



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS SOBRE  
MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

**ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE  
REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA, CHIAPAS,  
MÉXICO.**

**T E S I S**

Que para obtener el título de

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Presenta,

Luis Angel Jiménez López

Director de Tesis: Dr. Juan Manuel Sánchez Núñez

Comité Tutorial:

Dr. Carlos Felipe Mendoza  
M. en C. Germán Raúl Vera Alejandre  
Dr. Jonathan Mathuswamy Ponniah  
Dr. Mario del Roble Pensado Leglise

Ciudad de México

Diciembre, 2018







**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, el día **3** del mes de **Diciembre** del año **2018**, el que suscribe **Luis Angel Jiménez López** alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con número de registro **B160320**, adscrito al **Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD)**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Juan Manuel Sánchez Núñez y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estudio del peligro geológico por procesos de remoción en masa en la cuenca de Motozintla, Chiapas, México.”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: **ljimenez.geo@gmail.com;** **sanchez0120@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Luis Angel Jiménez López

## Créditos

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Maestría fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN (CIEMAD) con el apoyo de la Beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y la Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores (BEIFI) del Instituto Politécnico Nacional.

**A mis padres,**

Gracias por estar siempre, los amo.

**A mi hija Kaori.**

Por despertar ese amor incondicional que solo puedo sentir por ti y por esa sonrisa que repara cualquier mal rato.

**A mi compañera de vida, Perla.**

Un pilar inquebrantable, gracias por cuidarme y por esta hija hermosa.

## **Agradecimientos:**

**Dr. Juan Manuel Sánchez Núñez:** Por ser más que solo un director de tesis y convertirse en un verdadero amigo. Gracias infinitas por todo el conocimiento y las oportunidades de aprender.

**Dr. Carlos Felipe Mendoza:** Por su tiempo, apoyo y comentarios sobre este trabajo.

**M. en C. Germán Raúl Vera Alejandre;** Por las observaciones siempre atinadas.

**Dr. Jonathan Mathuswamy Ponniah;** Por su confianza y apoyo.

**Dr. Mario del Roble Pensado Leglise:** Por su amistad, consideración y enseñanzas.

**Dra. María Concepción Martínez Rodríguez:** Por su amistad y voto de confianza para materializar los proyectos donde me permitió colaborar.

**Dr. Lorenzo Martínez Gómez:** Por la oportunidad de colaborar con usted, su confianza y apoyo para seguir creciendo profesionalmente.

**A mis nuevas amistades,** con quien he compartido malos y buenos ratos en este proceso.

## **Agradecimiento Especial:**

**A la Dra. Luz Arcelia,** por proporcionarnos un espacio en el Laboratorio Socio-Tecnológico de Permacultura y Macro-Nano Textiles Técnicos, donde se desarrolló parte de este trabajo y seguramente desarrollaremos más en un futuro. Muchas gracias Dra.

## ÍNDICE

---

Lista de figuras .....	ix
Lista de tablas.....	xi
Lista de gráficos.....	xii
Resumen .....	xiii
Abstract .....	xiv
Introducción .....	1
Problemática de la zona .....	2
Hipótesis.....	3
Objetivo.....	3
Antecedentes .....	4
1 METODOLOGÍA.....	8
1.1 Trabajo de gabinete .....	9
1.1.1 Cartografía de gabinete .....	10
1.1.2 Análisis de cuenca .....	12
1.2 Trabajo de campo.....	13
1.3 Mapa de peligro .....	13
2 MARCO CONCEPTUAL.....	16
2.1 Peligro vs Riesgo .....	16
2.2 Peligro geológico .....	17
2.3 Procesos de remoción en masa .....	19
2.3.1 Clasificación de los procesos de remoción en masa. ....	20
2.3.2 Tipos de procesos de remoción de masa.....	25
3 MEDIO FÍSICO .....	37
3.1 Ubicación geográfica y acceso al área de estudio.....	37
3.2 Fisiografía.....	38
3.3 Hidrografía.....	39
3.4 Uso de suelo y vegetación.....	40
4 ESTRUCTURA TERRITORIAL Y ESCALAS URBANO – RURALES ANTE LA CONDICIÓN DE PELIGRO DE MOTOZINTLA.....	42
4.1 Crecimiento Poblacional.....	43
4.2 Estructura Territorial .....	47

4.2.1	Barrios .....	47
4.2.2	Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB).....	49
4.3	Vulnerabilidad en Motozintla. ....	52
4.3.1	Vulnerabilidad técnica .....	52
4.3.2	Vulnerabilidad socioeconómica .....	53
5	MARCO TECTÓNICO -GEOLÓGICO .....	55
5.1	Tectónica .....	55
5.2	Geología del área de estudio.....	56
5.2.1	Basamento .....	58
5.2.2	Macizo de Chiapas (Batolito de Chiapas).....	59
5.2.3	Tronco de Amatenango de la Frontera .....	60
5.2.4	Tronco de Buenos Aires .....	60
5.2.5	Formación Todos Santos .....	61
5.2.6	Formación Sierra Madre.....	61
5.2.7	Andesitas, Brechas y Tobas .....	61
5.2.8	Flujo Piroclástico Los Chocoyos .....	62
5.2.9	Depósito de caída, volcán Santa María.....	62
6	ANÁLISIS DE LA CUENCA .....	63
6.1	Parámetros de forma.....	63
6.1.1	Forma y tamaño de la cuenca.....	63
6.1.2	Coefficiente de compacidad (Kc) o índice de Gravelius .....	65
6.2	Parámetros de relieve .....	66
6.2.1	Hipsometría .....	66
6.2.2	Pendiente media de la cuenca.....	68
6.2.3	Curva hipsométrica adimensional.....	70
6.3	Red de drenaje .....	72
6.3.1	Orden de corrientes.....	72
6.3.2	Relación de Bifurcación .....	73
6.3.3	Densidad de drenaje.....	75
6.3.4	Tiempo de concentración (Tc) .....	78
7	LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN MOTOZINTLA .....	80
7.1	Análisis de pendientes .....	80
7.2	Cartografía de procesos de remoción en masa .....	83

7.2.1	Caídas .....	89
7.2.2	Reptación .....	90
7.2.3	Deslizamientos .....	91
7.2.4	Flujos .....	94
7.2.5	Complejos .....	97
7.2.6	Avalanchas .....	98
7.3	Mapa de peligro por procesos de remoción en masa .....	100
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	106
	REFERENCIAS .....	108

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.</b> Diagrama metodológico que se empleará en el trabajo de investigación .....	8
<b>Figura 2.</b> Procesos de Caída (Desprendimiento) de materiales.....	27
<b>Figura 3.</b> Tipos de caídas o desprendimientos .....	27
<b>Figura 4.</b> Vuelco (desplome) de material .....	28
<b>Figura 5.</b> Mecanismo de un deslizamiento y partes que lo conforman .....	29
<b>Figura 6.</b> Deslizamiento de rotación en una ladera .....	30
<b>Figura 7.</b> Diferentes tipos de deslizamientos rotacionales .....	31
<b>Figura 8.</b> Ejemplos de deslizamientos traslacionales .....	32
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de un flujo con fuerte precipitación en zona de montaña .....	34
<b>Figura 10.</b> Procesos de remoción en masa del tipo complejo .....	35
<b>Figura 11.</b> Mapa de localización del poblado de Motozintla .....	37
<b>Figura 12.</b> Subprovincias fisiográficas que comprende el área de estudio .....	38
<b>Figura 13.</b> Hidrografía del área de estudio.....	39
<b>Figura 14.</b> Uso de suelo y vegetación en Motozintla .....	40
<b>Figura 15.</b> Localidades que se encuentran dentro de la cuenca de Motozintla .....	42
<b>Figura 16.</b> Asentamientos humanos en Motozintla de acuerdo al censo del 2010 .....	48
<b>Figura 17.</b> Colonias Reubicadas a partir de los desastres de 1998 y 2005.....	49
<b>Figura 18.</b> Cubierta AGEB´s Motozintla .....	50
<b>Figura 19.</b> Densidad de población por hectárea delimitada por las AGEB´s Motozintla resultado del censo de INEGI en el año 2010 .....	51
<b>Figura 20.</b> Densidad de población por hectárea delimitada por las AGEB´s Motozintla, resultado del censo de INEGI en el año 2000. ....	51
<b>Figura 21.</b> Mapa tectónico Regional de sur de México, donde se observan, la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica, el Caribe y Cocos, así como su incidencia en el relieve. .	55
<b>Figura 22.</b> Mapa geológico de la cuenca de Motozintla desarrollado por Sánchez Núñez ....	57
<b>Figura 23.</b> Mapa geológico de la cuenca de Motozintla modificado de Sánchez Núñez (2012) y Carfantán, (1977) con cartografía de campo. ....	58
<b>Figura 24.</b> Diques de andesita que intrusionan al macizo de Chiapas. ....	59
<b>Figura 25.</b> Mapa hipsométrico de la cuenca de Motozintla .....	67

<b>Figura 26.</b> Mapa de órdenes de corrientes de la cuenca de Motozintla. ....	73
<b>Figura 27.</b> Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Motozintla interpolado mediante el método de Natural Neighbor. ....	77
<b>Figura 28.</b> Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Motozintla, interpolado mediante el método de Kriging. ....	77
<b>Figura 29.</b> Mapa de pendientes de la cuenca de Motozintla. ....	82
<b>Figura 30.</b> Mapa de inventario de procesos de remoción en masa de la región de Motozintla. ....	89
<b>Figura 31.</b> Procesos de caídas sobre la carretera que va de Motozintla a la localidad de Buenos Aires, frente a las oficinas de Protección Civil. ....	90
<b>Figura 32.</b> Reptación de suelos en zonas inestables, conjugándose diferentes tipos de procesos, cercanos a las localidades de Las Cruces y Buenos Aires. ....	91
<b>Figura 33.</b> Deslizamiento producto de construcción de camino. ....	92
<b>Figura 34.</b> Deslizamiento sobre camino en esquistos, se observa la deformación en los planos de falla con NE- SW. ....	93
<b>Figura 35.</b> Medidas de contención en zonas geológicamente inestables. ....	93
<b>Figura 36.</b> Grietas de tensión con aperturas entre 10 cm y 20 cm durante el desarrollo de un deslizamiento. ....	94
<b>Figura 37.</b> Depósitos de caídas y deslizamientos que alimentara flujos en temporada de lluvias. ....	95
<b>Figura 38.</b> Flujos de escombros depositando en el margen del río Xelajú. ....	96
<b>Figura 39.</b> Columna estratigráfica de los depósitos sobre el cauce del Río Xelajú, a la altura de la zona Urbana. ....	96
<b>Figura 40.</b> Depósitos sobre el cauce del río Xelajú, pertenecientes a eventos de alta potencia. ....	97
<b>Figura 41.</b> Proceso de remoción de masa complejo, iniciado como deslizamiento y continuado como flujo. ....	98
<b>Figura 42.</b> Fragmentos en rompecabezas, comúnmente encontrados en zonas de avalancha. ....	99
<b>Figura 43.</b> Socavación del material producto de avalancha. ....	99
<b>Figura 44.</b> Mapa de peligro por procesos de remoción de masas en el terreno de la cuenca de Motozintla. ....	102
<b>Figura 45.</b> Mapa de peligro por procesos de remoción en masas para la población de la cuenca de Motozintla. ....	104

**Figura 46.** Deslizamiento recurrente cercano a zonas pobladas en la zona noroeste de la cuenca de Motozintla..... 105

**Figura 47.** Grietas de tensión dentro de vivienda en zonas de deslizamientos al noroeste de la cuenca de Motozintla. .... 105

## LISTA DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.</b> Parámetros morfométricos del análisis de cuenca.....	12
<b>Tabla 2.</b> Escala fundamental de comparación Saaty (1990) .....	15
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de los procesos de remoción en masa según Sharpe (1938). ....	21
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de Procesos de Remoción en Masa, Varnes (1978). ....	22
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de los procesos de remoción de masa EPOCH (1993).....	23
<b>Tabla 6.</b> Procesos que conducen a deslizamientos Terzaghi (1950). ....	24
<b>Tabla 7.</b> Usos de suelo y vegetación de la cuenca de Motozintla.....	41
<b>Tabla 8.</b> Proyección de crecimiento poblacional del municipio de Motozintla periodo, 2005 – 2030.....	45
<b>Tabla 9.</b> Proyecciones de población por Cabecera Municipal y el resto del Municipio .....	46
<b>Tabla 10.</b> Porcentaje de materiales de las viviendas en el Municipio de Motozintla, obtenido a partir del anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017.....	53
<b>Tabla 11.</b> Población empleada por sector en el Municipio de Motozintla, obtenido del anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017 .....	54
<b>Tabla 12.</b> Relación de forma Horton (Strahler, 1957).....	64
<b>Tabla 13.</b> Tabla del índice de compacidad de Gravelius.....	65
<b>Tabla 14.</b> Porcentaje de intervalos de elevación de la cuenca de Motozintla. ....	68
<b>Tabla 15.</b> Valores comparativos de Pendiente media de Strahler (1957) .....	70
<b>Tabla 16.</b> Relación de bifurcación del drenaje en la cuenca de Motozintla .....	74
<b>Tabla 17.</b> Factores de densidad de drenaje según Strahler (1957) y Horton (1945) .....	76
<b>Tabla 18.</b> Valores de pendiente para la cuenca de Motozintla.....	81

<b>Tabla 19.</b> Valores de pendiente para la cuenca de Motozintla.....	82
<b>Tabla 20.</b> Inventario de procesos de remoción en masa cartografiados en la zona de Motozintla .....	83
<b>Tabla 21.</b> Tabla de variables jerarquizadas y su ponderación para el mapa de peligro del terreno.....	101
<b>Tabla 22.</b> Tabla de variables jerarquizadas y su ponderación para el mapa de peligro por PRM para la población. ....	103

## LISTA DE GRÁFICOS

---

<b>Gráfico 1.</b> Histórico poblacional del Municipio de Motozintla generado a partir de datos de INEGI (2017). ....	44
<b>Gráfico 2.</b> Curvas del ciclo erosivo, modificado de Strahler (1957) y Scheidegger (1991) ..	71
<b>Gráfico 3.</b> Curva hipsométrica de la cuenca de Motozintla .....	71

## RESUMEN

---

Los procesos de remoción en masa (PRM) se encuentran clasificados dentro de los eventos naturales que más impactan de manera directa a las poblaciones y a los ecosistemas. Tener en una zona factores que propician la generación de estos procesos la hace vulnerable al crear inestabilidad en los asentamientos humanos, ya que causan daños en las estructuras sociales de las poblaciones. Debido a su ubicación geológico-geográfica, el poblado de Motozintla en el estado de Chiapas, se encuentra expuesta a varios procesos de este tipo, ya que se ubica en una zona tectónica activa que combinada con el relieve, la morfología del terreno y los eventos meteorológicos que afectan la cuenca donde se localiza, lo hacen un lugar propicio para la ocurrencia de desastres. El municipio cuenta con aproximadamente 72 967 habitantes, de los cuales la tercera parte se localizan en la cabecera municipal, justo en la convergencia de los tres ríos más importantes de la cuenca. Con el objetivo de identificar las zonas susceptibles a la ocurrencia de PRM, se han cartografiado mediante fotografía aérea, imágenes de satélite, trabajo de campo y análisis geomorfológico del relieve, antiguos y recientes PRM. El estudio permitió un mejor entendimiento del comportamiento de estos eventos dentro de la zona, logrando delimitar los diferentes grados de peligro mediante un mapa que muestra las áreas más susceptibles de la población y su infraestructura a sufrir este tipo de procesos.

Palabras clave: PRM, Peligro, Inventario, Morfometría, Morfología.

## **ABSTRACT**

---

Movements of land mass are classified as natural events which highly impact populations and ecosystems. If an area has factors that could produce these processes they make it vulnerable to creating instability in human settlements, as they cause damage to the social structures of the communities. Due to its geological location, the town of Motozintla in the state of Chiapas is exposed to several processes of this type. It is located in an active tectonic zone plus the land relief, the morphology of the terrain and meteorological events that affect the basin where it is located, it turns in to a favorable place to happen disasters. The municipality has approximately 72 967 inhabitants, the third part is located in the municipal seat, located in a convergence of the three most important rivers in the basin. In order to identify the susceptible areas where could happen movements of land mass, they have been mapped using aerial photography, satellite images, field work and geomorphological analysis of land relief, old and recent movements of land mass. The study allowed a better understanding of the behavior of these events in the basin, managing to delimit the distinct degrees of hazard through a map that shows the most susceptible areas of the population and its infrastructure to suffer this kind of processes.

Keywords: PRM, Hazard, Inventory, Morphometry, Morphology.

## INTRODUCCIÓN

---

Los procesos de remoción en masa (PRM) se clasifican entre los fenómenos geológicos más destructivos en la naturaleza, ya que propician graves pérdidas en infraestructura, viviendas, equipamiento y vidas humanas. Sin embargo, una gran cantidad de pérdidas por estos procesos se podrían evitar si el problema se identifica con anticipación y se toman las medidas preventivas adecuadas (Oporto, 2006). El estudio oportuno de estos procesos puede llegar a convertirse en un importante instrumento para la planificación urbana debido a que los peligros naturales limitan y condicionan la capacidad de albergar una población en un territorio. Al darse su ocurrencia modifican las actividades humanas en la zona de manera temporal o definitiva, razón por la que su estudio pertinente puede contribuir con un ordenamiento territorial sustentable. Para ello, estos PRM deben ser inventariados, caracterizados y evaluados, evitando así poner a la población y sus actividades bajo peligro (Mardones y Vidal, 2001).

La presencia de diversos elementos considerados como factores condicionantes del terreno, en conjunción con factores detonantes, generan un riesgo latente que puede terminar en un desastre. Los principales factores que influyen en los procesos de remoción en masa están asociados con la geología del lugar, el tipo de suelo, la pendiente, la precipitación, condiciones climatológicas, los sismos intensos, uso de suelo y tipo de vegetación, además de las actividades ejercidas por el ser humano como son la deforestación y la construcción sin medidas de mitigación, entre otras (Lizama, 2016).

En México, existe una gran cantidad de áreas que son afectadas por procesos de remoción en masa, en las zonas serranas existen zonas con pendientes muy abruptas, producto de la actividad tectónica en la que se encuentra el país debido a la interacción entre las placas de Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe. Una condición muy particular se presenta en la zona sur de México, donde se encuentran en interacción la placa de Cocos, Caribe y la placa Norteamérica originando una zona de transtensión a nivel continental que al moverse puede desencadenar fuertes sismos (Guzmán-Speziale, 2010), además por su ubicación geográfica, muchos fenómenos climatológicos la impactan cada año.

## **PROBLEMÁTICA DE LA ZONA**

---

El estudio se centra en el poblado de Motozintla de Mendoza, cabecera del Municipio del mismo nombre, el cual se ubica en la porción sureste del estado de Chiapas y se considera una de las regiones geológicas más vulnerables en el país, debido a que aquí se conjugan factores condicionantes con factores detonantes que inducen una condición de peligro geológico constante.

El municipio cuenta con una población de 72 967 habitantes (INEGI, 2017) y en la cabecera municipal viven al menos la tercera parte de esta. El poblado se encuentra en la conjunción de los 3 ríos más importantes de la cuenca (Xelajú, Allende y La Mina), los cuales en temporadas de lluvias transportan gran cantidad de agua saturada con sedimentos producto de la erosión de las rocas de las partes altas de la cuenca. Sumado a ello, las altas pendientes de la zona (mayores a 30°), su ubicación en la convergencia de tres placas tectónicas, la alta actividad sísmica, las lluvias extraordinarias, los fenómenos climatológicos que se presentan en la zona y las actividades antropogénicas que se realizan, hacen inevitable presuponer que el poblado se encuentra bajo peligro inminente, situación que ha quedado demostrada con los desastres ocurridos en los últimos 20 años.

En los años 1998, 2005 y 2010 se ha documentado que esta población fue impactada por procesos de remoción en masa, producto de las tormentas tropicales y huracanes que provocaron pérdidas humanas, destrucción de casas y cultivos. Es por ello que este estudio de la evaluación del peligro, se centra en generar un inventario base que servirá para comprender cuál es la dinámica de estos procesos en Motozintla y como están relacionados los factores condicionantes del terreno con los factores detonantes, y así poder inferir el comportamiento del terreno ante nuevos eventos naturales que puedan impactar la zona.

## **HIPÓTESIS**

---

Las condiciones geológico-hidrológicas que interactúan con las actividades antrópicas presentes en la región de Motozintla de Mendoza generan una condición de peligro ante PRM que no han sido identificados ni evaluados adecuadamente; estudiar de manera integral los antiguos y diferentes procesos que han ocurrido en la cuenca de Motozintla así como los factores que los originaron, ayudará a extrapolar estas características a las actuales condiciones del terreno permitiendo identificar zonas que se encuentren bajo un posible peligro.

## **OBJETIVO**

---

Identificar y caracterizar las zonas donde pueden presentarse PRM por la acción de los factores detonantes y condicionantes (Naturales y Antropogénicos) que se observan en el área de estudio para elaborar un inventario en escala 1:50000 y generar el mapa de peligro por procesos de remoción en masa para Motozintla.

## ANTECEDENTES

---

El estudio del “peligro” se ha convertido en un tópico importante para las disciplinas existentes, ya que los humanos estamos expuestos a peligros desde que somos concebidos. El avance en los estudios de peligro por fenómenos naturales ha redefinido el concepto y fortalecido otros como el de “riesgo” y “vulnerabilidad” en el área de ciencias de la tierra, esto debido al apoyo de las ciencias sociales que se enfocan en estudiar aspectos del daño directo a la población humana, además de las afectaciones sociales y económicas que puedan existir. Esta interacción entre diversas ciencias lo ha convertido en una línea de investigación interdisciplinaria que va desde el estudio del origen del fenómeno hasta su impacto directo en la población.

Se han llevado a cabo un sin número de discusiones para separar el termino de peligro sobre el de riesgo, sin embargo, para este estudio el riesgo existe si está en función del peligro preexistente, la vulnerabilidad y la exposición. Una de las expresiones más difundidas en el ámbito de los desastres provocados por la presencia de fenómenos naturales es la del Centro Nacional de Prevención a Desastres (CENAPRED, 2004):

$$\text{Riesgo} = f(\text{Peligro} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad})$$

Donde:

**Peligro:** es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un lapso de tiempo dado, midiendo su potencial con base en su intensidad y periodo de retorno.

**Exposición:** Cantidad de personas, bienes, valores, infraestructura y sistemas que son susceptibles a ser dañados o perdidos.

**Vulnerabilidad:** susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados.

La expresión anterior no refleja necesariamente un pensamiento generalizado sobre la evaluación del riesgo, aunque sí es la más utilizada por algunas instituciones dedicadas a su estudio y evaluación. Este trabajo intenta evaluar solo la variable de *peligro* en la ecuación, por lo que tomaremos esta definición como base ya que estudia solo a la amenaza y su probabilidad de ocurrencia.

Dado que el peligro natural representa el impacto inherente de los fenómenos naturales sobre la vida, la infraestructura, la economía y la sociedad, será necesario abordarlo de manera interdisciplinaria. Por lo tanto, el estudio de los peligros naturales está relacionado con analizar las propiedades físicas, los modos de ocurrencia, establecer modelos numéricos y físicos, así como el diseñar herramientas de simulación computacional para modelar sus efectos (Delgado-Granados, 2012). Dada la relevancia e importancia de la evaluación del riesgo a todos los niveles de gobierno y el significado que representa para la población en general, esta evaluación debe realizarse a partir de métodos científicos que le den certeza a los resultados y generen propuestas de mitigación, estudiar a fondo todas las variables que componen el riesgo es estrictamente necesario, por lo que la variable de peligro debe ser monitoreada adecuada y constantemente ya que sin ella la fórmula no tendría razón de ser.

*“La evaluación de peligros está en el ámbito de la investigación científica e ingeniería, enfocada en la reconstrucción de eventos, entendimiento de procesos y desarrollo de tecnología para estudiarlos, modelarlos y representarlos” (Delgado-Granados, 2012).*

Esta evaluación es clara para los científicos, sin embargo, la manera de abordarlos actualmente sigue siendo de forma independiente, mientras que estos problemas necesitan análisis complejos desde la perspectiva de las distintas ciencias.

El poblado de Motozintla es un laboratorio para estos nuevos estudios ya que debido a su ubicación geográfica ha sufrido frecuentes desastres por fenómenos naturales, especialmente en la zona urbana, donde han impactado con consecuencias funestas. Los peligros en la zona siempre han estado presentes y es urgente evitar que se conviertan en desastres, mediante la comprensión de cómo funcionan los fenómenos para poder prevenir o mitigar sus efectos.

Motozintla se localiza al sur del estado de Chiapas, cerca de la frontera con Guatemala, dentro de la cuenca del río Xelajú que corresponde a la región hidrológico-administrativa XI, llamada Frontera Sur, y a la región hidrológica número 30, denominada Grijalva-Usumacinta. Se sitúa en la convergencia de tres corrientes fluviales que son: el río Xelajú, el río La Mina y el río Allende; en una región con intensos periodos de lluvia con promedios mensuales de hasta 180 mm por mes en la zona urbana, pero de hasta 450 mm en las zonas alta de la cuenca (Serrano *et*

*al.*, 2006), lo cual se ve reflejado en desplazamiento de masas de roca, detritos y suelos que impacta directamente en la población, afectando casas, cultivos y carreteras. En conjunción con esto, la zona de Motozintla se encuentra sobre una base rocosa con diferentes grados de alteración y composición, la convergencia de tres placas tectónicas (Norteamericana, Caribe y Cocos) generan una alta ocurrencia sísmica, sumado a esto es golpeada regularmente por fenómenos Hidrometeorológicos de gran magnitud.

En los últimos años, grandes fenómenos naturales han afectado intensamente la zona, causando desastres y daños irreparables como la pérdida de vidas humanas.

En septiembre de 1998 las tormentas tropicales *Earl* y *Javier* ocasionaron el desbordamiento de ríos que a su vez provocó graves daños materiales, la muerte de 12 personas y la desaparición de 18 más (Mariscal, 2006).

Las precipitaciones pluviales ocasionadas por los fenómenos hidrometeorológicos *Rita* y *Norma*, provocaron entre el 24 y 25 de septiembre del año 2005 destrozos en Chiapas: desbordamiento de 20 ríos; inundaciones y deslaves en 12 municipios; afectaciones a la agricultura y ganadería en 361 localidades; daños a 191 caminos rurales, 9 caminos alimentadores, 45 puentes y 206 procesos de remoción en masa, asolvamiento de 511 pozos artesianos y destrucción de sistemas de agua entubada, drenaje y alcantarillado; afectaciones a 62 comunidades, 8 barrios y 5 mil 300 viviendas, además de la evacuación de 15 mil personas. (GECh, 2005).

El Huracán *Stan* durante los primeros días de octubre de 2005, provocó precipitaciones pluviales sin precedente, sobre el territorio chiapaneco, causando escurrimientos súbitos, saturación de cauces, desbordamiento de 98 ríos, cuantiosos daños en 800 localidades de 41 municipios, destruyendo viviendas, escuelas, centros de salud, infraestructura urbana, carreteras, puentes, tierras cultivadas, comunicaciones, afectando el sector ganadero, lagunas y campos pesqueros, alterando los ecosistemas.

Los eventos anteriormente descritos demuestran la necesidad de evaluar de manera objetiva la zona de Motozintla, ya que las pérdidas humanas y los costos económicos debido a las pérdidas materiales son cuantiosos. La atención de estos desastres generó un gasto público por un total aproximado de 400 000 000 de pesos, que, de invertirse en programas de prevención, podría

reducir gastos futuros (GECh, 2005) tal como se ha realizado con otros desastres provocados por diferentes fenómenos naturales.

Anteriormente los desastres de origen natural que ocurrían en México se abordaban de manera local y desconectada del contexto nacional hasta mediados de la década de los 80. Un parteaguas en la gestión del riesgo en nuestro país fue el desastre que provocó el sismo de 1985 a la Ciudad de México y que afectó a gran parte del centro del país. Derivado de esto se creó el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en 1986, el cual sigue vigente. El SINAPROC ha sentado las bases para la Ley General de Protección Civil, que, en su última actualización en el Diario Oficial de la Federación publicado en 2014, en su Capítulo Primero de las disposiciones Generales, en su Artículo 2 en las fracciones XXII, XXIII, XXIV hace alusión a la protección ante diferentes riesgos naturales que clasifica como:

*XXII. Fenómeno Natural Perturbador: Agente perturbador producido por la naturaleza.*

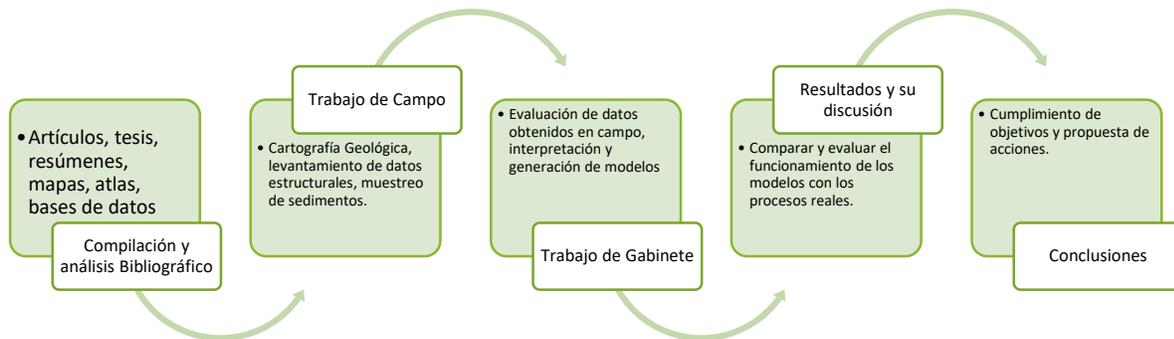
*XXIII. Fenómeno Geológico: Agente perturbador que tiene como causa directa las acciones y movimientos de la corteza terrestre. A esta categoría pertenecen los sismos, las erupciones volcánicas, los tsunamis, la inestabilidad de laderas, los flujos, los caídos o derrumbes, los hundimientos, la subsidencia y los agrietamientos.*

*XXIV. Fenómeno Hidrometeorológico: Agente perturbador que se genera por la acción de los agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas; sequías; ondas cálidas y gélidas; y tornados.*

Si bien la protección de la población ante riesgos producidos por fenómenos naturales se ha establecido a un nivel constitucional, no existe una obligatoriedad de generar mapas de peligro o atlas de riesgos a nivel municipal, sin embargo muchos municipios lo han generado con recurso público y hoy en día pueden ser consultados en la página <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx> donde existe un compilado de ellos, esto no quiere decir que cumplen con el objetivo que debería tener un trabajo de este tipo. Por ello es necesario llevar a cabo investigaciones de estos fenómenos para reducir las pérdidas humanas y económicas ya que son cuantiosas y no existen las líneas base de donde partir.

# 1 METODOLOGÍA

En este apartado se presenta el proceso metodológico para el desarrollo de la investigación (Fig. 1), la cual se dividió en las etapas básicas de un proceso investigativo.



**Figura 1.** Diagrama metodológico que se empleará en el trabajo de investigación.

Los inventarios geomorfológicos son la base para los estudios de los procesos de remoción en masa, si bien la recolección de información ayudan a conocer el panorama de estos eventos de manera general, los inventarios geomorfológicos permiten comenzar a realizar análisis cuantitativos y cualitativos de la zona de estudio.

Una combinación de dos o más técnicas puede ser utilizada para preparar un mapa de inventario. La selección de una técnica específica depende de la finalidad del trabajo, la extensión del área de estudio, la escala de los mapas base, la resolución y las características de las imágenes disponibles (fotografías aéreas, imágenes de satélite, elevación de datos LIDAR Datos, etc.), las habilidades y experiencia de los investigadores y los recursos disponibles para completar el trabajo (Guzzetti *et al.*, 2012).

La metodología para el análisis de los diferentes factores detonantes y condicionantes está basada en el modelo heurístico en conjunto con el análisis multicriterio y el método Mora - Varshon (Mora & Vahrson, 1994); Barrantes Castillo, Barrantes Sotela, & Núñez Roman, 2011; Muñiz-Jauregui & Hernández-Madrigal, 2012; Paz Tenorio, González Herrera, Gómez Ramírez & Velasco Herrera, 2017). Debido a que es un método rápido y consistente en función del razonamiento de las condiciones de terreno de estudio, permite analizar una mayor cantidad de variables físicas que intervienen y afectan al evento (Muñiz-Jauregui & Hernández-Madrigal, 2012; Roa, 2006). Con el objetivo de modelar factores identificados que condicionan y detonan PRM en la zona de estudio, se desarrollarán una serie de procesos y modelos a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los métodos a utilizar para la obtención de datos en campo, se basan en los propuestos por el Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (PMA, 2007) estos son la “Zonificación de amenazas en el área de propagación basándose en el análisis de los depósitos y el método de “Zonificación de amenazas en el área de propagación basado en el análisis de la fuente de material”. Esto consiste en mapear las zonas de propagación y distribución del movimiento en masa, así como determinar la composición del material y su fuente de origen con el fin de guiar decisiones relacionadas con el desarrollo y proporcionar los parámetros para el diseño de medidas de protección.

La metodología consiste en un trabajo de gabinete previo a los trabajos de campo durante el cual se realiza el análisis de fotografía aérea, imágenes satelitales y diversos análisis morfológicos del terreno. Posteriormente en el trabajo de campo se busca corroborar los datos obtenidos en gabinete, mediante datos reales del área de estudio, los cuales sirven para evaluar los métodos indirectos usados y reforzarlos con datos del terreno.

## **1.1 TRABAJO DE GABINETE**

La recopilación de artículos científicos, libros especializados, tesis de diversos grados académicos, mapas temáticos y la consulta de bases de datos y su análisis, marcarán el precedente para el desarrollo del marco de referencia del cual partirá la investigación y los trabajos subsecuentes.

Las actividades a realizar consisten en:

- Compilación de mapas temáticos (geomorfológico, geológicos, edafológicos e hidrológicos).
- Análisis de productos de sensores remotos.
- Inventarios previos de movimientos en masa.
- Investigación del subsuelo de trabajos anteriores (métodos directos o indirectos).
- Informes técnicos.
- Revisar e integrar bases de datos

### **1.1.1 Cartografía de gabinete**

Para esta etapa de la investigación se comenzó a trabajar con cartografía geológica y geomorfología aplicada mediante fotografía aérea obtenida del INEGI y de imágenes satelitales de Google Earth. En ellas se delimitan los contactos de las posibles litologías del área y las estructuras mayores que las afectan. Esta cartografía estará dividida en diferentes mapas morfométricos en escala 1: 50 000.

El uso de la fotografía aérea estereoscópica ha definido un estándar y un punto de referencia contra el cual las nuevas tecnologías en detección se comparan para corregir la interpretación visual. Este método sigue siendo tan efectivo como hace 50 años (Guzzetti *et al.*, 2012) ya que permite inferir el tipo de roca, la actitud de los planos de estratificación, presencia de fallas, hidrología y otras características tectónicas o estructurales, que son importantes para detectar procesos de remoción en masa y para resolver errores de clasificación. Esta técnica fué reforzada con el uso del continuo de elevación mexicano 3.0 (CEM 3.0) que es generado por INEGI (2017) con una resolución a 15 m.

El relieve terrestre puede diferenciarse por las semejanzas que tiene con diferentes cuerpos geométricos, al compararse con ellos el relieve puede tomar formas capaces de ser medidas y con ello también cuantificadas, de esta manera podemos evaluar el relieve morfométricamente.

Los mapas morfométricos que se realizarán son los definidos por Lugo Hubp (1988) apoyados en el software Arcgis 10.1 y servirán de insumos para generar el mapa de peligros por Procesos de remoción de masas, así como el análisis de la cuenca:

**Mapa Hipsométrico:** Conocido también como mapa altimétrico, consiste en definir las zonas de menor a mayor elevación con el fin de que exprese de manera clara e inmediata como se encuentra el terreno. Este se hace mediante la coloración de intervalos de elevación definidos por el autor, y que generalmente ocupan colores fríos en las zonas bajas y cálidos en las altas, mostrando una transición de la cota menor a la mayor (Lugo, 1988).

**Mapa de Ordenes de Corrientes:** La utilidad de este análisis parte de que los órdenes de corriente son reflejo de un proceso evolutivo de la topografía del terreno. Las corrientes de primer orden son las más jóvenes, con valles de formación incipiente, las de órdenes mayores, en general reflejan las etapas más antiguas de desarrollo en la red fluvial y en muchos casos son indicadores de estructuras sobre las que se han desarrollado los valles fluviales: anticlinales, fracturas, fallas, etc. Para la elaboración de este se ocupa la metodología de Strahler (1957–Horton (1945), la cual consiste en asignar el orden 1 a los cauces que aportan la primer descarga de agua y que no se encuentran ramificadas, al unirse dos corrientes de este orden, generan una de orden 2 y así sucesivamente, si un orden menor drena sobre uno mayor la jerarquía la continua el mayor, es decir si un orden 1 intersecta a un orden 3 el cauce continua en orden 3 (Viramontes-Olivas et al., 2007).

**Densidad de drenaje:** También conocido como mapa de disección del relieve, equivale al resultado de la acción de las corrientes. Este se genera al dividir la zona de estudio en áreas homogéneas y sumar la longitud de los cauces dentro de ellas para después ser divididos entre el área. El resultado de esta división se coloca en el centro del área definida para después ser interpolada, por el método que más convenga al área de estudio (Lugo, 1988).

**Pendientes del Terreno:** Consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente (ángulo entre la base y la cima). Los rangos que se representaran en el mapa estarán basados en el análisis previo del terreno, condiciones fisiográficas, escalas y del objetivo del trabajo (Lugo, 1988).

### 1.1.2 Análisis de cuenca

Este análisis consiste en definir las características representativas de la cuenca, que son de utilidad para analizar su evolución y el estado en que se encuentran, mediante parámetros que disminuyan la subjetividad y puedan ser integrados a un tratamiento matemático (Chester, Sandra, Eduardo, & David, 2017; Gaspari et al., 2012; Ibisate, 2004; Viramontes-Olivas et al., 2007).

Los parámetros a calcular se muestran en la Tabla 1 y fueron obtenidos de diferentes artículos en los que se evalúan cuencas de diferentes escalas.

**Tabla 1.** Parámetros morfométricos del análisis de cuenca.

Factor de Forma	$F = \frac{A}{L^2}$	Relación del área de la cuenca y su longitud máxima.
Coefficiente de compacidad	$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$	Relación entre perímetro y el área de la cuenca.
Pendiente media de la cuenca.	$PM = 100 \frac{(H \times L)}{A}$	Relación entre desnivel altitudinal de la cuenca, la longitud de las curvas de nivel y el área.
Curva hipsométrica de la cuenca	-	Caracterización del relieve, obteniéndose a partir de las cotas de altitud y complementado con la estimación de la superficie acumulada por cada cota.
Orden de Corriente	-	Corriente de mayor orden en la cuenca
Relación de bifurcación	$Rb = \frac{\sum Nu}{\sum (Nu + 1)}$	Relación entre el número de cauces de un orden dado al número de cauces del siguiente orden.
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{L}{A}$	La longitud de los cauces por unidad de área
Tiempo de concentración Johnstone and Cross (1949)	$Tc = 300 \sqrt{\frac{L}{S}}$	Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida,
Tiempo de concentración Giandotti (1934)	$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}}$	

## 1.2 TRABAJO DE CAMPO

Los trabajos de campo se centrarán en la cartografía geológica de la zona de estudio, basada en los aspectos litológicos, grado y tipo de alteración de las rocas y la morfometría del PRM. Estos datos serán levantados con GPS + GLONASS para poder ser evaluados de manera espacial (Coordenadas X, Y), por lo que se elaborarán los siguientes productos a escala 1:50 000:

- Mapa Geológico
- Cartografía de abanicos aluviales.
- Cartografía de procesos de remoción en masa.
- Caracterización morfológica y estructural de procesos.

La generación de la cartografía de los procesos de remoción en masa debe estar basada en una clasificación que permita diferenciarlos, es por ellos que para este trabajo se usará la clasificación de los PRM de la EPOCH, ya que está basada en los estudios realizados por Varnes (1978) quien clasificó estos eventos de acuerdo con el tipo de movimiento y al tipo de material.

La caracterización Geomorfológica y estructural estará definida por la toma de datos en campo con la brújula tipo Brunton, midiendo rumbos y echados de fallas, fracturas y planos de estratificación.

## 1.3 MAPA DE PELIGRO

Representa un sistema en el cual se analiza un conjunto de datos estáticos y dinámicos que interactúan entre ellos para poder obtener un resultado objetivo. Es aquí donde la metodología del modelo heurístico pretende integrar todos los resultados en un solo mapa, tomando como base la algebra de mapas básica del método de Mora-Vahrson (1994), la cual consiste en combinar parámetros obtenidos de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacial, obteniendo de esta manera una visión espacial de los factores que conducen a un posible PRM (Barrantes Castillo et al., 2011).

En la Metodología de Mora-Vahrson (1994) se analiza el grado de susceptibilidad (probabilidad) a un deslizamiento como el producto de 3 factores condicionantes y 2 factores detonantes (sismos y lluvias) (Barrantes Castillo et al., 2011), esta misma idea será usada para generar el mapa de peligros de la cuenca de Motozintla, pero omitiendo los factores detonantes, ya que independientemente de donde ocurran, si los factores condicionantes se encuentra en el terreno ocurrirá un PRM, de lo contrario la probabilidad será mucho menor.

La elaboración del mapa propuesto está basada en seis variables que pueden ser medidas en la cuenca a una escala 1: 50 000, y será apoyada con el análisis multicriterio a través del análisis jerárquico “AHP” (Analytic Hierarchy Process) desarrollado a finales de los 60 por Thomas Saaty . AHP es un método matemático creado para decidir alternativas cuando se tiene en consideración varios criterios, basándose en los principios de la experiencia y el conocimiento del evaluador, considerando su conocimiento tan importante como los datos utilizados en el proceso (Gómez et al., 2008; Paz Tenorio, González Herrera, Gómez Ramírez, & Velasco Herrera, 2017).

El AHP utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. Se basa en la tabla de comparación de Saaty (1990) (Tabla 2) en la que se asigna el grado de importancia de una variable sobre otra, el promedio de los resultados de la normalización de la matriz para cada variable, marcará la Jerarquía que ocupan estas respecto a las demás y será el valor de ponderación

**Tabla 2.** Escala fundamental de comparación Saaty (1990)

<b>Intensidad o importancia en escala absoluta</b>	<b>Categoría</b>	<b>Explicación</b>
<b>1</b>	Igual importancia	Las 2 variables contribuyen de igual forma al objetivo
<b>3</b>	Moderada Importancia de uno sobre el otro	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
<b>5</b>	Esencial o importancia alta	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
<b>7</b>	Importancia muy alta	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica.
<b>9</b>	Extremadamente Importante	La evidencia que favorece una actividad es absoluta y totalmente clara
<b>2,4,6,8</b>	Valores intermedios entre los juicios adyacentes	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
<b>Recíprocos</b>	Comparaciones inversas	

Fuente; Saaty (1990)

Con la ayuda del análisis jerárquico, para este estudio podemos definir al peligro por procesos de remoción en masa como la sumatoria de la susceptibilidad de que ocurra un proceso de acuerdo a cada una de las variables:

$$P = S_R(Pd_R) + S_L(Pd_L) + S_{Dd}(Pd_{Dd}) + S_s(Pd_s) + S_c(Pd_L) + S_{PRM}(Pd_{PRM})$$

Donde:

**S<sub>R</sub>**: Susceptibilidad por pendiente del terreno

**S<sub>L</sub>**: Susceptibilidad Litológica.

**S<sub>Dd</sub>**: Susceptibilidad por densidad de drenaje.

**S<sub>s</sub>**: Susceptibilidad por uso de suelo y vegetación.

**S<sub>c</sub>**: Susceptibilidad por cortes de camino

**S<sub>PRM</sub>**: Susceptibilidad por PRM desarrollados

**Pd** = Es el valor de ponderación de cada uno de los factores obtenida a través de la jerarquización de ellos.

## 2 MARCO CONCEPTUAL

---

### 2.1 PELIGRO VS RIESGO

De manera cotidiana las personas utilizamos estos términos como sinónimos, sin un buen uso de su definición. Se puede definir el Peligro y el Riesgo desde el punto de vista de las diferentes ciencias y aun así no se podría llegar a un acuerdo. Para cuestiones de desastres provocados por fenómenos naturales el término ha sido definido con base en el agente o evento que genera el estado de peligro, el cual puede ser perceptible de manera inmediata.

Las definiciones actuales de la Real Academia Española de la Lengua (RAE), ayudan a la confusión de usarlos como sinónimos, ya que definen al Peligro como un riesgo o contingencia inminente de que suceda algún mal; mientras que el Riesgo está definido como la contingencia o proximidad de un daño (RAE, 2018).

La palabra "peligro" en inglés "HAZARD", deriva del árabe AZ- ZHAR, una palabra compuesta que significa literalmente "GAMING DIE", el cual puede traducirse literalmente como "un juego de dados", esto haciendo referencia a la probabilidad, suerte y azar de ocurrencia de un evento (Paron, 2013) .

Para este caso de estudio, intentamos encontrar la definición concisa y adecuada que lo defina, partiendo de las propuestas de dependencias Gubernamentales que se encargan de atenderlo.

El Centro Nacional de Prevención a Desastres (CENAPRED, 2004) define al Peligro como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado, por lo que el peligro pasa a ser una variable de la ecuación que define al Riesgo y que está dado por:

$$R = f(P, V, E)$$

P=Peligro

V=Vulnerabilidad

E=Exposición

Definiendo al Riesgo en términos Cualitativos como “la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores (CENAPRED, 2004).

En la actualidad el término de peligro y riesgo, continúan redefiniéndose tratando de dejar en claro que son eventos distintos pero que guardan relación entre ellos. Para este estudio se asume el peligro como el evento físico que tiene un impacto en un área particular dentro de un marco de tiempo específico con espacialidad implícita (es decir la probabilidad de que los efectos del evento se extiendan sobre una cierta distancia o área determinada) y probabilidad temporal (probabilidad de que ocurran en un futuro cercano)(Martí J., 2017) .

Dado que los eventos naturales, son eventos físicos recurrentes que impactan directa o indirectamente un área y pueden o no provocar daño, deben estudiarse en términos de peligro, ya que su respectiva y acertada evaluación podrá ayudar a delimitar el nivel de riesgo en el que se encuentra la zona.

## **2.2 PELIGRO GEOLÓGICO**

Existen gran cantidad de peligros que no ocurren por la acción del hombre, a estos se les clasifica como “peligros naturales”, los cuales hacen referencia a cualquier evento o fenómeno natural (no provocado por el humano) que plantea una amenaza para la vida o las propiedades humanas de manera directa o indirecta (Tarolli & Cavalli, 2013) y que son asociados con procesos físicos recurrentes del planeta, ya que son una parte integral del ambiente (Bokwa, 2013) . Los peligros naturales no pueden ser evaluados sin los conceptos de “Magnitud” que denota también la intensidad, “Ubicación geográfica” que limita las áreas donde han ocurrido y donde existe una potencial ocurrencia y por ultimo tenemos la “Recurrencia de tiempo”, que se basa en los datos registrados de estos fenómenos en el tiempo para conocer la frecuencia (Tarolli & Cavalli, 2013) .

Los peligros naturales son clasificados de acuerdo con su causa y dado que solo están delimitados a procesos físicos, dejan de manera separada a los riesgos biológicos que incluyen tanto flora y fauna; de esta manera las enfermedades por hongos, plantas venenosas, virales o

infecciones quedan fuera del ámbito de los procesos naturales (Bokwa, 2013). Bajo el contexto anterior, los peligros naturales se pueden clasificar de la siguiente forma:

1. Peligros meteorológicos: se incluyen las tormentas, tornados, ciclones tropicales, descenso y ascenso de temperatura, niebla, granizo, sequia, tormenta de polvo.
2. Peligros hidrológicos: quedan incluidas las inundaciones, avalanchas de nieve, peligros de los glaciares (por ejemplo, avalanchas de hielo o lodo por agua) reservorios de agua subglaciar y lagos periglaciares.
3. Peligros oceanográficos: comprende la marejada ciclónica y cambios del nivel del mar.
4. Peligros geológicos: terremotos, vulcanismo, procesos de remoción en masa, riesgos kársticos y tsunamis.
5. Peligros relacionados con la vegetación: incendios forestales,
6. Peligros extraterrestres: Impactos de meteoritos.

Los peligros geológicos, conocidos en inglés como “Geological hazards” o “Geohazard”, son definidos como el conjunto de amenazas a los recursos humanos que se derivan de la inestabilidad de las características de la superficie de la tierra. La amenaza surge de la respuesta de la forma del terreno a los procesos superficiales, aunque los procesos iniciadores pueden originarse a grandes distancias de la superficie (Gares et al., 1994, p. 5, como se citó en Rivard, 2009,).

Dentro de los principales peligros geológicos se encuentran los volcánicos, sísmicos, procesos de remoción en masa, desertificación y tsunamis. Para este estudio nos centraremos en los procesos de remoción en masa, los cuales pueden ser originados principalmente por otro peligro geológico o por un peligro meteorológico.

## 2.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

Los procesos de remoción en masa (PRM) son definidos como una variedad de procesos que resultan en movimiento hacia abajo y hacia afuera de la zona en reposo, donde los materiales que conforman la pendiente, como son rocas, suelo, relleno artificial o combinaciones de estos materiales se ponen en movimiento debido a la influencia de la gravedad (Sidle, 2013) y sin un fluido que los transporte de manera obligatoria (Brunsden, 1979, p 130- 186, como se citó en (Alcántara-Ayala, 2000). Es importante reconocer que en la definición de los PRM, el término pendiente juega el papel clave, tanto es así que estos procesos han sido reconocidos como procesos de pendientes durante mucho tiempo (Varnes, 1978).

Los aportes de Penck (1894) dan origen al término de PRM, definiendo “Movimiento en masa” como aquellos movimientos originados únicamente por la acción de la gravedad, cuando el movimiento implica un medio de transporte como agua, aire o hielo se hace referencia a “Transporte de una masa” dado que en conjunto con la gravedad facilitan el proceso (Alcántara-Ayala, 2000; Cardozo, 2013).

El término de proceso de remoción en masa ha sido tema de discusión en los estudios de los países que tienen como lengua el español, debido a que es un término traducido directamente del inglés, donde es usado comúnmente como “Landslide”. Los países de habla hispana adoptamos este como un sinónimo de proceso de remoción en masa, en lugar de definirlo como tal; un “landslide” (deslizamiento) hace referencia a el movimiento de cierto tipo de material (roca, detritos o suelo), sobre un plano o superficie sobre el cual se mueva (Alcántara-Ayala, 2000).

Sharp (1938) define un landslide como un movimiento perceptible ladera abajo de una masa relativamente seca de tierra, roca o de una mezcla de ambas, a través de un mecanismo de deslizamiento o desprendimiento (Alcántara-Ayala, 2000). Estos mecanismos se dan por la falla y el movimiento de una masa de roca, sedimento, suelo o relleno artificial bajo la influencia de la gravedad en un plano (Clague, 2013). Con base en estas definiciones podemos clasificar a los deslizamientos dentro de los procesos de remoción en masa y no como un sinónimo de ellos.

Los procesos de remoción en masa serán definidos en términos generales como el movimiento pendiente abajo, de una masa rocosa, detritos o tierra (Cruden, 1991), el cual tiene su origen en las condiciones de la zona, tales como las geológicas, geomorfológicas, la mecánica de subsuelo y humanas. De acuerdo con Wiczorek (1996) estos PRM pueden ser detonados por uno o más agentes, sea este lluvias intensas, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas, rápido socavamiento basal o la misma fuerza de gravedad, a este grupo le llamaremos factores detonantes. El más común de ellos es la ocurrencia de precipitación pluvial en determinadas áreas que conduce a un aumento de la presión vertical del terreno debido al peso o reducción de la cohesión de los materiales que lo conforman, acelerando así su colapso, sin embargo los movimientos telúricos pueden desestabilizar las condiciones del subsuelo y de laderas, o los materiales volcánicos pueden aumentar la presión vertical del terreno cuando depositan y conjugarlo con los sismos generados durante la erupción.

### **2.3.1 Clasificación de los procesos de remoción en masa.**

La clasificación de los procesos de remoción en masa ha sido desarrollada desde el punto de vista de varias disciplinas, de manera general esta se ha basado en aspectos de atributos geomorfológicos; ya sea de la superficie de ruptura o del área del depósito; en la velocidad y la cinemática del movimiento; en el tipo de material involucrado y su tamaño; su grado de actividad y desarrollo; así como por el tipo de clima donde se produce (Alcántara-Ayala, 2000). Sin embargo Terzaghi (1943) el padre de la mecánica de suelos hace una clasificación con las propiedades mecánicas de las rocas afectadas (Gutiérrez - Elorza, 2008).

Los procesos y factores implicados en un PRM, ofrecen ilimitadas posibilidades de clasificación (Gutiérrez - Elorza, 2008). Dado que el tipo de material es uno de los factores más importantes que influyen en el comportamiento de los PRM, su caracterización debe estar determinada por una terminología influenciada por alguna de las principales áreas de ingeniería, ya sea la Geológica donde se distinga por su origen y su forma o al área geotécnica donde se base en propiedades mecánicas de la roca y el material. Para este estudio quedarán fuera las propiedades mecánicas de la roca y los suelos y nos centraremos solo en las geológicas.

Las clasificaciones que más han influido en el estudio de estos procesos han sido las de Sharpe (1938), Varnes (1978), Hutchinson (1988) y EPOCH (1993), de las cuales podemos ver a continuación un comparativo de ellas y las características base para su elaboración.

Sharpe en 1938 realiza una clasificación de movimientos gravitacionales, con base en el tipo de movimiento, la velocidad y el tipo de material que puede ser susceptible a sufrir estos procesos. La clasificación se torna confusa ya que existen procesos mezclados dentro de ellos mismos (Tabla 3), pero los aportes de Sharpe, como las condiciones del terreno y materiales como hielo y agua que funcionan como catalizadores del movimiento permiten ampliar la perspectiva de las clasificaciones futuras, además definió la velocidad de movimiento para estos procesos.

**Tabla 3.** Clasificación de los procesos de remoción en masa según Sharpe (1938).

TERRENO	MOVIMIENTO		MATERIAL					
	TIPO	VELOCIDAD	HIELO		TIERRA O ROCA	AGUA		
			Principalmente hielo	Tierra o roca más hielo	Tierra o roca, seca o con cantidades menores de agua o hielo	Tierra o rocas más agua	Principalmente agua	
Libre en al menos un lado.	Flujo	Generalmente imperceptible	Reptación de rocas de glaciación		Reptación de rocas		Acarreo fluvial	
		De lento a rápido	Acarreo glaciación	Solifluxión	Reptación de escombros de talud			Solifluxión
		↓		Derrumbe de derrubios	Corriente terrosa			Corriente de barro
	Muy rápido	↓		Derrumbe de detritos.	Derrumbe de detritos.			
	Deslizamiento	De lento a rápido	Acarreo glaciación	↓	Desmoronamiento	↓		
		↓		Deslizamiento de detritos	Deslizamiento de rocas			
Muy rápido		Caída de detritos						
	Alud de rocas							
Deslizamiento o flujo	Deslizamiento o flujo	Rápido a lento						

Fuente: Sánchez Núñez (2012).

La clasificación de los PRM ideada por Varnes y continuamente actualizado hasta 1996 con ayuda de Cruden, es el sistema de clasificación de estos procesos con mayor popularidad en

América del Norte y sus variaciones realizados por científicos de todos los continentes dan muestra de su utilidad y su vigencia (Hungar, Leroueil, & Picarelli, 2014). Esta clasificación de los PRM podemos observarla en la Tabla 4 y está en función del tipo de movimiento y el material fuente, considerando únicamente a las rocas y el suelo (Clague, 2013).

**Tabla 4.** Clasificación de Procesos de Remoción en Masa, Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMIENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCA DE FONDO (SUSTRATO)	FORMACIÓN DE SUELO	
				PREDOMINAN GRUESOS	PREDOMINAN FINOS
Caída			Caída de Roca	Caída de Escombros	Caída de tierra
Vuelco (Topple)			Vuelco de Roca	Vuelco de escombros	Vuelcos de tierra
Deslizamiento	Rotacional	Pocas Unidades	Hundimiento de roca	Hundimiento de escombros	Hundimientos de tierra
	Traslacional		Deslizamiento de bloque de roca	Deslizamiento de escombros en bloques	Deslizamiento de bloques de Tierra
			Muchas unidades	Deslizamiento de Roca	Deslizamiento de escombros
Expansión Lateral (Spread)			Expansión de roca	Expansión de escombros	Expansión de tierra
Flujos – Reptación (creep)			Flujo de Roca ( reptación intensa)	Flujo de escombros	Flujo de Tierra
				Reptación de suelo	
Complejo			Combinación de dos o más tipos		

Fuente; Varnes (1978).

La tercera clasificación es la desarrollada por el Programa de la Ocurrencia Temporal y Pronostico de Deslizamientos de la Comunidad Europea” (EPOCH) en 1993 (Tabla 5), la cual se basa en el mecanismo de movimiento y es generada a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988) incluyendo así los distintos movimientos y los materiales que lo conforman, los cuales pueden ser rocas, detritos o derrubios y suelos (Alcántara-Ayala, 2000; Dikau *et al.* 1996; Sánchez Núñez, 2012), por ello será esta la clasificación usada para este estudio.

**Tabla 5.** Clasificación de los procesos de remoción de masa EPOCH (1993)

MECANISMO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL INVOLUCRADO		
Tipo		Roca	Derrubios	Suelo
Caída o desprendimientos		Caída o desprendimiento de roca	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelos
Vuelco o desplome		Vuelco o desplome de roca	Vuelco o desplome de derrubios	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamientos	Rotacional simple	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo	Individual, múltiple y sucesivo
	Traslacional o de bloques	Deslizamiento de roca en bloque.	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento traslacional de suelo
Flujos		Flujo de roca	Corrientes de derrubios	Flujos de tierra, arena o suelo
Expansión lateral		Expansiones laterales en roca	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos
Complejos		Ejemplo: Alud de roca (rock avalanche)	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujos de tierra

Fuente; Dikau *et al.* (1996).

Karl Terzaghi fue un geólogo reconocido principalmente por los ingenieros civiles ya que les enseñó a apreciar la geología como ingeniería mediante los estudios geomorfológicos y geológicos de la superficie y el subsuelo (Rogers & Chung, 2016). Terzaghi, apoyado en la clasificación de pendientes de Penck (1924), desarrolló una matriz para la caracterización de los deslizamientos de tierra (Tabla 6), en la que reconoció que existen múltiples mecanismos disponibles, para activar un PRM y que las innumerables combinaciones de estos factores ejercen un efecto agregado al desencadenamiento de la inestabilidad de las pendientes, enumerando como varios mecanismos ambientales pueden impactar el equilibrio de la pendiente, reduciendo parámetros de resistencia como la fricción y la cohesión del suelo. La complejidad del estudio de estos procesos sigue siendo difícil para los geo-ingenieros, ya que la actual estimación de la pendiente presenta una perspectiva simplista basada en la suposición con base en los valores de fricción de suelo, cohesión y presión intersticial, ignorando todos los demás factores (Rogers & Chung, 2016).

**Tabla 6.** Procesos que conducen a deslizamientos Terzaghi (1950).

Nombre del Agente	Evento o proceso que provoca el agente en acción	Modo de acción del agente	Materiales de la pendiente más sensibles a la acción	Naturaleza física de las acciones significativas del agente	Efectos en el equilibrio de las condiciones de la pendiente
Agente transportado	Operación de construcción o erosión	Incremento de altura o de la pendiente	Todo el material	Cambios en el estado de estrés de los materiales que forman la pendiente.	Aumento de las tensiones de corte
			Material rígido, arcilla fisurada, shale.	Cambio en el estado de estrés, causando la apertura de las fracturas	Aumenta las tensiones de corte, reducción de la presión capilar Asociado con la expansión
Estrés tectónico	Movimientos tectónicos	Deformación a gran escala de la corteza terrestre	Todo el material	Incremento de ángulo de pendiente	Aumento de las tensiones de corte
Estrés tectónico o explosivo	Sismos o voladuras	Vibración de alta frecuencia	Todo el material	Produce cambio transitorio de estrés.	Disminución de la cohesión Aumento de las tensiones de corte
			Loess, arena ligeramente cementada y gravas	Daño intergranular	
			Arena media o fina, suelta en estado saturado.	Inicio de la reorganización de los granos	Licuefacción espontánea
Peso de la pendiente - formación de material	Proceso de creación pendiente	Reptación en pendiente	Materiales rígidos, arcilla fisurada, shale y remanentes de antiguos deslizamientos	Abre las fracturas cerradas y produce nuevas	Reducción de la cohesión, produciendo reducción de la presión capilar asociada a la expansión.
		Reptación sobre un estrato débil	Materiales rígidos descansando sobre materiales plásticos.		
Agua	Lluvia o derretimiento de nieve	Desplazamiento de aire en vacíos	Arena húmeda	Incremento de la presión del poro de agua	Disminución de la resistencia a la fricción
		Desplazamiento de aire en fracturas abiertas	Roca fracturada, shale.		
		Reducción de la presión capilar asociado con la expansión.	Material rígido, arcilla fisurada	Causado por la expansión	Disminución de la cohesión
		Meteorización Química	Cualquier tipo de roca	Debilidad de las conexiones intragranulares (Desgaste químico)	
	Escarcha	Expansión del agua debido a congelación	Roca fracturada	Ampliación de las fracturas existentes y generación de nuevas.	
		Formación y posterior derretimiento de capas de hielo	Limo y arena limosa	Aumento en el contenido de agua del suelo por la capa superior congeladas	Disminución de la resistencia a la fricción
	Sequia	Contracción	Arcillas	Producción de grietas de contracción	Disminución de la cohesión
	Reducción rápida	Produce filtración al hacia la base de la pendiente	Arena fina, limo, previamente drenado.	Produce exceso en la presión de poro de agua	Disminución de la resistencia a la fricción
	Rápidos cambios de elevación del nivel de agua	Inicio de reorganización de granos	Arena fina o media en estado saturado	Incremento espontaneo de la presión del poro de agua	Licuefacción espontanea
	Aumento del nivel freático en un acuífero distante	Causa aumento del nivel piezométrico a nivel superficial	Capas de limo o arena, entre o bajo capas de arcillas.	Incremento de la presión del poro de agua	Disminución de la resistencia a la fricción
	Filtraciones de fuentes artificiales de agua (Reservorio o canal)	Filtración hacia la pendiente	Limos saturados	Incremento de la presión del poro de agua	
		Desplazamiento de aire en los vacíos	Material húmedo, arena fina	Eliminación de la tensión superficial	Disminución de la cohesión
		Elimina la carpeta soluble	Loess	Destrucción de las conexiones intergranulares	
		Erosión subsuperficial	Arena fina o limo	Socava la pendiente	Aumento del corte

Fuente; Rogers & Chung, (2016)

## 2.3.2 Tipos de procesos de remoción de masa

De acuerdo con la clasificación de la EPOCH (1993), los PRM se clasifican de acuerdo a la intervención de distintos movimientos y materiales que los forman, siendo estos divididos en caídas o desprendimientos; vuelcos o desplomes; deslizamientos; expansiones laterales; flujos y movimientos complejos.

### 2.3.2.1 Caídas o desprendimientos

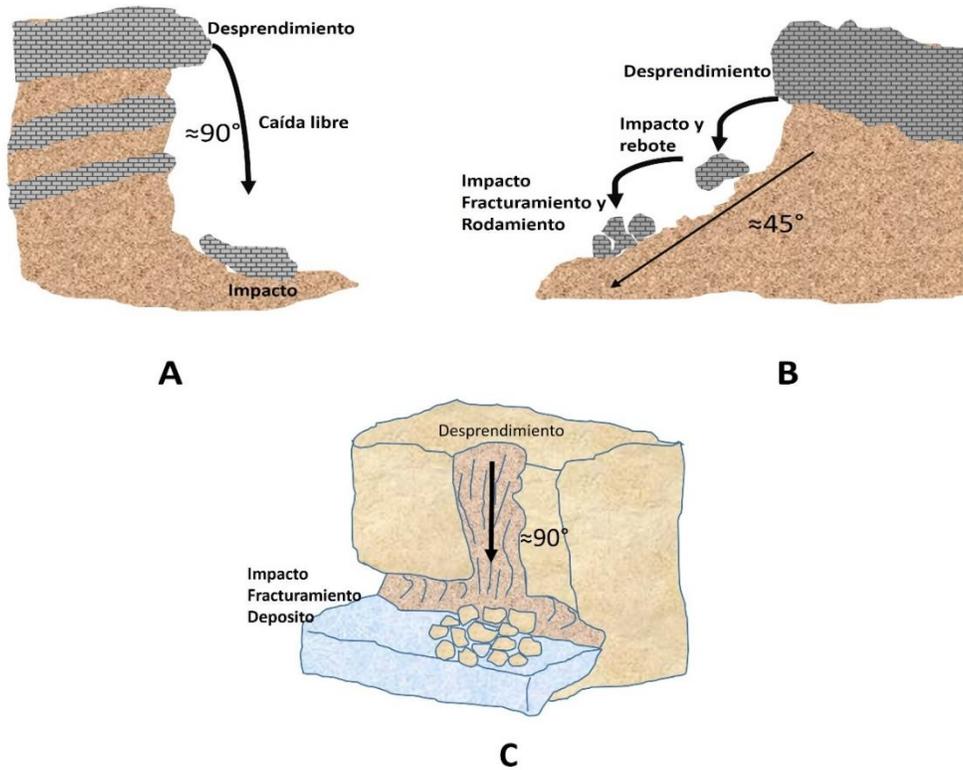
Cuando una masa (roca, detritos, suelos o hielo) de cualquier tamaño se desprende de una pendiente pronunciada o acantilado y se desplaza a lo largo de una superficie (Fig. 2B) o en caída libre (Fig. 2A Y 2C) sin incluir las pequeñas partículas que son producto del intemperismo se le denomina caída (Alcántara-Ayala, 2000; Dikau *et al.*, 1996; Varnes, 1978). Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie fuertemente inclinada, el cual posteriormente puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo (Cardozo, 2013). Estos procesos se caracterizan por ser movimientos rápidos a extremadamente rápidos, debido a que las superficies de fricción son escasas y la gravedad los acelera. Estos fenómenos se presentan regularmente en pendiente mayores a  $30^\circ$ , si las pendientes se encuentran en  $45^\circ$  en promedio, los fragmentos tenderán a rodar por la pendiente, si la inclinación está muy cercana a la vertical ( $90^\circ$ ) los materiales entran en caída libre (Sánchez Núñez, 2012).

De acuerdo con el tipo de material (Fig. 3) que entra en acción las caídas pueden clasificarse como;

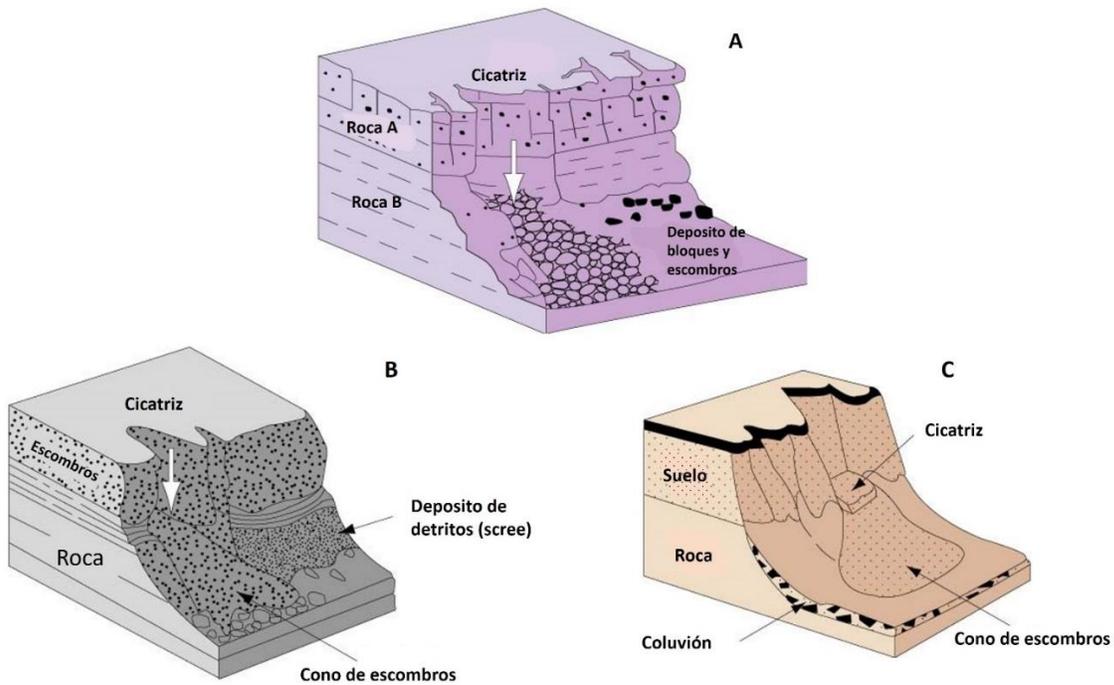
- **Caída o desprendimiento de Roca** (rockfall) que hace referencia a una roca que es recién separada de una roca madre (Varnes, 1978) debido a nuevas o existentes discontinuidades (fracturas, estratificación, clivaje, foliación), esta roca puede considerarse como material primario y cae o se desliza lo largo de un acantilado, donde cuesta abajo puede rebotar. Una caída de roca se detiene cuando ha perdido suficiente energía a través de impactos o por fricción. En el impacto, la energía se pierde y la dirección del movimiento de la caída cambia, también la roca puede dividirse en múltiples fragmentos que proceden por trayectorias separadas. Cuando múltiples bloques de roca están involucrados en una caída, hay poco o ninguna interacción entre los fragmentos individuales (Guzzetti, 2013).

- ***Caída o desprendimiento de derrubios;*** Hace referencia a una caída de fragmentos de roca de menor tamaño, que se compone principalmente de fragmentos detríticos los cuales pueden considerarse como material secundario. Varnes (1978) toma como referencia la clasificación de los detritos por tamaños de Rapp (1960) en la cual distingue a los guijarros con tamaños menores a 20 mm; los adoquines con tamaños mayores a 20 mm pero menores a 200 mm y los cantos rodados que poseen un tamaño mayor a los 200 mm. Estos tamaños puede variar de acuerdo a la escala usada para su clasificación, entre ellas la de Udden-Wentworth y la escala de tamaños de grano Krumbein Phi.
- ***Caída o desprendimiento de suelo;*** Hace referencia a una caída de suelo o material muy fino producto de la erosión e intemperismo, el cual se encuentra en una pendiente abrupta, este proceso es común en la orillas de las carreteras debido a los cortes de camino. El mecanismo de la propagación es similar a la caída de rocas, aunque los impactos pueden ser altamente reducidos por la debilidad de las partículas en movimiento (Hungry *et al.*, 2014).

Los desencadenantes naturales de desprendimientos de roca incluyen los terremotos, ciclos de congelación-descongelación de agua, derretimiento de nieve o permafrost, cambios de temperatura, precipitaciones intensas o prolongadas, alivio del estrés después de la desglaciación, actividad volcánica y penetración de las raíces de los árboles y plantas. Dentro de las causas antropogénicas se incluyen la erosión de las laderas rocosas, las actividades mineras, fugas de tubería, drenaje ineficiente y vibraciones causadas por excavaciones, voladuras o tráfico (Guzzetti, 2013).



**Figura 2.** Procesos de Caída (Desprendimiento) de materiales A) pendientes  $\approx 90^\circ$  B) pendientes  $45^\circ$  (Gonzales de Vallejo *et al.*, 2002), C) Diagrama de bloques de una típica caída de roca por socavación de la base (Dikau *et al.*, 1996).

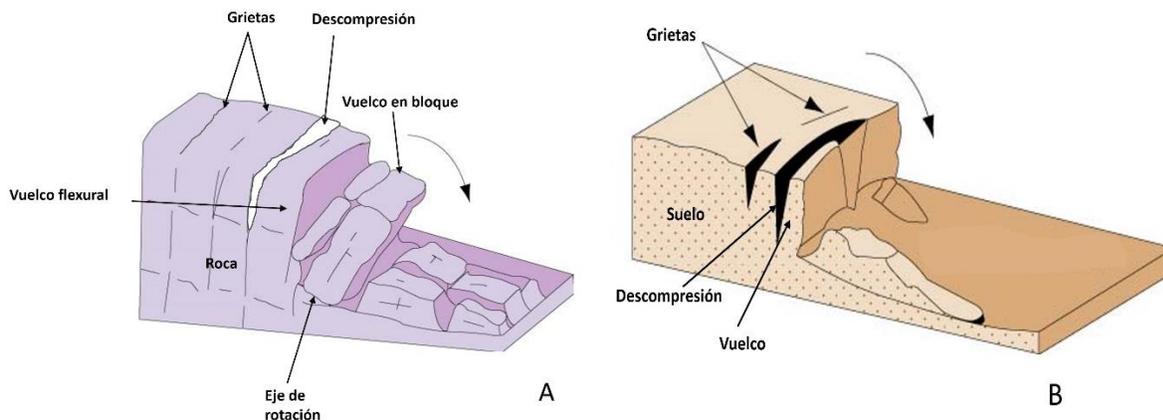


**Figura 3.** Tipos de caídas o desprendimientos A) Caída de Roca B) Caída de escombros y C) Caída de suelo. Fuente: Modificado de British Geological Survey, 2018.

### 2.3.2.2 Vuelco (topple)

Un vuelco es la rotación hacia fuera de la pendiente de una masa de roca, detritos o suelo (Fig. 4) entorno a un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (Alcántara-Ayala, 2000; Cruden, 2013; Gutiérrez - Elorza, 2008), a veces es impulsado por la gravedad ejercida sobre el material adyacente a la masa desplazada o por fluidos que ingresan en las grietas del material (Cruden, 2013; Varnes, 1978). Generalmente ocurren en una masa o superficies de materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferenciales como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares (Alcántara-Ayala, 2000). Los vuelcos pueden conducir a caídas o deslizamientos dependiendo de la geometría de la masa en movimiento, la geometría de la superficie de separación, la orientación y la extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas. Los vuelcos van desde extremadamente lentos a extremadamente rápidos, a veces acelerando a lo largo del movimiento. La rotación puede realizarse en uno o varios planos de descompresión (Dikau et al., 1996), siendo esta un requisito indispensable para que ocurran estos procesos.

Los vuelcos pueden clasificarse de acuerdo al tipo de proceso y material involucrado, estos son; vuelcos por flexión, vuelcos de bloques, vuelcos en chevron y los vuelcos de bloques flexionados. Los factores que influyen en la ocurrencia de este proceso son los ciclos de hielo y deshielo, meteorización salina en areniscas y disolución en calizas (Dikau et al., 1996; Gutiérrez - Elorza, 2008).



**Figura 4.** Vuelco (desplome) de material, A) Vuelco en roca y B) Vuelco en suelo.

Fuente: Modificado de British Geological Survey, 2018.

### 2.3.2.3 Deslizamiento

Un deslizamiento (Fig. 5) es un desplazamiento de una masa de suelo, detrito o roca, rígida o semirrígida que desciende a lo largo de distintas superficies de ruptura o sobre estrechas zonas de intensa deformación por cizallamiento, bajo la influencia de la gravedad (Gutiérrez - Elorza, 2008; Jackson, 2013; Varnes, 1978), frecuentemente la formación de grietas transversales es la primera señal visible de que un proceso se está iniciando y estas grietas definen la zona que ocupara el escarpe principal (Alcántara-Ayala, 2000). El deslizamiento puede ser progresivo, es decir que las fallas de corte inicialmente pueden no ocurrir de manera simultánea sobre lo que se convertirá en una superficie de ruptura, sino que puede desplazarse sobre una falla local (Varnes, 1978). El tipo y número de superficies de ruptura son usadas para subdividir los deslizamientos (Dikau et al., 1996) en deslizamientos rotacionales y deslizamientos traslacionales, caracterizándose por presentarse en pendientes mayores a  $15^\circ$  (Sánchez Núñez, 2012) y pueden tener velocidades que van de muy bajas (milímetros por año) hasta muy rápidas (metros por segundos) (Jackson, 2013).

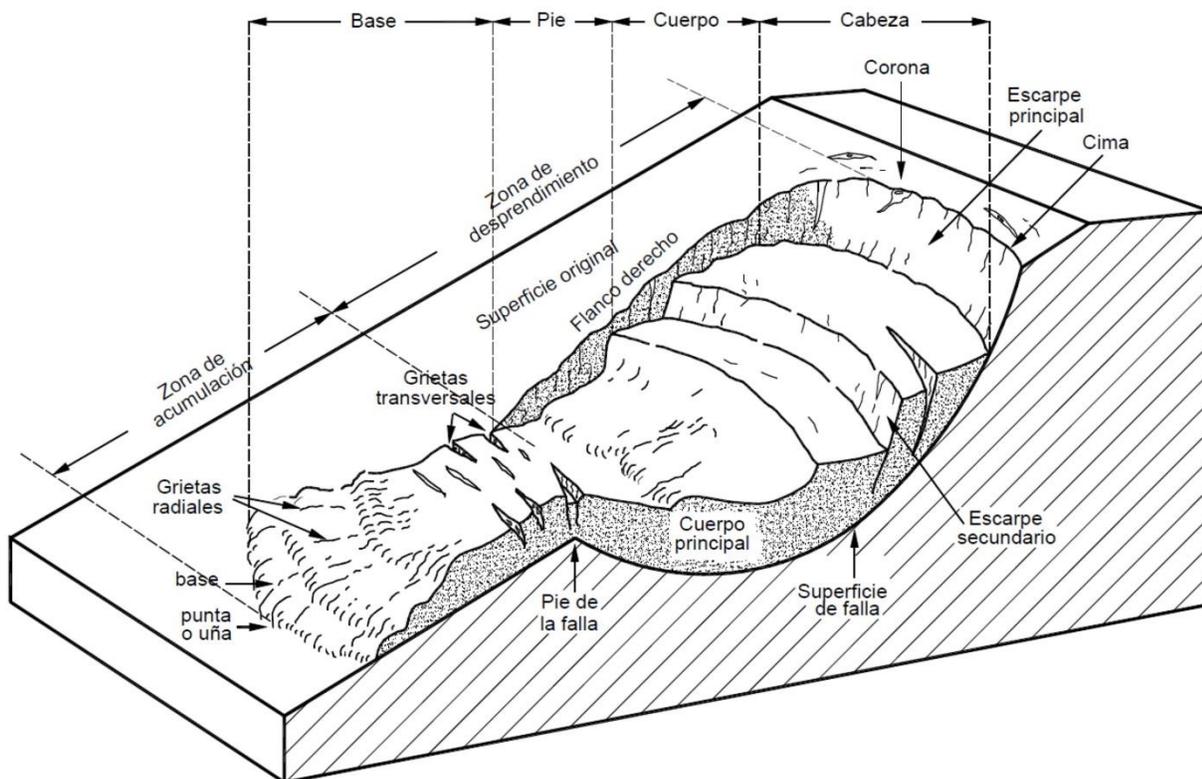
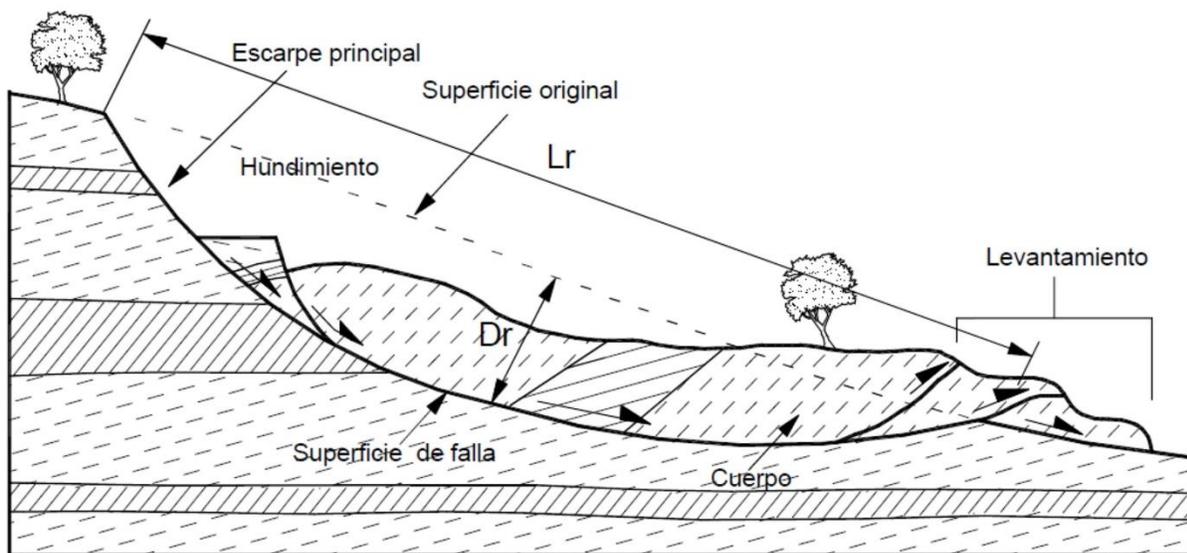


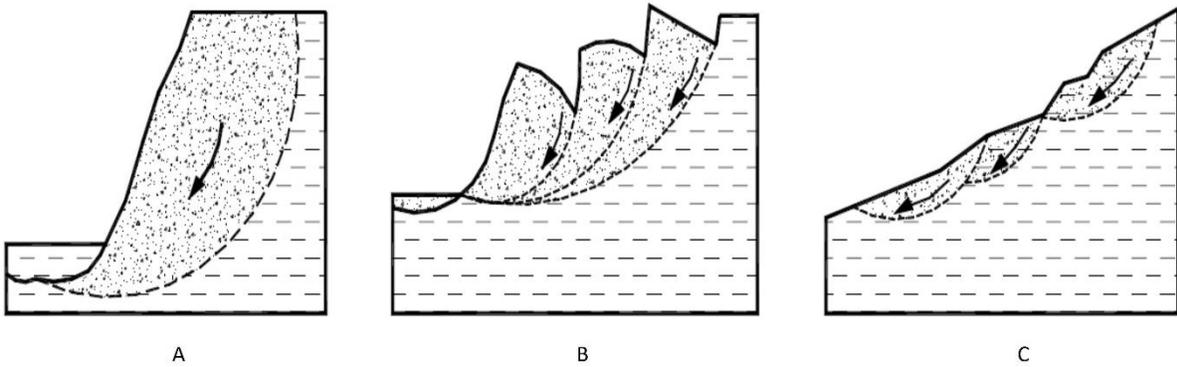
Figura 5. Mecanismo de un deslizamiento y partes que lo conforman, tomado de Díaz (2009).

- **Deslizamientos rotacionales:** este tipo de procesos se producen en superficies de ruptura curva, cóncava o en forma de cuchara (Fig. 6) (Alcántara-Ayala, 2000; Varnes, 1978), y se dividen en simples, múltiples y sucesivos ( Fig. 7). Las grietas expuestas en planta son concéntricas y cóncavas hacia la dirección del movimiento, ocasionando que en el área de las cabeceras los bloques basculen contra la pendiente(Gutiérrez - Elorza, 2008), produciendo un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, generando en la mayoría de los casos flujos de materiales en la parte inferior del pie de la ladera (Díaz, 2009) .

Los deslizamientos rotacionales, ocurren regularmente en suelos homogéneos naturales o artificiales; notándose en los suelos residuales un aumento de la resistencia al corte de los materiales a mayor profundidad, generándose en ellos una superficie de ruptura generalmente curva; las zonas meteorizadas a gran profundidad o en rellenos con alturas significativas presentan la superficie de ruptura de manera circular (Díaz, 2009).

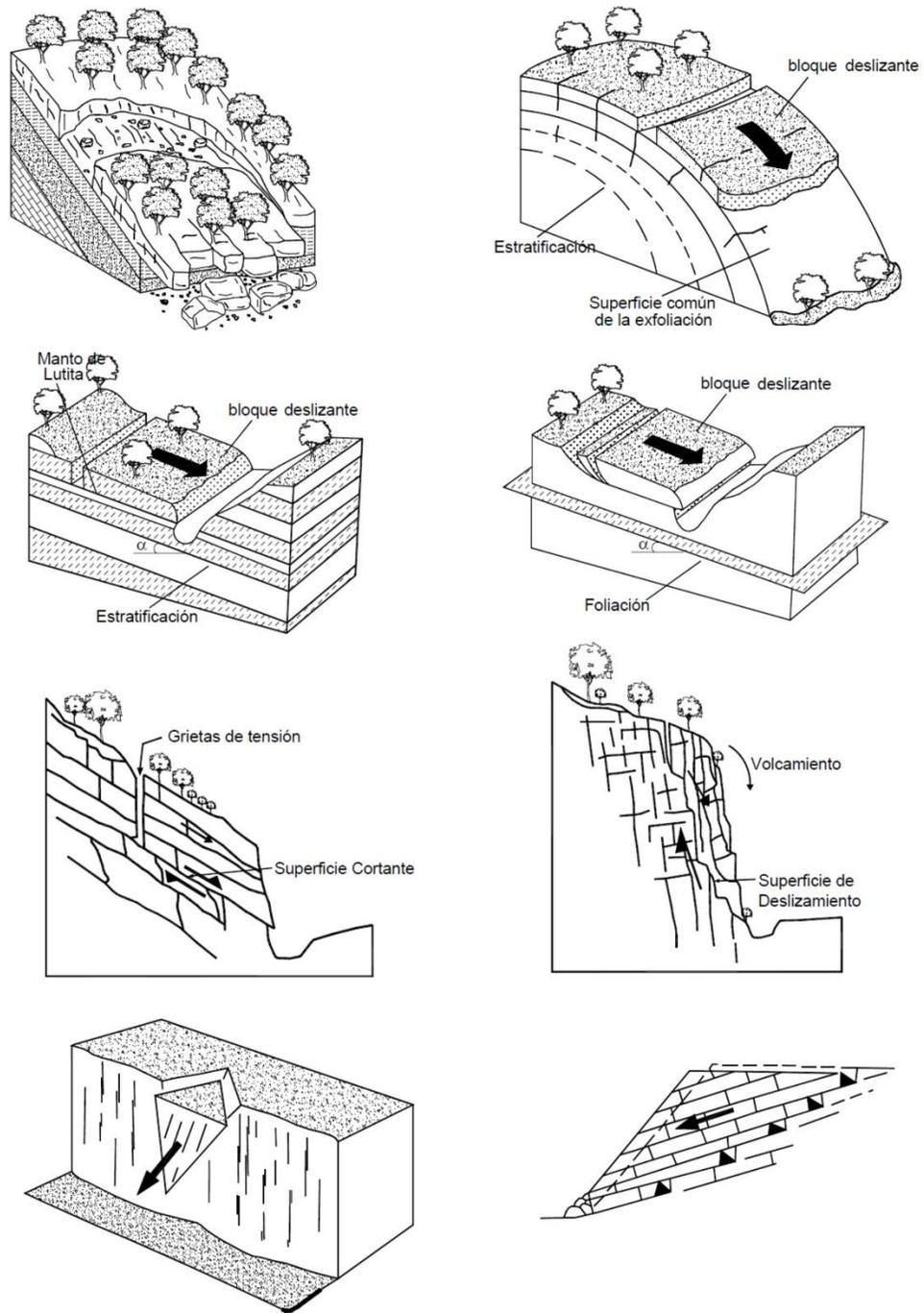


**Figura 6.** Deslizamiento de rotación en una ladera, tomado de Díaz (2009).



**Figura 7.** Diferentes tipos de deslizamientos rotacionales, A) Simple, B) Múltiple, C) Sucesivo, tomado de Díaz (2009).

- **Deslizamientos traslacionales** : en este tipo de deslizamiento, la masa de roca se mueve bruscamente a lo largo de una superficie plana o con suave ondulación (Fig. 8), presentando una pequeña rotación o inclinación hacia atrás(USGS, 2004; Varnes, 1978), este puede continuar indefinidamente si la superficie sobre la cual descansa es suficientemente inclinada y extensa, siempre y cuando la resistencia de la superficie sea menor a la fuerza motriz de la masa (Varnes, 1978), estos deslizamientos tienden a ser menos profundos que los rotacionales, ya que involucran un movimiento paralelo a la superficie sobre la que se desplazan(Alcántara-Ayala, 2000).



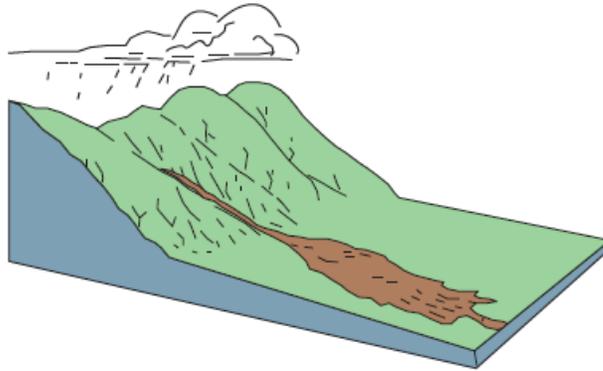
**Figura 8.** Ejemplos de deslizamientos traslacionales, tomado de Díaz (2009).

#### 2.3.2.4 Flujos

Un flujo es un desplazamiento en el cual las partículas individuales viajan separadamente dentro de una masa en movimiento a través de un canal empinado, asimilando cualquier material que esté disponible (Fig. 9). Esta masa es una mezcla saturada de materiales que puede ser roca fuertemente fracturada, restos clásticos en una matriz muy fina o simplemente granos de tamaño muy fino. Se caracterizan por ser movimientos continuos que causan deformación irreversible del material debido al estrés prolongado ejercido sobre este (Dikau et al., 1996; Hungr, 2013). Como no tienen un plano de superficie definido por el cual deban fluir, pueden alcanzar distancias lejanas a la fuente, siendo controlados en parte por el relieve topográfico. De acuerdo al tipo de material se clasifican en flujos de roca, escombros o suelo, siendo los dos últimos los más comunes (Sánchez Núñez, 2012).

De acuerdo con la clasificación de Varnes (1978), los flujos se clasifican en; *flujos de roca*, los cuales consisten en flujos de roca por acción de la gravedad y se asocian a deformaciones gravitacionales profundas; *flujos de detritos*, estos movimientos son reconocidos por movilizar fragmentos de roca, bloques y cantos rodados en una matriz arenosa con escaso contenido de arcillas; *flujos de suelo*, los movimientos de este tipo se dan en suelos arcillosos o arenosos saturados en agua, adquiriendo un comportamiento fluido (Gutiérrez - Elorza, 2008).

Los flujos se pueden desarrollar en condiciones de humedad o secos, la velocidad de desplazamiento puede variar debido a que se comporta como un fluido viscoso, razón por la cual la velocidad no es continua y puede variar durante todo el trayecto, dando lugar a la formación de lóbulos, los cuales se forman debido al movimiento intergranular al interior del cuerpo. La mayor parte de los flujos se desarrollan en condiciones de humedad (Alcántara-Ayala, 2000; Sánchez Núñez, 2012), sin embargo existen flujos en condiciones secas que pueden ocurrir debido a un movimiento sísmico.



**Figura 9.** Comportamiento de un flujo con fuerte precipitación en zona de montaña, tomado de Highland & Bobrowsky (2008)

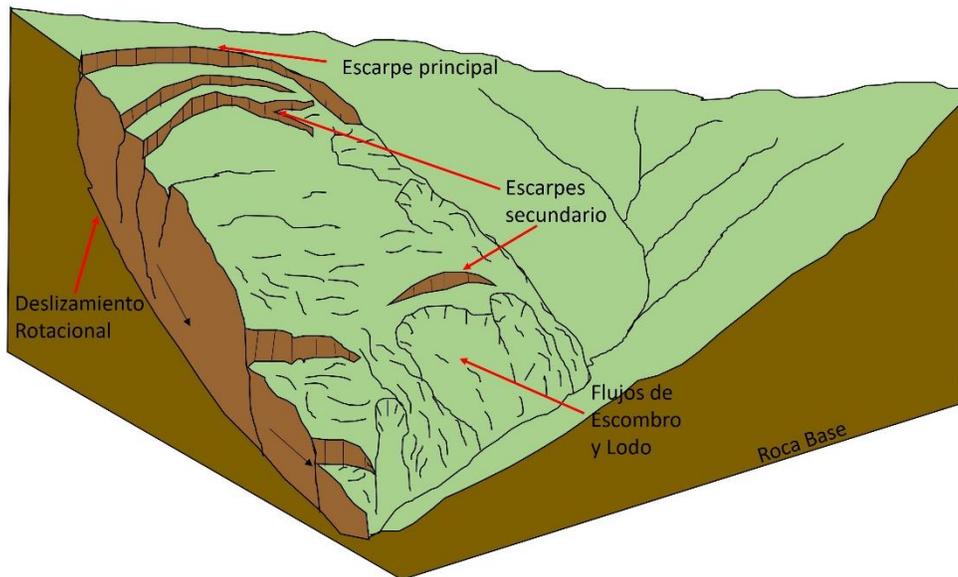
El origen de un flujo comúnmente se relaciona con lluvias extraordinarias, sin embargo el deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas montañosas son algunos de los factores que también detonan estos eventos y aunque la ausencia de vegetación influya en la ocurrencia de estos, no es un requisito (Díaz, 2009).

De acuerdo a las características de la masa que se transporta, la pendiente y la forma del canal se diferencian 4 tipos de flujos (Díaz, 2009):

- **Flujo de agua;** Descarga de agua con concentración de sedimentos < 5% en volumen.
- **Flujo hiperconcentrado;** Contiene > 5% de sedimentos en volumen, transporta grandes volúmenes de arena. El porcentaje máximo de sedimentos depende de las cantidades de limos y arcillas que lleve asimiladas.
- **Flujos de lodos;** Predominan los limos y las arcillas, generalmente posee altas concentraciones de partículas finas. La masa presenta una especie de cohesión a medida que la concentración de finos aumenta.
- **Flujos de residuos;** Con la alta concentración de sedimentos la masa presenta una consistencia de pasta aguada (Slurry) que es similar a un concreto húmedo.

### 2.3.2.5 Movimientos complejos

Estos movimientos de masa implican una combinación de uno o más de los tipos de movimientos revisados anteriormente, esas combinaciones se pueden observar en las diferentes etapas de desplazamiento y desarrollo (Varnes, 1978). Es común que un tipo de masa comience a moverse debido a un tipo de movimiento y posteriormente evolucione a otro diferente del inicial (Fig. 10)



**Figura 10.** Procesos de remoción en masa del tipo complejo, comienza como un deslizamiento de un bloque, en la cima se puede observar el escarpe principal, posteriormente comienzan a desarrollarse escarpes secundarios y las grietas de tensión, finalizando en la formación de flujos de tierra o escombros. Modificado de (Sánchez Núñez, 2012).

Este comportamiento es común en los flujos y engloban a las avalanchas, flujos deslizantes y grandes deslizamientos gravitacionales, los cuales presentan características diferentes en la evolución del movimiento (Gutiérrez - Elorza, 2008; USGS, 2004).

- **Avalanchas;** Una masa fluidizada fundamentalmente por aire que moviliza rápidamente grandes volúmenes de roca y que generalmente forman flujos de pendiente abierta.

- **Flujos deslizantes;** es material de colapsos estructurales de ladera originados por un deslizamiento que se fluidifica momentáneamente y moviliza alcanzando grandes velocidades, manifestando un amplio desplazamiento.
- **Deslizamientos gravitacionales;** generalmente asociados a grandes dimensiones en laderas de montañas, se han descrito en el ámbito de la tectónica y se producen en conjuntos sedimentarios levantados tectónicamente formando una estructura plega

### 3 MEDIO FÍSICO

#### 3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ACCESO AL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al sureste del estado de Chiapas, tiene una extensión de aproximadamente 99 km<sup>2</sup> y se localiza entre los paralelos 15° 18' y 15° 24' de latitud norte y los meridianos 92° 10' y 92° 20' de longitud oeste a una altitud entre los 1024 y 2610 msnm.

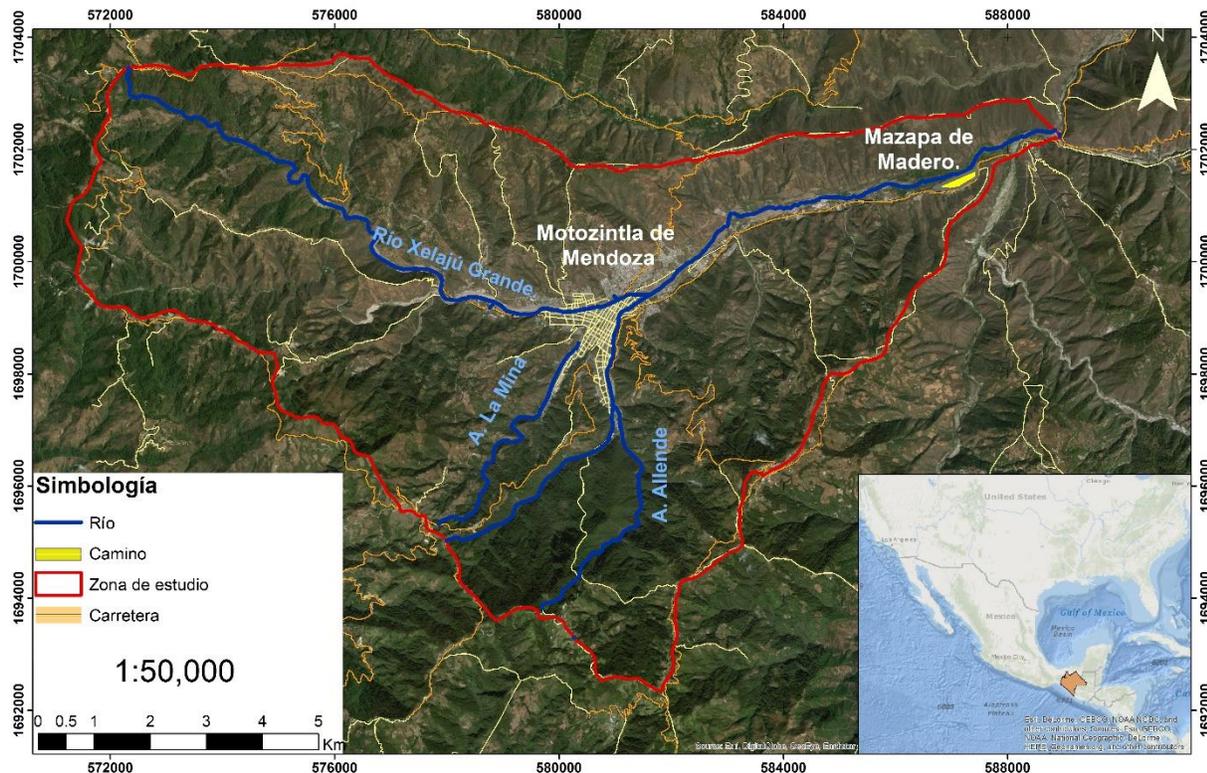


Figura 11. Mapa de localización del poblado de Motozintla UTM WGS 84.

Para llegar a la cabecera Municipal de Motozintla se puede optar por dos vías de acceso carretero. La primera por la zona norte, partiendo de Tuxtla Gutiérrez por la carretera 190, pasando por San Cristóbal de las Casas y Comitán, posteriormente deberá tomar la desviación a la carretera 211 Frontera Comalapa que llega al poblado de Motozintla. El segundo acceso es por la zona sur a través de la autopista 200 que bordea la zona de costa de Chiapas e inicia en el poblado de Arriaga, cruzando Tonalá, Pijijiapan y Mapastepec hasta llegar a Huixtla, aquí

comenzara el ascenso de aproximadamente 2000 m por la carretera 211 hasta el poblado de Buenos aires que se sitúa en la zona de parteaguas de la cuenca, posteriormente comenzara el descenso hacia el poblado de Motozintla por la misma carretera.

### 3.2 FISIOGRAFÍA

El área de estudio se localiza en la Provincia de la Cordillera Centroamericana (INEGI, 2017), la cual cuenta en la zona de México con 34,250 Km<sup>2</sup> y se entiende como un sistema montañoso dirección NW-SE de aproximadamente 370 km. La zona está dividida por dos subprovincias fisiográficas (Fig. 12); al norte se observa la provincia Sierra del Sur de Chiapas, la cual está representada por toposformas de sierra alta de ladera escarpada; al sur se encuentra la denominada Volcanes de Centroamérica, definida por toposformas de sierra alta volcánica (INEGI, 2017). Los valles que se desarrollan en forma de “V” en estas subprovincias reflejan una etapa de juventud del ciclo geomorfológico (Sánchez Núñez, 2012) ya que el terreno es joven y la erosión tiene un periodo de tiempo corto, sin embargo por lo alto de sus pendientes y la forma de los valles se aprecia que el grado de erosión es fuerte y profundo.

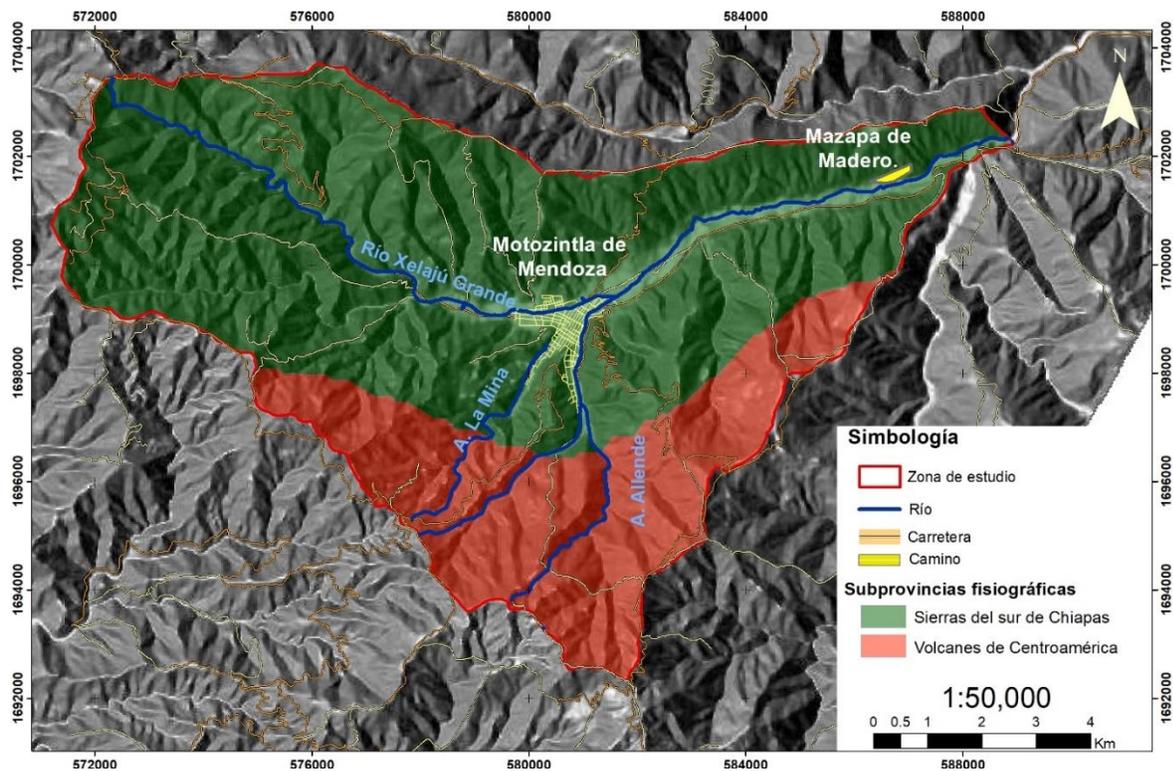


Figura 12. Subprovincias fisiográficas que comprende el área de estudio, UTM WGS 84.

### 3.3 HIDROGRAFÍA

La zona de estudio se encuentra dentro de la región hidrológica número 30 denominada por la Comisión Nacional del Agua (CNA) como “Grijalva-Usumacinta” (Fig. 13), limitando al SW con la región número 23 Costa de Chiapas, dentro de la cuenca Grijalva- La concordia, y la subcuenca región Tapizaca (INEGI, 2017).

El poblado de Motozintla se ubica en el centro de una cuenca que delimita la zona de estudio, dentro de ella se encuentran tres ríos principales, que convergen directamente en el poblado, estos son el Río Xelajú Grande que es el de mayor orden y sobre el cual desembocan el río La Mina y el río Allende. Durante la mayor parte del año, los escurrimientos son escasos y modelan en bajo grado el paisaje, esta conducta se invierte en la temporada de lluvias que se presentan de Junio a Noviembre (Camacho, 2015) y más aún si son acompañadas de grandes fenómenos hidrometeorológicos (Ramos, Trujillo Vela & Prada S., 2015).

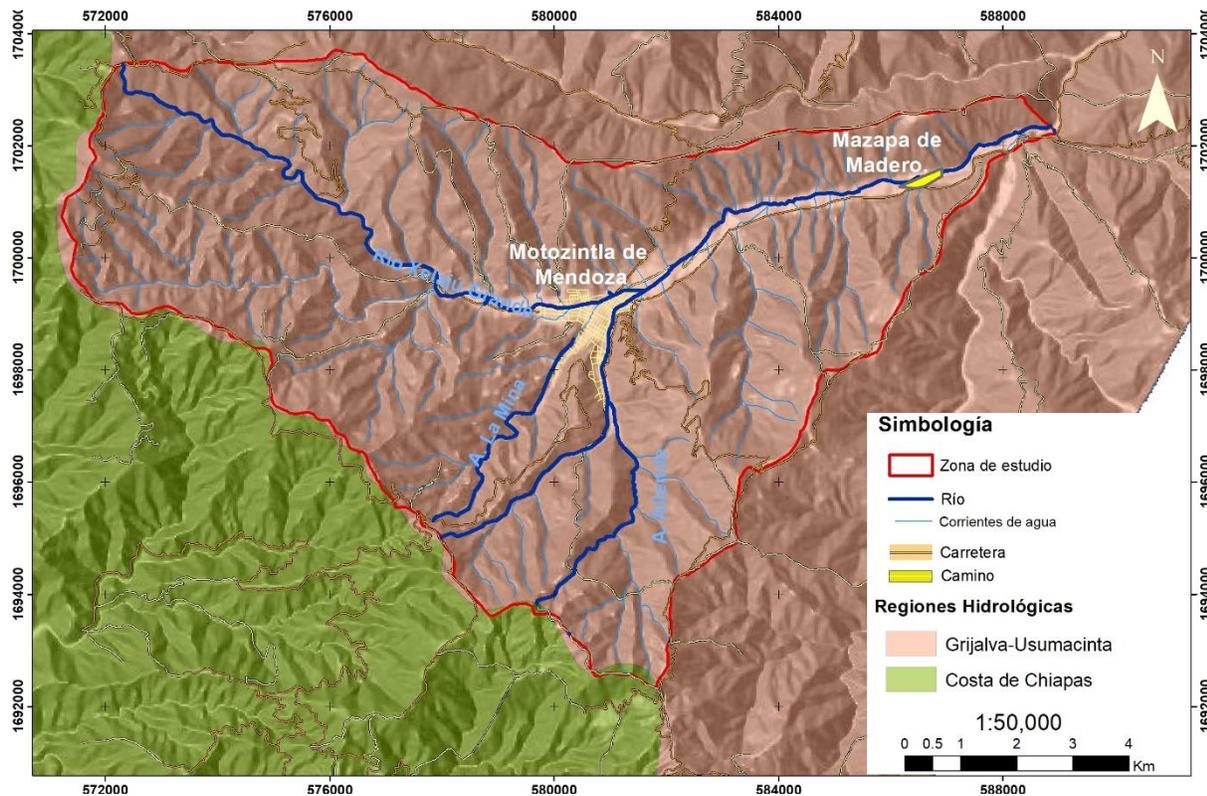


Figura 13. Hidrografía del área de estudio, UTM WGS 84.

### 3.4 USO DE SUELO Y VEGETACIÓN

El agua cuando se infiltra, satura los suelos ocasionando una mayor probabilidad de ocurrencia de un PRM. La vegetación ayuda de manera efectiva a mitigar los efectos negativos que pueden ocurrir ya que retarda la rápida infiltración y saturación de agua, reduce el agrietamiento de la superficie de suelo y en consecuencia ayuda a la prevención de derrumbes (Xiao et al., 2017).

La cuenca donde se encuentra Motozintla a lo largo de la historia ha sido explotada en sus recursos forestales, principalmente maderables (Carballido, 2008). Por lo que actualmente cuenta con extensas áreas deforestadas y usadas para agricultura (Fig. 14)

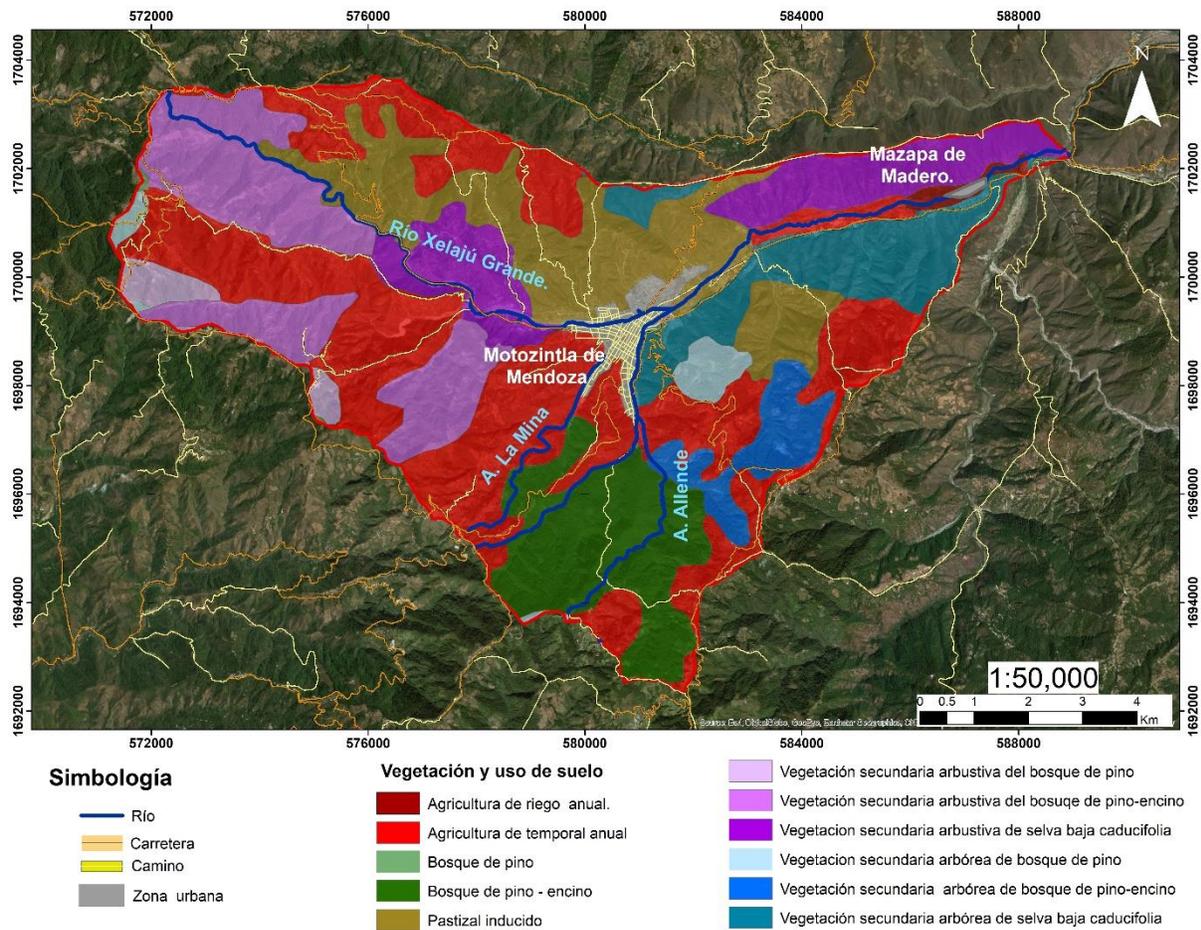


Figura 14. Uso de suelo y vegetación en Motozintla. (INEGI, 2017)

La cuenca presenta una vegetación primaria que corresponde a Bosques de Pino y Pino-Encino, esto se aprecia en la zona alta que limita el parteaguas al sur de la cuenca y las zonas altas al

oeste, cubriendo un área de 10.69 Km<sup>2</sup>. La mayor cantidad de área forestal pertenece a vegetación secundaria de características arbustiva y arbórea (Tabla 7), la cual suma un área de 37.96 Km<sup>2</sup>. Por su parte las área que tienen mayor exposición a los agentes erosivos, se encuentran conformadas por las zonas de pastizal inducido, agricultura de riego, agricultura de temporal y el área de asentamientos humanos que en conjunto cubren un área de 50.27 Km<sup>2</sup>. Si bien las zonas forestales comprenden casi el 50% del área, que la gran cantidad de vegetación sea arbustiva y espaciada genera que las áreas que cubre sean más susceptibles a la erosión que las zonas arboladas. También hay que tomar en cuenta que por las características de la zona, las altas pendiente no permiten el desarrollo de grandes capas de suelo, por lo que la zona forestal podría no estar bien enraizada al estrato, ocasionando que la base sea débil y propensa a un posible PRM.

**Tabla 7.** Usos de suelo y vegetación de la cuenca de Motozintla.

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN	Área Km <sup>2</sup>	%
Bosque de pino	0.057414	0.058031
Bosque de pino-encino	10.63703	10.75123
Pastizal inducido	14.49623	14.65187
Agricultura de riego anual	0.712295	0.719942
Agricultura de temporal anual	32.99677	33.35103
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	1.603437	1.620652
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	12.97087	13.11012
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	9.642174	9.745692
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	1.61808	1.635452
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	3.560433	3.598657
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	8.571484	8.663507
Asentamientos humanos	2.071578	2.093818
<b>Total</b>	<b>98.93781</b>	<b>100</b>

## 4 ESTRUCTURA TERRITORIAL Y ESCALAS URBANO – RURALES ANTE LA CONDICIÓN DE PELIGRO DE MOTOZINTLA.

De acuerdo al censo realizado por el INEGI en 2010 (INEGI, 2017) el municipio de Motozintla posee 417 localidades de las cuales 416 corresponden al ámbito rural, siendo Motozintla de Mendoza que es la cabecera Municipal, catalogada como la única localidad urbana. De las 417 localidades 31 de estas se encuentran en estatus de inactividad debido a que no existe población en ellas (SEDESOL, 2018). Los datos de Carballido en 2008 mencionan que existían 343 localidades Rurales, lo que muestra un incremento del 22% en menos de 10 años.

De acuerdo al último censo realizado en 2010, en la cuenca que se encuentra de Motozintla existen 67 localidades, de ellas 66 se consideran rurales y solo 1 (Motozintla de Mendoza) es considerada urbana (Fig. 15).

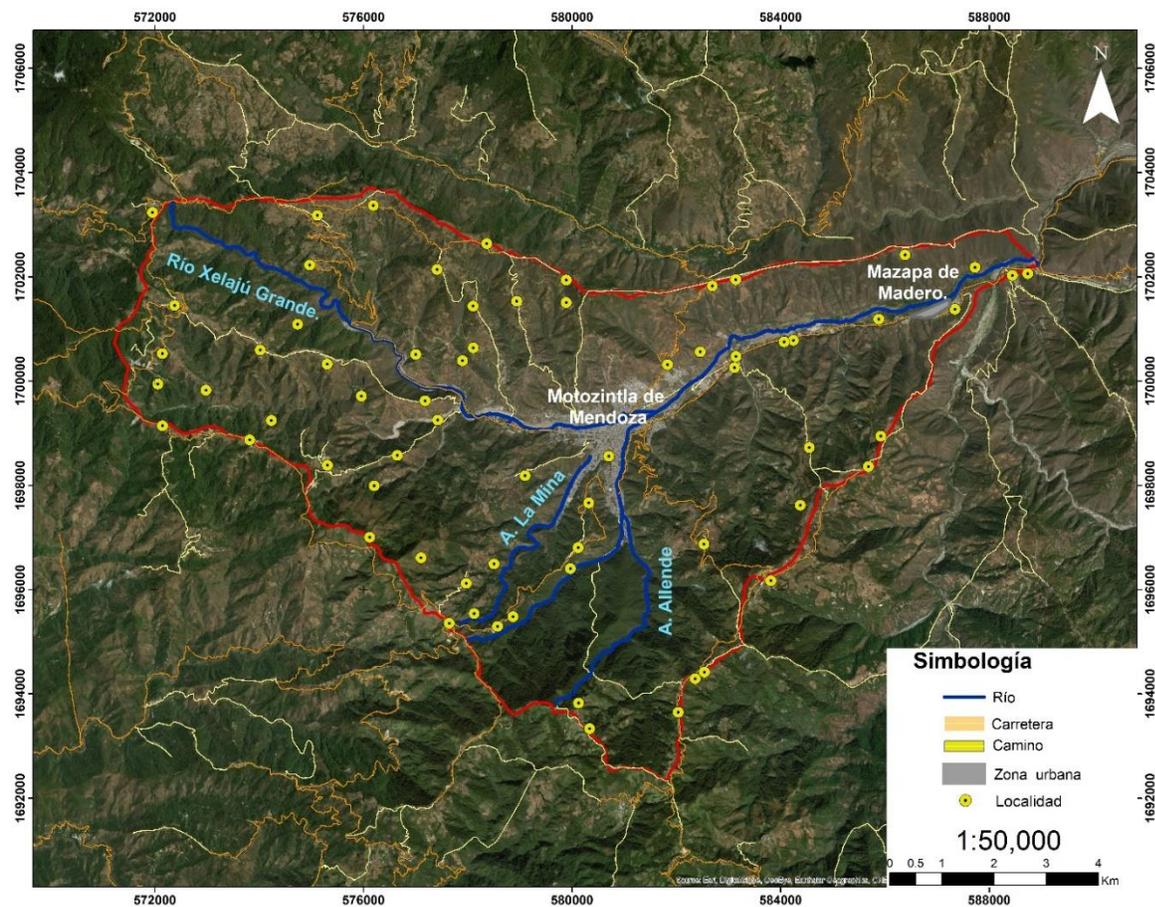


Figura 15. Localidades que se encuentran dentro de la cuenca de Motozintla

#### 4.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL

Motozintla se creó como un asentamiento de tránsito durante la época colonial en 1620, poseía un trazo ortogonal iniciado por la finca San Francisco Motozintla, la cual se consolidó como lugar de paso necesario entre el centro del estado y la costa, la región poseía amplios terrenos para la crianza de ganado vacuno y ovino por lo que fue considerado el lugar más importante de la Sierra. Este asentamiento se encontraba justo en lo que hoy es el actual centro del poblado y se ubicaba entre las desembocaduras del río La Mina y el río Allende. La zona a finales del siglo XIX estuvo habitada principalmente por indígenas Mame, Cakchiquel y Mochó los cuales vieron incrementada su población por la llegada de habitantes de otros pueblos debido al auge de la plantación del café.

Para 1900 cuando Motozintla era una villa, ya obtenían agua a través de canales de ladrillo y tuberías, agraciados por la alta cantidad de escurrimientos en la zona. Debido al incremento de población a mediados del siglo XX, se comenzaron a ocupar espacios cada vez más cercanos a los cauces de los ríos Xelajú, Allende y La Mina e iniciaron la construcción de drenajes para las aguas negras, los cuales continuaron creciendo hasta nuestros días (Carballido, 2008).

En 1954 el estado de Chiapas eleva al rango de “ciudad” la localidad de Motozintla por concentrar la mayor cantidad de habitantes de esa región, además de ser el principal centro comercial y de servicios. En 1980 se propuso un plan de crecimiento urbano por parte de la federación y el estado, sin embargo la ciudad creció de manera anárquica por que no fue realizado el seguimiento al plan. En 1983 se vuelve a considerar su importancia como centro de comercio y se asigna como sede de servicios regionales con el respaldo de un plan de desarrollo decretado por el Diario Oficial de la Federación el 5 de enero de 1983 (Carballido, 2008).

De acuerdo con Carballido los censos de población demuestran que la ciudad tuvo un crecimiento moderado entre los años cincuentas y setentas, debido a que la tasa de crecimiento anual era del 2.26%, a diferencia de 1950 en donde esta era de 1.38%. A partir de 1970 se incrementó la tasa de crecimiento anual a más del 4%, lo que se reflejó en la población ya que se triplicó entre 1970 y 1980 como consecuencia de la construcción de mejores vías de comunicación que fueron terminadas en esos años. Ejemplo de ellas son la carretera a Huixtla

que se terminó de pavimentar en 1960 y la de Frontera Comalapa terminada en 1975 (Carballido, 2008).

A razón de los desastres ocurridos en Motozintla en 1998 y 2005 que afectaron directamente a la ciudad, se efectuó una migración de las personas originarias de esta. Las anécdotas de la gente local cuentan que esto se debió a diferentes razones, entre ellas se encuentran el temor a un recurrente desastre, falta de empleo por salida de empresas y comercios de esta ciudad vulnerable, así como por falta de suelos cultivables debido a la fuerte erosión provocada por los eventos hidrometeorológicos extraordinarios. Por ser ciudad cercana a la frontera la localidad continúa con su explosión demográfica (Grafico. 1) debido a los migrantes que llegan de la región de Centroamérica buscando mejores condiciones de vida y otros más tienen un fuerte comercio de importación y exportación en la libre frontera. Gracias a que muchos de ellos obtienen permisos de residencia, es común observar en la ciudad vehículos con placas de Guatemala en jardines de casas en Motozintla, así como personas inmigrantes prestando servicios en locales y comercios.



Grafico 1. Histórico poblacional del Municipio de Motozintla generado a partir de datos de INEGI (2017).

De acuerdo con la SEDESOL (2018), la proyección de población del municipio realizada por la CONAPO en 2006 mostraba una disminución de esta en los próximos 25 años (Tabla 8), seguramente pensada por la migración de las personas afectadas. Si realizamos la comparación con la información colectada por los censos, en la gráfica anterior (Gráfica 1) la población no disminuyó, por el contrario continuó aumentando pero aun ritmo lento.

**Tabla 8.** Proyección de crecimiento poblacional del municipio de Motozintla periodo, 2005 – 2030 (CONAPO, 2006).

AÑO	TOTAL	HOMBRES	MUJERES
2005	59 404	29 293	30 111
2006	58 773	28 912	29 861
2007	58 314	28 616	29 698
2008	57 831	28 310	29 521
2009	57 328	27 997	29 331
2010	56 806	27 676	29 130
2011	56 268	27 349	28 919
2012	55 715	27 016	28 699
2013	55 149	26 679	28 470
2014	54 569	26 337	28 232
2015	53 980	25 993	27 987
2016	53 382	25 647	27 735
2017	52 775	25 298	27 477
2018	52 158	24 947	27 211
2019	51 533	24 594	26 939
2020	50 900	24 240	26 660
2021	50 260	23 884	26 376
2022	49 612	23 527	26 085
2023	48 956	23 169	25 787
2024	48 291	22 808	25 483
2025	47 618	22 445	25 173
2026	46 938	22 080	24 858
2027	46 252	21 715	24 537
2028	45 559	21 349	24 210
2029	44 859	20 980	23 879
2030	44 154	20 611	23 543

Actualmente la proyección poblacional proporcionada por la SEDESOL (2018) para Motozintla tiende a incrementar, como se observa en la tabla 9. Si comparamos sus proyecciones con el conteo de 2015 que obtiene un total de 72 967 habitantes, se está por debajo de lo estimado.

El incremento de población puede deberse a que la región continua en actividades de comercio, apoyada por su cercanía a la frontera con Guatemala. En la ciudad pueden observarse la constante presencia de vehículos de carga con material de construcción y alimentos, también hay un creciente auge en la construcción de bodegas sobre el cauce del río Xelajú, siendo evidente que no existe un proyecto de planeación territorial y si existiera, este no presenta seguimiento o simplemente no se implementa.

**Tabla 9.** Proyecciones de población por Cabecera Municipal y el resto del Municipio.  
(SEDESOL, 2018)

AÑO	TOTAL	CABECERA MUNICIPAL	RESTO DEL MUNICIPIO
2010	70 585	24 259	46 326
2011	72 213	25 391	46 822
2012	73 603	26 468	47 134
2013	74 870	27 528	47 341
2014	76 044	28 579	47 465
2015	77 149	29 627	47 521
2016	78 204	30 678	47 524
2017	79 220	31 737	47 483
2018	80 210	32 805	47 404
2019	81 181	33 885	47 294
2020	82 138	34 980	47 157
2021	83 086	36 090	46 994
2022	84 029	37 217	46 811
2023	84 967	38 360	46 606
2024	85 900	39 519	46 380
2025	86 827	40 693	46 133
2026	87 744	41 879	45 864
2027	88 651	43 077	45 573
2028	89 545	44 284	45 260
2029	90 426	45 500	44 924
2030	91 286	46 721	44 565

Aunque la zona es un centro comercial en la región la población solo ha alcanzado 72 967 habitantes, por lo que se cree que debido a los continuos eventos hidrometeorológicos registrados en la zona durante el 2010, la población retomo la migración a lugares más seguros.

## **4.2 ESTRUCTURA TERRITORIAL**

El espacio geográfico se desarrolla en la medida que se organiza y reorganiza una población, con base en sus intereses a largo y corto plazo, así como en la inestabilidad generada por la fuerza de modernización impuesta por agentes internos o externos a ese espacio. Motozintla se encuentra dividida en barrios como unidades de control, aunque para un control federal, se divide en áreas geoestadísticas básicas (AGEB).

### **4.2.1 Barrios**

La ciudad de Motozintla se encuentra conformada por 42 asentamientos humanos, de los cuales 36 están catalogados por el INEGI como “barrios”, 4 como fraccionamientos y 2 como colonias (Fig. 16). En los años posteriores a los desastres de 1998 y 2005 se aprecia un incremento en los asentamientos humanos al noreste de la ciudad, los cuales no aparecen aun en el censo de 2010 ya que muchos de ellos se han intensificado posterior a este año.

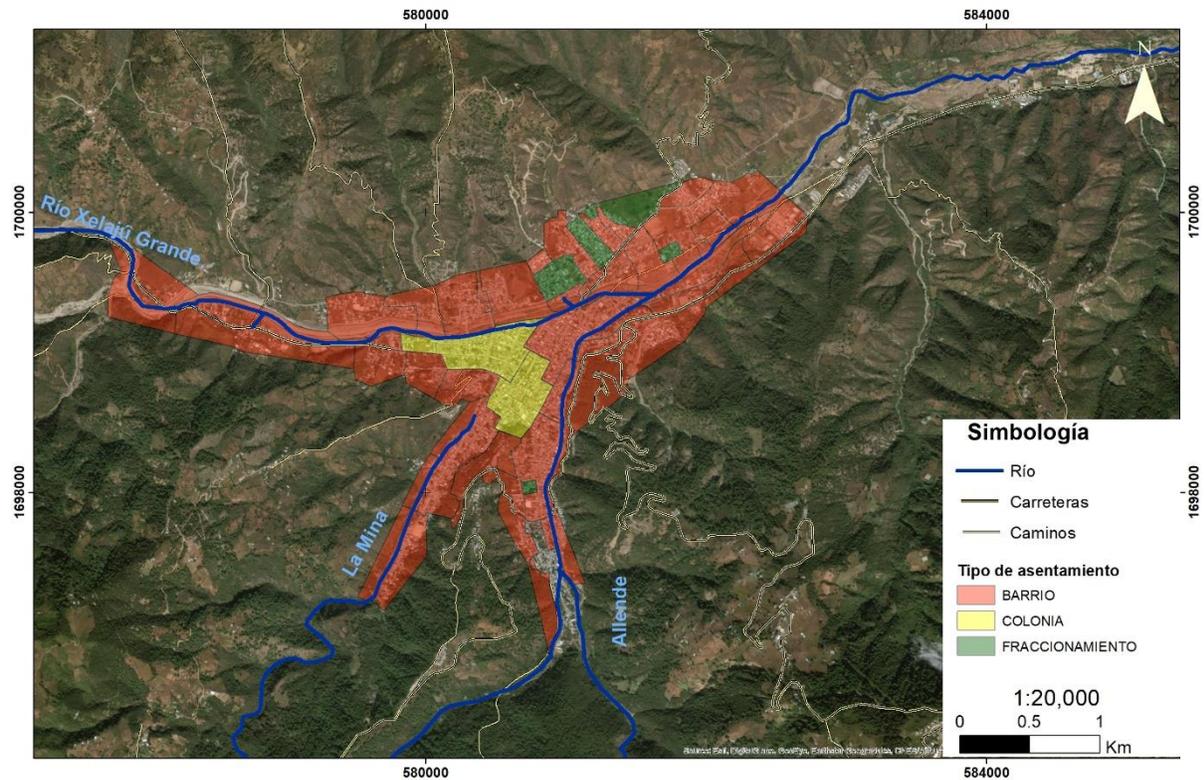


Figura 16. Asentamientos humanos en Motozintla de acuerdo al censo del 2010 (INEGI, 2017).

Algunos de estos barrios aumentaron su población posteriormente a raíz de los desastres ocurridos en 1998 y 2005, entre ellos se encuentran las ampliaciones en barrio El edén, donde fueron construidas la colonia *Nuevo Milenio III* y el fraccionamiento *Vida Mejor III* para las familias reubicadas de los Barrios El pedregal, Nuevo Milenio, Framboyan y Los pinos (Carballido, 2008). Como se observa en la figura 17, estas zonas se encuentran al norte en los márgenes del río Xelajú en la zona de piedemonte o sobre depósitos de abanicos. Algunas de las familias que recibieron apoyo para reubicación prefirieron comprar terrenos en zonas más altas o fuera de la cuenca por temor a un futuro desastre, esto generó una migración intra e intermunicipal descontrolada en la que solo se reubicó sin considerar futuros peligros de los nuevos asentamientos.

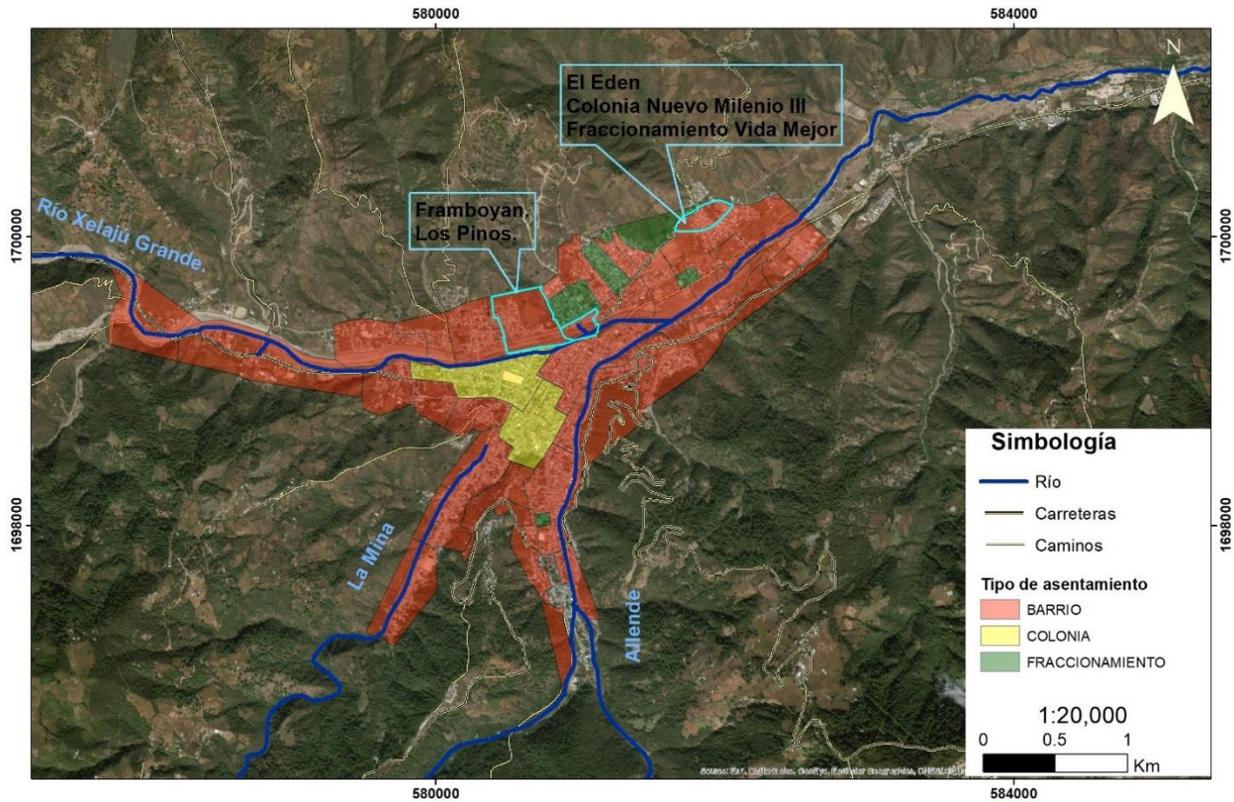


Figura 17. Colonias Reubicadas a partir de los desastres de 1998 y 2005 (INEGI, 2010).

#### 4.2.2 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB)

De acuerdo con el INEGI (2017) la AGEB es la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales, y dependiendo de sus características se clasifican en rurales o urbanas.

Una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso de suelo es principalmente habitación, industrial, de servicios o comercial, por lo que son asignadas al interior de las localidades urbanas (INEGI, 2017)

La ciudad de Motozintla se encuentra dividida en 15 AGEB's, la información de estas áreas permite realizar un análisis espacial con mayor detalle, en la figura 18 se muestra la división de las AGEB's generada por el INEGI en 2010, podemos observar que se encuentra rebasada por la mancha urbana la cual ha crecido río abajo en la zona Noreste.

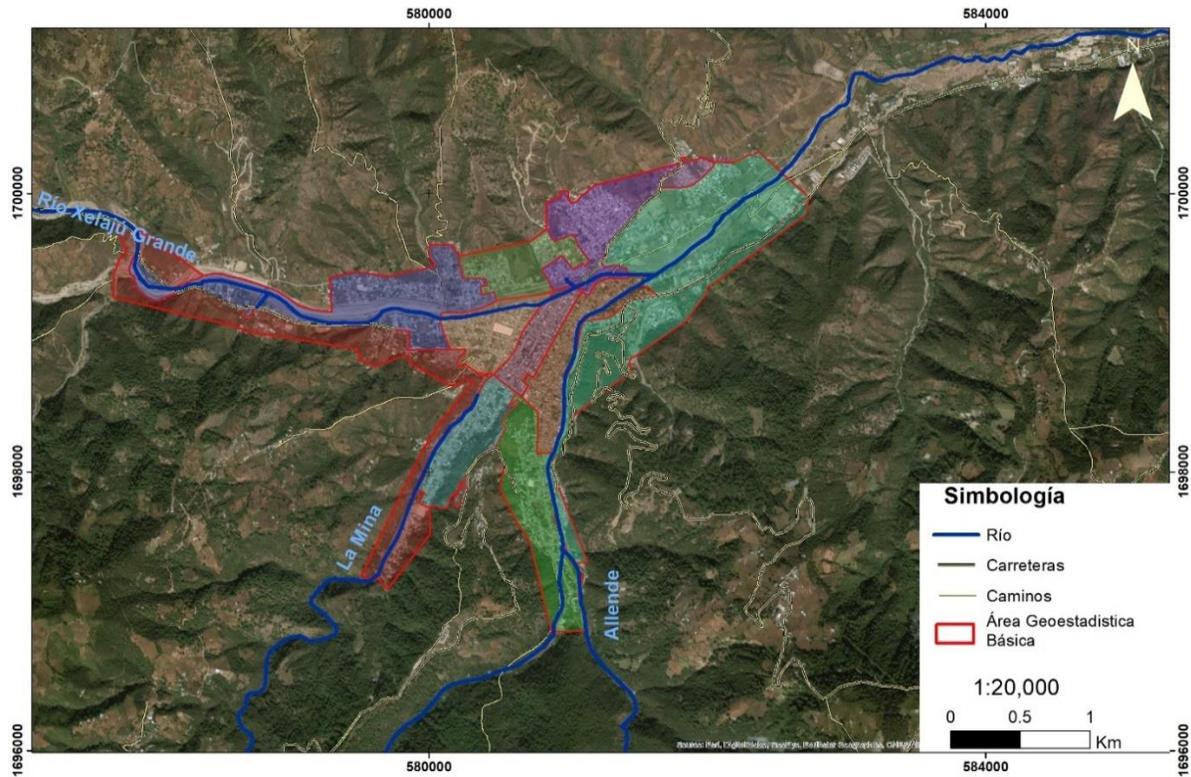


Figura 18. Cubierta AGEB's Motozintla (INEGI, 2017).

Hemos limitado las zona donde se reúne la mayor cantidad de la población existente para el censo de 2010, y se observa que existe una mayor densidad de población por hectárea en la zona centro, la cual se encuentra en la convergencia de la corrientes de los 3 ríos principales y que es la zona de mayor amplitud de los depósitos de flujos, básicamente está asentada sobre los sedimentos que conforman la conjunción de los abanicos aluviales de los ríos (Fig. 19). Comparada con los datos del año 2000, existe una zona que ha decaído en cuanto a población, se encuentra al norte de la zona centro, cruzando el rio Xelajú (Fig. 20) y corresponde a los barrios afectados por los eventos de 1998 durante la tormenta tropical Javier, sin embargo las zonas periféricas a esta aumentaron su densidad de población al replegarse los asentamientos a las zonas más altas.

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA, CHIAPAS, MÉXICO.

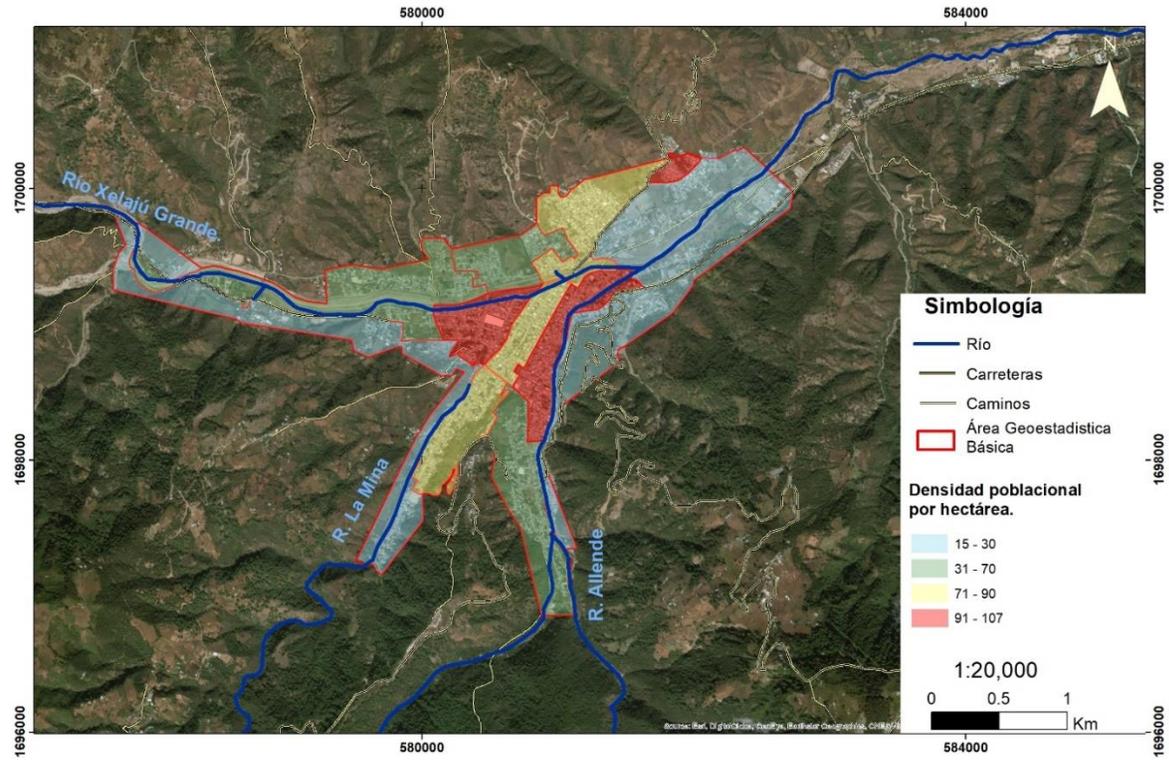


Figura 19. Densidad de población por hectárea delimitada por las AGEB's Motozintla resultado del censo de INEGI en el año 2010 (INEGI, 2017).

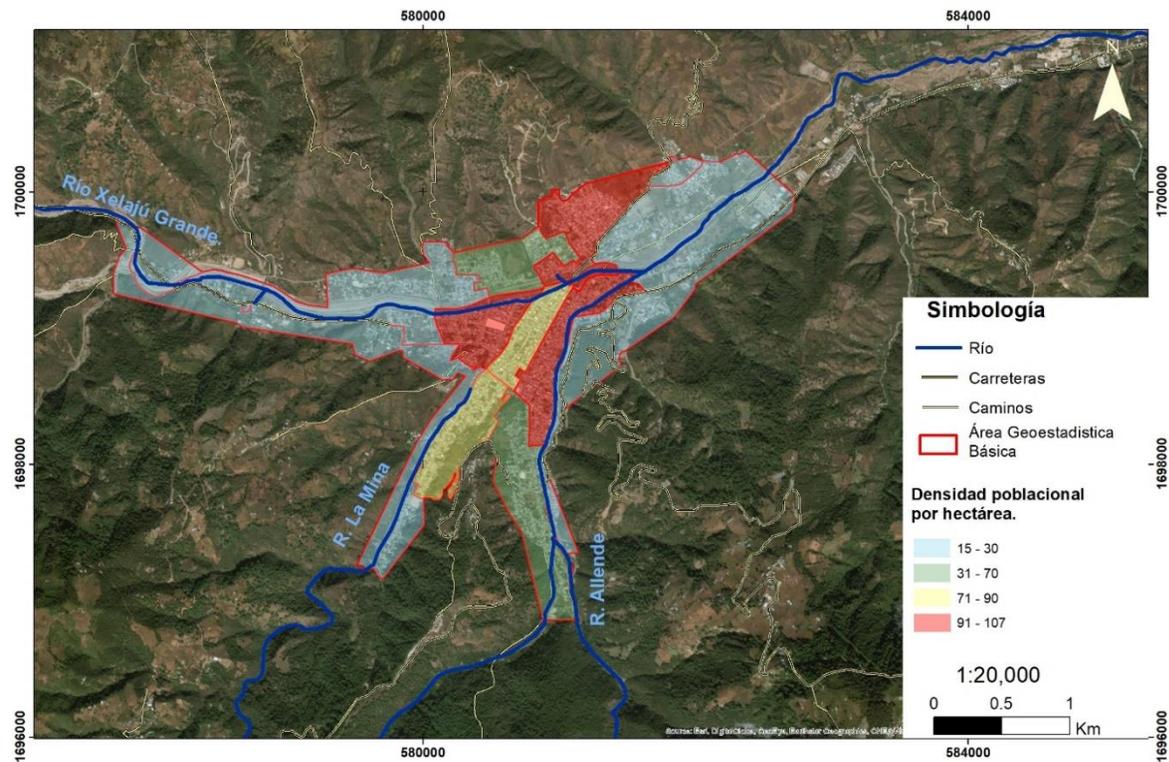


Figura 20. Densidad de población por hectárea delimitada por las AGEB's Motozintla, resultado del censo de INEGI en el año 2000. (INEGI, 2017)

### **4.3 VULNERABILIDAD EN MOTOZINTLA.**

La vulnerabilidad puede asumirse desde la perspectiva de un carácter técnico y de un carácter social. El carácter técnico puede ser cuantificado con facilidad asignando números a los daños, a diferencia del social que solo puede valorarse cualitativamente y de forma relativa debido a que se relaciona con aspectos económicos, educativos, culturales e ideológicos (Lavell, 1993). Para este apartado la vulnerabilidad será tomada desde el punto de vista técnico, analizando las condiciones de la población que los ponen en desventajas ante un riesgo, siendo la vulnerabilidad estructural y la vulnerabilidad socioeconómica las que analizaremos.

#### **4.3.1 Vulnerabilidad técnica**

La vulnerabilidad técnica se refiere a la falta de inadecuadas técnicas en la construcción de casas, edificios e infraestructura básica (Lavell, 1993), es por ello que hacemos este análisis a partir de los datos del anuario estadístico de 2017 publicado por el INEGI (2017) a nivel municipal. El municipio de Motozintla presenta en más del 60 % casas con paredes construidas con materiales rígidos como son piedra, cemento, tabiques, block o ladrillos, que pueden resistir mayores embates de los eventos naturales, pero existe una fragilidad en los techos ya que más del 70 % son de lámina de asbesto, metálicas o coberturas con palma, este se traduce como mayor debilidad ante corriente de viento a alta velocidad o a soportar pesos muy grandes, el 80 % las casas poseen pisos de cemento (Tabla 10).

**Tabla 10.** Porcentaje de materiales de las viviendas en el Municipio de Motozintla, obtenido a partir del anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017 (INEGI, 2017)

<i>Materiales de vivienda (porcentajes)</i>							
<i>Ubicación</i>	Total de viviendas	Tierra	Material de desecho o lámina de cartón	Embarro o bajareque, lámina de asbesto o metálica, carrizo, bambú o palma.	Madera o adobe	Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	Material no especificado
<i>Paredes</i>	<b>15169</b>		<b>0.03</b>	<b>2.8</b>	<b>29.14</b>	<b>67.68</b>	<b>0.35</b>
<i>Techo</i>	<b>15169</b>		<b>0.83</b>	<b>76.23</b>	<b>1.86</b>	<b>20.69</b>	<b>0.39</b>
<i>Piso</i>	<b>15169</b>	<b>9.88</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6.32</b>	<b>83.45</b>	<b>0.35</b>

Aunque los materiales de las casas de la mayoría de las familias en Motozintla son básicos para una construcción de mediana calidad, no está evaluada la calidad del diseño estructural de estas construcciones, por lo que su vulnerabilidad seguramente aumentara.

#### 4.3.2 Vulnerabilidad socioeconómica

De acuerdo con Lavell (1993), existe una relación inversa entre ingresos per cápita a nivel nacional, regional, local o poblacional y el impacto de los fenómenos físicos extremos. Es decir que la pobreza y marginación aumenta el riesgo de desastres, esto no quiere decir que la pobreza de una familia sea la única causa, sino también la falta de adecuados presupuesto públicos y la falta de capacidad de gestión de los gobiernos para impulsar inversión en sus regiones.

El municipio de Motozintla, se encuentra clasificado dentro de grado de marginación medio a muy alto de acuerdo a la SEDESOL (2018). Los sectores con mayor actividad económica en el municipio son agricultura y ganadería en un 48 %, seguido por la prestación de servicios que comprende el transporte, trabajo en instituciones de gobierno y otros más (Tabla 11). Los números ponen de manifiesto que es un municipio en estado de pobreza, el cual ante desastres naturales es complicado que pueda recuperarse sin apoyo de la federación.

**Tabla 11.** Población empleada por sector en el Municipio de Motozintla, obtenido del anuario estadístico y geográfico de Chiapas 2017 (INEGI, 2017)

**POBLACIÓN EMPLEADA POR SECTOR DE ACTIVIDAD ECONÓMICA  
(PORCENTAJE)**

<b>TOTAL</b>	Primario (a)*	Secundario (b)**	Comercio	Servicios (c)***	No especificado
<b>18 004</b>	<b>48.01</b>	11.98	13.16	25.47	1.38

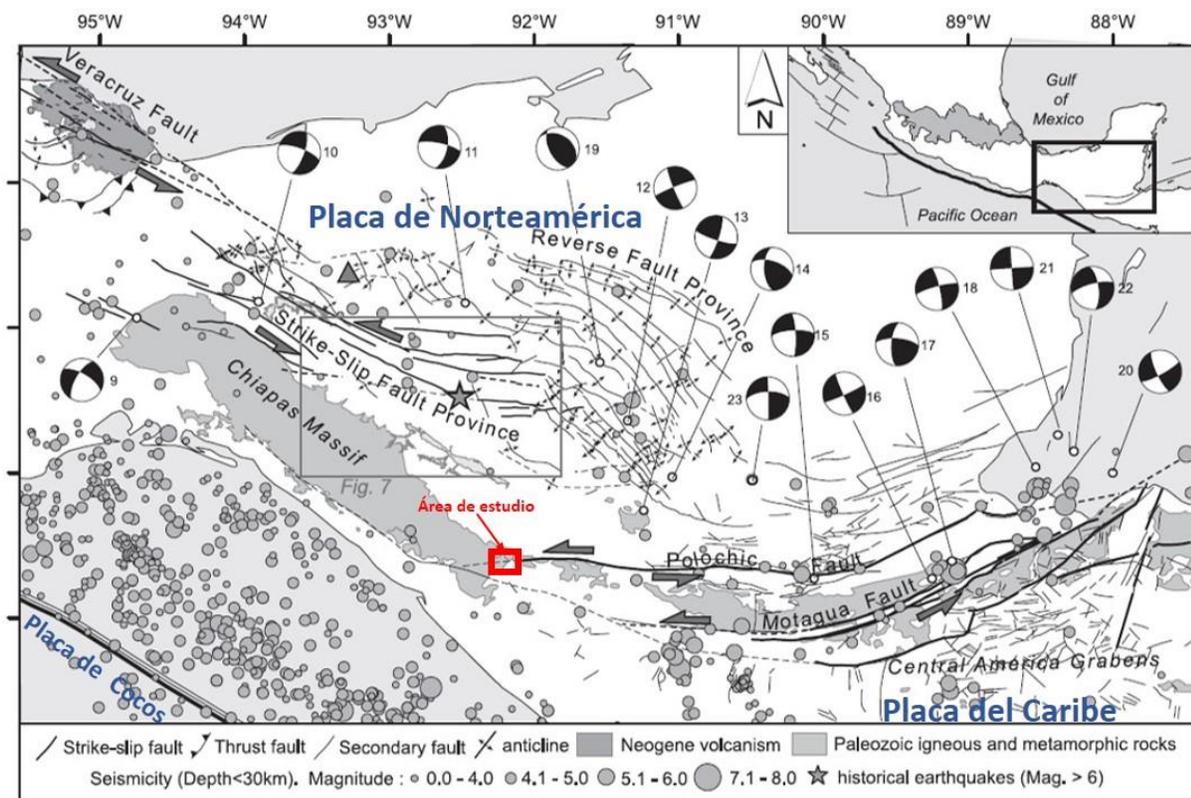
\*(a) Comprende: agricultura, ganadería, silvicultura, pesca y caza. \*\* (b) Comprende: minería, extracción de petróleo y gas, industria manufacturera, electricidad, agua y construcción. \*\*\* (c) Comprende transporte, gobierno y otros servicios.

La mayor parte de la población cuenta con un ingreso mensual entre 1 y 2 salarios mínimos el cual se encuentra estipulado por la federación en 2220.40 pesos, con estos ingresos las familias solo sobreviven y no tienen acceso a mejores condiciones de vida, por lo que la brecha económica dentro del municipio es grande. Siendo la ciudad de Motozintla el polo de urbanización del municipio y la región, concentra a la población con ingresos más altos de este, siendo los funcionarios, directores y profesionistas quienes cuentan con estos, los cuales rondan entre 3 y 5 salarios mínimos mensuales.

## 5 MARCO TECTÓNICO -GEOLÓGICO

### 5.1 TECTÓNICA

El poblado de Motozintla se encuentra geográficamente cercano al plano de desplazamiento de la Falla Polochic (Fig. 21), esta estructura forma parte de un sistema de fallas activas continentales de grandes dimensiones denominado “Sistema de Fallas Polochic – Motagua” (SFPM). El sistema tiene su origen debido a la interacción de los límites de tres Placas tectónicas que interactúan en la región (Placa del Caribe, Placa de Norteamérica y Placa de Cocos). El punto de interacción de estas placas da origen a la región conocida como “ la triple unión Caribe-Norteamérica-Cocos” (Authemayou et al., 2011; Lyon-Caen et al., 2006) o la unión Triple de Tehuantepec (Espindola, 1996; Sánchez Núñez, 2012).



**Figura 21.** Mapa tectónico Regional de sur de México, donde se observan, la interacción de las placas tectónicas de Norteamérica, el Caribe y Cocos, así como su incidencia en el relieve. Tomada y modificada de Andreani et al., 2008.

El sistema de Fallas Motagua –Polochic (Fig. 21) está definido como un sistema de fallas de transformación sinistral (movimiento izquierdo) con dirección E-W entre las placas de Norteamérica y el Caribe. Es observable en el continente en al menos 400 Km que recorren desde el Este en la costa de Guatemala con el Mar Caribe, para posteriormente entrar a México por el estado de Chiapas y terminar en el Océano Pacífico al Oeste. En el lecho marino se proyecta en aproximadamente 2000 km hasta la trinchera de subducción de Puerto Rico (Lyon-Caen et al., 2006) El desplazamiento de la placa Norteamericana con respecto a la del Caribe se ha estimado cerca de los 1110 Km (Authemayou et al., 2011). Y el desplazamiento en el margen de la falla Polochic ha sido estimado en 100 y 130 Km (Authemayou et al., 2011, Ratschbacher et al., 2009, Burkart, 1983). Bajo estas dos placas se encuentra subducida la placa de Cocos, que inflige una fuerza al NE en el punto triple, generando una zona de compresión identificada al Norte del SFPM por fallas con dirección NW-SE (Authemayou et al., 2011; Sánchez Núñez, 2012). La región del área de estudio al desarrollarse en un marco tectónico complejo, con zonas de subducción de placa, esfuerzos transtensivos y distensivos que la someten a un estrés tectónico, conjugado con magmatismo y vulcanismo activo que favorecen el modelado del relieve con una dinámica exógena de alta energía cinética (Camacho, 2015) propicia que se generen factores condicionantes y detonantes sobre la superficie, induciendo la aparición de diversos peligros en la región, entre ellos fuertes sismos e inestabilidad de los terrenos.

## 5.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

En Chiapas el SFPM pone en contacto 2 regiones geológicas muy diferentes, en las regiones del norte se aprecia rocas del Paleozoico conformadas por el batolito de la Sierra madre de Chiapas y su cubierta sedimentaria del Mesozoico, mientras en las regiones del sur, se aprecian rocas con alto grado de metamorfismo y sedimentos del mesozoico en conjunción con un complejo volcánico-plutónico epimetamórfico (Carfantán, 1977)

La geología del área de estudio ha sido retomada y actualizada por Sánchez Núñez en 2012 (Fig. 22) quien identifica nueve unidades estratigráficas las cuales caen en desacuerdo con las de Carfantán (1977) debido al objetivo de la cartografía. Sánchez Núñez (2012) basa su cartografía en la roca origen (protolito) de la zona metamórfica, lo cual nos muestra la

dimensión del protolito dentro de la cuenca y Carfantan cartografía las rocas actuales originadas por el metamorfismo. Con base en estos dos autores se generó un mapa geológico que delimite la roca con base en sus características mineralógicas, ya que la modificación de la roca original ha producido zona de debilidad para la ocurrencia de PRM (Fig. 23). Sin embargo la base geológica se encuentra en la desarrollada por Sánchez Núñez (2012), el mapa generado servirá para evaluar la ocurrencia de PRM con base en la alteración o deformación del protolito.

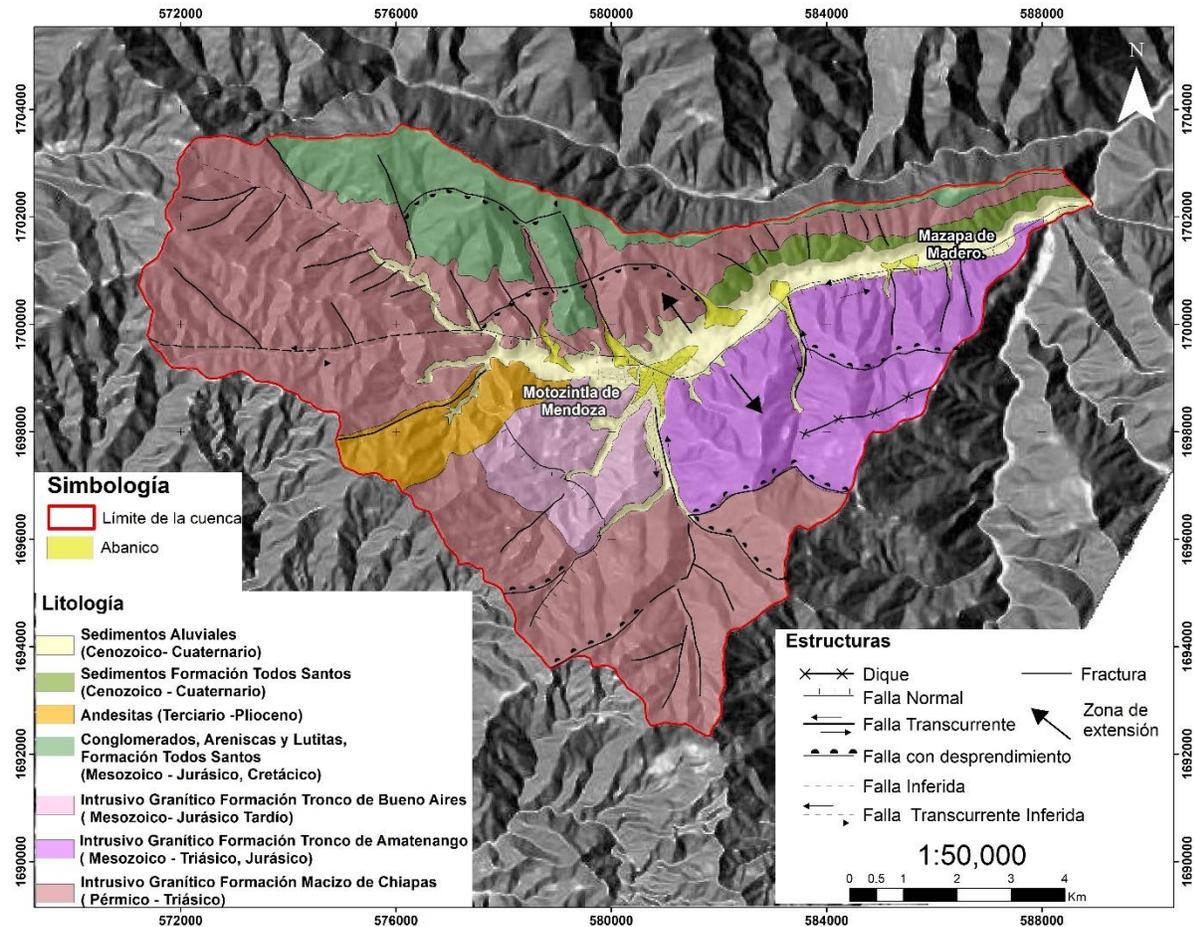


Figura 22. Mapa geológico de la cuenca de Motozintla desarrollado por Sánchez Núñez (2012).

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA, CHIAPAS, MÉXICO.

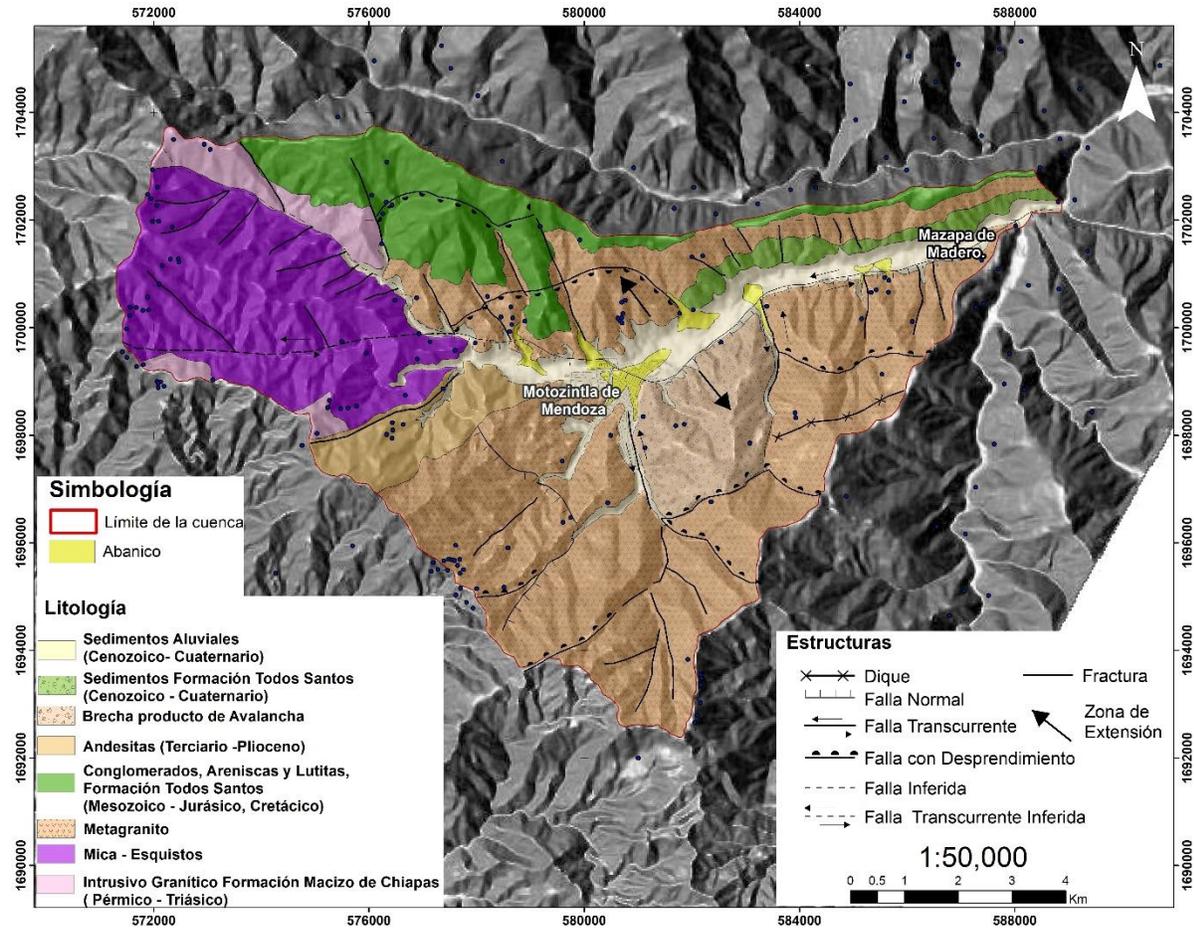


Figura 23. Mapa geológico de la cuenca de Motozintla modificado de Sánchez Núñez (2012) y Carfantan (1977) con cartografía de campo.

### 5.2.1 Basamento

Es la roca más antigua y está clasificada como un metamórfico precámbrico (con posible protolito granítico), el cual fue intrusionado por cuerpos graníticos (Batolito de Chiapas), formando el complejo basal de metamorfismo regional constituido por gneis de biotita, anfibolitas y esquistos de biotita y moscovita. (Carfantan, 1977; Schaaf et al., 2002; Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015). De acuerdo con los trabajos descriptivos de Sánchez Núñez (2012) los esquistos presentan bandas de horblenda, andesina, cuarzo, sericita y epidota, lo cual corresponde con su asociación mineralógica observada en lámina delgada, determinando que pertenece a un esquisto de horblenda. El gneiss de anfibolita se compone principalmente de

oligoclasa, horblenda, cuarzo, esfena, sericita y calcita. Las anfibolitas presentan un contenido de cuarzo, ferromagnesianos y pirita, teniendo como mineral accesorio la horblenda, apatita y zircón.

El espesor es desconocido, ya que los afloramientos son escasos y han sido fuertemente erosionados. Se pueden encontrar algunos afloramientos en la zona norte – noreste de la cuenca, distribuidos de manera errática en el macizo de Chiapas (Sánchez Núñez, 2012) algunos más a lo largo del río Motozintla o fragmentos depositados en las llanuras de inundación (Camacho, 2015).

### 5.2.2 Macizo de Chiapas (Batolito de Chiapas)

Constituye el mayor cuerpo intrusivo de Chiapas y uno de los mayores de México, presenta una longitud de 250 km por 35 km de ancho, por lo que se considera un batolito. Este ha sido el cuerpo que ha intrusionado al complejo basal metamórfico y se distribuye en dirección NW-SE, constituyendo la Sierra madre de Chiapas . En la zona de Motozintla se observa como un granito rosado claro y color crema, que es cortado por diques de composición andesítica (Fig. 24). Se compone de biotita color rosa, feldespatos potásicos, cuarzo, pirita y ferromagnesianos, en algunas zonas se observa deformado, alterado y metamorfozido. (Carfanta, 1977; Schaaf et al., 2002; Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015.)



**Figura 24.** Diques de andesita que intrusionan al macizo de Chiapas.

Mediante metodos radiométricos K--Ar, el cuerpo ha sido datado por diferentes autores, situándolo en edades entre 220 – 290 Ma y 165 – 154 Ma, definiendo de esta manera al menos dos eventos magmáticos importantes (Sanchez-Núñez, 2012; Camacho, 2015). Damon et al. (1981) obtuvo edades entre 290 – 271 Ma, mientras Mugica-Mondragón (1987) lo situó en 271 – 222 Ma. y 161-154 Ma. En 2002 Schaaf ocupo dataciones de Rb-Sr obteniendo edades de 244 – 214 Ma. Esto ubica al macizo de Chiapas en periodos del Pérmico Tardío- Triásico Medio y el evento más reciente entre finales del Jurásico Medio e Inicios del Jurásico Superior (Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015).

### **5.2.3 Tronco de Amatenango de la Frontera**

Se observa como un plutón leucogranítico, de textura porfídica, color rosa con fenocristales de feldespatos de 1 a 2 cm de longitud; una matriz cristalina compuesta por feldespato, cuarzo y cristales de ferromagnesianos, cloritizado. Se encuentra deformado por esfuerzos tectónicos generando un “Auge- esquisto” que cambia de color rosa a verde, el efecto de los esfuerzos producto del tectonismo se aprecia al microscopio en la deformación de los minerales (Sánchez Núñez, 2012). Se le ha estimado una edad de 198 Ma. (Mugica-Mondragón, 1987; Sánchez Núñez, 2012) que lo ubica en a inicios del Jurásico Inferior.

### **5.2.4 Tronco de Buenos Aires**

Cuerpo Leucogranítico de color blanco compuesto por moscovita, en zonas de alteración se observan tonalidades verdosas, debido a las micas que se alteran a clorita. Esta unidad se presenta deformado producto del tectonismo de la región, por lo que se pueden observar con cristales de feldespatos, cuarzo y moscovita orientados, y en las zonas de cizalla se observan aporcelanado y quebradizo. Existen dataciones por K-Ar que lo sitúan en  $154 \pm 12$  Ma (Mugica-Mondragón, 1987; Sánchez Núñez, 2012) a mediados del Jurásico Superior.

Presentan intemperismo significativo y las capas de suelo que forman, no pasan de los 40 cm, por lo que son fácilmente erosionables durante las temporadas de lluvias, incrementando la probabilidad en las zonas de pendiente (Sánchez Núñez, 2012).

### **5.2.5 Formación Todos Santos**

Conocida como “Lechos Rojos”, consiste en una serie de conglomerados, areniscas de grano fino a grueso y limolitas, todo producto del aporte continental. En la zona de estudio este se encuentra principalmente en la zona norte y se les asigna una edad que va del Jurásico Tardío al Cretácico Temprano, siendo las rocas más antiguas del Mesozoico que afloran en Chiapas. (Blair, 1981; Sánchez Núñez, 2012). Es correlacionable con las rocas continentales clásticas de la Serie Metapán en el Salvador y la Formación Salina, que consiste en una secuencia de capas rojas y evaporitas en el sureste de México. En Motozintla se puede observar en discordancia sobre el macizo granítico y sobreyacida por la formación Sierra Madre (Carfantan, 1977; Sánchez Núñez, 2012)

### **5.2.6 Formación Sierra Madre**

Formación constituida por una secuencia de sedimentos marinos, la cual se puede dividir en dos miembros de tipo calcáreo; el inferior, constituido por dolomías que varían en su espesor entre 7 a 10 cm y el superior que lo constituyen calizas con espesores entre 5 y 20 cm, estimando el espesor de la formación en 1900 m (García –Palomo et al, 1987; Salazar, 2008; Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015). Esta formación tiene asignada una edad Albiano-Cenomaniano y cubre de manera discordante a la formación todos Santos (Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015).

### **5.2.7 Andesitas, Brechas y Tobas**

Andesitas masivas de textura porfídica, presenta coloración gris claro a verde oscuro, compuesta por fenocristales de horblenda, plagioclasa y piroxeno, con bajo grado de fracturamiento. Sobreyaciendo a estas se presentan flujos piroclásticos color gris claro, masivos

y constituidos por fragmentos de andesita, feldespato alterado y minerales arcillosos (Sánchez Núñez, 2012). El conjunto de estos constituye una unidad litológica a la que Mérida (1976) asignó una edad del Mioceno y Moreno (1977) lo ubica en Plio - Cuaternario. Por su parte Carfantán (1977) hace mención de la existencia de metandesitas y metatobas así como batolito granodiorítico y diorítico de edad Mioceno-Tardío.

### **5.2.8 Flujo Piroclástico Los Chocoyos**

Consiste en depósitos de cenizas con líticos de granito, esquistos y mayormente de pómez. Se localizan en las partes altas de la sierra en el extremo Este, rellenando depresiones y con espesores de 0.70 m hasta 10 m. La edad estimada es de 84 000 años y se encuentra discordante con el Macizo de Chiapas. Estos depósitos son producto de las emisiones de la caldera de Atitlán en Guatemala, los depósitos pueden localizarse en el camino de Motozintla a Amantengo de la Frontera (Salazar, 2008; Sánchez Núñez, 2012).

### **5.2.9 Depósito de caída, volcán Santa María**

Compuesto por cenizas, pómez, vidrio y fragmentos de líticos, este depósito cubre a todas las unidades litológicas descritas anteriormente. Se asocia con una erupción de tipo Pliniana del Volcán Santa María en Guatemala durante 1902, y cubre una amplia extensión, distribuida desde Guatemala hasta México y que se cree llegó hasta la ciudad de Oaxaca (Sánchez Núñez, 2012; Camacho, 2015).

## 6 ANÁLISIS DE LA CUENCA

---

Una cuenca es la unidad geomorfológica fundamental y es definida topográficamente e hidrológicamente, ya que comprende toda el área que proporciona la escorrentía superficial, siendo el resultado de las interacciones de los flujos de materia y energía sobre la superficie del terreno existente, el cual modifican de manera precisa.

### 6.1 PARÁMETROS DE FORMA

#### 6.1.1 Forma y tamaño de la cuenca

Dependiendo de la ubicación, tamaño y forma de una cuenca, la escorrentía influye en ella, esto se ve reflejado en la producción de sedimentos, ya que a mayor tamaño mayor aporte y mayor descarga. Aunque el aporte de sedimentos puede ser puntual en zonas pequeñas debido a diversos factores, la conjunción de todos los aportes en un área mayor aumenta la influencia de fuentes puntuales (Martínez-Ramírez, Steinich, & Tuxpan, 2017; Quijano C, 2014).

La metodología propuesta por Horton (1945), determina la forma (Tabla 12) de la cuenca en función de su área y de la longitud máxima de ella mediante la fórmula:

$$F = \frac{A}{L^2}$$

Donde;

F = Forma

A = Área de la cuenca

L<sup>2</sup>= Longitud máxima de la cuenca

**Tabla 12.** Relación de forma Horton (Strahler, 1957)

<i>Rango de Valores</i>	<i>Forma de la cuenca</i>
< 0.22	Muy alargada
0.22 - 0.30	Alargada
0.30 - 0.37	Ligeramente alargada
0.37 - 0.45	Ni alarga ni ensanchada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80- 1.12	Muy ensanchada
> 1.2	Rodeando el desagüe

Fuente: Modificada de (Chester et al., 2017)

Ya que la cuenca de Motozintla posee un área de 99.09 km<sup>2</sup> y su longitud máxima es de 17.63 km, tenemos un factor de forma de;

$$F= 99.09 \text{ Km}^2 / (17.63 \text{ km})^2$$

$$F= 99.09 \text{ Km}^2 / 310.8169 \text{ km}^2$$

$$F= 0.3188$$

Este se encuentra alejado de la unidad (1), por lo que puede clasificarse como una cuenca ligeramente alargada, con un cause colector de mayor longitud que los tributarios el cual capta la mayor parte de los afluentes guiando los flujos de agua en una misma dirección a través de una mayor longitud, retardando las crecidas y desfogando constantemente. Sin embargo por su forma triangular, posee dos afluentes en la cabecera, ambos de similar magnitud y sincronismo en la llegada, por lo que ocurrirán crecidas significativas. El tamaño de la cuenca de acuerdo a la clasificación de Campos (1992), se encuentra dentro del orden de una cuenca pequeña ya que no sobrepasa en área los 250 km<sup>2</sup>.

### 6.1.2 Coeficiente de compacidad (Kc) o índice de Gravelius

El Kc es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca (tabla 13), ya que la forma de un círculo se toma como una cuenca ideal, con sus tributarios dispuestos radialmente desembocando en el punto central. La configuración geométrica de una cuenca, tiene influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de la precipitación (Chester et al., 2017; Ibisate G, 2004; Viramontes-Olivas et al., 2007).

**Tabla 13.** Tabla del índice de compacidad de Gravelius

<i>Índice Kc</i>	<i>Descripción</i>
1 – 1.25	Redonda – Ovalo redonda
1.25 – 1.5	Ovalo redonda- Ovalo oblonga
1.5 – 1.75	Ovalo oblonga – Rectangular oblonga
> 1.75	Rectangular oblonga – Muy lobulada

Fuente: Modificada de (Chester et al., 2017)

El Kc es calculado mediante la fórmula;

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

$$Kc = \frac{(0.282)P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P= Perímetro de la cuenca

A= Área de la cuenca

Por lo que para la cuenca de Motozintla el valor de  $K_c$  es:

$$K_c = \frac{51.28 \text{ km}}{2\sqrt{3.1416(99.09 \text{ km}^2)}}$$

$$K_c = 1.45$$

El valor de  $K_c = 1.45$  define a la cuenca de Motozintla como oval redonda a oval oblonga, es decir que presentan una peligrosidad media en cuanto a las crecidas que se generan, debido a que cuando el  $K_c$  tiende a 1, las áreas comprendidas entre las divisorias con respecto al punto central no presentan afluentes mayores, por lo que el tiempo de concentración será más rápido y los flujos en las crecidas podrían ser continuos.

## 6.2 PARÁMETROS DE RELIEVE

### 6.2.1 Hipsometría

La hipsometría es definida como el análisis de la medición entre la elevación de la superficie y el nivel del mar (Martínez-Ramírez et al., 2017). El mapa hipsométrico, representa de manera simple, clara y concisa el comportamiento de la topografía del área, a pesar de su simplicidad juega un papel crucial en el análisis del terreno, principalmente el de una cuenca. Con este mapa deben iniciar los estudios morfométricos del terreno, ya que consiste en definir dentro de un área la altura máxima y mínima de esta, la diferencia de altitud se muestra gradual al dividir el rango de elevación en intervalos suficientes que permitan apreciar la evolución del relieve partiendo del punto más bajo hacia el más alto (Lugo, 1988).

Motozintla se encuentra dentro de un sistema Montañoso, por lo que el mapa hipsométrico (Fig. 25), permite apreciar de manera clara las zonas más altas que funcionan como parteaguas y delimitan perfectamente la cuenca. La zona posee una altitud mínima en la desembocadura de la cuenca de 1025 msnm y alcanza una altitud máxima de 2607 msnm, con una diferencia de elevación de 1582 m a lo largo de 17.25 km en línea recta del punto más bajo al más alto.

Para apreciar el comportamiento de la altitud se utilizó una paleta de colores que tiende de tonos fríos en las zonas más bajas y tonos cálidos a las más altas con una clasificación de 16 intervalos que abarcan 100 metros de elevación entre ellos. Las tonalidades azules muestran los primeros 300 metros de elevación remarcando la zona de planicies aluviales que son coronadas en sus extremos por depósitos de abanicos aluviales; en estas zonas bajas se encuentra asentado la zona urbana de Motozintla. En tonalidades que van de color fiusha al blanco se observan las zonas que tienden a la mayor elevación de la cuenca. Al noroeste, en blanco, se observa el punto más alto de ella dividiendo los dos afluentes que alimentan el río Xelajú.

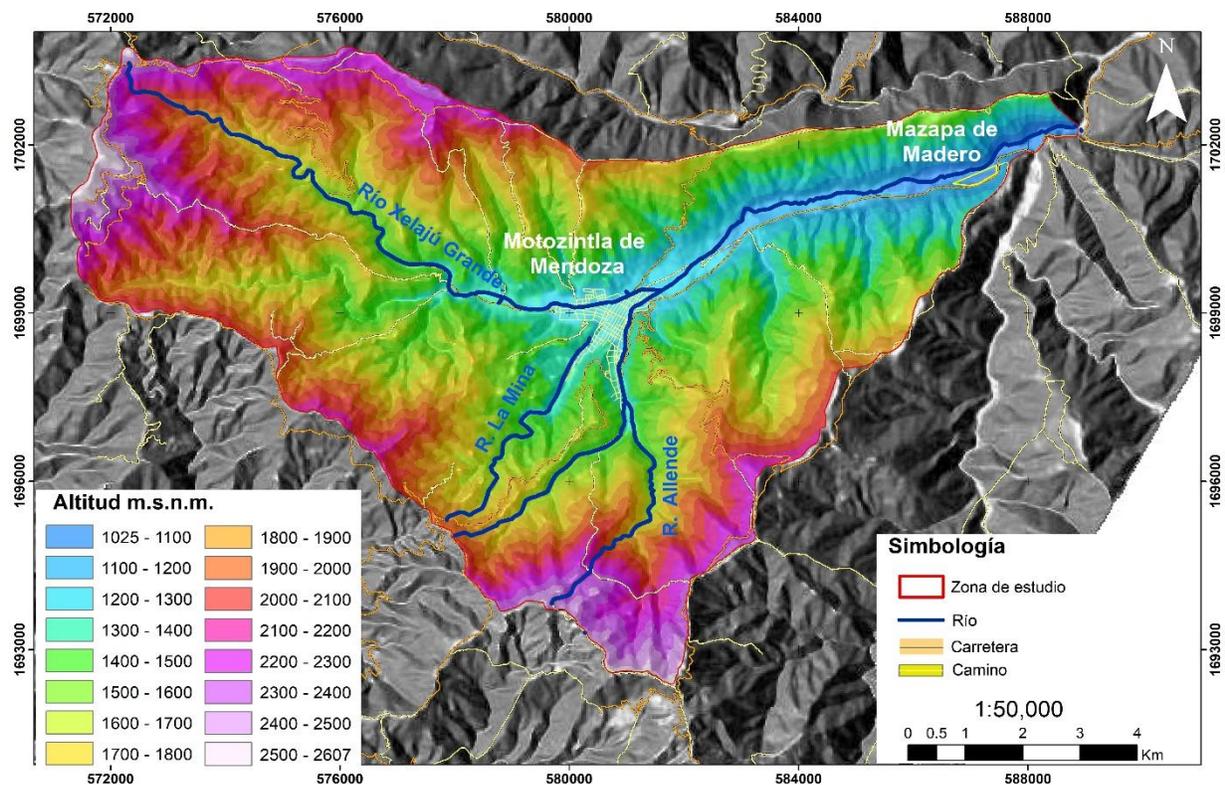


Figura 25. Mapa hipsométrico de la cuenca de Motozintla.

De acuerdo con la tabla 14, se observa un área homogénea entre las cotas 1500 a 1800, ya que por cada 100 m en la vertical se cubre en la cuenca un área promedio de 10.44 km<sup>2</sup> que en conjunto cubren un área del 31.62 %, estando estas elevaciones por debajo de la media que corresponde a 1750 m.s.n.m.

**Tabla 14.** Porcentaje de intervalos de elevación de la cuenca de Motozintla.

INTERVALO DE ALTITUD m.s.n.m	COTA MEDIA m.s.n.m.	ÁREA Km <sup>2</sup>	PORCENTAJE DE ÁREA %	PORCENTAJE DE ÁREA ACUMULADA %
1025 - 1100	1062.5	1.271 7	1.283576937	1.283576937
1100 - 1200	1150	3.004 2	3.032257478	4.315834416
1200 - 1300	1250	6.282	6.340670222	10.65650464
1300 - 1400	1350	8.157 6	8.233787233	18.89029187
1400 - 1500	1450	9.186 3	9.272094692	28.16238656
1500 - 1600	1550	10.56 42	10.66286348	38.82525004
1600 - 1700	1650	10.45 71	10.55476322	49.38001326
1700 - 1800	1750	10.30 77	10.40396792	59.78398118
1800 - 1900	1850	9.152 1	9.237575284	69.02155646
1900 - 2000	1950	8.580 6	8.660737807	77.68229427
2000 - 2100	2050	6.983 1	7.048318087	84.73061236
2100 - 2200	2150	5.497 2	5.548540647	90.279153
2200 - 2300	2250	4.648 5	4.691914283	94.97106729
2300 - 2400	2350	2.913 3	2.940508525	97.91157581
2400 - 2500	2450	1.519 2	1.533388443	99.44496425
2500 - 2607	2553.5	0.549 9	0.555035746	100

### 6.2.2 Pendiente media de la cuenca

Permite observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie y caracterizar el relieve de la misma, ya que el proceso de degradación al que se somete el caudal máximo y la cuenca en general, están fuertemente influenciados por la topografía. Para determinar este parámetro se ocupa la fórmula (Gaspari et al., 2012; Viramontes-Olivas et al., 2007):

$$PM = 100 \frac{(H \times L)}{A}$$

Donde:

PM = Pendiente Media (%)

H= La equidistancia entre curvas de nivel medidas (km)

L= Sumatoria de las longitudes de las curvas de nivel medidas (km)

A= Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Por

lo

que la pendiente media de la cuenca de Motozintla corresponde a

$$PM = 100 \frac{(0.1 \text{ Km} \times 566.86 \text{ km})}{99.09 \text{ km}^2}$$

$$PM = 57.20 \%$$

Está pendiente del 57.20 % equivale a una de 29.76°, que como se observa de manera gráfica más adelante, corresponde a la mayor proporción de pendientes dentro de la cuenca. De acuerdo a la clasificación de López Cadenas de Llano (1998) y Gaspari (2012) el relieve en la cuenca es fuertemente accidentado, por lo que en primera instancia deja pocas zonas planas o suaves para actividades antropogénicas. En la clasificación de Strahler (1957) tendría una clasificación aun mayor, considerándose escarpadas (Tabla 15).

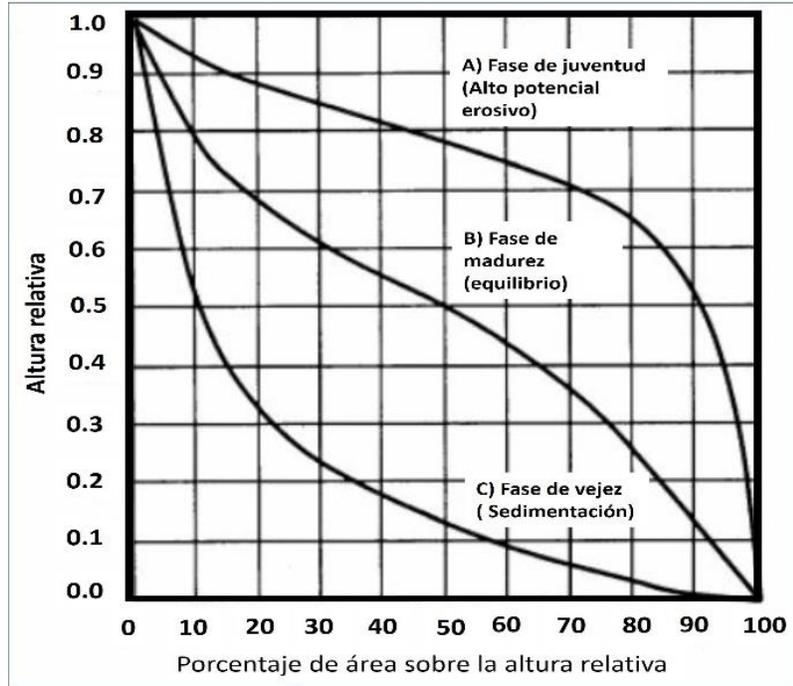
**Tabla 15.** Valores comparativos de Pendiente media de Strahler (1957)

<i>Pendiente media %</i>	<i>Tipología de Terreno</i>
< 0.5	Muy plano
0.5 - 1	Plano
1 - 3	Suave
3 - 12	Accidentado medio
12 - 20	Accidentado
20 - 50	Fuertemente Accidentado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy Escarpado

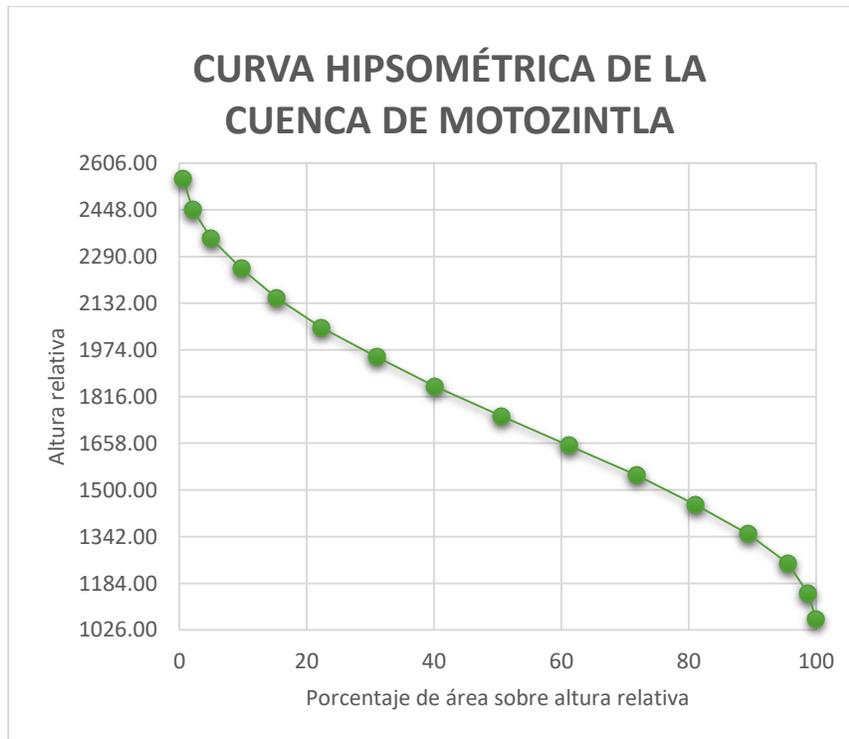
Fuente: Modificada de (Chester et al., 2017)

### 6.2.3 Curva hipsométrica adimensional

La curva hipsométrica ayuda a determinar el estado de equilibrio dinámico potencial de la cuenca. Bajo la hipótesis de relacionar altitud con área es que se puede medir la evolución de la cuenca, ya que a medida que pasa el tiempo las elevaciones y áreas se modifican por efecto de la erosión. De acuerdo con el diagrama de curvas hipsométricas características del ciclo de erosión (Gráfico 2) de Strahler (1957), la curva hipsométrica de la cuenca de Motozintla (Gráfico 3) refleja que esta se encuentra en su etapa de madurez, por la que estaría en un alto estado de equilibrio, en el cual la erosión y la deposición son proporcionales (Guerra & González, 2002; Strahler, 1957).



**Gráfico 2.** Curvas del ciclo erosivo, modificado de Strahler (1957) y Scheidegger (1991)



**Gráfico 3.** Curva hipsométrica de la cuenca de Motozintla

### **6.3 RED DE DRENAJE**

Es el arreglo jerarquizado de los canales que conducen los flujos de agua, los cuales inician en las zonas más altas con pequeños cauces hasta llegar al cauce principal, aquí confluyen generando el principal colector de la cuenca (Chester et al., 2017; Ibisate G, 2004; Viramontes-Olivas et al., 2007).

La cuenca de Motozintla presenta de manera general un drenaje de tipo dendrítico, que indica litologías con permeabilidades bajas, pendientes moderadas, zonas litológicas muy alteradas y de resistencia uniforme. En la zona noreste de la cuenca se observan drenajes de tipo paralelo que son característicos de pendientes altas, caudales cortos y de controles estructurales.

#### **6.3.1 Orden de corrientes**

El método Strahler(1957) - Horton (1945) permite la codificación de cada uno de los segmentos de los afluentes para que puedan ser cuantificados y clasificados, jerarquizando la red fluvial de acuerdo de los pequeños canales donde inician los cauces hasta el afluente principal, definiendo así un orden de corrientes que nos da información sobre la complejidad y desarrollo evolutivo del sistema de drenaje. De acuerdo con el mapa de órdenes de corrientes de la cuenca de Motozintla (Fig. 26) presenta un orden 6, en lo que comprende la última etapa del río Xelajú, es decir que este tramo refleja la etapa más antigua de desarrollo, indicando la traza de la estructura donde se ha desarrollado. Esta jerarquización revela que la cuenca está sometida a continuas precipitaciones, las rocas presentan fuerte alteración y baja resistencia al intemperismo y la erosión. Es notable la presencia de factores estructurales como fallas y fracturas que han ayudado a que los flujos de agua sean altamente incisivos en el terreno.

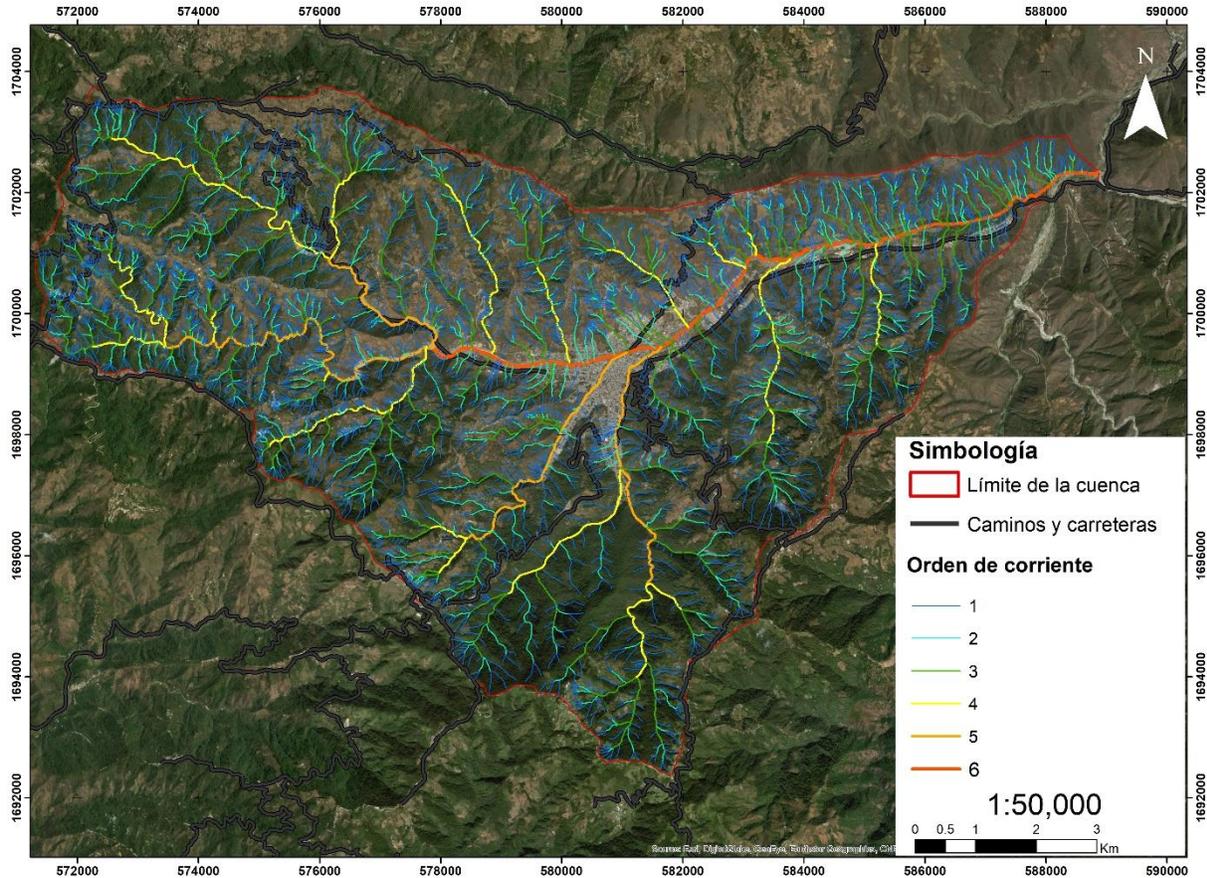


Figura 26. Mapa de órdenes de corrientes de la cuenca de Motozintla.

### 6.3.2 Relación de Bifurcación

Horton (1945) estableció que el número de cauces de diferentes órdenes dentro de una cuenca dada, tiende a aproximarse a una progresión geométrica inversa en la que el primer término es la unidad y la razón es una relación constante de bifurcación.

Esto se describe como la relación entre el número de cauces de un orden con el número de cauces de orden inmediatamente superior ((Chester et al., 2017; Ibisate G, 2004; Martínez-Gutiérrez, Díaz-Gutiérrez, & Cosío-González, 2010) y que está definido por la fórmula:

$$Rb = \frac{\sum Nu}{\sum (Nu + 1)}$$

Donde

Rb = Relación de bifurcación

Nu = clase u orden de cause.

**Tabla 16.** Relación de bifurcación del drenaje en la cuenca de Motozintla

<i>Orden de corriente</i>	$\sum Nu$	<i>Rb</i>
1	3484	5.665041
2	615	4.489051
3	137	6.85
4	20	5
5	4	4
6	1	1

La Rb permite inferir sobre posibles crecidas en el sistema. Valores bajos de esta relación se asocian con cuencas muy bien drenadas que a su vez pueden generar crecidas más violentas (Strahler, 1957; Horton, 1945). El valor típico, se establece entre 3 y 5 en cuencas donde la estructura geológica no distorsione el patrón de drenaje natural (Strahler, 1957). La tabla 16 concentra la relación de bifurcación de los diferentes órdenes de corrientes de la cuenca, se observa que el promedio los órdenes del 1 al 3 sobrepasan los valores típicos, por lo que muestran que existe un retardo en la concentración del flujo de agua y que se relación con su forma ovalo redonda- ovalo oblonga, ya que entre más tienda a la circularidad tardara más en descargar en el afluente principal, sin embargo una vez lleguen a este la crecida será violenta.

### 6.3.3 Densidad de drenaje

Es la relación entre la suma de las longitudes de todos los cauces de agua que drenan por la cuenca y el área de la misma. Cuantitativamente, caracteriza la relación de la red de drenaje con el material donde fluyen, una mayor escorrentía indica un mayor arreglo estructural o un mayor potencial erosivo debido a la debilidad de los materiales (Chester et al., 2017; Gutiérrez - Elorza, 2008). Horton (1945) y Strahler (1957), la definen como:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde:

Dd = Densidad de Drenaje

L= La sumatoria de todos los cauces de agua que drenan la cuenca

A= Área total de la cuenca.

La cuenca de Motozintla presenta una densidad de drenaje de:

$$Dd = 869.26 \text{ Km} / 99.09 \text{ km}^2$$

$$Dd = 8.77$$

Que de acuerdo a la Clasificación de Horton (1945) y Strahler (1957), la cuenca posee una categoría muy alta, por lo que a mayor densidad de drenaje mayor será la respuesta de la cuenca ante una precipitación, de manera que el agua será evacuada más rápida llegando en tiempo muy cortos a las zonas bajas donde se encuentra asentada la población.

Con base en esta fórmula se realizó un mapa de densidad de drenaje (Fig. 27 y 28) para la cuenca, el cual evalúa la relación de los cauces en un área menor, para este caso se crearon áreas de 0.25 Km<sup>2</sup> y se realizaron interpolación mediante la técnica “Natural Neighbor” (Fig. 22) y “Kriging” (Fig 23), la primera servirá para localizar las zonas de mayor densidad de drenaje y

será el usado para el mapa de peligros, el segundo mostrara la tendencia de las densidad de drenaje es decir las posibles zonas donde este incremento, la clasificación (Tabla 17 ) se hizo con base en la clasificación de Horton (1945) y Strahler (1957) sin embargo los valores excedían los propuestos por ellos, por lo que se anexaron intervalos que muestran mejor la tendencia.

**Tabla 17.** Factores de densidad de drenaje según Strahler (1957) y Horton (1945)

<i>Densidad de Drenaje (Km / Km<sup>2</sup>)</i>	<i>Categoría</i>
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente: Modificada de (Chester et al., 2017)

En el mapa (Fig. 27) interpolado por el método del vecino cercano (Natural Neighbor) se observa con mayor precisión las zonas donde el drenaje ha sido el modelador del relieve. La cuenca presenta escasas zonas con densidades menores de 3 Km/ Km<sup>2</sup>, por lo que las probables zonas seguras son mínimas, lo que hace dudoso para asentamientos.

Las zonas en color rojo y naranja presentan las Dd más altas, estas muestran la traza de la falla Polochic con tendencia NE – SW, ya que son las zonas que poseen mayor alteración y desarrollo estructural.

En el mapa interpolado por el método de Krigin (Fig. 28) se han eliminado estadísticamente los valores atípicos, teniendo como el valor de Dd más alto a 14 Km/ Km<sup>2</sup>, podemos observar dentro del mapa que los drenajes continuarán desarrollándose sobre la falla y con mayor énfasis en zonas de alteración, estas tendencia se continua hacia la cuenca próxima, que de acuerdo con el análisis de imágenes de satélite presenta fuerte desarrollo de drenajes así como de PRM.

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA, CHIAPAS, MÉXICO.

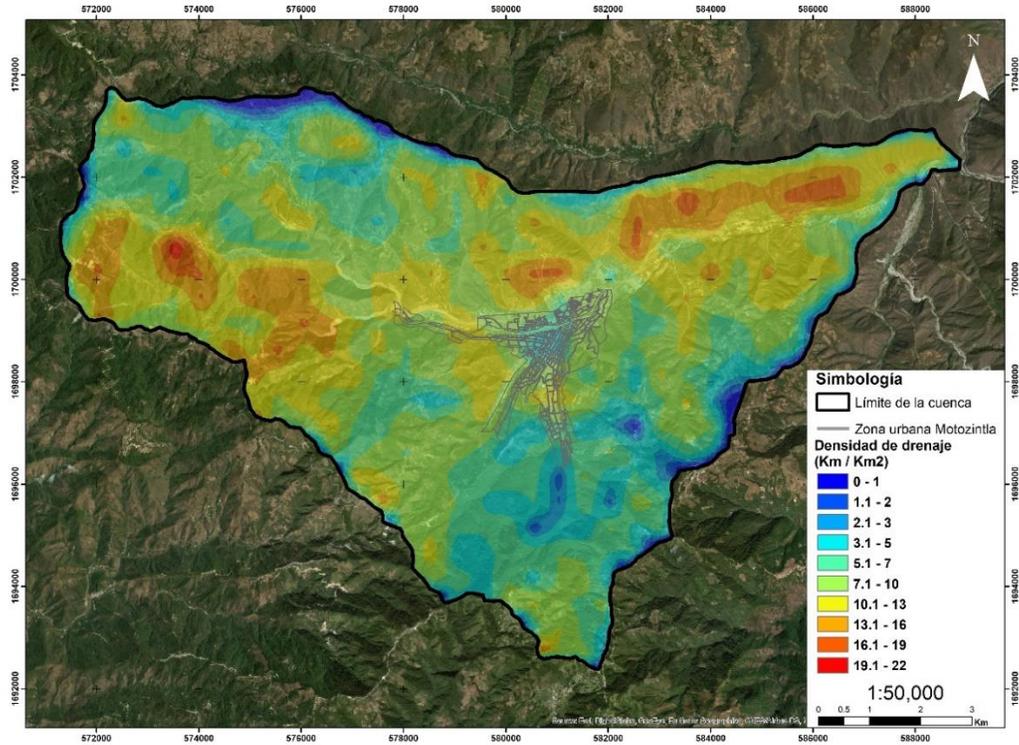


Figura 27. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Motozintla interpolado mediante el método de Natural Neighbor.

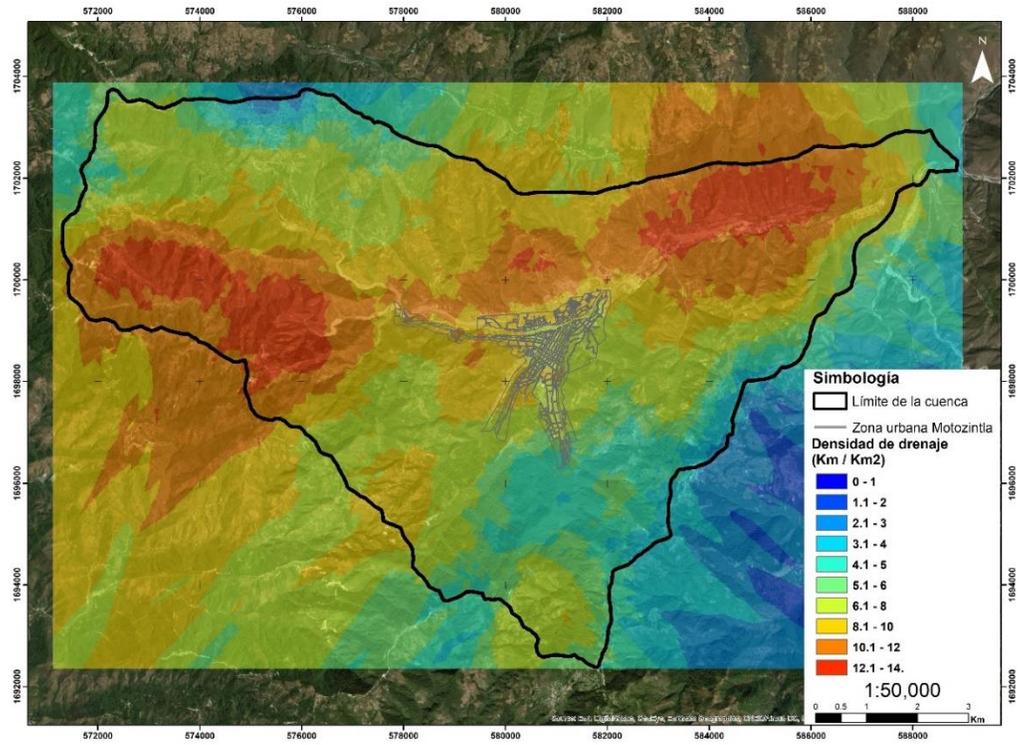


Figura 28. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca de Motozintla, interpolado mediante el método de Kriging.

#### 6.3.4 Tiempo de concentración (Tc)

Se considera como el tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Gaspari et al., 2012) La densidad de drenaje afecta al tipo de escorrentía, así en zonas de alta densidad la escorrentía recorre la superficie rápidamente rebajando el Tc e incrementando el pico de crecida al haber menos infiltración (Ibisate, 2004).

Existen muchas fórmulas empíricas para realizar el cálculo de este parámetro, sin embargo todas ellas presentan una variación con respecto a la otra, debido a que han sido probadas en cuencas de escala diferentes (Grimaldi, Petroselli, Tauro, & Porfiri, 2012). Para este estudio se usará la fórmula de Johnstone and Cross (1949) la cual de acuerdo con Grimaldi (2012) está calibrada para áreas de drenaje entre 64 km<sup>2</sup> y 4200 km<sup>2</sup>, y será comparada con la de Giandotti (1934) que fue calibrada en 12 cuencas con áreas de drenaje entre 170 Km<sup>2</sup> y 70 000 Km<sup>2</sup> (Grimaldi et al., 2012).

Johnstone and Cross (1949) dice que:

$$T_c = 300 \sqrt{\frac{L}{S}}$$

Donde:

Tc = Tiempo de Concentración (minutos)

L = Es la longitud total del cauce principal desde la zona más elevada hasta la zona de salida de la cuenca (millas).

S = La pendiente media del cauce principal (pies / millas)

Por lo que para Motozintla tiene un  $T_c$  de:

$$T_c = 300 \sqrt{\frac{14.44 \text{ mi}}{68.03 \text{ ft/mi}}}$$

$$T_c = 300(0.4607)$$

$$T_c = 138.2 \text{ minutos} = 2 \text{ hr } 18.2 \text{ minutos}$$

Giandotti (1934) dice que:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L}{0.8\sqrt{H}}$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (horas)

$A$  = Área de la cuenca ( $\text{Km}^2$ )

$L$  = Longitud total del cauce principal (Km)

$H$  = La diferencia entre la altitud media de la cuenca y la altitud de salida (m)

$$T_c = \frac{4\sqrt{99.09\text{km}^2} + 1.5 (23.246\text{Km})}{0.8\sqrt{(1750\text{m} - 1026.62\text{m})}}$$

$$= \frac{39.81 + 34.869}{21.51}$$

$$= 3.47 \text{ horas}$$

## 7 LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN MOTOZINTLA

---

Los procesos de remoción en masa serán definidos en términos generales como el movimiento pendiente abajo, de una masa rocosa, detritos o tierra (Cruden, 1991), el cual tiene su origen en las condiciones de la zona, tales como las geológicas, geomorfológicas, físicas y humanas. De acuerdo con Wieczoreck (1996) solo pueden ser detonados por un agente, sea este lluvias intensas, movimientos sísmicos, erupciones volcánicas o rápido socavamiento basal, su ocurrencia en determinadas áreas conduce a un aumento de la presión vertical del terreno debido al peso o reducción de la cohesión de los materiales que lo conforman, acelerando así su colapso.

El análisis de pendientes es uno de los procesos esenciales para determinar zonas susceptibles a PRM. En áreas con pendientes abruptas, la erosión hídrica y los procesos de caída son más intensos (Aceves Quesada, Legorreta Paulín & Álvarez Ruíz, 2017).

Las laderas son el principal condicionante de un PRM, ya que la acción de la gravedad es constante sobre los cuerpos. Aunque no es una regla general, identificar los ángulos de inclinación que presentan las laderas en la zona de estudio proporcionara una guía de zonas que se encuentren bajo riesgo de este tipo de peligros.

### 7.1 ANÁLISIS DE PENDIENTES

El análisis de pendiente deduce la aptitud de un terreno ante diferentes procesos naturales, definiendo de esta manera su potencial de uso para las actividades antropogénicas como cultivo, urbanización, industria o vivienda (Ruiz & Campos, 1994).

Ramos, Trujillo Vela & Prada S (2015), analizan de manera pertinente los ángulos a los que ocurren los procesos de remoción en masa en un área de estudio en la zona de Bogotá en Colombia, obteniendo que la mayoría ocurrieron en pendientes con ángulos mayores a 40°. Datos obtenidos por Imaizumi et al (2008) en Japón, exhiben que los deslizamientos ocurrían en laderas de pendientes mayores a 30 ° y con cubiertas jóvenes de bosques de edades entre 1 y

10 años. Otros estudios difieren de estos datos, Dai y Lee (2001) reportan para Hong Kong una mayor cantidad de deslizamientos en taludes con ángulos entre 30° y 40° mientras que en la Isla de Latuan en Hong Kong se observan entre 20° y 35°. Con base en los datos anteriores clasificaremos en 5 rangos las pendientes, de forma que puedan considerarse para el análisis de peligro, tomando como base que la mayoría de los procesos ocurren por arriba de los 20°. De esta manera las pendientes que se encuentren por debajo de los 20° podrán considerarse de menor peligro.

Los valores de pendientes serán clasificados de acuerdo al área de estudio (Tabla 18), ya que por encontrarse en un sistema montañoso analizaremos con más detalle las pendientes que sobrepasan los 10°.

**Tabla 18.** Valores de pendiente para la cuenca de Motozintla

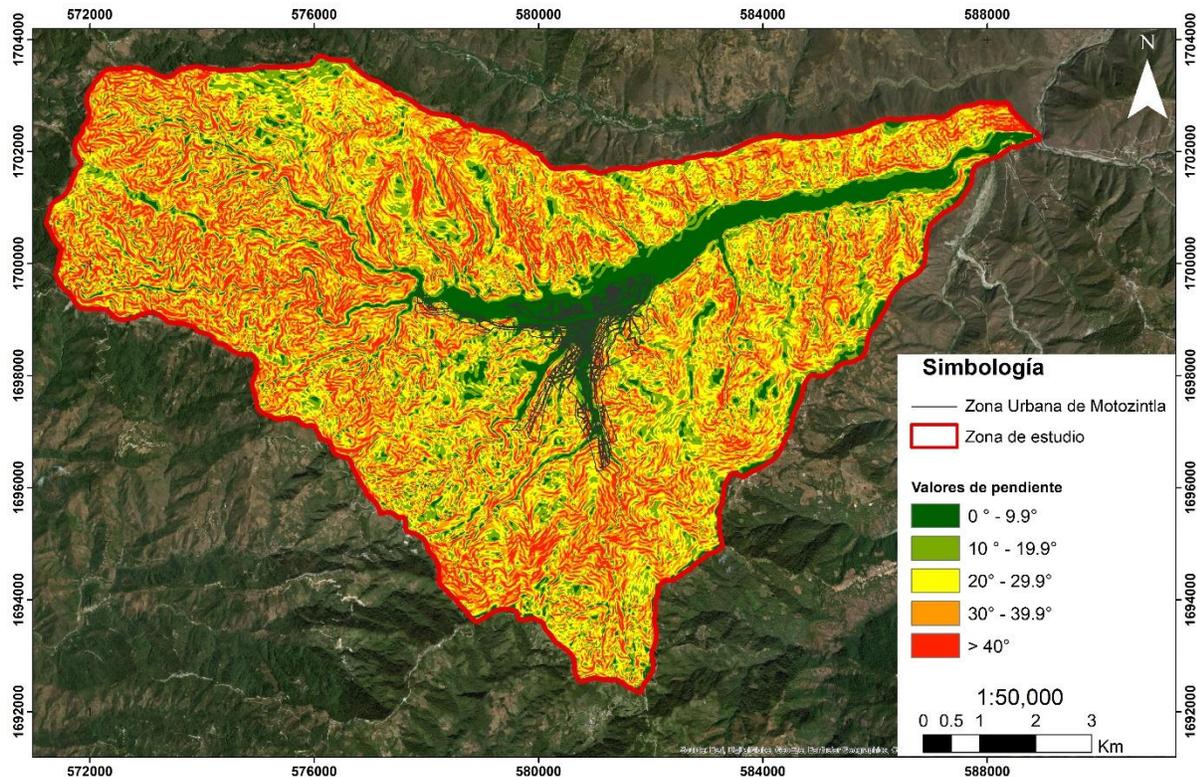
<i>Valor de pendiente</i>	<i>PRM</i>	<i>Categoría</i>
0° - 9.9°	Terrazas, planicies, abanicos aluviales y piedemonte.	Ligeramente inclinada
10° - 19.9°	Laderas que pueden generar movimientos en masa de baja velocidad.	Moderadamente inclinada
20° - 29.9°	Laderas que pueden generar movimientos de masa de todo tipo, especialmente soliflucción, reptación y ocasionalmente deslizamientos	Fuertemente Inclinada
30° - 39.9°	Movimientos de todo tipo, moderadamente caídas de roca, deslizamientos, flujos y vuelcos.	Escarpada
> 40°	Caída de rocas, deslizamientos, vuelcos, flujos.	Fuertemente Escarpada

La clasificación servirá de base para el análisis de peligro en la zona. Como se observa en el mapa (Fig 29), el área urbana de Motozintla se encuentra asentada en las zonas de planicie aluvial, no está expuesto directamente a que ocurra un proceso en su base, sin embargo su posición no es privilegiada ante la ocurrencia de flujos que arrastren material, ya que estos impactan directamente sobre ella. A partir de las tonalidades amarillas se encuentran las pendientes que poseen un fuerte grado de peligro, para futuros asentamientos esto refleja la

escasez de lugares menos susceptibles a que ocurra un PRM. De acuerdo con la Tabla 19 donde se muestra el porcentaje de área cubierta por las diferentes pendientes, 55 % de la superficie de la cuenca presenta alta probabilidad de procesos de ladera y 16% probabilidad a inundaciones y ocurrencia de flujos de escombros.

**Tabla 19.** Valores de pendiente para la cuenca de Motozintla

Valor de pendiente	Área	Área %	Acumulativo %
0° - 9,9°	15.94	16.08639	100
10° - 19,9°	28.6	28.86265	83.91361
20° - 29,9°	28.5	28.76173	55.05096
30° - 39,9°	9.36	9.445958	26.28923
> 40°	16.69	16.84327	16.84327



**Figura 29.** Mapa de pendientes de la cuenca de Motozintla.

## 7.2 CARTOGRAFÍA DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

La cartografía consiste en identificar en campo los diferentes procesos que previamente fueron marcados en gabinete con la imagen de satélite y las fotografías aéreas. En campo se identifican los factores condicionantes que pudieran preexistir, entre ellos se encuentra la topografía, su geología, morfometría, evidencias de su origen como actividades antropogénicas que inciten a que ocurra un proceso o si son producto de factores naturales.

En el área se cartografiaron 204 PRM, estos fueron diferenciados por su origen entre naturales y antropogénicos, generando así un inventario base (Tabla 20). Los PRM de origen natural predominan en un 75.5 % dejando el 24.5 % restante a los de origen antropogénico, aunque podemos diferenciar que los antropogénicos son actuales y presentan un mayor desarrollo, principalmente en los cortes de carreteras y caminos que han sido modeladores de las pendientes debido al corte sobre ellas y al material depositado pendiente abajo, es decir que han generado una condición de peligro que no existía.

**Tabla 20.** Inventario de procesos de remoción en masa cartografiados en la zona de Motozintla

No.	Tipo de PRM	Coordenada UTM		Unidad Litológica	Origen
		X	Y		
1	Caída	576093.6	1704963	TODOS SANTOS	NATURAL
2	Caída	577342.8	1705241	TODOS SANTOS	NATURAL
3	Caída	577520.5	1704822	TODOS SANTOS	NATURAL
4	Caída	575418.7	1703916	TODOS SANTOS	NATURAL
5	Caída	578478.6	1703093	TODOS SANTOS	NATURAL
6	Caída	576481.8	1700513	MICA -ESQUISTO	NATURAL
7	Caída	576881	1700555	METAGRANITO	NATURAL
8	Caída	578451.5	1700198	METAGRANITO	NATURAL
9	Caída	578894.1	1700122	METAGRANITO	NATURAL
10	Caída	580918	1702974	TODOS SANTOS	NATURAL
11	Caída	582034.9	1702611	TODOS SANTOS	NATURAL
12	Caída	581666.8	1702221	TODOS SANTOS	NATURAL
13	Caída	584938.3	1704533	TODOS SANTOS	NATURAL
14	Caída	585608.1	1703165	TODOS SANTOS	NATURAL

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA,  
CHIAPAS, MÉXICO.

15	Caída	585990.8	1702932	METAGRANITO	NATURAL
16	Caída	586526.9	1704572	TODOS SANTOS	NATURAL
17	Caída	586953	1704895	TODOS SANTOS	NATURAL
18	Caída	588541.7	1704035	TODOS SANTOS	NATURAL
19	Caída	589203.3	1704444	TODOS SANTOS	NATURAL
20	Caída	590692.3	1704873	TODOS SANTOS	NATURAL
21	Caída	589354.1	1703347	METAGRANITO	NATURAL
22	Caída	589111.4	1702379	METAGRANITO	NATURAL
23	Caída	588937.4	1703206	METAGRANITO	NATURAL
24	Caída	588841.2	1703510	METAGRANITO	NATURAL
25	Caída	589361.4	1701424	METAGRANITO	NATURAL
26	Caída	587691.7	1701094	METAGRANITO	NATURAL
27	Caída	587417.9	1700448	METAGRANITO	NATURAL
28	Caída	588250.4	1700788	METAGRANITO	NATURAL
29	Caída	588818.6	1700722	METAGRANITO	NATURAL
30	Caída	587903.1	1699520	METAGRANITO	NATURAL
31	Caída	587802.6	1698955	METAGRANITO	NATURAL
32	Caída	588183.7	1698856	METAGRANITO	NATURAL
33	Caída	589433.5	1698433	METAGRANITO	NATURAL
34	Caída	587614.4	1697836	METAGRANITO	NATURAL
35	Caída	587268.8	1697032	METAGRANITO	NATURAL
36	Caída	587081.1	1696165	METAGRANITO	NATURAL
37	Caída	586551	1696305	METAGRANITO	NATURAL
38	Caída	587056.2	1695108	METAGRANITO	NATURAL
39	Caída	587515.6	1695023	METAGRANITO	NATURAL
40	Caída	586783.9	1694650	METAGRANITO	NATURAL
41	Caída	585643.5	1693603	METAGRANITO	NATURAL
42	Caída	581092.2	1698351	BRECHA - AVALANCHA	NATURAL
43	Caída	581127.2	1697771	BRECHA - AVALANCHA	NATURAL
44	Caída	579589.9	1697521	METAGRANITO	NATURAL
45	Caída	577932.5	1694783	METAGRANITO	NATURAL
46	Caída	575695.2	1695943	METAGRANITO	NATURAL
47	Caída	572589.9	1694243	METAGRANITO	NATURAL
48	Caída	575002.2	1693510	METAGRANITO	NATURAL
49	Caída	577374.7	1698868	METAGRANITO	NATURAL
50	Caída	576674.2	1698744	MICA -ESQUISTO	NATURAL
51	Caída	576895.2	1699420	MICA -ESQUISTO	NATURAL
52	Caída	577134.7	1699738	MICA -ESQUISTO	NATURAL
53	Caída	575951.2	1699527	MICA -ESQUISTO	NATURAL
54	Caída	575494.1	1699743	MICA -ESQUISTO	NATURAL
55	Caída	584305.1	1702603	METAGRANITO	NATURAL
56	Caída	583830.1	1702566	METAGRANITO	NATURAL
57	Caída	588116.2	1705317	TODOS SANTOS	NATURAL

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA,  
CHIAPAS, MÉXICO.

58	Caída	592908.1	1704382	METAGRANITO	NATURAL
59	Caída	584906.5	1691560	METAGRANITO	NATURAL
60	Caída	576633.3	1698201	ANDESITAS	NATURAL
61	Caída	587381.3	1701256	METAGRANITO	NATURAL
62	Caída	582199.2	1701333	METAGRANITO	NATURAL
63	Caída	576048.2	1702466	TODOS SANTOS	NATURAL
64	Caída	576430.9	1702284	TODOS SANTOS	NATURAL
65	Caída	576320.9	1702333	TODOS SANTOS	NATURAL
66	Caída	576258.2	1702116	TODOS SANTOS	NATURAL
67	Caída	586016.3	1694131	METAGRANITO	NATURAL
68	Complejo	572364	1703503	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO
69	Complejo	571900.7	1700326	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
70	Complejo	571669.6	1700374	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
71	Complejo	571676.2	1699279	MICA -ESQUISTO	NATURAL
72	Complejo	573092.7	1699035	MICA -ESQUISTO	NATURAL
73	Complejo	572083.7	1698974	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
74	Complejo	575027.7	1698034	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO
75	Complejo	575231.5	1698513	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO
76	Complejo	576436.8	1698094	ANDESITAS	NATURAL
77	Complejo	577186.5	1695634	METAGRANITO	NATURAL
78	Complejo	578000.5	1695147	METAGRANITO	NATURAL
79	Complejo	582352.5	1696765	METAGRANITO	NATURAL
80	Complejo	585327.4	1700655	METAGRANITO	NATURAL
81	Complejo	585423.1	1700707	METAGRANITO	NATURAL
82	Complejo	585651.5	1700662	METAGRANITO	NATURAL
83	Complejo	578634.3	1700388	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
84	Complejo	578652.9	1700062	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
85	Complejo	581856.5	1698205	BRECHA - AVALANCHA	NATURAL
86	Complejo	579601.3	1696381	METAGRANITO	NATURAL
87	Complejo	579748.4	1696471	METAGRANITO	NATURAL
88	Complejo	578666.4	1700184	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
89	Complejo	581696.5	1698177	BRECHA - AVALANCHA	NATURAL
90	Complejo	576327.5	1703081	TODOS SANTOS	NATURAL
91	Complejo	577596.5	1699581	MICA -ESQUISTO	NATURAL
92	Complejo	571413.8	1699552	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
93	Deslizamiento	585041.2	1703867	TODOS SANTOS	NATURAL
94	Deslizamiento	585948.1	1704202	TODOS SANTOS	NATURAL
95	Deslizamiento	586492.3	1703519	TODOS SANTOS	NATURAL
96	Deslizamiento	586787.6	1706055	TODOS SANTOS	NATURAL
97	Deslizamiento	587719.2	1705184	TODOS SANTOS	NATURAL
98	Deslizamiento	578199.3	1700579	TODOS SANTOS	NATURAL
99	Deslizamiento	579917.8	1701634	TODOS SANTOS	NATURAL

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA,  
CHIAPAS, MÉXICO.

100	Deslizamiento	583219.7	1702302	METAGRANITO	NATURAL
101	Deslizamiento	572983.1	1696720	METAGRANITO	NATURAL
102	Deslizamiento	580436.6	1696746	METAGRANITO	NATURAL
103	Deslizamiento	583073.2	1697853	BRECHA - AVALANCHA	NATURAL
104	Deslizamiento	584862.5	1696869	METAGRANITO	NATURAL
105	Deslizamiento	591709.8	1700575	METAGRANITO	NATURAL
106	Deslizamiento	574183.5	1694020	METAGRANITO	NATURAL
107	Deslizamiento	586014.9	1705049	TODOS SANTOS	NATURAL
108	Deslizamiento	581000	1692000	METAGRANITO	NATURAL
109	Deslizamiento	576926.6	1699888	MICA -ESQUISTO	NATURAL
110	Deslizamiento	571978.1	1702940	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
111	Deslizamiento	572069.6	1702611	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
112	Deslizamiento	571887.8	1702477	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
113	Deslizamiento	572084.7	1701977	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
114	Deslizamiento	571971.6	1701973	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
115	Deslizamiento	572163.6	1701158	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
116	Deslizamiento	572455.1	1701278	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
117	Deslizamiento	572095.4	1700807	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
118	Deslizamiento	571799.1	1700322	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
119	Deslizamiento	571557.8	1700383	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
120	Deslizamiento	571887.2	1700572	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
121	Deslizamiento	571552.8	1700225	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
122	Deslizamiento	571491.8	1699981	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
123	Deslizamiento	571804.4	1699315	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
124	Deslizamiento	572124	1698992	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
125	Deslizamiento	574754.6	1697814	ANDESITAS	NATURAL
126	Deslizamiento	575607.5	1698504	MICA -ESQUISTO	NATURAL
127	Deslizamiento	575472.7	1698499	MICA -ESQUISTO	NATURAL
128	Deslizamiento	575765.8	1698545	MICA -ESQUISTO	NATURAL
129	Deslizamiento	576325.7	1698014	ANDESITAS	NATURAL
130	Deslizamiento	577392.9	1695664	METAGRANITO	NATURAL
131	Deslizamiento	577686.1	1695695	METAGRANITO	NATURAL
132	Deslizamiento	577480.7	1695699	METAGRANITO	NATURAL
133	Deslizamiento	577534.2	1695686	METAGRANITO	NATURAL
134	Deslizamiento	577580.7	1695674	METAGRANITO	NATURAL
135	Deslizamiento	577276.2	1695511	METAGRANITO	NATURAL
136	Deslizamiento	577456.5	1695492	METAGRANITO	NATURAL
137	Deslizamiento	577752.3	1695506	METAGRANITO	NATURAL
138	Deslizamiento	577693.6	1695433	METAGRANITO	NATURAL
139	Deslizamiento	582164.1	1693550	METAGRANITO	NATURAL
140	Deslizamiento	582177.7	1693484	METAGRANITO	NATURAL
141	Deslizamiento	582052.4	1692662	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA,  
CHIAPAS, MÉXICO.

142	Deslizamiento	582097.3	1692789	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
143	Deslizamiento	581919.9	1693832	METAGRANITO	NATURAL
144	Deslizamiento	583929	1698329	METAGRANITO	NATURAL
145	Deslizamiento	583915.5	1698418	METAGRANITO	NATURAL
146	Deslizamiento	585532.4	1699132	METAGRANITO	NATURAL
147	Deslizamiento	586097.6	1700113	METAGRANITO	NATURAL
148	Deslizamiento	585151.3	1700167	METAGRANITO	NATURAL
149	Deslizamiento	585579.7	1700932	METAGRANITO	NATURAL
150	Deslizamiento	585661.1	1700877	METAGRANITO	NATURAL
151	Deslizamiento	582000.3	1701315	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
152	Deslizamiento	580760.7	1700512	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
153	Deslizamiento	580693.9	1700471	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
154	Deslizamiento	580699.8	1700185	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
155	Deslizamiento	578508.9	1695176	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
156	Deslizamiento	577695.7	1695157	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
157	Deslizamiento	577610	1695032	METAGRANITO	NATURAL
158	Deslizamiento	577809	1694894	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
159	Deslizamiento	577362.3	1694869	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
160	Deslizamiento	580490.5	1698000	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
161	Deslizamiento	578579.3	1695906	METAGRANITO	NATURAL
162	Deslizamiento	582541	1699729	BRECHA - AVALANCHA	ANTROPOGÉNICO
163	Deslizamiento	587269.6	1700381	METAGRANITO	NATURAL
164	Flujo	578015.7	1704315	TODOS SANTOS	NATURAL
165	Flujo	587842.5	1705835	TODOS SANTOS	NATURAL
166	Flujo	591795.3	1702034	METAGRANITO	NATURAL
167	Flujo	574264.5	1695434	METAGRANITO	NATURAL
168	Flujo	577605.2	1695952	METAGRANITO	NATURAL
169	Flujo	576433	1698237	ANDESITAS	NATURAL
170	Flujo	587378.7	1703568	TODOS SANTOS	NATURAL
171	Flujo	592691.4	1703710	METAGRANITO	NATURAL
172	Flujo	572936.8	1703412	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO
173	Flujo	573046	1703317	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO
174	Flujo	571944.6	1702400	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
175	Flujo	572342.5	1701874	MICA -ESQUISTO	NATURAL
176	Flujo	572056.5	1702268	MICA -ESQUISTO	NATURAL
177	Flujo	572311.6	1701275	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
178	Flujo	572468.4	1701223	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
179	Flujo	572083.2	1698889	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
180	Flujo	572062.1	1699001	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
181	Flujo	572190.9	1698911	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
182	Flujo	575260.4	1698652	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	ANTROPOGÉNICO

ESTUDIO DEL PELIGRO GEOLÓGICO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA CUENCA DE MOTOZINTLA,  
CHIAPAS, MÉXICO.

183	Flujo	576431.1	1697947	ANDESITAS	NATURAL
184	Flujo	580669.3	1700123	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
185	Flujo	580625.3	1700179	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
186	Flujo	580704	1700088	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
187	Flujo	580714.2	1700263	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
188	Flujo	578611.6	1699931	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
189	Flujo	571495.7	1699451	MICA -ESQUISTO	ANTROPOGÉNICO
190	Flujo	582172.8	1693359	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
191	Reptación	577155.5	1695469	METAGRANITO	NATURAL
192	Reptación	577643.8	1695581	METAGRANITO	NATURAL
193	Zona de Avalancha A	579177.2	1701882	TODOS SANTOS	NATURAL
194	Zona de Avalancha A	577971.7	1699715	METAGRANITO	NATURAL
195	Zona de Avalancha A	576236.2	1701561	GRANITO MACIZO DE CHIAPAS	NATURAL
196	Zona de Avalancha A	581771.8	1700265	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
197	Zona de Avalancha B	582155.6	1693026	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
198	Zona de Avalancha B	586894.8	1694200	METAGRANITO	NATURAL
199	Zona de Avalancha B	583390.5	1700398	METAGRANITO	NATURAL
200	Zona de Avalancha B	588012.2	1701895	METAGRANITO	ANTROPOGÉNICO
201	Zona de deslizamientos rotacionales	582448	1702113	TODOS SANTOS	NATURAL
202	Zona de deslizamientos rotacionales	588465.3	1702978	TODOS SANTOS	NATURAL
203	Zona de deslizamientos rotacionales	582025.5	1700332	TODOS SANTOS	NATURAL
204	Zona de deslizamientos rotacionales	588806.1	1702342	TODOS SANTOS	NATURAL

El mapa de inventario de procesos de remoción en masa (Fig. 30), localiza de manera espacial los procesos identificables a simple vista en la zona, podemos observar que existe una mayor concentración de ellos en áreas con características específicas y no están distribuidos de manera aleatoria. Se concentran en las zonas de mayor altitud de fallas de grandes dimensiones, principalmente en el plano de la falla Polochic al oeste, y de la falla por donde se desarrolla el río Mina en la porción sur, las zonas de convergencia de los principales afluentes que alimentan al río Xelajú también concentran estos procesos. En el parteaguas de la zona sur cercana a la localidad de Buenos Aires y sobre la carretera que conecta a este poblado con el de El Pizarrín, siendo el trayecto entre la localidad de Benito Juárez y El Pizarrín la zona más afectada.

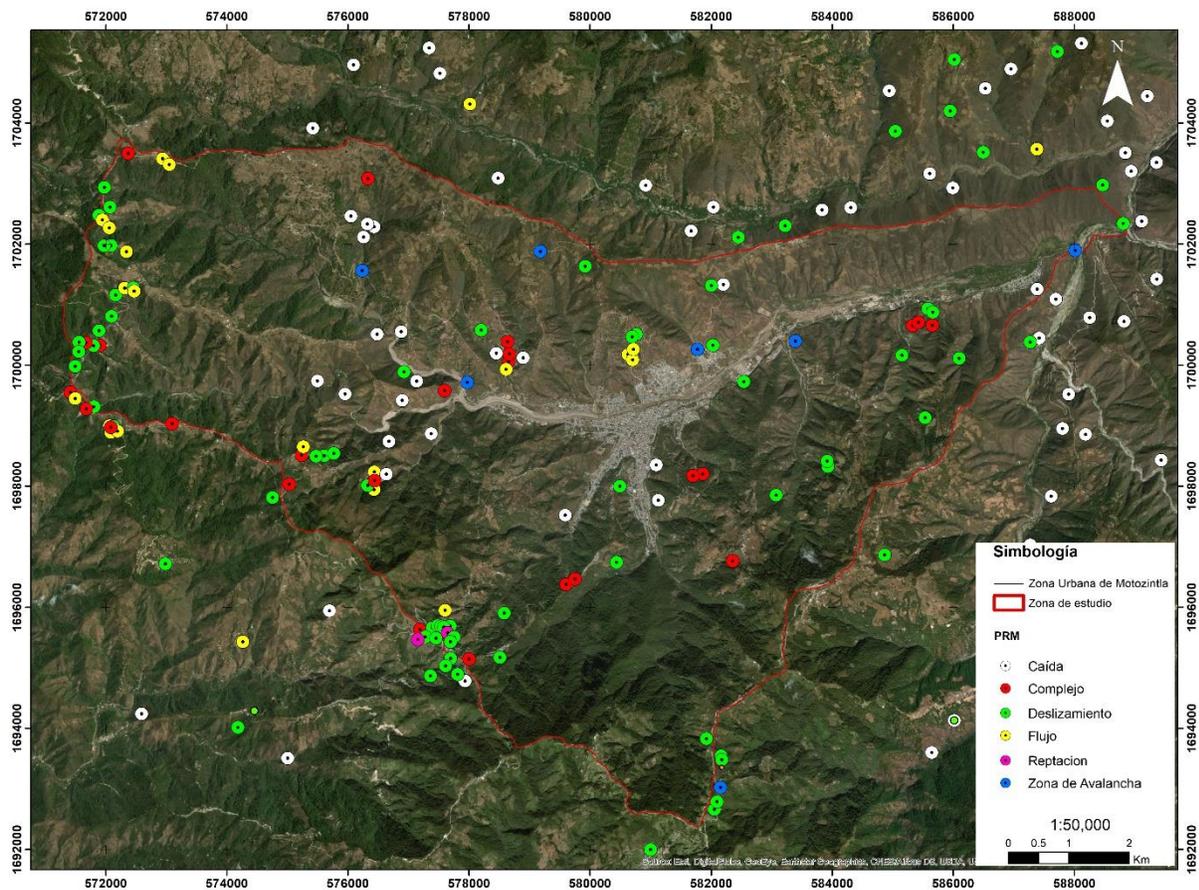


Figura 30. Mapa de inventario de procesos de remoción en masa de la región de Motozintla.

### 7.2.1 Caídas

Se identifican un total de 67 caídas, las cuales corresponden al 33 % de los procesos cartografiados. Del total de caídas el 57 % ocurren en metagranitos que tienen como protolito al macizo de Chipas, el Tronco de Amatenango y el Tronco de Buenos Aires, el segundo en ocurrencia lo cubre la formación todos santos con el 30 %, estos procesos pueden apreciarse a gran escala alejados de la zona urbana.

La zona limítrofe a la ciudad encuentran algunas caídas producto de los cortes de las carretera que comunican la ciudad (Fig 31), estas presentan deficientes sistemas de contención como muros de gaviones para detener el tránsito de las rocas hacia carretera.



**Figura 31.** Procesos de caídas sobre la carretera que va de Motozintla a la localidad de Buenos Aires, frente a las oficinas de Protección Civil.

El mecanismo que genera estos procesos se debe esencialmente a topografía abrupta, la cual ha sido modelada en la zona debido a la tectónica activa del sistemas Polochic- Motagua el cual mantiene la zona sujeta a un fuerte estrés tectónico, produciendo intenso fracturamiento y fallamiento. Las caídas también ocurren en las laderas a orilla de los cauces de ríos que han socavado fuertemente su base como son en la intercesión de los 2 principales afluentes que alimentan el río Xelajú o en el río Agua caliente que rodea a la cuenca. Los cortes carreteros en la zona son un detonante para estos procesos, y es común verlos a los largo del camino.

### 7.2.2 Reptación

Los procesos de reptación en la zona ocupan apenas el 1 % del total, sin embargo estos son importantes porque abarcan áreas considerables de suelo que se está desplazando, aunque su velocidad es lenta comienzan a generar zonas de debilidad que pueden ser activadas por factores detonantes como sismos o lluvias, sin mencionar el efecto de la gravedad. Estos procesos se

encuentran en el metagranito donde el protolito corresponde al macizo de Chiapas, en zonas con fuerte alteración argílica, cercanas a las localidades de Las cruces y Buenos Aires (Fig. 32)



**Figura 32.** Reptación de suelos en zonas inestables, conjugándose diferentes tipos de procesos, cercanos a las localidades de Las Cruces y Buenos Aires.

### 7.2.3 Deslizamientos

Se identifican 75 deslizamientos en la zona los cuales corresponden al 36 % del total de los procesos cartografiados. Estos se observan principalmente en las zonas más altas de la cuenca, muy cerca del parteaguas donde las pendientes son abruptas y se encuentran por arriba de los  $30^\circ$ , el 56 % de ellos ocurren en la zonas de Metagranitos siendo relativamente obvio debido a que cubre mayor área, a este le continua las unidades litológicas de Mica-Esquisto con 24% .

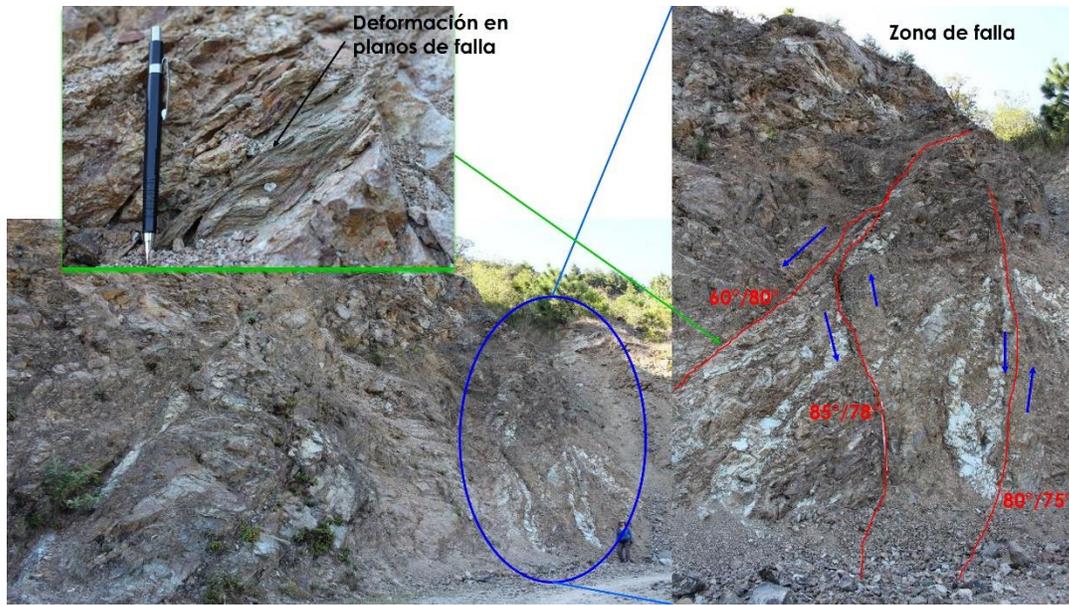
Este tipo de proceso se ha identificado cercano a zonas pobladas o en zonas de constate trafico como son las carreteras y caminos. Muchos de ellos han sido desarrollados a causa de la construcción de estos accesos (Fig. 33)



**Figura 33.** Deslizamiento producto de construcción de camino.

En Motozintla el 36 % de los deslizamientos tienen como principal factor detonante las actividades antropogénicas, ya que la abrupta topografía exige a los pobladores vías de acceso que reduzcan los tiempos de traslado desde la zona baja donde se encuentra la ciudad hasta los poblados de las zonas altas y la carretera que se encuentra en la zona de parteaguas. Muchos de los caminos de terracería que se han realizado han sido por la renta de maquinaria de los dueños de tierras y parcelas para sacar los cultivos, sin embargo existe una falta de asesoría para los trazos de camino y estudios del terreno.

Como se observa en las Figuras 33, 34 y 35 el corte de ladera para la construcción del camino ha producido deslizamientos de escala considerable que mantienen continuamente inservible esta vía de acceso. La zona es geológicamente inestable, debido a que se presenta una litología de Mica-Esquisto (Fig. 34) que ha desarrollado planos donde las rocas pueden deslizarse, estos planos están a favor de la pendiente y la existencia de fallas muestran que las rocas han estado sometidas a grandes esfuerzos que las deforman, por lo que es una zona que requiere de avanzados estudios de ingeniería.



**Figura 34.** Deslizamiento sobre camino en esquistos, se observa la deformación en los planos de falla con NE-SW.



**Figura 35.** Medidas de contención inoperantes en zonas geológicamente inestables.

Las áreas donde los deslizamientos se han originado naturalmente tienen una velocidad de desarrollo menor y se puede observar el comienzo de estos por las grietas de tensión que se generan en la zona de hundimiento, y el crecimiento de la apertura de estas grietas (Fig. 36).



**Figura 36.** Grietas de tensión con aperturas entre 10 cm y 20 cm durante el desarrollo de un deslizamiento,

#### 7.2.4 Flujos

Los flujos en Motozintla son el resultado de un proceso anterior, debido a las altas pendientes, un deslizamiento previo produce flujos en los cauces o ladera, las lluvias arrastran materiales pendiente abajo que depositan en los ríos para alimentar flujos mayores. Tal es el caso de los flujos de escombros que impactan a la zona urbana debido al acarreo de material colectado por todos los afluentes, principalmente en la zona Oeste y los provenientes de las zonas altas del río Mina.

Dentro de los procesos cartografiados, los flujos abarcan el 13 %, sin embargo el fuerte desarrollo de la red de drenaje de la cuenca ayuda a que los flujos durante temporadas de lluvias escalen en potencia y daño (Fig. 37). El 37 % de los flujos se encuentran en zonas de

metagranito, regularmente en zonas de alteración argilica donde previamente han ocurrido otros procesos originados por actividades antropogénicas, como lo son la construcción de caminos.



**Figura 37.** Depósitos de caídas y deslizamientos que alimentarán flujos de escombros en temporada de lluvias.

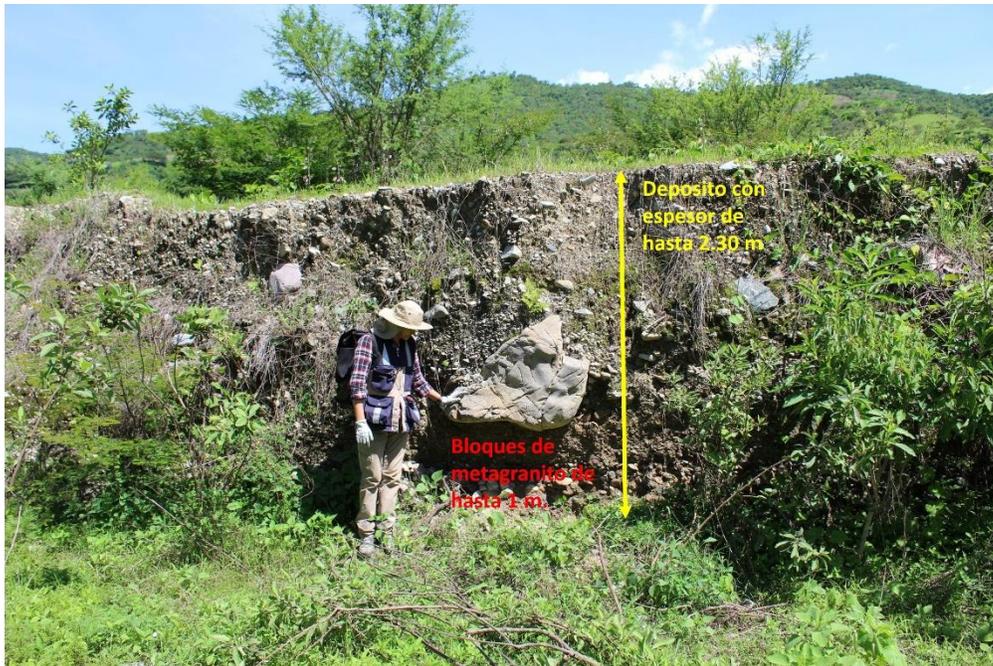
Los depósitos de estos flujos regularmente se encuentran sobre los márgenes de los afluentes y durante las crecidas son arrastrados. En las figuras 38, 39 y 40 se observa la columna de constantes depósitos sobre el cauce del río Xelajú. La figura 35 muestra la columna estratigráfica de los primeros 8.5 m, con eventos de moderada a fuerte potencia ya que presenta espesores entre 20 cm y 50 cm, entre ellos son notables los dos depósitos de flujo hiperconcentrando en la base, que reflejan largos periodos de baja potencia en el cauce. También se pueden encontrar pequeños rastros de depósitos de los eventos más potentes (Fig. 40) como los de 1998 y 2005 en la superficie del cauce, que de acuerdo a las anécdotas de la gente, arrastro rocas de hasta 1m.



**Figura 38.** Flujos de escombros depositando en el margen del río Xelajú



**Figura 39.** Columna estratigráfica de los depósitos sobre el cauce del Río Xelajú, a la altura de la zona Urbana



**Figura 40.** Depósitos sobre el cauce del río Xelajú, pertenecientes a eventos de alta potencia.

### 7.2.5 Complejos

En Motozintla los movimientos complejos están fuertemente relacionados a los deslizamientos que debido a la pendiente de la zona cambian su dinámica y comienzan a fluir. Esta dinámica del material es causada por la acción de gravedad sobre canales y pendientes abruptas, cuando las partículas se encuentran secas, los depósitos recorren los trayectos hasta que la pendiente se estabiliza, con un factor detonante como la lluvia, estos tienden a reactivarse. El 4 % de los procesos de remoción en masa de la zona corresponden a este tipo y ocurren principalmente en el metagránito y mica- esquisto, en un 44% y 24% respectivamente.

La Figura 41 muestra el comportamiento de un PRM complejo, el cual ha iniciado como un deslizamiento y se ha depositado casi inmediatamente debido a que parece tener una zona de deslizamiento cerrada que lo retiene sobre un cauce de menor apertura, aquí el proceso ocurre también a la inversa, los pequeños flujos de agua y escombros van acarreado e incidiendo sobre el depósito en sus periferias, lo que provocará inestabilidad en el depósito y dará libertad para producir un deslizamiento.



**Figura 41.** Proceso de remoción de masa complejo, iniciado como deslizamiento y continuado como flujo de escombros.

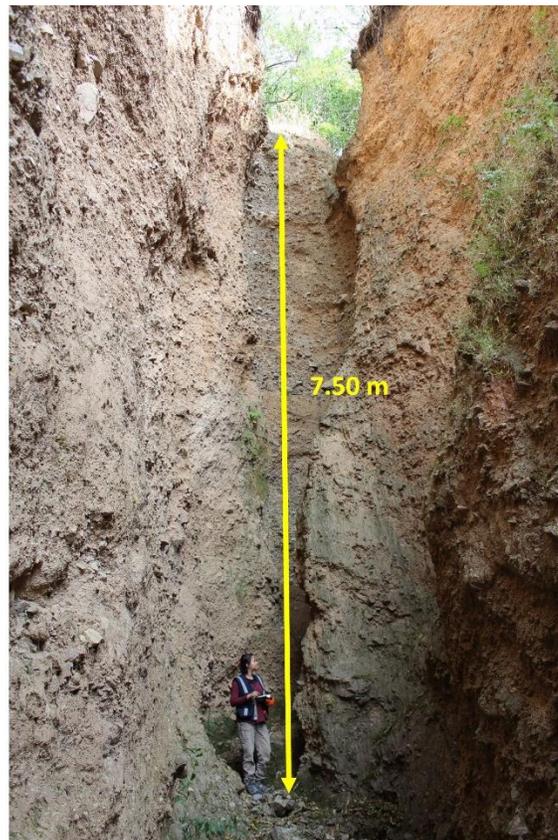
### 7.2.6 Avalanchas

Las avalanchas son comunes en las márgenes del río Xelajú, principalmente en la zona Sur. Como se puede ver en el mapa geológico se delimita una litología como avalancha debido a que todo el cuerpo de roca se presenta fracturado en forma de rompecabezas, es decir clastos mayores se observan fragmentados pero no separados, dando la impresión de ser una brecha formada por clastos de metagranito. Estos afloramientos se pueden observar en las zonas de piedemonte del barrio Lindavista (Fig. 42).

Este cuerpo es altamente erosionable por flujos de agua, y se puede observar en la Figura 43, se encuentra sobre la carretera que va de Motozintla a Buenos Aires, cerca de la estación de Protección civil, donde hay una intensa socavación del depósito debido el sistema de cunetas aplicado en la carretera que pasa arriba. Esta socavación alimenta directamente al río Allende el cual atraviesa la zona urbana y deposita en el cauce del Xelajú.



**Figura 42.** Fragmentos de roca en rompecabezas, comúnmente encontrados en zonas de avalancha.



**Figura. 43.** Socavación del material producto de avalancha.

### **7.3 MAPA DE PELIGRO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA**

El mapa de peligro por PRM plasma todo el análisis realizado anteriormente, así como la representación del conocimiento obtenido del área de estudio. Este es el resultado de la unión de seis capas temáticas que se han considerado como los factores condicionantes de PRM en la cuenca y que al sumarse reflejan las posibles áreas que se encuentran bajo diferentes grados de peligro.

Los factores condicionantes que se ocuparon, son el mapa de pendientes, el mapa de geología, el mapa de densidad de drenaje, el mapa de uso de suelo y vegetación, la configuración de la red de caminos y el inventario de PRM realizado. Estas variables fueron analizadas mediante el método de jerarquización AHP para conocer el orden de influencia de cada una y la ponderación que tendrá al sumarse (Tabla 21). Los valores que se usaron en los mapas fueron reclasificados de acuerdo al número intervalos de diferenciación existentes en las clasificaciones de los mapas individuales. Por ejemplo si para el mapa de pendientes había 5 intervalos, estos fueron reclasificados del 1 al 5, siendo las pendientes más bajas 1 y las más altas 5.

Dado que los PRM presentan dinámicas diferentes, se realizó primero el mapa de peligros del terreno (Fig. 44), donde se utiliza una ponderación que tiene a la pendiente como la variable de mayor peso (Tabla 21), posteriormente para realizar el mapa de peligro para la población actual, adicionando una capa de población (Fig. 45). En el mapa de peligros del terreno se observan las zonas de mayor riesgo a PRM en las pendientes, considerando a las zonas de menor pendiente las de menor riesgo debido a que se acercan a la horizontalidad, sin embargo Motozintla presenta una topografía muy abrupta por lo que PRM como los flujos, tienen un mayor potencial de desarrollo sobre los cauces o planicies aluviales,

**Tabla 21.** Tabla de variables jerarquizadas y su ponderación para el mapa de peligro del terreno.

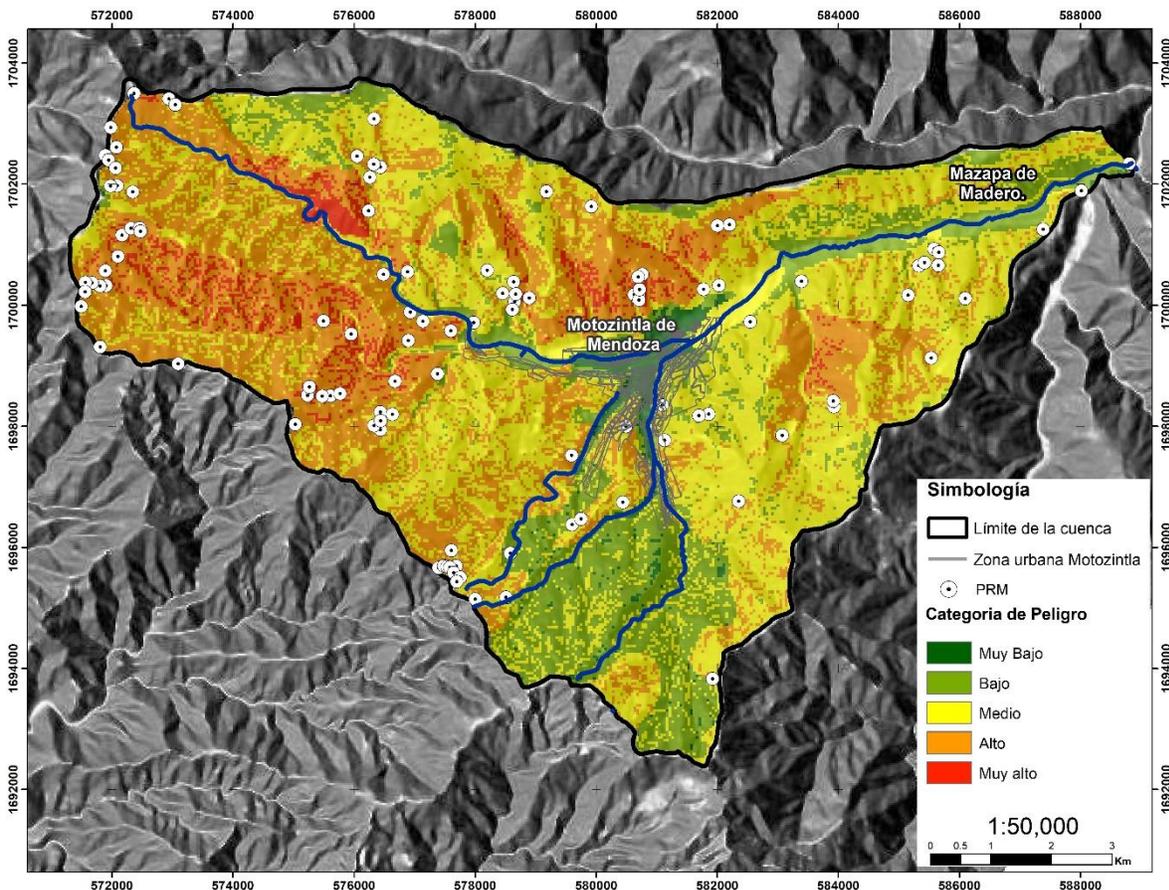
<b>Variable</b>	<b>Importancia en el análisis y ponderación</b>
Pendientes	0.39
Geología	0.22
Red de caminos	0.16
Densidad de drenaje	0.12
Uso de suelo y vegetación	0.06
Inventario de PRM	0.5

De acuerdo con la tabla de ponderación ( Tabla 21 ) podemos observar que la variable más importante es la de pendientes debido a que los PRM se originan a partir de la topografía del terreno, básicamente de la pendiente que exista; a continuación se encuentra la geología que representa al material que entra en acción y las condiciones del terreno, si fueran rocas sanas la probabilidad de que ocurrieran los PRM disminuiría considerablemente; el tercer lugar lo ocupa la red de caminos, ya que es la principal acción que desestabiliza las pendientes y donde la mayoría de los procesos se desarrollan, sin embargo esta es una condición antrópica y depende de las actividades humanas; la densidad de drenaje ocupa el cuarto lugar debido a que es una agente modelar del terreno (similar a los cortes de camino ) pero que necesita tiempo para incidir en el relieve, este es potenciado por intensos periodos de lluvias que incitan a la generación de flujos; el uso de suelo tiene menor importancia ya que se ha observado que debido a las fuertes pendientes los espesores de suelo son pequeños y de manera natural ocurren deslizamientos en zonas con extensa cubierta forestal; por último se encuentra el inventario de procesos, este presenta una ponderación baja debido a que son eventos puntuales que una vez ocurridos intensifican la probabilidad de ocurrencia en su periferia ya que no se ha determinado su posible cinemática.

La zona Noroeste (Fig 44) de la cuenca presenta la mayor susceptibilidad al peligro, en esta se encuentra la cota de mayor altitud de la cuenca, la roca se presenta como un esquisto con alto

contenido de micas más una intensa alteración argílica, se encuentra sobre la falla Polochic que genera una zona estructuralmente inestable y deformada, todo esto conjugando con la desestabilización de la pendiente por la carretera y caminos que la cruzan.

La segunda zona se presenta al norte del poblado de Motozintla, zona en la que se ha reubicado la población afectada por los desastres de años anteriores. Aquí, la influencia de la pendiente, una alta concentración de caminos, zonas deforestadas, intenso fracturamiento de la roca y una fuerte densidad de drenaje se conjugan para delimitarla como una zona de muy alto peligro.



**Figura 44.** Mapa de peligro por procesos de remoción de masas en el terreno de la cuenca de Motozintla.

La zona al sur (Fig. 44) presenta una zonificación de peligro bajo a moderado, esto es debido a que se encuentra el área de mayor zona forestal, en consecuencia al reclasificarla presente un área de mayor resistencia a PRM. Sin embargo al analizarlo, no es prospectable para colocar una gran población, ya que la invasión por parte de esta, generaría condiciones antropogénicas

de peligro por actividades como tala, cortes de taludes por construcción de caminos y vivienda, generando así condiciones similares a otras zonas de la cuenca, que se encuentran en niveles de peligro medio a fuerte.

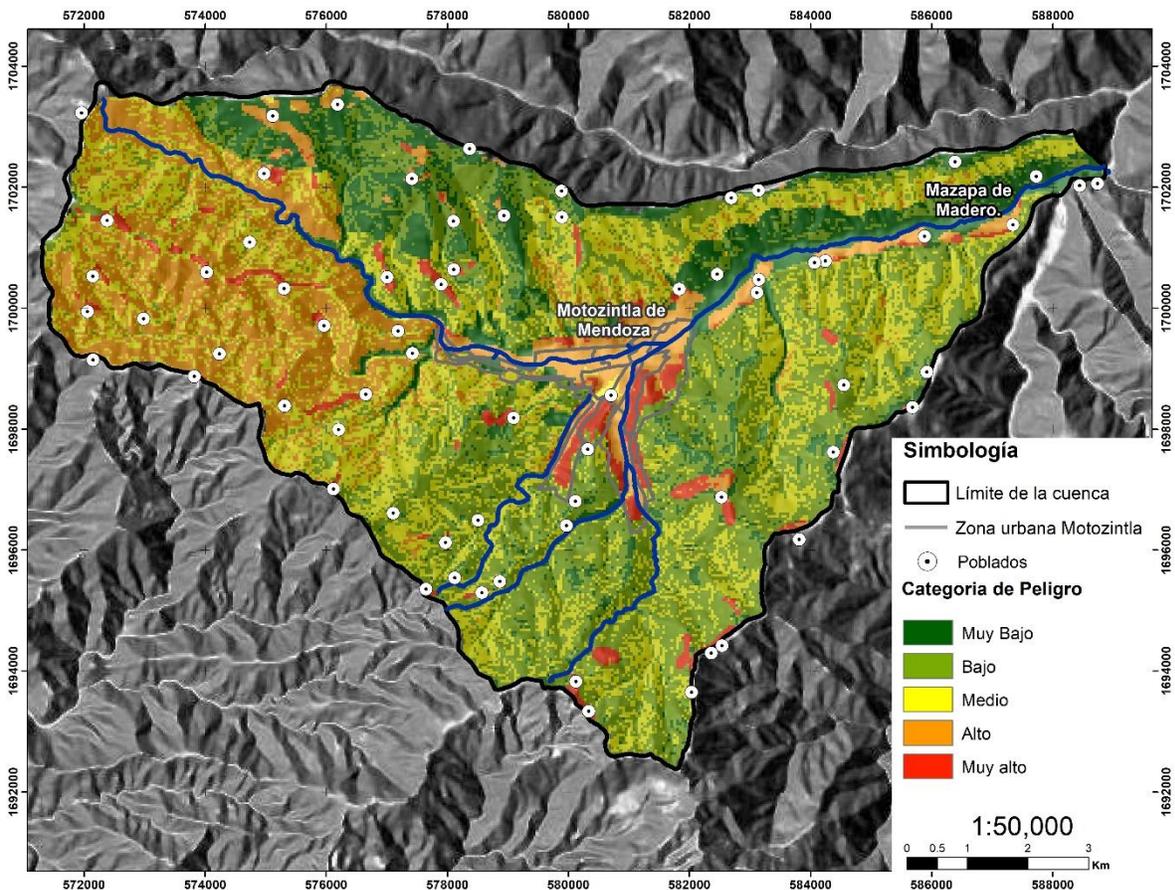
De acuerdo con el mapa de peligros de terreno (Fig. 44), el área urbana se encuentra en la zona menos vulnerable ante este tipo de procesos, lo cual es real si los procesos solo se desarrollaran en las pendientes altas. Esta no se encuentra en una zona de pendientes sino en la planicie aluvial, la cual concentra los flujos de la cuenca, por ello es fuertemente susceptible a procesos de tipo flujo, debido a ello se realizó el mapa de peligro por PRM para la población actual (Fig. 45).

En el mapa de peligros por PRM para la población (Fig. 45), se volvió a realizar la jerarquización de las variables considerando a la población sobre las demás, mostrando el peligro cercano a estas, por lo que la población queda ponderada con el valor más alto, seguido de la capa de pendientes y la geología (Tabla 22).

**Tabla 22.** Tabla de variables jerarquizadas y su ponderación para el mapa de peligro por PRM para la población.

Variable	Importancia en el análisis y ponderación
Población	0.49
Pendientes	0.18
Geología	0.13
Red de caminos	0.07
Densidad de drenaje	0.07
Uso de suelo y vegetación	0.03
Inventario de PRM	0.3

Como se observa en la Figura 45, la zona urbana que abarca la ciudad de Motozintla se encuentra en un peligro alto a muy alto, esto debido a que concentra una mayor cantidad de población en una zona de peligro implícito. Dentro del área urbana se observa una pequeña mancha en color amarillo perteneciente a una categoría de peligro medio, corresponde con las áreas que han recibido el menor impacto durante los eventos de 1998, 2005 y 2010, aquí se encuentran las colonias del centro donde existen la mayor cantidad de albergues de acuerdo a los protocolos de reacción de protección civil.



**Figura 45.** Mapa de peligro por procesos de remoción en masas para la población de la cuenca de Motozintla.

En la zona noroeste se sigue apreciando un área de peligro medio a muy alto, la zona se encuentra sobre pendientes alta y sobre la traza de falla Polochic, concentra pequeños poblados de apenas algunas casas que se encuentran bajo riesgo alto y que deberían ser reubicadas antes de que ocurra un evento desafortunado. Durante los trabajos de campo se pudo apreciar que

algunas casas ya se encuentran bajo estos peligros al grado de encontrarse en riesgo (Fig. 46 y 47).



**Figura 46.** Deslizamiento recurrente cercano a zonas pobladas en la zona noroeste de la cuenca de Motozintla.



**Figura 47.** Grietas de tensión dentro de vivienda en zonas de deslizamientos al noroeste de la cuenca de Motozintla.

## 8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

- La cuenca de Motozintla es un espacio geográfico de muy alto peligro por procesos de remoción en masa, las condiciones del terreno no son las óptimas para mantener una población, ni en sus zonas de pendientes ni en sus zonas de planicie.
- Los índices morfométricos indican que la cuenca se encuentra en una etapa de madurez, es decir que sus cauces están bien consolidados y el sistema de drenaje bien desarrollado para evacuar el agua de las precipitaciones de manera rápida. El tiempo calculado para que una gota de lluvia llegue desde la parte más alta a la zona de desfogue de la cuenca se encuentra entre 2 y 4 horas lo que da un margen muy corto de evacuación. Esta evacuación consistiría en salir de la cuenca, sin embargo, por la zona serrana que se encuentra, es probable que las cuencas adyacentes se encuentren en las mismas condiciones.
- El método heurístico y el criterio multivariable son útiles para evaluar peligros por PRM ya que al compararse con el inventario de procesos la correspondencia de estos es alta. Debe continuarse alimentado este estudio con más variables relacionadas a los procesos para fortalecer los resultados.
- Existe un control estructural y litológico en la zona, el cual se observa en el mapa de densidad de drenaje, pendientes y peligros. Este está definido por la traza de la falla Polochic.
- Las decisiones de crecimiento urbano no se encuentran bajo un plan de desarrollo en Motozintla, prueba de esto la reubicación en zonas de peligro y la construcción de bodegas en zonas del cauce.
- Los peligros naturales son un control demográfico en Motozintla.

- Motozintla necesita de su propio monitoreo de las condiciones del terreno y no estudios esporádicos. La zona es un laboratorio para la evaluación del peligro y el riesgo.
- Deben considerarse estudiar las características de las pendientes entre 10° y 20° en la cuenca, podrían funcionar como las mejores zonas de refugio.
- Evaluar el peligro para Motozintla necesita de estudios, meteorológicos, hidrológicos, geológicos e hidráulicos, ya que los diferentes PRM presentan sus propias dinámicas y una sola área de estudio no puede abarcarlas.
- Generar un estudio hidráulico para modificar las velocidades de aporte de agua de los afluentes podría generar una opción que evitara la rápida concentración de agua en el cauce principal, permitiendo desfogar el agua de acuerdo a las necesidades y así evitar una inundación.
- Generar un mapa estructural basado en análisis vectorial de los esfuerzos, permitirá identificar las zonas que están bajo mayor estrés, esto con el fin de definir las zonas donde el terreno es más inestable.

## REFERENCIAS

---

- Aceves Quesada, F., Legorreta Paulín, G., & Álvarez Ruíz, Y. (2017). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín De La Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 329-342. <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v66n2/v66n2a9.pdf>
- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 41, 7–25. [https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci\\_arttext](https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext)
- Alcántara Ayala, I. y Murillo García, F. (2007). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 66, 47-64.
- Andreani, L., Le Pichon, X., Rangin, C. and Martinez-Reyes, J. (2008). The southern Mexico block: main boundaries and new estimation for its Quaternary motion. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 179(2), pp.209-223.
- Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Simon-Labric, T., Gutiérrez, A., Chiquín, E. and Morán, S. (2011). The Caribbean-North America-Cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic-Motagua fault systems: Pull-up and zipper models. *Tectonics*, 30(3), p.n/a-n/a.
- Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Núñez Roman, O. (2011). Efectividad De La Metodología Mora- Deslizamientos Provocados Por El Terremoto De Cinchona , Costa Rica Effectiveness of the Modified Mora-Vahrson Methodology in the Case of Landslides Caused By the Cinchona Earthquake ., *Revista Geográfica de América Central*.
- Bokwa, A. (2013). Natural Hazard. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 711–718). Canada: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- Camacho Gutiérrez, A. (2015). Geomorfología en la cuenca alta del río Motozintla-Mazapa, Chiapas - México (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Campos, A. 1992. *Proceso del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. San Luis Potosí, México. 22-23 p.
- Carballido P., A. B. (2008). Análisis comparativo de las Reubicaciones urbanas por desastre en Motozintla, Chiapas. El caso de las colonias nuevo milenio III y fraccionamiento Vida Mejor III, entre 1998 y 2005.

- Cardozo, C. P. (2013). Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Tesis de maestría. UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA. Recuperado a partir de [http://ig.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010\\_Cardozo-Paola.pdf](http://ig.edu.ar/wp-content/uploads/sites/68/2017/08/2010_Cardozo-Paola.pdf)
- Carfantan, J. C. (1977). La cobijadura de Motozintla, un paleoarco volcanico en Chiapas. *Revista del instituto de Geología UNAM*, 1(2), 133–137.
- CENAPRED. (2004). Guía Básica para la elaboración de atñas estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (version 2004). (1a ed.). México.
- Chester, S., Sandra, B., Eduardo, C., & David, M. (2017). Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador, 399–412.
- Clague, J. J. (2013). Landslide. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 594–602). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- CONAPO. (2006). Proyecciones de la población de México 2005-2050. En : SEDESOL. (2018). Cédulas de Información Municipal (SCIM). Recuperado a partir de <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=07&mun=057>
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D. (2013). Landslide Types. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 615–618). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_344](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_344)
- Dai, F.C. and Lee, C.F. (2001). Frequency–volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology* 59(3), 253-266
- Delgado-Granados, H. (2012). Elaboración de mapas de peligro geológico: pasado, presente y futuro... [www.ugm.com](http://www.ugm.com). Revisado 29 noviembre 2016, de [http://www.ugm.org.mx/docs/webinar/2012/31\\_Agosto\\_2012\\_webinario.pdf](http://www.ugm.org.mx/docs/webinar/2012/31_Agosto_2012_webinario.pdf)
- Diario Oficial de la Federación, (2014). Ley general de protección civil... <http://www.diputados.gob.mx/>. Revisado 29 noviembre 2016, de [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC\\_030614.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC_030614.pdf)
- Díaz, J. S. (2009). Deslizamientos Análisis geotécnico. Universidad Industrial de Santander.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., & Ibsen, M.-L. (1996). *Landslide Recognition: Identification, Movement and Courses*. John Wiley & Son.
- EPOCH (European Community Programme). (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community. Recuperado a partir de

[http://www.ukgeohazards.info/pages/eng\\_geol/landslide\\_geohazard/eng\\_geol\\_landslides\\_classification\\_epoch.htm](http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification_epoch.htm)

- Gares PA, Sherman J, Nordstrom KF (1994) Geomorphology and natural hazards. Geomorphology 10. En: Rivard, L. A. (2009). Geohazard-associated geounits: Atlas and glossary. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augmdomus*, 4, 144–158. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2637>
- Giandotti, M., 1934. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. Istituto Poligrafico dello Stato, 8, 107–117. En: Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Temps de concentration: un paradoxe dans l'hydrologie moderne. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244>
- GECh, (2005). Gobierno del Estado de Chiapas. Programa Emergente: "Huracan Stán" (pp. 78-81). Gobierno del Estado de Chiapas.
- Gobierno Federal -SEDESOL. (2011). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Motozintla 201. Motozintla, Chiapas. Revisado de <http://www.atlasmunicipalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Gómez, O., Carlos, J., Cabrera, O., & Pablo, J. (2008). El proceso de análisis jerárquico (ahp) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia Et Technica*, 14(39), 247–252.
- Gonzales de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Temps de concentration: un paradoxe dans l'hydrologie moderne. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244>
- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchitara, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7, 88–108.
- Gutiérrez - Elorza, M. (2008). Geomorfología., Pearson, Prentice hall, 898 págs.
- Guzmán-Speziale. (2010). The North America–Caribbean plate boundary west of the Motagua–Polochic fault system: a fault jog in Southeastern Mexico. *Journal Of South American Earth Sciences*, 13(4-5), 459-468. [http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811\(00\)00036-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0895-9811(00)00036-5)
- Guzzetti, F., Mondini, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>

- Guzzetti, F. (2013). Rockfall. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 875–877). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_302](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_302)
- Horton, R.E., 1945, Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology: *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Hungr, O. (2013). Debris Flow. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 149–151). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_85](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_85)
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y> INEGI (2015) Número de habitantes. Chiapas. (2015). [Cuentame.inegi.org.mx](http://cuentame.inegi.org.mx). Revisado 2 Mayo de 2017, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/chis/poblacion/>
- Hutchinson, J. N. (1988). "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology", in Bonnard, C. (ed.). *Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides*, A. A., Balkema, Rotterdam, Netherlands, vol. I, pp. 3-35. En: Alcántara-Ayala, I. (2000). *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 41, 7–25. [https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci\\_arttext](https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext)
- Ibáñez G, A. (2004). Análisis Morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes, aplicado a la peligrosidad de crecidas.
- Imaizumi, F., Sidle, R.C. and Kamei, R. (2008). Effects of forest harvesting on the occurrence of landslides and debris flows in steep terrain of central Japan. *Earth Surface Processes and Landforms* 33(6), 827-840
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2017). Recuperado a partir de <https://www.inegi.org.mx/>
- Jackson, L. E. (2013). Slide and Slump. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 913–919). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4\\_323](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_323)
- Johnstone, D. and Cross, W.P., 1949. *Elements of applied hydrology*. New York: Ronald Press.
- Lizama, C. (2016). Propuesta metodológica para establecer áreas de riesgo por remoción en masa, Chile. [Revistas.unal.edu.co](http://www.revistas.unal.edu.co). Revisado 29 noviembre 2016, de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/37023/43846>

- López Cadenas de Llano F. 1998. Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa, Madrid, España: 945 p
- Lugo H, J. (1988). Elementos de geomorfología aplicada. (1st ed., p. 128). México DF: Dirección General de Publicaciones, Instituto de Geografía, UNAM.
- Mardones, M. & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción. EURE (Santiago), 27(81). <http://dx.doi.org/10.4067/s0250-71612001008100006>
- Mariscal, A. (2006). Motozintla, el municipio chiapaneco más vulnerable a fenómenos meteorológicos. La Jornada. Revisado de <http://www.jornada.unam.mx/2006/05/30/index.php?section=estados&article=038n1est>
- Martí J. (2017). Assessing Volcanic Hazard: A Review. En Oxford Handbooks Online. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190699420.013.32>
- Martínez-Gutiérrez, G., Díaz-Gutiérrez, J. J., & Cosío-González, O. (2010). Análisis morfométrico en la cuenca hidrológica San José del Cabo, B.C.S., México: Una aproximación en la identificación de potenciales áreas de captura. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 27(3), 581–592.
- Martínez-Ramírez, Steinich, B., & Tuxpan, J. (2017). Morphometric and hypsometric analysis in the Tierra Nueva Basin, San Luis Potosí, México. Environmental Earth Sciences, 76(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6766-7>
- Mora C, S., & Vahrson, W.-G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 31(1), 49–58. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.xxxi.1.49>
- Mugica-Mondragón, R., 1987, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas. México, D.F., IMP, Proyecto C-2009, no publicado.
- Muñiz-Jauregui, J., & Hernández-Madrigal, V. (2012). Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico. Revista Mexicana De Ciencias Geológicas, 29(1), 103-114.
- Oporto, R. B. (2006). Estudio de fenómenos de remoción en masa. Sector niebla-San Ignacio comuna de Valdivia. Universidad Austral de Chile.
- Paron, P. (2013). Natural Hazards in developing countries. En P. T. Bobrowsky (Ed.), Encyclopedia of Natural Hazards (pp. 718–726). Canada: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Investigaciones Geograficas, 2017(92), 1–2. <https://doi.org/10.14350/rig.52822>

- Penck, A. (1894), *Morphologie der Erdobefflache*, 2 vols. 471 and 696. En: Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM., 41, 7–25. [https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci\\_arttext](https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext)
- Penck, W., 1924. *Morphological Analysis of Land Forms*. Hafner Publishing, New York (English translation by Czech, H., and Boswell, K.C., 429 p). En: Rogers, J. D., & Chung, J. won. (2016). Applying Terzaghi's method of slope characterization to the recognition of Holocene land slippage. *Geomorphology*, 265, 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.020>
- PMA (2007)- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas, 2007. Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Multinacional, No. 4, 432p., 1 CD-ROM.
- Quijano C, J. E. (2014). Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la cuenca amagá. <https://doi.org/10.1007/s00606-011-0505-4>
- RAE. (2018). *Diccionario de la Real Academia Española*.
- Ramos C., A., Trujillo Vela, M., & Prada S., L. (2015). Análisis de los procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras Y Proyectos*, (18), 63-75. <http://www.scielo.cl/pdf/oyp/n18/art06.pdf>
- Rivard, L. A. (2009). *Geohazard-associated geounits: Atlas and glossary*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Roa, J., 2006, Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela: *Ágora Trujillo*, 17, 185-205.
- Rogers, J. D., & Chung, J. won. (2016). Applying Terzaghi's method of slope characterization to the recognition of Holocene land slippage. *Geomorphology*, 265, 24–44. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.020>
- Ruiz H, A., & Campos, N. (1994). Análisis geomorfométrico aplicado al ordenamiento territorial. *Revista Geográfica de América Central*, 30, 65–81.
- Salazar, J. J. (2008). *Geología, petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas, área de Motozintla de Mendoza*. UNAM.
- Sánchez Núñez, J. M. (2012). *Procesos de remoción en masa en la cuenca de Motozintla Chiapas*. Tesis Doctoral. UNAM.

- Schaaf, P., Weber, B., Weis, P., Groß, A., Köhler, H. y Ortega-Gutiérrez, F., 2002, The Chiapas Massif (México) revised: New geologic and isotopic data for basement characteristics. *Neues. Jahrb. Geol. Paläontol. Abh*; v.225, p.1-23.
- Scheidegger, A.E. 1991. *Theoretical Geomorphology*. Berlín: Springer. En: Chester, S., Sandra, B., Eduardo, C., & David, M. (2017). *Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador*, 399–412
- SEDESOL. (2018). *Cedulas de Informacion Municipal (SCIM)*. Recuperado a partir de <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=07&mun=057>
- Serrano, A. V., M. A.; Díaz- Padilla, G.; López-Luna, M. A.; Báez - González, A.D y Garrido-Ramírez, E. E.; 2006. *Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Chiapas. (Período 1961-2003)*. INIFAP. SAGARPA: Libro Técnico No. 1. Ocozocoautla, Chis., México. 186 páginas.
- Sharpe C., F.S. (1938), *Landslides and related phenomena*, Columbia University Press, New York. En: Alcántara-Ayala, I. (2000). *Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología*. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 41, 7–25. [https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci\\_arttext](https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext)
- Saaty, T. L. (1990). *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/doi:10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/doi:10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sidle, R. C. (2013). *Mass movement*. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 657–660). Canada: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- Strahler, A. N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Tarolli, P., & Cavalli, M. (2013). *Geographic information system (GIS) and Natural Hazards*. En P. T. Bobrowsky (Ed.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 378–385). Canada: springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4>
- Terzaghi, K., 1943. *Theoretical SoilMechanics*. JohnWiley & Sons 510 p
- Terzaghi, K., 1950. *Mechanismof landslides*. In: Paige, S. (Ed.), *Application of Geology to Engineering Practice*. Berkey Volume, Geological Society of America, pp. 83–123
- USGS. (2004). *Landslide Types and Processes*. Recuperado a partir de <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>
- Varnes, D. J. (1978). *Slope Movement Types and Processes*. *Transportation Research Board Special Report*, (176), 11–33. [https://doi.org/In Special report 176: Landslides: Analysis and Control](https://doi.org/In%20Special%20report%20176%3A%20Landslides%3A%20Analysis%20and%20Control), Transportation Research Board, Washington, D.C.

- Viramontes-Olivas, O. A., Escoboza-García, L. F., Pinedo-Álvarez, C., Pinedo-Álvarez, A., Reyes-Gómez, V. M., Román-Calleros, J. A., & Pérez-Márquez, A. (2007). Morfometría de la cuenca del río San Pedro, Conchos, Chihuahua. *Tecnociencia*, I(3), 21–31.
- Wieczorek, G..1996. Landslide Triggering Mechanisms. Chapter 4. in: A.K. Turner and R.L. Schuster (eds.), *Landslides—Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247:36-75. Washington, D.C.: National Academy of Sciences
- Xiao, H., Huang, J., Ma, Q., Wan, J., Li, L., Peng, Q., & Rezaeimalek, S. (2017). Experimental study on the soil mixture to promote vegetation for slope protection and landslide prevention. *Landslides*, 14(1), 287–297. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0634-x>