



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES

**ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE TIPOS DE DESLIZAMIENTOS Y SUS ZONAS DE
SUSCEPTIBILIDAD EN LA MICROCUENCA EL VENTILADOR, ANGANGUEO,
MICHOACÁN, MÉXICO**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS

PRESENTA

ALEJANDRO RAFAEL DE LA LUZ D'ELIA

DIRIGIDA POR:

DR. EUSEBIO JR. VENTURA RAMOS

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO

NOVIEMBRE 2011



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Facultad de Ciencias Naturales
Facultad de Ingeniería
Facultad de Psicología

Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

ANÁLISIS Y DEFINICIÓN DE TIPOS DE DESLIZAMIENTOS Y SUS ZONAS DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA MICROCUENCA EL VENTILADOR, ANGANGUEO, MICHOACÁN, MÉXICO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Alejandro Rafael de la Luz D'Elia

Dirigida por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Co-Director:

M en I. Pablo Talamantes Contreras

SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Presidente

M. en I. Pablo Talamantes Contreras
Secretario

M. en C. Omar Chávez Alegria
Vocal

M. en G. Carmen Paz Castro Correa
Suplente

Dr. Sergio Sepúlveda Valenzuela
Suplente

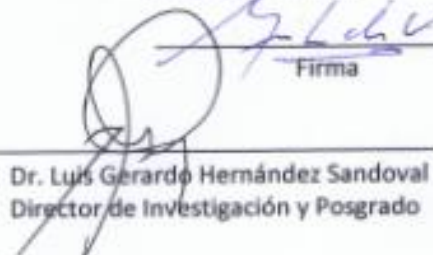
Biol. Jaime Ángeles Ángeles
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre 2011
México

RESUMEN

Las remociones en masa o deslizamientos, son uno de los desastres naturales más frecuentes en zonas montañosas de México que causan daños principalmente en asentamientos humanos vulnerables. Tal es el caso de lo ocurrido en febrero de 2010 en Angangueo, Michoacán, donde la combinación de lluvias extremas en laderas de pendientes pronunciadas y deforestadas, contribuyeron a la generación de remociones en masa con daños incluso fatales. “El Ventilador” es una microcuenca de aporta a la población de Mineral de Angangueo. El inventario de deslizamientos en el área muestra 46 remociones, la mayoría deslizamientos de tipo superficial y en menor cantidad caída de rocas y flujos de detritos. Las remociones se produjeron en suelos volcánicos muy intemperizados. Este trabajo, presenta el análisis de factores condicionantes de remociones aplicando análisis jerárquico para obtener su susceptibilidad. Así mismo, se determinó el peligro y la vulnerabilidad de la población, concluyéndose que más del 80% de las viviendas de la localidad de Dolores, con 302 habitantes, se encuentra entre los valores de Muy alta, Alta y Mediana vulnerabilidad. Usando Sistemas de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas y se modelaron los procesos, con el fin de facilitar el análisis espacial de factores, así como la caracterización y diagnóstico de la microcuenca utilizando los modelos Automated Geospatial Watershed Assessment - Kinematic Runoff and Erosion (AGWA - KINEROS) y la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE).

Palabras Clave: (Susceptibilidad de remoción en masa, Deslizamientos, Procesos en laderas, Vulnerabilidad de la población).

SUMMARY

Mass movement or landslides are one of the more frequent natural disasters in mountainous regions of Mexico, which normally cause damage, mostly in vulnerable population centers. Such is the case of what happened in February 2010 in Angangueo, Michoacan, where the combination of extreme rainfall events on deforested steep slopes, contributed to the generation of mass movements with even fatal damage. "El Ventilador" microwatershed is a contributing watershed to the town of Mineral de Angangueo. The landslides inventory in the area resulted in 46 identified mass movements, most them corresponding to surface soil landslides and to a lesser degree, rocks falls and debris flows. Soil landslides occurred in highly weathered volcanic soils. This work shows the analysis of mass movements conditioning factors applying hierarchical analysis to obtain their susceptibility. Also, the population hazard and vulnerability was determined, concluding that more than 80% of houses in the locality of Dolores, with 302 inhabitants, fall in the categories of very high, high and moderate vulnerability. Using Geographic Information Systems (GIS), maps were generated and process were modeled, with the goal of facilitating the spatial analysis of factors, as well as the characterization and diagnosis of the microwatershed using the Automated Geospatial Watershed Assessment - Kinematic Runoff and Erosion (AGWA – KINEROS) model and the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).

Keywords: (Mass movement susceptibility, Landslides, Hillslope processes, Population vulnerability).

DEDICATORIAS

A Dios.

A mi familia (Laura, Alex Jr. y Emilio).

A mis padres y hermanas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos por haberme invitado a participar en el proyecto: RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA AMBIENTAL DE LAS MICROCUENCAS DE APORTE A LA POBLACIÓN DE MINERAL DE ANGANGUEO, MICHOACÁN; MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS DE MANEJO DEL AGUA Y PRESERVACIÓN DE SUELOS, mismo que fue desarrollado para la Comisión Nacional del Agua (CNA) bajo Convenio de Colaboración N° SGIH-GDTT-UAQ-11/03/RF/CC.

Agradezco a todo el equipo de trabajo establecido por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), el Colegio de Postgraduados (COLPOS) de la UACH y la Universidad Autónoma de Querétaro – Facultad de Ingeniería (UAQ), por todas las aportaciones para la realización de este trabajo.

Agradezco la colaboración y guía del Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos en la realización de este trabajo, también la revisión de los doctores y maestros Carmen Paz Castro Correa, Omar Chávez Alegría, Pablo Talamantes Contreras y Sergio Sepúlveda Valenzuela.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico durante el posgrado.

Gracias a todos los maestros de la MAGIC que nos compartieron un poco de su experiencia y conocimiento.

Gracias a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) y a la Facultad de Ciencias Naturales.

Gracias a la Universidad de Chile: Facultad de Arquitectura y Urbanismo (Departamento de Geografía) y a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (Departamento de Geología) por darme la oportunidad de realizar una estadía académica.

CONTENIDO

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Conceptualización del Problema.	1
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Importancia y Justificación del Estudio.	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.	9
2.1. Cuenca.	9
2.2. Características Generales de las Laderas.	11
2.2.1. Nomenclatura de una ladera natural.	12
2.3. Clasificación y Descripción de los Tipos de Remociones en Masa.	13
2.3.1. Clasificación.	13
2.3.2. Tipos de remociones en masa.	15
2.3.2.1. Caídos o derrumbes.	15
2.3.2.2. Deslizamientos.	17
2.3.2.3. Flujos.	22
2.3.3. Descripción de factores condicionantes de procesos de remociones en masa.	25
2.3.3.1. Geología y geotecnia.	26
2.3.3.2. Geomorfología.	27
2.3.3.3. Hidrología e hidrogeología.	28
2.3.3.4. Vegetación.	29
2.3.3.5. Clima.	31
2.3.3.6. Actividad Antrópica.	32
2.3.4. Descripción de factores detonantes de procesos de remociones en masa.	32
2.3.4.1. Precipitaciones.	33
2.4. Inventario de Remociones en Masa.	34
2.5. Proceso de Análisis Jerárquico.	35
2.6. Conceptualización del Riesgo y Vulnerabilidad.	41
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	45
3.1. Objetivo General.	45
3.2. Objetivos Específicos.	45
3.3. Hipótesis.	45
IV. METODOLOGÍA DE TRABAJO.	46
4.1. Localización del Área de Estudio.	46
4.2. Metodología para la Caracterización Físico – Geográfica.	47
4.2.1. Caracterización físico-geográfica.	47
4.2.1.1. Fisiografía.	48
4.2.1.2. Pendiente.	48
4.2.1.3. Morfometría de la cuenca.	48
4.2.1.4. Hidrología.	49
4.2.1.5. Vegetación.	49
4.2.1.6. Edafología.	49
4.2.1.7. Geología.	49
4.2.1.8. Geomorfología.	50
4.2.1.9. Clima.	50
4.3. Metodología para Determinar el Diagnóstico de la Microcuenca.	50
4.3.1. Modelación hidrológica con el modelo KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model).	50
4.3.2. Modelación de erosión y sedimentación.	51
4.4. Metodología para el Levantamiento del Inventario de Remociones en Masa.	52

4.5.	Susceptibilidad de Remociones en Masa.	53
4.5.1.	Evaluación de la susceptibilidad.	53
4.5.1.1.	Datos de entrada (factores condicionantes).	56
4.5.2.	Proceso de análisis jerárquico.	59
4.6.	Marco Social.	61
4.7.	Peligro y Vulnerabilidad Física – Social.	62
4.8.	Riesgo.	64
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	65
5.1.	Caracterización Físico-Geográfica de la Microcuenca “El Ventilador”.	65
5.1.1.	Fisiografía.	65
5.1.2.	Características morfométricas.	67
5.1.3.	Hidrología.	69
5.1.4.	Vegetación.	71
5.1.5.	Edafología.	73
5.1.6.	Geología regional.	76
5.1.7.	Geología local.	77
5.1.8.	Geomorfología.	80
5.1.9.	Clima.	82
5.2.	Diagnóstico de la Microcuenca “El Ventilador”.	86
5.2.1.	KINEROS, escurrimiento e infiltración.	86
5.2.2.	Erosión RUSLE.	92
5.2.2.1.	Factor R.	92
5.2.2.2.	Factor K.	93
5.2.2.3.	Factor LS.	94
5.2.2.4.	Factor C.	95
5.2.2.5.	Erosión Potencial.	97
5.2.2.6.	Erosión Actual.	98
5.3.	Inventario de Remociones en Masa (Microcuenca “El Ventilador”).	102
5.4.	Análisis del Tipo de Remociones en Masa en la Microcuenca “El Ventilador”.	106
5.5.	Análisis de la Susceptibilidad.	107
5.6.	Análisis de Factores Condicionantes de Procesos de Remociones en Masa (Mapas Temáticos).	109
5.6.1.	Modelo digital de elevación.	110
5.6.2.	Mapa de geomorfología (unidades del paisaje geográfico).	111
5.6.3.	Mapa de pendientes.	114
5.6.4.	Mapa de exposición de laderas (orientación).	119
5.6.5.	Mapa de geometría de las laderas.	121
5.6.6.	Mapa de saturación y concentración de flujo.	125
5.7.	Marco Social.	126
5.7.1.	Población.	126
5.7.2.	Características educativas.	128
5.7.3.	Discapacidad.	129
5.7.4.	Calidad de la vivienda.	130
5.7.5.	Características económicas.	134
5.8.	Vulnerabilidad Social.	134
5.8.1.	Densidad de población.	134
5.8.2.	Probabilidad de ocurrencia.	141
5.8.3.	Importancia relativa de los factores condicionantes de remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador”.	141
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	145
6.1.	Conclusiones.	145
6.2.	Recomendaciones.	146
	BIBLIOGRAFÍA.	147
	ANEXOS EN DIGITAL (CD).	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Principales deslizamientos, caídos y flujos de suelos y rocas de 1988 a 2007 (CENAPRED, 2010).....	3
Tabla 2.	Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978).	14
Tabla 3.	Clasificación de remociones en masa Dikau et al (1996).....	15
Tabla 4.	Escala de velocidad de remociones en masa según Cruden et al (1996).	24
Tabla 5.	Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Lara et al., 2008).	26
Tabla 6.	Efectos de la saturación por precipitaciones según Prieto (1985).	33
Tabla 7.	Escala de preferencias para la matriz de comparaciones pareadas.....	37
Tabla 8.	Valores del índice de consistencia aleatoria.....	41
Tabla 9.	Matrices de comparaciones pareadas, pesos y razón de consistencia de factores condicionantes y clases en las capas de datos, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	54
Tabla 10.	Matriz de comparaciones pareadas, pesos y razón de consistencia de los factores condicionantes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	61
Tabla 11.	Datos estadísticos básicos de la localidad de Dolores, Angangueo Michoacán.....	61
Tabla 12.	Matriz de evaluación del riesgo por remociones en masa.	64
Tabla 13.	Índices morfométricos de la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	67
Tabla 14.	Uso del suelo y vegetación. Elaboración propia a partir de datos SIG.	71
Tabla 15.	Tipo de suelos. Elaboración propia.	74
Tabla 16.	Unidades geológicas. microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	79
Tabla 17.	Remociones en masa por unidad de escurrimiento, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	87
Tabla 18.	Remociones en masa por unidad de infiltración, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	89
Tabla 19.	Clasificación, área y valor de C de la cobertura y uso de suelo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	97
Tabla 20.	Base de datos y caracterización de remociones, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	104
Tabla 21.	Complemento de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	104
Tabla 22.	Escala sugerida de amenaza en laderas para deslizamientos (CENAPRED, 2006) y adaptada para la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	107
Tabla 23.	Unidades geomorfológicas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	112
Tabla 24.	Unidades geomorfológicas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	114
Tabla 25.	Rangos de pendientes (en grados y por ciento), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	116
Tabla 26.	Total de remociones por rangos de pendiente (en grados), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán”.	116
Tabla 27.	Remociones con pendiente discretizada en SIG y en campo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	117
Tabla 28.	Orientación de laderas y remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	119
Tabla 29.	Mapa de Orientación de laderas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	121
Tabla 30.	Geometría de laderas y remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	124
Tabla 31.	Población total en el Municipio de Angangueo. Fuente: INEGI (2010).	127
Tabla 32.	Porcentaje de densidad de población, Dolores, Angangueo.....	136
Tabla 33.	Vulnerabilidad por número de viviendas y población expuesta a remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	139

Tabla 34. Datos del fenómeno de precipitación para la estación climatológica Ciudad Hidalgo.
Fuente: IMTA 2010. 141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subdivisiones de una Cuenca hidrográfica.....	9
Figura 2. Perfil de una ladera.....	12
Figura 3. Tipos de remociones en masa (Varnes, 1978). (a) Caídas, (b) Deslizamientos, (c) Volcamientos, (d) Flujos, (e) Extensiones laterales.....	14
Figura 4. Desprendimiento.....	16
Figura 5. Caídas de rocas.....	16
Figura 6. Deslizamientos rotacionales.....	18
Figura 7. Deslizamiento Traslacional.....	19
Figura 8. (a) Movimiento simple, (b) Movimiento múltiple, (c) Movimiento sucesivo, (Hutchinson, 1988).....	20
Figura 9. Partes de un deslizamiento (Varnes, 1978).....	20
Figura 10. Avalancha de detritos.....	23
Figura 11. Flujo de detritos.....	23
Figura 12. Creep o flujo muy lento.....	23
Figura 13. Mapa de localización general del municipio de Angangueo, Michoacán, México y la microcuenca “El Ventilador”.....	46
Figura 14. Mapa de localización de la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	47
Figura 15. Esquema para determinar la susceptibilidad de remociones en masa.....	62
Figura 16. Esquema para determinar la amenaza o peligro por remociones en masa.....	63
Figura 17. Esquema para determinar la vulnerabilidad social.....	63
Figura 18. Mapa de Fisiografía, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	66
Figura 19. Curva Hipsométrica, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	68
Figura 20. Perfil del cauce principal, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	69
Figura 21. Mapa hidrológico, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	70
Figura 22. Mapa de Uso del Suelo y Vegetación, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	73
Figura 23. Mapa de Edafología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	75
Figura 24. Mapa de Geología Regional, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	77
Figura 25. Mapa de Geología local, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	80
Figura 26. Mapas de Geomorfología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	82
Figura 27. Mapa de distribución de la precipitación (método IDW), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	84
Figura 28. Mapa de distribución de la temperatura (método IDW), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	85
Figura 29. Esgurrimiento (mm), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	88
Figura 30. Infiltración (mm), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	90
Figura 31. Flujo pico (m ³ /s), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	92
Figura 32. Clasificación y ubicación espacial de los tipos de suelo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	94
Figura 33. Clasificación del factor LS, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	95
Figura 34. Clasificación de la cobertura y uso de suelo en función del factor C, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	96
Figura 35. Resultado del análisis de erosión potencial aplicando la Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo (RUSLE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	98
Figura 36. Resultado del análisis de erosión actual aplicando la Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo (RUSLE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	100
Figura 37. Producción de sedimentos (ton/ha/año), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	102
Figura 38. Mapa del Inventario de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.....	103

Figura 39. Tipos de remociones identificados, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	106
Figura 40. Histograma que muestra el área de zonas con deslizamientos que cae dentro de cada una de las clases del mapa de susceptibilidad, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	108
Figura 41. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	109
Figura 42. Modelo digital de elevación (MDE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	111
Figura 43. Unidades del paisaje y geomorfología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	113
Figura 44. Mapa de pendientes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	115
Figura 45. Histograma: Rangos y tipos de pendiente (en grados), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	117
Figura 46. Mapa de Geometría de laderas, microcuenca El Ventilador, Angangueo, Michoacán.	122
Figura 47. Mapa de Geometría de laderas convexas, rectas y cóncavas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	123
Figura 48. Mapa de saturación y concentración de flujos, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	126
Figura 49. Pirámide de población, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	128
Figura 50. Características educativas, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	129
Figura 51. Discapacidad, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	130
Figura 52. Vivienda construida de lámina de cartón o material de desechos, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	131
Figura 53. Vivienda construida de madera, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	131
Figura 54. Vivienda construida de adobe, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	132
Figura 55. Vivienda construida de tabique, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	132
Figura 56. Características económicas (PEA), Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.	134
Figura 57. Densidad de población, Localidad de Dolores, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	135
Figura 58. Mapa de peligro o amenaza de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	138
Figura 59. Mapa de vulnerabilidad por vivienda y número de habitantes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	139
Figura 60. Mapa de rangos de población, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	140
Figura 61. Peso de los factores condicionantes en análisis jerárquico para determinar la susceptibilidad, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.	142

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Conceptualización del Problema.

La topografía de nuestro país, y la exposición a eventos y fenómenos hidrometeorológicos, determinan que los procesos de remoción en masa constituyan uno de los peligros geológicos/geotécnicos más importantes en ambientes de tipo montañoso, donde las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del paisaje de relieve montañoso lo convierten en una fuente considerable de fenómenos de este tipo.

Por otro lado, la relación entre el hombre y su entorno se vuelve cada vez más compleja sobre todo ante el efecto de fenómenos asociados al cambio climático. Las cuencas hidrográficas, por ser la unidad física en la cual tienen lugar todos los procesos naturales, son asimismo la unidad natural y lógica para el desarrollo agrícola, ambiental y socioeconómico. Sin embargo, con el crecimiento demográfico y el aumento de las necesidades de urbanización, industrialización y producción de alimentos, los efectos de la actividad antropogénica hacen cada vez más vulnerables a los centros de población adyacentes o localizados dentro de las cuencas.

La microcuenca denominada “El Ventilador”, se ubica en una zona de montaña del Oriente del Estado de Michoacán, donde la población se ha establecido cerca o sobre el cauce de la misma. Esta zona se caracteriza por tener un relieve muy escarpado y una respuesta hidrológica muy rápida que genera flujos con gran velocidad y arrastre de sedimentos hacia el poblado de Dolores y Mineral de Angangueo, cabecera del municipio del mismo nombre (Aguilar *et al.*, 2010).

El lunes 1º de febrero de 2010, al nor-orienté del estado de Michoacán, en los límites con el estado de México, se tuvieron nevadas y granizadas que dejaron capas de hielo de hasta 20 cm de espesor. En los siguientes 4 días se

presentaron precipitaciones atípicas en la zona que generaron ondas de avenida que provocaron diversos problemas en varias localidades de la zona, entre las que se destaca la población de Dolores, Angangueo.

Las características topográficas de la zona, donde existen pendientes muy fuertes, así como el alto grado de deforestación, provocan el deslizamiento del material de la cubierta de la zona montañosa.

Las localidades de Dolores y Angangueo sufrieron el impacto de un flujo líquido con grandes concentraciones de sólidos, con las correspondientes consecuencias. El flujo líquido podría no haber causado problemas severos si el cauce estuviera libre de obstáculos. El problema se magnificó al integrarse al flujo el material disponible en el cauce acumulado durante el tiempo, por el deslizamiento de laderas conteniendo diversos tamaños de materiales pétreos provenientes de los cortes en laderas, tiros de minas, y de los deslizamientos de áreas desprovistas de vegetación producto de la deforestación.

La problemática socioeconómica, en conjunto con la presión sobre los recursos naturales de la población en la microcuenca “El Ventilador”, han derivado en la alteración del ecosistema, propiciando la degradación del medio ambiente y sus procesos naturales. A causa de esta alteración, en febrero de 2010, al parecer se combinaron varios factores, uno de ellos, detonante y caracterizado por la presencia de lluvias atípicas que en conjunción con factores condicionantes como la pendiente, el uso de suelo, la geología, etc., causaron remociones en masa que afectaron en pérdidas humanas y materiales a una parte de la localidad de Dolores y Angangueo.

1.2. Antecedentes.

De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2010) los casos más relevantes de deslizamientos, caídos y flujos de suelos y rocas de 1988 a 2007 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales deslizamientos, caídos y flujos de suelos y rocas de 1988 a 2007 (CENAPRED, 2010).

Fecha	Ubicación	Tipo de fenómeno	Características del fenómeno
1998 y 2005	Motozintla, Chiapas	Deslizamientos de laderas e inundaciones	Históricamente Motozintla ha sido afectada por lluvias intensas que además de generar inundaciones y desbordamientos del río, han ocasionado deslizamientos de suelos y rocas. Entre los eventos más importantes figuran los deslizamientos y flujos de suelos y rocas detonados por las lluvias intensas de 1998 debidas al huracán Mitch y los ocasionados por el huracán Stan en 2005 los daños materiales fueron más de 800 viviendas destruidas y 14 mil damnificados. <i>En ambos casos las pérdidas humanas sumaron poco más de 180.</i>
26 Sep. 1999 a 7 Oct. 1999	Sierra Norte de Puebla	Deslizamientos de laderas	Las lluvias intensas, producto de la Depresión Tropical 11, detonaron cientos de deslizamientos, caídos y flujos de suelos y rocas de esa región que abarca los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz. Se presentaron daños materiales por más de 240.6 millones de dólares. <i>Hubo 263 personas fallecidas y 110 perecieron en el trágico deslizamiento de Teziutlán.</i>
27 Mar. 2002 a 7 Abr. 2002 y 16 Dic. 2002 a 21 Feb. 2003	Tijuana, BC	Deslizamientos de laderas	Una fuga en el sistema de drenaje y las lluvias de invierno produjeron sendos deslizamientos en las colonias Defensores de BC y Cumbres del Rubí, con un saldo total de 124 viviendas destruidas. Gracias a la lentitud con la que ocurrieron ambos fenómenos se evacuó a la población, aunque las pérdidas fueron millonarias.
2007	Sierra Negra de Puebla	Deslizamiento y caídos de rocas	Un deslizamiento de rocas y suelos impactó y sepultó a un autobús de pasajeros. El deslizamiento ocurrió en una ladera ubicada a un costado de la carretera Tlacotepec-Tehuacán, en el municipio de San Miguel Eloxochitlán, Puebla, en la Sierra Negra. <i>Ocasiónó la muerte de 32 personas</i>
2007	Juan de Grijalva, municipio de Ostuacán, Chiapas	Deslizamiento de suelos y rocas	Este deslizamiento fue de dimensiones extraordinarias (poco más de 55 millones de metros cúbicos, casi 7 mil veces más grande que el de Teziutlán) y es considerado como uno de los más grandes ocurridos en el mundo. Obstruyó, de manera casi inmediata, el cauce del río Grijalva y originó una ola que arrasó varias viviendas, una iglesia. <i>Causó la pérdida de 19 vidas y 6 desaparecidos de la localidad de Juan de Grijalva.</i>
2007	Laderas del volcán La Malinche, en Tlaxcala		Otro suceso de dimensiones más grandes (80 millones de metros cúbicos, aproximadamente) ocurrió ese mismo año en las laderas del volcán La Malinche, en Tlaxcala, no afectó a la población ni a obras de infraestructura. Este tipo de fenómenos han ocurrido en otras zonas y épocas, aunque es posible que no se hayan documentado debido a que ocurrieron en zonas despobladas.

A raíz de los procesos de remociones en masa ocurridos en el mes de febrero del 2010, la Comisión Nacional del Agua (CNA), solicitó a la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), la Universidad Autónoma de Querétaro -

Facultad de Ingeniería (UAQ), y el Colegio de Postgraduados (CP), realizar el proyecto de restauración hidrológica ambiental de las microcuencas de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán, (“Las Jaras”, “El Ventilador”, “El Charco”, “San Luis” y “El Tigre”); mediante la implementación de prácticas de manejo del agua y preservación de suelos. Estas instituciones académicas, desarrollaron un enfoque similar para determinar el análisis de las remociones en masa, usando para tres microcuencas análisis jerárquico y la estabilidad de laderas en Sistemas de Información Geográfica (SIG). El objetivo general consistió en llevar a cabo la implementación de prácticas de regulación hídrica para el control y corrección de cauces torrenciales para disminuir la velocidad de las corrientes de agua y controlar las crecidas súbitas donde se manifiestan los fenómenos de erosión, transporte y depósito de materiales de arrastre. De manera específica, uno de los objetivos fue: Realizar el estudio hidrológico, de erosión y sedimentación, riesgo de deslizamientos y cambio de uso de suelo en las microcuencas de aporte a Mineral de Angangueo, con la finalidad de establecer el plan de acción para la restauración hidrológica ambiental.

Existen otras publicaciones que abordan las remociones en masa bajo tres perspectivas, la primera relacionada con las características geológicas/geotécnicas de los materiales, la segunda, asociada a los factores condicionantes y detonantes asociados al índice de estabilidad de laderas, y la tercera, es más de tipo geográfico, en donde se considera mayormente el riesgo, contemplando la amenaza y la vulnerabilidad de las poblaciones ante estos fenómenos. A continuación, se describen los trabajos de investigación y tesis más relevantes:

Estudios de características geológicas/geotécnicas de los materiales.

- Hernández (2002), elaboró un estudio para generar un mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado en la región de Zapotitlán de Méndez, Puebla. Aquí se enfatiza en el análisis estadístico de factores y se modelan en software de Sistemas de Información Geográfica, sin mencionar que la estabilidad de laderas y muestreos geotécnicos de campo fueron determinantes.
- Capra *et al* (2006), estudiaron a la Geología como factor condicionante

- de procesos de remoción en la Sierra Norte de Puebla.
- Capra *et al* (2003ab), estudiaron las características de movimientos en masa en zona volcánica de la ciudad de Teziutlán y estudiaron los procesos de remoción en la zona de Zapotitlán de Méndez, Puebla y describen la relación de la litología y el tipo de movimiento.
 - Flores *et al* (2002) generaron cartografía morfogenética y las remociones en masa en Teziutlán, Puebla.
 - Cruz *et al* (2000), estudiaron deslizamientos en la Carretera Tijuana-Ensenada, Baja California, mediante muestreos geotécnicos y horizontes litológicos como planos de falla de los fenómenos en los cortes de carretera.

Estudios enfocados a factores condicionantes y detonantes asociados al índice de estabilidad de laderas.

- Aguilar *et al* (2010), realizaron el análisis técnico de la vulnerabilidad hidrológica ante el crecimiento urbano. Caso de Angangueo, Michoacán.
- Caballero *et al* (2006), realizaron el estudio de los efectos de un evento hidrometeorológico ocurrido en Septiembre de 1998 en Motozintla, Chiapas, donde se caracterizan las remociones en masa y se detalla la descripción de los flujo de detritos que afectaron la zona.
- Lugo *et al* (2005), hicieron un estudio de la clasificación del relieve afectado por lluvias en 1999, e identificaron los tipos de remociones, causas y efectos.
- Alcántara *et al* (2004), realizaron estudios sobre los deslizamientos detonados por precipitaciones, mismos que según este estudio representan un riesgo importante en México ya que alrededor de 200 municipios de los estados de Puebla, Veracruz e Hidalgo se vieron afectados por las inundaciones y los procesos de remoción en masa como resultado de una depresión tropical del Océano Atlántico en octubre de 1999. Cientos de remociones se presentaron en laderas de pendientes fuertes provocados por las intensas precipitaciones, que en algunas localidades llegó a 420 mm en un período de 24 horas. De acuerdo con datos oficiales, 263 personas murieron y 1 475 654 habitantes se vieron afectados por las inundaciones y los deslizamientos.
- Lugo *et al* (2001), realizaron un análisis sobre los procesos gravitacionales en la Sierra de Puebla por un evento hidrometeorológico ocurrido en 1999.
- Vázquez *et al* (2001), estudiaron los efectos causados por la lluvia en 1999, calculando los periodos de retorno de más de 25 años para la Sierra Norte de Puebla.

Estudios de riesgo, contemplando la amenaza, vulnerabilidad y términos.

- García et al (2006), realizaron un inventario de 206 puntos de peligro por remociones en la Sierra de Guadalupe, ubicada al norte de la Ciudad de México y se citaron los principales mecanismos de falla.
- Alcántara et al (2000), realizaron una propuesta para uso de términos de procesos de remoción de masas en México.
- Alcántara et al (2008), a través del Instituto de Geografía (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), publicaron una propuesta de elaboración de un inventario nacional En ese trabajo, el IG presenta un inventario de las remociones en masa ocurridas en La Sierra Norte de Puebla y destaca su importancia en cada estudio.
- Finalmente, aún cuando existen varios estudios sobre deslizamientos, pocos son los trabajos reportados para el Estado de Michoacán y en específico para la zona de Mineral de Angangueo, y mucho menos existen antecedentes de su estudio bajo un enfoque de cuencas.

1.3. Importancia y Justificación del Estudio.

Una de las razones que motivaron a la realización de este estudio, se fundamenta en que no existen muchos trabajos de análisis de los factores condicionantes y detonantes de los fenómenos de remociones en masa con un enfoque de cuenca y en particular que consideren las unidades de escurrimiento. La elaboración de proyectos a este nivel, permite estudiar con mayor detalle dichos factores y la influencia o interacciones que tiene el hombre como un factor antrópico detonante. Sin duda alguna, la población juega un papel muy importante en la alteración del medio físico, a través del crecimiento poblacional y los cambios de uso de suelo derivados de la explotación de los recursos naturales (agua, suelo, bosques).

Es de destacar que existen muchas metodologías para determinar la susceptibilidad del terreno a sufrir remociones en masa, destacan por su importancia los métodos estadísticos (tratamiento de datos), heurísticos, y determinísticos. Por las características de este trabajo, se puede asumir que la

aplicación del análisis jerárquico puede ser una combinación de métodos estadístico y heurístico (más orientado al segundo). Sin embargo, se hace una formulación de una hipótesis que sugiere el factor condicionante de remociones en masa ocurridas y que bajo las mismas condiciones podrían volver a presentarse. Dentro de los métodos estadísticos también se aplican: (a) Cartografiar los deslizamientos (actuales o pasados), (b) Cartografiar los factores supuestamente condicionantes y (c) Clasificar el terreno (susceptibilidad) de acuerdo con la relación observada entre los factores condicionantes y la presencia de deslizamientos en el terreno, aspectos que fueron desarrollados en este trabajo.

Los métodos heurísticos por su parte, determinan los factores condicionantes, se clasifican y ponderan de acuerdo con la importancia (esperada o asumida) en la aparición de deslizamientos. Se basa en la experiencia (subjetividad). Aquí, se establecen indicadores, umbral de pendientes, Índices simples (superposición de factores) y pueden incluirse o no procedimientos estadísticos (análisis factorial, análisis discriminante).

Basado en estas definiciones, puede sugerirse que el método de análisis jerárquico es un método confiable que permite determinar la susceptibilidad de remociones en masa y que la conjugación de factores condicionantes tiene una relación estrecha con el inventario de remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador”.

Otra de las aportaciones de este estudio, es que permitirá entender los tipos de procesos de remoción en masa que se han presentado en la microcuenca “El Ventilador” y la vulnerabilidad de los habitantes de la localidad de Dolores, municipio de Angangueo, situada justo en las márgenes del cauce principal de dicha microcuenca.

Los resultados de este trabajo pueden servir a las autoridades federales, estatales y municipales, como CNA, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Protección Civil, etc., para evaluar los efectos que los cambios de uso del suelo tienen en la respuesta hidrológica en la microcuenca y

su relación con los procesos de degradación que ocurren en la misma. Se pueden establecer o mejorar los criterios y las acciones de mitigación a través de la generación de obras de ingeniería en la cuenca alta y cuenca media (se sugiere aplicar técnicas de ingeniería naturalística para el control de la erosión y cauces, por su bajo costo), tomando en consideración las unidades de escurrimiento (infiltración-escurrimiento) y los resultados de la erosión actual. Se pueden utilizar los mapas de susceptibilidad y de vulnerabilidad para enriquecer la estrategia de seguridad a la población. Se puede actualizar el inventario de viviendas y habitantes en la zona urbanizada. Se pueden establecer programas de recuperación y reforestación de los bosques alterados o degradados. Se puede continuar con la estrategia de capacitación y difusión de programas para la población (como ya ha sucedido), con temas de erosión y deslizamientos, con un enfoque de las causas y efectos y de la importancia de preservar los bosques y la restauración de deslizamientos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1. Cuenca.

Una 'cuenca hidrográfica' se define como el espacio geográfico natural delimitado por los parteaguas de las montañas, en donde existen escurrimientos superficiales de agua, mismos que se conducen por medio de un sistema de drenaje o cauces a un punto de acumulación y tienen una salida (Cruz, 2003). La cuenca, es el lugar en donde el hombre interactúa con el medio ambiente, dándose interrelaciones entre los componentes físicos y bióticos que lo integran, por lo que es de vital importancia su entendimiento en conjunto con la identidad cultural y socioeconómica que presenta la población para acceder y explotar los recursos naturales (Cotler, 2004).

Las cuencas hidrográficas son unidades naturales para el manejo de los recursos naturales y en particular del agua, asimismo esta puede subdividirse en subcuencas, microcuencas y unidades de escurrimiento, las cuales forman parte del mismo sistema hidrológico de la cuenca (Figura 1).



Figura 1. Subdivisiones de una Cuenca hidrográfica.

Una cuenca puede dividirse en tres zonas funcionales, mismas que presentan distintas características estructurales y un grado de 'fragilidad' diferente (Cotler *et al.*, 2004).

1. La zona de cabecera (parte alta de la cuenca). Es una zona de gran fragilidad para el funcionamiento de toda la cuenca, ya que los procesos que aquí se desarrollan pueden tener repercusiones en las zonas bajas. En la zona de cabecera se inicia la captación inicial del agua, en donde la cubierta vegetal existente, actúa como reguladora de la cantidad y temporalidad del flujo del agua, protegiendo a los suelos de la erosión hídrica y la sedimentación y degradación de ríos, por consiguiente la pérdida de fertilidad de los suelos en las laderas.

2. La zona de captación- transporte (zona media de la cuenca). Es el área en la que se capta la mayor parte del agua. También aquí se transporta el agua, sedimentos y los nutrientes que provienen de la parte alta. La zona media se caracteriza por ser una zona de amortiguamiento entre la parte alta y baja de la cuenca, y normalmente es donde se presentan con mayor intensidad las actividades productivas.

3. La zona de emisión (parte baja de la cuenca). Es la zona de recepción de los cauces de agua, mismos que se caracterizan por ser más caudaloso. Esta zona normalmente recibe los impactos de las acciones realizadas en la parte media y alta de la cuenca.

Dourojeanni, (1991) menciona que la cuenca hidrográfica constituye el marco conceptual y espacial adecuado para la planeación y la gestión integral de los recursos naturales. Las cuencas hidrográficas, por ser las unidades físicas en las cuales tienen lugar todos los procesos naturales, son así mismo la unidad natural y lógica para el desarrollo agrícola, ambiental y socioeconómico. Con el crecimiento demográfico y el aumento de las necesidades de urbanización, industrialización y producción de alimentos, los efectos de la actividad antropogénica ya no se limitan a zonas pequeñas ni a una comunidad en

particular; deben examinarse en el contexto más amplio en el que ocurren (Salgado, 2005).

La planeación y ejecución de acciones bajo el contexto de un manejo integral de cuencas dependen del tamaño de la cuenca y de su jerarquía en el sistema hidrográfico. Esto conlleva a ligar los problemas con el nivel jerárquico de cuenca adecuado, tanto para su planeación como para su gestión. Es decir, que toda intervención local debe considerarse en el contexto de la situación general de la cuenca en donde se debe elaborar una metodología que considere varios niveles: cuenca, subcuenca, microcuenca, y además considerar las unidades de escurrimiento (FAO, 2007).

El manejo integral de una cuenca tiene como fin último la conservación y/o restauración del ciclo hidrológico natural de la cuenca, atendiendo durante el proceso, a objetivos intermedios como la conservación y restauración de otros recursos naturales, la reconversión productiva y formas más eficientes de aprovechamiento, y en general, el control de externalidades negativas que impactan la funcionalidad y el equilibrio ecológico de la cuenca. El propósito de este enfoque es integral y ecológico y permite tener ecosistemas más saludables capaces de proveer bienes y servicios ambientales que mejoren la calidad de vida de los habitantes (Córdova, 2010).

Bajo estas premisas, puede incluirse en la gestión integrada de cuencas, el estudio de los factores condicionantes y detonantes de procesos de remociones en masa, determinar el grado de amenaza y conocer la vulnerabilidad de la población por estos fenómenos, con ello, se podrán generar las acciones necesarias para la restauración ambiental reduciendo la erosión y energía del agua que se capta en la cuenca.

2.2. Características Generales de las Laderas.

Las laderas, o vertientes, son masas de suelo y roca cuya conformación se debe a procesos naturales. Aparentemente la mayoría de las laderas se perciben

estáticas o estables; sin embargo, los procesos de evolución del relieve (factores condicionantes y detonantes), tales como la topografía, la sismicidad, cambios en los flujos de agua subterránea, en las precipitaciones, en la resistencia al corte, meteorización o en factores de tipo antrópico inciden sobre las laderas para que se generen procesos de remociones en masa (Dikau *et al.*, 1996).

Según Suárez (1998), una ladera está conformada por una serie de elementos, los cuales se describen de manera general a continuación:

2.2.1. Nomenclatura de una ladera natural.

Una ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural.

En una ladera se definen los siguientes elementos: Altura, Pie, Cabeza o escarpe, Altura de nivel freático y Pendiente. Ésta última puede medirse en grados o en porcentaje (Figura 2).

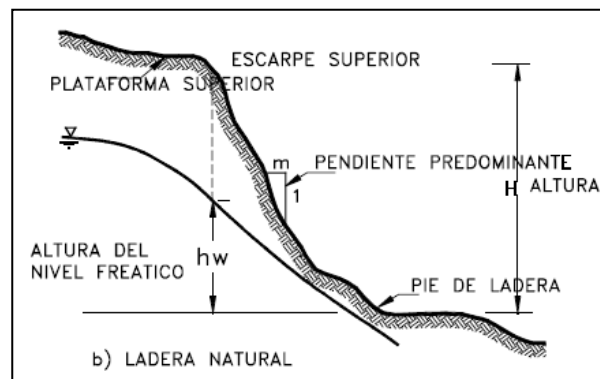


Figura 2. Perfil de una ladera.

Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento de la ladera.

2.3. Clasificación y Descripción de los Tipos de Remociones en Masa.

2.3.1. Clasificación.

El proceso de Remoción en Masa es un movimiento descendente por efecto de la gravedad de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos (Cruden, 1991). La movilización o transporte de los materiales puede ser lento o rápido, de diferentes magnitudes y generados por un conjunto de factores (Hauser, 1993).

Según Highland *et al* (2008), una remoción en masa de ladera es un término que se emplea para designar a los movimientos talud abajo de materiales térreos, que resultan de un desplazamiento hacia abajo y hacia afuera de suelos, rocas y vegetación, bajo la influencia de la gravedad.

Existen diversos conceptos y clasificaciones en el mundo que son usados para entender los procesos de remociones en masa, mismos que también son conocidos simplemente como 'deslizamientos'. El término que se usa en este trabajo para entender este proceso natural, es el de 'remociones en masa' ya que el término de 'deslizamientos' es usado como uno de los tipos de 'remociones en masa'. Esto permite un mejor entendimiento de estos procesos y su clasificación. En general las diversas clasificaciones de los procesos de remoción en masa se asocian con la mecánica específica de la falla de la pendiente y las propiedades y características de los tipos de falla.

La clasificación de procesos de remociones en masa han sido desarrolladas por Cruden *et al* (1996), considerando el tipo de movimiento y el material involucrado en los procesos de remociones en masa (Varnes, 1978) (Tabla 2 y Figura 3).

Los tipos de materiales corresponden a roca y suelo. La roca es una masa firme intacta, *in situ*, antes de comenzar el movimiento y el suelo constituido por

tierra o barro (> 80% de las partículas son menores a 2 mm) y detritos (en donde el 20-80% son partículas mayores a 2mm).

Tabla 2. Clasificación de remociones en masa (Varnes, 1978).

Tipo de movimiento		Tipo de material				
Caída		Roca	Suelo			
Toppling			Grano grueso (detritos, <80% partículas <2mm)			
Deslizamiento	Rotacional				Grano fino (barro, >80% partículas <2mm)	
	Traslacional					
Extensiones laterales						
Flujos						
Complejos						

Los tipos de movimientos que se pueden generar se clasifican en cinco tipos: Caídas o Desprendimientos (falls), Volcamientos (topples), Deslizamientos (slides), Extensión o Propagación Lateral (spreads) y Flujos (flows) (Lara et al., 2008).

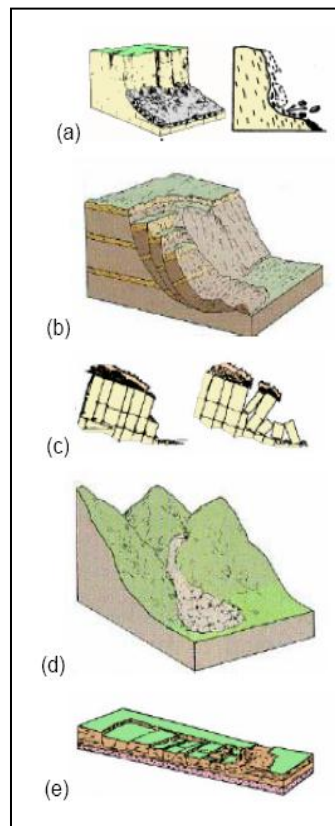


Figura 3. Tipos de remociones en masa (Varnes, 1978). (a) Caídas, (b) Deslizamientos, (c) Volcamientos, (d) Flujos, (e) Extensiones laterales.

Es de destacar que se pueden presentar procesos de remoción en masa combinados, mismos que adquieren otra nomenclatura bajo el dominio de 'remoción en masa'. Estas clasificaciones se pueden apreciar a continuación:

Dikau *et al* (1996), sugieren una clasificación con siete tipos de remociones en masa y varios subtipos (Tabla 3). Sin embargo, de alguna manera están contenidos en la clasificación de Varnes (1978) y Highland (2008).

Tabla 3. Clasificación de remociones en masa Dikau et al (1996).

Número	Tipo de movimiento	Subtipo
1	Caída o desprendimiento de suelo o rocas	
2	Vuelcos o desplome de suelo o roca	
3	Deslizamiento rotacional	Simple Múltiple Sucesivo
4	Deslizamiento traslacional	De bloques De suelo Rocoso Derrubios
5	Extensión lateral	Lateral en rocas Lateral en suelos
6	Flujos	De roca De derrubios De arena
7	Complejos	Alud o avalancha de rocas Flujo deslizante

Con el fin de tener un entendimiento más claro de los problemas de inestabilidad que pueden presentarse en las laderas naturales se describen brevemente los conceptos y características de los tipos de remociones en masa combinando el trabajo realizado por Highland, (2008), Lara *et al* (2008) y Dikau *et al* (1996):

2.3.2. Tipos de remociones en masa.

2.3.2.1. Caídos o derrumbes.

Son movimientos de suelos y fragmentos aislados de rocas que pueden caer libremente, rodando o rebotando Dikau *et al* (1996) y Highland (2008). Es común observarlos en topografías abruptas y acantilados. La forma y volumen de

los caídos depende de la naturaleza del material y del grado de alteración que presenten. Pueden clasificarse de acuerdo al tamaño de las partículas desprendidas y al origen y naturaleza del material del cual se generan (Whalley, 1984). Se presentan en materiales rocosos no consolidados o poco consolidados y en suelos. Dentro de éstos se incluyen:

- a. **Desprendimientos:** Caída de suelos producto de la erosión o de bloques rocosos, atendiendo a discontinuidades estructurales (grietas, planos de estratificación o fracturamiento) proclives a la inestabilidad (Highland, 2008).

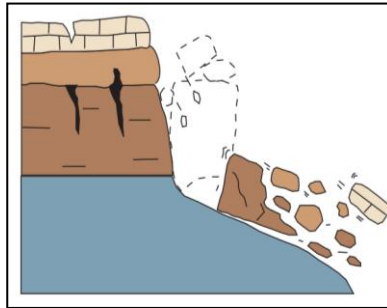


Figura 4. Desprendimiento

- b. **Vuelcos o volteos (Caídos de rocas):** Caída de bloques rocosos con giro hacia adelante y hacia afuera, propiciado por la presencia de discontinuidades estructurales (grietas de tensión, formaciones columnares, o diaclasas) que tienden a la vertical (Highland, 2008).

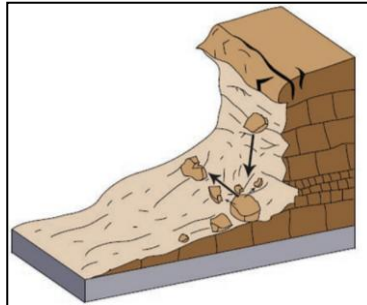


Figura 5. Caídos de rocas.

Estos tipos de remociones corresponden a movimientos rápidos a extremadamente rápidos que se generan cuando el material rocoso o suelo se desprende de una ladera de alta pendiente a través de una superficie donde no se genera cizalle, descendiendo mediante caída libre, rebotando o rodando. Puede ocurrir en este caso que sean precedidos por pequeños deslizamientos, lo cual puede darse por ejemplo en suelos cohesivos o bloques de roca. La generación

de desprendimientos, controladas por discontinuidades en la roca, está relacionada a pendientes abruptas, principalmente de inclinaciones mayores a 50°, donde la roca está directamente expuesta (Soeters *et al.*, 1996). Si el material caído rebota o se rompe con el impacto dependerá de sus propiedades y de los ángulos entre la ladera y la trayectoria de caída (Hungry *et al.*, 1988). Las acumulaciones de material detrítico en los pies de las laderas tienen ángulos entre 25° y 35°, ángulo que está directamente relacionado con el ángulo de fricción interna de las partículas. La zona de depositación presenta una vegetación caracterizada por bajas densidades de árboles y arbustos, mientras más baja la densidad mayor es el grado de actividad de la ladera (Soeters *et al.*, 1996).

2.3.2.2. *Deslizamientos.*

Se definen como movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, sobre una o varias superficies de falla delimitadas por la masa estable o remanente de una ladera. Por la forma de la superficie de falla, se distinguen:

- a. **Rotacionales:** Deslizamientos en los que su superficie principal de falla resulta cóncava hacia arriba (forma de cuchara o concha), definiendo un movimiento rotacional de la masa inestable de suelos y/o fragmentos de rocas con centro de giro por encima de su centro de gravedad. A menudo estos deslizamientos rotacionales ocurren en suelos arcillosos blandos, aunque también se presentan en formaciones de rocas blandas muy intemperizadas (Highland, 2008).

Varnes (1978) lo define como un movimiento rotatorio producido a lo largo de un eje paralelo al perfil de la ladera sobre una superficie cóncava que resulta ser la superficie de falla. A menudo la superficie puede observarse como circular pero no siempre lo es. Pueden dividirse de acuerdo al número de planos de falla similares o consecutivos que presente, o sea en rotacionales múltiples o consecutivos (Dikau *et al.*, 1996). Un indicador de movimiento es la aparición de grietas de tensión en la corona o cabeza de la ladera principal o en laderas secundarias. Generalmente produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, formándose flujos por debajo del pie de la ladera. La

superficie de falla está influenciada por las discontinuidades y es común encontrar este tipo de movimiento en suelos y rocas poco consolidadas o gravemente alteradas.

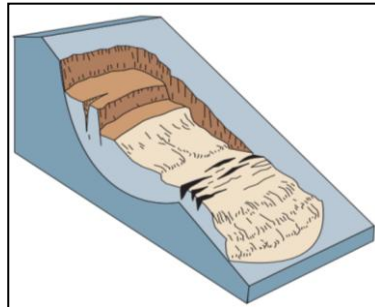


Figura 6. Deslizamientos rotacionales.

- b. **Traslacionales:** Deslizamientos en los que la masa de suelos y/o fragmentos de rocas se desplazan hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie de falla más o menos plana, con muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Usualmente determinan deslizamientos someros en suelos granulares, o bien están definidos por superficies de debilidad en formaciones rocosas, tales como planos de estratificación, juntas y zonas de diferente alteración o meteorización de las rocas, con echado propicio al deslizamiento (Highland, 2008).

Suárez, (1998) cita un concepto similar y Dikau *et al* (1996), menciona que en suelos pueden abarcar total o parcialmente el perfil del suelo pero en rocas pueden llegar a ser de un volumen considerable pues están definidos por las superficies de debilidad de las formaciones rocosas. Se clasifican de acuerdo al material que se desliza en deslizamientos de bloques, rocosos, en suelos y de derrubios. Las remociones en masa de tipo traslacional son las más inestables y comunes debido a que dependen de su control estructural y estado del material que los forme. En muchos de estos deslizamientos las masas pueden deformarse y romperse y llegar a convertirse en flujos.

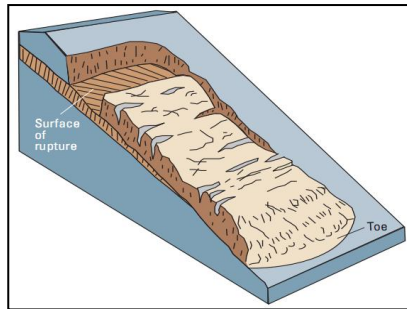


Figura 7. Deslizamiento Traslacional.

Es común que los procesos de remoción en masa se combinen o que se conviertan en otro tipo de remoción a medida que avanzan y como consecuencia generen un movimiento ladera abajo difícil de interpretar. Por esta razón se creó el concepto de 'complejo', en el cual se logran identificar dos o más tipos principales de desplazamientos Suárez (1998). Dos ejemplos de este tipo de movimientos son los aludes o avalanchas y los flujos deslizantes (Dikau *et al.*, 1996) y que también se describen según Highland (2008).

Este tipo de movimiento no ocurre a lo largo de toda la superficie de ruptura simultáneamente, sino más bien comienza en zonas donde se generan fallas locales, a menudo evidenciadas por grietas de tensión en la superficie original a lo largo de la cual se formará el escarpe principal del deslizamiento. *El inicio de estos desplazamientos se produce cuando el esfuerzo de cizalle supera el valor del esfuerzo normal y la resistencia del suelo en dicha superficie.* Cuanto mayor sea la pendiente mayor es la componente de cizalle y los deslizamientos serán más frecuentes (Hauser, 1993). Los movimientos pueden involucrar una masa individual desplazada a lo largo de una única superficie de ruptura o bien dos o más masas desplazadas a lo largo de más de una superficie, en tales casos el movimiento es catalogado como 'simple' o 'múltiple' respectivamente (Hutchinson, 1988); y si un movimiento múltiple ocurre durante un periodo de tiempo se denominará movimiento 'sucesivo' (Hutchinson, 1988) (Figura 8).

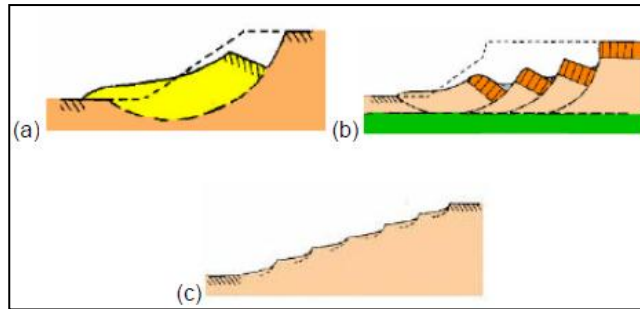


Figura 8. (a) *Movimiento simple*, (b) *Movimiento múltiple*, (c) *Movimiento sucesivo*, (Hutchinson, 1988).

Entre las partes de un deslizamiento es posible identificar la corona, el escarpe principal, el escarpe menor, tope, punta de la superficie de ruptura, cuerpo principal, flanco, pie, dedo y extremo (Varnes, 1978), (Figura 9).

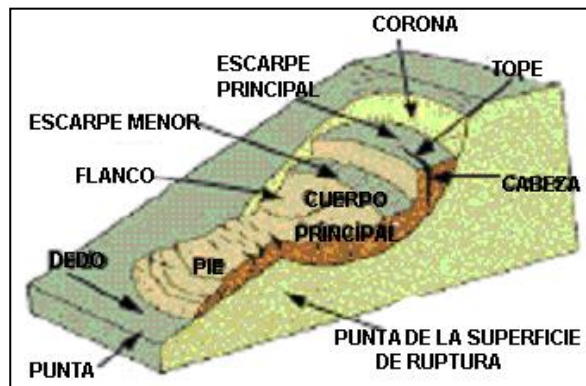


Figura 9. *Partes de un deslizamiento* (Varnes, 1978).

Los deslizamientos rotacionales ocurren a lo largo de superficies curvas y cóncavas. Estos movimientos ocurren en materiales homogéneos, por lo cual tienen gran incidencia sobre rellenos. Sin embargo, los materiales naturales no son idealmente uniformes, por esto los movimientos en laderas se orientan, al menos parcialmente, por las discontinuidades y zonas de debilidad que estos presentan. La generación de este tipo de remoción está asociada a pendientes que varían entre 20° y 40° (Soeters *et al.*, 1996).

El escarpe principal generado por un deslizamiento rotacional, es cercanamente vertical e inestable, en consecuencia pequeños movimientos podrán generar la retrogresión del deslizamiento. A esto se suman los pequeños deslizamientos que se podrán generar en las paredes de la superficie cóncava de

ruptura, dada su inestabilidad. El nivel de agua no suele presentarse a mucha profundidad y podrá drenarse de tal manera de mantener húmeda la superficie y la zona del escarpe, generando potenciales deslizamientos en la cabecera una vez que el escarpe ha alcanzado pendientes suficientes. Deslizamientos sucesivos o retrogresivos generan morfologías de tipo “escalones” en la cabecera de la superficie de deslizamiento; este tipo de movimientos se caracteriza porque parte de la masa deslizada suele formar escalones a contrapendiente producto de su rotación.

La vegetación en materiales deslizados se observa caótica y perturbada, y la ausencia de cultivos o diferencias en el uso del suelo con respecto a zonas aledañas hablan de la actividad de los movimientos (Soeters *et al.*, 1996).

En relación a los factores causantes de los deslizamientos traslacionales, se genera una superficie de cizalle aproximadamente plana, donde la masa deslizará por una superficie menos resistente que corresponderá a discontinuidades presentes ya sea en la roca o el suelo, como fallas, diaclasas, superficies de estratificación o superficies de contacto entre roca y suelo. Estos tipos de deslizamientos son en general más superficiales que los rotacionales, además, mientras la rotación de estos últimos tiende a estabilizar la masa desplazada, el deslizamiento traslacional puede continuar si la superficie de ruptura se mantiene lo suficientemente inclinada.

En la zona afectada por deslizamientos las condiciones de drenaje se desordenan e incluso están ausentes. Es común además la generación de lineamientos paralelos a la dirección de movimiento y la ausencia de vegetación.

A medida que el deslizamiento traslacional continúa, y si la velocidad de éste o su contenido de agua aumentan, el desplazamiento podría tomar una forma más parecida a un flujo de detritos.

Entre los principales tipos de deslizamientos traslacionales figuran los deslizamientos en bloque. Estos pueden estar limitados por una sola estructura

mayor, también llamados deslizamientos planos. En este caso es común que la acumulación de fragmentos de material que se genera a los pies de la ladera difiera en granulometría, disminuyendo de diámetro a medida que se encuentran más alejados de ésta. La vegetación en la zona deslizada se presenta caótica y en parches, mientras que las condiciones de drenaje son normalmente buenas ya que la mayor cantidad del drenaje en este caso es interno.

Otro tipo común de deslizamiento en bloque es el que se genera en cuña, donde los límites de la superficie de deslizamiento están dados por dos o más discontinuidades que afloran en la ladera y que se intersectan, generando una línea de intersección a lo largo de la cual se desplaza la masa; los deslizamientos de barro, clasificados como complejos, compuestos de materiales finos arcillosos y que suelen ser más superficiales y ocurrir en condiciones de pendientes entre 15° y 25° (Soeters *et al.*, 1996) y los deslizamientos compuestos (intermedios entre traslacionales y rotacionales).

2.3.2.3. *Flujos.*

Se refiere a movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos; pueden distinguirse:

- a. **Avalancha de detritos:** Son esencialmente grandes, extremadamente rápidas, frecuentemente los flujos se forman cuando una pendiente inestable colapsa y resulta en detritos fragmentados que son transportados pendiente abajo, si existe agua suficiente el flujo puede convertirse en un flujo de detritos (Highland, 2008).

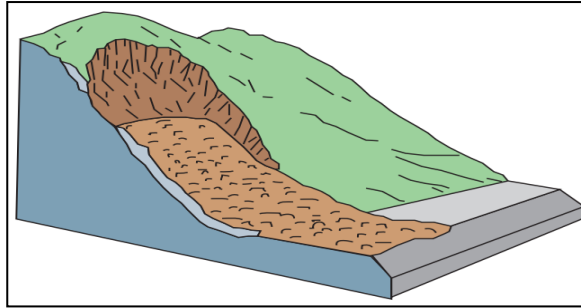


Figura 10. Avalancha de detritos

- b. **Flujos de detritos:** Son una forma de movimiento rápido de masas en el cual se pierde suelo, rocas y algunos materiales orgánicos combinados con agua para formar una mezcla que fluye pendiente abajo. Han sido informalmente e inapropiadamente llamados “flujos de lodo”, dada la cantidad de material fino que puede estar presente en el flujo. Ocasionalmente, cuando un deslizamiento rotacional o traslacional gana velocidad y el material interno pierde cohesión o se satura de agua, se puede convertir en un flujo de detritos (Highland, 2008).

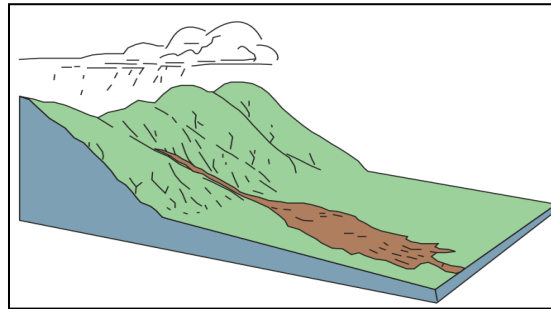


Figura 11. Flujo de detritos.

- c. **Creep o flujo muy lento:** A diferencia de los casos anteriores, es un movimiento constante pero muy lento de suelos y rocas pendiente abajo, en el que no se define con precisión la superficie de falla (Highland, 2008).

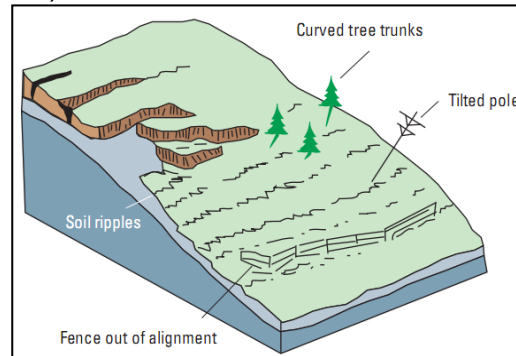


Figura 12. Creep o flujo muy lento.

Estos procesos presentan diversas tasas de movimientos, que van desde extremadamente rápidos a extremadamente lentos. A manera de unificar estos términos, Cruden *et al* (1996) asocian valores de tasa de movimiento con términos cualitativos de rapidez (Tabla 4).

Tabla 4. Escala de velocidad de remociones en masa según Cruden *et al* (1996).

Clase según velocidad	Descripción	Velocidad [m/s]	Velocidad típica
7	Extremadamente rápido	5	5 m/s
6	Muy rápido	0,05	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-4}	1,8 m/hr
4	Moderado	5×10^{-6}	13 m/mes
3	Lento	5×10^{-8}	1,6 m/año
2	Muy lento	5×10^{-10}	16 mm/año
1	Extremadamente lento	$< 5 \times 10^{-10}$	<16 mm/año

Dentro de los factores que causan los deslizamientos tipo flujos, corresponden a movimientos continuos en el espacio, donde las superficies de ruptura no son preservadas, y las masas desplazadas son fuertemente deformadas internamente, comportándose de manera similar a un líquido viscoso (Varnes, 1978) dada la cantidad de agua que presentan, presentan una reología plástica a viscoso-plástica (Pierson *et al.*, 1987). Existe una gradación desde deslizamientos a flujos, dependiendo del contenido de agua de la masa desplazada, de su movilidad (mayor o menor cohesión) y de la evolución del movimiento. De esta forma, también es posible encontrar eventos compuestos del tipo deslizamiento-flujo.

Los flujos son clasificados por diversos autores de acuerdo al tipo de material involucrado y a la cantidad de agua que presentan (Varnes, 1978; Hauser, 1993; Naranjo *et al* 1996). Así, se pueden encontrar los flujos de detritos, donde la mayor parte del material sólido corresponde a material particulado grueso; los flujos de tierra, donde el material corresponde a la fracción más fina de los suelos y el material no se encuentra saturado; y los flujos de barro, donde el material se compone principalmente de material fino y arena fina y se encuentra totalmente saturado. La dificultad en este tipo de clasificación es que no existe un acuerdo sobre los porcentajes de la fracción granulométrica que componen un

flujo de detritos y un flujo de barro, considerando más conveniente basar su clasificación según su comportamiento mecánico (Selby, 1993), donde sus propiedades mecánicas dependerán fundamentalmente de la concentración volumétrica de partículas sólidas con respecto al total de sólidos y agua, y de la forma, tamaño y distribución granulométrica de las partículas (Solís, 1995). Algunos autores (Cousot *et al.*, 1996) hacen subdivisiones, llamando flujos hiperconcentrados a aquéllos de concentraciones de sólidos menores que un 50% o 60% en volumen y que aún aparentan fluir como un líquido.

En particular, los flujos de detritos son de alta densidad, pudiendo incorporar a su masa bloques de varios metros de diámetro, además de material que se encuentra en las riberas de los cauces mediante erosión basal, lo cual incrementará su energía y velocidad. Los flujos pueden extenderse por muchos kilómetros, perdiendo velocidad en pendientes de gradientes más bajos.

2.3.3. Descripción de factores condicionantes de procesos de remociones en masa.

Es de gran importancia en el estudio de procesos de remociones en masa el papel de los factores que condicionan dichos procesos. Los factores condicionantes son aquellos elementos que determinan una condición potencialmente 'inestable'. Junto con agentes detonantes, 'condicionan' la ocurrencia de las remociones en masa, además de su velocidad y volumen de desplazamiento del material involucrado (Lara *et al.*, 2008). Los factores condicionantes son: la geología/las condiciones geotécnicas de los materiales/geomorfología, topografía (pendiente del terreno), el clima y vegetación y la actividad Antrópica (Hauser, 1993).

Estos factores condicionantes 'actúan' controlando la susceptibilidad de una zona para generar los procesos de remociones en masa, por lo que la susceptibilidad se define como la capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Sepúlveda *et al.*, 1998).

Cada uno de los distintos procesos de remociones en masa tiene un origen y adquiere características particulares en su comportamiento, dichas características estarán determinadas por el tipo de factor que influya más en su generación (formas y grados diferentes). A continuación se presentan las características generales de cada factor (Tabla 5), su definición es muy importante ya que algunos de ellos fueron utilizados para determinar la susceptibilidad o amenaza de remociones en masa en la zona de estudio.

Tabla 5. **Factores condicionantes relevantes para cada tipo de remoción en masa (Lara et al., 2008).**

Factores Condicionantes	Tipo de remociones				
	Caídas	Deslizamientos	Toppling	Flujos	Extensiones Laterales
Geología y Geotecnia	X	X	X	X	X
Geomorfología	X	X	X	X	X
Hidrología e Hidrogeología	X	X	X	X	X
Vegetación y Clima		X		X	X
Actividad Antrópica	X	X	X	X	

2.3.3.1. Geología y geotecnia.

La geología y la geotecnia influyen en mayor o menor grado en la generación de diversos eventos de remociones en masa. Entre los factores de esta categoría se cuentan el tipo de depósito y el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad; la litología de las rocas, su estructura, alteración y meteorización (Lara et al., 2008).

El tipo de depósito condiciona ciertas características en su comportamiento; por ejemplo, los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de pie de monte, aluviales, coluviales, y de antiguos flujos de detritos son susceptibles a ser movilizados y/o removilizados, ya que son materiales permeables, donde el agua

se infiltra fácilmente, superando su capacidad de infiltración y produciendo la saturación rápida y facilitando el escurrimiento rápido del agua en este material saturado (Hauser, 1997). En general, esto aplica a materiales sueltos, donde se incluyen también depósitos de remociones antiguas y/o desprendimientos y laderas que presenten reptación lenta o solifluxión (Hauser, 1993). Por otro lado, en materiales menos permeables, como aquellos de grano fino, densos, arcillosos y rocosos con escasas fracturas, el escurrimiento de agua superficial es relativamente más rápido debido a su poca capacidad de infiltración y a la menor rugosidad de sus estructuras (Jacoby, 2001).

2.3.3.2. Geomorfología.

Los rasgos geomorfológicos que condicionan eventos de remociones en masa son principalmente la topografía, pendientes de las laderas, cambios fuertes de pendientes en las laderas y la extensión y altura de las mismas. Estas características inciden en la velocidad, energía y volumen de los deslizamientos que puedan originarse. También, cualquier modificación de estos puede transformar una ladera estable en inestable y generar deslizamientos (Popescu, 2002). Por otro lado, influyen la forma y superficie de las “cuencas” hidrográficas, orientación de laderas y su consecuente exposición al sol (Lara *et al.*, 2008).

El relieve escarpado y con pendiente alta en sus laderas es uno de los factores geomorfológicos a considerar, ya que son propicios para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes. La generación de flujos se ve favorecida por la presencia de laderas de pendiente abrupta que afecta o disminuye la estabilidad de los depósitos, donde el escurrimiento de agua superficial actúa como factor desestabilizador. La pendiente tanto de laderas como en cauces, mientras mayor es, facilita el transporte y energía a los flujos (Lara *et al.*, 2008). De esta manera se puede deducir que las corrientes tributarias de corta longitud y pendiente alta o abrupta, de forma recta y estrecha concentran el transporte del material incrementando su energía cinética (Jacoby, 2001). Pendientes mayores a 25° en las cabeceras de las cuencas hidrográficas, son favorables para el desarrollo de

flujos o 'aluviones' (Hauser, 1993), aunque algunos podrían generarse sobre pendientes menores que no sobrepasan los 15° (Lara *et al.*, 2008). Por otra parte, también es considerado otro atributo o factor dentro de la geomorfología, este es el aspecto u orientación de las laderas ante la exposición al sol, lo cual influye junto con los escurrimientos y de manera estacional el deshielo, erosionando y meteorizando el material.

En el caso de deslizamientos superficiales, se genera una situación naturalmente inestable, donde para el caso de suelo se generará un deslizamiento en un talud si su ángulo supera el ángulo de fricción interna del material (Lambe *et al.*, 1972).

Finalmente, para que alguna remoción en masa suceda debe existir material susceptible a ser movilizado. Por lo que es necesario identificar depósitos de antiguos deslizamientos o flujos, principalmente si se encuentran en estado suelto, o la identificación de depósitos coluviales que se ubican generalmente al pie de las laderas y quebradas (cañadas) o escarpes, donde su condición de equilibrio límite los hace muy propensos a generar flujos.

2.3.3.3. *Hidrología e hidrogeología.*

Las características de la red de drenaje, las posiciones y variaciones del nivel freático, caudales, coeficientes de escorrentía y coeficientes de infiltración, son factores hidrológicos e hidrogeológicos que condicionan la generación de remociones en masa ya que están directamente relacionados a la incorporación de agua en los suelos o macizos rocosos (Lara *et al.*, 2008).

El suelo saturado presentará variaciones en los rangos de cohesión dependiendo de su granulometría. De todas maneras, la incorporación de agua en la estructura del suelo, que en ciertos casos puede llegar a la saturación, genera una disminución en la resistencia del material, disminuyendo su tensión efectiva producto de la generación de presiones de poros (Lambe *et al.*, 1972). En roca, el

agua puede contribuir a la pérdida de resistencia al infiltrarse en las estructuras, ejerciendo tensiones en estas estructuras que se oponen a las tensiones que la mantienen estable.

En el caso de los flujos, éstos en su gran mayoría se generan por saturación del material, lo cual al provocar un aumento en la presión de poros disminuye su resistencia efectiva. La identificación de zonas húmedas o saturadas es de gran importancia para la identificación de áreas críticas para la generación de remociones. La posición del nivel freático y sus variaciones en este ámbito es importante, ya que al encontrarse a poca profundidad, mediante la incorporación de agua ya sea por lluvias o fusión de nieve, éste puede ascender rápidamente llegando a generar la saturación del material superficial. Por otra parte, en suelos arenosos afectados por sismos, el nivel freático puede ascender hasta el punto de saturar el material, generando en el suelo un comportamiento de tipo fluido viscoso (licuefacción del suelo) producido por la vibración. Se debe tener en cuenta en el momento de evaluar este factor que la distribución de agua subterránea varía de acuerdo a la topografía y a la condición de meteorización de la roca madre (Pathak *et al.*, 2004).

Aunque los flujos de detritos se asocian a un suelo saturado, el flujo puede ir incorporando líquido en el trayecto, generándose en un principio por la inestabilidad del suelo condicionada por la resistencia, el ángulo de fricción interna y el grado de saturación del suelo (Yoshida *et al.*, 1991). Pueden existir movimientos de ladera complejos, que pueden derivar en un flujo de detritos o un flujo seco, dependiendo si hay o no incorporación de agua al material transportado (Varnes, 1978).

2.3.3.4. *Vegetación.*

Este factor también es considerado como condicionante en los procesos de remoción en masa según Lara *et al* (2008), sin embargo, existen estudios en Chile, que demuestran que la vegetación no siempre contribuye a disminuir la

erosión en laderas. Se cita el ejemplo de su poca influencia en la estabilidad de laderas, en zonas climáticas lluviosas con abundante vegetación, es el caso de los deslizamientos ocurridos en el sur de ese País, en la Región de Aisén, producto de un sismo ocurrido en abril del 2007, donde una parte de un cerro con frondosa vegetación deslizó provocando un tsunami.

La estabilidad dada por la vegetación está fuertemente condicionada por el efecto del clima y la topografía, Prieto (1985), ya que zonas que sufren de fuertes vientos, si la pendiente es fuerte, los árboles remueven el terreno provocando su desestabilización, Es probable que antes y durante las lluvias intensas se presenten fuertes vientos que originen la caída de árboles, en estas especiales condiciones puede ocurrir que la evapotranspiración no alcance a compensar la alta infiltración, por lo que el nivel freático asciende saturando el material.

Según Selby (1993), la vegetación contribuye a disminuir el efecto erosivo sobre laderas generado por factores como el clima, propiedades del suelo y topografía. La existencia de árboles en las laderas pudiera permitir la absorción de agua por parte de estos disminuyendo el grado de saturación del suelo. Además, sus raíces en general ayudarían a la estabilización de las laderas actuando como anclajes de reforzamiento, sin dejar de considerar que en algunos casos esta estabilización es sólo superficial. El mismo autor, establece que la vegetación ideal para la estabilización de laderas corresponde a bosques con suelos cubiertos de pasto o hierba, exponiendo los principales efectos de la vegetación sobre la estabilidad del suelo, los cuales incluyen: que la vegetación interceptaría el agua caída, disminuiría la capacidad de erosión provocada por el agua en las laderas y aumentaría la resistencia del suelo y su porosidad. Además, aumentaría la evapotranspiración del agua disminuyendo el grado de saturación del suelo y produciría compactación del suelo más profundo (Lara *et al.*, 2008). En tanto, el escaso desarrollo de vegetación pareciera contribuir a restar estabilidad a las laderas, además de demostrar una alta sensibilidad a la erosión hídrica (Jacoby, 2001), puesto que en general las raíces tenderían a actuar como agentes estabilizadores.

2.3.3.5. *Clima.*

Los principales factores que generan erosión de laderas son las precipitaciones, temperaturas, viento y radiación solar, siendo las precipitaciones el más importante.

Las precipitaciones, además de ser consideradas uno de los factores detonantes de remociones en masa más importantes, 'condicionan' la estabilidad de macizos debido a la disminución de la resistencia de estructuras al filtrarse agua entre las fracturas de rocas y del suelo, esto disminuye el coeficiente de roce. Por otro lado, en su mayoría los flujos de detritos y barro han sido detonados por eventos de lluvias intensas, asociadas con saturación del material por lluvias previas cercanas al día del evento que en este caso estarían actuando como condicionante en la estabilidad de laderas.

Por otra parte, otro factor climático de importancia corresponde a la temperatura, ya que ésta condiciona el estado de la precipitación, es decir, si es sólida o líquida, controla el punto de fusión de la nieve, modificando la humedad del suelo luego de las lluvias y condiciona el congelamiento del suelo.

Por otro lado el viento tiene efectos sobre el ángulo de incidencia de las gotas de lluvia y además en la desestabilización de laderas abruptas con árboles (Selby, 1993).

Por último, el factor climático de radiación solar también incide en la estabilidad-inestabilidad de laderas, al influir en la condición de humedad del material, disminuyendo la resistencia de las laderas mientras mayor grado de humedad éstas presenten. Este punto se encuentra ligado a la presencia de vegetación, siendo ésta más prominente en zonas protegidas de intensa radiación solar.

Finalmente, en la actualidad se habla del cambio climático que el hombre ha propiciado, lo que ha provocado que se presenten fenómenos hidrometeorológicos atípicos que implican o se asocian a variaciones en la temperatura, la intensidad de las lluvias y su distribución espacial, esto influye

directamente en la generación de remociones en masa afectando asentamientos humanos.

2.3.3.6. *Actividad Antrópica.*

Este factor hace referencia a las perturbaciones o alteraciones que provoca el ser humano al medio natural favoreciendo la generación de las remociones en masa. Algunas de las actividades del hombre que influyen en esto son cambios en el uso del suelo (incluye el crecimiento urbano), excavaciones, rellenos, construcción de estructuras, extracción de materiales y acumulación de escombros, entre otros. Estas afectaciones pueden contribuir de dos maneras: a) desestabilización de las laderas producto de la disminución artificial de la resistencia del material, b) la contribución de material para ser movilizados por futuros eventos y cambios en la escorrentía superficial y en la topografía (Lara *et al.*, 2008).

Dentro de los cambios de uso de suelo más importantes y que pueden afectar propiciando las remociones en masa se tiene la deforestación y tala clandestina. Muchas veces la tala, aunque sea controlada, si se presentan malas prácticas de manejo en ambos casos, contribuyen a la generación de remociones en masa.

La actividad minera, por su parte, contribuye a la generación de sismicidad inducida, lo cual puede influir en la desestabilización producto de las vibraciones que si bien tal vez no alcanzan grandes intensidades, pueden ser frecuentes y constantes, disminuyendo gradualmente la resistencia de los depósitos y macizos rocosos (Lara *et al.*, 2008).

2.3.4. Descripción de factores detonantes de procesos de remociones en masa.

Un agente detonante es un factor externo que genera una respuesta traducida en una remoción en masa mediante el rápido incremento de esfuerzos o

la reducción de la resistencia del material de una ladera (Wieczorek, 1996). Un agente detonante se caracteriza principalmente por la existencia de un lapso corto entre la causa y su efecto (Lara *et al.*, 2008).

Entre los agentes desencadenantes más comunes de deslizamientos se presentan principalmente las lluvias de gran intensidad y los sismos; secundariamente las erupciones volcánicas, la intervención Antrópica, la fusión de nieve, la erosión de cauces, entre otros.

2.3.4.1. Precipitaciones.

La lluvia como factor detonante de remociones en masa establece una relación con su intensidad, duración y distribución González *et al* (2002). Las precipitaciones de poca intensidad en periodos prolongados de tiempo y precipitaciones de gran intensidad en periodos cortos de tiempo podrían desencadenar remociones en zonas susceptibles. En este sentido, las precipitaciones de corta duración e intensas son detonantes a originar deslizamientos superficiales, mientras que precipitaciones más prolongadas pueden detonar remociones más profundas (Aleotti 2004; Kim *et al* 2004; Lara *et al* 2008) (Tabla 6).

Las precipitaciones son causantes del aumento del grado de saturación de los materiales del suelo y fracturas, aumentando temporalmente la presión de fluidos (μ).

Tabla 6. **Efectos de la saturación por precipitaciones según Prieto (1985).**

Efectos asociados	Consecuencias	Inestabilidades producidas
Lluvias intensas - Infiltración-	Elevación del nivel freático	Deslizamientos (planos) de suelo sobre roca
		Deslizamientos circulares por empuje
	Carga de fisuras	Deslizamiento de taludes en suelo o en roca blanda
		Vuelco de masas rocosas
Saturación	Movilización de taludes en equilibrio estricto.	

Efectos asociados	Consecuencias	Inestabilidades producidas
		Reptaciones
		Hundimiento. Desplazamiento de bloques
Inundación de la base del talud	Disminución de resistencia en zonas críticas	Deslizamiento por falta de resistencia
	Efectos de desembalse	Deslizamientos por tracción de pie
	Arrastres superficiales	Flujos sólidos en torrentes
Erosión de laderas	Acumulaciones en pie de conos de deyección	Deflación del cono
	Erosión interna	Hundimientos generalizados
Socavación	Eliminación de zonas resistentes	Deslizamientos progresivos desde el pie
		Vuelco de cornisas
Disolución	Creación de cavernas y túneles	Hundimientos en la cima
		Retroceso de cantiles

En general, distintas zonas requieren de lluvias intensas y de prolongada duración que superen un umbral determinado para generar remociones. Poder estimar dichos umbrales no es sencillo, pues son requeridos datos continuos de precipitaciones con alta frecuencia que permitan realizar análisis estadísticos y lamentablemente en la mayoría de los casos no se cuenta con esta información.

Además, es necesario recalcar la importancia que presenta la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, como son los frentes fríos en invierno, en los que se han observado una tendencia de más días con distintos tipos de precipitaciones y de mayor intensidad, siendo un ambiente propicio para la generación de eventos de remociones en masa.

2.4. Inventario de Remociones en Masa.

Un inventario o catastro de remociones en masa es un conjunto de registros ordenados con la localización geográfica y características particulares de una serie de remociones ocurridas en un área dada. Normalmente, un inventario consiste de un mapa generalmente asociado a fichas o base de datos 'tablas' con información de mayor detalle. El mapeo se hace en trabajo de campo y a través de la fotointerpretación, asignando a cada remoción una serie de características, además de representarlo cartográficamente. El grado de detalle de la

representación cartográfica dependerá de la escala de trabajo y la información disponible (Lara *et al.*, 2008). Por otro lado, según Alcántara *et al* (2008), un inventario se define como la relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos de remoción en masa en un territorio determinado, y durante un periodo específico, el cual debe permanecer actualizado detalladamente.

2.5. Proceso de Análisis Jerárquico.

El Proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por Thomas L. Saaty (AHP) por sus siglas en inglés The Analytical Hierarchy Process, 1980, está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después, especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una 'jerarquización' con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión. En un ambiente de certidumbre, el AHP proporciona la posibilidad de incluir datos cuantitativos relativos a las alternativas de decisión. La ventaja de éste, consiste en que adicionalmente permite incorporar aspectos cualitativos que suelen quedarse fuera del análisis debido a su complejidad para ser medidos, pero que pueden ser relevantes en algunos casos.

A continuación se presentan algunas ventajas del AHP ante otros métodos de decisión multicriterio:

- Presentar un sustento matemático.
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes.
- Medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Permitir verificar el índice de consistencia y hacer las correcciones, si es el caso.
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad.
- Es de fácil uso y permite que su solución se pueda complementar con métodos matemáticos de optimización.

Base matemática del AHP. El AHP trata directamente con pares ordenados de prioridades de importancia, preferencia o probabilidad de pares de elementos en función de un atributo o criterio común representado en la jerarquía de decisión. Se cree que este es el método natural ‘pero refinado’ que la gente siguió al tomar decisiones mucho antes que se desarrollaran funciones de utilidad y antes que se desarrollara formalmente el AHP” (Ávila, 2000).

El AHP hace posible la toma de decisiones grupales mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones, cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico (Chacón *et al.*, 2006)

Establecimiento de prioridades con el AHP. El AHP pide a quien toma las decisiones señalar una preferencia o prioridad con respecto a cada alternativa de decisión en términos de la medida en la que contribuya a cada criterio. Teniendo la formación sobre la importancia relativa y las preferencias, se utiliza el proceso matemático denominado síntesis, para resumir la información y para utilizar una jerarquización de prioridades de las alternativas, en términos de la preferencia global.

Comparaciones pareadas. Las comparaciones pareadas son bases fundamentales del AHP. El AHP utiliza una escala subyacente con valores de 1 a 9 para calificar las preferencias relativas entre dos elementos (Tabla 7). Se presentan las calificaciones numéricas que se recomiendan para las preferencias verbales expresadas por el tomador de decisiones. Investigaciones anteriores han determinado que esta es una escala razonable para distinguir las preferencias entre dos alternativas:

Tabla 7. **Escala de preferencias para la matriz de comparaciones pareadas.**

ESCALA DE PREFERENCIAS	
Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Matriz de comparaciones pareadas. Es una matriz cuadrada que contiene comparaciones pareadas de alternativas o criterios.

Sea **A** una matriz $n \times n$, donde $n \in \mathbb{Z}^+$. Sea a_{ij} el elemento (i,j) de **A**, para $i = 1, 2, \dots, n$, y $j = 1, 2, \dots, n$. Se dice que **A** es una matriz de comparaciones pareadas de 'n' alternativas, si a_{ij} es la medida de la preferencia de la alternativa en el renglón i cuando se le compara con la alternativa de la columna j . Cuando $i = j$, el valor de a_{ij} será igual a 1. Pues se está comparando la alternativa consigo misma.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Además se cumple que: $a_{ij} \cdot a_{ji} = 1$, es decir:

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

En la construcción de la matriz de comparaciones pareadas, cada factor es comparado contra cada uno de los otros y se le asigna un valor dominante relativo entre 1 y 9 a la celda de intersección. Cuando el factor en el eje vertical es más

importante que el factor en el eje horizontal los valores varían entre 1 y 9, y viceversa los valores varían entre los recíprocos $1/2$ y $1/9$.

Procedimiento para sintetizar juicios. Sumar los valores en cada columna de la matriz de comparaciones pareadas.

Dividir cada elemento de tal matriz entre el total de su columna; a la matriz resultante se le denomina matriz de comparaciones pareadas normalizada.

Calcular el promedio de los elementos de cada renglón de las prioridades relativas de los elementos que se comparan.

Consistencia. Una consideración importante en términos de la calidad de la decisión final se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de la serie de comparaciones pareadas. Se debe tener presente que la consistencia perfecta es muy difícil de lograr y que es de esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas, después de todo son juicios rendidos por seres humanos.

El AHP ofrece un método para medir el grado de consistencia entre las opiniones pareadas que proporciona el decisor. Si el grado de consistencia es aceptable, puede continuarse con el proceso de decisión. Si el grado de consistencia es inaceptable, quien toma las decisiones debe reconsiderar y posiblemente modificar sus juicios sobre las comparaciones pareadas antes de continuar con el análisis (Tabla 8).

De forma matemática, se tiene que una matriz de comparación \mathbf{A} $n \times n$ es consistente si $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$, para $i, j, k = 1, 2, \dots, n$.

Esta propiedad requiere que todas las columnas (y renglones) de \mathbf{A} sean *linealmente dependientes*. En particular, las columnas de cualquier matriz de comparación de 2×2 son dependientes, y por lo tanto una matriz de 2×2 siempre es consistente.

Para determinar si un nivel de consistencia es o no “razonable”, se necesita desarrollar una medida cuantificable para la matriz de comparación \mathbf{A} $n \times n$ (donde n es el número de alternativas a ser comparadas). Se sabe que si la matriz \mathbf{A} es perfectamente consistente produce una matriz \mathbf{N} $n \times n$ normalizada, de elementos w_{ij} (para $i, j, = 1, 2, \dots, n$), tal que todas las columnas son idénticas, es decir, $w_{12} = w_{13} = \dots = w_{1n} = w_1$; $w_{21} = w_{23} = \dots = w_{2n} = w_2$; $w_{n1} = w_{n2} = \dots = w_{nn} = w_n$.

$$N = \begin{bmatrix} w_1 & w_1 & \dots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \dots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n & w_n & \dots & w_n \end{bmatrix}$$

Se concluye entonces que la matriz de comparación correspondiente \mathbf{A} , se puede determinar que a partir de \mathbf{N} , dividiendo los elementos de la columna i entre w_i (que es el proceso inverso de la determinación de \mathbf{N} a partir de \mathbf{A}). Entonces se tiene:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_1 & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

De la definición dada de \mathbf{A} :

$$\begin{bmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}$$

De la forma más compacta, se dice que \mathbf{A} es consistente si y sólo si:

$$AW = nW$$

Donde \mathbf{W} es un vector columna de pesos relativos w_i ($j = 1, 2, \dots, n$) se aproxima con el promedio de los n elementos del renglón en la matriz normalizada \mathbf{N} . Haciendo W el estimado calculado se puede mostrar que:

$$A W = n_{\max} W$$

Donde $n_{\max} \geq n$. En este caso, entre más cercana sea n_{\max} a n , más consistente será la matriz de comparación **A**. Como resultado, el AHP calcula la razón de consistencia (RC) como el cociente entre el índice de consistencia de **A** y el índice de consistencia aleatorio.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Donde IC es el índice de consistencia de A y se calcula como sigue:

$$IC = \frac{n_{\max} - n}{n - 1}$$

El valor de n_{\max} se calcula de $A = n_{\max}$ observando que la i -ésima ecuación es:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \bar{w}_j = n_{\max} \bar{w}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Dado que $\sum_{i=1}^n \bar{w}_i = 1$, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \bar{w}_j \right) = n_{\max} \sum_{i=1}^n \bar{w}_i$$

Esto significa que el valor de n_{\max} se determina al calcular primero el vector columna A y después sumando sus elementos.

IA es el índice de consistencia aleatoria de A, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generada en forma aleatoria. Se puede mostrar que IA depende del número de elementos que se comparan, y asume los siguientes valores:

Tabla 8. **Valores del índice de consistencia aleatoria.**

No. Elementos comparados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistencia Aleatoria	0	0	0.6	0.9	1.1	1.2	1.3	1	1.5	1.5

Algunos autores sugieren la siguiente estimación para el **IA**:

$$IA = \frac{1.98 \sqrt{n-2}}{n}$$

Se calcula la razón de consistencia (RC) (o CR, de Consistency Ratio). Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.1 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.1 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

RC ≤ 0.1 : Consistencia razonable

RC > 0.1 : Inconsistencia

2.6. Conceptualización del Riesgo y Vulnerabilidad.

El riesgo es la relación dinámica entre las llamadas amenazas con la vulnerabilidad en que se encuentra una sociedad (Cardona, 2001).

El Riesgo es la probabilidad de ocurrencia de consecuencias ambientales, económicas o sociales no deseadas en un sitio particular y durante un tiempo de exposición determinado. De la relación amenaza y vulnerabilidad (como factores del riesgo) se obtienen los elementos expuestos (República Dominicana, 2002), (Wilches-Chaux, 1989). Por lo que el modelo conceptual de riesgo se expresa de la siguiente manera:

Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad

Riesgo: Condición latente que anuncia la probabilidad de daños y pérdidas, lo cual implica que el riesgo puede ser anticipado, permitiendo que la sociedad intervenga para mitigarlo. El riesgo existe cuando la probabilidad de interacción de una amenaza (con determinadas características) con una unidad social o elemento vulnerable en cierto grado o nivel). (CENAPRED, 2006 y Comunidad Andina *et al* 2007).

Amenaza: Es un evento que tiene probabilidad de ocurrir y la capacidad de producir daños físicos, económicos y ambientales. Su origen puede ser natural, socio natural o tecnológico (CENAPRED, 2006 y Comunidad Andina *et al* 2007).

Las amenazas se definen como las condiciones de procesos naturales y artificiales que tienden a iniciar episodios de daños excepcionales y alteraciones de las condiciones de habitabilidad de los asentamientos humanos (CENAPRED, 2006).

Vulnerabilidad: La Vulnerabilidad es la probabilidad de que un sujeto o elemento expuesto a una amenaza, sufra daños y pérdidas humanas como materiales, en el momento del impacto, teniendo además dificultad en recuperarse de ello a corto, mediano o largo plazo (Chardon, 2002).

También Cardona, (1993) define la vulnerabilidad como la situación de incapacidad de una unidad social para anticiparse, resistir y recuperarse de los efectos adversos de una amenaza. Los factores de la vulnerabilidad son: la exposición a la amenaza, la susceptibilidad o fragilidad a sufrir daños por el impacto de una amenaza, resiliencia, misma que se define como la capacidad de asimilación o recuperación del impacto.

La vulnerabilidad representa las características internas de los elementos expuestos a las amenazas, estos son: población, asentamientos humanos, producción, infraestructura, etc., que los hacen propensos de sufrir daño al ser impactados por eventos de distinta naturaleza. La vulnerabilidad entonces,

significa una falta de resiliencia y de resistencia y, además, condiciones que dificultan la recuperación y reconstrucción autónoma de los elementos afectados. Estas son específicas a distintos tipos de amenaza, lo que significa que no existen vulnerabilidades generales, sino vulnerabilidades con referencia a amenazas o conjuntos de amenazas específicas. (GTZ *et al.*, 2008).

En la actualidad, la FAO (2009), se centra en determinar en qué medida los diferentes niveles de adaptación del hombre al ambiente son en sí mismos generadores de situaciones de riesgo, aún más se habla de que los riesgos son inherentes a la condición social del hombre. Desde esta perspectiva el concepto de desastre se debe enmarcar dentro de la interacción hombre-naturaleza, a partir de allí subyace que un desastre se genera socialmente y que se desarrolla en un tiempo y un espacio.

Es más común hablar de desastre que de riesgo, pues es algo que ya ocurrió, se puede medir en sus consecuencias y se interviene una vez ocurrido. En cambio, el riesgo es algo que puede ocurrir o es latente, es posible identificarlo, actuar sobre sus causas y, de esta manera, disminuir o eliminar sus consecuencias, en caso de que se materialice en un evento peligroso (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2000).

La materialización del riesgo es el desastre, que puede definirse como la situación o proceso social que se desencadena como resultado de la ocurrencia de un fenómeno de origen natural, tecnológico o provocado por el hombre que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una comunidad, se traduce en alteraciones intensas en las condiciones normales del funcionamiento de la sociedad, en donde existe la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de bienes y daños severos sobre el medio ambiente, requiriendo de una respuesta inmediata de las autoridades y de la población para atender a los afectados y restablecer la normalidad (República Dominicana, 2002).

Una vez que el riesgo es reconocido por la comunidad, implica que se debe hacer algo para reducirlo, lo que debe comprometer a instituciones no sólo del

sector público, sino también del sector privado y a la comunidad misma. Pero el riesgo colectivo, o “compartido” como lo define (Comfort, 1999), involucra una serie de problemas que son interdependientes, dinámicos e inciertos, que requieren una acción también colectiva para poder resolverlos. Lamentablemente, no es extraño que comunidades expuestas a la acción de sucesos peligrosos ya reconocidos, no enfrenten el problema en forma colectiva, por restricciones de recursos o porque su percepción del riesgo no estimula su interés para asumir este problema colectivo. Algunos integrantes de la población o comunidad, en ocasiones son conscientes del peligro y llevan a cabo acciones individuales para reducirlo, sin embargo, la comunidad en general, como un todo, permanece vulnerable. El nivel de riesgo de una sociedad está relacionado con sus niveles de desarrollo y su capacidad de modificar los factores de riesgo que potencialmente la afectan. En este sentido, los desastres son riesgos mal manejados. El riesgo se construye socialmente, aun cuando el evento físico con el cual se asocia sea natural.

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

3.1. Objetivo General.

Analizar y definir los tipos de remociones en masa y sus zonas de susceptibilidad en la microcuenca “El Ventilador”, para determinar el peligro y la vulnerabilidad en que se encuentra la localidad de Dolores, Angangueo, Michoacán, México.

3.2. Objetivos Específicos.

- Realizar la caracterización de la microcuenca “El Ventilador”.
- Realizar el diagnóstico de la microcuenca “El Ventilador”.
- Realizar el inventario de remociones en masa e identificar los tipos de remociones ocurridas en la microcuenca “El Ventilador”.
- Definir la susceptibilidad de remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador” considerando los principales factores condicionantes que influyen en las remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador”.
- Definir el peligro y vulnerabilidad física - social por remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador”.

3.3. Hipótesis.

El relieve de la microcuenca afecta directamente los procesos de remisión en masa, a partir de ciertos umbrales que se modifican por el efecto de otros factores condicionantes como la vegetación, la geología, geomorfología, hidrología superficial y subterránea, y el factor detonante que es la precipitación.

IV. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

4.1. Localización del Área de Estudio.

La microcuenca “El Ventilador”, con una superficie de 362 ha (3.62 Km²), se encuentra ubicada al Oriente del Estado de Michoacán justo en los límites con el Estado de México, la microcuenca se localiza al noreste del municipio de Angangueo y al Norte limita con el municipio de Senguio, al Sur con el municipio de Ocampo, y al Oeste con los municipios de Aporo y Ocampo. Las coordenadas extremas son 2173959.38 m y 366091.72 m en Longitud Este y 2171501.30 m y 368621.71 m en Latitud Norte (Figura 13 y Figura 14).

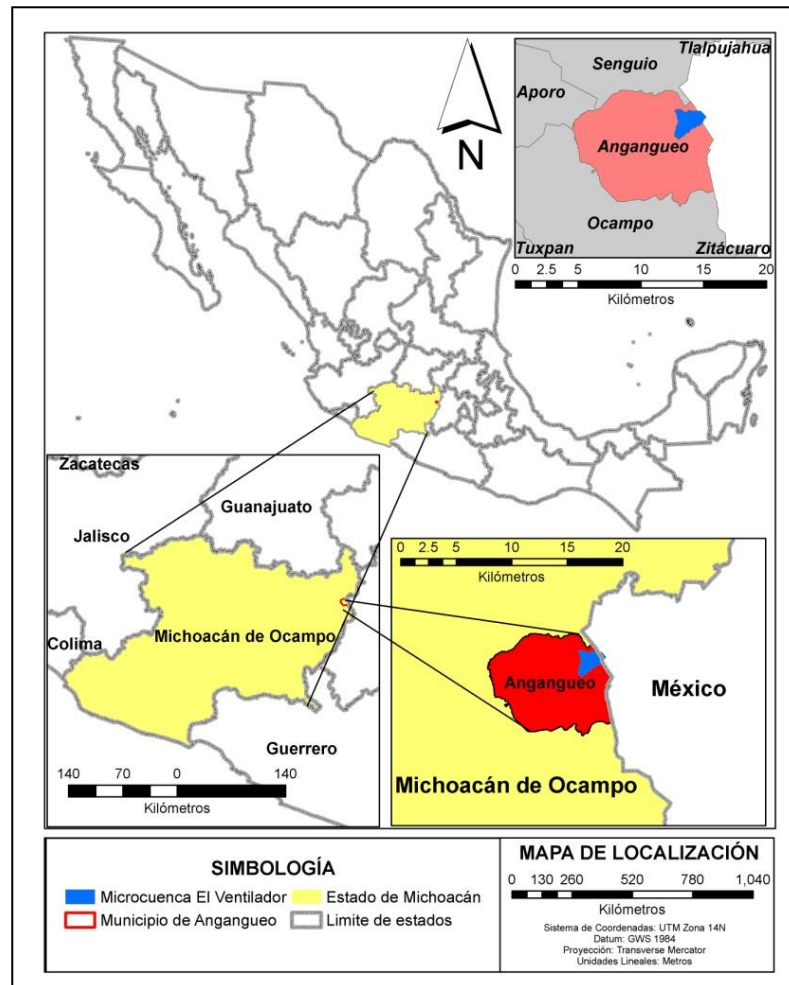


Figura 13. Mapa de localización general del municipio de Angangueo, Michoacán, México y la microcuenca “El Ventilador”.

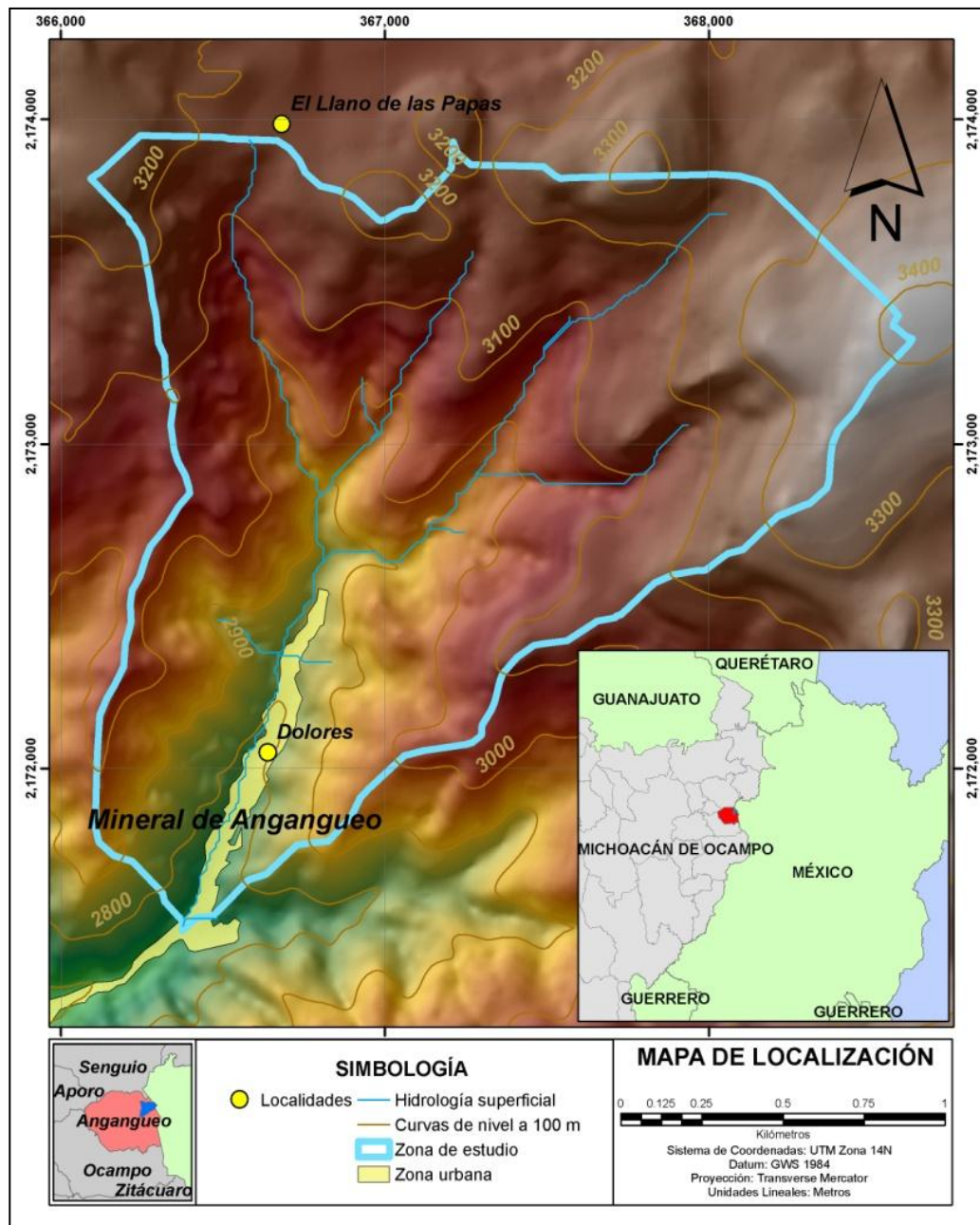


Figura 14. Mapa de localización de la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

4.2. Metodología para la Caracterización Físico – Geográfica.

4.2.1. Caracterización físico-geográfica.

Para realizar la caracterización de la microcuenca “El Ventilador” fue necesario recopilar información documental, estadística y geográfica digital escala

1:50,000 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), además de otras fuentes de información muy específicas para cada tema, misma que son descritas en los siguientes apartados. Se usó el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 9.3.

Es de destacar que la información cartográfica existente se encuentra en Proyección Cónica Conforme de Lambert, misma que fue convertida a proyección UTM zona 14. Los detalles de cada proyección geográfica se pueden consultar en el Anexo 1.

4.2.1.1. *Fisiografía.*

Para elaborar la fisiografía de la zona de estudio se usó información en formato shape file (SHP) del INEGI.

4.2.1.2. *Pendiente.*

El mapa topográfico es la base para la elaboración de un mapa de pendientes, en este sentido, el mapa de pendientes de la microcuenca “El Ventilador” fue construido a partir de los valores de altura obtenidos en el Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante la función *slope* en ArcMap, el cual, calcula la máxima tasa de cambio en Z entre cada celda y sus vecinas. El cálculo se hace utilizando la función gradiente en dirección X y Y (diferencias de alturas contra diferencias de distancias). El resultado es un ráster que puede ser expresado en porcentajes o en grados. Posteriormente, se hizo una reclasificación y se establecieron los rangos para su mejor interpretación de acuerdo a los criterios de Lugo, H. (1989) y Dai *et al* (2002).

4.2.1.3. *Morfometría de la cuenca.*

Para obtener la morfometría de la microcuenca “El Ventilador” se aplicó el programa desarrollado por Valtierra, (2007), desarrollado en Arcview 3.2 y que

calcula dichos índices generando a partir de las curvas de nivel un MDE, también se requiere el polígono de la microcuenca para aplicar el modelo. Los índices y parámetros obtenidos fueron: perímetro, área, longitud, índice de forma, densidad de drenaje, pendiente media, elevación máxima, orden de la cuenca, perfil del cauce principal, coeficiente de compacidad, relación de elongación, relación de bifurcación, longitud de cauce, densidad de corriente, elevación mínima, elevación media y la curva hipsométrica.

4.2.1.4. Hidrología.

Para elaborar este mapa se utilizó la cartografía del Programa Nacional de Microcuencas, misma que contiene información en SHP de región hidrológica, cuenca subcuenca y microcuenca.

4.2.1.5. Vegetación.

Este mapa fue elaborado en primera instancia por la UACH y fue validado y actualizado durante el trabajo de campo durante la realización de este trabajo, encontrándose algunas diferencias de la vegetación, mismas que fueron actualizadas.

4.2.1.6. Edafología.

Para elaborar este mapa se utilizaron los archivos en formato SHP de INEGI.

4.2.1.7. Geología.

Se elaboraron dos mapas de Geología (Regional y Local), para ambos se utilizaron archivos digitales en formato shape file (SHP) del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y se adaptaron a la simbología estándar que maneja dicha institución.

4.2.1.8. *Geomorfología.*

Para elaborar el mapa geomorfológico se tomó como base una imagen de un mapa elaborado por Ortiz, M. (s/f) del Instituto de Geografía de la UNAM y cuya escala se desconoce. Fue digitalizada a mano alzada para este trabajo. Finalmente, para complementar este estudio fue necesario aplicar el modelo desarrollado por Weiss (2000), que genera en base a un MDE y considerando el índice topográfico, y las unidades de formas del relieve, mismas que fueron reclasificadas y adaptadas para este estudio.

4.2.1.9. *Clima.*

Para elaborar los mapas de clima (distribución de temperatura y precipitación), se obtuvo la información de las normales climatológicas de la red de estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) - Comisión Nacional del Agua (CNA). Se utilizaron siete estaciones que se encuentran en los alrededores a la microcuenca “El Ventilador” con datos de más de 20 años continuos. Las estaciones fueron: 16033 Chincua, 16099 Presa Tuxpan (CFE), 16121 Senguio, 15066 Palizada, 15070 Presa Brockman, 15102 San Onofre y 15197 Cuesta del Carmen.

4.3. Metodología para Determinar el Diagnóstico de la Microcuenca.

4.3.1. Modelación hidrológica con el modelo KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model).

El modelo KINEROS (Kinematic Runoff and Erosión), desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para la evaluación del estado actual de los recursos de una microcuenca menor a 10,000 hectáreas, así como, para evaluar escenarios posibles y facilitar la toma de decisiones y manejo de recursos, fue utilizado para la modelación hidrológica de la Microcuenca “El Ventilador”. Este modelo se encuentra ejecuta desde la herramienta AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) en la plataforma de ArcView 3.2.

De manera general, AGWA discretiza la superficie de la microcuenca en unidades de escurrimiento, con base en un área de acumulación de flujo y un área de aportación definida por el usuario. Posteriormente, analiza la información de suelos de la microcuenca con base en la composición porcentual de los tipos de suelo y su textura; mientras que la información de uso de suelo, se basa en los valores de grupo hidrológico para cada tipo, así como el porcentaje de cobertura, la infiltración y el coeficiente de rugosidad de Manning (n).

El siguiente nivel de AGWA es la información de la precipitación, cabe mencionar que el programa trabaja por evento de lluvia, por lo que el diseño de la tormenta, para este caso específico, fue para un periodo de retorno de 50 años, una lámina de escurrimiento de 100 mm y una duración de 1 hora. Finalmente, la corrida del programa genera estimaciones de las tasas de: escurrimiento (m^3), producción de sedimentos (kg/ha), flujo pico (m^3/s) e infiltración (mm).

Para la modelación se necesita el DEM del territorio de la cuenca, el grid de cobertura de suelo, el shapefile de suelos y los datos de precipitación. Los resultados que se obtienen de la modelación con KINEROS son: infiltración, producción de sedimentos y escurrimientos. Estos resultados se presentan en intervalos en un mapa.

La modelación consiste en los siguientes pasos:

- 1) Delimitación de la cuenca
- 2) Parametrización del modelo con la cobertura y tipo de suelo
- 3) Generación de los archivos de precipitación
- 4) Generación del archivo de entrada y corrida del programa
- 5) Despliegue de resultados

4.3.2. Modelación de erosión y sedimentación.

Para la evaluación del estudio de erosión en la microcuenca “El Ventilador” se aplicó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS).

La EUPS tiene la siguiente expresión matemática.

$$A=R*K*LS*C*P$$

Donde:

A = Pérdida de suelo promedio anual en [t/ha/año]

R = Factor erosividad de la lluvia en [MJ.mm/ha.hr]

K = Factor erodabilidad del suelo en [t.hr/MJ.mm]

LS = Factor topográfico (adimensional)

C = Factor cobertura de la vegetación (adimensional)

P = Factor de prácticas de conservación (adimensional)

Cada uno de los factores fueron evaluados de acuerdo a la metodología de Renard et al (1997), con la excepción del factor P, dada la ausencia de las mismas en la cuenca.

Como resultado, se presenta el mapa de erosión potencial y actual. La producción de sedimentos por unidades de escurrimiento se determinó por el modelo KINEROS descrito anteriormente, con ello se pudieron obtener las especificaciones de prácticas que deberían ser implementadas en la microcuenca de intervención, tanto en laderas como en cauces, para garantizar la Restauración Hidrológica Ambiental.

4.4. Metodología para el Levantamiento del Inventario de Remociones en Masa.

El inventario de deslizamientos fue el resultado de la aplicación de una metodología consensuada en un Curso-Taller sobre metodologías para estudios hidrológicos, de erosión y sedimentación, riesgo de deslizamientos y SIG del Plan de Acción de las microcuencas de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán, celebrado en noviembre de 2010 entre la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH), el Colegio de Postgraduados (COLPOS) de la UACH y la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), instituciones encargadas de estudiar cinco microcuencas de aporte, entre ellas la de “El Ventilador”.

En primera instancia se definió el contenido del inventario, mismo que se utilizó para generar un formato en Excel que posteriormente serviría para el trabajo de campo y el análisis y clasificación de los deslizamientos.

En la etapa de trabajo de campo se realizaron recorridos en laderas y cauces de la microcuenca “El Ventilador”, tratando de abarcar las zonas afectadas por remociones en masa. La información más relevante del formato definido corresponde a su localización, tipo de remoción, altitud y pendiente del talud, factores de uso de suelo (tipo de cobertura en porcentajes, estratos de vegetación); factores edafológicos (tipo de suelo, profundidad del suelo, naturaleza del límite, textura; factores hidrológicos (escurrimientos superficiales y subsuperficiales); factores geológicos como tipo de roca observada, ángulos, meteorización y finalmente factores antrópicos.

Para el levantamiento del inventario y ubicación de cada deslizamiento se utilizó un GPS de marca GARMIN modelo eTrex Vista HCX con precisión de 3 metros.

Como resultado de este trabajo se obtuvo la ubicación de cada remoción para elaborar un mapa de inventario de remociones en masa dentro de la microcuenca “El Ventilador”.

Además de la localización, se obtuvo la poligonal envolvente (puntos GPS), de los límites de las remociones más importantes. El resto de ellas se levantó solo a nivel puntual. Los detalles del formato de inventario de remociones en masa se pueden consultar en el Anexo 2.

4.5. Susceptibilidad de Remociones en Masa.

4.5.1. Evaluación de la susceptibilidad.

En este estudio se utilizó información en formato vectorial “*shapefile*” (*SHP*) con datos de geología, obtenidos de cartografía del Servicio Geológico Mexicano

(SGM); y cartografía de INEGI (edafología, geología, hidrología superficial, uso de suelo, etc.). Por otro lado, se utilizó información en formato ráster “modelo de elevación digital” generado a partir de las curvas de nivel de INEGI escala 1:50,000, con esta información se procedió a generar mapas de pendientes y orientación (*aspecto*). Se realizó análisis espacial en SIG del cual se obtuvo el mapa de susceptibilidad de remociones en masa. El software utilizado para el procesamiento de la información fue ArcGIS 9.3, para producir capas de datos que posteriormente se usaron para generar el mapa de susceptibilidad de deslizamiento de tierra.

Las capas de datos usadas se clasificaron haciendo una diferenciación entre los distintos factores que podrían tener influencia en la ocurrencia de deslizamientos, con el objetivo de encontrar aquellas clases que son las que tienen mayor importancia.

También se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico o “Analytical Hierarchy Process” (AHP) para producir el mapa de susceptibilidad utilizando las capas de datos en formato SHP (con sus respectivas clases) y el mapa de inventario de deslizamientos generado.

Diversos estudios demuestran que cuando las condiciones del terreno y las demás características estudiadas en gabinete son evidenciadas por la experiencia del trabajo en campo, como el inventario realizado, el enfoque del AHP da mejores resultados que el empleo de otros métodos. Los resultados de la aplicación del AHP se muestran en la (Tabla 9).

Tabla 9. Matrices de comparaciones pareadas, pesos y razón de consistencia de factores condicionantes y clases en las capas de datos, microcuena “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

	Factores		1	2	3	4	5	Peso
	Geología							
1.-	Andesita		1					0.8
2.-	Límite de alteración		1/4	1				0.2
	Razón de consistencia:	0						

	Factores		1	2	3	4	5	Peso
	Uso del suelo							
1.-	Bosque		1					0.134
2.-	Vegetación Secundaria		2	1				0.283
3.-	Agricultura		2	1	1			0.356
4.-	Sin Vegetación		1	1/2	1/3	1		0.138
5.-	Urbano		1	1/3	1/6	1/2	1	0.088
	Razón de consistencia:	0.029						
	Pendiente (Grados)							
1.-	0 - 10		1					0.103
2.-	10-20		2	1				0.2
3.-	20 - 30		5	4	1			0.408
4.-	30 - 40		2	1	1	1		0.259
5.-	40 - 50		1/4	1/9	1/9	1/9	1	0.029
	Razón de consistencia:	0.063						
	Orientación							
1.-	Norte		1					0.308
2.-	Este		1/9	1				0.04
3.-	Sur		1/2	5	1			0.17
4.-	Oeste		2	9	3	1		0.482
	Razón de consistencia:	0.025						
	Distancia a escurrimientos							
1.-	0 - 50		1					0.4
2.-	50 - 100		1/2	1				0.176
3.-	100 - 150		1/2	1	1			0.176
4.-	150 - 200		1/3	1	1	1		0.163
5.-	200 - 250		1/5	1/2	1/2	1/2	1	0.084
	Razón de consistencia:	0.005						
	Densidad de drenaje							
1.-	A		1					0.118
2.-	B		5	1				0.461
3.-	C		3	1/2	1			0.255
4.-	D		1	1/5	1/2	1		0.138
5.-	E		1/7	1/9	1/9	1/9	1	0.028
	Razón de consistencia:	0.076						

	Factores		1	2	3	4	5	Peso
	Edafología							
1.-	Litosol		1					0.062
2.-	Andosol Ocrico		5	1				0.236
3.-	Andosol Ocrico Fase Gravosa		9	4	1			0.701
	Razón de consistencia:	0.089						

4.5.1.1. Datos de entrada (factores condicionantes).

Los datos de entrada para la aplicación de esta metodología fueron capas de datos en formato *shapefile*, se describen a continuación:

Inventario de remociones en masa. El mapa de inventario de remociones es un elemento muy útil para la realización del análisis de susceptibilidad puesto que se representan de manera gráfica las zonas en las que ocurrieron deslizamientos, de tal manera que al sobreponer el mapa de inventario con alguna otra capa de datos de entrada se pueden identificar con facilidad las condiciones en las que hay una mayor presencia de deslizamientos.

Geología. Las características geológicas son un factor clave para la determinación de las condiciones en las que ocurren las remociones ya que al haber unidades geológicas débiles existe una mayor probabilidad de que se presenten remociones al combinarse con condiciones climáticas extremas que los provoquen. En la zona de estudio únicamente se presentan dos condiciones geológicas por diferenciar, mismas con las que se realizó el estudio.

Uso de suelo. El uso del suelo es uno de los factores que influye en la probabilidad de que ocurran remociones en una ladera puesto que los diferentes usos de suelo presentan condiciones que pueden ser favorables o desfavorables para que existan. El tipo y porcentaje de cobertura de una ladera con pendiente alta, es determinante para favorecer o evitar la ocurrencia de una remoción, las zonas que tienen una cobertura pobre, sin vegetación o poca cobertura van a permitir aún más la presencia de movimientos de masas. En la zona de estudio se tiene una gran cobertura por bosques, sin embargo existen zonas alteradas por

actividades humanas (deforestación y agricultura) en las cuales el material está más propenso a deslizarse.

Densidad de drenaje. La densidad de drenaje es la razón de la longitud total del escurrimiento al área de drenaje de la cuenca; entre más alta sea la densidad de drenaje, es menor la infiltración y mayor el movimiento del flujo superficial (Pachauri *et al* 1998; Nagarajan *et al* 2000; Cevik *et al* 2003 y Yalcin, 2008). La mayor parte de la infiltración toma lugar cerca de los escurrimientos en pendientes que tienen una alta permeabilidad como el aluvión. Para producir el mapa de densidad de drenaje se tomaron en cuenta afluentes de primer, segundo y tercer orden de la red de drenaje generada con la herramienta ArcSWAT 2009 en ArcGIS 9.3 en el modelo digital de elevación, tomando como superficie de captación un área de 10 ha. Se calculó la densidad de drenaje de cada escurrimiento de cada orden, originando varias regiones que se agruparon en cinco clases designadas por letras de acuerdo a las variaciones del factor de densidad de drenaje.

Pendiente. El principal parámetro de análisis en la estabilidad de pendientes es el ángulo de la pendiente (Lee *et al.*, 2001). Debido a que el ángulo de la pendiente está directamente relacionado con la ocurrencia de remociones, se usa frecuentemente en la preparación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos (Clerici *et al* 2002; Cevik *et al* 2003; Ercanoglu *et al* 2004; Lee *et al* 2004 y Yalcin, 2008). El mapa de pendiente del área de estudio se dividió en cinco categorías. Se realizó un análisis en ArcGIS 9.3 para descubrir en que rango de pendiente suceden las remociones y cuál es la razón de ocurrencia observada.

Orientación de laderas. En el mapa de exposición o de orientación de laderas fue calculado mediante los datos de elevación del MDE definiendo la dirección de cara de la ladera de cada celda y sus vecinos, el resultado se expresa en un ráster expresado en grados (de 0° a 360°), en base a los puntos cardinales, el valor de -1 corresponde a las zonas planas. Esto se puede elaborar empleando la función aspect en ArcGis. Así como en la pendiente, la orientación es uno de los

factores importantes en la preparación de mapas de susceptibilidad de remociones (Guzzetti *et al.*, 1999; Nagarajan *et al.*, 2000; Saha *et al.*, 2002; Cevik *et al.*, 2003; Ercanoglu *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004 y Lee, 2005). La orientación está relacionada con parámetros como la exposición a la luz del sol, vientos, lluvia (grado de saturación) y discontinuidades, los cuales pueden controlar la ocurrencia de remociones (Dai *et al.*, 2001 y Cevik, *et al.*, 2003). En este estudio se creó el mapa de orientación para mostrar la relación que existe entre la orientación y las remociones. Se creó una clasificación por orientación de regiones de acuerdo a diferentes clases que son: plana (-1), norte (315° - 360°, 0° - 45°), este (45° - 135°), sur (135° - 225°) y oeste (225° - 315°). Se realizaron algunos análisis usando los mapas de orientación y deslizamientos para determinar la distribución de éstos últimos de acuerdo a las clases formadas de la orientación y el porcentaje de deslizamientos que ocurren en cada clase de orientación.

Edafología. Las características de los tipos de suelo determinan que tan propensa es una pendiente a presentar remociones, si el tipo de suelo presenta características que favorecen una remoción, la probabilidad de que ocurran se va a incrementar. El grado de saturación de un suelo influye en la estabilidad de una pendiente pronunciada. En este caso se identificaron tres clases en el factor de edafología, con las que se realizó el análisis y se obtuvo el porcentaje de remociones en cada una de las clases.

Cercanía a escurrimientos. Un parámetro importante que controla la estabilidad de la pendiente es el grado de saturación del material en la pendiente. La cercanía de la ladera a estructuras de drenaje es otro factor importante en términos de estabilidad. Los escurrimientos pueden de manera adversa afectar la estabilidad erosionando las laderas o saturando la parte baja del material hasta resultar en el incremento de los niveles de agua (Gokceoglu *et al.*, 1996; Dai *et al.*, 2001; Saha *et al* 2002; Cevik, *et al* 2003 y Yalcin, 2005). Se crearon cinco áreas buffer para encontrar el grado de afectación de las pendientes debido a la cercanía con los escurrimientos. También se crearon otros mapas que sirvieron para el análisis de este factor, ellos fueron: el de saturación, se usó el modelo de

Stability Index Mapping (SINMAP), posteriormente, el de concentración de flujo, primero se crea un mapa de dirección de flujo a partir de un ráster de superficie, mismo que indica la dirección en la cual el agua podría fluir en cada celda analizada. El ráster resultante se toma como base para generar el mapa de saturación y concentración. El resultado se reclasifica y se generan rangos de saturación.

Finalmente, otro mapa que fue creado para complementar el análisis de la ocurrencia de remociones fue el de *Geometría de laderas*, según Lugo (1989), un mapa que representa la morfología del relieve, puede ser la geometría de laderas. Para la microcuenca “El Ventilador” se generó usando el MDE con la función curvature en ArcGis. El programa realiza el cálculo de la curvatura permitiendo conocer superficies rectas (casi planas), cóncavas y convexas, los valores positivos representan formas cóncavas, los negativos indican formas convexas y las partes planas ‘rectas’ son representadas con cero. También se comparó contra el inventario de remociones y se obtuvieron porcentajes de ocurrencia por cada tipo de geometría.

4.5.2. Proceso de análisis jerárquico.

El Proceso de Análisis Jerárquico AHP es una teoría de medición para tratar con criterios cuantificables e intangibles que han sido aplicados a numerosas áreas, tales como la teoría de toma de decisiones y solución de conflictos (Vargas, 1990). El Proceso de Análisis Jerárquico es una herramienta de toma de decisiones con enfoque multiobjetivo y multicriterio el cual permite al usuario llegar a una escala de preferencias preparada a partir de un conjunto de alternativas. El AHP ganó una amplia aplicación en selección de sitios, análisis de idoneidad, planeación regional y análisis de susceptibilidad (Ayalew *et al.*, 2005). Para aplicar este enfoque, es necesario descomponer y obtener de un problema los factores que lo componen; ordenar esos factores en un orden jerárquico; asignar valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada factor; y sintetizar los juicios para determinar las prioridades a ser asignadas a dichos

factores (Saaty *et al.*, 2001). En la construcción de la matriz de comparaciones pareadas, cada factor es comparado contra cada uno de los otros y se le asigna un valor dominante relativo entre 1 y 9 a la celda de intersección. Cuando el factor en el eje vertical es más importante que el factor en el eje horizontal los valores varían entre 1 y 9, y viceversa los valores varían entre los recíprocos $1/2$ y $1/9$. En esa técnica, primeramente, los efectos de cada parámetro a la susceptibilidad de deslizamientos relativo a cada uno de los demás fueron determinados en evaluaciones por parejas, para posteriormente determinar las preferencias en los efectos de los parámetros en el mapa de susceptibilidad de deslizamientos. Normalmente, la determinación de los valores de los parámetros relativos a cada otro es una situación que depende de las elecciones del tomador de decisiones. Sin embargo, en este estudio, la comparación de parámetros relativos a cada uno de los otros y la determinación de las alternativas de decisión, llamados el efecto de los valores de los subcriterios de los parámetros (pesos), se basaron en una comparación del mapa de inventario de deslizamientos construido con el levantamiento en campo, con cada una de las otras capas de datos. Consecuentemente los pesos de los valores fueron determinados de manera precisa con datos reales de campo. En este estudio se utilizaron bases de datos obtenidas como resultado de recorridos de campo y trabajos elaborados en laboratorios de cómputo y oficinas con la finalidad de generar el mapa de susceptibilidad de deslizamientos. En el análisis las capas de datos en formato vectorial fueron convertidas en modelos de datos ráster, determinando sus pesos en términos de las capas de datos vectoriales y los subcriterios del tomador de decisiones, como consecuencia de los cálculos llevados a cabo de acuerdo a la metodología del AHP. Como resultado de este análisis se produjo el mapa de susceptibilidad de deslizamientos para la microcuenca “El Ventilador”. Para todos los modelos que se ejecutaron, se calculó la Razón de Consistencia “Consistency Ratio” (CR) y se descartaron de manera automática aquellos con un CR mayor de 0.1. Se definieron los valores de los pesos de los factores espaciales usando el método de AHP. Usando el procedimiento de suma ponderada se usaron los pesos adquiridos para calcular los modelos de susceptibilidad.

En la (Tabla 10) se observa que los factores de pendiente, uso de suelo y la geología, fueron los parámetros más importantes, mientras que la densidad de drenaje fue el factor de menor importancia.

Tabla 10. Matriz de comparaciones pareadas, pesos y razón de consistencia de los factores condicionantes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Factores	1	2	3	4	5	6	7	Peso
1.- Geología	1							0.132
2.- Uso del suelo	2	1						0.169
3.- Pendiente	3	1	1					0.232
4.- Orientación	1	1	1/2	1				0.120
5.- Distancia a escurrimientos	1	1/2	1/2	1	1			0.123
6.- Densidad de drenaje	1/2	1	1/2	1	1	1		0.105
7.- Edafología	1/2	1	1/2	1	1/2	2	1	0.118
Razón de consistencia:	0.046							

4.6. Marco Social.

Para conocer las características socioeconómicas de la población se utilizó el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI y particularmente los Principales Resultados por Localidad. Los datos utilizados para este trabajo corresponden a:

Tabla 11. Datos estadísticos básicos de la localidad de Dolores, Angangueo Michoacán.

ENTIDAD	16
NOM_ENT	Michoacán de Ocampo
MUN	005
NOM_MUN	Angangueo
LOC	0003
NOM_LOC	DOLORES
LONGITUD	1001619
LATITUD	193821
ALTITUD	2807

De un total de 190 indicadores con las características de la población, los hogares censales y las viviendas, solo fueron usados algunas variables de los

siguientes indicadores: Población, Discapacidad, Educación y Características Económicas.

Finalmente, se incorpora la información del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) publicada en diciembre de 2010: Porcentaje de población, según indicadores de pobreza del municipio de Angangueo, Michoacán, México 2010. Además, se presentan las estimaciones del Índice de Rezago Social 2010 a nivel municipal y por localidad. Es de destacar que el Índice de Rezago Social incorpora indicadores de educación, salud, servicios básicos en la vivienda, y calidad y espacios en la vivienda.

4.7. Peligro y Vulnerabilidad Física – Social.

Para estimar el peligro en la microcuenca “El Ventilador”, primero se determinó que los procesos de remociones en masa constituyen una amenaza o peligro para la población de Dolores. Se realizó un análisis de la susceptibilidad del relieve a sufrir remociones en masa (Figura 15), el resultado de éste, se combinó con las zonas de saturación y se obtuvo el mapa de amenaza o peligro. Finalmente, se usó información de la población (total de habitantes y su densidad dentro de la microcuenca y se obtuvo el mapa de riesgo (Figura 16 y Figura 17).

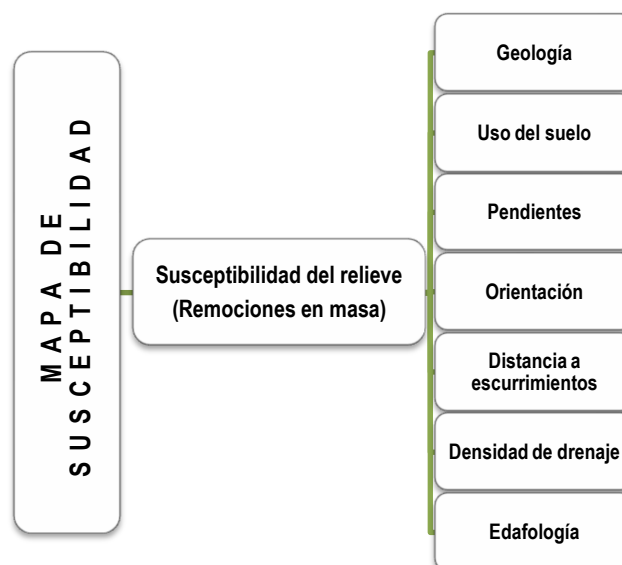


Figura 15. Esquema para determinar la susceptibilidad de remociones en masa.

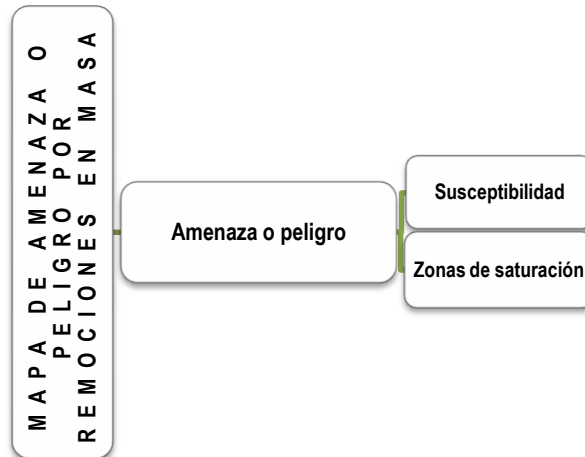


Figura 16. Esquema para determinar la amenaza o peligro por remociones en masa.



Figura 17. Esquema para determinar la vulnerabilidad social.

La vulnerabilidad se entenderá bajo la concepción de Wilches-Chaux (1989), es decir, como una vulnerabilidad global, que consiste en considerar no sólo la vulnerabilidad socioeconómica (total de población y densidad de población), sino también la vulnerabilidad física-natural. Para la evaluación del nivel de vulnerabilidad se utilizó únicamente la variable de población total y su densidad a partir del Censo de Población y Vivienda del INEGI, 2010, éstas variables se analizaron a nivel de pequeños núcleos urbanos con un inventario GPS de cada vivienda de la localidad de Dolores. Estos datos se procesaron a

través del software ArcMap 9.3 generando la distribución de población a nivel polígono y punto.

Cada factor constituye una capa de información dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG). Posteriormente, estas capas de información son usadas para realizar un análisis espacial en el SIG para determinar las áreas y las viviendas en peligro de remociones en masa así como la población más vulnerable.

4.8. Riesgo.

Finalmente, se obtiene el mapa de riesgo a través del cruce de los resultados obtenidos del mapa de peligro de remociones en masa con la vulnerabilidad, para establecer el grado de riesgo de cada vivienda, con ello se obtuvo la matriz de evaluación del riesgo por remociones en masa (Tabla 12).

Tabla 12. *Matriz de evaluación del riesgo por remociones en masa.*

		Vulnerabilidad				
		Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Amenaza o peligro	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Media	Baja
	Alta	Muy Alta	Alta	Media	Media	Baja
	Media	Alta	Alta	Media	Baja	Baja
	Baja	Media	Media	Baja	Baja	Muy baja
	Muy baja	Media	Media	Baja	Muy baja	Muy baja

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. Caracterización Físico-Geográfica de la Microcuenca “El Ventilador”.

5.1.1. Fisiografía.

La Microcuenca “El Ventilador” está ubicada dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y particularmente en la subprovincia de “Mil Cumbres”, el sistema de topografía genérico es de tipo sierra formado por escudos volcánicos (INEGI, 2009). Se distingue por ser una zona de fosas tectónicas y de vulcanismo reciente caracterizada por predominar en ella derrames basálticos y varios volcanes. El pueblo de Mineral de Angangueo se encuentra enclavado en la cañada de San Francisco que está orientada de norte a sur y tiene una longitud de aproximadamente 10 km. Esta cañada se inicia en el lado sur de la altiplanicie formada en la parte superior de la sierra, localizándose en esta los llanos denominados Las Papas con una altitud de 3,160 msnm, y Garatachía con 3,100 msnm.

El rango altitudinal va desde los 2,740 hasta los 3,400 msnm en las partes elevadas de los parteaguas. Las elevaciones máximas las encontramos al Norte, Noroeste y Noreste de la microcuenca, mientras que en la zona Suroeste y Sureste se ubica la localidad de Mineral de Angangueo (Figura 18).

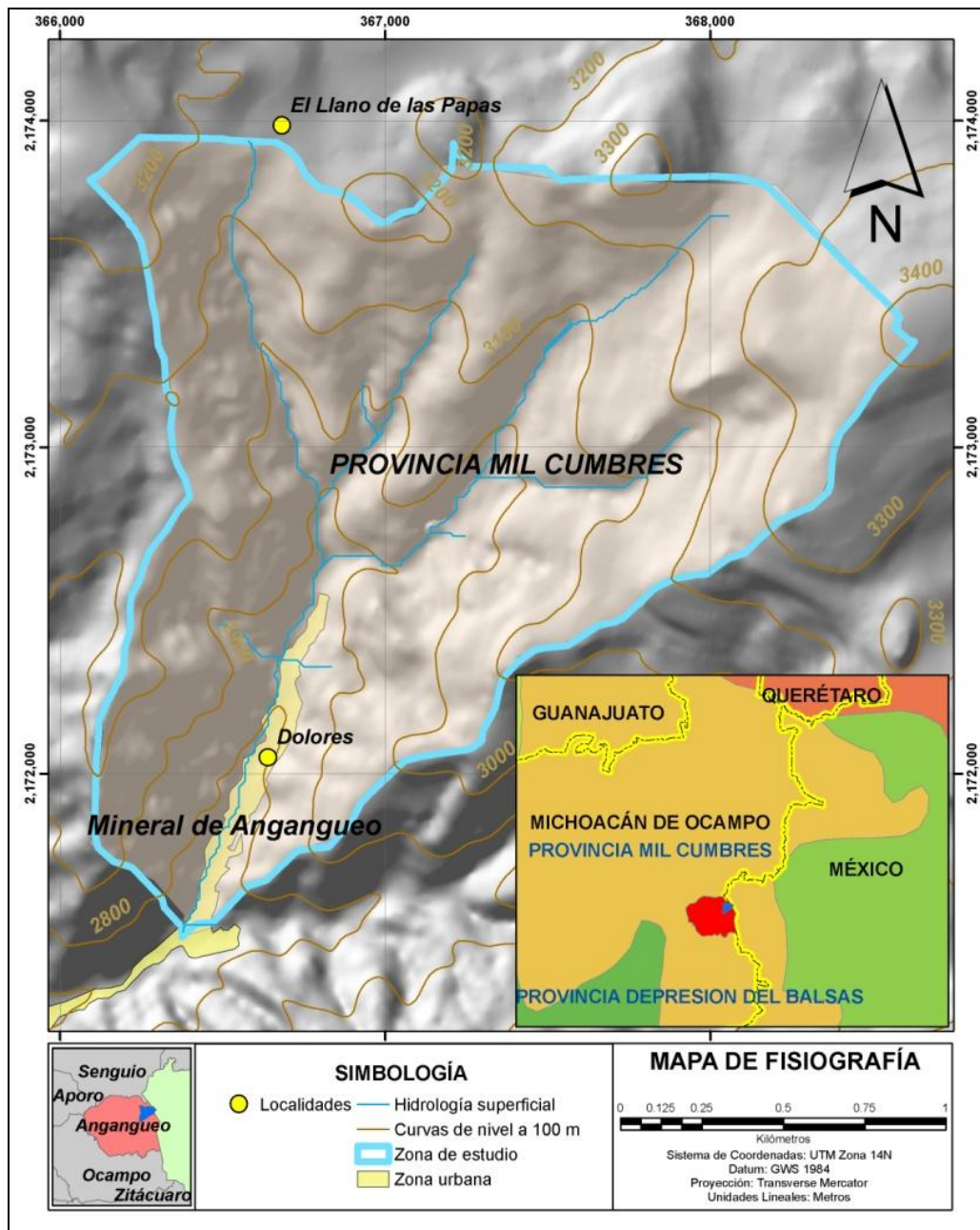


Figura 18. Mapa de Fisiografía, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

El sistema hidrográfico da lugar a laderas muy disectadas. La microcuenca presenta un relieve de tipo montañoso, con laderas de pendientes muy inclinadas y fuertemente inclinadas.

En cuanto a la valoración de las pendientes, estas son descritas con detalle más adelante.

5.1.2. Características morfométricas.

De acuerdo a sus características morfológicas, la microcuenca “El Ventilador” es de tipo exorreica de forma alargada la cual presenta un drenaje que podría considerarse como asimétrico y por su tamaño se considera una microcuenca muy pequeña (Tabla 13).

A continuación se detallan las características morfológicas más importantes:

Tabla 13. *Índices morfométricos de la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Microcuenca	Índice
Área (en km ²)	3.62
Perímetro (en km)	8.68
Longitud de la cuenca (en km)	2.88
Índice de forma	0.4353
Coefficiente de compacidad	1.287
Relación de elongación	0.7442
Relación de bifurcación	0.4167
Longitud de cauce (en km)	3.646
Densidad de drenaje (km/km ²):	4.0901
Densidad de corriente	27.8968
Pendiente media (en grados y porciento)	24.29° 46.41%
Elevación mínima (en msnm)	2740
Elevación máxima (en msnm)	3400
Elevación media (en msnm)	3070.88
Orden de cuenca	5

A partir de las características antes descritas podemos deducir que la microcuenca se encuentra en una zona en donde el relieve topográfico es de tipo abrupto, constituido por grandes eminencias de pronunciadas pendientes por donde descienden arroyos torrenciales tributarios de los ríos Puerco y Carrillo, los cuales se encuentran en etapa juvenil. Estos ríos se unen aguas abajo a los ríos Limpio, de la Plancha y las Trojes, para formar el río de Angangueo, que es afluente del río Tuxpan. La topografía de la zona y la forma de la microcuenca

determinan que el tiempo de respuesta hidrológica sea rápido, y a pesar de que la mayoría de los afluentes son intermitentes de mediana longitud y baja densidad de drenaje, no retiene el agua ya que es drenada al exterior de la microcuenca de forma rápida. Por esta razón, es recomendable realizar obras para la captación de agua, control de velocidad del agua en cauces y retención de sedimentos y rocas, así como para la conservación de humedad en laderas.

De acuerdo a su curva hipsométrica, la microcuenca “El Ventilador”, es una cuenca geológicamente joven con una tendencia marcada a la madurez (Figura 19), y por la pendiente del cauce se considera una cuenca de montaña (Figura 20).

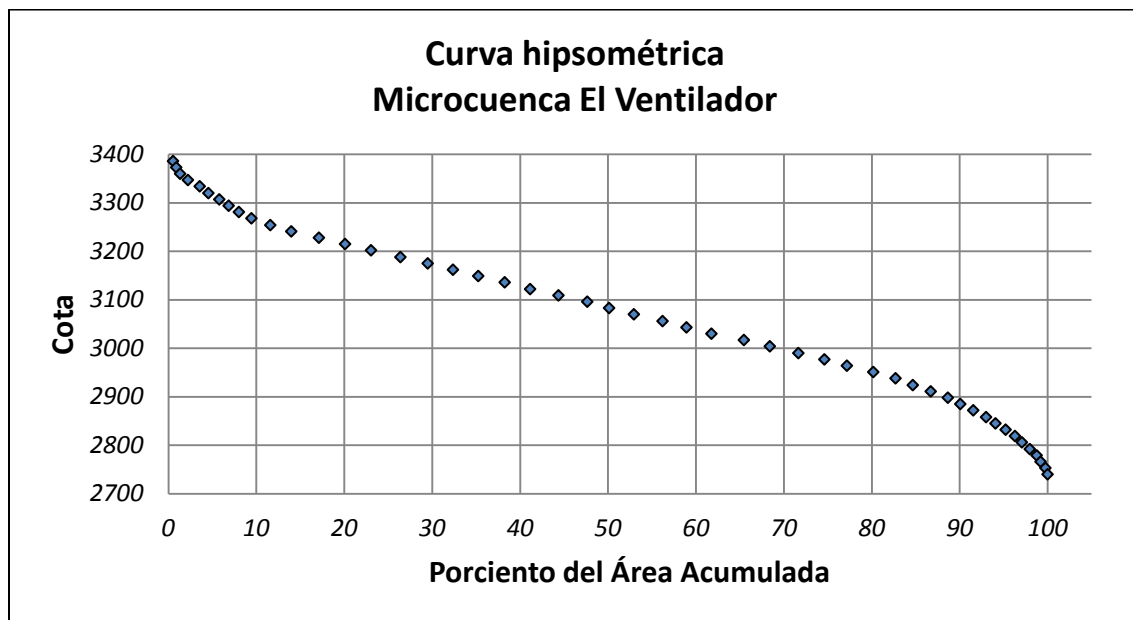


Figura 19. Curva Hipsométrica, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

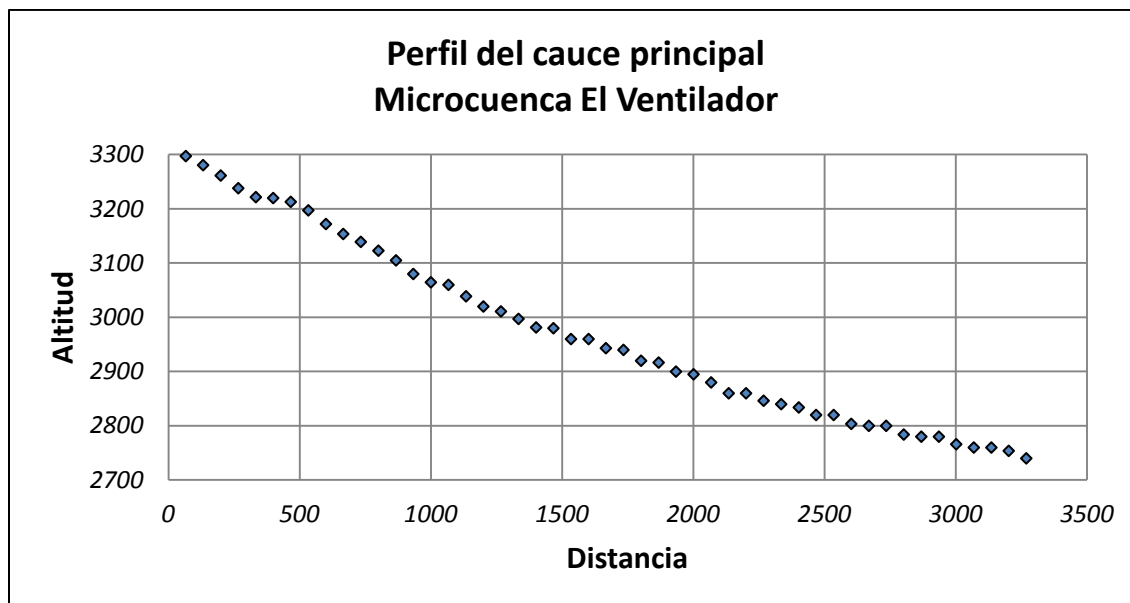


Figura 20. Perfil del cauce principal, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.1.3. Hidrología.

La microcuenca “El Ventilador” se encuentra dentro de la región hidrológica del Río Balsas (RH18) y particularmente en la Cuenca del Río Cutzamala (071), Subcuenca del Río Chiquito y microcuenca de Mineral de Angangueo (Figura 21).

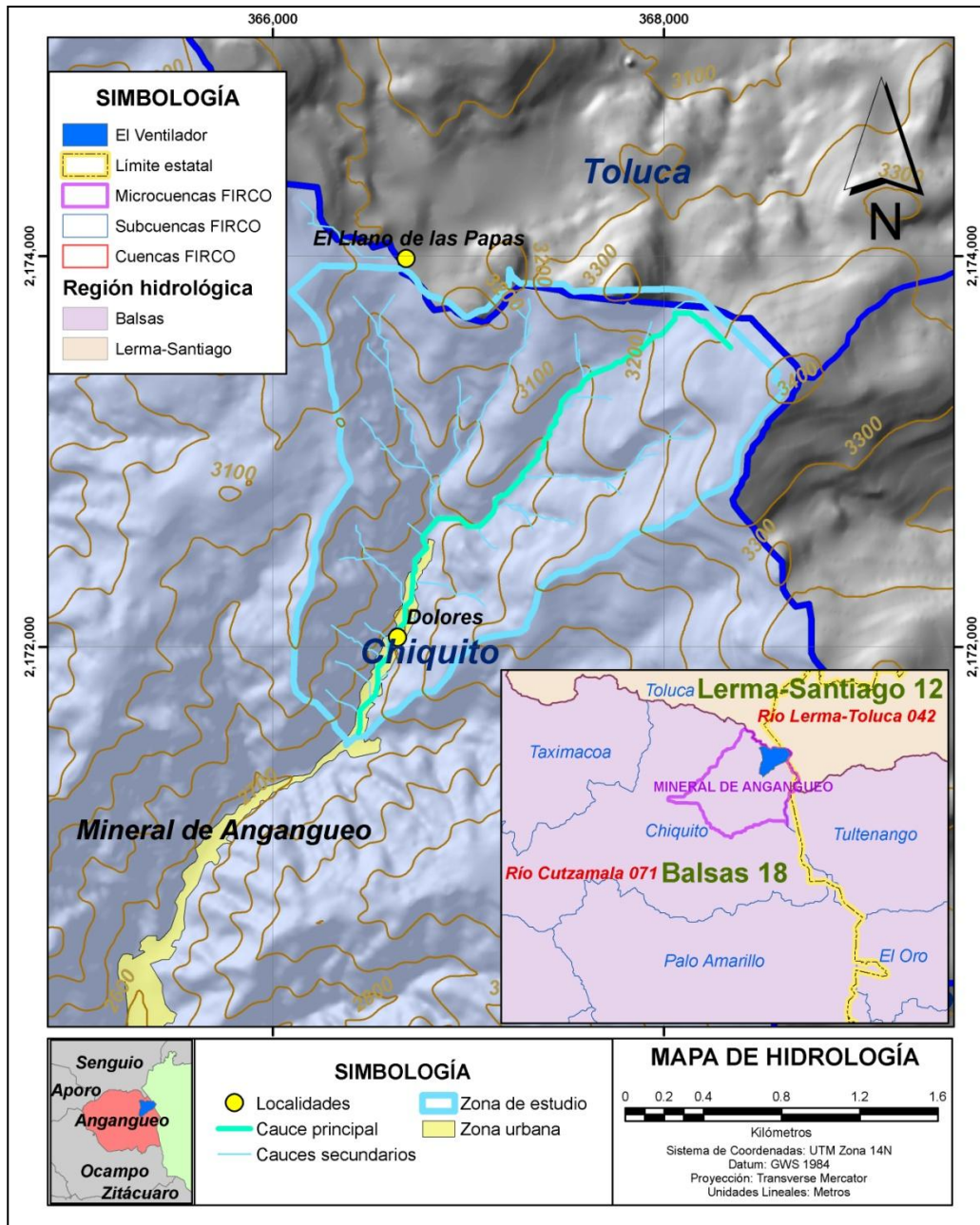


Figura 21. Mapa hidrológico, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

La microcuenca “El Ventilador” no presenta corrientes perennes, solo corrientes intermitentes con caudal en temporada de lluvias. Las características hidrológicas de la microcuenca esta moldeada por la acción de la Subcuenca del Río Chiquito y según se aprecia en la Figura 21, que el cauce principal abastece al suroeste a la Cuenca del río “Cutzamala”.

5.1.4. Vegetación.

La mayor parte del territorio es área boscosa y predominan las coníferas. Las características generales como el tipo de suelo, clima y precipitación, generan un tipo de vegetación en el que destacan diferentes especies arbóreas, entre ellas: pino, cedro y oyamel. Además en algunas áreas se encuentran pastizales. Las zonas boscosas constituyen uno de los elementos naturales que deben protegerse, dada su importancia ecológica, paisajística y económica; esta última dada por el flujo de turismo.

La distribución y las características de la cubierta vegetal en la microcuenca “El Ventilador” están determinadas por una serie de factores físicos como son: diversidad de formas del terreno, material geológico, suelos y en particular el clima de la región. El clima que predomina es templado húmedo con lluvias en verano, por lo que la distribución de la vegetación en la microcuenca es como sigue: Bosque de encino (11.36%), Bosque de oyamel (47.93%), Bosque de oyamel – pino (3.68%), Bosque de oyamel con vegetación secundaria (3.87%), Bosque de oyamel con vegetación secundaria cobertura arbórea media (1.60%), Bosque de pino (3.44%), Bosque de pino – encino (8.35%), Bosque de pino con vegetación secundaria cobertura arbórea baja (1.44%) y Bosque de pino con vegetación secundaria cobertura arbórea media (0.22%), (Tabla 14).

Por otro lado, contrasta la superficie dedicada a la agricultura de temporal con solo el 5.58% de la superficie de la microcuenca (Tabla 14). Finalmente, las áreas sin vegetación ocupan el 1.09%, superficie en reforestación 1.5%, vegetación herbácea y pastizales con 17% de la superficie de la microcuenca. Esto nos indica que la principal actividad económica es la explotación del bosque por los ejidatarios de la zona (Figura 22).

Tabla 14. Uso del suelo y vegetación. Elaboración propia a partir de datos SIG.

Uso del suelo	Ha	Por ciento
Agricultura de temporal	20.20	5.58
Áreas sin vegetación aparente	3.96	1.09
Bosque de encino	41.13	11.36
Bosque de oyamel	173.51	47.93

Uso del suelo	Ha	Por ciento
Bosque de oyamel - pino	13.32	3.68
Bosque de oyamel con veg sec / cobertura arbórea baja	14.03	3.87
Bosque de oyamel con veg sec / cobertura arbórea media	5.80	1.60
Bosque de pino	12.46	3.44
Bosque de pino - encino	30.23	8.35
Bosque de pino con veg sec / cobertura arbórea baja	5.224	1.44
Bosque de pino con veg sec / cobertura arbórea media	0.797	0.220
Camino de terracería	0.539	0.14
Carretera pavimentada	4.113	1.13
Juniperus chaparro	1.736	0.47
Pastizal inducido	2.294	0.63
Pino - reforestación	0.922	0.25
Pino - reforestación - pastizal inducido	0.659	0.18
Veg sec herbácea - pastizal inducido	7.449	2.05
Vegetación herbácea	9.647	2.66
Vegetación sec herbácea y arbustiva	11.708	3.23
Zona urbana	2.249	0.62

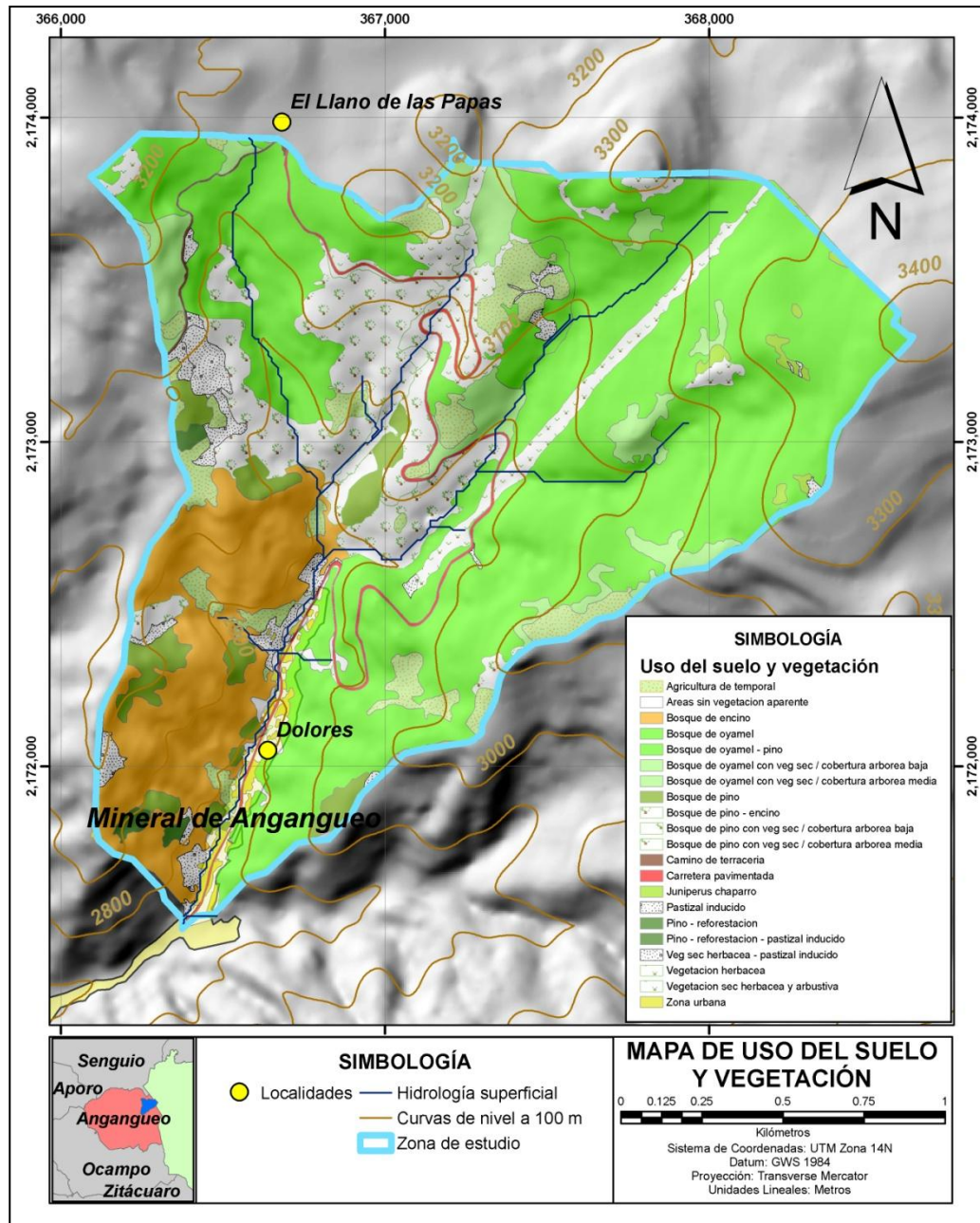


Figura 22. Mapa de Uso del Suelo y Vegetación, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.1.5. Edafología.

Los suelos de la zona se localizan en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, por lo que los sistemas predominantes son de origen volcánico y predominan las rocas extrusivas del Terciario TmA-TA (Andesita-Toba andesítica) y TsB (basaltos), en la zona existen varios aparatos volcánicos. El mosaico de

suelos no es muy complejo, debido principalmente a la relativa homogeneidad mineralógica de las rocas, así como a la predominancia de afloramientos de basalto y otras rocas ígneas básicas ricas en minerales ferromagnesianos (Tabla 15), de las cuales se considera que se han derivado los suelos en esta región. Así, los suelos que predominan son:

Tabla 15. Tipo de suelos. Elaboración propia.

Suelo	Ha	Por ciento
Andosol Húmico	3.3	0.9
Andosol Húmico con fase gravosa	25.7	7.1
Andosol Ócrico	11.9	3.3
Andosol Ócrico con fase gravosa	278.4	76.9
Litosol	42.9	11.8
	362.1	100.0

De acuerdo al mapa de suelos encontramos que en la zona predominan los suelos de tipo Andosol (Húmico, Húmico con fase gravosa, Ócrico, Ócrico con fase gravosa) y Litosol.

Los Andosoles son suelos oscuros muy ligeros, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico. Particularmente los suelos Andosol Húmico presentan una capa superficial algo gruesa, oscura pero pobre en nutrientes, con terrones muy duros cuando están secos; el Andosol Ócrico es muy limoso o arcilloso a menos de 50 cm de profundidad, tiene una capa superficial clara y pobre en materia orgánica y nutrientes. La vegetación que sustentan es en su mayoría bosques de oyamel y pino. Es muy común la presencia de gruesas capas de grava y arena.

Los Litosoles son suelos que están limitados en profundidad por una roca dura continua y coherente dentro de los 25 cm de la superficie. Se localizan en las partes altas de la microcuenca (al noreste) con pendientes abruptas donde poco o ningún material del suelo se ha acumulado, principalmente en aquellas desmontadas para su incorporación a la agricultura de temporal o pastizales, estas zonas son las que presentan mayor erosión.

Dentro de la microcuenca “El Ventilador” podemos encontrar zonas con infiltración de alta a baja. La topografía y pendientes de la zona no favorece la acumulación y desarrollo de suelos dado que predominan pendientes muy inclinadas de 15-35°, esto equivale al 72% de la superficie del la microcuenca y empinadas de 35-55°, lo que representa un 10.9% de la superficie de la microcuenca.

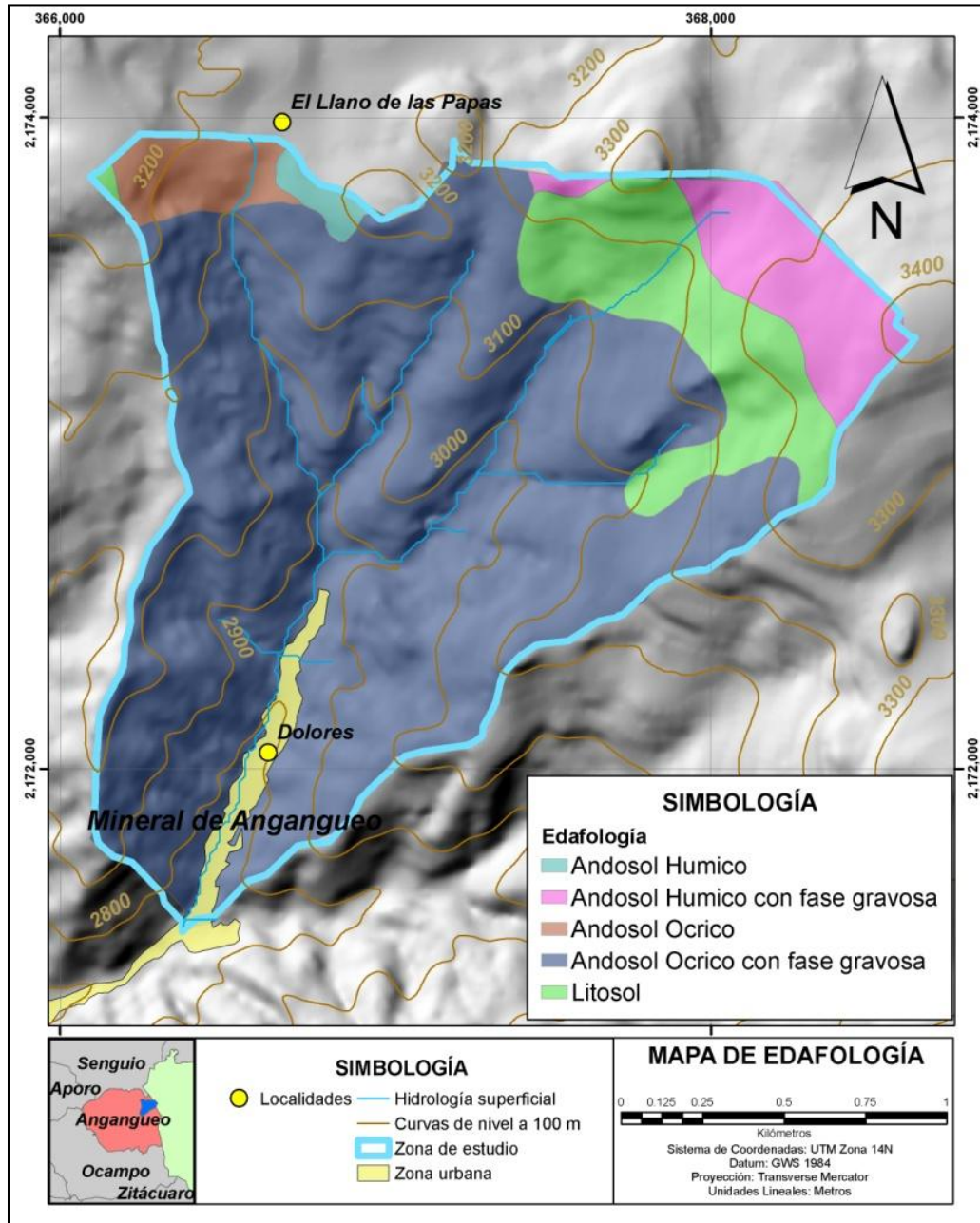


Figura 23. Mapa de Edafología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.1.6. Geología regional.

El rasgo morfotectónico más relevante de la región es la Sierra de Angangueo, de orientación noroeste-sureste, con alturas que varían de 2,400 a 3,600 m.s.n.m., siendo su punto más alto el Cerro del Campanario con 3,640 m. Las rocas más antiguas que afloran en la región de estudio corresponden a una secuencia volcanosedimentaria metamorfizada del Subterreno Teloloapan (ST) del Terreno Guerrero (TG) de edad Cretácico Inferior (Figura 24).

Casi la totalidad de la porción occidental de la zona, está constituida por la unidad andesítica de Angangueo (Tm A) que representa la manifestación masiva con que se inicia la actividad volcánica del CVM en la zona. Se trata de un macizo conformado por varios aparatos volcánicos de composición andesítica con una textura porfídica y en algunas zonas afanítica microcristalina. La asociación de fenocristales dominante es de plagioclasas y piroxenos, y localmente puede ser de hornblenda con o sin piroxenos; localmente se puede encontrar una brecha intercalada con los derrames andesíticos. La edad de esta andesita corresponde al Mioceno según dos fechamientos radiométricos realizados al sureste de Angangueo (17.6 y 13.1 Ma., K/Ar, CFE 1992). Esta unidad es muy importante, debido a que en ella están emplazadas las vetas polimetálicas del Distrito Minero de Angangueo.

En la porción centro occidental de la zona, al occidente de Angangueo aflora una unidad constituida por brecha andesítica y *debris flow* (Tm BvA), que representan los últimos eventos del volcanismo miocénico de la Sierra Madre Occidental.

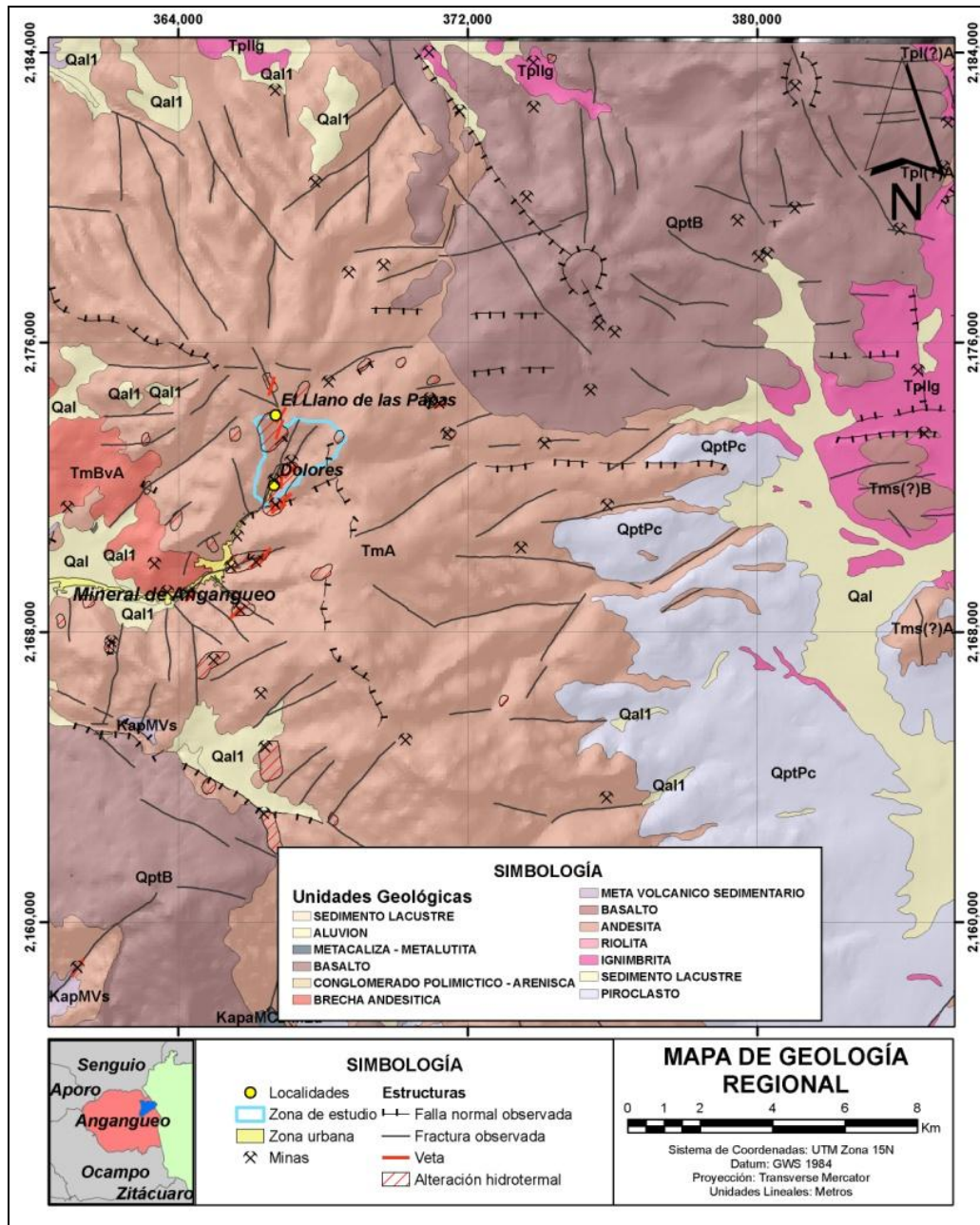


Figura 24. Mapa de Geología Regional, microcuena "El Ventilador", Angangueo, Michoacán.

5.1.7. Geología local.

La microcuena "El Ventilador" se encuentra en una zona geológica en donde predominan rocas ígneas Terciarias de naturaleza andesítica y basáltica. Los basaltos se presentan en forma de derrames de lava y forman algunas altiplanicies como el Llano de Las Papas y Garatachía. El primero, se ubica en los

límites de la zona norte de la microcuenca, mientras que las andesitas forman principalmente las eminencias topográficas como el cerro de Guadalupe, el cerro del Melón, etc.

La sierra de Angangueo está constituida en su base por una gruesa formación de pizarras que están atravesadas o cubiertas por rocas ígneas, estas rocas son las de más reciente actividad volcánica que se efectuó del Terciario. La sierra divide al estado de Michoacán y de México y forma el parteaguas de dos sistemas fluviales que irrigan a cada estado.

Las rocas sedimentarias representan depósitos recientes que corresponden a los siguientes:

Depósitos aluviales: Son el producto de la desintegración y descomposición de las rocas expuestas en las partes elevadas principalmente, y que son transportados y acumulados por el agua en las partes bajas, como en la cañada de San Francisco y en los lugares inmediatos a los cauces de los arroyos.

Suelos residuales: Son el producto de la lixiviación de las rocas subyacentes y de los minerales sulfurosos, especialmente el sulfuro de hierro. Si bien es cierto que el hierro se disuelve rápidamente en aguas sulfatadas, se precipita como hidróxido de hierro en presencia de oxígeno, y la zona superficial y el afloramiento de un cuerpo de sulfuros se mancha generalmente con coloraciones rojizas debido al contenido de óxidos de hierro principalmente aluminio.

Los depósitos aluviales se deben a los cambios bruscos de temperatura que desintegra las rocas formando un material arenoso "in situ".

Las rocas ígneas pertenecen a la zona de Fosas Tectónicas y vulcanismo reciente. Las rocas que en esta zona se encuentran son andesitas, dacitas y basaltos. La asociación andesita-basalto conforma la orografía local. Las

andesitas adoptan la forma de picos y montañas, mientras que los derrames basálticos forman mesetas.

Andesitas: son las rocas más ampliamente difundidas, cubren la mayor parte de la superficie y casi la totalidad del subsuelo. Desde el punto de vista económico, son las rocas más importantes por formar la roca encajonante de los yacimientos del lugar. Se diferencian dos tipos de andesitas, las andesitas de piroxema (augita e hiperstena) y andesitas de anfíbola (hornblenda); las primeras son las más abundantes.

El color de las andesitas varía de café rojizo a gris y verde, con diferentes tonalidades y cambios graduales entre los mismos cerca de las zonas mineralizadas. Las andesitas de hiperstena adoptan colores oscuros y se les encuentra en la carretera que une a Angangueo con el tiro de Catingon.

TmA-TA (Andesita-Toba andesítica) y TsB (basaltos) y materiales volcánicos según interpretación de SE, (1999), (Tabla 16).

Tabla 16. *Unidades geológicas. microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Clave	Clase	Tipo	Era	Sistema	Tipo de roca
Ts(B)	Ígnea extrusiva	Basalto	Cenozoico	Neógeno	Ignea Extrusiva Básica
Ts(A)	Ígnea extrusiva	Andesita	Cenozoico	Neógeno	Ignea Extrusiva Intermedia

Finalmente, es destacar que en la zona de estudio existe una gran alteración hidrotermal, lo que origina una ‘descomposición’ del material del subsuelo lo que sugiere una mayor susceptibilidad del material a ser fácilmente removido.

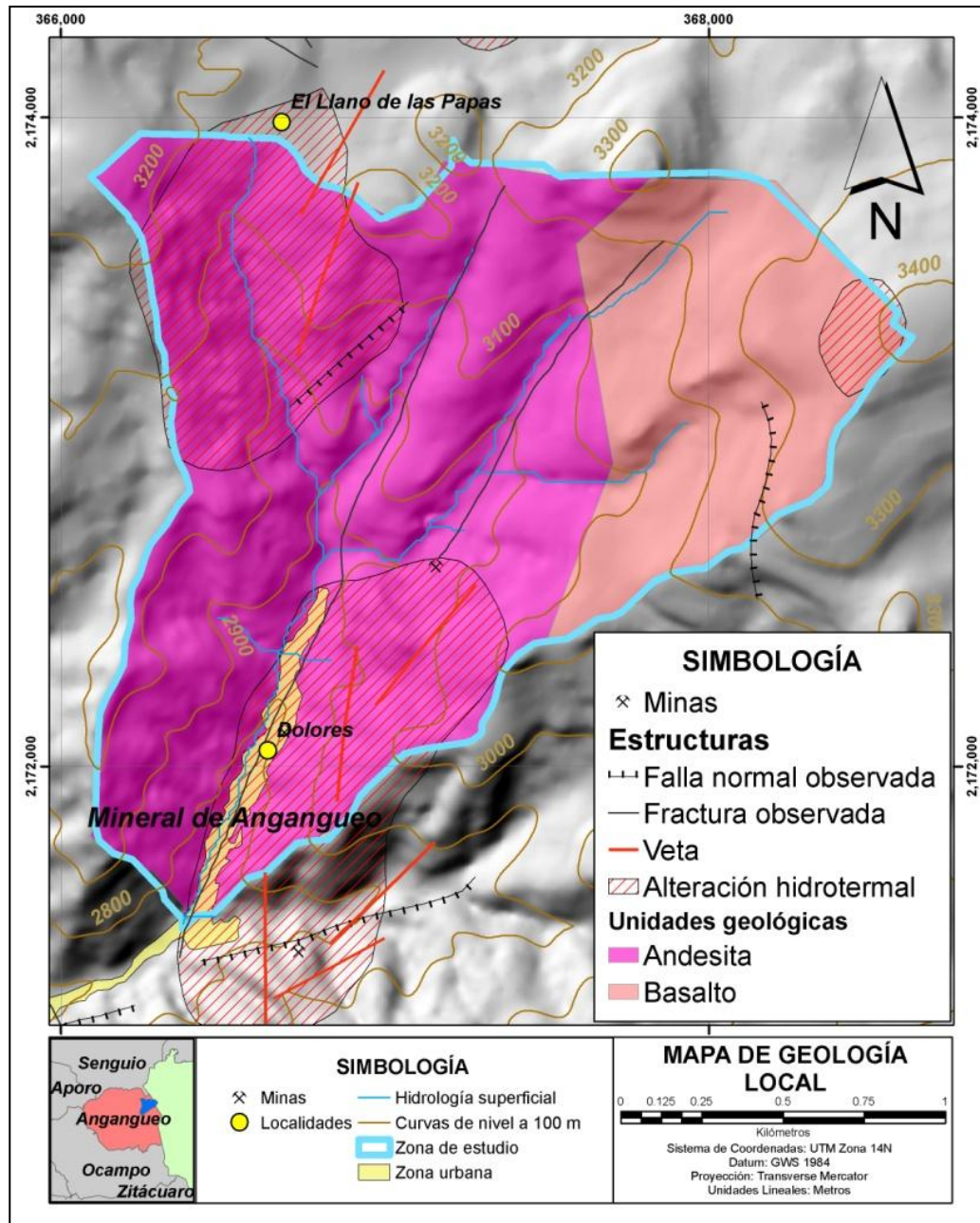


Figura 25. Mapa de Geología local, microcuena “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.1.8. Geomorfología.

Las unidades geomorfológicas en la microcuena “El Ventilador” están delimitadas por las geformas en función de su origen y a continuación se describen (Figura 26).

Montañoso denudatorio de laderas muy inducidas por la red torrencial. Relieve que se localiza en un nivel altitudinal de entre los 2600 y los 3600 metros. Corresponde a laderas compuestas por andesitas y basaltos terciarios que presentan un moldeamiento intenso debido a procesos erosivos de arroyada superficial y concentrada, en las que predominan las pendientes de entre 15 y 35°. En esta unidad se originan los cauces del primer orden del sistema fluvial.

Montañoso denudatorio de interfluvios cumbresales. Comprende todas aquellas áreas que se localizan por encima de los 3000 msnm. Generalmente se trata de superficies de los parteaguas principales, en las que dominan andesitas que datan del Terciario y que han sido escasamente modeladas por los procesos de meteorización al que están expuestas. Las pendientes en estas zonas no superan los 12°.

Valle fluvial de laderas montañosas. Valles constituidos como barrancos de disección lineal formados por el corte erosivo del talweg, donde dominan procesos de socavación y sofusión.

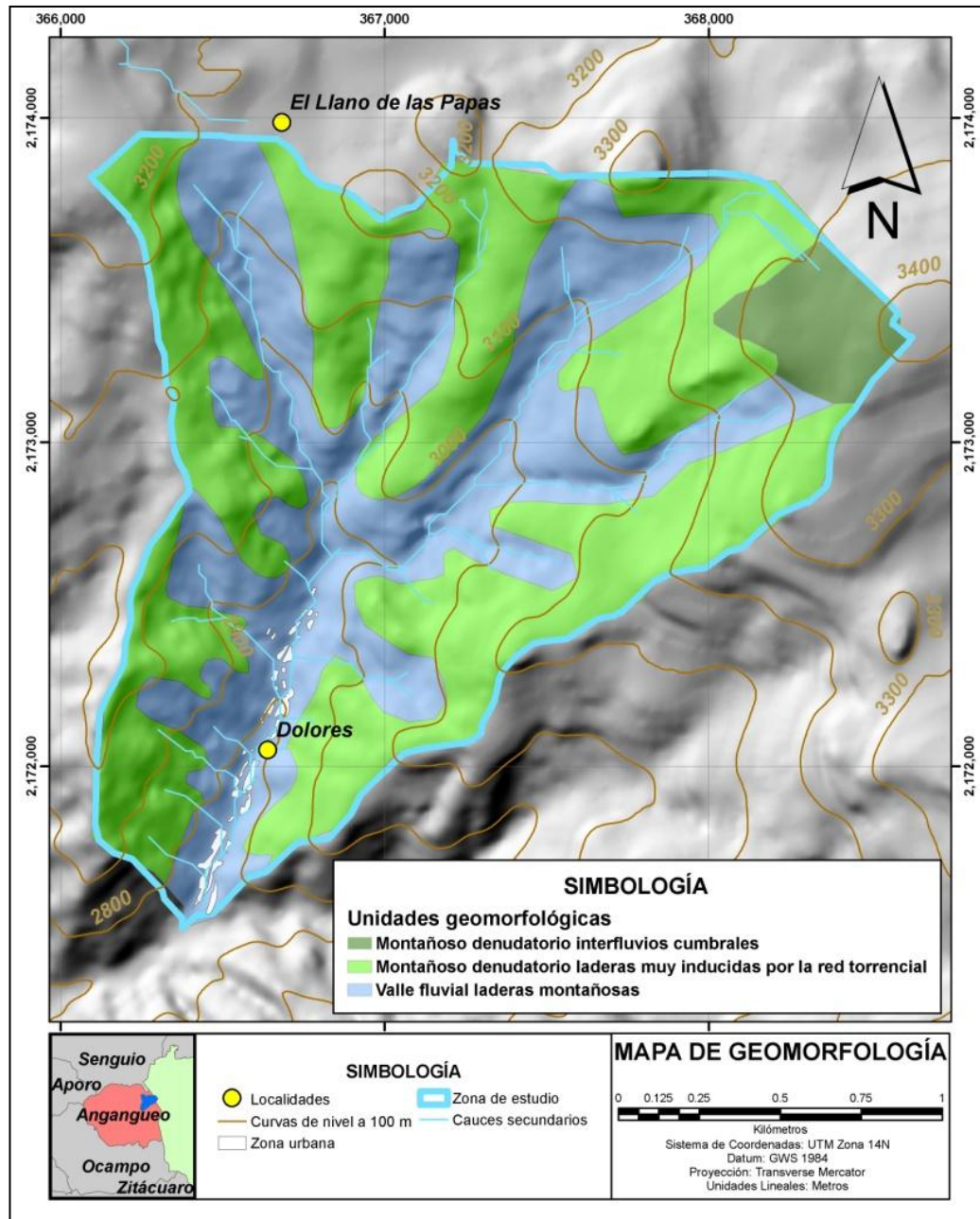


Figura 26. Mapas de Geomorfología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.1.9. Clima.

El clima predominante en la microcuenca “El Ventilador” es húmedo de montaña Cb(w2)(i)g, con un promedio de 136 días de lluvia al año, 8 días de granizo y una temperatura promedio máxima de 28 °C y media de 14.6 °C. Estos

datos se obtuvieron promediando las observaciones meteorológicas de 1971-2000 (29 años) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Según INEGI (2009), el municipio de Mineral de Angangueo presenta diversos climas que van desde Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (60.66%), semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (35.19%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (4.15%).

El promedio de precipitación anual varía entre los 800 y 1,200 mm (Figura 27) y la temperatura promedio anual varía entre los 8 °C y 16 °C, con la menor temperatura en las partes altas y la mayor en la parte baja de la microcuenca (Figura 28).

Para revisar en detalle los climogramas y diagramas ombrotérmicos consultar el Anexo 3.

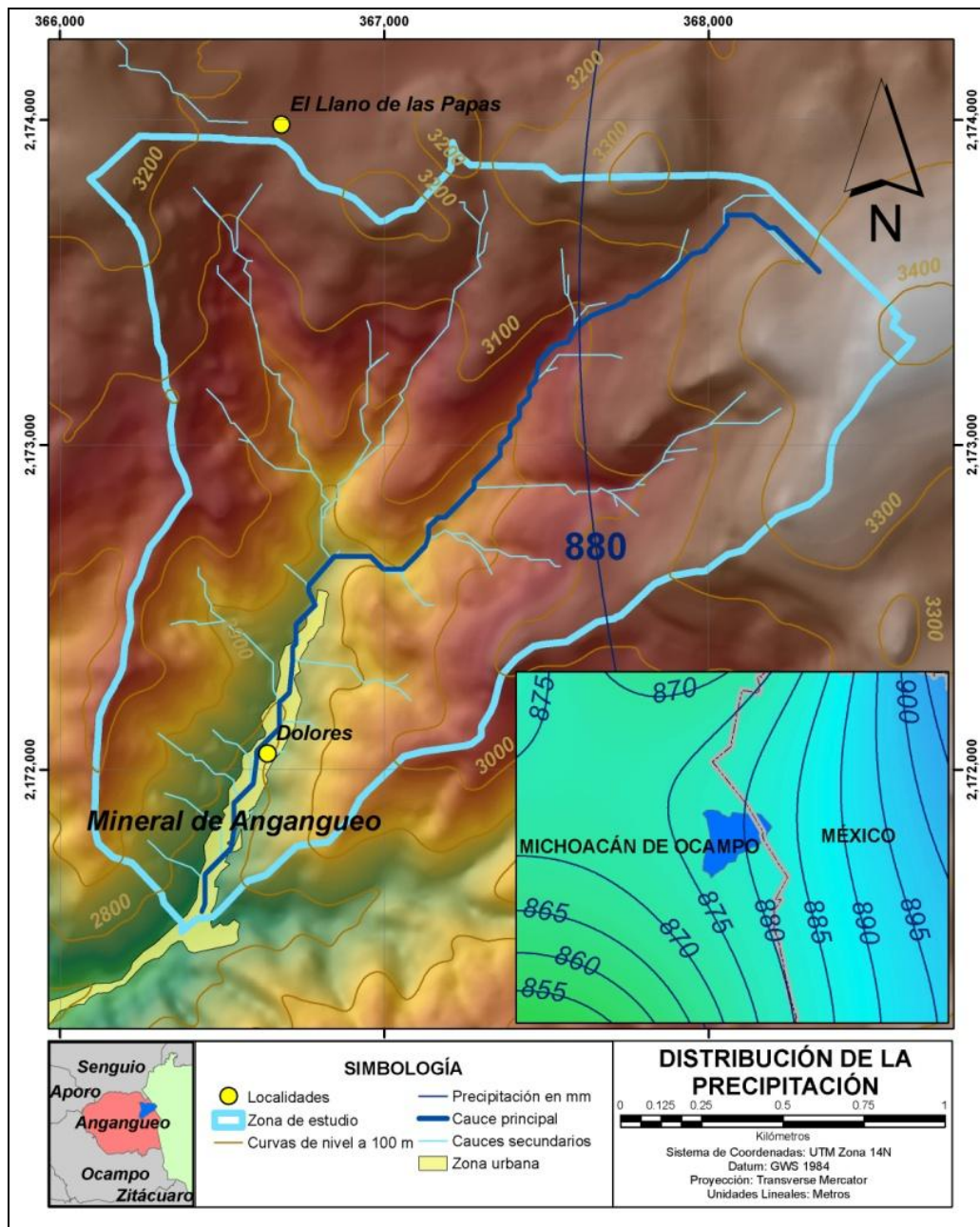


Figura 27. Mapa de distribución de la precipitación (método IDW), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

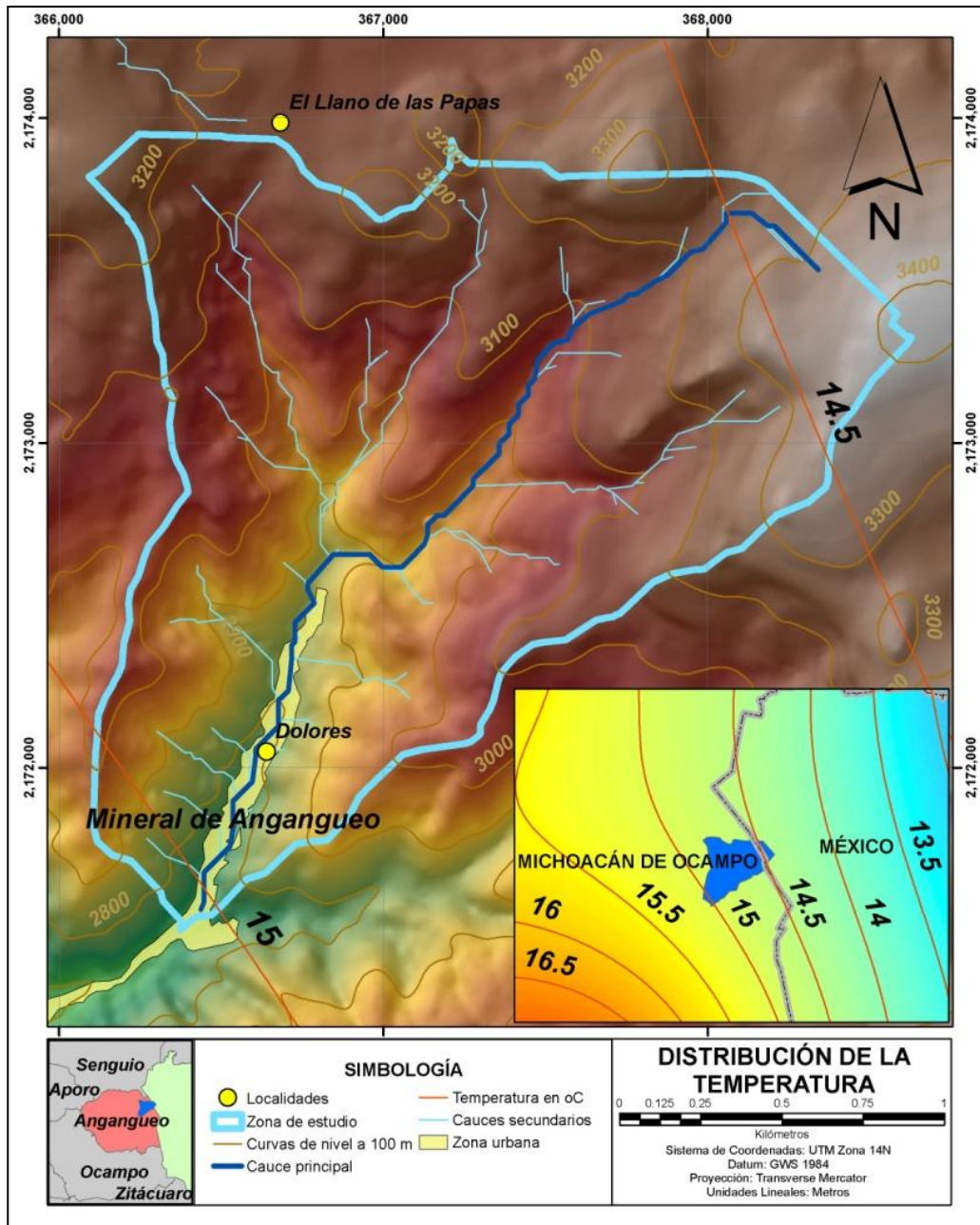


Figura 28. Mapa de distribución de la temperatura (método IDW), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.2. Diagnóstico de la Microcuenca “El Ventilador”.

5.2.1. KINEROS, escurrimiento e infiltración.

En este apartado se obtuvo como resultado la relación del número de remociones en masa por unidad de escurrimiento y se describe el tipo de vegetación y el estado de cada una de ellas (Tabla 17). El escurrimiento superficial en la microcuenca “El Ventilador” se muestra en la Figura 29, en donde se observa que los mayores valores (20–24 mm) se presentan hacia la parte Sur de la misma, específicamente en las unidades de escurrimiento que rodean el cauce principal, correspondientes a los números 4, 6, 7 y 8. De tal manera que, es en estas áreas donde se encuentra la vegetación de bosque de encino (unidad 7) en estado perturbado debido a incendios, apertura de áreas destinadas a las actividades agrícolas, superficies abandonadas y sin vegetación aparente, entre otras. De igual manera, se puede encontrar en la unidad 8 bosque de oyamel-pino en condición perturbada y áreas abiertas a la agricultura, mientras que, en las unidades 4 y 6, se identifican bosques combinados de pino-encino y de pino, pero con grados de perturbación considerables. Cabe señalar que estas unidades, con la tasa más alta de escurrimiento, se ubican rodeando el cauce del río principal de la microcuenca “El Ventilador”, en cuya rivera se asienta la comunidad de Dolores y más abajo la de Mineral de Angangueo y, quienes viven principalmente de la extracción de madera de oyamel y de pino.

Hacia la parte Norte de la microcuenca, las tasas de escurrimiento disminuyen, registrando tasas de entre 17 y 20 mm de escurrimiento, específicamente en las unidades 1,3 y 5, las cuales coinciden con la presencia de bosques de oyamel y de pino conservados mayormente. Cabe destacar que la menor tasa de escurrimiento se presenta en la unidad 2 situada sobre la parte alta del cauce principal de la microcuenca de estudio, en donde la vegetación dominante son boques de pino-encino y de pino, muy conservados, pero donde también se presentan pendientes abruptas. A continuación se presenta la relación

de escurrimiento en mm con el número de remociones en masa y su porcentaje por unidad y agrupado por rangos.

Tabla 17. Remociones en masa por unidad de escurrimiento, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Unidad	Escurrecimiento en mm	Remociones en masa	Porcentaje por Unidad	Porcentaje agrupado	Estado
2	0-17	14	30.4	30.4	Boques de pino-encino y de pino, conservados
1	17-20	5	10.9	32.6	Bosques de oyamel y de pino conservados
3		5	10.9		Bosques de oyamel y de pino conservados
5		5	10.9		Bosques de oyamel y de pino conservados
7	20-24	6	13.0	21.7	Bosque de encino Perturbado. Incendios, áreas abiertas a la agricultura (algunas abandonadas) y sin vegetación aparente
8		4	8.7		Bosque de oyamel-pino perturbado, áreas abiertas a la agricultura
4	>24	3	6.5	15.2	Bosque de pino-encino y de pino, con grados de perturbación considerables
6		4	8.7		Bosque de pino-encino y de pino, con grados de perturbación considerables
		46	100.0		

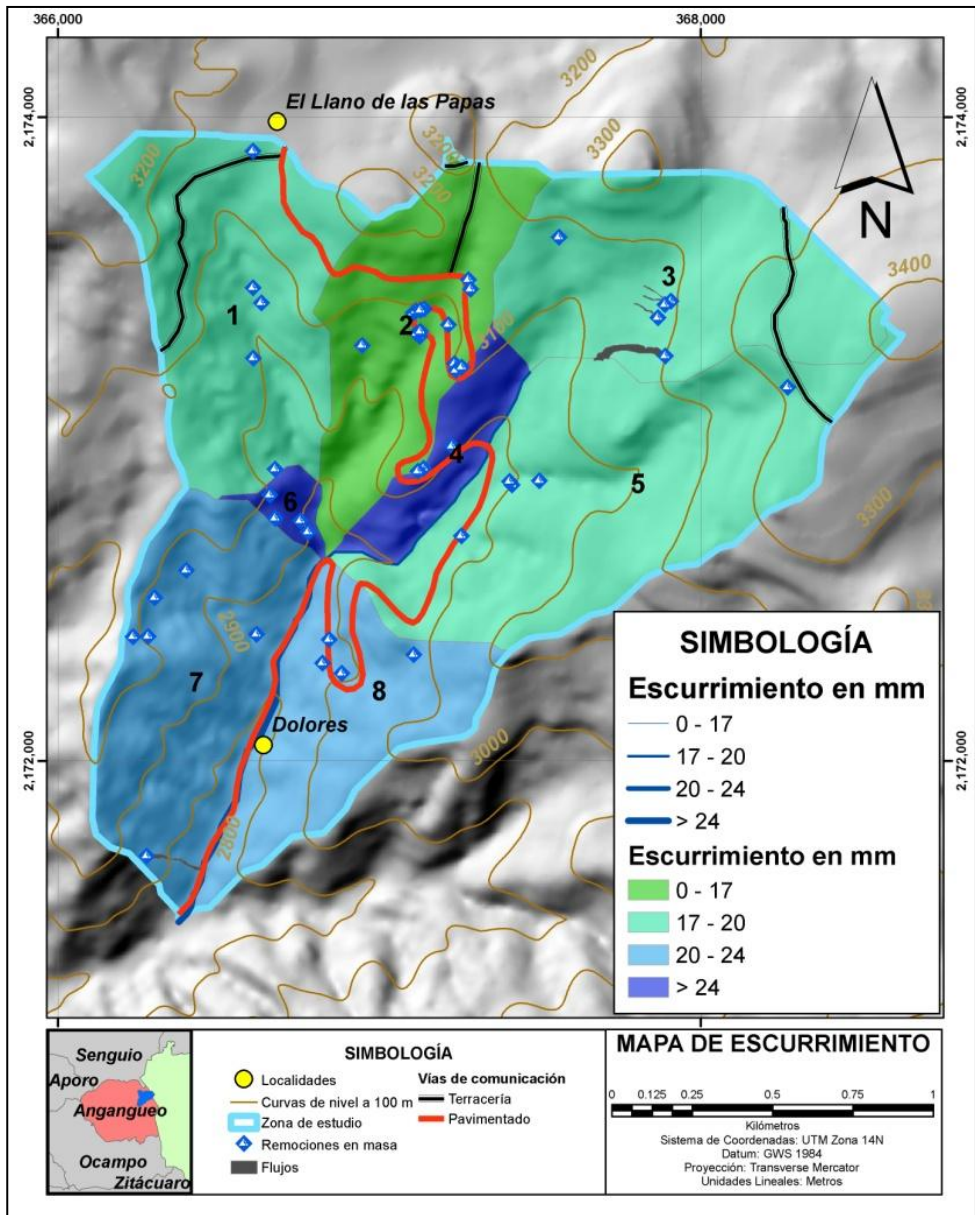


Figura 29. Escorrimento (mm), microcuena “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Por lo que respecta a la infiltración, cabe señalar que este parámetro es altamente dependiente del tipo de vegetación y de su estado de conservación, así como del tipo de suelo. Para el caso de la microcuena de “El Ventilador”, el Bosque de Oyamel tiene una alta capacidad de captación, retención e infiltración de agua de lluvia, mientras que el tipo de suelo dominante en la microcuena son los Andosoles ócricos (To). De las unidades de escorrimento definidas para la microcuena de interés, los mayores valores de infiltración (más de 30 mm) se presentan en la unidad 2 en donde están los bosques más conservados de pino y

pino-encino; las unidades aledañas (1,3 y 5) presentan valores entre los 27 y los 30 mm de infiltración, los cuales también corresponden con la presencia de bosques aunque impactados, aun abundantes. Para las unidades de escurrimiento 7 y 8 se registraron valores de 25–27 mm mientras que los valores más bajos se ubicaron en las unidades 4 y 6. Justamente en estas cuatro unidades, se encuentran establecidos los asentamientos humanos, concentrados a las riberas del río principal de la microcuenca, de igual manera, hay zonas que han sido taladas y otras que se emplean para la producción agrícola (Tabla 18) (Figura 30).

Tabla 18. Remociones en masa por unidad de infiltración, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Unidad	Infiltración en mm	Remociones en masa	Porcentaje por Unidad	Porcentaje agrupado	Estado
2	> 30	14	30.4	30.4	Boques de pino-encino y de pino, conservados. Remociones asociadas a la carretera.
1	27 - 30	5	10.9	32.6	Bosques de oyamel y de pino conservados
3		5	10.9		Bosques de oyamel y de pino conservados
5		5	10.9		Bosques de oyamel y de pino conservados. Remociones asociadas a caminos, cauces y líneas de conducción eléctrica.
7	25 - 27	6	13.0	21.7	Bosque de encino Perturbado. Incendios, áreas abiertas a la agricultura (algunas abandonadas) y sin vegetación aparente. Asentamientos humanos.
8		4	8.7		Bosque de oyamel-pino perturbado, áreas abiertas a la agricultura. Remociones asociadas también a la carretera. Asentamientos humanos.
4	24 - 25	3	6.5	15.2	Bosque de pino-encino y de pino, con grados de perturbación considerables. Remociones asociadas también a la carretera. Asentamientos humanos.
6		4	8.7		Bosque de pino-encino y de pino, con grados de perturbación considerables. Asentamientos humanos
		46	100.0		

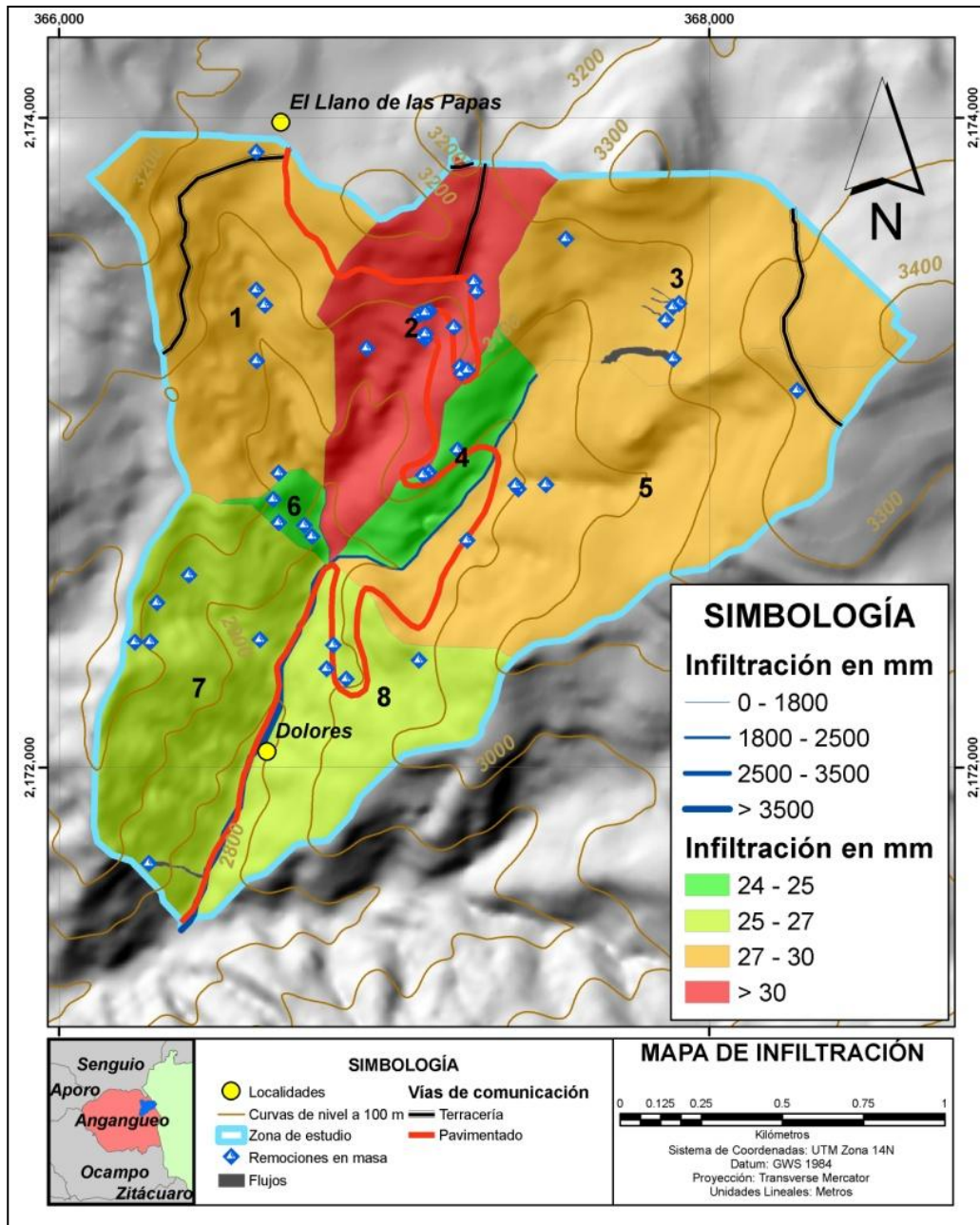


Figura 30. Infiltración (mm), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Las unidades de escurrimiento considerando el factor de “infiltración” que mayor número de remociones en masa presentaron son 1, 3 y 5 (27-30 mm) con el 32.6%, aunque la vegetación aquí predominante es Bosque de oyamel y pino conservados, las remociones se presentaron a los costados de caminos construidos para la extracción de madera y cauces. La unidad 2 (>30 mm) con el 30.4% presenta Boques de pino-encino y de pino, conservados, sin embargo, las

remociones están asociadas en su mayoría a la carretera pavimentada. Las unidades 7 y 8 (25-27 mm) con el 21.7% son las unidades más expuestas al factor antrópico, aquí se localiza la población de Dolores, Anganagueo, Michoacán y existen áreas de cultivos agrícolas, áreas sin vegetación aparente y bosque perturbado. Finalmente, las unidades 4 y 6 (24-25 mm) con el 15.2%, son las unidades con más perturbaciones derivadas al factor antrópico, aquí se localiza la población de Dolores, Anganagueo, Michoacán y también existen áreas de cultivos agrícolas, áreas sin vegetación aparente y bosque muy perturbado.

En cuanto al flujo pico en la microcuenca “El Ventilador”, los mayores valores registrados fueron de más de 9 m³/s, ubicándose en las unidades de escurrimiento 5, 7 y 8, mientras que los valores promedio equivalentes a flujos entre 3 y 6 m³/s se presentaron en las unidades 1, 4 y 3. De tal manera, el menor flujo se presentó en las unidades 2 y 6 (Figura 31). En general, la combinación de la topografía de la microcuenca y el impacto por deforestación que se ha venido presentando en la vegetación original de la zona, han propiciado que el flujo se incremente hacia las partes bajas de la microcuenca ubicadas al Suroeste.

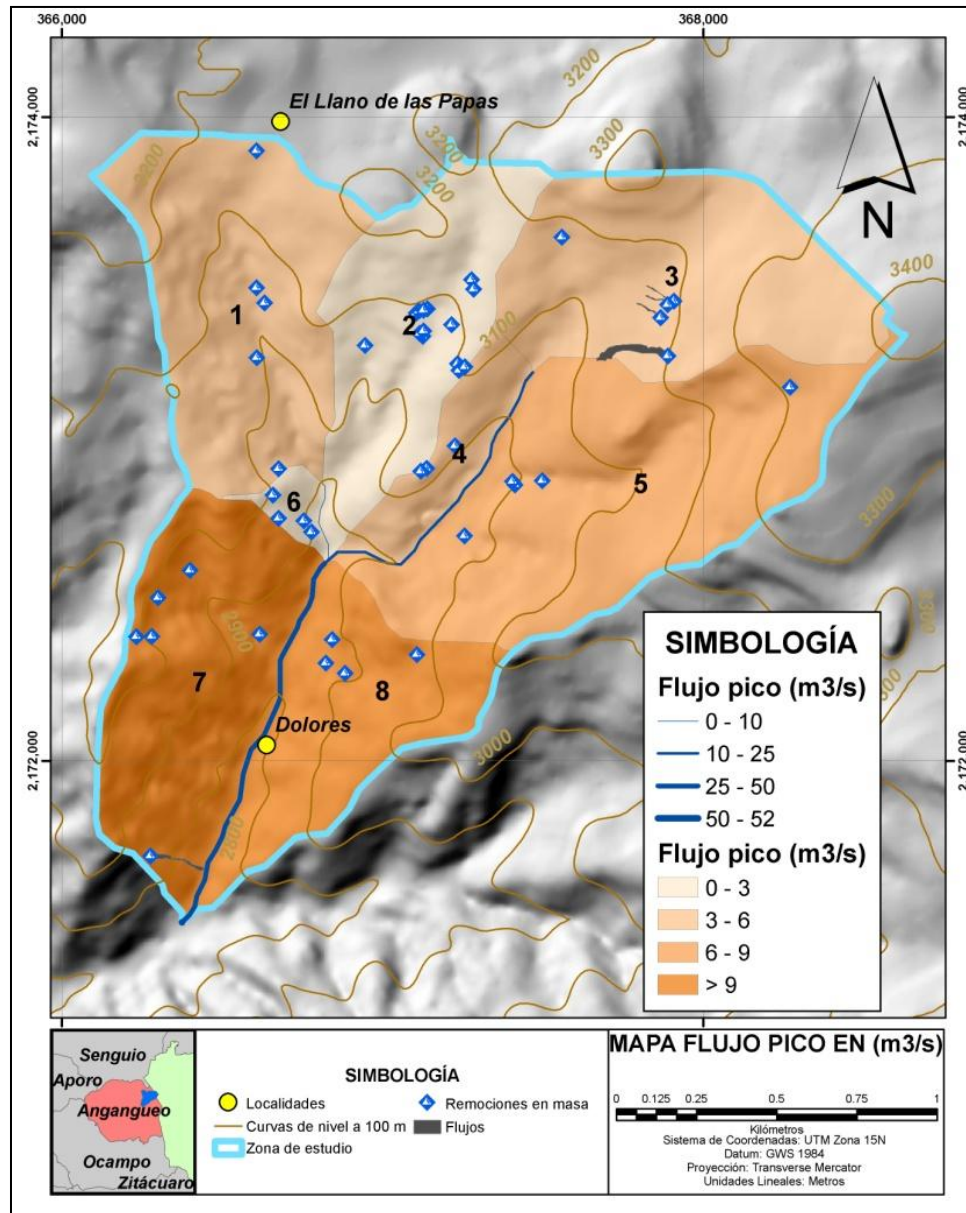


Figura 31. Flujo pico (m³/s), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.2.2. Erosión RUSLE.

5.2.2.1. Factor R.

La microcuenca “El Ventilador” se ubica dentro de la región V según la Regionalización nacional de erosividad de la lluvia (Cortes *et al.*, 1991). Obtenida la ubicación de la microcuenca dentro la regionalización se calculó la precipitación media anual de la misma extrayendo información de la red nacional de estaciones.

Una vez obtenida la precipitación media anual se calculó la erosividad de la lluvia a partir de la ecuación de la Región V:

$$R = A * P + B * P^2$$

Donde:

R es la erosividad en MJ.mm/(ha.h)/año

P es la lluvia media anual

A es una constante (para la región V A=3.4880)

B es una constante (para la región V B= -0.000188)

Para el caso de la microcuenca “El Ventilador” la precipitación media anual es de 1,200 mm y utilizando la ecuación propuesta por Cortes *et al* (1980) el valor de R para la microcuenca es de 4459.2 MJ.mm/(ha.h)/año.

5.2.2.2. Factor K.

El tipo de suelo en la microcuenca “El Ventilador” es casi en su totalidad homogéneo; encontrando tres tipos de suelo. A continuación se describen cada uno de los tipos de suelo, según la clasificación de la FAO (1980), por tipo de textura.

Para el Andosol ócrico (To), el factor K asociado a este tipo de suelos es 0.028. Para el caso del Litosol (I), el factor K asociado es 0.040, mientras que para el Andosol húmico (Th), el factor K correspondiente es 0.020. Litosol (I). La distribución espacial del factor K se muestra en la (Figura 32).

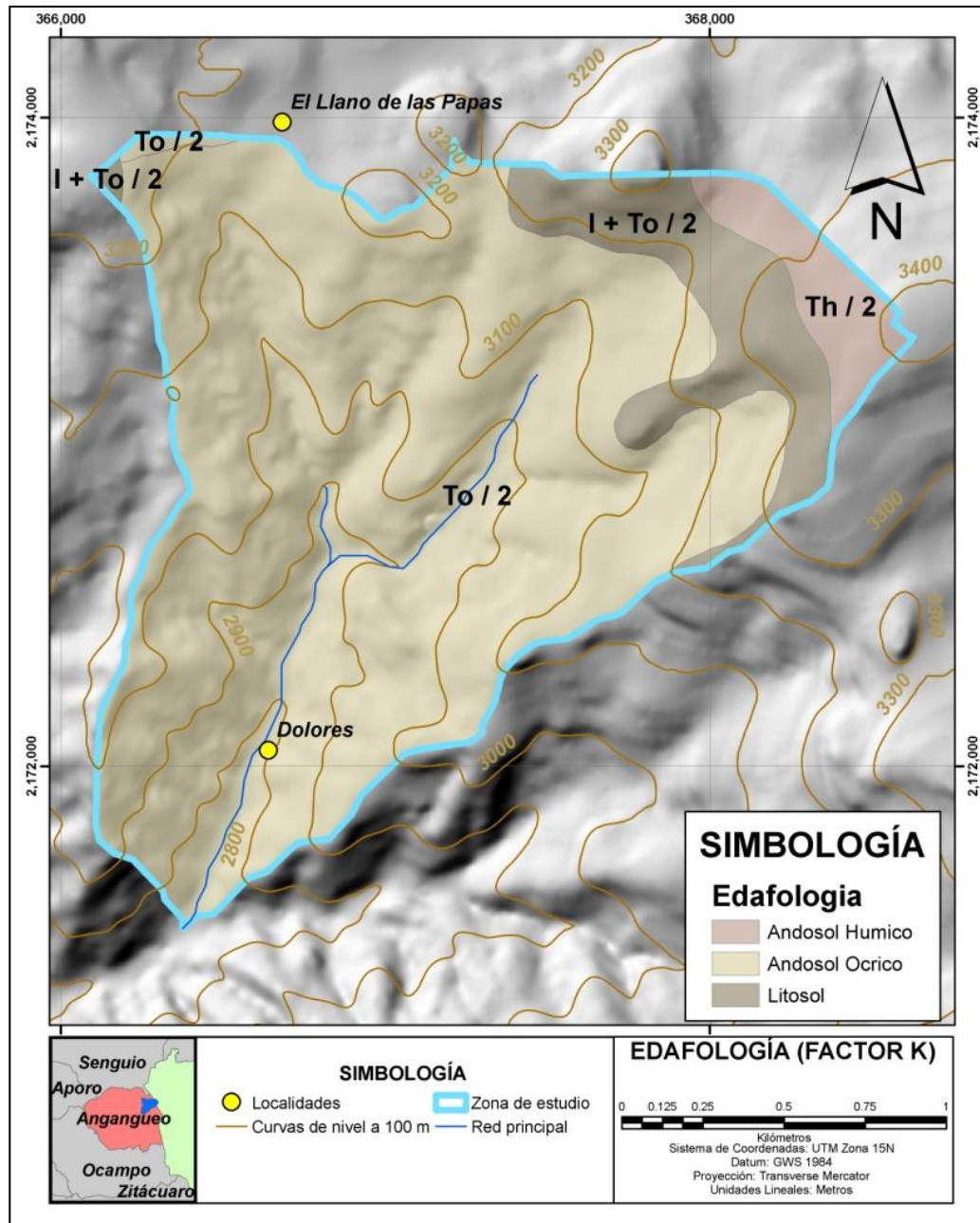


Figura 32. Clasificación y ubicación espacial de los tipos de suelo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.2.2.3. Factor LS.

Los valores del factor LS se presentan en la Figura 33. En general los valores se encuentran en el rango de 0 a 43.42, siendo la media de 9.93 para la microcuenca.

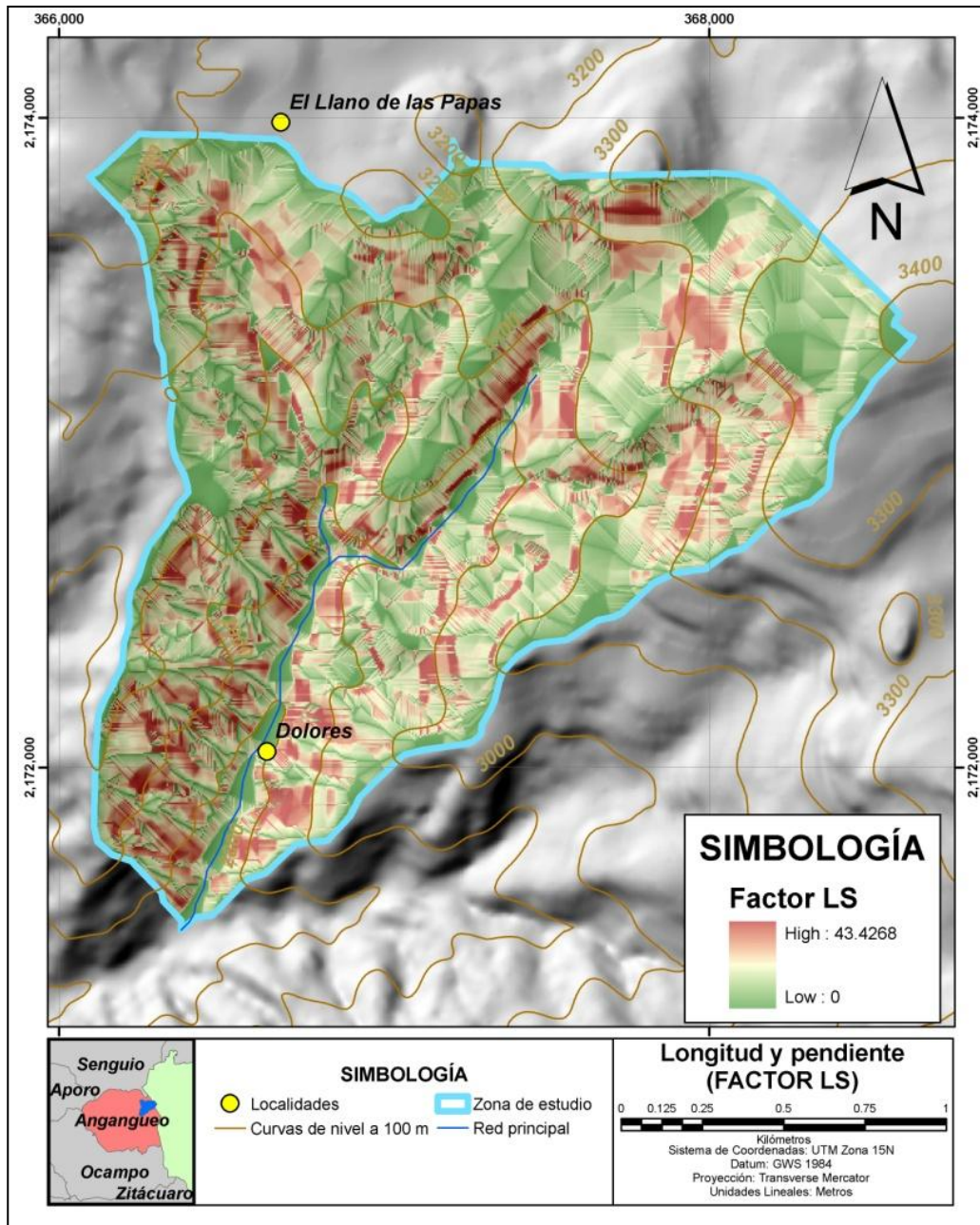


Figura 33. Clasificación del factor LS, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.2.2.4. Factor C.

El factor C se asocia a la cobertura vegetal y al uso del terreno. La FAO (1980), propuso un valor de C asociado al efecto de cobertura vegetal y al uso de suelo para la EUPS. En la microcuenca “El Ventilador” se definieron 21 tipos de uso de suelo. Sin embargo, la cobertura predominante con un 73% son los

bosques de coníferas, la agricultura de temporal, que ocupa un 24% del territorio, y los pastizales inducidos con un 3% de la superficie de la microcuenca (Figura 34).

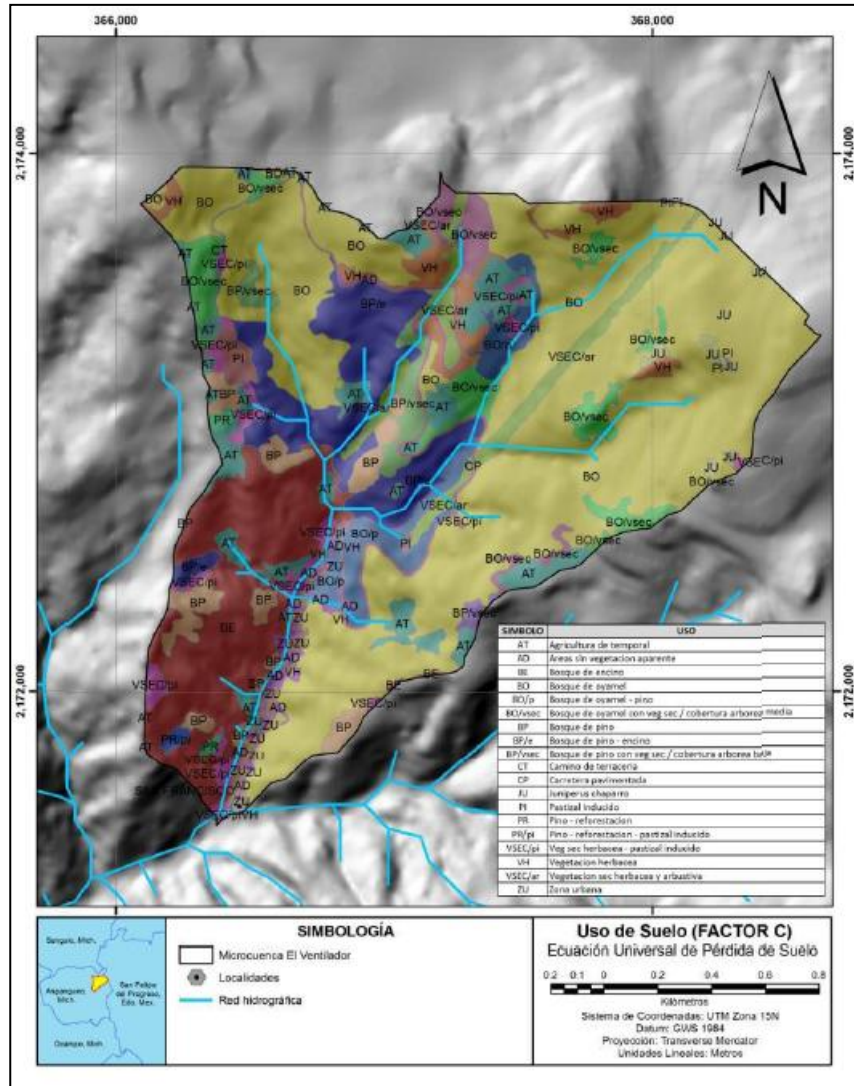


Figura 34. Clasificación de la cobertura y uso de suelo en función del factor C, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

En la (Tabla 19) se puede observar las agrupaciones de usos y coberturas, las áreas y el factor de conservación de la cobertura vegetal C.

Tabla 19. **Clasificación, área y valor de C de la cobertura y uso de suelo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.**

SIMBOLO	USO	Área (ha)	C
AT	Agricultura de temporal	20.1200	0.3900
AD	Áreas sin vegetación aparente	3.8300	0.7000
BE	Bosque de encino	41.5000	0.0025
BO	Bosque de oyamel	173.3000	0.0025
BO/p	Bosque de oyamel - pino	13.3000	0.0030
BO/vsec	Bosque de oyamel con veg sec / cobertura arbórea media	19.5000	0.0070
BP	Bosque de pino	12.6000	0.0030
BP/e	Bosque de pino - encino	30.2000	0.0030
BP/vsec	Bosque de pino con veg sec / cobertura arbórea baja	6.0000	0.0050
CT	Camino de terracería	0.5000	0.8000
CP	Carretera pavimentada	4.1000	0.0000
JU	Juníperos chaparro	1.5000	0.0030
PI	Pastizal inducido	2.3000	0.0130
PR	Pino - reforestación	0.9000	0.0045
PR/pi	Pino - reforestación - pastizal inducido	0.6000	0.0130
VSEC/pi	Veg sec herbácea - pastizal inducido	7.7000	0.0130
VH	Vegetación herbácea	9.8000	0.0760
VSEC/ar	Vegetación sec herbácea y arbustiva	11.7000	0.0420
ZU	Zona urbana	2.2000	0.0001

5.2.2.5. Erosión Potencial.

En la Figura 35, se puede observar el mapa de erosión potencial para la microcuenca “El Ventilador”. SEMARNAT-UACH (2002) definen los rangos de clasificación de la erosión para el territorio mexicano según sus valores obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación. Como era de esperarse en la erosión potencial, los valores de erosión se clasifican mayormente entre erosión severa y erosión muy severa, ya que el tipo de suelo y la topografía del terreno hacen condiciones propicias para el desprendimiento y transporte de sedimentos en el supuesto de una ausencia de la cobertura vegetal. En general, el 85.16% del territorio de la microcuenca se encuentra en el rango de erosión muy severa, mientras que rangos como sin erosión aparente, erosión ligera, erosión moderada y severa tienen valores de 12.90%, 0.00% y 0.64% y 1.29%, respectivamente, bajo el supuesto que define la erosión potencial.

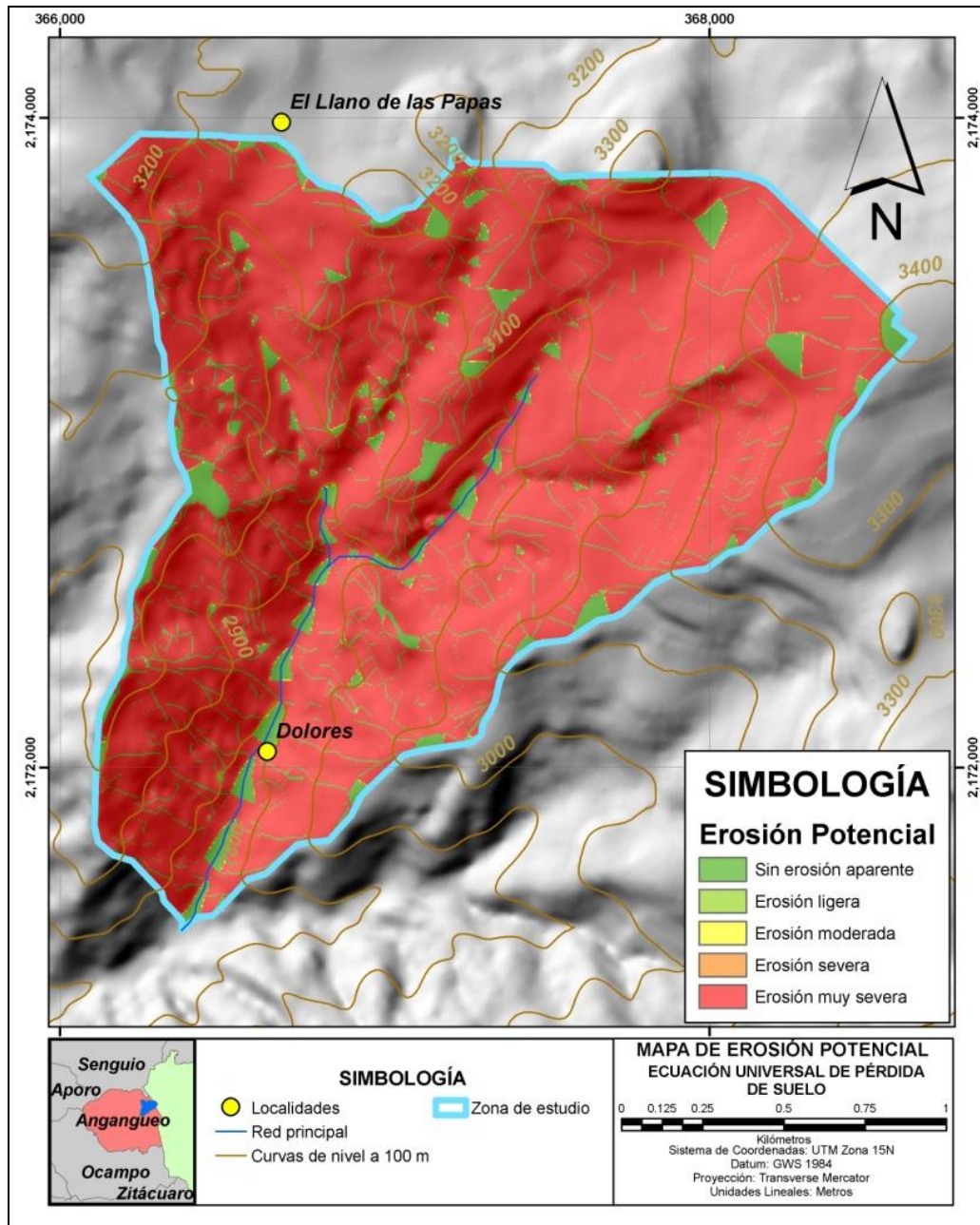


Figura 35. Resultado del análisis de erosión potencial aplicando la Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo (RUSLE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.2.2.6. Erosión Actual.

Los resultados obtenidos con la EUPS para el caso de la erosión actual, que considera el efecto de la vegetación, pero en este caso no el efecto de las prácticas de soporte, el 56.25% del territorio de la microcuenca se localiza en el

rango de erosión severa, siendo la clasificación predominante en la microcuenca. El segundo rango predominante en la microcuenca es el de erosión moderada con un 19.35%, seguido por el rango de erosión muy severa con el 10.62%. Lo anterior indica que los principales procesos de erosión en la cuenca van de moderado a muy severo con un total para los tres rangos de 86.25% del territorio de la microcuenca. Esta situación indica que la microcuenca se encuentra en un estado de alto riesgo de degradación por fenómenos de desprendimiento, transporte y acumulación de sedimentos. Por otra parte en zonas de baja pendiente, se encuentran zonas con erosión ligera con un 0.62% del territorio, y zonas sin erosión aparente con un 13.12%, estas zonas corresponden a las zonas de erosión baja encontradas en el análisis de erosión potencial. Los cambios drásticos de valores de erosión encontrados en la microcuenca corresponden principalmente a los usos de suelo y cobertura vegetal, indicando el fuerte impacto que tienen las actividades humanas en el proceso de la erosión (Figura 36).

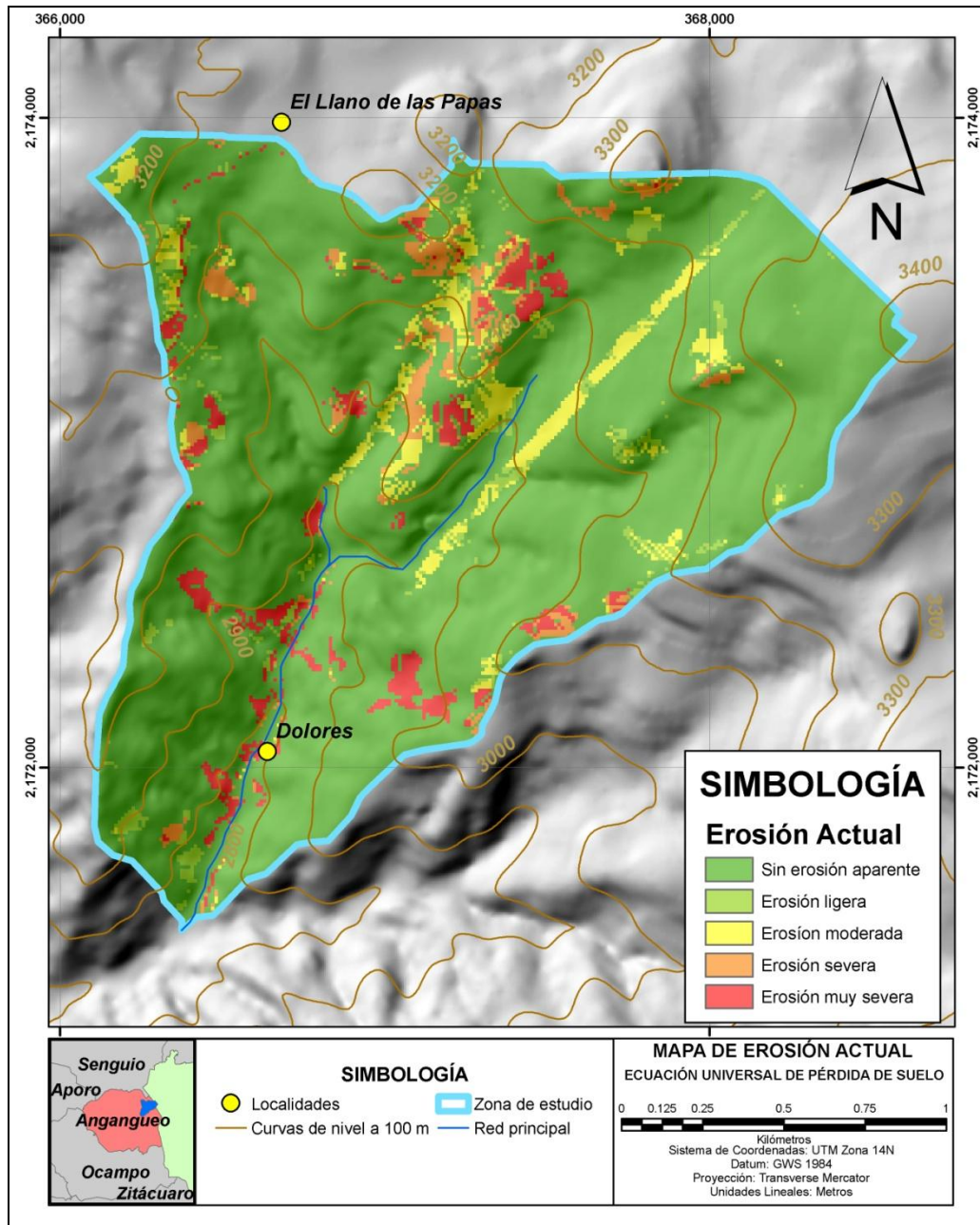


Figura 36. Resultado del análisis de erosión actual aplicando la Ecuación Universal Revisada de la Pérdida de Suelo (RUSLE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Finalmente, la producción de sedimentos en la microcuenca (Figura 37), presentó valores máximos de más de 10 ton/ha/año, específicamente en la unidad de escurrimiento 7, ubicada hacia el Sureste de la microcuenca, en donde se han presentado las condiciones más degradadas de la zona de estudio y donde además queda ubicada la mayor parte de la comunidad de El Mineral de

Anganguero, cabe señalar que en la unidad 7 se ubica uno de los deslizamientos identificados en el inventario que se realizó para este estudio. Los rangos de 5 a 10 ton/ha/año, se presentaron en las unidades 5 y 8, prácticamente en la parte Oeste de la microcuenca, en donde la vegetación dominante son los bosques de oyamel y de oyamel-pino constantemente impactados por la extracción de madera para uso comercial, además de la presencia de algunas superficies clasificadas con actividad agrícola. Las unidades 1, 3 y 4 presentan una producción de sedimentos entre las 2.5 y 5 ton/ha/año, lo cual va acorde con la presencia de bosques conservados aunque en estas unidades se encuentran las mayores pendientes.

Es importante destacar que la unidad 7 presentó deslizamientos significativos que causaron fatalidades durante el evento de febrero de 2010, lo que indica la correspondencia de los resultados obtenidos, al menos en magnitud relativa. El otro aspecto es que; aunque las tasas de producción de sedimentos parecen moderadas, cuando estas se combinan con los gastos picos, la cantidad total que puede ser arrastrada pendiente abajo se vuelve de consideración.

Sin embargo, los resultados combinados con los del estudio hidrológico, de erosión y los sucesivos de deslizamientos, proporcionan información sobre la severidad de los procesos y de la localización de las prácticas que deben implementarse para el control de avenidas, retención de sedimentos, y estabilización de deslizamientos.

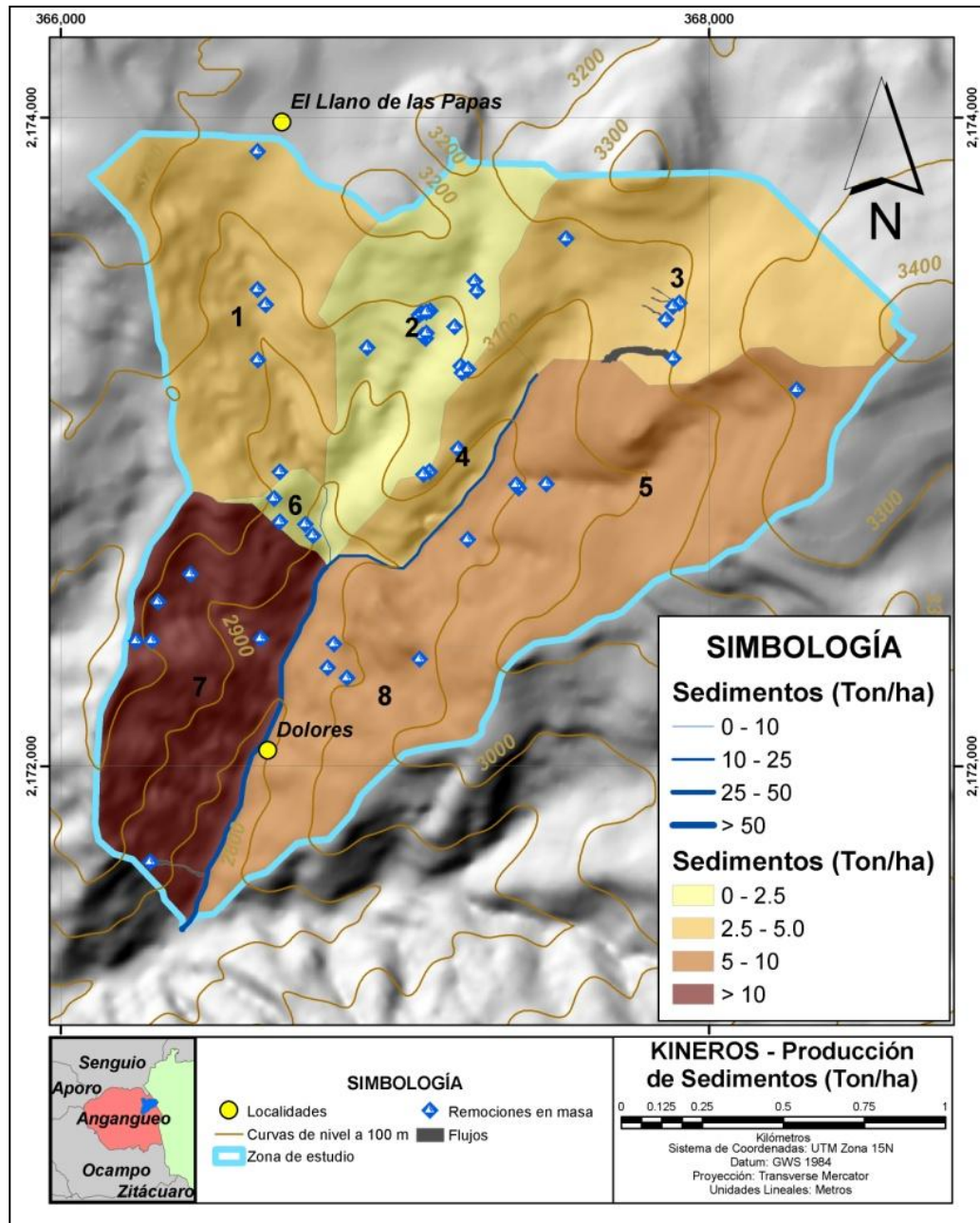


Figura 37. Producción de sedimentos (ton/ha/año), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.3. Inventario de Remociones en Masa (Microcuenca “El Ventilador”).

Con los datos del inventario de remociones en masa (coordenadas geográficas), y su caracterización correspondiente se elaboró el mapa de inventario de remociones (Figura 38).

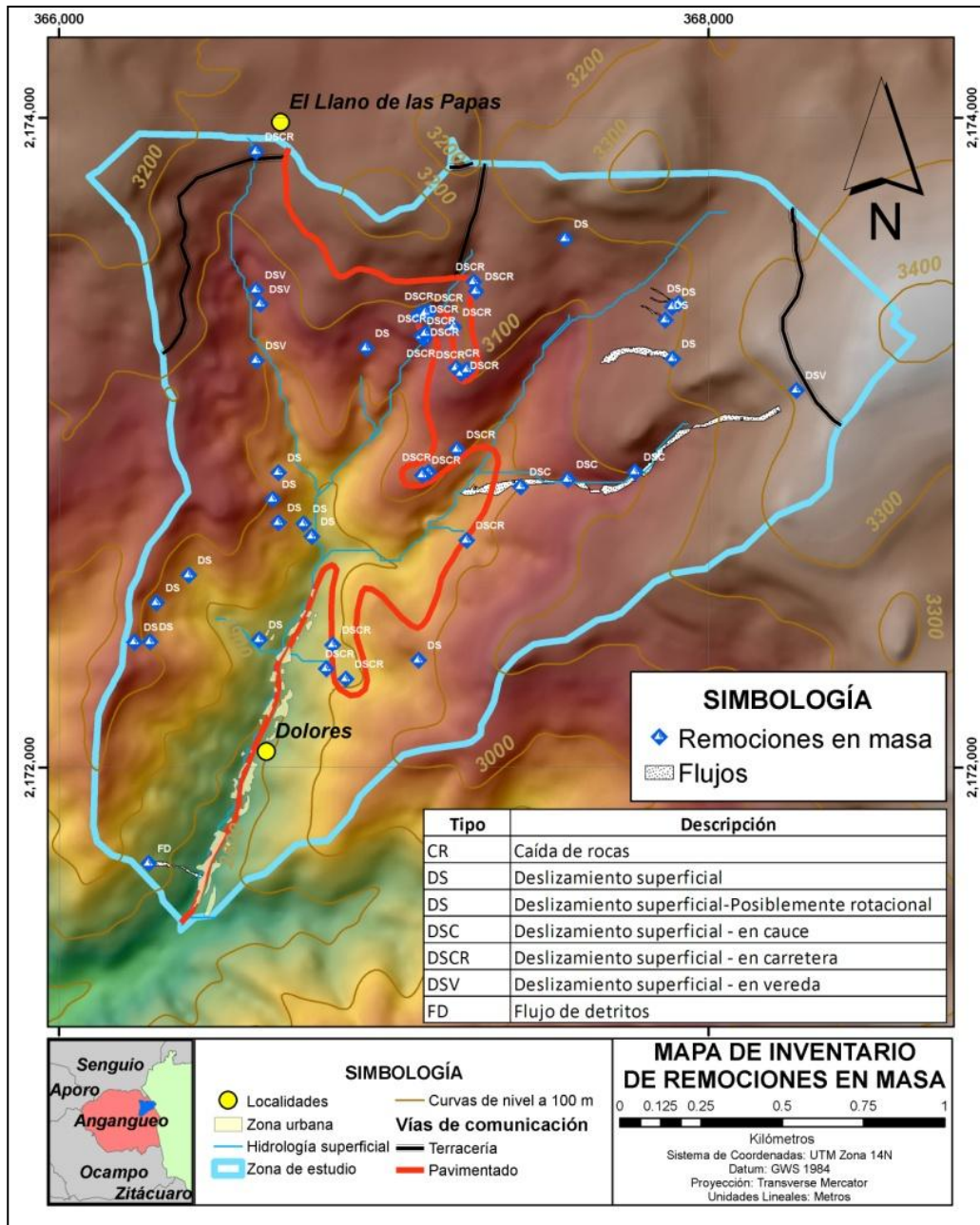


Figura 38. Mapa del Inventario de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Es de destacar que en el trabajo de campo, durante el reconocimiento de remociones, solo se identificaron 15 deslizamientos (Tabla 20), esto debido a que el primer recorrido de campo se realizó entre los meses de noviembre y diciembre de 2010 y los eventos ocurridos se originaron en el mes de febrero de ese mismo año, es decir, ya habían transcurrido 8 o 9 meses después del evento. Para entonces, muchos deslizamientos ya habían sido restaurados o la vegetación

natural cubrió las remociones. Por este motivo, solo fueron visibles los siguientes 15 deslizamientos en la microcuenca y cuentan con su ficha descriptiva, ésta puede ser consultada en el Anexo 2.

Tabla 20. Base de datos y caracterización de remociones, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Punto GPS	Tipo	Descripción
082	DS	Deslizamiento superficial
088	DS	Deslizamiento superficial
091	DS	Deslizamiento superficial-Posiblemente rotacional
102	DSC	Deslizamiento superficial - en cauce
103	DSC	Deslizamiento superficial - en cauce
105	DSC	Deslizamiento superficial - en cauce
107	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
108	CR	Caída de rocas
109	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
110	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
116	DSV	Deslizamiento superficial - en vereda
118	DSV	Deslizamiento superficial - en vereda
120	DSV	Deslizamiento superficial - en vereda
125	DS	Deslizamiento superficial
146	FD	Flujo de detritos

Dado que era evidente que se habían presentado más remociones en masa en la zona de estudio, para complementar el inventario se utilizó la herramienta google earth y las imágenes posteriores al evento de febrero del 2010 fueron exportadas al software de SIG. Cada uno de ellos se comparó con el inventario anterior y por las características de ubicación se correlacionó el tipo de evento ocurrido. Esto se pudo validar aleatoriamente en campo y el resultado fue el siguiente (Tabla 21):

Tabla 21. Complemento de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Id	Tipo	Descripción
01	DS	Deslizamiento superficial
02	DS	Deslizamiento superficial
03	DS	Deslizamiento superficial
04	DS	Deslizamiento superficial
05	DS	Deslizamiento superficial

Id	Tipo	Descripción
07	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
10	DS	Deslizamiento superficial
11	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
12	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
13	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
18	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
19	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
20	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
21	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
22	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
23	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
25	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
26	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
27	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
30	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
31	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
33	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
43	DSCR	Deslizamiento superficial - en carretera
47	DS	Deslizamiento superficial
48	DS	Deslizamiento superficial
49	DS	Deslizamiento superficial
50	DS	Deslizamiento superficial
51	DS	Deslizamiento superficial
52	DS	Deslizamiento superficial
55	DSV	Deslizamiento superficial - en vereda
56	DS	Deslizamiento superficial

Una vez integrada la información, se lograron identificar 46 remociones en masa según la clasificación de Highland (2008), de las cuales (44) están clasificados como deslizamientos superficiales.

Para entender mejor su origen, en este trabajo fueron subdivididos estos procesos en desprendimientos en carretera (20) y deslizamientos superficiales (24), éstos últimos, también son conocidos como deslizamientos de suelo o traslacionales. Finalmente se identificaron: caídas de roca (1) y flujo de detritos (1) (Figura 39).

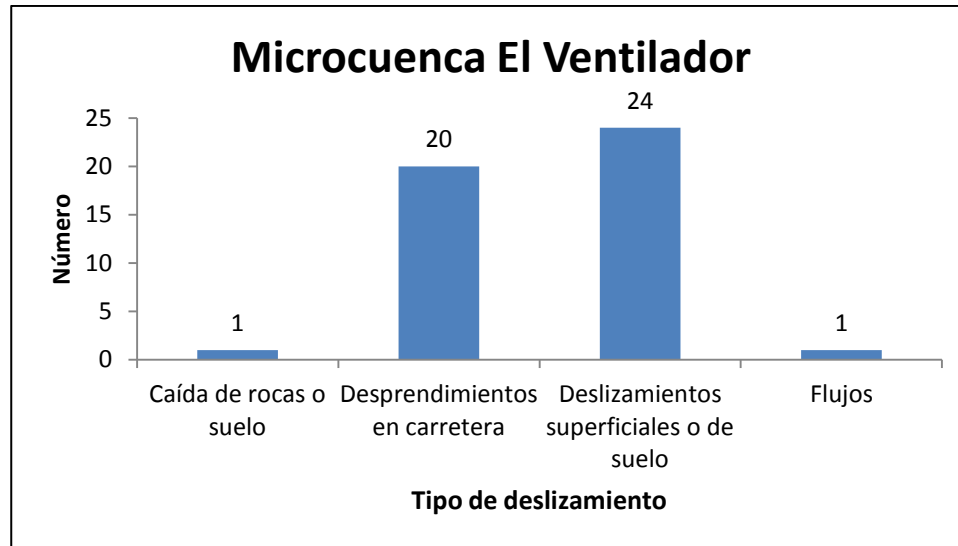


Figura 39. *Tipos de remociones identificados, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

5.4. Análisis del Tipo de Remociones en Masa en la Microcuenca “El Ventilador”.

En la microcuenca “El Ventilador”, los procesos de remociones en masa se presentan principalmente como movimientos de tipo deslizamientos traslacional simples, desprendimientos sobre carreteras, terracerías, veredas y cauces y en menor grado caídas de rocas o presencia de algunos bloques rocosos. Por otra parte, los ocurridos en materiales tipo suelo corresponden con eventos que inician como deslizamientos traslacionales o superficiales sin mucha distancia en su trayectoria de recorrido, excepto el que se encuentra cercano a la mina Catingón: con número de GPS 146 (Anexo 2), y que terminó como flujo de detritos en donde murieron 4 personas. Los volúmenes de material de suelo y rocas ‘removidos’ en cada proceso de remoción, son del orden de metros a decenas de metros cúbicos. Dos procesos encontrados dentro del área de trabajo son considerados de suma importancia dentro de este estudio debido al volumen involucrado, uno de ellos por su cercanía a viviendas: con número de GPS 146 y el GPS 091 (Anexo 2). El resto de las remociones en masa que en conjunto con la erosión en laderas y cauces depositaron cientos de metros cúbicos de material en los cauces listos para ser removidos en futuros eventos hidrometeorológicos extremos.

5.5. Análisis de la Susceptibilidad.

A continuación se definen los rangos o grados de susceptibilidad de remociones en masa resultantes. Debe considerarse que no se está estimando la intensidad del peligro por deslizamiento, sino que se hace una evaluación de la influencia de los factores condicionantes de remociones en masa que intervinieron en la microcuenca “El Ventilador” en febrero de 2010 y que, las zonas resultantes pudieran experimentar alguna remoción en el futuro en ciertas condiciones:

Tabla 22. *Escala sugerida de amenaza en laderas para deslizamientos (CENAPRED, 2006) y adaptada para la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Muy alta	Laderas con agrietamientos, escarpas o salientes. Suelos muy alterados, sueltos y / o saturados. Presencia de discontinuidades desfavorables. Antecedentes de deslizamientos en el área o sitio. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
Alta	Laderas que exhiben zonas de falla. Meteorización de moderada a alta. Pose discontinuidades desfavorables, donde han ocurrido deslizamientos. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
Media	Laderas con algunas zonas de fallas. Formaciones rocosas con alteración y agrietamientos moderados. Con antecedentes menores de deslizamientos. Laderas menos alteradas. Pendientes muy inclinadas y fuertemente inclinada.
Baja	Laderas en formaciones rocosas con alteración de baja a moderada. Planos de discontinuidades pocos favorables al deslizamiento. Con antecedentes escasos o nulos de deslizamientos. Laderas poco perturbadas. Capa de suelos compactos de poco espesor. Pendientes Ligeramente inclinadas o planas.
Muy baja	Laderas en formaciones rocosas no alteradas, poco agrietadas o fisuradas. Sin planos de discontinuidad que favorezcan el deslizamiento. Sin antecedentes de deslizamientos. Ladera sin perturbación. Pendientes ligeramente inclinadas o planas.

Para probar la fiabilidad del mapa de susceptibilidad de deslizamientos generado mediante el AHP se realizó una comparación entre el inventario de deslizamientos y el mapa de susceptibilidad. Se identificaron cinco niveles de susceptibilidad: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta (Figura 40 y Figura 41), se comparó el área total que ocupan las zonas de los deslizamientos inventariados con la superficie de cada una de las clases. El 84.8% del área con remociones en masa cae dentro de las clases muy alta y alta susceptibilidad (30.4% con 14 remociones y 54.3% con 25 remociones respectivamente), el 13.0% con 6

remociones cae en el área que coincide con la zona de susceptibilidad media, el 2.2% con 1 remoción cae dentro de la susceptibilidad baja y ninguna remoción se encuentra en las zona de muy baja susceptibilidad.

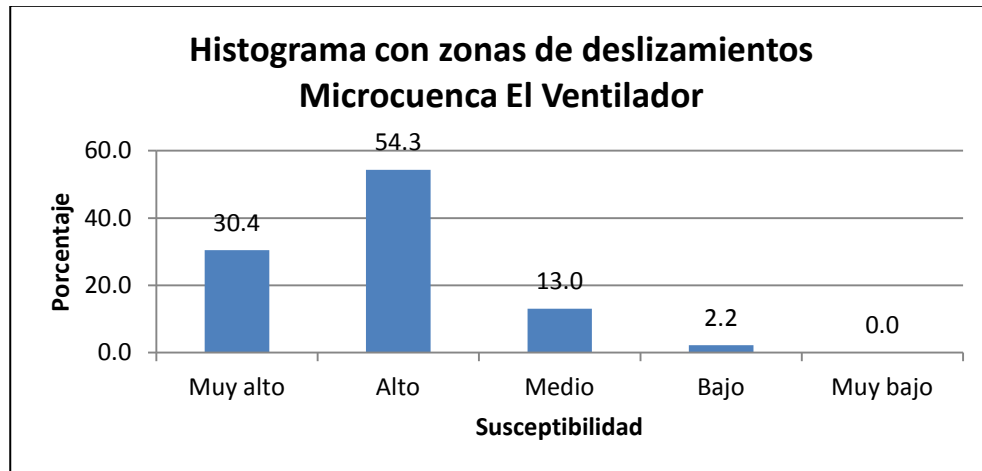


Figura 40. *Histograma que muestra el área de zonas con deslizamientos que cae dentro de cada una de las clases del mapa de susceptibilidad, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

El porcentaje de las remociones en masa inventariados en las zonas de alta y muy alta susceptibilidad se considera aceptable, según la bibliografía consultada la mayoría de los métodos explican el 65 % del inventario y un buen método alcanza a cubrir más del 70% del área de deslizamientos.

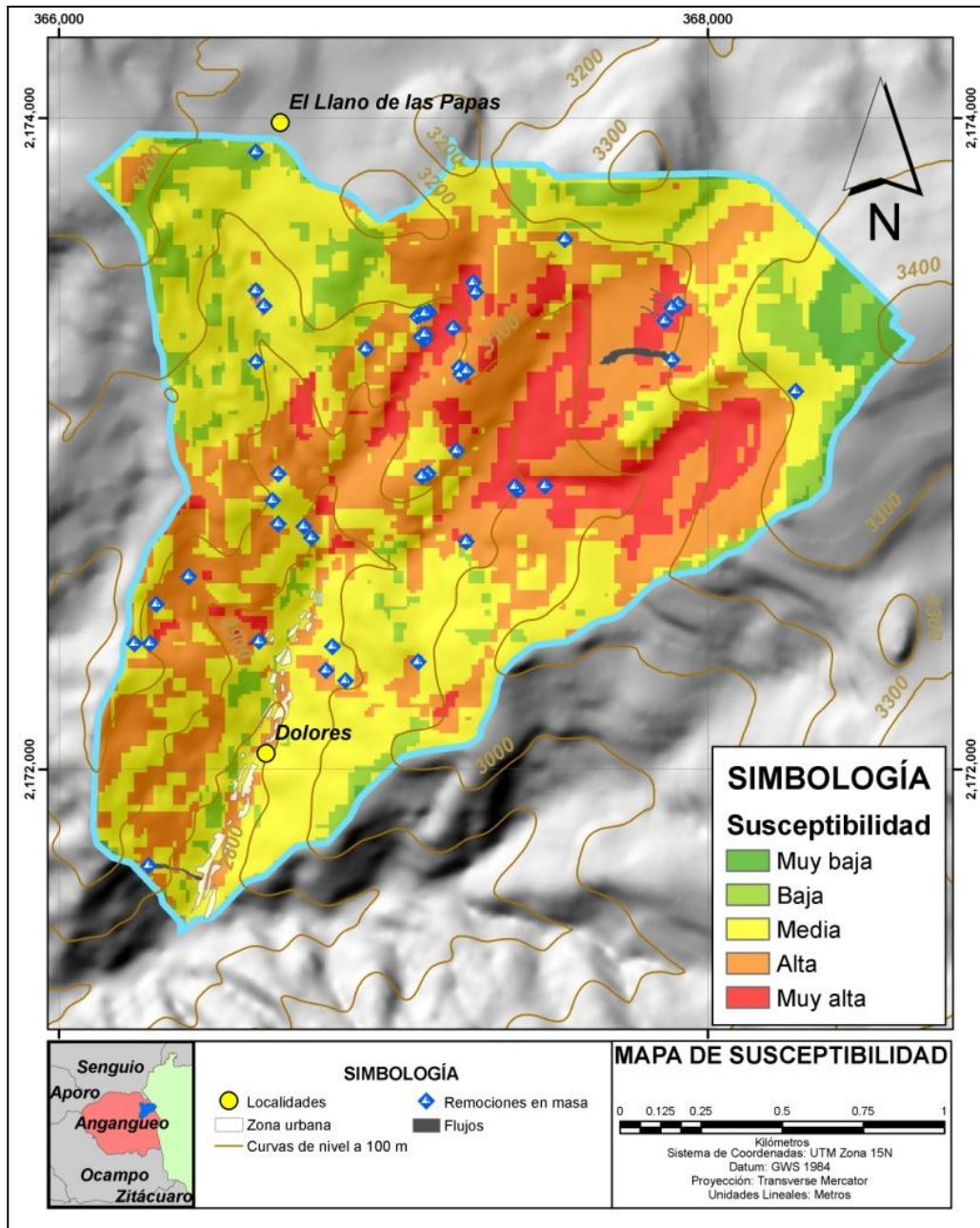


Figura 41. Mapa de susceptibilidad de deslizamientos, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.6. Análisis de Factores Condicionantes de Procesos de Remociones en Masa (Mapas Temáticos).

Las características e interpretación de los diversos factores que intervienen dentro de los procesos desarrollados en la microcuenca “El Ventilador” son analizados en los diferentes tipos de mapas temáticos que se presentan en este

apartado, los cuales sirvieron como base fundamental en la realización del análisis para determinar la descripción de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en dicha microcuenca.

5.6.1. Modelo digital de elevación.

Con los datos del análisis morfométrico basado en el Modelo de Elevación Digital (MDE) de la zona de estudio (Figura 42) se identifican desniveles de más de 600 metros con una elevación máxima de 3,400 msnm y mínima de 2,740 msnm. Las elevaciones mayores se observan al norte y noreste de la microcuenca “El Ventilador” y forman parte de la Sierra de Angangueo. Por otra parte, las áreas de menor nivel corresponden básicamente a la continuidad de la geoforma caracterizada como Valle fluvial de laderas montañosas, misma que está representada por los cauces primarios y secundarios de la microcuenca “El Ventilador”. El drenaje dendrítico se concentra en mayor medida en la zona de la cuenca media y alta, por lo que la erosión es mucho mayor dentro de esta parte del relieve. La carretera que comunica a Mineral de Angangueo con El Llano de las Papas y los caminos que fueron creados para la extracción de madera así como la línea de conducción eléctrica que cruza la microcuenca “El Ventilador” favorecen los procesos de remoción en masa.

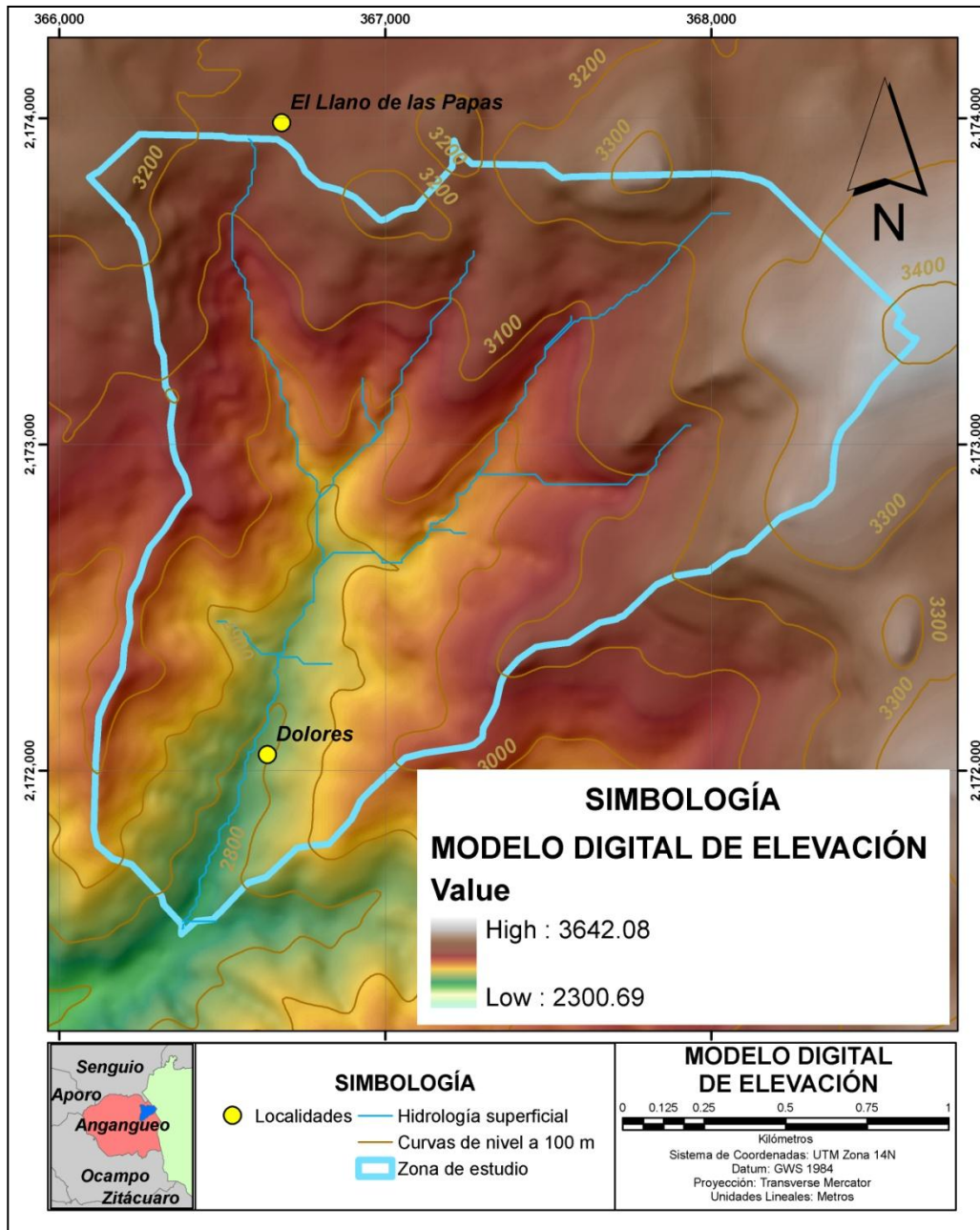


Figura 42. Modelo digital de elevación (MDE), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.6.2. Mapa de geomorfología (unidades del paisaje geográfico).

En este mapa destacan por su importancia en extensión dentro de la microcuenca, los Cañones profundamente disectados por corrientes con un 20.74%, le siguen Laderas medias con el 17.48%, Crestas en laderas medias,

Pequeñas colinas en llanuras con el 14.51%, y Valles en forma de U con el 12.89% (Tabla 23 y Figura 43).

Tabla 23. *Unidades geomorfológicas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Unidad geomorfológica	Superficie en km ²	Superficie en ha	Superficie en m ²	Por ciento
Cañones profundamente disectados por Corrientes	0.75	75.11	751133.65	20.74
Drenajes de laderas medias, valles poco profundos	0.35	34.98	349786.94	9.66
Drenajes de tierras altas, cabeceras de cauces	0.04	3.67	36748.69	1.01
Valles en forma de U	0.47	46.70	467031.49	12.89
Planicies	0.02	1.88	18798.08	0.52
Laderas medias	0.63	63.31	633082.27	17.48
Laderas más altas o superiores, mesas	0.27	27.48	274769.22	7.59
Crestas locales/Colinas en los valles	0.27	27.39	273860.28	7.56
Crestas en laderas medias, pequeñas colinas en lla	0.53	52.56	525578.56	14.51
Cimas de montañas, cumbres altas	0.29	29.16	291569.69	8.05
	3.62	362.24	3622358.89	100.00

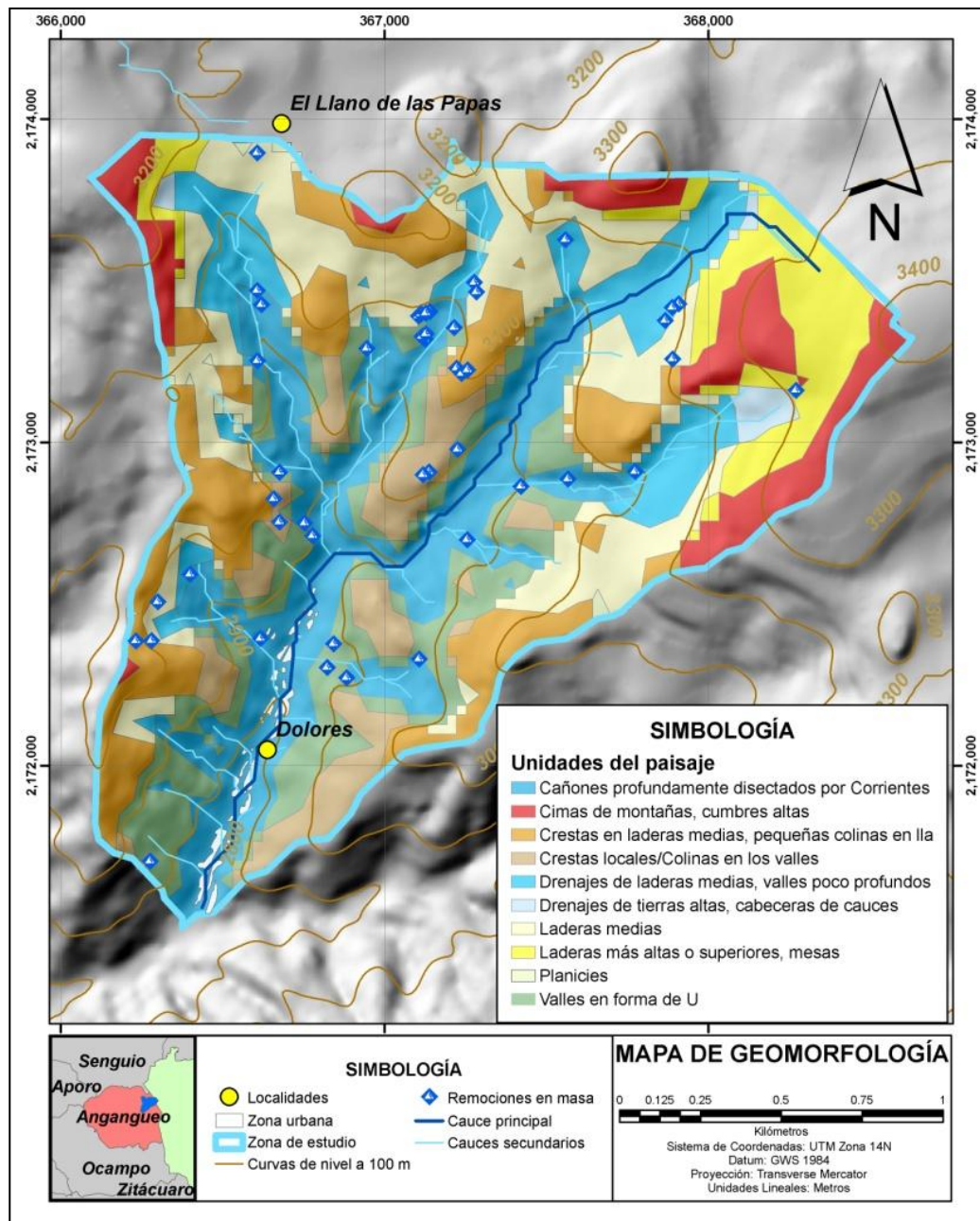


Figura 43. Unidades del paisaje y geomorfología, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Sobreponiendo el inventario de remociones en masa con las unidades geomorfológicas, el resultado es el siguiente (Tabla 24).

Tabla 24. **Unidades geomorfológicas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.**

Unidad geomorfológica/paisaje	Remociones en masa	Por ciento
Cañones profundamente disectados por Corrientes	13	28.3
Drenajes de laderas medias, valles poco profundos	5	10.9
Drenajes de tierras altas, cabeceras de cauces	0	0.0
Valles en forma de U	13	28.3
Planicies	0	0.0
Laderas medias	6	13.0
Laderas más altas o superiores, mesas	1	2.2
Crestas locales/Colinas en los valles	4	8.7
Crestas en laderas medias, pequeñas colinas en lla	4	8.7
Cimas de montañas, cumbres altas	0	0.0
	46	100.0

Las unidades que presentan mayor número de remociones en masa corresponden a Cañones profundamente disectados y Valles en forma de U con 13 remociones cada una que equivalen al 28.3%, respectivamente; le siguen Laderas medias con 6 remociones (13%), Drenajes de laderas medias, valles poco profundos (5 remociones – 10.9%).

5.6.3. Mapa de pendientes.

El relieve de una determinada zona geográfica juega un papel definitivo en la estabilidad de la misma, puesto que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan las remociones en masa por movimientos gravitacionales. En algunos casos aún con pendientes ligeramente inclinadas se presentan movimientos. De esta manera, la cartografía y el análisis del factor pendiente está dentro de las características indispensables en un estudio de susceptibilidad.

Los valores obtenidos en el mapa de pendientes (Figura 44), indican una pendiente media de 24.29° (46.41%), los rangos de los valores obtenidos indican que el 72.88% de la superficie de la microcuenca “El Ventilador” presenta una pendiente caracterizada como ‘Muy inclinada’ (oscila entre 15° a 35°), el 14.72% Fuertemente inclinada (oscila entre 5° a 15°) y el 10.93% Empinada (oscila entre

35° a 55°). Finalmente, solo el 1.4% del territorio tiene una pendiente menor a 5° (Tabla 25).

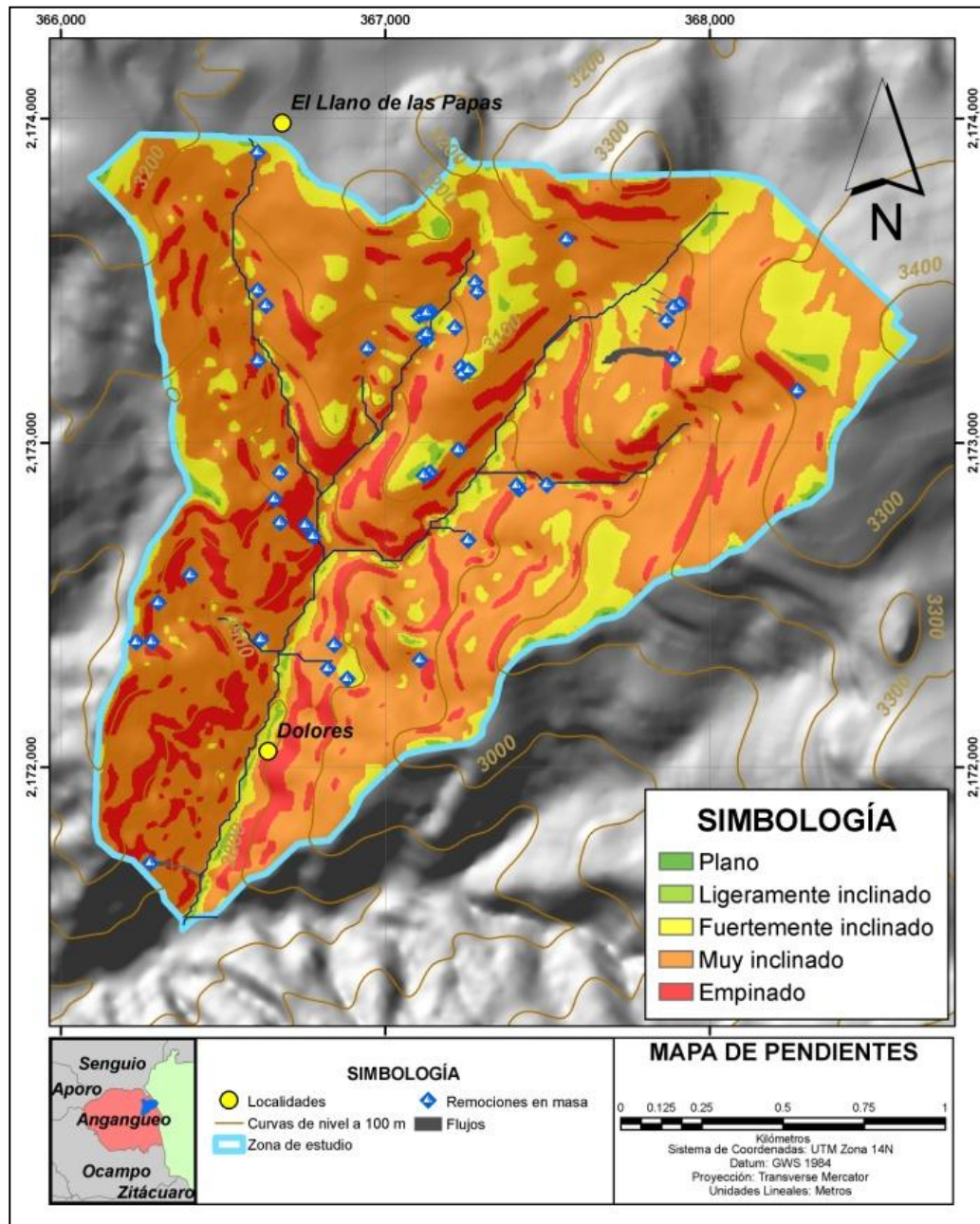


Figura 44. Mapa de pendientes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Como puede observarse en el mapa de pendientes, la mayor parte de la superficie de la microcuenca “El Ventilador”, presenta pendientes susceptibles a procesos o movimientos gravitacionales, considerando que al aumentar el gradiente de una ladera se incrementa la probabilidad de falla.

Tabla 25. **Rangos de pendientes (en grados y porciento), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.**

Tipo de pendiente	Rangos de pendiente (grados)	Superficie (ha)	Superficie (porcentaje)	Rangos de pendiente (porcentaje)
Plano (planicie)	0° - 2°	0.53	0.14	3.5
Ligeramente inclinado	2° - 5°	4.68	1.30	3.6 - 8.7
Fuertemente inclinado	5° - 15°	52.95	14.72	8.7 - 26.8
Muy inclinado	15° - 35°	262.11	72.88	26.8 - 70
Empinado	35° - 55°	39.34	10.93	70 - 143

Asociando los rangos de pendientes con el número de remociones en masa puede observarse en la Tabla 26 y Figura 45 que el 76.1% de las remociones de febrero de 2010 se encuentran dentro de la categoría de Muy inclinada cuyo rango es de 15° a 35° de pendiente (35 remociones), el 10.9% Fuertemente inclinado con rangos de 5° a 15° de pendiente (5 remociones), el 8.7% Empinado en el rango de 35° a 55° (4 remociones), y finalmente, el 4.3% Ligeramente inclinado en el rango de 2° a 5° (2 remociones).

Tabla 26. **Total de remociones por rangos de pendiente (en grados), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán”.**

Tipo de pendiente	Rangos de pendiente (en grados)	Remociones en masa	Porciento
Plano (planicie)	0° - 2°	0	0.0
Ligeramente inclinado	2° - 5°	2	4.3
Fuertemente inclinado	5° - 15°	5	10.9
Muy inclinado	15° - 35°	35	76.1
Empinado	35° - 55°	4	8.7
		46	100.0

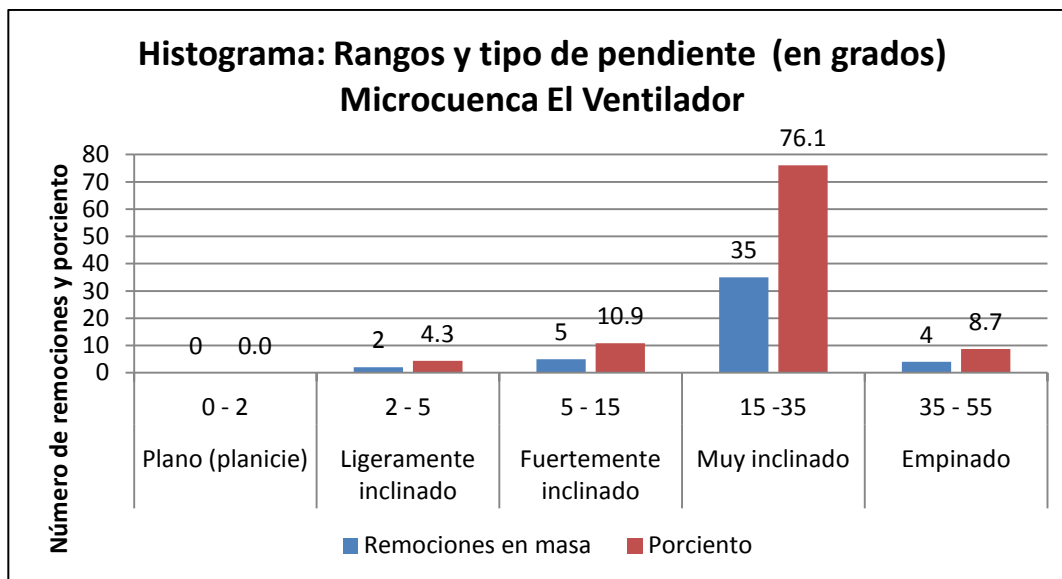


Figura 45. Histograma: Rangos y tipos de pendiente (en grados), microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Es importante resaltar que la localidad de Dolores, municipio de Angangueo, se encuentra rodeada de las pendientes que van de 15 a 35 grados, por lo que representa una alta exposición o amenaza a sufrir remociones en masa, considerando solo este factor. Por otro lado, la carretera que comunica a Mineral de Angangueo con El Llano de Las Papas representa la única salida de evacuación y fue trazada sobre el cauce principal a la altura de la localidad de Dolores y en mayor parte sobre laderas con pendientes de 15°-35°.

Finalmente, en la siguiente Tabla 27 se observan las principales remociones en masa y su punto GPS obtenido en campo, a través del uso de SIG (campo pendiente) y se comparó con el valor obtenido durante el trabajo de campo.

Tabla 27. Remociones con pendiente discretizada en SIG y en campo, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Remoción en masa	Punto GPS	Pendiente en grados (Fuente SIG)	Pendiente Observada en Campo
1	082	35.41°	35 grados o 70%
2	088	33.45°	35 grados o 70%
3	091	35.72°	35 grados o 70%
4	102	32.88°	35 grados o 70%

Remoción en masa	Punto GPS	Pendiente en grados (Fuente SIG)	Pendiente Observada en Campo
5	103	20.53°	35 grados o 70%
6	105	29.73°	35 grados o 70%
7	107	25.64°	35 grados o 70%
8	108	16.90°	45 grados o 85%
9	109	26.79°	45 grados o 85%
10	110	15.69°	45 grados o 85%
11	116	21.21°	35 grados o 70%
12	118	24.88°	55 grados o 143%
13	120	34.03°	35 grados o 70%
14	125	46.02°	55 grados o 143%
15	146	27.14°	35 grados o 70%

Como se puede observar, las diferencias en los puntos 103, 105, 107, 108, 109, 110, 116, 118, 125 y 146, se puede deber principalmente a que la carta topográfica a escala 1:50,000 no es suficiente para realizar este nivel de detalle.

La evidencia de campo (fichas) y su validación con el mapa de pendientes indica que las remociones ocurrieron en una pendiente promedio de alrededor de 25° (46%), una profundidad de suelo de entre 20 cm a 40 cm y una cobertura generalmente compuesta por bosque, vegetación secundaria y arbustos. La mayoría de estas remociones en masa están relacionadas con algún tipo de escurrimiento superficial o subsuperficial. Las remociones en masa caracterizadas como 'caída de rocas y desprendimientos' se localizan en los márgenes de la carretera de la localidad de Anganguero en dirección a El Llano de Las Papas y algunas veredas o terracerías. Estos se debieron a la combinación de dos factores, uno, humedad en el suelo y a la inclinación de la pendiente por los cortes en la carretera, otros corresponden a desprendimientos que se dieron a los costados de los cauces o están asociados a caminos rurales o líneas de conducción eléctrica sin servicio pero cuya área fue deforestada (Anexo 2).

5.6.4. Mapa de exposición de laderas (orientación).

Un mapa de exposición de laderas permite conocer, de un relieve, la orientación con respecto a los puntos cardinales de las caras de las laderas que lo conforman. Existen diversos usos para este tipo de mapas, sin embargo, en lo que se refiere al estudio del peligro de los procesos de remoción las condiciones de humedad que guarda una ladera debido a la influencia del sol sobre esta, determinaran el tipo de procesos exógenos que pueden presentarse. Dado que no siempre es posible encontrar información disponible acerca de las condiciones freáticas y sus fluctuaciones, en el análisis de peligros puede usarse la cartografía con mediciones indirectas como es el caso de la orientación de las laderas y la vegetación que revelan las condiciones hidrológicas de las mismas. En los procesos gravitacionales la resistencia de los macizos rocosos y los suelos pueden verse afectados por el efecto de inestabilidad que el agua influye sobre ellos, de tal forma que, la cantidad de humedad que presente una ladera debe al menos incluirse aunque de manera indirecta en un estudio de peligro, sobre todo en lugares donde es evidente que uno de los factores condicionantes es la acumulación de agua dentro del sistema rocoso o del suelo por efecto de la lluvia.

Para la microcuenca “El Ventilador” (Tabla 28 y Tabla 29), los valores resultantes comprenden todos los cuadrantes principales de 0° a 360°, pero para cada orientación de laderas varía la identificación o presencia de remociones en masa. En todas las orientaciones de laderas se presentaron procesos de remociones en masa. Se puede deducir que la tendencia de orientación de laderas en relación al número de remociones en masa identificadas son: Sureste (11 - 23.9%), Noroeste (11 - 23.9%), Noreste (6 - 13.0%), Sur (4 - 8.7%), Norte (4 - 8.7%), Este (3 - 6.5%), Suroeste (3 - 6.5%), Norte (2 - 4.3%), Oeste (2 - 4.3%).

Tabla 28. *Orientación de laderas y remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Exposición de laderas de 0° a 360°	Número de remociones	Por ciento
North (0-22.5)	2	4.3
Northeast (22.5-67.5)	6	13.0

Exposición de laderas de 0° a 360°	Número de remociones	Por ciento
East (67.5-112.5)	3	6.5
Southeast (112.5-157.5)	11	23.9
South (157.5-202.5)	4	8.7
Southwest (202.5-247.5)	3	6.5
West (247.5-292.5)	2	4.3
Northwest (292.5-337.5)	11	23.9
North (337.5-360)	4	8.7
	46	100

Las laderas que reciben mayores periodos de exposición de luz solar son las del oeste y norte debido a la orientación general de la microcuenca (noreste-suroeste), por otro lado, las laderas cóncavas son de gran altitud y se localizan en el centro de la microcuenca y hacia el norte y noroeste de la misma, entre ellas, se ubican los cauces principales cuyas laderas reciben menor tiempo la luz del sol. Esto contribuye quizá a mayor acumulación de humedad y es aquí donde se presenta una mayor presencia de procesos de remociones en masa. La microcuenca “El Ventilador”, tiene la influencia de los vientos alisios del suroeste provenientes del Océano Pacífico y también la influencia de frentes fríos de misma orientación. Por esta razón, de junio a noviembre en época de huracanes y durante los frentes fríos de diciembre a marzo la microcuenca “El Ventilador” puede verse afectada por cualquier fenómeno meteorológico que durante 24 horas permita una precipitación de 110 mm (Aguilar *et al.*, 2010). Es de destacar que los cauces cuentan con una gran concentración de detritos esperando solamente a ser removidos por un evento hidrometeorológico como el sucedido en febrero de 2010.

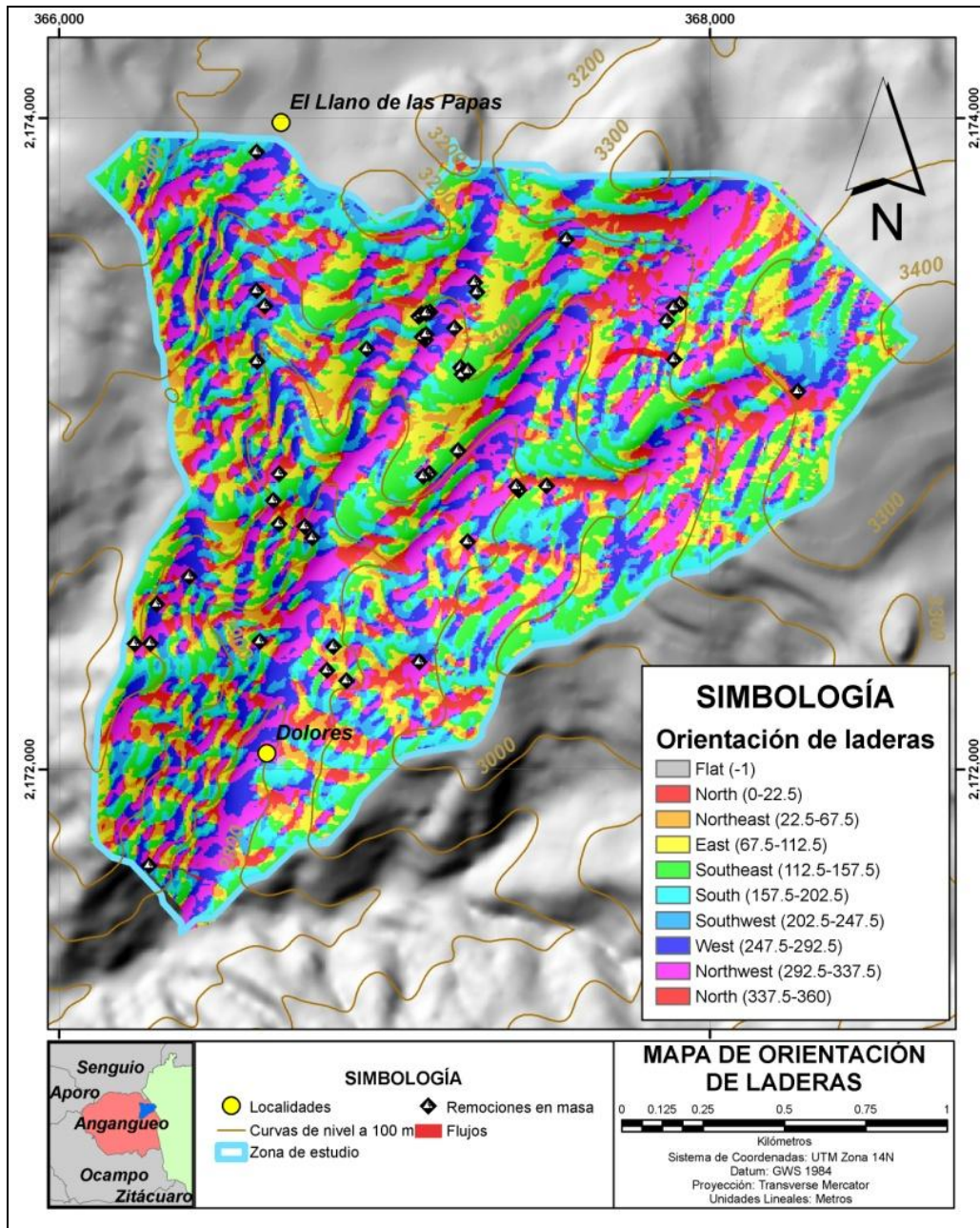


Tabla 29. *Mapa de Orientación de laderas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

5.6.5. Mapa de geometría de las laderas.

El resultado de la geometría de las laderas muestra un rango de valores que van de -27 a 14, estos números representan a los relieves montañosos (Figura 46).

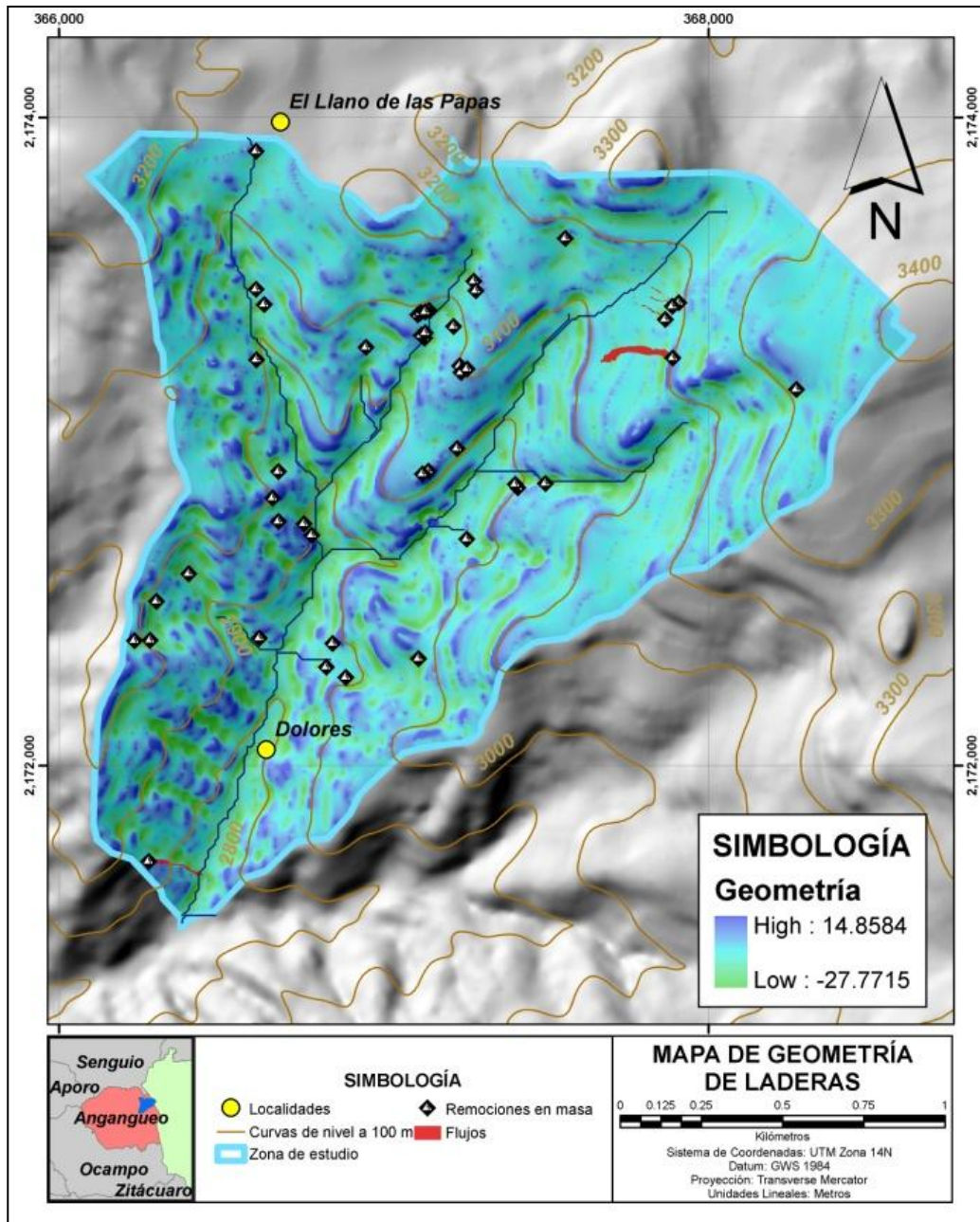


Figura 46. Mapa de Geometría de laderas, microcuenca El Ventilador, Angangueo, Michoacán.

Las formas convexas y cóncavas son dadas por las laderas de los cordones serranos que bordean los estrechos fondos de valles de la microcuenca “El Ventilador” (Figura 47), mientras que las únicas formas planas o semiplanas son las terrazas formadas por los cauces principales.

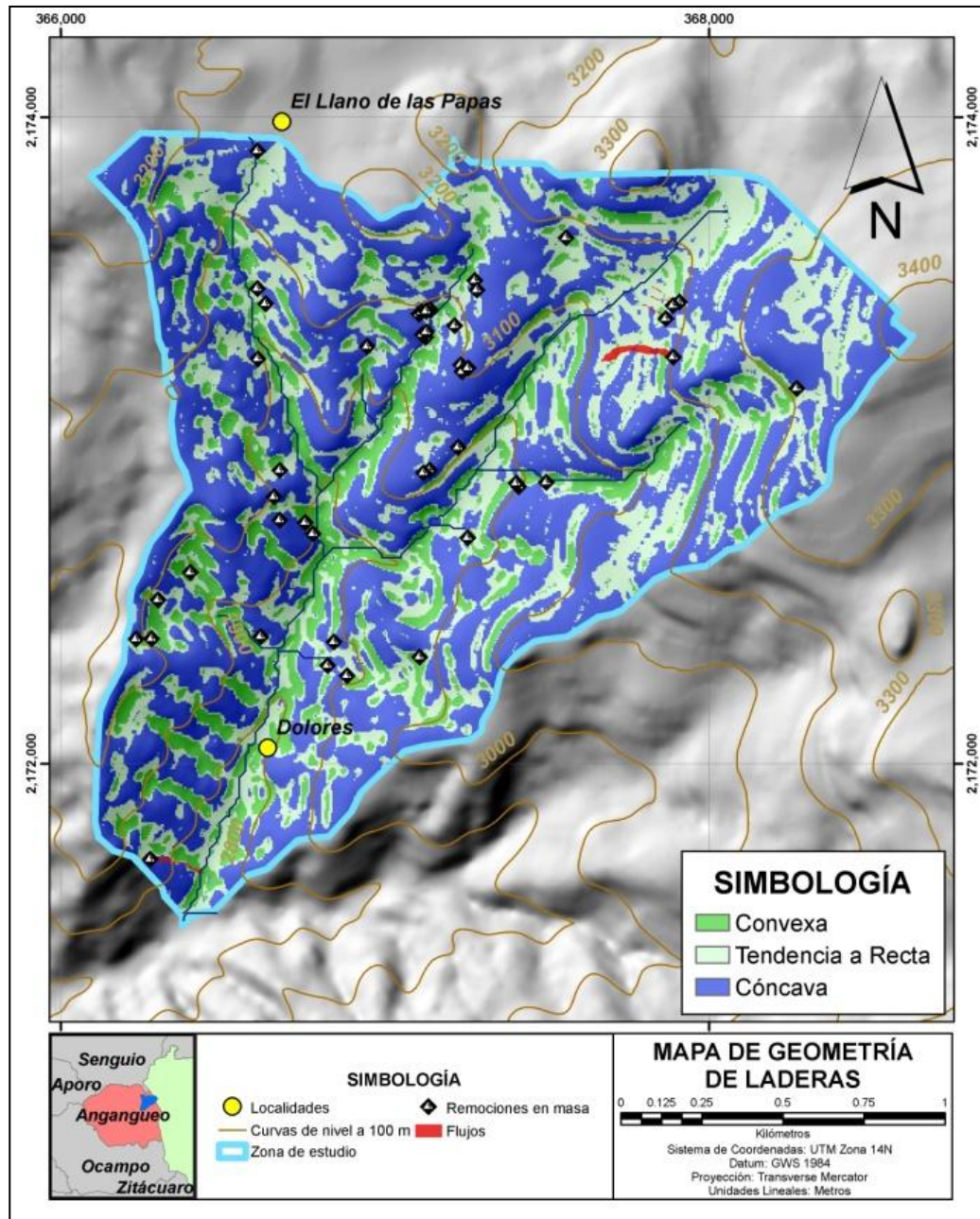


Figura 47. Mapa de Geometría de laderas convexas, rectas y cóncavas, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

El resultado del mapa combinando el inventario de remociones en masa demuestra lo siguiente: formas convexas, cóncava y plana, de las que el 56.5% de las remociones en masa se presentan en convexas y el 43.5% son laderas cóncavas. Finalmente, el resultado muestra valores cercanos a cero, esto no quiere decir que no existan superficies planas, lo que quizá representan terrazas fluviales (Tabla 30).

Tabla 30. **Geometría de laderas y remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.**

Valores	Geometría	Remociones en masa	Por ciento
Negativos	Convexa	26	56.5
Ceros	Recta	0	0.0
Positivos	Cóncava	20	43.5
		46	100

Los resultados estadísticos de este factor demuestran que la mayoría de los procesos de remoción en masa ocurren en laderas convexas y un grupo menor de procesos que se presentan en valores muy cercanos a la concavidad. Los procesos gravitacionales de mayores dimensiones que ocurren en formas de laderas cóncavas probablemente se deben a la concentración del flujo de agua. Por otro lado, en las laderas convexas se espera tener procesos gravitacionales más superficiales como respuesta a la intensa erosión superficial laminar. Aunque no se descarta que con la combinación de factores ocurran movimientos considerables, ya que las lluvias intensas y continuas pueden generar erosiones profundas sobre todo en materiales tipo suelo.

En su mayoría los eventos se localizaron dentro de las partes convexas de las laderas, iniciándose en muchos casos en los trazos carreteros o en franjas donde el bosque está perturbado o existen asociadas superficies dedicadas a la agricultura. En el primer caso se localizan a los costados de la carretera pavimentada en dirección a El Llano de Las Papas. Las remociones en masa se generan a partir de la combinación de los factores geológicos (litología y estructura geológica), hidrogeológicos (presencia de agua) y geotécnicos (comportamiento mecánico de los materiales). El mecanismo de falla y modo de desprendimiento son controlados por los factores geológicos y geotécnicos. Muchas de estas remociones coinciden también con alteraciones en el uso de suelo por actividades antrópicas, por ejemplo, establecimiento de vías de comunicación ‘carreteras pavimentadas’, caminos de terracería para la extracción de madera de los bosques y finalmente, líneas de conducción eléctrica.

5.6.6. Mapa de saturación y concentración de flujo.

Debido a la importancia que tiene el comportamiento del factor hidrológico dentro de los procesos de remoción en masa, es relevante conocer la dirección o ruta que puede seguir el agua en la superficie de las laderas y el estado de sus concentraciones. El mapa que puede vincularse con el comportamiento del agua en superficie es el de saturación y de concentración o acumulación de flujo, este análisis espacial permite conocer las zonas de saturación en función del número de píxeles en cuatro rangos: saturación baja, húmedo, umbral de saturación y saturación. Por otro lado, el de concentración de flujo permite conocer el número de líneas de flujo que pasan por cada píxel o celda a través de su trayectoria dentro de una cuenca. Esta medida regularmente es útil para calcular el tiempo de concentración del agua en una cuenca.

En este mapa (Figura 48), se puede observar que predomina la saturación caracterizada como húmeda en la cuenca media y alta, mientras que la saturación denominada como media, está relacionada a la geometría de la ladera tipo cóncava. La saturación está relacionada también a la pendiente y es por ello que la máxima concentración y saturación se presenta a nivel de cauces o valles fluviales de laderas montañosas.

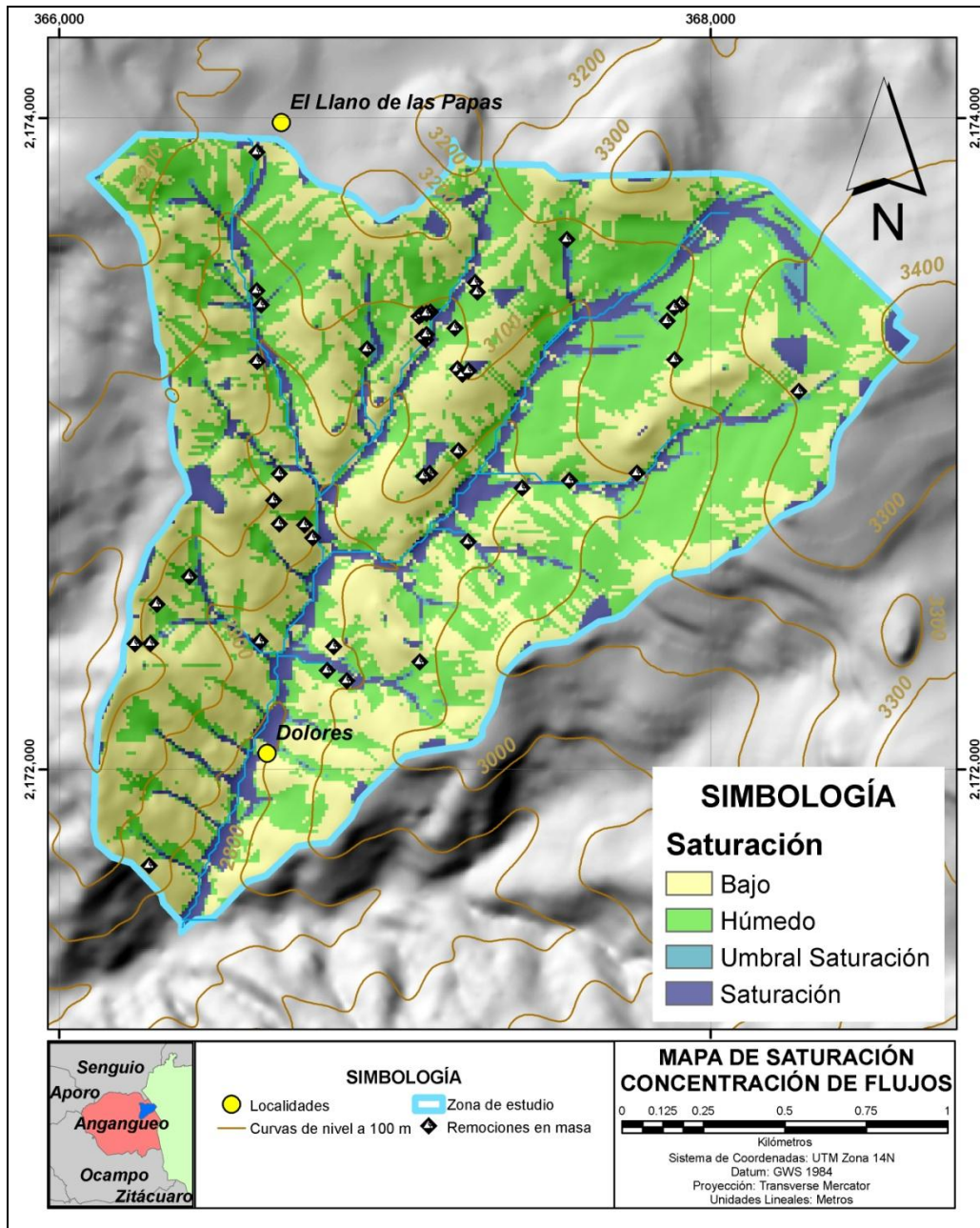


Figura 48. Mapa de saturación y concentración de flujos, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

5.7. Marco Social.

5.7.1. Población.

El municipio de Angangueo tiene según el Censo de Población y vivienda 2010 un total de 10,768 habitantes, de los cuales la cabecera municipal ‘Mineral

de Angangueo' tiene 4,601 habitantes y que representan el 42.73% de la población total del municipio. Por otra parte, la localidad de Dolores, misma que se encuentra dentro de la microcuenca "El Ventilador" cuenta con un total de 302 habitantes, representando el 2.8% de la población del municipio de Angangueo (Tabla 31).

Tabla 31. *Población total en el Municipio de Angangueo. Fuente: INEGI (2010).*

Clave de localidad	Localidad	Población total	Por ciento
0001	MINERAL DE ANGANGUEO	4601	42.73
0002	CARRILLOS (BARRIO DE CARRILLOS)	6	0.06
0003	DOLORES	302	2.80
0004	COLONIA INDEPENDENCIA	1150	10.68
0005	LAS JARAS	92	0.85
0006	JESÚS DE NAZARENO (LA HACIENDA)	667	6.19
0008	SEGUNDA MANZANA DE NICOLÁS ROMERO (CAÑADA DEL MUERTO)	412	3.83
0009	LA RONDANILLA (PRIMER CUARTEL)	566	5.26
0010	LA SALUD	891	8.27
0014	MANZANA DE LA TRINIDAD (LA JUNTA)	908	8.43
0019	EL LLANO DE LAS PAPAS	13	0.12
0020	PRIMERA MANZANA DE NICOLÁS ROMERO (LOS MIMBRES)	328	3.05
0021	SEGUNDO CUARTEL DE RONDANILLA	314	2.92
0024	BARRIO DE SAN PEDRO	21	0.20
0025	EL TIGRE (NUEVA COMUNIDAD EL TIGRE)	55	0.51
0026	SAN ANTONIO	60	0.56
0027	EL PARQUE DE LAS MESAS	4	0.04
0028	SAN MARCIAL	14	0.13
0029	CERRO DEL MELÓN	64	0.59
0030	EL PUERTO	162	1.50
0031	AMPLIACIÓN NUEVA EL PEDREGAL	21	0.20
0032	LA CALERA	117	1.09
		10768	100.00

En la pirámide de población de la localidad de Dolores, municipio de Angangueo (Figura 49), se identifica una población joven con tendencia al envejecimiento. Este proceso de envejecimiento, es comparable con la misma

tendencia de la población de todo el país. A nivel local, también se observa la misma estructura del municipio. Las localidades rurales, muestran una distribución etaria muy heterogénea.

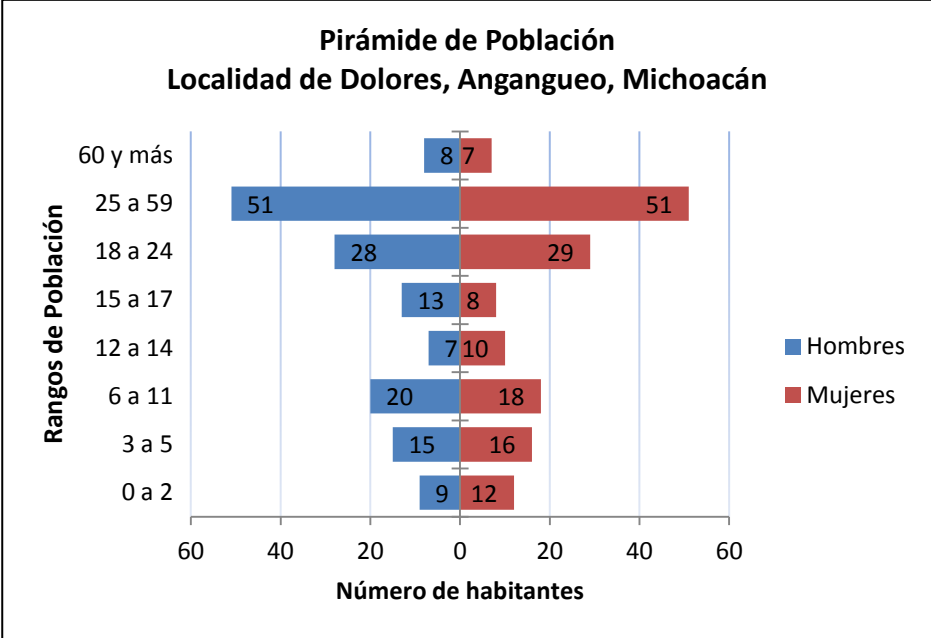


Figura 49. Pirámide de población, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.

5.7.2. Características educativas.

De los 302 habitantes que se encuentran en la localidad, existen 195 habitantes mayores de 15 años, de los cuales 14 son analfabetas y el 9.3% que corresponde a población de 15 a 17 años, se encuentra actualmente estudiando.

La población que asiste actualmente a la escuela se encuentra entre las edades de 6 a 17 años, que sumados conforman el 25% del grueso de la población, esto indica que la deserción educativa se presenta a los 17 años.

Por otro lado, también según INEGI (2010), la población de 15 años y más, que concluyó la primaria consta de 51 habitantes, la secundaria completa de 70 y estudios pos-básicos solamente 8 habitantes (Figura 50).

El grado promedio de escolaridad que resulta de la división de los grados escolares aprobados por las personas mayores de 15 años, entre las personas del

mismo grupo de edad, muestra que solamente se cursan 6.78 años escolares por habitante, dejando en niveles de primaria a toda la población adulta.

De la población total actualmente 61 habitantes se encuentran estudiando, esta población va de entre los 6 a los 17 años.

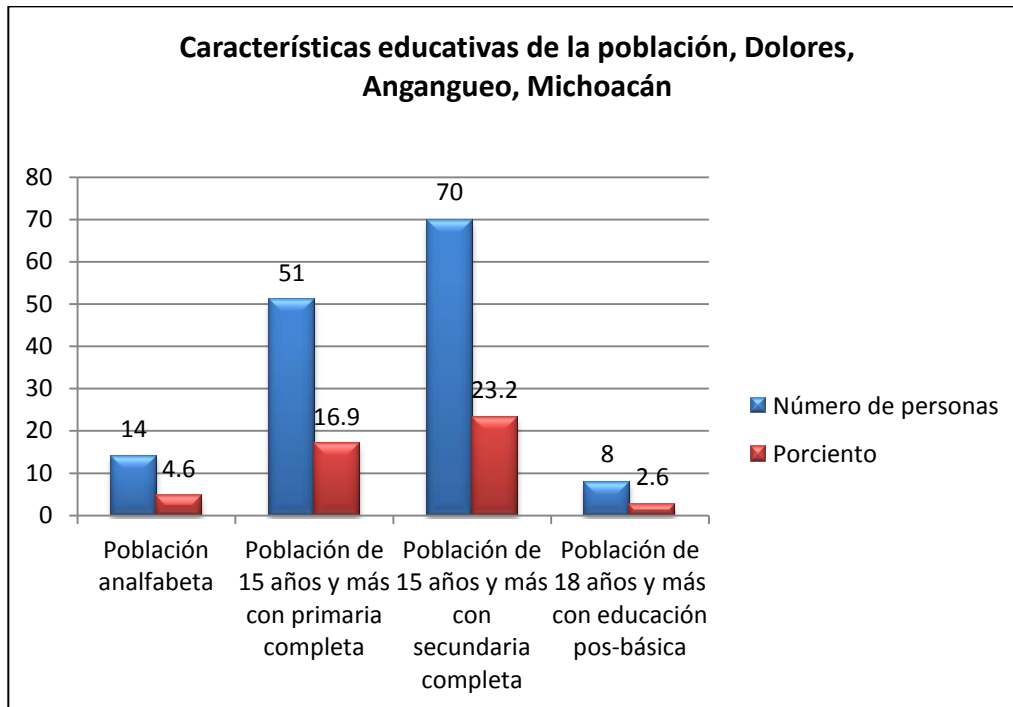


Figura 50. Características educativas, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.

5.7.3. Discapacidad.

En la localidad de Dolores, Angangueo, existen cuatro variables o tipos de discapacidad que constituyen el 5.3% - 16 habitantes, estos datos se aprecian en la Figura 51.

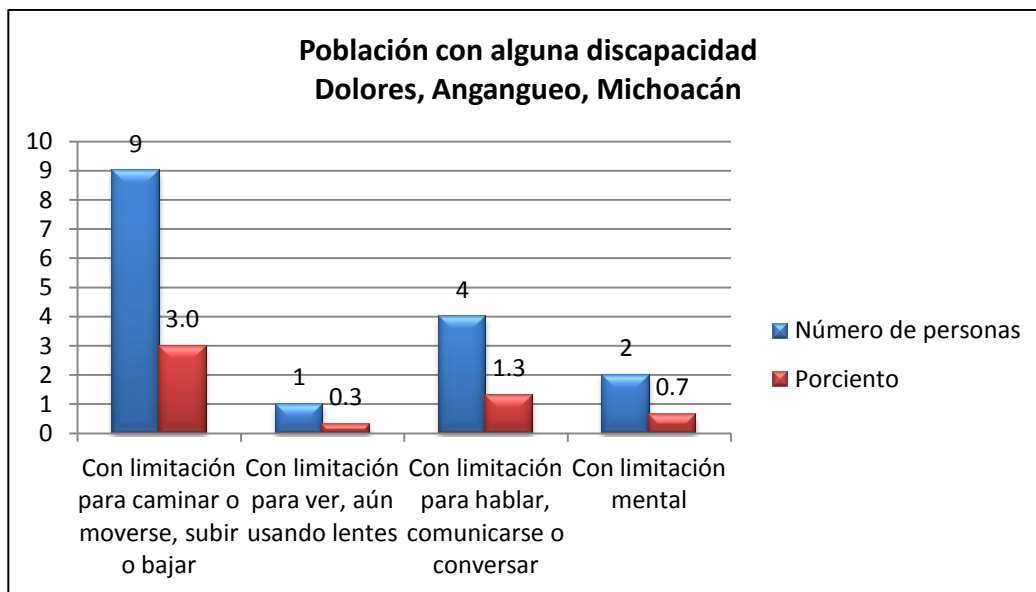


Figura 51. Discapacidad, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.

5.7.4. Calidad de la vivienda.

La cantidad de hogares que se encuentran registrados en el Censo de Población y Vivienda 2010, para la localidad Dolores en el municipio Angangueo es de 56, sin embargo, existen 65 viviendas en la localidad, con un promedio de ocupantes por vivienda de 5.39 habitantes.

Características de la vivienda. Para el municipio de Angangueo, según el cuestionario ampliado del Censo Población y Vivienda 2010, indica que de las viviendas particulares habitadas, excluyendo las habitaciones construidas para locales, las viviendas móviles y los refugios, el 0.11% de las viviendas están construidas con materiales de lámina de cartón o material de desechos (Figura 52); el 50.76% se encuentran construidas de madera o adobe (Figura 53 y Figura 54), y; el 49.14% de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto (Figura 55).



Figura 52. Vivienda construida de lámina de cartón o material de desechos, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.



Figura 53. Vivienda construida de madera, Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.



Figura 54. *Vivienda construida de adobe, Localidad de Dolores, municipio de Anganguero.*



Figura 55. *Vivienda construida de tabique, Localidad de Dolores, municipio de Anganguero.*

Las estadísticas para la localidad de Dolores, no se encuentran especificadas por tipo de materiales de construcción de techo y muros, sin embargo, se podrá considerar algunas variables que muestra el Censo de Población y Vivienda, 2010 considerando lo siguiente:

Habitaciones en la vivienda: entre menor sea la cantidad de cuartos, existirá mayor hacinamiento.

Viviendas con piso diferente a tierra: si el piso es de tierra, la construcción de los muros y techos será de baja calidad.

Servicios básicos conectados a la vivienda: si no cuentan con los tres servicios básicos, existirá rezago para la satisfacción de sus actividades.

Dentro de la localidad, se puede observar que solamente dos viviendas cuentan con piso de tierra, una es de un cuarto, 23 de dos cuartos y 31 de tres o más cuartos y, solamente 17 cuentan con los 3 servicios conectados a la vivienda.

Debido a que la electricidad es uno de los primeros servicios que se proporcionan a los asentamientos humanos, sean o no irregulares, todas las viviendas cuentan con éste servicio y aparentemente 54 viviendas cuentan con el servicio de drenaje, lo que muestra que las 2 viviendas con piso de tierra no cuentan el drenaje, pero, solamente 17 cuentan con el abastecimiento de los tres servicios, por tanto, si se descarta que las viviendas con mayor hacinamiento no tienen conectados los 3 servicios, solamente el 54% de las 17 viviendas de tres o más cuartos se encuentran en excelentes condiciones.

Por tanto, si se hace un cruce de variables, se obtiene que solamente el 2% de las viviendas está en condiciones de muy baja calidad en la estructura de su construcción, el 52% en calidad baja, el 23% con calidad media y 23% con buena calidad.

5.7.5. Características económicas.

La Población Económicamente Activa (PEA) de la localidad de Dolores, municipio de Angangueo, es del 29.5%, esta variable la conforman la Población ocupada y la Población desocupada (Figura 56).

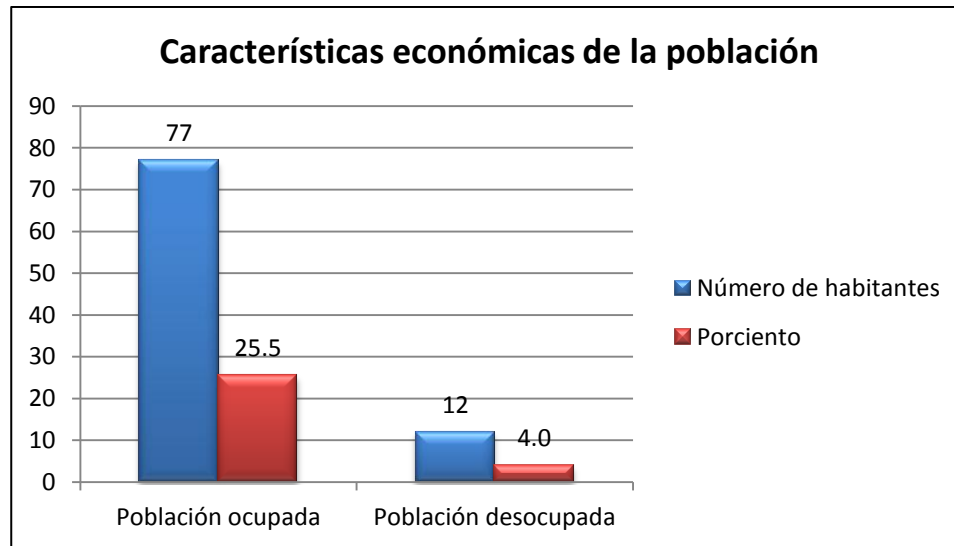


Figura 56. Características económicas (PEA), Localidad de Dolores, municipio de Angangueo.

5.8. Vulnerabilidad Social.

5.8.1. Densidad de población.

La localidad de Dolores, municipio de Angangueo, tiene una densidad de población de 83 habitantes / km², dicha población se concentra en la cuenca baja, justo en la salida de la microcuenca “El Ventilador” (Figura 57).

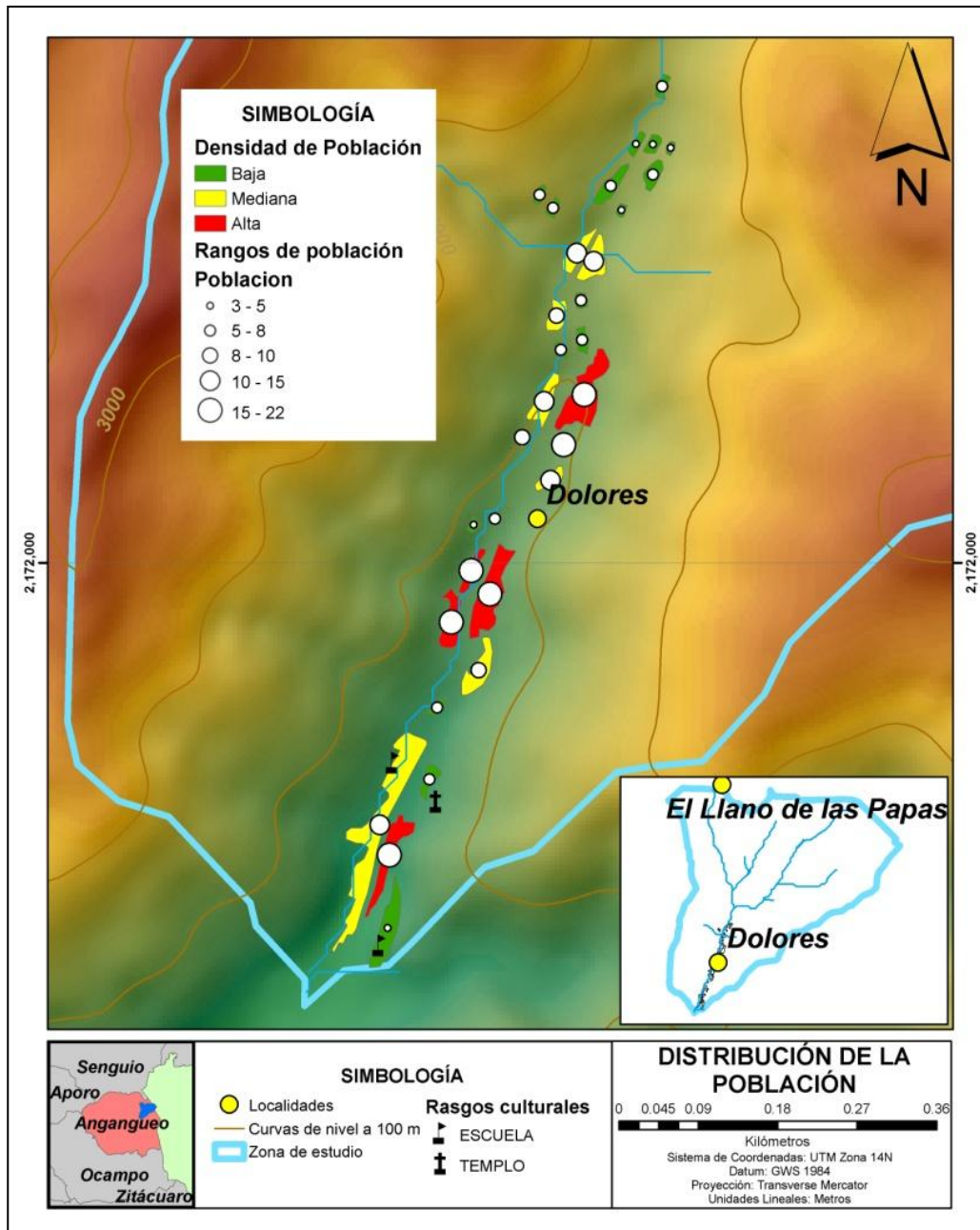


Figura 57. Densidad de población, Localidad de Dolores, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Es de destacar que la mancha urbana de la localidad de la cabecera municipal de Mineral de Angangueo, se ha extendido hasta la microcuenca “El Ventilador” donde se ubica la localidad de Dolores (302 habitantes).

Ambas localidades (Dolores y Mineral de Angangueo), se establecieron o crecieron sobre el cauce y los costados del río “Puerco”, en esta zona la

geomorfología es de tipo valle fluvial en donde de manera natural corre el agua no solo de la microcuenca “El Ventilador” sino también de las microcuencas “Las Jaras”, “El Charco”, “San Luis” y “El Tigre”, mismas que aportan una gran cantidad de sedimentos y detritos. La mancha urbana de esta localidad se extiende hacia la zona norte, donde se ubica la localidad de Dolores ‘aguas arriba’. Las calles laterales son prácticamente nulas, por lo que la carretera principal divide en dos partes la zona urbana. Dicha traza urbana es muy asimétrica y dispersa o irregular dentro de la microcuenca “El Ventilador”.

A continuación se presenta la clasificación de la densidad de población dentro de la zona urbana de la localidad de Dolores. Como se observa en la Tabla 32, la densidad ‘baja’ representa el 21.8% del total de superficie dentro de la mancha urbana, la densidad ‘media’ cubre el 19.6% y finalmente la densidad ‘alta’ cubre el 58.7%.

Tabla 32. Porcentaje de densidad de población, Dolores, Angangueo.

Rangos	Densidad	Área en m ²	Por ciento
3 - 8	Baja	4889.22	21.8
8 - 14	Media	4392.74	19.6
14 - 22	Alta	13179.64	58.7
		22461.6	100.0

La fase final del estudio de riesgo de deslizamientos, tal y como se describe en el esquema presentado en la metodología, radica en el análisis de las consecuencias que pudieran presentarse a partir de la ocurrencia de nuevos eventos de remociones en masa y en particular de flujos de detritos, éste análisis consiste de conjuntar la probabilidad de ocurrencia de tales eventos que afectarían a los elementos en riesgo (viviendas, vidas humanas, entre otros) y su vulnerabilidad.

Se puede concluir que los eventos de flujos de detritos del año 2010, la inestabilidad de las laderas, y la presencia de acumulaciones de material suelto y depósitos antiguos de deslizamientos sugieren que la microcuenca “El Ventilador” es geológicamente activa en cuanto a la generación de eventos de remociones en

masa. Los resultados muestran que, en general, el peligro se asocia fundamentalmente a deslizamientos de tipo superficial o de suelo en laderas, y flujos de detritos en cauces de la microcuenca “El Ventilador”. Los flujos de detritos confluyen al cauce principal y escurren por éste alcanzando la zona urbana ubicada en la comunidad de Dolores, misma que ya fue afectada por un flujo de febrero de 2010.

Se identificaron un total de 46 fuentes de deslizamientos y por lo menos 13 posibles trayectorias, se tiene una densidad de 12.7 remociones/km². Las fuentes de deslizamientos se identificaron mediante el análisis de susceptibilidad con las zonas de saturación obtenidas en SIG y un análisis visual comparativo entre dicho mapa y la ortofoto digital a escala 1:10,000.

Se observa en la (Figura 58) que las zonas que representan peligro muy alto corresponden a las áreas de inundación que podrían recibir el material producto de deslizamientos superficiales y flujos de detritos, éste material compuesto de rocas y suelo principalmente, incrementa la capacidad abrasiva de los escurrimientos que combinada con avenidas extraordinarias en corrientes torrenciales tiene la capacidad de arrasar con todo a su paso (viviendas, bosque, caminos e infraestructura en general) en la población de Dolores aguas abajo.

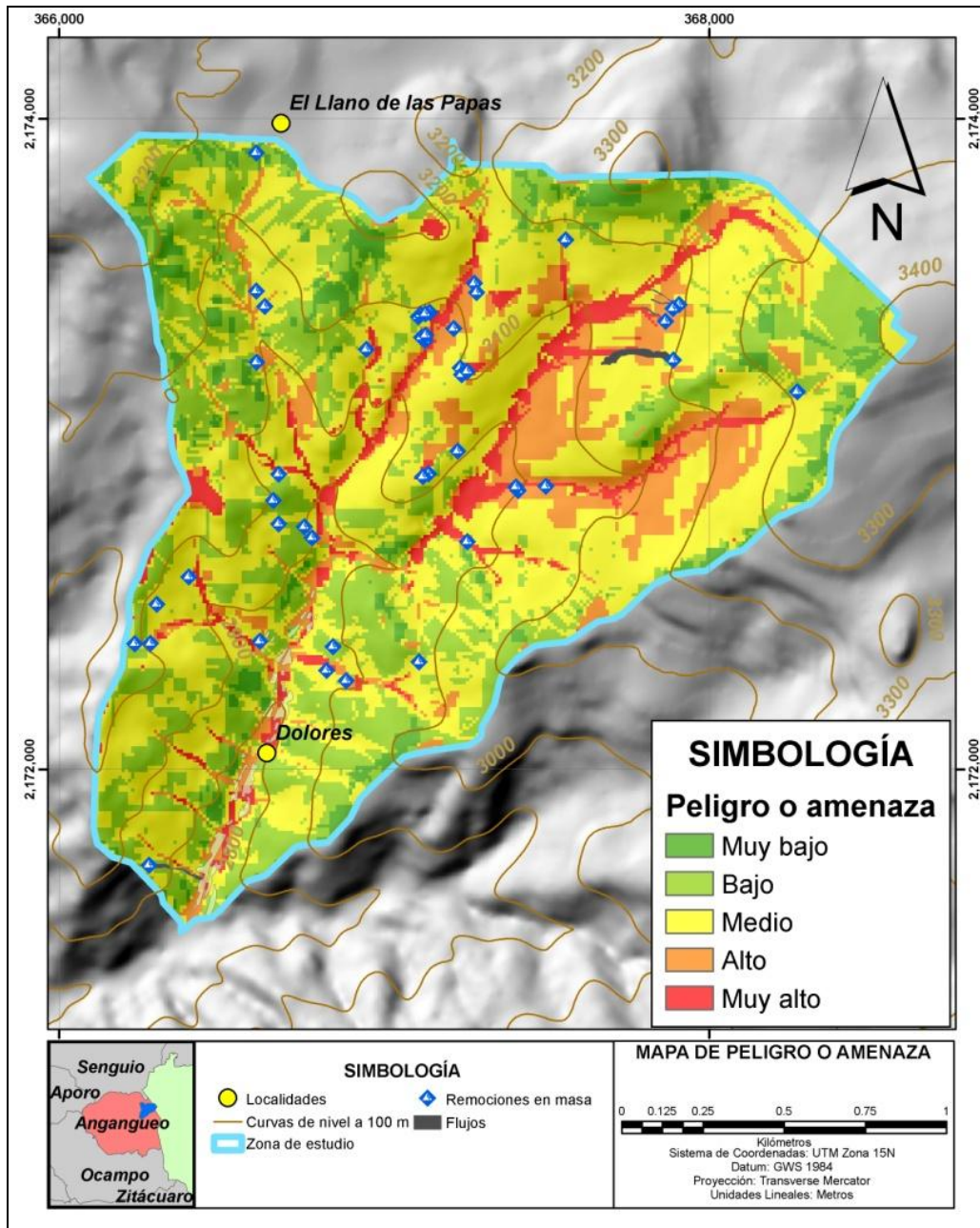


Figura 58. Mapa de peligro o amenaza de remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

Finalmente, el resultado de la vulnerabilidad de la población expuesta a procesos de remociones en masa, considerando el número de viviendas es el siguiente (Tabla 33, Figura 59 y Figura 60):

Tabla 33. Vulnerabilidad por número de viviendas y población expuesta a remociones en masa, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

No.	Vulnerabilidad	Viviendas	Por ciento
1	Muy bajo	2	1.7
2	Bajo	14	12.2
3	Medio	27	23.5
4	Alto	56	48.7
5	Muy alto	16	13.9
		115	100.0

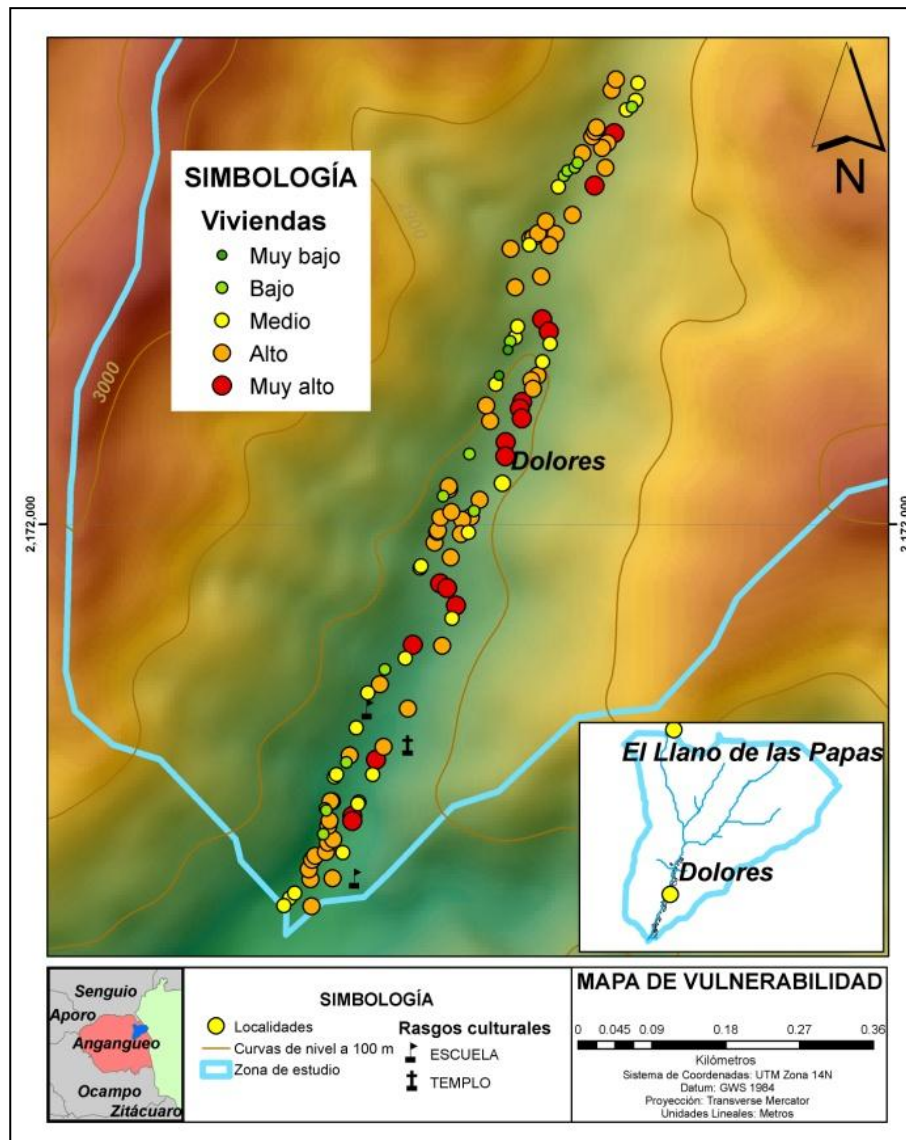


Figura 59. Mapa de vulnerabilidad por vivienda y número de habitantes, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

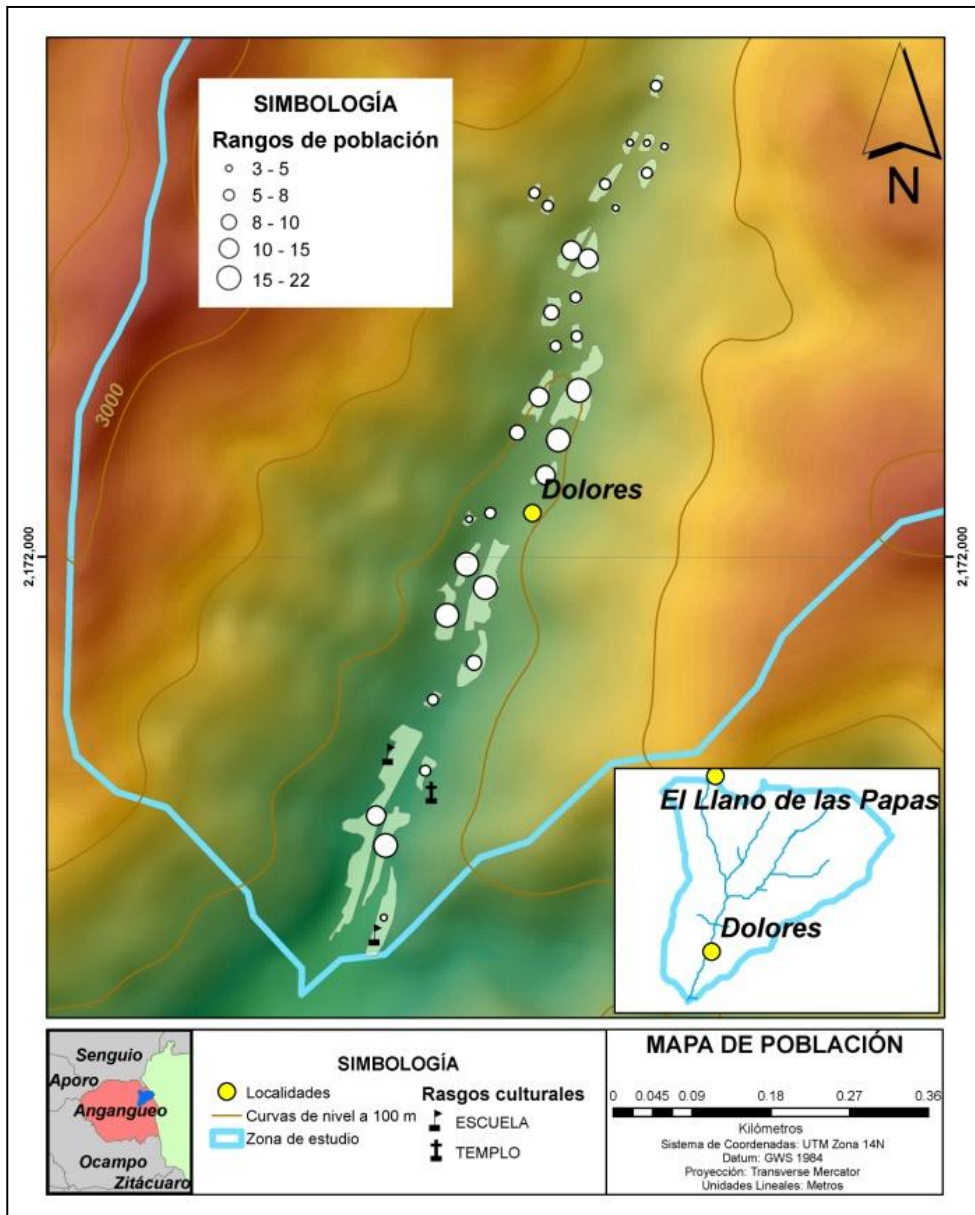


Figura 60. Mapa de rangos de población, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.

El 86.1% de las viviendas que se encuentran sobre el cauce principal de la microcuenca “El Ventilador” (cuenca baja) presentan una vulnerabilidad *Muy alta* y *Alta*: (Muy alta: 13.9%- 16 viviendas), (Alta: 48.7%-56 viviendas) y (Media (23.5%- 27 viviendas). Finalmente, con vulnerabilidad Baja el 12.2%-14 viviendas y Muy baja 1.7%-2 viviendas.

5.8.2. Probabilidad de ocurrencia.

Para calcular la probabilidad de que se presenten deslizamientos superficiales y flujos de detritos en las áreas susceptibles ya identificadas, se relacionó ocurrencia de éstos fenómenos a la frecuencia e intensidad del evento desencadenante; en éste caso particular al evento de precipitación extraordinaria ocurrido.

En la Tabla 34 se observa que una precipitación de 70 mm en 24 horas y 144 mm en cinco días puede ser igualada o excedida dentro del intervalo de 45 años según el periodo de observación 1961 a 2004, también se observa que se presentó una precipitación de 110 mm en 24 horas y 233.5 en cinco días en el año 2010, por lo tanto, se espera que un fenómeno de magnitud similar se repita dentro de un intervalo de recurrencia aproximado de 50 años. Se puede asociar éste periodo de retorno a la ocurrencia de flujos de detritos para la zona de estudio.

Tabla 34. *Datos del fenómeno de precipitación para la estación climatológica Ciudad Hidalgo. Fuente: IMTA 2010.*

Duración	Periodo de 1961 a 2004	Periodo de 1 a 5 de Febrero de 2010
24 horas	70 mm	110 mm
Cinco días	144 mm	233.5 mm

5.8.3. Importancia relativa de los factores condicionantes de remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador”.

La aplicación previa del análisis jerárquico como parte del proceso de elaboración del mapa de susceptibilidad permitió confirmar que las remociones en masa ocurrieron en sitios de media, alta y muy alta susceptibilidad. Además, las bases utilizadas durante la ponderación de los factores condicionantes permitieron obtener una mejor clasificación, mostrando el valor de peso que cada factor condicionante genera y la contribución al desencadenamiento de las remociones. Es importante destacar que algunos problemas o errores de interpretación pueden ser corregidos seleccionando adecuadamente los factores más representativos.

Para este estudio, el resultado del análisis jerárquico muestra que los factores que determinan una mayor susceptibilidad de remociones en masa en laderas son en orden de importancia: la pendiente del terreno, el uso del suelo, la Geología, distancia a escurrimientos, orientación de laderas, Edafología y densidad de drenaje.

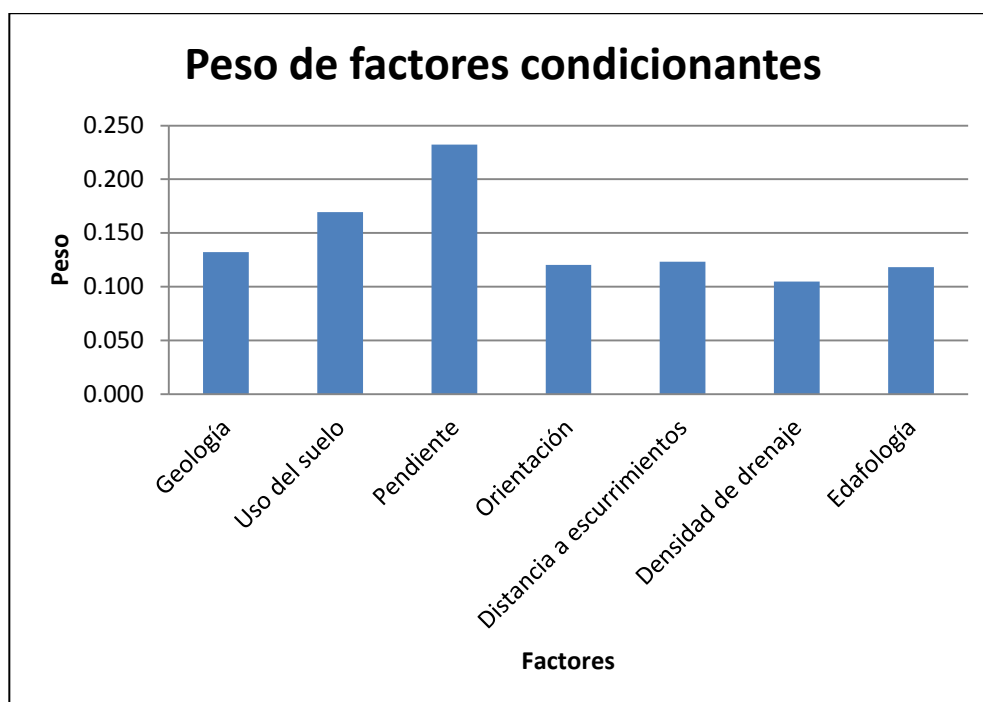


Figura 61. *Peso de los factores condicionantes en análisis jerárquico para determinar la susceptibilidad, microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.*

Se encuentran asociadas a las remociones, cambios en el uso de suelo y vegetación (factor antrópico) con deforestación, construcción de vías de comunicación (carreteras y terracerías) y líneas de conducción eléctrica. Un flujo de detritos que se generó también en la parte media-alta de la microcuenca pero en la salida de la misma, causó daños a la población de Dolores (pérdidas humanas y materiales). En general las remociones en masa que se presentaron en febrero de 2010 y los procesos de erosión en la microcuenca han dejado gran cantidad de sedimentos y detritos esperando a ser removidos en futuros eventos.

Dentro del área se ubicaron 46 remociones en masa, todas detonadas por los frentes fríos 28 y 29 y la interacción con la corriente de chorro y otros

fenómenos climatológicos ocurridos durante la semana del 1 al 5 de febrero (registrándose la 5ª tormenta invernal) en el territorio nacional a lo largo de la Sierra Madre Occidental y lluvias que provocaron escurrimientos significativos.

Las remociones clasificadas como deslizamientos 'traslacionales' o deslizamientos superficiales o de suelos, se generaron en rocas andesíticas y en la zona se registran según la carta geológica alteraciones hidrotermales, lo que en teoría origina la descomposición por temperatura y humedad del subsuelo y capas más superficiales de roca dejando como resultado un material muy inestable y quebradizo, fácil de removerse cuando cambian las condiciones de saturación de humedad en el suelo.

La mayoría de las remociones ocurrieron entre los 3,200 y 3,600 msnm bajo mecanismos de gravedad, deslizamientos traslacional simple. La mayor parte de estos se originan en rocas andesitas terciarias.

Las 46 remociones ocurren en materiales pedológicos (depósitos piroclásticos). En su mayoría inician como deslizamientos traslacionales que adoptan como superficie deslizante el límite suelo-roca, un plano de estratificación o una fractura, terminando como flujos debido a la acumulación excesiva de agua.

Mecánicamente en su mayoría los suelos son de textura Franco arenoso y están compuestos por 65% de arenas, 11% de arcillas y 24 % limos, se clasifican principalmente como suelos gruesos arenosos con cantidades importantes de arcillas o limos que influyen en el comportamiento mecánico. Las arcillas y limos se encuentran en 52% como de alta compresibilidad y 48% de baja lo que hace que sean altamente susceptibles a colapsos y procesos de remoción por la alta capacidad de adsorción de agua que se ve reflejada en los contenidos de agua que en su mayoría rebasan el 25%.

Es evidente que en la región existe una estrato superior delgado, sin consolidación y poco resistente, que sobreyace a un estrato rocoso, intemperizado en su parte superior, no existe una zona de transición entre ellos, en consecuencia

existe una superficie de falla definida y que permite la separación entre los diferentes materiales favoreciendo el movimiento del material superior, de tipo arenoso con aparente contenido elevado de limos, a favor de la pendiente, la cual además tiene 24° en promedio, movimiento que aparentemente es acelerado por la acumulación de agua o infiltración, agua que además rápidamente puede alcanzar la superficie de falla y actuar como lubricante (jaboncillo).

El resultado del mapa de geometría de laderas muestra las formas convexas que corresponden a formaciones de cauces o zonas donde el intemperismo y erosión comienza a 'transportar materiales' y las cóncavas corresponden a macizos rocosos o serranos de derrames lávicos menos intemperizados.

Los procesos gravitacionales de mayores dimensiones que ocurren en la microcuenca "El Ventilador" se presentan en laderas convexas, debido posiblemente a la concentración de flujos de agua y a la saturación del suelo. Por otro lado, en las laderas cóncavas sugieren la presencia de procesos gravitacionales más superficiales como respuesta a la intensa erosión superficial de tipo laminar. No se descarta que dada la combinación de factores condicionantes y detonantes, ocurran procesos de remoción mayores debido a la intensa erosión, al grado de pendiente y cambios en el uso de suelo y vegetación.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

- El factor detonante de las remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador” fue el evento de lluvia extremo de febrero del 2010, mientras que el factor condicionante que más incidió fue la pendiente, regulada por otros factores tales como cambios en el uso del suelo y vegetación, la Geología (geomorfología: geometría de las laderas), distancia a escurrimientos, orientación de laderas, tipo de suelos y densidad de drenaje. El promedio de la pendiente en que ocurrieron estos procesos es de alrededor de 25° (46%).
- El inventario de remociones en masa para la microcuenca “El Ventilador” reportó la ocurrencia de 46 movimientos, de los cuales, la mayoría correspondió a deslizamientos superficiales de suelo y en menor grado caídos de rocas y flujos de detritos.
- En cuanto a la vulnerabilidad de la población, el 14% de las viviendas presentaron una vulnerabilidad Muy alta, mientras que el 49% presentó una vulnerabilidad Alta, y el 24% una vulnerabilidad Media.
- La aplicación del modelo AGWA-KINEROS2, así como las técnicas de SIG empleadas para evaluar los efectos de usos/coberturas del suelo sobre la distribución de la escorrentía e infiltración y su relación con los fenómenos de remociones en masa en la microcuenca “El Ventilador” permitieron verificar la alta correlación espacial de los procesos, por lo que estas herramientas pueden ser utilizadas para planificar zonas de restauración y conservación ecológica de los recursos suelo y agua a nivel de microcuenca.
- La participación ciudadana durante el curso-taller “Control de la Erosión de los Suelos y Deslizamientos en zonas de Montaña” impartido el día 13 de Octubre de 2011 en el Salón de Cabildos de la

Presidencia Municipal de Mineral de Angangueo, Estado de Michoacán, se aprovechó la presencia de las autoridades municipales, incluyendo el Coordinador de Protección Civil para entregarle los resultados del presente trabajo. Se cumplió con el objetivo de informar de los procesos que sufre la microcuenca y la importancia de realizar obras de restauración y fomentar estas prácticas con la población (Anexo 4: Relatoría de curso).

6.2. Recomendaciones.

- Realizar estudios de susceptibilidad por sismos.
- Realizar estudios de riesgos por otros fenómenos naturales.
- Se sugiere implementar obras de estabilización y consolidación de taludes sujetos a derrumbes y las de protección de suelos contra la erosión basados en la ingeniería naturalística (Anexo 5). Particularmente, es importante diseñar y ejecutar obras de Presas Filtrantes en la cuenca media para mitigar el efecto de flujos de detritos y rocas de grandes dimensiones.
- Realizar estudios geotécnicos para determinar las características y resistencia de rocas.
- Recomendar a las autoridades de Protección Civil realizar un inventario detallado de la población ya que se encontraron discrepancias en el total de viviendas del Censo de Población y Vivienda 2010 contra el inventario de viviendas que se realizó en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA.

- Aguilar, G. E., Santillán, H. O., Salgado, M. G., Martínez, M. M. 2010. Análisis técnico de la vulnerabilidad hidrológica ante el crecimiento urbano. Caso de Angangueo, Michoacán. XXI Congreso Nacional de Hidráulica. 7 pp.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2000) Prevención de desastres desde las aulas. Dirección de Atención y Prevención de Emergencias. Bogotá, Colombia. Primera Edición, 16 pp.
- Alcántara, A. I. 2000. Landslide: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. Universidad Nacional Autónoma de México: Boletín del Instituto de Geografía, 41:7-25.
- Alcántara, A. I., 2004. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in México: *Geomorphology*, 61(1-2):19-40.
- Alcántara, A. I., Murillo, G. F. 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, Núm. 66, 2008, pp. 47-64.
- Aleotti, P., 2004. A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology* No. 73, Elsevier, p. 247-265.
- Ávila M. R., 2000. Informe técnico No. 2. El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65, 15–31.
- Caballero, L., Macías, J.L., García, P. A., Saucedo, R., Borselli, L., Sarocchi, D., Sánchez, J.M., 2006. The September 8–9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, Mexico. *Natural Hazards*, 39(1): 103-126.
- Capra, L., Lugo, H. J., Borselli, L., 2003a. Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México). *Engineering Geology*, 69: 359-379.
- Capra, L., Lugo, H. J., Dávila, H. N., 2003b. Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(2): 95-106.

- Capra, L., Lugo, H. J., Zamorano, O. J., 2006. La importancia de la geología en el estudio de los procesos remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, número especial de geología urbana, LVII, 2: 205-214.
- Cardona, A., 1993. Capítulo III: Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo, en Los desastres no son naturales, compilado por Maskrey, A., Tercer Mundo Editores, Colombia, p. 61.
- Cardona, O (2001) Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis Doctoral para optar al título de Ingeniero de la Escuela de INGENYERIA DEL TERRENY CARTOGRÁFICA I GEOFÍSIC. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- CENAPRED, 2006. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, Fenómenos Geológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. 87 pp.
- CENAPRED, 2010. Peligros Naturales y Tecnológicos relevantes durante el periodo 1810-2010. 59 pp.
- Cevik, E., Topal, T., 2003, GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey): Environmental Geology, v. 44 pp. 949–962.
- Chacón J., Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., 2006. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. Springer-Verlag. Department of Civil Engineering, University of Granada, Granada, Spain.
- Chardon, A. 2002. Un enfoque geográfico de la vulnerabilidad en zonas urbanas expuestas a amenazas naturales. Manizales, Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia.174pp.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2002, A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method: Geomorphology, v. 48, pp. 349–364.
- Comfort, L K. (1999) Shared Risk: Complex Systems in Seismic Response. Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford (UK). 322 pp.
- Comunidad Andina <http://www.comunidadandina.org/>
- (CONEVAL) Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. 2005. Mapas de Pobreza y Rezago Social. Fuente: estimaciones del CONEVAL con base en el II Censo de Población y Vivienda 2005 y la Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto de los Hogares 2005.

- Córdova, A. M. 2010. Priorización de áreas para recuperar la función hidrológica de la subcuenca Támbula- Picachos, Guanajuato. Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis MAGIC. 232 pp.
- Cortés T. H. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillos. México. 168 p.
- Cotler, H. 2004. El manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política. Instituto Nacional de Ecología. México. 347 pp.
- Cotler, H., A. Priego. 2004. El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma- Chapala. Pp. 63- 74. *En: El manejo integral de las cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política.* Instituto Nacional de Ecología. México. 347 pp.
- Cousot, P., Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth Science Reviews*, No.40, p.209-227.
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No. 43, p. 27-29.
- Cruden, D., Varnes, D., 1996. Landslide types and processes. In Turner A.K. & Schuster R.L., 1996. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Special Report 247. Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C. 675 p.
- Cruz G. (2003) La cuenca como unidad de planeación ambiental, Instituto Nacional de Ecología, México. Consultado en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/estudios/397/cruz.html>. Fecha de consulta: 17/09/11.
- Cruz, M., Delgado, L., 2000. Los deslizamientos de la carretera Tijuana-Ensenada, Baja California. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, 418-431 p.
- Dai, F., Lee, C., 2002. Landslide characteristic and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, 42: 213-228.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996. *Landslide recognition identification, movement and causes*, John Wiley & Sons, 251 pp.
- Dourojeanni, A. 1991. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable (aplicados a microrregiones y cuencas). Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). Documento 89/05/Rev.1 Serie de Ensayos. Santiago de Chile. 69 pp.

- Ercanoglu, M., Gokceoglu, C., 2004, Use of fuzzy relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey): *Engineering Geology*, v. 75, pp. 229–250.
- FAO 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Roma, Italia. 86 p.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2007. La nueva generación de programas y proyectos de gestión de cuencas hidrográficas. FAO. Roma. 154 pp.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009). Análisis de Sistemas de gestión de riesgo de desastres. Una Guía. Serie sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales, No. 13. FAO, Roma. 112 p.
- Flores, L. P., Alcántara, A., I., 2002. Cartografía morfogenética e identificación de procesos en Teziutlán, Puebla: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, *Investigaciones Geográficas*, 41: 7-25 p.
- García, P. A., Valerio, V. C., López, M. C., Galván, G. A., Concha, D. A., 2006. Landslide inventory map of Guadalupe Range, north of the Mexico Basin. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana: número especial de geología urbana*, LVIII (2): 195-204.
- Gokceoglu, C., Aksoy, H., 1996. Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Engineering Geology* 44, 147–161.
- González, de V. L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. 715 p.
- GTZ y Equipo Regional de Competencias sobre Gestión del Riesgo y Cambio Climático; (2008) Marco Conceptual Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Lima, Perú. 1pp.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinalli, M., Reichenbach, P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31, 181–216.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago. *Boletín No. 45*, p. 7-29.
- Hauser, A., 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. *Boletín N° 49*. Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Highland L. M., Bobrowsky P., 2008. *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. United States Geological Survey, Reston, Virginia. 129 pp
- Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*. Rotterdam: Balkema, 685–90
- Hutchinson J.N. (1988). "Morphology and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology". *Fifth International Symposium on landslides, Lausanne*, pp. 3-35.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Censo de Población y Vivienda 2010*.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Angangueo, Michoacán de Ocampo. Clave geoestadística 16005*. 9 pp.
- Jacoby, D., 2001. Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada de Ramón. *Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil*, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., Sharma, J., 2004. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology No. 75*, Elsevier, p. 251-262.
- Lara, M., Sepúlveda, S. 2008. *Remociones en Masa, Apuntes del Curso del año 2008*. Departamento de Geología, Universidad de Chile. 63 pp
- Lee, S., 2005. Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing 26 (7)*, 1477–1491.
- Lee, S., Choi, J. 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model: *INT. J. GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE VOL. 18, NO. 8, DECEMBER 2004*, 789–814.
- Lee, S., Min, K., 2001, Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea: *Environmental Geology*, v. 40, pp. 1095–1113.
- Lugo, H. J., 1989. *Diccionario Geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 337 pp

- Lugo, H. J., Vázquez, C. M., Melgarejo, P. G., García, J. F., Matías, R. G., 2001. Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla. *Ciencias y desarrollo*, 27(157): 24-33.
- Lugo, H. J., Zamorano, O. J., Capra, L., Inbar., M., Alcántara, A. I., 2005. Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: causas y efectos, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2): 212-228.
- Nagarajan, R., Roy, A., Vinod, K.R., Mukherjee, A., Khire, M.V., 2000, Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 58, pp. 275–287.
- Naranjo, J.A., Varela, J., 1996. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47*.
- Pachauri, A.K., Gupta, P.V., Chander, R., 1998, Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas: *Environmental Geology*, v. 36, pp. 325–334.
- Pathak, S., Nilsen, B., 2004. Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan condition. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* No. 63, p. 25-32.
- Pierson, T.C.; Costa, J.E., 1987. A rheological classification of subaerial sedimentwater flows. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, vol.7, p. 1-12.
- Popescu, M.E., 2002. Landslide Causal Factors and Landslide Remedial Options. Keynote Lecture, *Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infra-Structures*, Singapore, p. 61-81.
- Prieto, C., 1985. Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. *Geología y prevención de riesgos por inundaciones*, Instituto Geológico y Minero de España, p. 117-192.
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder. 1997. Predicting soil erosion by water. U.S. Department of Agriculture, *Agricultural Research Service, Agriculture Handbook*. 703 pp.
- República Dominicana (2002). Ley Nº 147-02 Sobre Gestión de Riesgos. El Congreso Nacional en Nombre de la República. Santo Domingo, República Dominicana. 22 de Septiembre de 2002. 20 pp.
- Saaty T. (1980) "The Analytic Hierarchy Process". McGraw Hill.

- Saaty, T.L., Vargas, G.L., 2001. Models, Methods, Concepts, and Applications of the Analytic Hierarchy Process. Kluwer Academic Publisher, Boston.
- Saha, A.K., Gupta, R.P., Arora, M.K., 2002. GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing* 23 (2), 357–369.
- Salgado, R. M. 2005. Análisis integral del riesgo a deslizamientos e Inundaciones en la microcuenca del río Gila, Copán, Honduras. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica. 152 pp
- SE. Secretaría de Energía. Consejo de Recursos Mineros. 1999. Carta geológico-minera Anganguero E14-A26. ESCALA 1:50,000. ESTADOS DE MEXICO Y MICHOACAN. 55 pp.
- Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes. Second Edition, Oxford University Press, 451 p.
- SEMARNAT-UACH. 2002. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana, escala 1:1000000. México.
- Sepúlveda, S.A., 1998. Metodología para Evaluar el Peligro de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996). "Slope instability recognition, analysis and zonation". In Turner, K. y Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation; Transportation Research Board, Special Report 247*, National Academy Press, Washington DC, 129-177.
- Solís, E., 1995. Modelación matemática de corrientes de detritos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- SPP. Secretaría de Programación y Presupuesto. Información geodésica del territorio nacional en la SPP. Distrito Federal, México, SPP, 1981, p. 3.
- Suárez, J., 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia, 548 pp.
- Valtierra, J. G. 2007. Desarrollo de una herramienta computacional para el diagnóstico hidrológico de cuencas. Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis MAGIC. 137 pp.

- Vargas, L. (1990) "An overview of the Analytic Hierarchy Process (AHP)". European Journal of Operational Research, 48.
- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Weiss, A. D. 2000. Topographic Position and Landforms Analysis. The Nature Conservancy. Paper.
- Whalley, W.B., 1984. Slope Instability, rockfalls. D.,Brunsdon and D.B. Prior Ed., Wiley, Chichester, 217-256 p.
- Wilches-Chaux, G. (1989). Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis. Servicio Nacional de Aprendizaje. Popayán y SENA, Colombia.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion loss: A guide to conservation planning. Agricultural handbook 537. U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Yalcin, A., 2005. An investigation on Ardesen (Rize) region on the basis of landslide susceptibility. PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey. (in Turkish).
- Yalcin, A., 2008, GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations: Catena, v. 72, pp. 1–12.
- Yoshida, Y., Kuwano, J., Kuwano, R., 1991. Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength. Soil and Foundations, vol 31, No. 4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 187-193.

ANEXOS EN DIGITAL (CD).