Cabecera	Derecho	23.2	20.0	3.0	Caída de roca masiva
46	Caída de roca	430084.100	2114040.797	Cabecera	Derecho	25.5	20.0	3.0	Caída de roca masiva
47	Caída de roca	430112.265	2114073.095	Cabecera	Izquierdo	28.7	20.0	3.0	Caída de roca masiva
48	Escombros	430001.294	2114034.488	Cabecera	Derecho	13.0	16.0	1.0	Deslizamiento activo
49	Escombros	429982.475	2114039.580	Cabecera	Izquierdo	41.0	16.0	2.0	Presencia de depósito de 10m de largo
50	Escombros	429936.842	2114082.657	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	56.0	45.0	2.0	Deslizamiento activo
51	Escombros	430572.761	2114431.985	Cabecera	Izquierdo	14.0	5.0	1.5	Potencialmente humano, presencia de pómez.
52	Escombros	429946.383	2114041.373	Cabecera	Izquierdo	13.0	13.0	1.5	Presencia de quema de vegetación
53	Escombros	429867.316	2114036.754	Cabecera	Izquierdo	66.0	13.0	4.0	Presencia de depósito de 6m largo
54	Escombros	429854.227	2113999.142	Cabecera	Derecho	33.0	16.0	3.0	Presencia de depósito de 10m largo
55	Caída de roca	429804.739	2114003.103	Cabecera	Derecho	65.0	30.0	3.0	Caída masiva de roca, bloques 3-4m de tamaño

56	Escombros	429702.940	2114093.341	Cabecera Cuerpo y Deposito	Derecho	110.0	50.0	3.0	Presencia de pómez roja, ceniza y bloques
57	Escombros	429494.143	2114108.307	Cabecera cuerpo y Deposito	Derecho	40.0	17.0	1.5	Presencia de depósito de 10m de largo
58	Escombros	429427.274	2114130.827	Cabecera cuerpo y Deposito	Derecho	102.0	24.0	2.0	Presencia de depósito de 5m de largo
59	Escombros	429283.885	2114227.505	Cabecera Cuerpo y Deposito	Izquierdo	330.0	40.0	3.0	Presencia de depósito de 30m de largo
60	Escombros	429285.561	2114188.188	Cabecera	Derecho	142.0	18.0	2.0	Presencia de depósito de 10m largo
61	Escombros	428999.910	2114236.308	Cabecera Cuerpo y Deposito	Izquierdo	172.0	32.0	2.5	Presencia de 3 depósitos
62	Escombros	428960.914	2114185.987	Cabecera Cuerpo y Deposito	Derecho	257.0	19.5	2.0	Presencia de deposito
63	Escombros	428809.901	2114276.218	Cabecera y cuerpo	Izquierdo	109.0	25.0	2.0	Deslizamiento presente a partir de los 7m altura
64	Escombros	428797.558	2114207.598	Cabecera cuerpo y Deposito	Derecho	83.0	25.0	2.0	Presencia de depósito de 30m de largo
65	Escombros	428585.173	2114241.898	Cabecera Cuerpo y Deposito	Izquierdo	336.0	37.0	15.0	Deslizamientos activos
66	Escombros	428417.678	2114284.393	Cabecera Cuerpo y Deposito	Izquierdo	35.0	37.0	15.0	Deslizamientos activos
67	Escombros	428549.388	2114224.917	Cabecera	Derecho	206.0	30.0	2.0	Presencia de depósitos de 100 y 65m de largo
68	Escombros	428379.011	2114262.361	Cabecera	Derecho	65.0	29.0	1.5	Presencia de depósito 20m de largo
69	Escombros	427059.602	2114320.151	Cabecera	Derecho	124.0	4.2	0.5	Polígono de deslizamientos
70	Escombros	427010.945	2114323.446	Cabecera	Izquierdo	52.0	5.5	1.5	Zona activa a deslizamientos
71	Escombros	426963.116	2114314.612	Cabecera	Derecho	96.0	8.0	1.5	Deslizamiento sobre pómez
72	Escombros	426950.548	2114355.911	Cabecera	Izquierdo	10.0	4.0	0.5	Presencia de ceniza y pómez
73	Escombros	426919.659	2114355.197	Cabecera	Derecho	15.0	10.0	0.5	Presencia de pómez y ceniza poco consolidada
74	Escombros	426937.100	2114369.785	Cabecera	Izquierdo	8.0	3.0	0.5	Presencia de pómez y ceniza poco consolidada
75	Escombros	426893.663	2114363.461	Cabecera	Derecho	8.0	6.0	0.5	Deslizamiento superficial activo
76	Escombros	430677.712	2114011.289	Cabecera	Izquierdo	42.0	10.8	3.0	Deslizamiento activo
77	Escombros	430696.150	2113954.344	Cabecera	Derecho	160.0	17.0	0.5	Punto GPS tomado a 10m de la pared
78	Flujo de escombros	431073.950	2113766.863	Cabecera y zona de evacuación	Derecho	8.2	25.0	1.0	Deslizamiento activo
79	Escombros	430996.810	2113810.779	Cabecera y depósitos	Derecho	155.0	25.0	1.5	Presencia de depósitos
80	Escombros	430849.693	2113873.496	Cabecera	Derecho	100.0	30.0	2.0	Presencia de terraza margen izquierdo

81	Escombros	430817.601	2113952.852	Cabecera cuerpo y depósitos	Izquierdo	15.0	9.0	1.0	Presencia de depósitos de pómez
82	Escombros	432306.937	2113541.941	Cabecera	Derecho	15.0	6.0	s/d	Zona potencial a mas deslizamientos
83	Escombros	428669.020	2114078.575	Cabecera	Derecho	226.7	s/d	s/d	Zona potencial a mas deslizamientos
84	Escombros	427765.346	2114005.249	Cabecera	Derecho	132.2	s/d	s/d	Sin dato en campo
85	Escombros	427744.179	2114026.546	Cabecera	Izquierdo	186.4	s/d	s/d	Sin dato en campo
86	Escombros	427713.995	2113909.573	Cabecera	Izquierdo	209.2	s/d	s/d	Sin dato en campo
87	Escombros	428323.569	2113614.807	Cabecera	Derecho	195.1	s/d	s/d	Sin dato en campo
88	Escombros	432164.687	2113772.873	Cabecera	Derecho	50.8	s/d	s/d	Sin dato en campo
89	Escombros	427439.753	2113991.577	Cabecera	Derecho	90.9	s/d	s/d	Sin dato en campo
99	Escombros	427355.002	2113945.380	Cabecera	Derecho	42.1	s/d	s/d	Sin dato en campo
91	Escombros	427328.544	2113957.533	Cabecera	Izquierdo	76.1	s/d	s/d	Sin dato en campo
92	Escombros	428267.668	2113614.145	Cabecera	Izquierdo	68.3	s/d	s/d	Sin dato en campo
93	Escombros	427845.857	2113987.875	Cabecera	Izquierdo	123.4	s/d	s/d	Sin dato en campo
94	Escombros	426635.185	2113740.838	Cabecera	Derecho	79.8	s/d	s/d	Sin dato en campo
95	Escombros	426481.932	2114090.879	Cabecera	Derecho	90.3	s/d	s/d	Sin dato en campo
96	Escombros	426819.687	2114204.758	Cabecera	Derecho	76.7	s/d	s/d	Sin dato en campo
97	Escombros	426861.194	2114220.548	Cabecera	Derecho	38.7	s/d	s/d	Sin dato en campo
98	Escombros	426897.244	2114217.621	Cabecera	Derecho	43.6	s/d	s/d	Sin dato en campo
99	Escombros	426279.329	2113992.835	Cabecera	Derecho	71.7	s/d	s/d	Sin dato en campo

## Anexo 2. Dimensiones y localización del deslizamiento de asentamiento profundo localizado fuera del cauce del río

ID	Tipo	X	Y	Partes	Medidas (metros)			Observaciones
					Largo	Alto	Profundidad	
1	Asentamiento Profundo	432208.048	2114036.612	Cabecera Cuerpo y pie	328.0	38.4	3.0	Deslizamiento activo cerca de la población

### Anexo 3. Puntos de verificación

#### a) Deslizamiento de escombros



**Figura 29.** Punto de verificación **A**; deslizamiento de escombros. Con presencia de materiales leñosos.

#### b) Deslizamiento de escombros



**Figura 30.** Punto de verificación **B**; deslizamiento de escombros. Con presencia de depósitos.

c) Deslizamiento de asentamiento profundo



**Figura 31.** Punto de verificación **C**; deslizamiento de asentamiento profundo. Con presencia de casas con granja en la zona del pie del deslizamiento.

d) Deslizamiento de escombros



**Figura 32.** Punto de verificación **D**; deslizamiento de escombros. Se observa material deslizado como raíces de árboles y arbustos.

## REFERENCIAS

- Aceves, J.F., Legorreta, G., Lugo, J., Umaña, J., Legorreta, H.A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Volume 2016, Issue 91, 2016, Pp 43-55, ISSN 0188-4611, <https://doi.org/10.14350/rig.46503>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461117300043>).*
- Agresti, A., y Finlay, B. (1986). *Statistical methods for the social sciences* (2nd ed.). San Francisco: Dellen.
- Alanís, R. (2018). Influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera en la subcuenca del Río Chiquito Barranca del Muerto, Volcán Pico de Orizaba. Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alcántara, Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología, *Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 41, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-25.*
- Aleotti, P., y Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 58, 21–44.
- Anbalagan, R., Sing, B. (1996). Landslide hazard and risk assessment mapping in mounta inoustrains a case study from Kumaun Hymalaya, India. *Eng. Geol.* 43, 237–246.
- Anderson, M. B. (2000). Vulnerability to Disaster and Sustainable Development: A General Framework for Assessing Vulnerability. Pp. 11–25 in R. Pielke, Jr. and R. Pielke Sr., eds. *Storms* (Vol. 1). London: Routledge.
- Antonini, G., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2002) Surface deposits and landslide inventory map of the area affected by the 1997 Umbria-Marche earthquakes. *Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale 1, 843-853.*
- Armas, I., Stroia, F., Giurgea, L. (2013). Statistic Versus Deterministic Method for Landslide Susceptibility Mapping. In: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (eds) *Landslide Science and Practice*. Springer, Berlin, Heidelberg; [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3_52).
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., y Wisner, B. (1994). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. London: Routledge.
- Blaikie, P., Cannon, T., David, I., y Wisner, B. (1996). Vulnerability: The social, political and economic environment of disasters. *Social studies network on disaster prevention in Latin America, La Red, Perú.*
- Brunsdon, D. (1979). Mass movements, enembleton, C. E. y J. B, Thornes (eds.), *Progress in Geomorphology, Arnold*, pp. 130-186.
- Burton, I., Kates, R. W., y White, G. F. (1993). *The Environment as Hazard* (2nd ed.). New York: Guildford.
- Caballero, L., y Capra, L. (2010). Textural analysis of particles from El Zaguán debris avalanche deposit, Nevado de Toluca volcano, Mexico: Evidence of flow behavior during emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, pp.75-78.
- Cardona, A. O. D. (1993). Evaluación de amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. *Los Desastres No son Naturales, La Red*, pp.11-44. Available at: <http://www.desenredando.org>. Consultado 11 Sep. 2017.
- Cardona, A. O. D., Lavell, T.A.A., Mansilla, M.E., y Romero, R.A.M. (2005). Avances en las estrategias de desarrollo institucional y sostenibilidad financiera de la gestión del riesgo de desastres en America Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Whashington.
- Cardona, A. O. D. (2007). Riesgo y desastres, Su gestión municipal en Centroamérica, Cap. 1 Gestión de riesgos y desarrollo sostenible, Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural Hazards* 20 (2–3), 117–135.
- Castellanos, E., y Van, W.C.J. (2008). Qualitative Landslide Susceptibility Assessment by Multicriteria Analysis. Elsevier. ScienceDirect. *Geomorphology*. Pág 14.
- Castro, M.R. (2014). Modelo espacial de la probabilidad a la deforestación en bosques para el estado de Oaxaca. Ciudad de México, Tesis de Maestría. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Castro, M.R., y Legorreta, P.G. (2018) Análisis Espacial de Vecindad Continua y regresión logística en el modelado espacial de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. *Investigaciones Geográficas, [S.l.]*, n. 98, abr. 2019. ISSN 2448-7279. Disponible en: <<http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59760/53320>>. Fecha de acceso: 16 abr. 2020 doi:<http://dx.doi.org/10.14350/rig.59760>.
- CENAPRED. (2013). Atlas de Riesgos Naturales para el municipio de Tenango del Valle. 1st, ed. Estado de México: pp.47-61. Available at: <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>, Consulta 7 August 2018.
- CENAPRED. (2016): Causas que propician deslizamientos y medidas de prevención: Inestabilidad de Laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación, México, 1-39 p.
- Cerda, J., y Cifuentes, L. (2012). Uso de curvas ROC en investigación clínica: Aspectos teórico-prácticos. *Revista Chilena de Infectología*, 29(2), Pp138–141. doi:10.4067/s0716-10182012000200003.
- Cervi, F., Berti, M., Borgatti, L., Ronchetti, F., Manenti, F., y Corsini, A. (2010). Comparing predictive capability of statistical and deterministic methods for landslide susceptibility mapping: a case study in the northern Apennines (Reggio Emilia Province, Italy). *Landslides*, 7(4), 433–444. doi:10.1007/s10346-010-0207-y.
- Chaparro, A.E., y Renard, R.M. (2005). Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños originados por amenazas socio naturales., Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) No. 91, Santiago Chile.
- Chong, Xu. (2015). Preparation of earthquake-triggered landslide inventory maps using remote sensing and GIS technologies: Principles and case studies, *Geoscience Frontiers, Volume 6, Issue 6, 2015, Pages 825-836.*
- Chung, C.J.F., y Fabbri, A.G. (2005). Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. In: Glade, T., Anderson, M.G., Crozier, M.J. (Eds.), *Landslide Risk Assessment*. John Wiley, pp. 139–174.
- CICLOM. (2016). Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>).
- Ciurleo, M., Cascini, L., Calvello, M. (2017). A comparison of statistical and deterministic methods for shallow landslide susceptibility zoning in clayey soils. *Engineering Geology*, 223, 71–81. doi:10.1016/j.enggeo.2017.04.023.
- CONAGUA (1998). Cuencas hidrológicas, escala 1:250,000, <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas>.
- CONAGUA (2007). Regiones hidrológicas, escala 1:250,000 <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=regionesHidrológicas>.

- CONABIO. (1998). Subcuencas hidrológicas escala 1:1,000,000 <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/subcu1mgw>.
- Conoscenti, C., Rotigliano, E., Cama, M., Caraballo, A.N., Lombardo, L., y Agnesi, V. (2016). Exploring the effect of absences election on landslide susceptibility models: A case study in Sicily, Italy. *Geomorphology*, 261, pp.222-235.
- 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*, Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C., pp. 36-75.
- Cutter, S.L., Boruff, B.J., y Shirley, W.L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards\*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. doi:10.1111/1540-6237.8402002.
- Domínguez, A. E., y González, S. R. (2002). Análisis de las curvas receiver-operating characteristic: un método útil para evaluar procedimientos diagnósticos. *Revista Cubana de Endocrinología*, 13(2) disponible en; [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-2953200200010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-2953200200010&lng=es&tlng=es).
- EPOCH. (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European, Community, European Community Programme Flageollet, J. C. (ed.), 3 volumes. Contract no. 90 0025.
- ERMEX NG. (2017) Imagen satelital, Estación de Recepción México Nueva Generación, Ciudad de México.
- FAO. (2014). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. Pp. 218  
Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/clasificacion-del-suelo-WRB-y-soil-taxonomy>.
- FAO-UNESCO. (1970). Mapa Mundial De Suelos. 3rd ed. Paris: México y América Central, pp.56-68. Available at: <http://www.fao.org/3/as358s/as358s.pdf>, Consultado 11 June 2018.
- Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874. doi:10.1016/j.patrec.2005.10.010
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS*. 3rd ed. London: SAGE, pp.197-259.
- Fratini, P., Crosta, G., y Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. *Engineering Geology*, 111(1-4), 62–72. doi:10.1016/j.enggeo.2009.12.004.
- Fuente, S. (2011). La Regresión Logística. 1st ed. Madrid Universidad Autónoma de Madrid, pp.1-27. Available at: <http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/CUALITATIVAS/LOGISTICA/regresion-logistica.pdf> [Accessed 7 April 2020].
- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., y Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3-4), 268–289. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.023.
- García, A.V. (2002) Gestion de riesgos de desastres en America Latina, Inter American Institute for Global Change Research y Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), México.
- García, P.A., Macías, J.L., Garduño, M.V.H. (2000). Miocene to Recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, central Mexico: Tectonophysics, v. 318, p. 281–302, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00316-9.
- García, P.A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Espíndola, J.M., Garduño, M.V.H. (2002). Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico: Geological Society of America Map and Chart Series MCH099.
- García, S. (2017). Susceptibilidad geomorfológica a deslizamientos en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, Volcán Nevado de Toluca. Tesis de licenciatura, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, p.14. [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/PJQAJKUCLR5KHI9V8QX4LSPH5V2YUS9V8BBCY1Q11GYUF5BF7N\\_47992?func=full-set&set\\_number=011948&set\\_entry=000003&format=999](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/PJQAJKUCLR5KHI9V8QX4LSPH5V2YUS9V8BBCY1Q11GYUF5BF7N_47992?func=full-set&set_number=011948&set_entry=000003&format=999), Consultado 19 Mar. 2018.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. E., Foltz, R. B., y Elliot, W. J. (2006). Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transactions in GIS*, 10(3), 395–415. doi:10.1111/j.1467-9671.2006.01004.x
- Günther, A., Van, D., Eeckhout, M., Malet, J.P., Reichenbach, P., y Hervás, J. (2014). Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information. *Geomorphology*, 224, 69–85. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.011.
- Guzzetti, F., y Cardinali, M. (1990). Landslide inventory map of the Umbria region, Central Italy. In: Cancelli, A. (Ed.), *Proceedings ALPS 90 6th International Conference and Field Workshop on Landslides*, Milan, 12 September 1990, Pp. 273–284
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. (2005). Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology* 72, 272–299.
- Guzzetti, F., (2006). Landslide hazard and risk assessment. Ph.D. Thesis, Mathematisch Naturwissenschaft lichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität, University of Bonn, Bonn, Germany, Pp 389.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., y Chang, K.T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42–66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001.
- Hair, J.F., Black, W.C., Babin, B.J., y Anderson, R.E. (2010). *Multivariate Data Analysis*. Seventh Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Harp, E.L., Keefer, D.K., Sato, H.P., Yagi, H. (2011a). Landslide inventories: the essential part of seismic landslide hazard analyses. *Engineering Geology* 122 (1), 9e21.
- Harp, E.L., Jibson, R.W., Dart, R.L. (2011b). The Effect of Complex Fault Rupture on the Distribution of Landslides Triggered by the 12 January 2010, Haiti Earthquake. *Proceedings of the Second World Landslide Forum*, Rome: October 3e7, 2011.
- Hernández, Z. (2008). Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en el análisis multivariado: la región de Zapotitlán de Méndez, Puebla. Tesis de Maestría. Centro de Geociencias. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hewitt, K. (1997). *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*. Essex, U.K.: Longman.
- Horning, N. (2004). *Overview of accuracy assessment of land cover products*. 1st ed. New York, New York, 10024 USA: Center for Biodiversity and Conservation American Museum of Natural History, Pp.1-4.
- Hutchinson, J.N. (1988). General report, morphological and geotechnical parameters if landslides in relation to Geology and Hydrogeology, in Bonnard, C. (ed1.), *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, A. A. BaJkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, Pp. 3-35.
- IGESEM. (2008) Imagen satelital, Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México, México.
- INEGI (1975). Cartas geológicas, escala 1:50,000 <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825640750>.
- INEGI (1976). Cartas edafológicas, escala 1:50,000; <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/default.html#Mapa>.

- INEGI (2001a). Provincias fisiográficas, Conjunto de datos vectoriales. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html#Mapa>.
- INEGI (2001b). Subprovincias fisiográficas, Conjunto de datos vectoriales. Continuo Nacional. Escala 1:1 000 000. Serie I. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/default.html#Mapa>.
- INEGI. (2005). Guía para la interpretación de cartografía geológica, disponible en [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/istoricos/1329/702825231767/702825231767\\_3.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/istoricos/1329/702825231767/702825231767_3.pdf).
- INEGI (2008). Unidades climáticas, conjunto de datos vectoriales, escala 1:1,000,000 <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Mapa>.
- INEGI (2010) Censo de Población y Vivienda 2010, ITER, Ciudad de México, <https://datos.gob.mx/busca/dataset/censo-de-poblacion-y-vivienda-2010-principales-resultados-por-localidad>.
- INEGI (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, Resolución 15m <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>.
- INEGI (2014). Topografía, conjunto de datos vectoriales, escala 1:50,000; <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html>.
- INEGI (2015). Topografía, conjunto de datos vectoriales, escala 1:50,000, <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/default.html#Mapa>.
- INEGI (2017). Uso de suelo y vegetación, conjunto de datos vectoriales, Serie VI, escala 1:250,000 <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/default.html#Mapa>.
- Jager, S., y Wieczorek, G. E. (1994). Landslide susceptibility in the Tully Valley Area, Finger Lakes Region, New York (Pp. 94).
- Jiménez, J. (2005). Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de rules, Granada. Departamento de Ingeniería Civil Área de Ingeniería del Terreno. Tesis de Doctorado, Universidad de Granada.
- Krishnan, N., Pratheesh, P., Rejith, P.G., Vijith, H. (2005). Determining the suitability of two different Statistical Techniques un Shallow Landslide (Debris Flow) Initiation Susceptibility Assessment in the Western Ghats. *Environmental Research, Engineering and Management*, p 10-40.
- Krušić, J., Marjanović, M., Samardžić, P.M., Abolmasov, B., Andrejev, K., Miladinović, A. (2017). Comparison of expert, deterministic and Machine Learning approach for landslide susceptibility assessment in Ljubovija Municipality, Serbia. *Geofizika*. 34. 251-273. 10.15233/gfz.2017.34.15.
- Lee, S. (2005). Application and cross-validation of spatial logistic multiple regression for landslide susceptibility analysis. *Geosciences Journal*, 9(1), Pp.63-71.
- Lee, S. (2007). Comparison of landslide susceptibility maps generated through multiple logistic regression for three test areas in Korea. *Wiley InterScience*, 32, Pp.2133–2148.
- Legorreta, P. G., y Bursik, M. (2009). Logisnet: A tool for multimethod, multiple soil layers slope stability analysis, *Computers & Geosciences*, Volume 35, Issue 5, Pages 1007-1016, ISSN 0098-3004, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.003>.
- Legorreta, P. G., Bursik, M., Lugo, H.J., y Zamorano, J. (2010). Effect of pixel size on cartographic representation of shallow and deep-seated landslide, and its collateral effects on the forecasting of landslides by SINMAP and Multiple Logistic Regression landslide models, *Physics and Chemistry of the Earth*, núm. 35, pp. 138-146. doi:10.1016/j.pce.2010.04.008.
- Legorreta, P.G., y Lugo, H.J. (2014a). Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del volcán Pico de Orizaba, México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, Volume 2014, Issue 84, 2014, Pages 20-31, ISSN 0188-4611, <https://doi.org/10.14350/rig.37004>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S018846111470888X>).
- Legorreta, P.G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, H.J., Paredes, M.L., y Aceves, Q.F. (2014b). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), pp.343-354.
- Legorreta, P.G., Bursik, M., Zamorano, J., y Figueroa, G.J. (2015a). Landslide susceptibility of volcanic landforms in the Río El Estado watershed, Pico de Orizaba volcano, Mexico. *Natural Hazards*, 77(2), pp.559-574.
- Legorreta, P.G., Pouget, S., Bursik, M., Aceves, Q.F., y Contreras, T. (2015b). Comparing landslide susceptibility models in the Río El Estado watershed on the SW flank of Pico de Orizaba volcano, Mexico. *Natural Hazards*, 80(1), pp.127-139.
- Legorreta, P.G., Bursik, M., Zamorano, J., Lugo, H.J., Martínez, H.B., y Bajo, J.V. (2016). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, Volume 2017, Issue 92, 2017, Pp. 21-33, ISSN 0188-4611, <https://doi.org/10.14350/rig.51113>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0188461117300262>).
- Legorreta, P.G., Alanís, A.R., Arana, S.L., y Aceves, Q.F. (2018). Evaluation of landslide prediction efficiency using a cartographic hydrological model: case study Cuenca la Carbonera, SE flank of the Pico de Orizaba Volcano. *Investigaciones Geográficas*, 0(95). doi:<http://dx.doi.org/10.14350/rig.58387>.
- Lillesand, T., Kiefer, R., y Chipman, J. (2007). *Remote sensing and image interpretation*. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, p.587.
- Lombardo, L., Cama, M., Conoscenti, C., Märker, M., y Rotigliano, E. (2015). Binary logistic regression versus stochastic gradient boosted decision trees in assessing landslide susceptibility for multiple-occurring landslide events: application to the 2009. storm event in Messina (Sicily, southern Italy). *Natural Hazards*, 79(3), pp.1621-1648.
- López, P., (2004.) *Población muestra y muestreo*. 8th ed. Bolivia: SCIELO, Pp.70-74. ISSN 1815-0276 <http://On-line ISSN 1815-0276> Consultado 4 October 2017.
- Lugo, H.J., y Córdova, C. (1992). Regionalización geomorfológica de la república mexicana. *Investigaciones geográficas*, (25), 25-63. Recuperado en 15 de febrero de 2019, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111992000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111992000200002&lng=es&tlng=es).
- Mata, M.C., y Macassi, S. (1997). *Cómo elaborar muestras para los sondeos de audiencias*. Cuadernos de investigación No 5. ALER, Quito.
- Menard, S. (1995). *Applied logistic regression analysis*. Sage university paper series on quantitative applications in the social sciences, 07-106. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Miller, S., y Degg, M. (2012). Landslide susceptibility mapping in North-East Wales. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 3(2), pp.133-159.
- Muñoz, J. (2017). *Regresión logística Multinomial*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

- Myers, R. (1990). *Classical and modern regression with applications* (2nd ed.). Boston, MA: Duxbury.
- Norini, G., Capra, L., Groppelli, G., y Lagmay, A.M.F. (2008). Quaternary sector collapses of Nevado de Toluca volcano (Mexico) governed by regional tectonics and volcanic evolution. *Geosphere* ; 4 (5): 854–871. doi: <https://doi.org/10.1130/GES00165.1>.
- Palacio, P.J. (1988). Destrucción de tierras en el flanco oriental del nevado de Toluca, el caso de la cuenca del arroyo el Zaguán. *Investigaciones Geográficas*, Pp.1-18: <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/58964>, doi:<http://dx.doi.org/10.14350/rig.58964>, Consultado 5 Dec. 2018.
- Pedraza, G.J. (1996). *Geomorfología principios, metodos y aplicaciones* Edit. Rueda. Madrid, España. p. 414.
- Pérez, J., y Gardey, A. (2011). Definición de altitud. Consultado el 18 Noviembre del 2020, disponible en <https://definicion.de/altitud/>
- Petschko, H., Bell, R., y Glade, T. (2015). Effectiveness of visually analyzing LiDAR DTM derivatives for earth and debris slide inventory mapping for statistical susceptibility modeling. *Landslides*, 13(5), pp.857-872.
- Pineda, B., Eva, L., y Francisca, C. (1994). *Metodología de la investigación, manual para el desarrollo de personal de salud*, Segunda edición. Organización Panamericana de la Salud. Washington.
- Regmi, A., Devkota, K., Yoshida, K., Pradhan, B., Pourghasemi, H., Kumamoto, T., y Akgun, A. (2013). Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), Pp.725-742.
- Reynaga, J. (2003). El método estadístico, Universidad Nacional Autónoma de México Documento en PDF.
- Romero, G., y Maskrey, A. (1993). Como Entender los Desastres Naturales, en “Los Desastres No Son Naturales”, Pp. (6-10). La Red.
- Rosete, F., y Luís, P., Damián, J., y Gerardo, B. (2009). Contribución al análisis del cambio de uso del suelo y vegetación (1978-2000) en la Península de Baja California, México. *Revista Investigación Ambiental*. Pp. 70-82.
- Ruff, M., y Czurda, K. (2008). Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria), *Geomorphology*, Volume 94, Issues 3–4, 2008, Pages 314-324.
- SAGARPA. (2017a). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP; Producción anual agrícola; Ciudad de México, <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.
- SAGARPA. (2017b). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP; Producción anual ganadera; Ciudad de México, <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>.
- Samaniego, R. (2014). *Regresión Logística y árboles de clasificación*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Pp.5-10.
- Sharpe, C.F.S. (1938), *Landslides and related phenomena*. Columbia University Press, New York.
- Soeters, R., y VanWesten, C.J. (1996). Slope in stability recognition, analysis, and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides, Investigation and Mitigation*. National Academy Press, Washington, D.C. ISBN: 0-309-06151-2, pp. 129–177.
- Soldano, A. (2009). *Conceptos sobre riesgo*. Cordoba, Argentina.
- Steger, S., Brenning, A., Bell, R., y Glade, T. (2016). The propagation of inventory-based positional error into statistical landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(12), pp.2729-2745.
- Strahler, A.N. (1957). *Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology*. American Geophysical Union Transactions 38:913-920.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanisms of landslides, *Geol. Soc. Am., Berkeley Volume*, pp. 83-123.
- UNISDR. (2017). *Terminología en la reducción del riesgo de desastres*. Desarrollo sostenible, reducción del riesgo de desastres, ONU, Ginebra. Pp. 11-39.
- USGS. (2008). *The Landslide Handbook. A Guide to Understanding Landslides the United States Geological Survey*. p129.
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science The Hague, La Haya, Holanda, ITC. 442p.
- Varnes, D.J. (1958). Landslides types and processes, In Eckel, E. B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*, Highway Res. Board Special Report 29, pp. 20-47.
- Varnes. (1978a). *Landslide Classification*, Czech Republic: Charles University in Prague, Faculty of Science, Ed1. Pp.3 19. [http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove\\_materialy/2\\_Varnes\\_landslide\\_classification.pdf](http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove_materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf), Consultado 12 September 2018.
- Varnes, D.J. (1978b). Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslides Analysis and control: National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176*, p. 11–33
- Washington, Department of Natural Resources (DNR), (2006). *Landslide Hazard Zonation (LHZ), DNR-WS-LHZ, Project Protocol, Version 2.1*, en ([http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp\\_lhz\\_protocol\\_v2\\_1\\_final.pdf](http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp_lhz_protocol_v2_1_final.pdf)).
- Wayne, W.D. (2004). *Bioestadística. Base para el análisis de ciencias de la salud*. LIMUSA S.A. de C.V., Ciudad de México. ISBN 968-18-61647.
- Wilches, C.G. (1993). *La Vulnerabilidad Global, Los Desastres No son Naturales*, La Red, pp.11-44. <http://www.desenredando.org> Consultado 11 Sep. 2017.
- Yarza, dI.T. E. (2003). Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones geográficas*, (50), 221-234. Recuperado en 29 de mayo de 2020, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46112003000100018&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112003000100018&lng=es&tlng=es).
- Youssef, A., Al-Kathery, M., y Pradhan, B. (2014). Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosciences Journal*, 19(1), pp.113-134.
- Zieher, T., Perzl, F., Rössel, M., Rutzinger, M., Meil, G., Markart, G., y Geitner, C. (2016). A multi-annual landslide inventory for the assessment of shallow landslide susceptibility, Two test cases in Vorarlberg, Austria. *Geomorphology*, 259, pp.40-54.