

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LA CUENCA DEL RÍO MAMO, ESTADO VARGAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Lic. Batista de S., Juan Rafael
Para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, Mayo de 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) EN LA CUENCA DEL RÍO MAMO, ESTADO VARGAS

TUTOR ACADÉMICO: Msc. Orlando Cabrera

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Lic. Batista de S., Juan Rafael
Para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ciencias Geológicas

Caracas, Mayo de 2015



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERÍA
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



Comisión de
Estudios de
Postgrado

VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el **Trabajo Especial de Grado** presentado por el Lic. **Juan Rafael Batista De Sousa**, portador de la Cédula de Identidad No **10.295.141**, bajo el título **“Modelo de Susceptibilidad de Deslizamientos Mediante la Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la Cuenca del Río Mamo, Estado Vargas”**, a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de Magister en Ciencias Geológicas; dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día miércoles 29 de julio de 2015, a las 10:00 a.m., para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que este hizo en el salón Zuloaga de la Escuela de Geología, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió aprobarlo, por considerar, sin hacerse solidario con la ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para este veredicto, el Jurado, los profesores Orlando Cabrera, Carlos Monedero, y Mauricio Bermúdez estimaron que la obra examinada representa en su conjunto un aporte importante. Esta investigación presenta un enfoque novedoso dentro del área de geología de superficie para la determinación de áreas susceptibles de movimiento en masa usando Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los veintinueve (29) días del mes de julio del año 2015, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del Jurado el M.Sc. ~~Orlando Cabrera~~.


Dr. Mauricio Bermúdez
C.I. 12.378.742
(Facultad de Ingeniería UCV)




Dr. Carlos Monedero
C.I. 4.883.072
(CENAMB, UCV)

M.Sc. Orlando Cabrera (Tutor)
C.I. 12.115.769
(Facultad de Humanidades UCV)

DEDICATORIA

A mis padres José Batista (†) e Isaura de
Batista (†) quienes me dieron fe para llegar
hasta esta etapa de mi vida profesional y académica.
Al Prof. Luis Pérez Fernández (†) quien me sugirió
este tema de trabajo especial de grado y me orientó
al desarrollo del mismo en un principio.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, especialmente a la Escuela de Geología por la paciencia y apoyo que me han dado durante todos los años que curse la maestría y desarrolle mi trabajo de investigación, ¡no me puedo quejar!, al Instituto de Mecánica de Fluidos de la UCV por la información facilitada a este trabajo a través de los proyectos realizados con el CENAMB y colaboraciones personales (al Prof. François Courtel).

Por otra parte quiero agradecer sinceramente a mi tutor y amigo, el Profesor Orlando Cabrera, por ser tan paciente y a la vez diligente cuando mas necesite de el para poder finalizar esta investigación.

Al Centro de Estudios Integrales del Ambiente (CENAMB) de la UCV, especialmente a los Profesores: Carlos Monedero por la presión que me impuso en el buen sentido de la palabra para agilizar el desarrollo de esta investigación y a Xavier Bustos quien me ayudo con el chequeo realizado en campo y otras diligencia relacionadas con la finalización del trabajo. También quiero agradecer al resto de los compañeros que me animaron a terminar la investigación y a la institución por darme el tiempo y las facilidades necesarias para terminar cuando el tiempo de entrega se me empezó a agotar.

A todas las personas que apoyaron la presente investigación.

Batista de S., Juan Rafael

**MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE UN SIG EN LA CUENCA DEL RÍO MAMO. ESTADO
VARGAS.**

**Tutor Académico: Msc. Orlando Cabrera. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2015, 124 p.**

Palabras Claves: Deslizamiento de tierra, Sistema de Información Geográfica, Modelo de simulación, Cuenca, Desastre natural.

Resumen. Los deslizamientos de tierra o movimientos de masas son algunos de los eventos de mayor frecuencia e impacto en cuanto a los desastres que afectan a la tierra cada año, con este trabajo se ha querido ubicar aquellas áreas que sean propensas a deslizamientos y tratar de predecir su comportamiento a futuro. Con ese fin, para este proyecto se utilizaron un método semiprobabilístico y otro determinístico. El primero fue útil para lograr una zonificación de las áreas con mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, mediante la evaluación de los factores causantes o de ocurrencia y el inventario de dichos eventos, todo esto compilado mediante el procesamiento de los datos usando los Sistemas de Información Geográfica (SIG). El segundo método se obtuvo información sobre el grado de estabilidad de las laderas a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT), inventario de deslizamientos e inferencia de ciertos parámetros de precipitación utilizando un programa llamado SINMAP para calibrar la zonificación de las áreas de mayor susceptibilidad. Este último método también permite alcanzar un modelamiento del comportamiento de las laderas bajo diferentes regímenes de precipitación. En fin fue satisfactorio el empleo de estos métodos, se cumplieron gran parte de los objetivos. De haberse tenido información precisa de los parámetros de humedad, precipitación y suelos para la cuenca discriminados para los años de eventos anteriores se podría haber obtenido algo mas fidedigno en cuanto a estabilidad de taludes del área y también haberlo utilizado jugando con los rangos de precipitación para predecir deslizamientos futuros, sobre todo para determinar áreas con alta posibilidad de ocurrencia de deslizamientos ocultos o zonas de iniciación potencial de deslizamientos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.	iv
AGRADECIMIENTOS.	v
RESUMEN.	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.	ix
ÍNDICE DE TABLAS.	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
CAPÍTULO I.	1
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.	1
1.2. OBJETIVOS.	2
- General.	2
- Específicos.	2
CAPÍTULO II.	3
2.1. LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	3
2.1.1 LOCALIZACIÓN.	3
2.1.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.	5
2.2. UNIDADES GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.	9
2.3. FALLAS.	11
CAPÍTULO III.	13
3. MARCO REFERENCIAL.	13
3.1. ANTECEDENTES Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	13
CAPÍTULO IV.	21
4. MARCO TEÓRICO.	21
4.1. DEFINICIÓN DEL TERMINO A UTILIZAR (DESLIZAMIENTO).	21
4.2. FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES.	21
4.3. DEFINICIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS.	22
4.4. DEFINICIÓN DE MODELOS.	23
4.5. PREDICCIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA CON SIGS.	25
CAPÍTULO V.	26
5. METODOLOGÍA.	26
5.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	26
5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.	26
5.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES E INDICADORES.	28
5.4. PROCEDIMIENTO.	29

5.4.1. Determinación de la susceptibilidad a deslizamientos.	29
5.4.2. Estabilidad de taludes o laderas.	32
5.4.3. Modelo de predicción de deslizamientos.	35
5.5. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	36
5.6. LEVANTAMIENTO EN CAMPO DEL INVENTARIO ACTUAL DE DESLIZAMIENTOS.	36
5.7. ANÁLISIS DE DATOS.	39
 CAPÍTULO VI.	 40
FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO.	40
6.1. PRECIPITACIONES.	40
6.2. HIDROGRAFÍA.	47
6.3. GEOMORFOLOGÍA.	52
6.3.1. Características de la unidad de montaña.	55
6.4. GEOLOGÍA.	64
6.5. USO DE LA TIERRA.	66
6.6. COBERTURA VEGETAL.	71
 CAPÍTULO VII.	 75
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	75
7.1. GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD.	79
7.1.1. Factor de Certeza para la geomorfología.	79
7.1.2. Factor de certeza para la pendiente (en grados).	84
7.1.3. Factor de certeza para la Geología.	87
7.1.4. Factor de certeza para el Uso de la Tierra.	90
7.1.5. Factor de certeza para la Cobertura vegetal.	93
7.2. CATEGORÍAS (ÍNDICES) DE SUSCEPTIBILIDAD PARA LA CUEN.	96
7.3. MODELO DE ESTABILIDAD DE TALUDES.	101
7.4. VALIDACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD.	109
7.5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MODELOS CARTOG.	110
7.6. MAPA DE PREDICCIÓN DE DESLIZAMIENTOS.	116
 CAPÍTULO VIII.	 118
8. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES.	118
 BIBLIOGRAFÍA.	 121

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Área de estudio.	4
Figura 2. Área de estudio (Hoja 6747).	5
Figura 3. Configuración tectónica de la Cordillera de La Costa.	6
Figura 4. Composición litológica del área de estudio.	8
Figura 5. Mapa de unidades geológicas.	10
Figura 6. Mapa de fallas.	12
Figura 7. Metodología simplificada.	27
Figura 7.1. Procedimiento detallado para obtener Mapa de Susceptibilidad	28
Figura 8. Modelo de Estabilidad infinita de taludes.	33
Figura 9. Área de captación específica.	34
Figura 10. Mapa de Distribución de Deslizamientos.	38
Figura 11. Mapa de Isoyetas.	42
Figura 12. Mapa de Isoyetas (del POTEV).	44
Figura 13. Mapa de Isoyetas y distribución de deslizamientos.	46
Figura 14. Hidrografía de la Cuenca del Río Mamo.	48
Figura 15. Hidrografía de la Cuenca del Río Mamo y distribución de deslizamientos.	51
Figura 16. Mapa de Geomorfología.	54
Figura 17. Mapa de Modelo Digital del Terreno (MDT).	56
Figura 18. Mapa de Pendiente en grados.	58
Figura 19. Mapa de Geomorfología y distribución de movimientos en masa o deslizamientos.	61
Figura 20. Mapa de superficie de deslizamientos de acuerdo a la pendiente en grados.	63
Figura 21. Mapa de distribución de deslizamientos de acuerdo a la litología.	65
Figura 22. Uso de la Tierra.	68
Figura 23. Distribución de superficies de deslizamiento de acuerdo al uso de la tierra.	70
Figura 24. Mapa de Cobertura Vegetal.	72
Figura 25. Distribución de superficies de deslizamiento de acuerdo a la cobertura vegetal.	74
Figura 26. Distribución simplificada de deslizamientos para su uso con SINMAP.	78
Figura 27. Factor de Certeza para la Geomorfología de la cuenca.	83
Figura 28. Factor de Certeza para la Pendiente en grados.	86
Figura 29. Factor de certeza para la geología de la cuenca.	89
Figura 30. Factor de certeza para el uso de la tierra.	92
Figura 31. Factor de certeza para la cobertura vegetal.	95
Figura 32. Mapa de susceptibilidad final de la cuenca.	98
Figura 33. Calibración de parámetros de entrada de SINMAP.	102
Figura 34. Rellenado de espacios vacíos del MDT (pit-filled DEM).	103

Figura 35. Dirección de flujo (Flow Direction).	103
Figura 36. Pendiente (slope).	104
Figura 37. Área de captación (Contributing Area).	104
Figura 38. Índices de estabilidad de taludes” (Stability Index).	105
Figura 39. Saturación de humedad del suelo (Saturation).	106
Figura 40. Cuadro estadístico de índices de estabilidad.	107
Figura 41. Mapa de índices de estabilidad de taludes.	108
Figura 42. Coincidencia o similitudes entre Mapa de Susceptibilidad y Mapa de Índices de Estabilidad de Taludes de la Cuenca del Río Mamo.	112
Figura 43. Ejemplos de deslizamientos en zonas de distinta susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca del Río Mamo.	115

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Unidades geológicas.	9
Tabla 2. Variables indicadores.	29
Tabla 3. Factor de Certeza.	31
Tabla 4. Grados de estabilidad por Índice de Estabilidad (IS).	35
Tabla 5. Principales cursos de agua en la Cuenca del Río Mamo.	49
Tabla 6. Clasificación de Unidades Geomorfológicas.	53
Tabla 7. Valores de Pendiente de la Montaña.	57
Tabla 8. Superficies de deslizamientos con respecto a categorías de geomorfología.	79
Tabla 9. Factor de Certeza para la Geomorfología (Tipos de relieve).	81
Tabla 10. Superficies de deslizamientos con respecto a categorías de Pendiente en grados.	84
Tabla 11. Factor de Certeza para las categorías de Pendiente en grados.	84
Tabla 12. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de geología (unidades).	87
Tabla 13. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de uso de la tierra.	90
Tabla 14. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de cobertura vegetal.	93

ÍNDICE DE GRAFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Distribución puntual de los deslizamientos de acuerdo a la precipitación promedio anual de la cuenca.	45
Gráfico 2. Distribución puntual de los deslizamientos de acuerdo a la hidrografía de la cuenca.	52
Gráfico 3. Distribución de la pendiente en grados para la cuenca del Río Mamo.	57
Gráfico 4. Tipos de relieve para la cuenca del Río Mamo.	59
Gráfico 5. Distribución de deslizamientos y tipos de relieve para la cuenca del Río Mamo.	62
Gráfico 6. Distribución de deslizamientos y tipos de pendientes en grados para la cuenca del Río Mamo.	64
Gráfico 7. Distribución de deslizamientos en Unidades Geológicas y litología para la cuenca del Río Mamo.	66
Gráfico 8. Usos de la Tierra para la cuenca del Río Mamo.	66
Gráfico 9. Distribución de superficies de deslizamientos con respecto a usos de la tierra para la cuenca del Río Mamo.	69
Gráfico 10. Cobertura Vegetal para la cuenca del Río Mamo.	71
Gráfico 11. Distribución de superficies de deslizamientos con respecto a la cobertura vegetal para la cuenca del Río Mamo.	73
Gráfico 12. Distribución del F.C. para las categorías de Geomorfología.	82
Gráfico 13. Distribución del F.C. para las categorías de Pendientes en grados.	85
Gráfico 14. Distribución del F.C. para las categorías de geología.	88
Gráfico 15. Distribución del F.C. para las categorías de uso de la tierra.	91
Gráfico 16. Distribución del F.C. para las categorías de cobertura vegetal.	94
Gráfico 17. Categorías de Susceptibilidad para la Cuenca del Río Mamo.	99
Gráfico 18. Factores significativos en la susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca del Río Mamo.	101
Gráfico 19. Porcentaje de los índices de estabilidad de taludes para la Cuenca del Río Mamo.	109

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación constituye una aplicación de algoritmos automatizados y semiautomatizados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección Espacial (TE), para obtener un modelo de predicción de deslizamientos. Con el fin de elaborar este modelo primero se establecieron unos factores de ocurrencia que permiten determinar la susceptibilidad del área a los deslizamientos o movimientos en masa, se calcula el índice de estabilidad de laderas a partir de un modelo digital del terreno, esto aunado a un fenómeno temporal como precipitaciones medias y máximas, es lo que va a permitir predecir las áreas mas proclives a sufrir deslizamientos. Esta investigación esta compuesta por ocho capítulos estructurados de la siguiente manera: I) Introducción del trabajo, planteamiento de la investigación y los objetivos; II) Localización y marco geológico regional; III) Un marco referencial; IV) Marco Teórico; V) Metodología; VI) Factores condicionantes y detonantes de movimientos en masa para el área de estudio; VII) Análisis de resultados; VIII) Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En cuanto a los desastres que afectan a las comunidades cada año, los deslizamientos de tierra o movimientos de masas son algunos de los de mayor frecuencia e impacto; de hecho luego de las inundaciones, huracanes y terremotos, son uno de los fenómenos que tienen mayor repercusión en nuestro planeta.

En Venezuela a partir de las fuertes precipitaciones ocasionadas por la tormenta que afectó a la costa norte entre los días 14 y 16 de diciembre de 1999, se desencadenaron deslizamientos en las pendientes escarpadas de la Serranía del Litoral Central, de igual manera las fuertes lluvias ocasionaron inundaciones y flujos detríticos que dañaron a comunidades costeras del Estado Vargas. Según el Inventario Nacional de

Riesgos Geológicos, existen registros entre el 15 y 18 de febrero del año 1951 que indican que en el pasado ocurrieron eventos de deslizamiento e inundaciones de similar magnitud en la misma zona (Singer *et. al.*, 1983). Debido a que se conocen casos de deslizamientos en la cuenca del río Mamo (Op. cit., 1983), pero no existen estudios sobre predicción de deslizamientos para dicha cuenca, por tal razón se pretende con este trabajo ubicar aquellas áreas que sean propensas a deslizamientos y tratar de predecir su comportamiento a futuro. Para llegar a ello, se posee información cartográfica detallada (1: 25.000 y 1: 5.000) fotografías aéreas e imágenes de satélite de distintos años y todo un cúmulo de información bibliográfica referida a estos procesos geodinámicos externos.

1.2. OBJETIVOS

- **General:** Determinar las áreas susceptibles a movimientos en masa mediante la aplicación de un modelo de predicción de deslizamientos en la cuenca del río Mamo mediante la integración de variables espacializadas con el uso de Sistema de Información Geográfica (SIG).

- **Específicos:**

- (a) Caracterizar ambientalmente la cuenca del río Mamo para la jerarquización de las variables determinantes en la activación de deslizamientos.
- (b) Aplicar un modelo predictivo para la estabilidad del terreno mediante la identificación de las zonas que manifiestan recurrencia en la activación de este tipo de eventos.
- (c) Elaborar la zonificación de la cuenca del río Mamo según los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.

CAPITULO II

2.1. LOCALIZACIÓN Y MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1.1. LOCALIZACIÓN

El área de estudio limita al norte con el Mar Caribe, al sur con los estados Aragua y Miranda, al este con las cuencas de las quebradas La Zorra y Tacagua también con el Distrito Capital, al oeste con las cuencas del río Uricao u Oricao y Chichiriviche, ver figuras 1 y 2. Comprende el municipio Vargas, parroquias Catia La Mar, Carayaca, y El Junko del Estado Vargas. La cuenca del río Mamo abarca una superficie de 144,6 Km². La misma pertenece a la Serranía del Litoral Central.

“El río Mamo nace en el Pico Geremba (El Palmar) a una altura de 2.210 msnm y recorre 38,4 km antes de descargar sus aguas al Mar Caribe justo en el Club de Mamo con una pendiente de fondo de 1,4%. Está formado por numerosos afluentes entre los que cabe destacar al Río Petaquire y a las quebradas Yaguara, El Piache y El Tigre” (COTEV, 2004), ver Figuras 1 y 2.

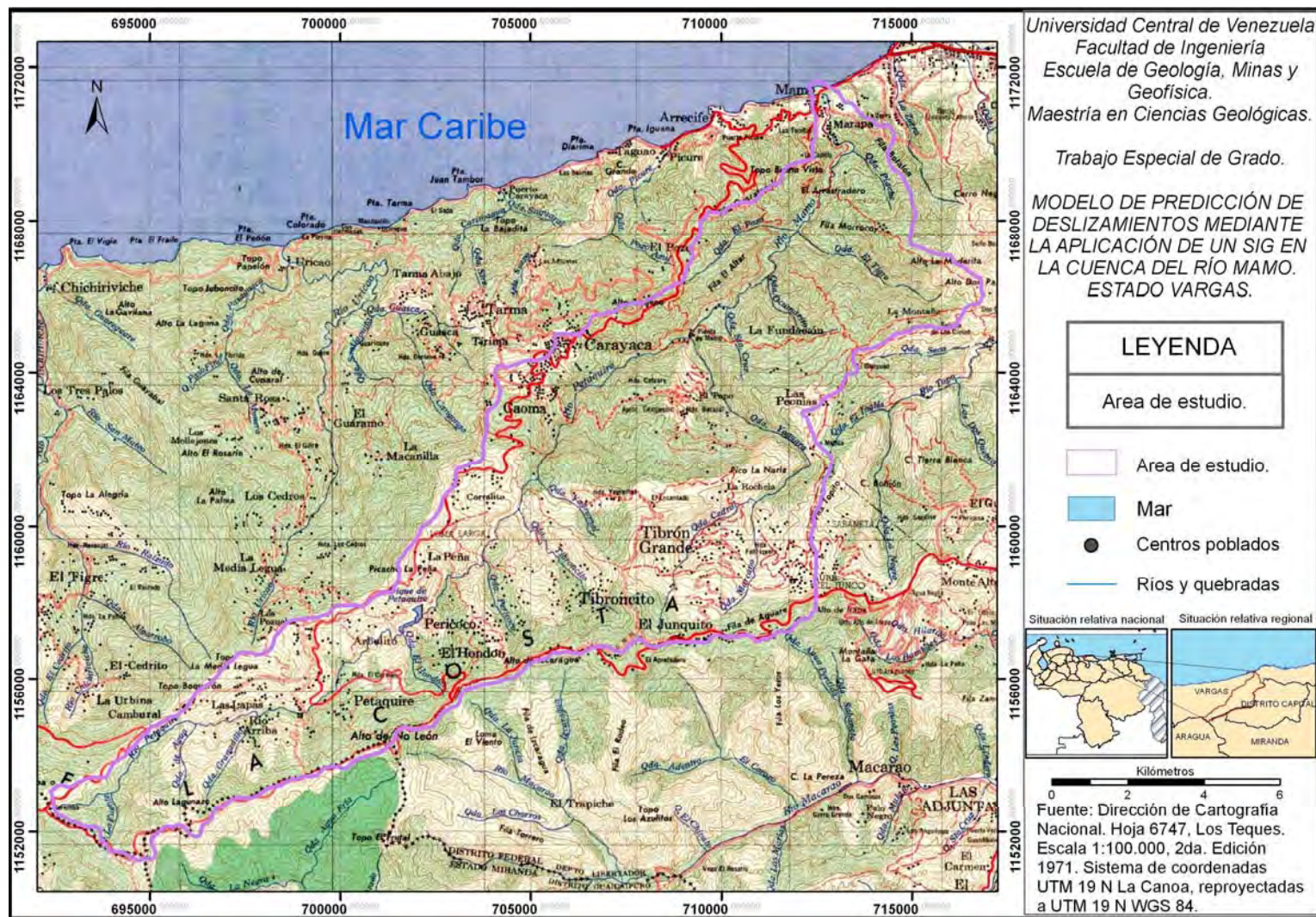


Figura 1. Área de estudio (Tomado de DIRECCIÓN DE CARTOGRAFÍA NACIONAL, 1971).

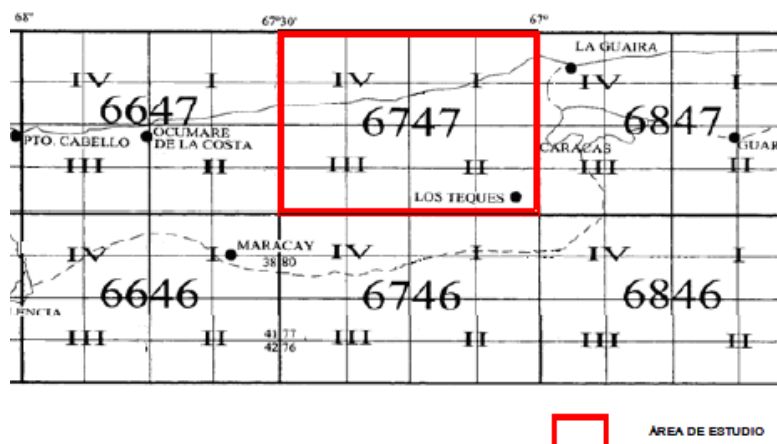


Figura 2. Área de estudio (hoja 6747)(Tomado de Urbani y Rodríguez, 2003).

2.1.2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El área a estudiar esta dentro del cinturón de deformación del sureste del Caribe y norte de Sudamérica localizado en el centro norte de Venezuela (Pérez, 2006). Según Schubert y Vivas (1993) "las Montañas del Caribe en el norte de Venezuela y Trinidad, se originaron como un complejo de arco de islas volcánicas, en una zona de subcorrimento durante el Mesozoico Medio, el cual fue posteriormente sobrecorrido por encima del límite norte de América del Sur (Escudo de Guayana), en una serie de capas tectónicas (nappes), durante el Terciario temprano a Medio".

Este cinturón de deformación ya mencionado "corresponde con la Cordillera de la Costa (La cual es parte de la Cordillera del Caribe, que también agrupa otros sistemas montañosos: la Serranía del Interior Central, Cordillera Araya-Paria y Serranía del Interior Oriental), la cual se formo por colisión y transpresión oblicua entre la Placa del Caribe con el margen norte de la Placa Suramericana (ver Figura 3), siendo la deformación diacrónica de oeste a este y localizándose aproximadamente en el centro norte de Venezuela en el Oligoceno" (Pérez, 2006). Esta cordillera es de origen aloctono, es decir, que son restos de microcontinentes, tal vez un antiguo complejo de arcos de islas volcánicas que fueron traídas por la Placa del Caribe desde el Oeste (Pindell y Kennan, 2001).

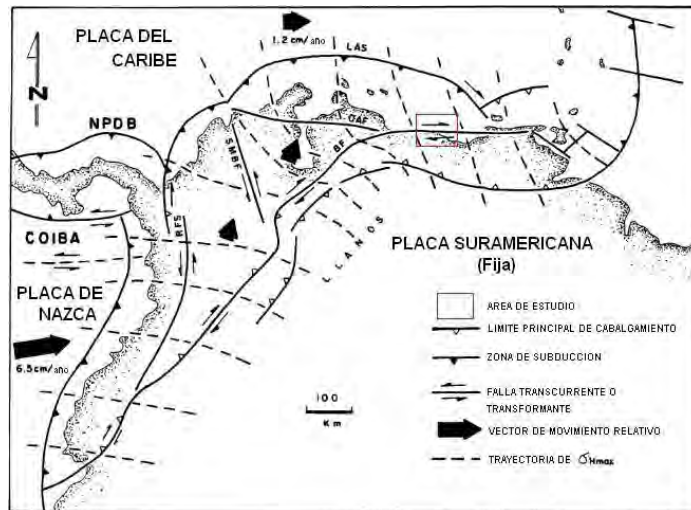


Figura 3. Configuración tectónica de la Cordillera de La Costa (Audemard, 2002)

“Producto de esto, la Cordillera de la Costa es litológica, petrológica y geocronológicamente muy heterogénea, formada por terrenos de afinidad oceánica, de margen continental y de basamento continental” (Avé Lallemant, 1997). Como consecuencia de la colisión y transpresión que fueron clave para el levantamiento de la Cordillera de la Costa, también ocurrió un intenso fallamiento donde destaca la falla de San Sebastián.

En la cuenca del Río Mamo abundan las rocas del Mesozoico, siendo la composición litológica predominante la de Esquistos, cuarzo albitico muscovítico clorítico, correspondiente al Esquisto de las Brisas (53,6% del área de estudio); luego le siguen en importancia el Mármol y las anfibolitas, correspondientes a la Formación Mármol de Antimano (28,13% del área de estudio); los Esquistos grafitosos y epidocita, correspondiente al Esquisto Tacagua (6,87% del área de estudio); los Esquistos y gneis cuarzo plagioclástico micáceo pertenecientes al Complejo San Julián (5,01% del área de estudio (Urbani y Rodríguez, 2003); y finalmente las Anfibolitas, correspondientes a las Anfibolitas de Nirgua (4,21 % del total del área de estudio). El resto son rocas ultramáficas (1,73 % del total del área de estudio) que son rocas mas antiguas del Pre –Mesozoico, las cuales se encuentran dispersas sin un nombre formal y que han sido relacionadas con la Asociación Metamórfica Ávila, y aluviones del Holoceno (0,45% del área de estudio) según la información generada por Sistemas de

Información Geográfica a partir de la información del Atlas geológico de la Cordillera de la Costa (Urbani y Rodríguez, 2003). Ver Figura 4.

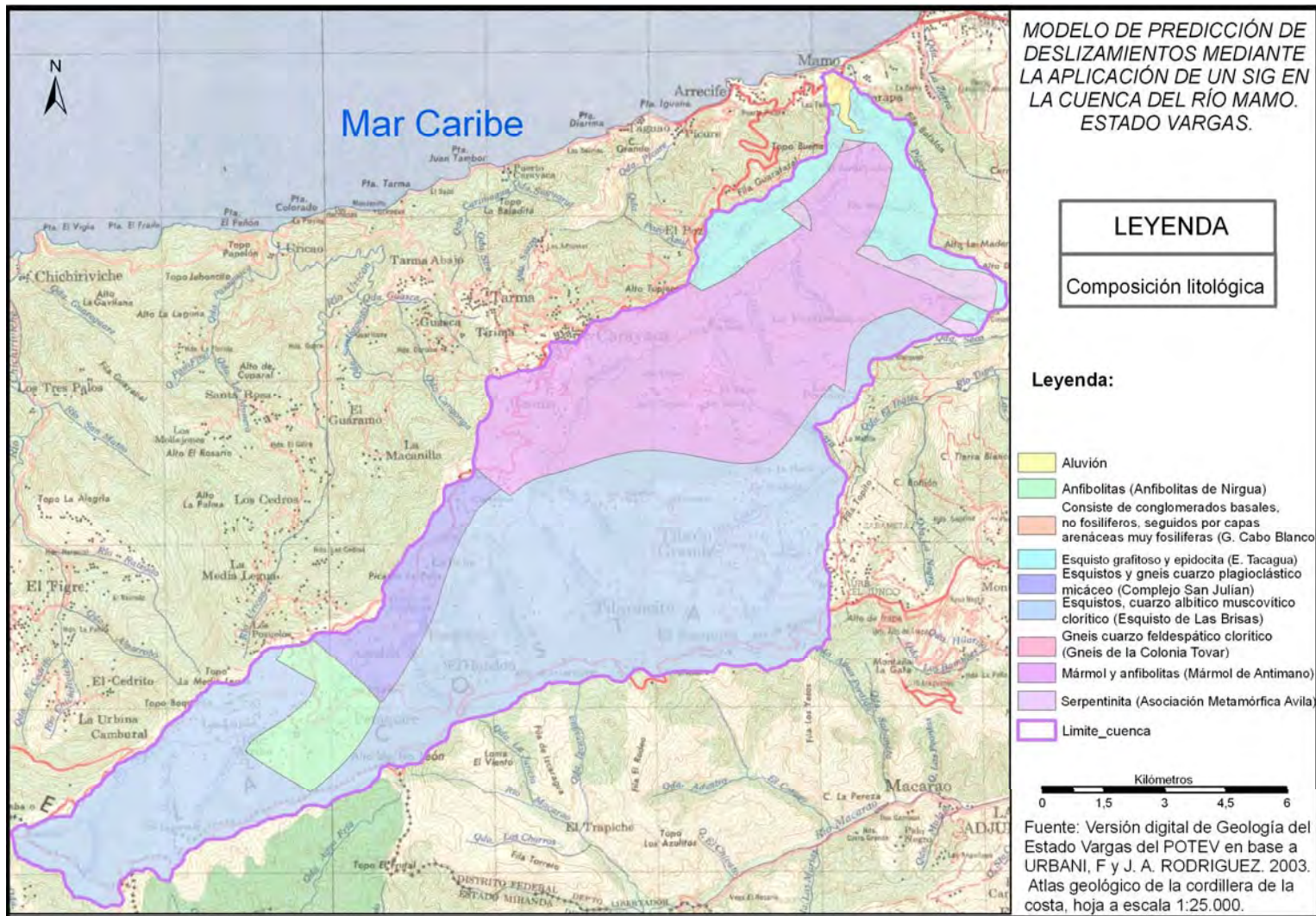


Figura 4. Composición litológica del área de estudio (Tomado de COTEV 2004 en base a Urbani y Rodríguez, 2003)

2.2. UNIDADES GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

En el área de estudio se presentan un conjunto de unidades de rocas ígneo-metamórficas y sedimentarias, las cuales están resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Unidades geológicas

TIPO DE ROCA	Unidades geológicas	Código de Unid. Geológica	ASOCIACIÓN	EDAD	COMPO LITOLOGICA	LÉXICO	Area (Km2)	Hectáreas
SEDIMENTARIA	Aluvión	Qal		HOLOCENO	Aluvión		0,7	65,2
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Anfibolita de Nirgua	CN	Asoc. Metamórfica de la Costa	MESOZOICO	Anfibolitas	Anfibolita Nirgua	6,1	608,5
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Complejo San Julián	ASJ	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Esquistos y gneis cuarzo plagioclástico micáceo	Complejo San Julian	7,2	724,8
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Esquistos de Las Brisas	CaB	Asoc. Metasedimentaria Caracas	MESOZOICO	Esquistos, cuarzo albítico muscovítico clorítico	Esquisto Las Brisas	77,5	7745,6
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Esquistos de Tacagua	CT	Asoc. Metamórfica de la Costa	MESOZOICO	Esquisto grafitoso y epidocita	Esquisto Tacagua	9,9	993,7
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Gneis de la Colonia Tovar	ACT	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Gneis cuarzo feldespático clorítico	Gneis Colonia Tovar	0,0	0,5
SEDIMENTARIAS	Grupo Cabo Blanco	GCB		PLIOCENO- PLEISTOCENO	Consiste de conglomerados basales, no fosilíferos, seguidos por capas arenáceas muy fosilíferas.		0,0	0,0
ÍGNEO-METAMÓRFICAS	Mármol de Antimano	CA	Asoc. Metamórfica de la Costa	MESOZOICO	Mármol y anfibolitas	Marmol Antimano	40,7	4066,2
ULTRAMAFICAS	Serpentinita	Sp	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Serpentina y otros filosilicatos afines		0,0	0,9
ULTRAMAFICAS	Serpentinita	Sp	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Serpentina y otros filosilicatos afines		0,1	9,8
ULTRAMAFICAS	Serpentinita	Sp	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Serpentina y otros filosilicatos afines		0,3	25,1
ULTRAMAFICAS	Serpentinita	Sp	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Serpentina y otros filosilicatos afines		1,9	190,2
ULTRAMAFICAS	Serpentinita	Sp	Asociación Metamórfica Avila	PRE-MESOZOICO	Serpentina y otros filosilicatos afines		0,2	24,7
						Total:	144,6	14455,3

Elaboración propia en base a Urbani y Rodríguez, 2003. Las abreviaturas del texto serán usadas a lo largo del texto.

En la Figura 5 se pueden observar en detalle las unidades geológicas del área de estudio.

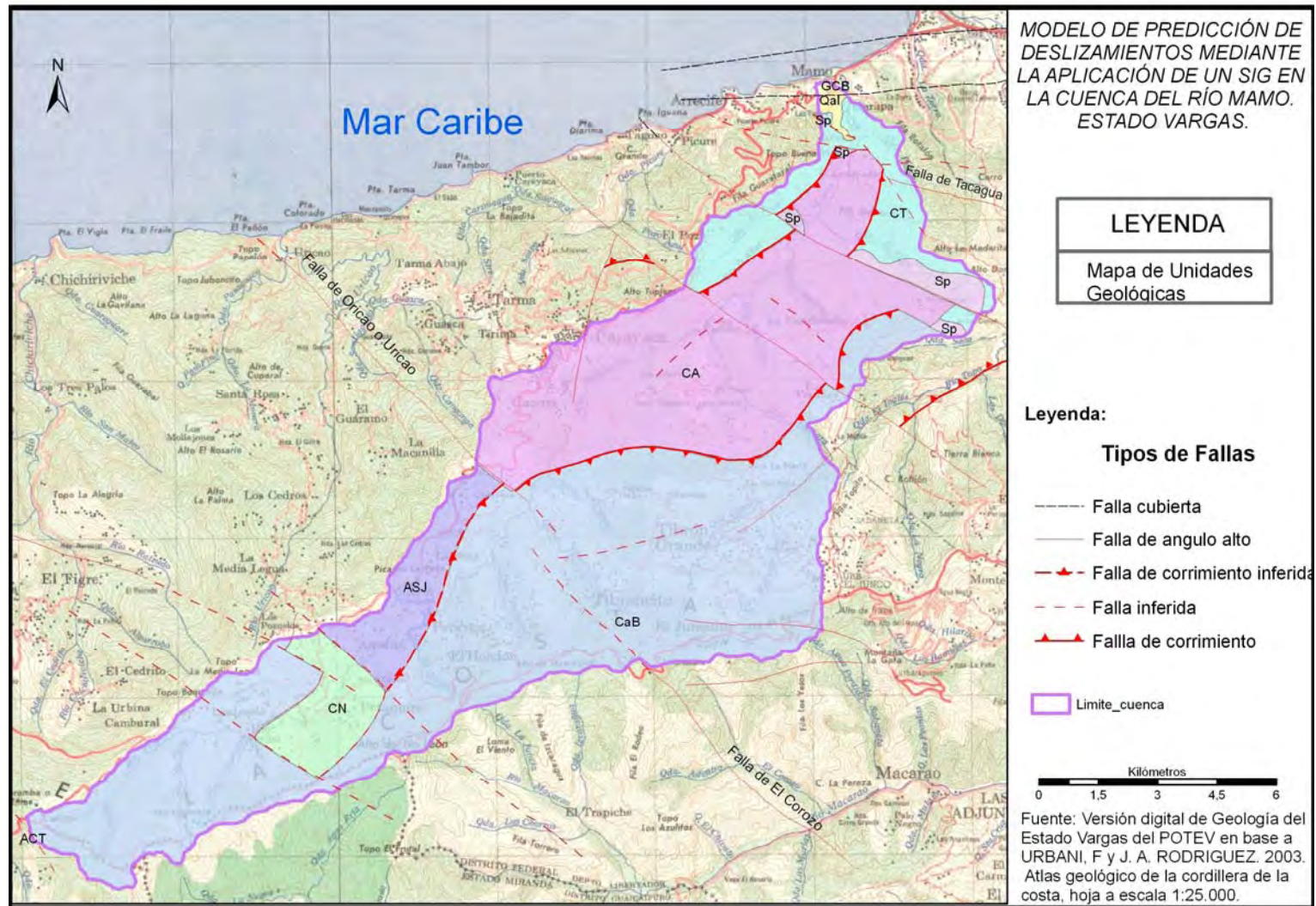


Figura 5. Mapa de unidades geológicas digital a partir de las hojas 6747 - I - NE, 6747 - I - SO, 6747 - I - SE, 6747 - II - NE, 6747 - II - NO (Tomado de COTEV 2004 en base a Urbani y Rodríguez, 2003)

2.3. FALLAS

De acuerdo a las hojas: 6747 - I- NE, 6747 - I- SO, 6747 - I - SE, 6747 - II - NE, 6747 - II - NO correspondientes al Proyecto “Cartografía Geológica del Estado Vargas” (Urbani y Rodríguez, 2003) en cuanto a la expresión espacial de las fallas presentes en la cartografía geológica dentro del área de estudio se puede decir que las principales tienen rumbo NO-SE y muy pocas tienen sentido SO-NE u O-E. En total se registró una longitud total de 197 km de fallas dentro o que atraviesan el área de estudio. En la Figura 6 se pueden observar en color rojo el sistema de fallas que atraviesan el área de estudio, las más gruesas indican fallas de corrimiento inferidas o no y las más delgadas indican fallas de ángulo alto.

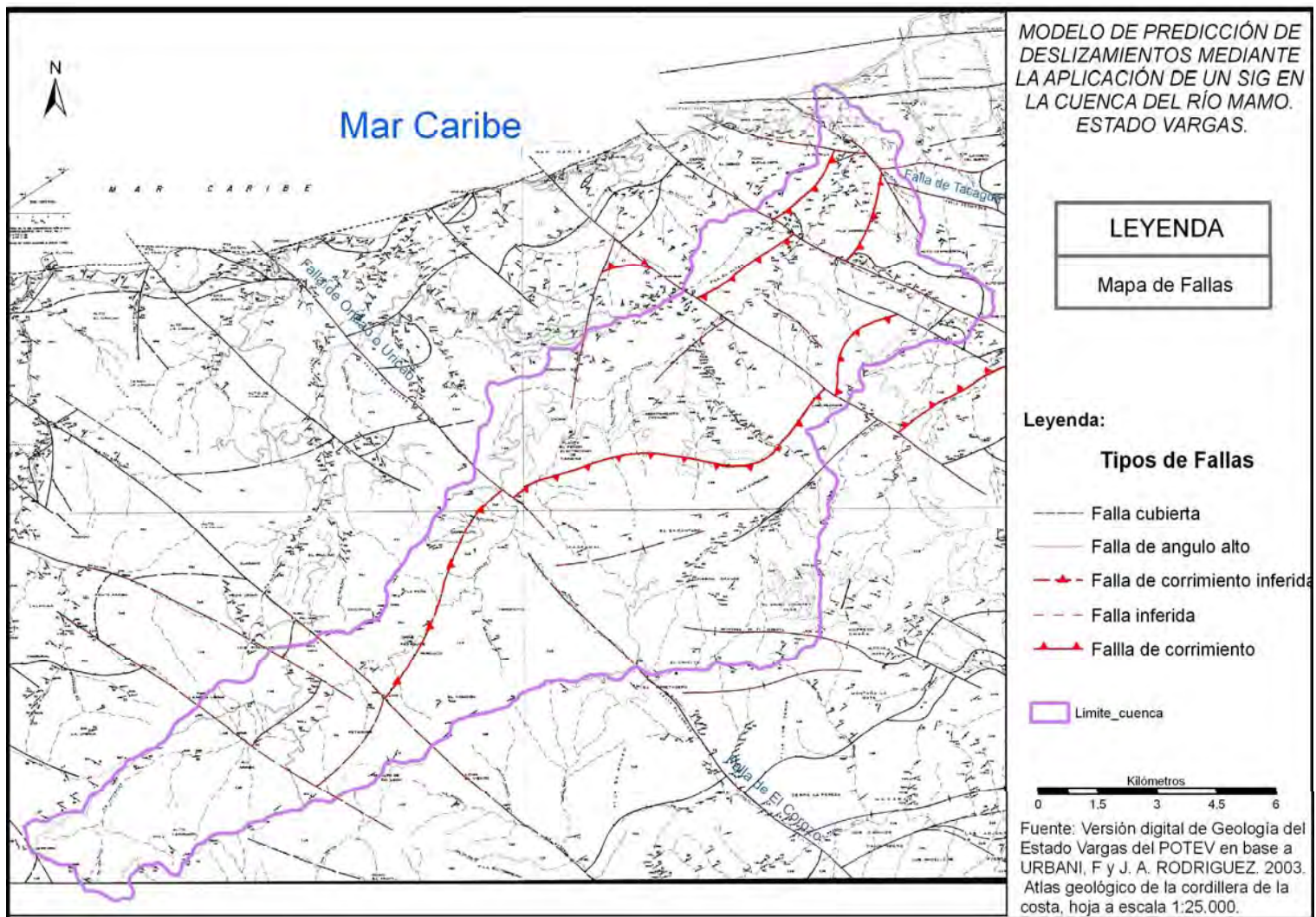


Figura 6. Mapa de fallas a partir de las hojas 6747 - I- NE, 6747 - I- SO, 6747 - I - SE, 6747 - II - NE, 6747 - II - NO (Urbani y Rodríguez, 2003)

CAPÍTULO III

3. MARCO REFERENCIAL

3.1.- ANTECEDENTES Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Como antecedente principal existe un trabajo realizado por el Centro de estudios Integrales del Ambiente (CENAMB) para el Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) financiado por CORPOVARGAS, titulado: “Auditoría de vulnerabilidad urbana en las cuencas de las La Zorra, Mamo y Tacagua. Edo Vargas” (Delgado, 2007). En dicho trabajo se hizo el levantamiento de la vulnerabilidad urbana de las edificaciones presentes en cada una de las cuencas mencionadas, el mismo fue un insumo para el “Proyecto Implementación de una Red de Estaciones Hidrometeorológicas y Simulación de Inundaciones Torrenciales en las Cuencas de Tacagua, Mamo y La Zorra, Edo. Vargas”. Ese proyecto fue llevado a cabo por el IMF desde el 2004 hasta el 2008, en el se definieron los eventos, inundaciones o aludes torrenciales, la intensidad y la probabilidad de ocurrencia de los mismos, indicados por los períodos de retorno estudiados 10, 100 y 500 años. Los mapas de amenaza de aludes torrenciales sirvieron para hacer la zonificación de la vulnerabilidad de las estructuras en cada una de las tres cuencas. Gracias a al trabajo de Auditoria de Vulnerabilidad se obtuvo información cartográfica detallada (1: 25.000 y 1: 5.000) de amenazas de aludes torrenciales y deslizamientos, vulnerabilidad de edificaciones, nivel de daño a edificaciones, curvas de nivel, modelo digital de elevación, fotografías aéreas e imágenes de satélite de distintos años y todo un cúmulo de información bibliográfica útiles para este trabajo de tesis que se pretende hacer.
- De las tesis revisadas en la Escuela de Geología no existe ninguna que abarque la cuenca del río Mamo, solo mencionan un tramo de la cuenca y tampoco hay ninguna donde hagan un inventario de deslizamientos. La que mejor se aproxima en cuanto al análisis que se hace de la propensión a

deslizamientos es la titulada: “Geología de una zona en la carretera El Junquito – río Mamo, Distrito Federal” (Arreaza, 1978). Hay varias tesis que abordan el tema de deslizamiento, pero hacia las cuencas de la parte central del litoral.

- En el estudio hecho por la Comisión Estatal de Ordenación Territorial de Vargas – COTEV (2004), titulado “Plan de ordenación del territorio del estado Vargas (POTEV)”, aunque se abarca todo el Estado Vargas, contiene información de variación interanual de precipitación, precipitación media mensual y precipitaciones extremas de la cuenca del río Mamo, datos de la cuenca (superficie, extensión, pendiente, tributarios, grado de intervención humana, información de aludes torrenciales (la misma información del IMF ya citado en este capítulo como primer antecedente) y grado de afectación de las cuencas del estado) (esta el dato para Mamo). En el Plan se hizo una mapa y análisis de movimientos en masa para el estado, el mismo lamentablemente, abarca hasta la cuenca de la Quebrada Tacagua, al este de esta no hay información.
- Hay un trabajo de la Autoridad Única de Área para el Estado Vargas (AUAEV, 2000) que fue hecho para la Presidencia de la República, el cual contiene información básica de la cuenca al igual que el del POTEV.

Como referencias documentales para esta investigación se tomaron aquellos que tienen que ver con el desarrollo de modelos de evaluación de amenazas, peligrosidad o de vulnerabilidad ante deslizamientos y metodologías para zonificar áreas susceptibles a deslizamientos. De ellos hay varios que han sido aplicados tanto en Venezuela como en otros países.

De los trabajos consultados hechos en Venezuela, existen tesis de grado y varios trabajos publicados en revistas científicas. El mas importante de ellos es la tesis de pregrado de la Escuela de Geología Titulada:

- “Actualización del mapa geotécnico y aplicación de una metodología de susceptibilidad a deslizamientos en el Distrito Metropolitano de Caracas” (Zamora, 2007). Esta tesis se hizo con un Sistema de Información Geográfica (SIG) que contiene información geológica – geotécnica del Distrito Metropolitano de Caracas, Sector Central, a partir del cual se obtuvo el mapa de orientación geotécnica. Se generó como resultado un mapa de susceptibilidad a movimiento de masa en el Distrito Metropolitano de Caracas; permitiendo así cuantificar el riesgo existente, en el cual se integra información sísmica, de humedad en los suelos, litología, clinometría (pendientes) y de precipitaciones diarias. El mismo se basó en la metodología modificada de Mora y Vahrson, donde se le da bastante peso a la variable sísmica.

- Otra tesis de pregrado revisada, pero esta vez de la Escuela de Geografía de la UCV fue la titulada: “Propuesta metodológica para la zonificación de áreas susceptibles ante la ocurrencia de deslizamientos. Quebrada Tacagua, Estado Vargas” (Becerra; Díaz, 2005). La tesis fue una propuesta metodológica de tipo espacial que permitió identificar mediante Sistemas de Información Geográfica áreas susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos en la cuenca de Qda. Tacagua. La investigación la desarrollaron sobre la base de un análisis estadístico de probabilidad basado en la correlación espacial entre variables y el inventario de deslizamientos para la generación del producto final: Mapa de zonificación de áreas susceptibles ante la ocurrencia de deslizamientos. Se obtiene a parte la probabilidad de ocurrencia para cada una de las variables consideradas en el modelo.
- En la tesis titulada “Propuesta metodológica para el análisis de la susceptibilidad a la amenaza a deslizamiento a través de herramientas geomáticas” (Entrena, 2005) es rescatable el concepto de susceptibilidad a amenaza de deslizamientos desde el punto de vista geomorfológico, allí se establece la susceptibilidad “Como la capacidad de ser alterada (un área a la

amenaza de deslizamiento) o modificada por los efectos de los procesos modeladores del paisaje”

- Hay casos de aplicación de métodos heurísticas como el artículo en una revista científica titulado: “Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un Sistema de Información Geográfica” (Cartaya *et al.*, 2006), debido a que se basan en el entendimiento de los procesos geomorfológicos que actúan sobre el terreno como algo empírico y subjetivo. La limitante del trabajo fue que no se llegó a elaborar un mapa de amenaza ya que ello implicaba trabajar con los detonantes como las precipitaciones y/o la sismicidad.

- En otra revista científica aplicaron un método heurístico, pero hicieron un mapa de amenaza como si fuese un método Determinístico (Montiel *et al.*, 2007). La metodología aplicada para la evaluación de la amenaza geomorfológica por inestabilidad de laderas se basó en el análisis de la geología, la geomorfología, uso de la tierra, pendiente y también precipitaciones, mediante la teledetección, inspección de campo, la toma y análisis litológico de muestras rocosas de la microcuenca. Para hacer el mapa de geomorfología se empleó la teledetección e inspección de campo (lo mismo se usó con el uso de la tierra) en el se representó las formas y procesos observables en el área de estudio.

De los trabajos consultados hechos fuera de Venezuela, existen tesis de maestría o de doctorado dignas de mención como:

- la tesis doctoral (Universidad de Cantabria, España) titulada “Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos debidos a procesos geomorfológicos” (Bonachea, 2006). En dicho trabajo se elaboran modelos de susceptibilidad, los cuales se transforman en modelos de peligrosidad teniendo en cuenta la frecuencia y magnitud de los deslizamientos en el pasado, posteriormente se acomete el inventario de los elementos expuestos y el análisis de los daños producidos en el pasado, que es lo que permite evaluar la vulnerabilidad de los

diferentes elementos. Por ultimo se elaboran los modelos de riesgo mediante la combinación de los modelos de peligrosidad y de vulnerabilidad de los diferentes tipos de elementos. Esta metodología conceptualmente se basa en la expresión de Varnes y UNDRO que considera el riesgo como función de la peligrosidad de los elementos expuestos y de su vulnerabilidad, algo parecido a la metodología de riesgos de la UNEP/GRID-Geneva (Nadim, *et al.*, 2006).

- Existe una tesis de maestría presentada ante el Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra (llamado ITC que es como se lo conoce de su nombre original (Internacional Training Centre for Aerial Survey) de los Países Bajos titulada “Predictive Modelling of Rainfall Induced Landslides in a Tropical Environment. A case of Ang Khang and Wang Chin Districts in Northern Thailand” (Namuwaya, 2006). En ella se hace un inventario de deslizamientos a través de fotografías aéreas y de imágenes de satélite en un área afectada de Tailandia, la cual es cartografiada, también se cartografían los factores causantes y condicionantes de deslizamientos como geología (litología), pendiente, aspecto del relieve, uso de la tierra, acumulación de flujo, profundidad del suelo, clase de textura, clasificación de suelos a nivel de subgrupos y la distancia medida desde la carretera en aquellas áreas donde los deslizamientos fueron causados por un evento de lluvias torrenciales. Todo con el objeto de construir un modelo para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en otras áreas que no hayan tenido deslizamientos recientes (como el caso de Ang Khang). El método aquí aplicado al igual que en la tesis doctoral es estadístico o probabilístico, solo que es un modelo de susceptibilidad y no de amenaza ya que no incorpora la dimensión temporal, lo cual a diferencia del trabajo anteriormente mencionado no se puede utilizar en los análisis de riesgo.
- Hay un artículo donde se zonifica la amenaza titulado “Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico - ILWIS, utilizando el método Mora & Varhrson, 1991” (Salazar, 2007), cuyos

factores desencadenantes de deslizamiento no solo son la litología, uso de la tierra y lluvias extremas, sino, también la sismicidad. Todo el trabajo se sistematizó utilizando el Sistema de Información Geográfica – ILWIS (Integrated Land and Water Information System) desarrollado por el Internacional Training Centre (ITC) de los Países Bajos (Holanda).

- También fue revisado un artículo donde no se aplica un modelo de predicción de deslizamientos, pero si se hace un análisis de metodologías aplicadas a deslizamientos a partir de consideraciones geomorfológicas, el mismo se titula: “Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra” (Aristizabal; Yokota, 2006).

Estas metodologías son de tres tipos:

- 1) Metodologías heurísticas.
- 2) Metodologías estadísticas.
- 3) Metodologías determinísticas

El tipo de metodología es determinada de acuerdo con el alcance del estudio. Según esta guía, los métodos heurísticos han sido ampliamente utilizados para evaluar la susceptibilidad. Los métodos determinísticos han sido restringidos para evaluar amenaza, mientras que los métodos estadísticos son utilizados para ambos casos de acuerdo con el desarrollo metodológico.

- El primer trabajo consultado para esta tesis sobre modelos de predicción de deslizamientos fue el de “Landslide Stability Analysis and Prediction Modeling with Landslide Occurrences on KOMPSAT EOC Imagery” (Chi et al., 2002), donde se aplicó una metodología para graficar el área de pendiente seguida por el cartografiado del índice de estabilidad con variables hidrológicas de un área de Corea del Sur afectada por fuertes lluvias en el verano de 1998 como lo es la localidad de Boeun, Corea del Sur (algo parecido a lo ocurrido en Vargas durante el mes de diciembre de 1999), luego se llevó a cabo el modelado de predicción basado en un modelo de probabilidad para las áreas cartografiadas como potencialmente deslizables

(de amenaza), en dicho trabajo se usaron imágenes de satélite del sensor KOMPSAT EOC para detectar la localización y ocurrencia de deslizamientos en escarpes, se usaron al menos dos tipos de Sistemas de Información Geográfica para el procesamiento de toda la información.

- Otro trabajo importante fue “Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos” (Cereceda, 2006). Allí se utilizan 2 métodos de análisis sobre deslizamientos: probabilístico y determinístico. El primero es útil para lograr una zonificación de las áreas de mayor susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos, mediante la evaluación de factores causantes y el inventario de dichos eventos todo esto compilado mediante el procesamiento de los datos utilizando Sistemas de Información Geográfica. El segundo método obtiene la información sobre el grado de estabilidad de las laderas, a partir de parámetros mecánicos e hidrológicos del suelo, así como también permite alcanzar un modelamiento de comportamiento de las laderas bajo diferentes regímenes de precipitación. Estos métodos fueron aplicados en Xiaojiang Watershed, China con resultados bastante positivos.
- Finalmente ahondando mas en métodos de análisis de predicción de deslizamientos de tipo probabilístico y determinísticos fue consultado el trabajo titulado “Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China” (Lan et al., 2004). En este trabajo se estableció que las relaciones cuantitativas entre los deslizamientos y los factores que afectan a los deslizamientos se pueden obtener por medio del Modelo de Factor de Certeza (FC), con el se pueden saber cuales son los factores causantes que mas afectan a la hora de un deslizamiento en una zona. Como los deslizamientos en Xiaojiang son causados y disparados por lluvias intensas. Se utilizo un prometedor enfoque para el modelado de la distribución espacial de las precipitaciones detonantes de deslizamientos donde se combinan el mecanismo del modelo de estabilidad infinita de taludes con un modelo hidrológico. Un modelo modificado a partir del cartografiado del

índice de estabilidad (Stability Index Mapping (SINMAP) se utilizó para la preparación de los mapas de susceptibilidad de deslizamientos para diferentes condiciones de precipitaciones a manera de predicción.

CAPÍTULO IV

4. MARCO TEÓRICO

4.1. DEFINICIÓN DEL TERMINO A UTILIZAR (DESLIZAMIENTO)

Según Cees van Westen (2005) “existen una amplia variedad de nombres para los procesos denudacionales donde el suelo o roca es desplazado a lo largo de la pendiente por fuerzas gravitacionales.

- movimientos en masa
- movimientos de pendiente,
- deslizamiento”

Siguiendo con van Westen este define **Deslizamiento como “movimiento de una masa de roca, debris o tierra, pendiente abajo”**.

En el presente trabajo también se va a hablar de taludes, ya que El término “talud” (“slope”) es un término utilizado tanto para pendientes naturales como artificiales. “A los taludes naturales se les conoce también como “Ladera”, mientras que un talud artificial puede ser en “corte” o en “lleno (relleno)” (Suárez, 1998). “Un talud estable puede convertirse en un “deslizamiento”. Los deslizamientos son “taludes inestables” (Suárez op cit.).

4.2. FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES

Los procesos de inestabilidad son el producto de la combinación de factores condicionantes o de susceptibilidad y de factores detonantes o de disparo.

Los factores condicionantes son los que siempre están presentes dentro del área, tales como la geomorfología local, hidrología, condiciones geológicas y vegetación (Zamora, 2007). Hay también quienes utilizan el termino “ocurrencia” en lugar de condicionantes (Cereceda, 2006)

Los factores detonantes, desencadenantes o de disparo son situaciones que pueden desestabilizar una ladera tal como sismos, intensas lluvias y la intervención antrópica (Montiel *et al.*, 2007).

4.3. DEFINICIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD DE DESLIZAMIENTOS

¿Por qué susceptibilidad y no amenaza?

La “amenaza” la definen algunos autores como “probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo dentro de un específico periodo de tiempo y en una determinada área” (Aristizabal y Yokota, 2006). Concretamente el término amenaza expresa la probabilidad de ocurrencia de un potencial fenómeno destructivo en espacio y tiempo definidos. En cambio la “susceptibilidad” es “posibilidad de que un fenómeno ocurra en un área de acuerdo con las condiciones locales del terreno” (Opt. cit).

Para generar un mapa de amenaza lo que se necesita es tener una serie de variables en un espacio, tales como: pendiente, relieve interno (hipsometría), distancia a cursos de agua, cobertura vegetal y litología, ponderarlas asignándoles pesos y con eso se obtiene la susceptibilidad. Los mapas que se obtengan de precipitación (para un tiempo determinado) se les va a asignar un peso (siempre menor al de la susceptibilidad cuando se reclasifique) ese peso mas el de la susceptibilidad es lo que va a dar la amenaza.

Debido a que la amenaza es el resultado de la susceptibilidad anteriormente calculada, más el efecto de un agente externo catalizador de la inestabilidad como la de la distribución promedio de la precipitación (Roa, 2007), es decir:

Susceptibilidad + efecto de agente externo catalizador (detonante) de inestabilidad = amenaza de deslizamiento. O lo que es igual $1 + 2 = 3$, donde:

1 = Susceptibilidad (factor pasivo)

2 = Precipitación, sismicidad, etc. (agente detonante o factor activo)

3 = Amenaza

En la tesis doctoral (Universidad de Cantabria, España) titulada “Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos debidos a procesos geomorfológicos” (Bonachea, 2006) el autor, ya citado en los antecedentes de esta investigación, expresa que los modelos de susceptibilidad expresan la propensión del terreno a sufrir un determinado tipo de

deslizamiento de una determinada magnitud, mientras que la amenaza (para el es sinónimo de peligro) se da cuando se formulan escenarios de frecuencia futura que transforman modelos de susceptibilidad en modelos espacios temporales (probabilidad) en los que cada píxel representa la probabilidad de ocurrencia de nuevos deslizamientos en un periodo dado.

Para este trabajo especial de grado se establece en los objetivos que se va a hacer un mapa de zonificación para la cuenca del río Mamo según los niveles de susceptibilidad a movimientos de masa o deslizamientos y finalmente al combinar este con el agente detonante (precipitación) es que se va a generar el modelo de predicción sin pretender llamarlo mapa de amenaza.

Para esta investigación aplica el concepto de susceptibilidad a deslizamientos manejado por Cereceda (2006) quien cita que la susceptibilidad de deslizamientos, diciendo que “la susceptibilidad es la potencialidad de un terreno o área a la ocurrencia de deslizamientos y no implica el aspecto temporal del fenómeno”. En una definición mas amplia susceptibilidad es *“la propensión y la predisposición de un Sistema Ambiental al cambio en su estructura y funcionamiento, que conlleva a un Desempeño inadecuado”* (Delgado, 2007). Según esta ultima definición un sistema ambiental propenso y predispuesto al cambio de su estructura seria una (s) ladera (s) montañosa (s) que por la acción de un agente detonante (lluvias extremas o sismos) tendría un desempeño inadecuado como un deslizamiento o convertirse en un talud inestable.

4.4. DEFINICIÓN DE MODELOS

Según el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua (DRAE) se denomina **modelo** a un “esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento” (Microsoft Encarta, 2007).

El modelo a desarrollar va a ser implementado mediante un **Sistema de Información Geográfica (SIG)**. Aunque existen muchas definiciones en referencia a los SIG, la más completa establece que estos consisten en un “Sistema integrado de software, hardware, información y personal que permite manipular, analizar y presentar información que está asociada con una localización” (BURROUGHS, 1988 citado por Pérez, 2006). Estos trabajan con el principio de superposición de coberturas digitales tanto en la visualización como en la interacción de variables (Pérez, 2006).

También se va a trabajar con teledetección para recopilar información sobre deslizamientos. La teledetección (TE) es una “técnica que permite la adquisición de datos de la superficie terrestre a partir de sensores localizados en plataformas aéreas o espaciales” (Lombardo y Rojas 2000, Pujadas 2003, citado por Pérez, 2006) (ejemplo: fotografías aéreas, imágenes de satélite y de radar).

Con el uso de ortofotoplanos, imágenes de satélite y recopilación bibliográfica se puede obtener un inventario de los movimientos de masa ocurridos en el área para un periodo de años que va desde 1951 hasta 2008. La combinación de esta información mas las capas de información de factores de ocurrencia (como geología, geomorfología, cobertura vegetal, etc.) y de variables obtenidas a través de un modelo digital del terreno (elevación, orientación y pendiente del talud) nos permiten a partir del calculo de un factor de certeza o bien de favorabilidad de cada una de ellas generar tablas de cada cobertura, la correlación de estas coberturas mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica nos va determinar las áreas mas susceptibles o no a deslizamientos. Al incorporarle a estas áreas la información ponderada de factores detonantes como precipitación media y máxima se podría tratar de predecir la ocurrencia de deslizamientos de acuerdo a umbrales de precipitación. Por otro lado con un modelo de estabilidad de taludes se va a tener mayor precisión en la determinación de las áreas susceptibles a deslizamientos. Al tener idea de donde podrían ocurrir deslizamientos, esta información se podría utilizar para la gestión de riesgos.

4.5. PREDICCIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA CON SIGS

Una predicción se hace mediante la combinación de las proyecciones de cada componente individual. Para este trabajo se piensa hacer una predicción a partir del cruce de los mapas de susceptibilidad y de la capa de lluvias excepcionales mensuales como las de 1951 y 1999.

CAPITULO V

5. METODOLOGÍA

5.1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio, se corresponde a una investigación de tipo exploratoria, debido a que se quiere establecer una metodología para la predicción y localización de futuros deslizamientos a partir de la combinación de otras metodologías ya conocidas. El área a trabajar, cuenca del río Mamo, es un sitio donde se han hecho estudios poco detallados de estabilidad de taludes, pero no de susceptibilidad y menos de predicción de deslizamientos. Para este proyecto se trabajó con una combinación de metodología estadísticas y determinísticas. Las metodologías tipo estadístico como la probabilística, se usan para lograr una zonificación de las **áreas de mayor susceptibilidad** a la ocurrencia de deslizamientos, mediante la evaluación de factores causantes y el inventario de dichos eventos, todo esto compilado los datos utilizando SIG (Cereceda, 2006).

El modelo de susceptibilidad se hace combinando distintas coberturas de cartografía temática, mediante la aplicación de la función de probabilidad llamada factor de certeza (F.C.). Al obtener el mapa de susceptibilidad se compara con el mapa de estabilidad de taludes o laderas, el cual se genera a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT), y con el empleo del software SINMAP por su nombre en ingles: Stability Index Mapping (Pack *et. al.*, 2005). La estabilidad de taludes o laderas sirve para calibrar el mapa de susceptibilidad.

Luego de corregir la susceptibilidad con la estabilidad de taludes, se integra este producto con las lluvias extraordinarias de los años 1951 y 1999 para poder obtener el mapa de predicción de deslizamientos.

5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Se parte de una documentación de tipo bibliográfica y de campo, en la cual se sustenten los procedimientos a seguir según las metodologías preexistentes (estadísticas y determinísticas) ajustadas a la realidad y disponibilidad de información

del área, los pasos o etapas metodológicas necesarias para llevar a cabo la siguiente investigación son (ver Figura 7):

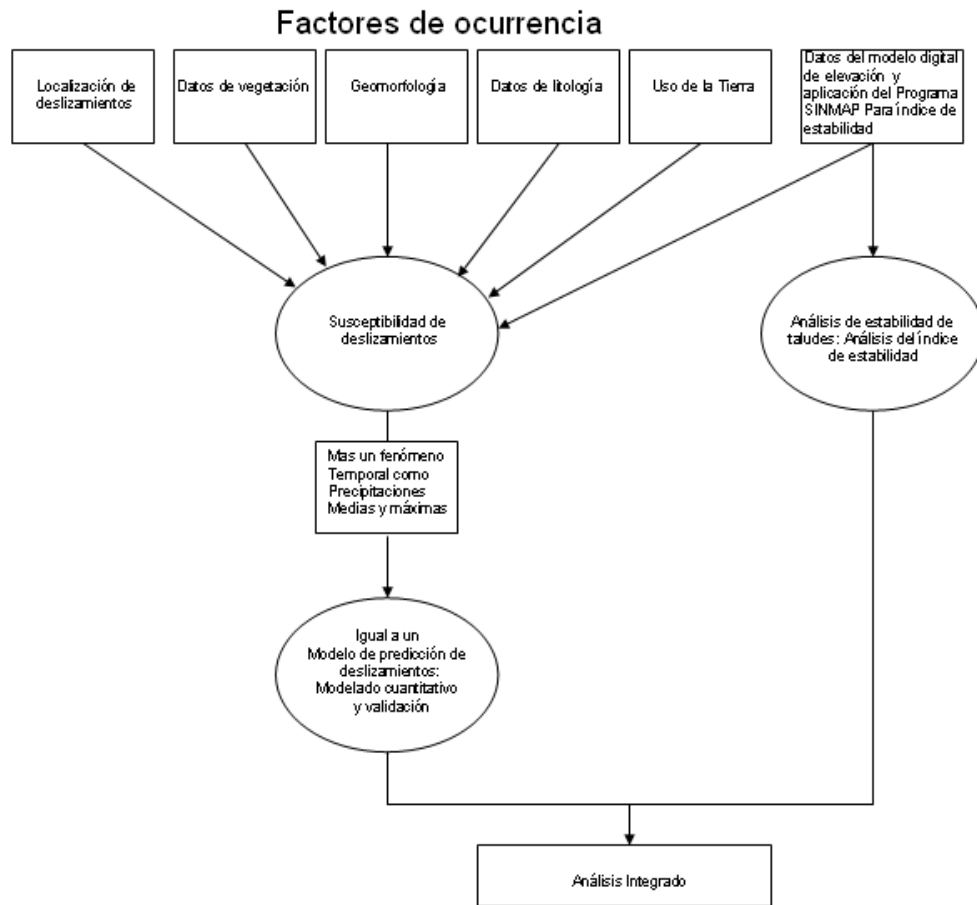


Figura 7. Metodología simplificada
(Elaboración propia 2010 en base a Chi et al., 2002).

a) Determinación de la susceptibilidad a deslizamientos.

En el siguiente flujograma (Figura 7.1) se puede ver como es el procedimiento para obtener la susceptibilidad de deslizamiento, la cual se explica de manera mas detallada en el punto 5.4.1 de este capítulo y se aplica tal cual en el Capítulo VII de este trabajo.

**Procedimiento para obtener mapa de susceptibilidad a deslizamientos
de la cuenca del Río Mamo**

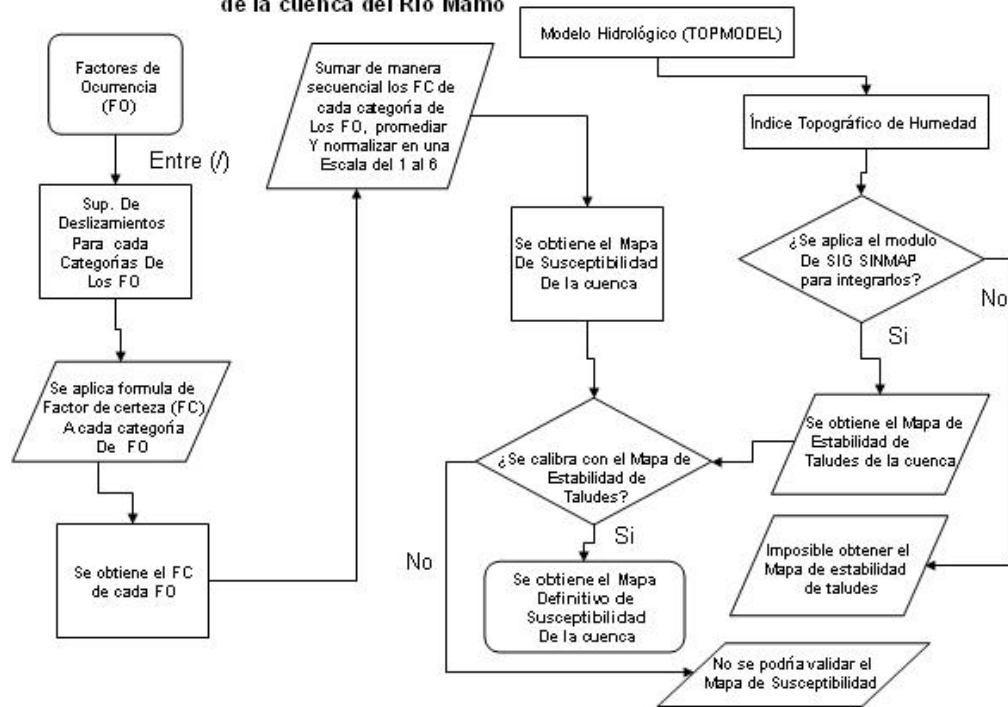


Figura 7.1 Procedimiento detallado para obtener Mapa de Susceptibilidad
(Elaboración propia 2015 en base a Cereceda, 2006).

- b) Determinación de la estabilidad de taludes o laderas.
- c) Generación del mapa de predicción de deslizamientos.

5.3. DEFINICIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

Las variables e indicadores se seleccionaron tomando en consideración los objetivos planteados para esta investigación, (Tabla 2):

Tabla 2. Variables indicadores

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	VARIABLES	SUBVARIABLES	INDICADORES	FUENTE DE INFORMACIÓN
Caracterizar ambientalmente la cuenca del Río Mamo para la jerarquización de las variables determinantes en la activación de deslizamientos. 2) Diseñar un modelo de distribución espacial de zonas estables e inestables mediante la identificación de las zonas que manifiesta recurrencia en la activación de este tipo de eventos. 3) Elaborar la zonificación de la cuenca del río Mamo según los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa.	Geología	Litología	Sup./unidad litológica (m ²).	Atlas geológico de la cordillera de la costa (Urbani, 2003)
	Clima	Precipitación	Total promedio mensual (mm) / año	POTEV
	Cobertura vegetal	Tipos de cobertura	Superficie/categoría (m ² /ha).	Interpretación de imágenes de satélite/POTEV
	Geomorfología	Unidades geomorfológicas	Superficie/categoría (m ² /ha).	Elaboración propia a partir de modelo digital de elevación.
	Topografía	Pendiente superficial	Grado de inclinación (%)	Elaboración propia a partir de modelo digital de elevación
	Uso de la Tierra	Tipos de Uso	Sup./unidad uso (m ²).	Interpretación de imágenes de satélite

5.4. PROCEDIMIENTO

Para poder cumplir con los objetivos de la investigación, se realizaron los siguientes procedimientos o pasos:

5.4.1. Determinación de la susceptibilidad a deslizamientos

Para determinar la susceptibilidad a deslizamientos se consideran tres aspectos:

- a) Inventario de los deslizamientos (se tienen mapas de FUNVISIS con ubicación de deslizamiento para los años 1951 y 1999 y un informe del IMF del 2009), ver Figura 7. Es importante señalar que la mayor parte de la información de deslizamientos localizados fue facilitada por FUNVISIS en formato “shape” de ArcGis para el proyecto: “Auditoría de vulnerabilidad urbana en las cuencas de La Zorra, Mamo y Tacagua. Edo Vargas” (Delgado, 2007), en el cual trabajo hace años, la fuente original de esos levantamientos es de André Singer (Singer *et. al.*, 1983). Se agregaron 8 deslizamientos o movimientos en masa fueron identificados utilizando técnicas de teledetección. El uso de teledetección que se hizo implica imágenes de satélite Landsat que van desde los años 1999, 2000, 2005 y 2006 (University of Maryland, 2009) para realizar resta de imágenes o cambio de detección de uso con el propósito poder identificar en que sectores de la cuenca hubo deslizamientos durante 1999 y posterior a ese año.
- b) Topografía de la zona de estudio (a partir de las curvas de nivel del área de estudio se obtiene el Modelo Digital del Terreno ó MDT). Del MDT se obtiene a la vez la orientación de los taludes y la pendiente en porcentaje del área expresada, ver Figura 7.
- c) Análisis de los **factores de ocurrencia** (litología, geomorfología, cobertura vegetal y uso de la tierra), ver Figura 7.

Para el análisis de la susceptibilidad de los deslizamientos se utiliza el método del factor de certeza (F.C.) “que incluye el cálculo de un factor de seguridad (FS)”. El cual se compone de:

- **Factor de certeza.**

El modelo del factor de certeza es una función de probabilidades que se emplea en el manejo de la combinación de los diversos parámetros o factores de ocurrencia que actúan en un deslizamiento. El factor de certeza (F.C.) según Cereceda (2006) se calcula de la siguiente manera.

$$F.C. = \frac{PPa - PPs}{PPa * (1 - PPs)} \quad \text{Si: } PPa \text{ mayor o igual a } PPs$$

$$F.C. = \frac{PPa - PPs}{PPs * (1 - PPa)} \quad \text{Si: } PPa \text{ menor a } PPs$$

Donde:

PPa: Superficie probable de deslizamientos por cada factor de ocurrencia (es decir, cuantos km² o hectáreas de deslizamientos hay por cada tipo de litología, por tipo de pendiente, de vegetación, etc.), se menciona en la Figura 7.1.

PPs: número probable de superficie de deslizamientos en el área total de estudio.

Y, la probabilidad:

$$Ppa = \frac{\text{Área de deslizamientos por cada clase del factor de ocurrencia}}{\text{Área de cada clase de factor de ocurrencia}}$$

$$Pps = \frac{\text{Área total de deslizamientos por cada factor de ocurrencia}}{\text{Área total de la zona de estudio}}$$

El rango de valores del F.C. oscila de - 1 a 1; donde los valores que se aproximan a - 1, indican que existe menor probabilidad en la ocurrencia de deslizamientos; para los que se acercan a 0, incrementa la incertidumbre en la ocurrencia y cuando se aproximan a 1 aumenta la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento. La Tabla 3 muestra la clasificación de los peligros o en función al F.C.

Tabla 3. Factor de Certeza

Grado	Rango	Descripción	Clase de peligro
1	-1 a -0,5	Mínima certeza en la ocurrencia de un deslizamiento	Alta estabilidad
2	-0,5 a -0,05	Baja certeza en la ocurrencia de un deslizamiento	Mediana Estabilidad
3	-0,05 a 0,05	Incertidumbre Los valores de F.C. dentro de este rango representan un intervalo en el cual la certeza en la ocurrencia de deslizamientos no puede ser Expresado.	Incertidumbre
4	0,05 a 0,3	Baja certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Baja Inestabilidad
5	0,3 a 0,8	Mediana certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Mediana Inestabilidad
6	0,8 a 1	Alta certeza en la ocurrencia de un deslizamiento.	Alta inestabilidad

Fuente: Cereceda, 2006.

Los rangos finales de F.C. obtenidos al combinar los factores de ocurrencia permiten determinar la susceptibilidad de la cuenca, la cual se calibra después con el producto de SINMAP que es la estabilidad de taludes o laderas.

5.4.2. Estabilidad de taludes o laderas

Para determinar la estabilidad de los taludes o laderas, como insumo para calibrar el mapa de susceptibilidad, se procedió de la siguiente manera:

- a) “La estabilidad de taludes se basa principalmente en el concepto de Factor de seguridad (FS), donde el FS se define como la relación que existe entre la resistencia al corte del suelo o roca y los esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie de falla” (Pack, et al 1998 citado por Cereceda). Para este trabajo, el Factor de seguridad se calcula de manera automática mediante el modelo SINMAP, el cual es un software estadístico-matemático para ArcGis y ArcView, el cual como ya se mencionó se basa en el FS para poder conocer el grado de estabilidad de laderas.

Para calcular el grado de estabilidad de laderas, en base al factor de seguridad se necesita primero un Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes y un Modelo Hidrológico.

- b) El Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes se basa en el equilibrio de los componentes de gravedad con las fuerzas de fricción y cohesión sobre un plano paralelo a la superficie del talud (suelo). La influencia de los parámetros, para este modelo se da bajo la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{C' + \cos^2 \theta (1 - wr) \tan \phi}{\sin \theta \cos \theta}$$

Donde:

C es la cohesión adimensional

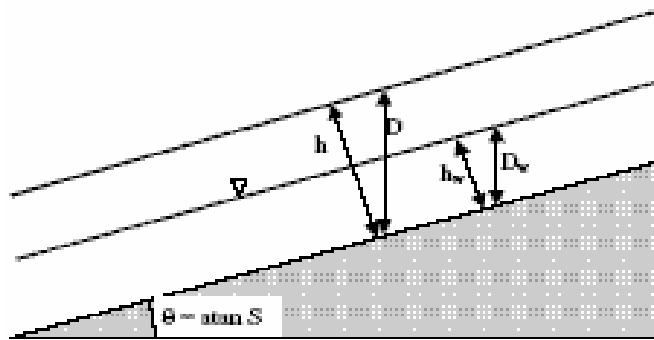
θ es el ángulo de pendiente

ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

w es la humedad relativa

r es la densidad del agua (ρ_w) entre densidad del suelo (ρ_s)

La Figura 8 representa de manera esquemática los elementos que intervienen en este modelo.



Fuente: Cereceda, 2006.

Donde:

θ = ángulo de la pendiente,

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo,

h = altura

w = humedad relativa o índice topográfico de humedad

D_w = altura vertical del nivel freático (ó densidad del agua)

D = espesor vertical del material (ó densidad del suelo)

C = cohesión del suelo

h_{psg} = peso del suelo

C_r = cohesión de las raíces

C_s = cohesión del suelo

r = densidad del agua (ρ_w) entre densidad del suelo (ρ_s)

Figura 8. Modelo de Estabilidad infinita de taludes.

- c) “El modelo hidrológico (TOPMODEL), el cual se fundamenta en la influencia que ejercen los parámetros hidrológicos sobre la estabilidad de un talud, a partir del índice topográfico de humedad (w); definido por la siguiente ecuación” (Pack, et al 1998 citado por Cereceda):

$$w = \min \left(\frac{Ra}{T \sin \theta}, 1 \right)$$

Donde:

a : área de captación específica

R : recarga

T : transmisividad

q : ángulo del talud

- d) Índice topográfico de humedad (w), entendido como el contenido de humedad del suelo varía de acuerdo a la topografía de la zona, la vegetación y el clima; por tanto, cuanto más grande sea el área expuesta a las lluvias y menor sea su

inclinación, la humedad será mayor. El modelo TOPMODEL considera lo siguiente: El área de captación que contribuye al flujo sigue las gradientes topográficas, en tanto que la descarga lateral en un punto esta en equilibrio con la recarga constante, y la transmisividad y el ángulo de talud rigen el comportamiento del área de captación, ver Figura 9.

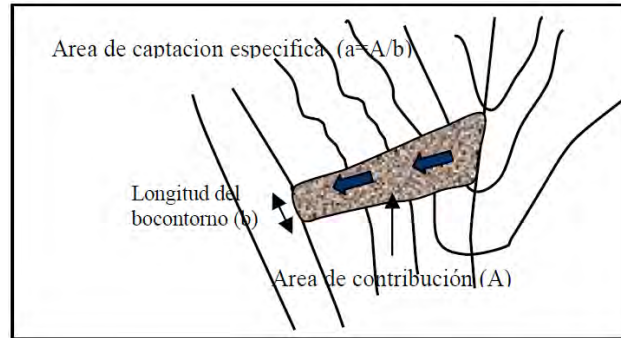


Figura 9. Área de captación específica
(Tomado de CERECEDA 2006)

- e) Modelo SINMAP (Stability Index MAPing), el cual un módulo para el Sistema de Información Geográfica ArcGis 9.0 que integra la computación y el mapeo del índice de estabilidad de taludes basándose sobre información geográfica, principalmente información de elevación digital, se basa en el Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes. El cálculo de FS se logra haciendo uso y reemplazando las ecuaciones de los modelos anteriores, se obtiene la siguiente relación:

$$Fs = \frac{C' + (1 - \text{Min}\left(\frac{q}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1\right) \frac{1}{r}) \cos^2 \theta \tan \phi}{(1 + \text{Min}\left(\frac{q}{T} \frac{a}{\sin \theta}, 1\right) \frac{1}{r}) \cos \theta \sin \theta}$$

Donde:

$C's = C/Z\gamma$; C es la cohesión

$r : \gamma_s/\gamma_w$; γ_s , densidad del suelo, (KN/m³).

γ_w , densidad del agua, (KN/m³).

Z: altura del cuerpo del deslizamiento, (m).

θ : ángulo de talud

Φ : ángulo de fricción interna

q: precipitación efectiva = precipitación

real- evaporación- infiltración

T: transmisividad (m²/h)

A: área de captación.

Entonces el índice de estabilidad (IS), está definido como la probabilidad de la estabilidad de un talud basado en la distribución de parámetros como C, f, q y T; es decir:

$$IS = Prob (Fs > 1)$$

La predicción de deslizamientos se logra mediante la combinación de la susceptibilidad de deslizamientos mas la estimación del grado de estabilidad de taludes o FS (partiendo del análisis del índice de estabilidad que se obtiene a partir de la combinación de los modelos de Estabilidad Infinita de Taludes y el Modelo Hidrológico) y un fenómeno temporal excepcional como precipitaciones máximas.

La Tabla 4 muestra los grados de estabilidad en función a los IS

Tabla 4. Grados de estabilidad por IS

IS	CLASES	ESTABILIDAD
IS > 1,5	1	Alta estabilidad
1,5 > IS > 1,25	2	Estabilidad media
1,25 > IS > 1,0	3	Baja estabilidad
1,0 > IS > 0,5	4	Baja Inestabilidad
0,5 > IS > 0,0	5	Inestabilidad media
IS = 0	6	Alta inestabilidad

Fuente: Cereceda, 2006.

5.4.3 Modelo de predicción de deslizamientos

La predicción de deslizamientos se obtendría mediante la combinación de la susceptibilidad de deslizamientos derivada de cálculos de Factor de Certeza mas la estimación del grado de estabilidad de taludes con SINMAP (partiendo del análisis del índice de estabilidad que se obtiene a partir de la combinación de los modelos de Estabilidad Infinita de Taludes y el Modelo Hidrológico) el cual es necesario para

calibrar la susceptibilidad de la cuenca y finalmente un fenómeno temporal excepcional como precipitaciones máximas.

Otra manera de calcularlo es que conociendo los umbrales de precipitación necesarios para producir deslizamientos (como los de los años 1951 y 1999) tomados de los estudios que se han hecho en Caracas y alrededores y teniendo el mapa de susceptibilidad de deslizamientos es posible tratar de predecir donde podrían ocurrir deslizamientos al haber “X” tipo de precipitación.

5.5. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Técnicas de teledetección e información documental y cartográfica. La recolección de datos tuvo distintas fuentes tales como: bibliográfica, estadística, cartográfica (Hoja 6747, “Los Teques” de la Dirección de Cartografía Nacional a escala 1:100.000, año 1971; Ortofotoplanos de Cartocentro a escala 1:25.000, Hojas: 6747 - I- NE, 6747 - I- SO, 6747 - I - SE, 6747 - II - NE, 6747 - II – NO. Año 1994; Imágenes Landsat a Escala 1:100.000, años 1999 y 2000; imagen Ikonos del año 2005) y de campo (salidas del 20/07/2011 y del 16/12/2013), específicamente verificación de deslizamientos a partir de la información dada por FUNVISIS. Toda esta información fue procesada y analizada con la ayuda de los software Erdas Imagine 8.7, ArcView GIS 3.2, SINMAP 2.0 y ArcGis 9.3.

5.6. LEVANTAMIENTO EN CAMPO DEL INVENTARIO ACTUAL DE DESLIZAMIENTOS

En el área de estudio existen alrededor de 1117 deslizamientos identificados, los cuales se concentran en su casi totalidad en la parte baja de la cuenca y una ínfima porción hacia la cuenca media. Ocupan una superficie total de 8,7 Km² u 873,55 hectáreas (ver Figura 10). La mayor parte de la información de deslizamientos localizados como ya se mencionó fue facilitada por FUNVISIS y se basaba en información levantada por André Singer. Para la cuenca ellos identificaron alrededor de 1110 movimientos de masa, de ellos hay 374 que son del año 1951 y 735 de 1999. Los 8 restantes deslizamientos fueron identificados utilizando técnicas de

teledetección. Los 8 nuevos deslizamientos identificados son del año 1999 y se localizan en la cuenca media. Posterior a esa fecha no se identificaron mas deslizamientos en áreas distintas a las levantadas por FUNVISIS, solo se observó en campo que se reactivaron varios deslizamientos en la parte baja de la cuenca posterior a 1999. También fue difícil llegar en campo a la mayoría de todos los puntos de deslizamiento debido a la falta de vías transitables por lo que hubo que chequearlos desde las partes más altas de la cuenca. Cabe mencionar que la parte alta de la cuenca es la única que no presenta deslizamientos significativos desde el punto de vista cartográfico, ya que la evidencia observada en campo muestra que solo fueron micro deslizamientos los que se dieron allí cuando ocurrió la vaguada de 1999.

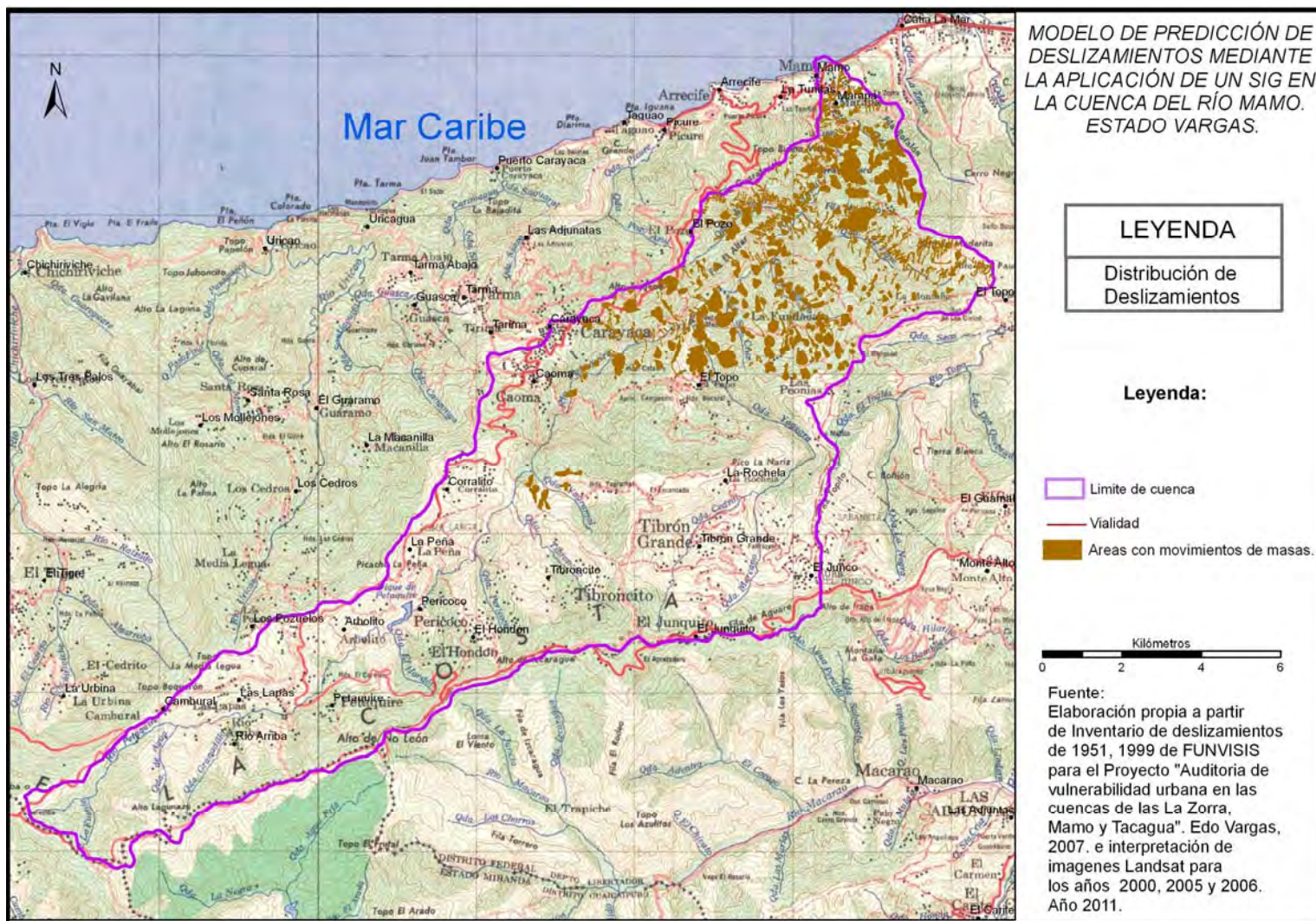


Figura 10. Mapa de Distribución de Deslizamientos. **Fuente:** Elaboración propia. 2011.

Existen 4 tipos de movimientos en masa dentro de la cuenca, los cuales son:

- 1) Deslizamientos.
- 2) Aludes torrenciales de ladera (flujos de detritos o debris flow).
- 3) Golpes de cuchara.
- 4) Debris slide (hay quienes los llaman deslizamientos traslacionales o también deslizamientos de derrubios).

5.7. ANÁLISIS DE DATOS

- Uso del Model builder de ArcGis para obtener las tablas (datos) correspondientes a cada cobertura temática y correlacionar los mismos para obtener el mapa de susceptibilidad.
- Uso del modulo SINMAP para obtener los índices de estabilidad de taludes.

CAPITULO VI

6. FACTORES CONDICIONANTES Y DETONANTES DE MOVIMIENTOS EN MASA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Los factores condicionantes son los que siempre están presentes dentro del área, tales como la geomorfología local, hidrología, condiciones geológicas y vegetación (Zamora, 2007).

Los factores detonantes (también conocidos por otros autores como de disparo o desencadenantes) son situaciones que pueden desestabilizar una ladera tales como sismos, intensas lluvias y la intervención antrópica (Montiel *et al.*, 2007).

Los factores de **Ocurrencia** o **Condicionantes** para este trabajo son: geología (litología y pendientes), geomorfología, cobertura vegetal y uso de la tierra.

Los factores **Detonantes o desencadenantes** son: las precipitaciones extraordinarias.

Posteriormente se describirán las características que presentan estos tipos de factores en general: geomorfología, pendiente, litología, precipitación, hidrografía, cobertura vegetal, y uso de la tierra

6.1. PRECIPITACIONES

Para esta parte del trabajo ha sido difícil conseguir información de precipitaciones que tengan una continuidad en el tiempo, por lo que se manejaron 2 fuentes, las cuales solo coinciden en los rangos mínimos y máximos. La precipitación se encuentra comprendidas en un promedio anual de 400 a 1.200 mm según la información del Boletín Geológico N° 21 (ZAMBRANO, 1970). Las menores precipitaciones se dan al norte en la parte costera como se observa en el mapa de Isoyetas (ver Figura 11) y en la parte suroeste de la cuenca cerca del centro poblado Los Pozuelos cercano a la naciente del Rio Oricao o Uricao, donde estas están en el orden de los 400 mm. Las mayores precipitaciones se dan en la parte centro-oeste de

la cuenca cerca del centro poblado Caoma donde están en el orden de los 1200 mm anuales. Estas diferencias se originan principalmente por factores orogénicos, que así lo posibilitan.

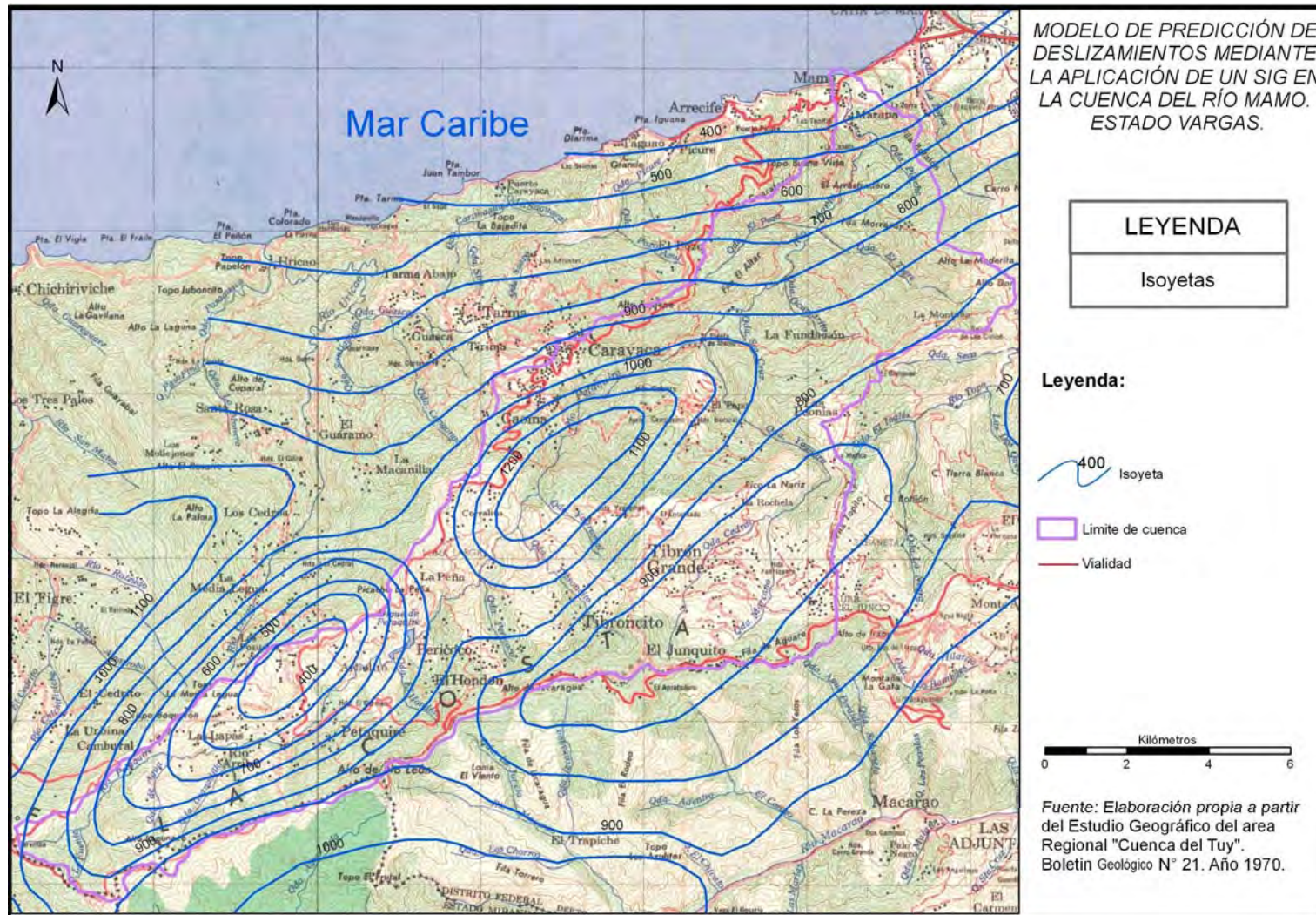


Figura 11. Mapa de Isoyetas. Fuente: Mapa de Isoyetas del " Estudio fisiográfico regional de la cuenca del Río Tuy". Boletín Geológico N° 21. Año 1970.

Según los datos de precipitación tomados del Plan de Ordenamiento Territorial del Estado Vargas (COTEV, 2004), los cuales son escasos en cuanto a estaciones hidrometeorológicas (apenas 17 estaciones), la interpolación genera un mapa con muchos vacíos (ver Figura 12), pero hay coincidencia con los rangos máximos y mínimos de precipitación como ya se menciono. La precipitación promedio anual va de 400 a 1200 mm, en este caso las menores precipitaciones (< 400 mm al año) solo se observan hacia la costa, hacia el centro de la cuenca están entre 800 y 900 mm al año y las mayores precipitaciones se observan en el extremo suroeste de la cuenca hacia el centro poblado de Cambural oscilando entre 1100 y 1200 mm.

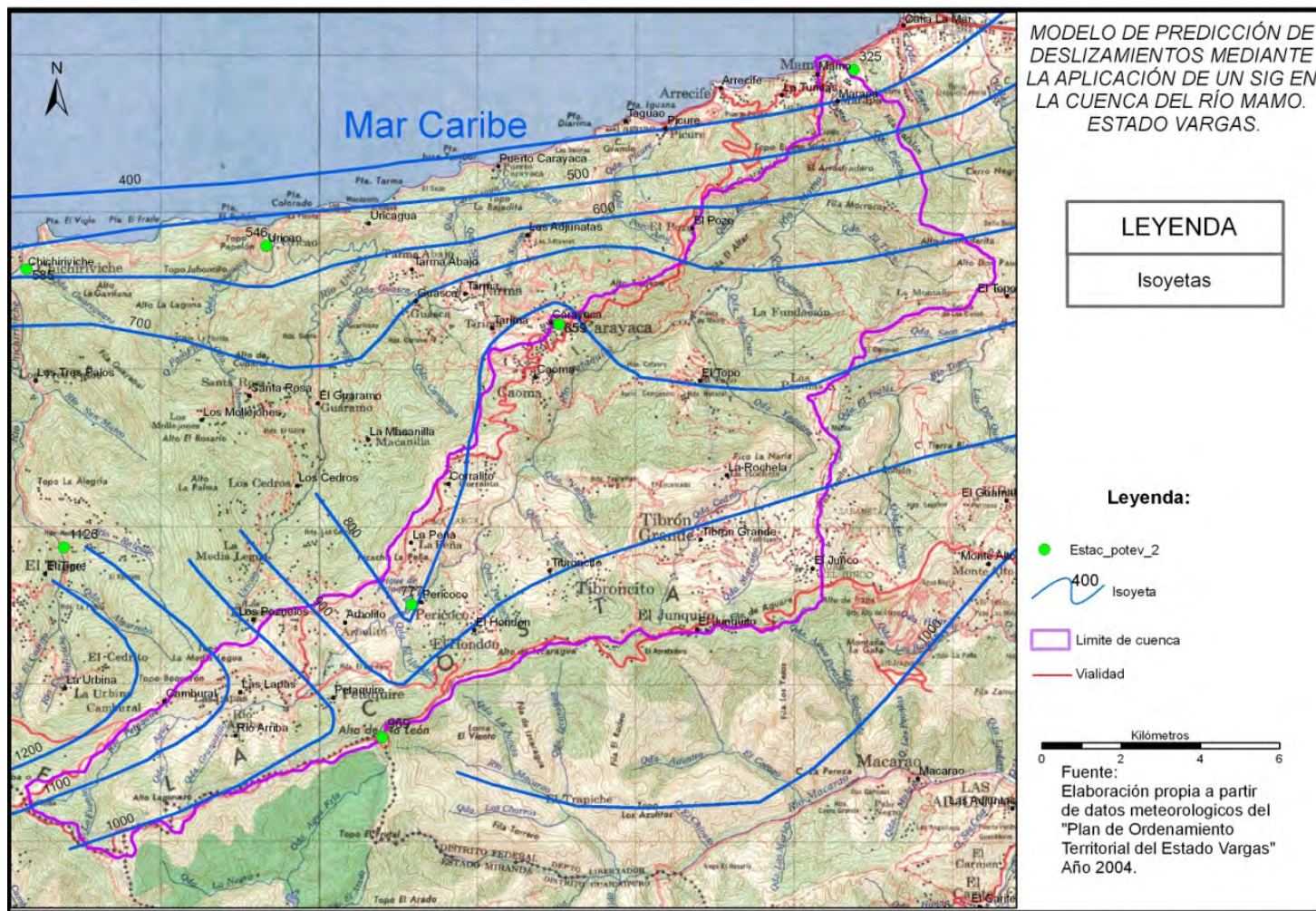


Figura 12. Mapa de Isoyetas. Fuente: Elaboración propia con los datos meteorológicos del "Plan de Ordenamiento Territorial del Estado Vargas" Año 2004.

Al asociar el mapa de precipitaciones con los puntos de localización de deslizamientos, se tiene que la mayoría de los deslizamientos (38%) se producen entre las isoyetas de 800 y 900 mm, ver Gráfico 1 y Figura 13.

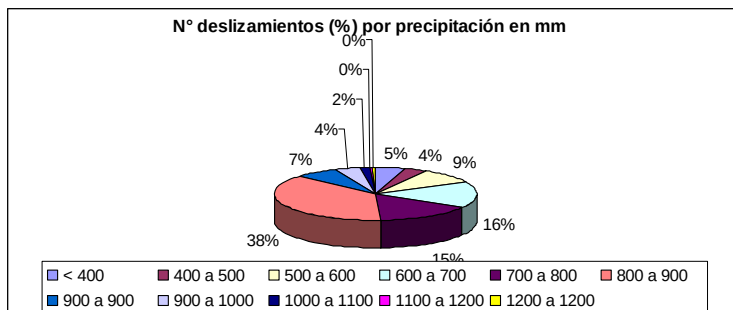


Gráfico 1. Distribución puntual de los deslizamientos de acuerdo a la precipitación promedio anual de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

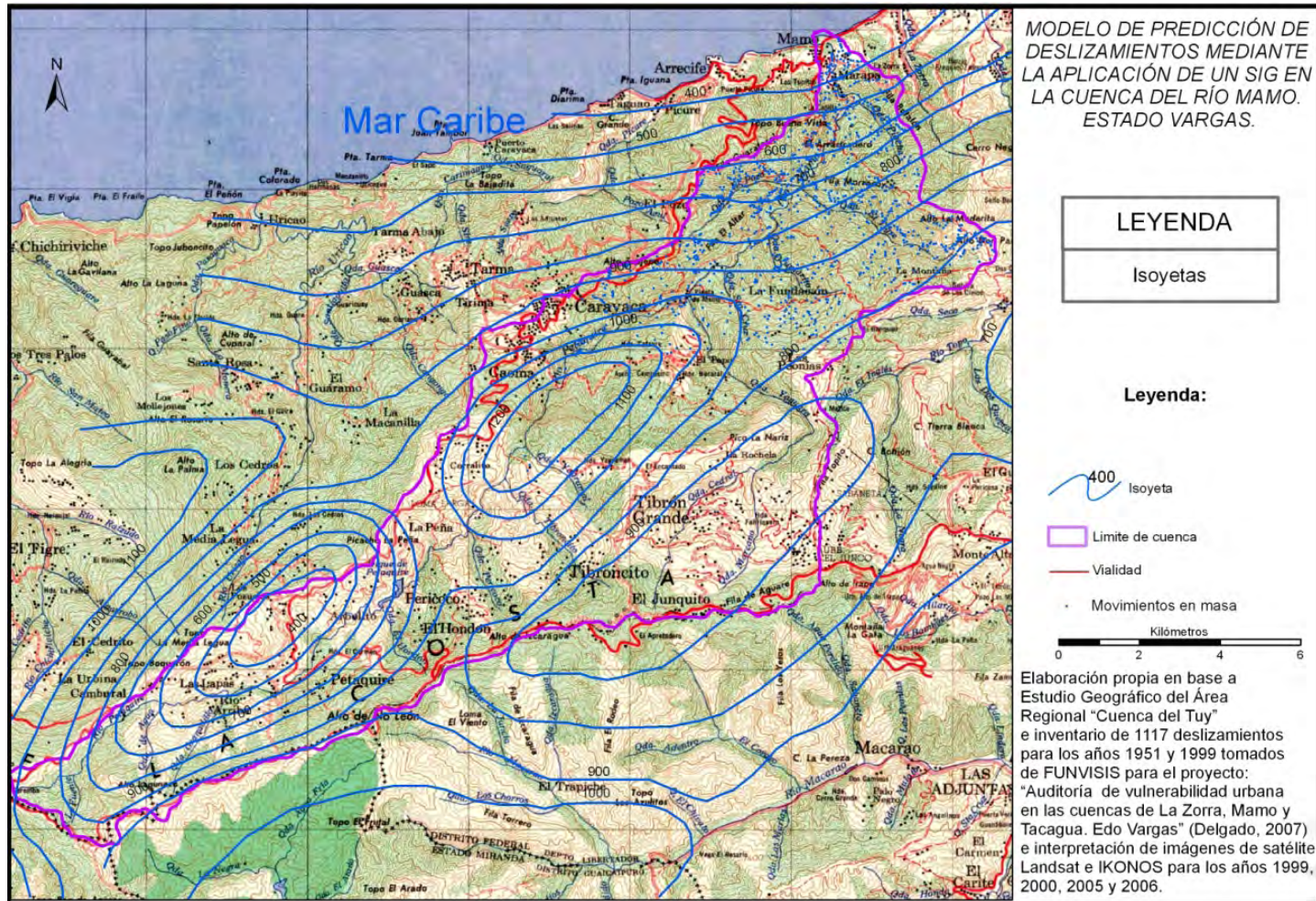


Figura 13. Mapa de Isoyetas y distribución de deslizamientos. Elaboración propia en base a Mapa de Isoyetas, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración: 2014.

6.2. HIDROGRAFÍA

Como se mencionó en el Capítulo II, el Río Mamo nace en el Pico Geremba (El Palmar) a una altura de 2.210 msnm. Según los cálculos realizados en ArcGis su longitud es de 30,33 Km. mas 4,47 Km. del Río Petaquire que es como se le llama en su parte alta suma un total de 34,80 Km. de longitud. Ver Tabla 5. Sus tributarios mas importantes son quebradas de régimen intermitente como: Quebrada Yaguara (7,26 Km. de longitud), Quebrada Ocumarito (4,29 Km.), Quebrada El Tigre (4,15 Km.) y Quebrada Tibroncito (4,13 Km.), el resto de las quebradas tienen una longitud inferior a 4 Km. Ver Figura 14 y Tabla 5.

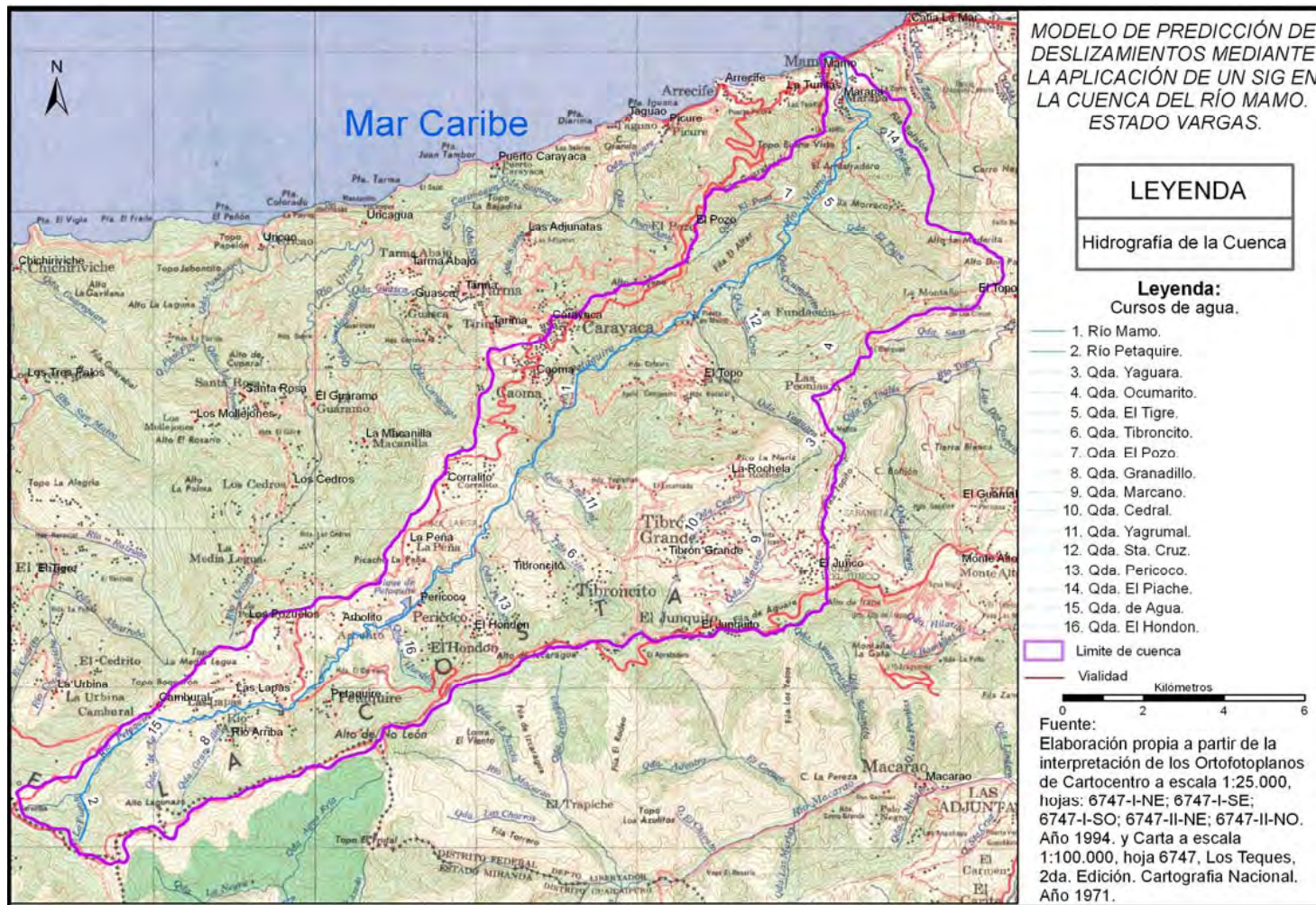


Figura 14. Hidrografía de la Cuenca del Río Mamo. Fuente: Carta a escala 1:100.000, hoja 6747, Los Teques, 2da. Edición. Cartografía Nacional. Año 1971.

Tabla 5. Principales cursos de agua en la Cuenca del Río Mamo.

ID	Nombre	Régimen	Longitud (Km.)
1	Río Mamo	Permanente	30,33
2	Río Petaquire	Permanente	4,47
3	Qda. Yaguara	Intermitente	7,26
4	Qda. Ocumarito	Intermitente	4,29
5	Qda. El Tigre	Intermitente	4,15
6	Qda. Tibroncito	Intermitente	4,13
7	Qda. El Pozo	Intermitente	3,65
8	Qda. Granadillo	Intermitente	3,01
9	Qda. Marcano	Intermitente	2,76
10	Qda. Cedral	Intermitente	2,75
11	Qda. Yagrumal	Intermitente	2,43
12	Qda. Sta. Cruz	Intermitente	2,35
13	Qda. Pericoco	Intermitente	2,29
14	Qda. El Piache	Intermitente	2,01
15	Qda. de Agua	Intermitente	1,92
16	Qda. El Hondon	Intermitente	2,71

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos hecho en ArcGis a partir del Mapa de Hidrografía de la cuenca del Río Mamo.

“El Río Mamo además de contar con la cuenca hidrográfica de mayor extensión, es el único río que ha sido objeto de aprovechamientos hidráulicos técnicamente programados; tal fue el caso del sistema hidroeléctrico de Mamo, implantado por la C.A. La Electricidad de Caracas al construir la presa de Petaquire para operar las centrales generadoras de electricidad en Petaquire, Caoma y Marapa a principios del siglo XX. Posteriormente, con la construcción de la Planta Tocoa, se concentró la generación energética y se construyeron líneas de transmisión con sus correspondientes caminos para mantenimiento que atraviesan por toda la cuenca. Más recientemente la cuenca fue objeto de nuevos análisis hidroeléctricos cuando la citada empresa proyectó un sistema de generación hidroeléctrica reversible, el cual se decidió no construir.

En cuanto al grado de intervención humana, presenta un notable grado de ocupación, tanto en las cumbres con caseríos como son Petaquire, Las Lapas, Tibroncito, Pericoco, Corralito y Río Arriba, además de extensas zonas pobladas en la divisoria sur como son El Apretadero, El Junquito, el Barrio Wilfredo Omaña, la Urbanización El Junko y Sabaneta (ver Figura 14). La ocupación urbana se torna más

obstructiva al acercarse a su desembocadura; a lo largo de unos 6 km del cauce principal del Río Mamo, en las riberas de los estrechos cauces de las quebradas afluentes y sobre las empinadas laderas marginales se han construido viviendas que se encuentran en precarias condiciones de estabilidad; como ejemplo están los barrios de El Piache, El Tigre, El Arrastrado y Marapa, para sólo mencionar algunos” (COTEV, 2004).

Si se asocian el mapa de hidrografía con los puntos de localización de deslizamientos, se tiene que la mayoría de los deslizamientos (25%) caen alrededor de la Quebrada El Tigre, un 22% cae paralelo al Río Mamo, un 17% en la parte baja del Río Mamo entre las quebradas El Pozo (13% de los deslizamientos), El Tigre y El Piache (6%) ver Gráfico 2 y Figura 15.

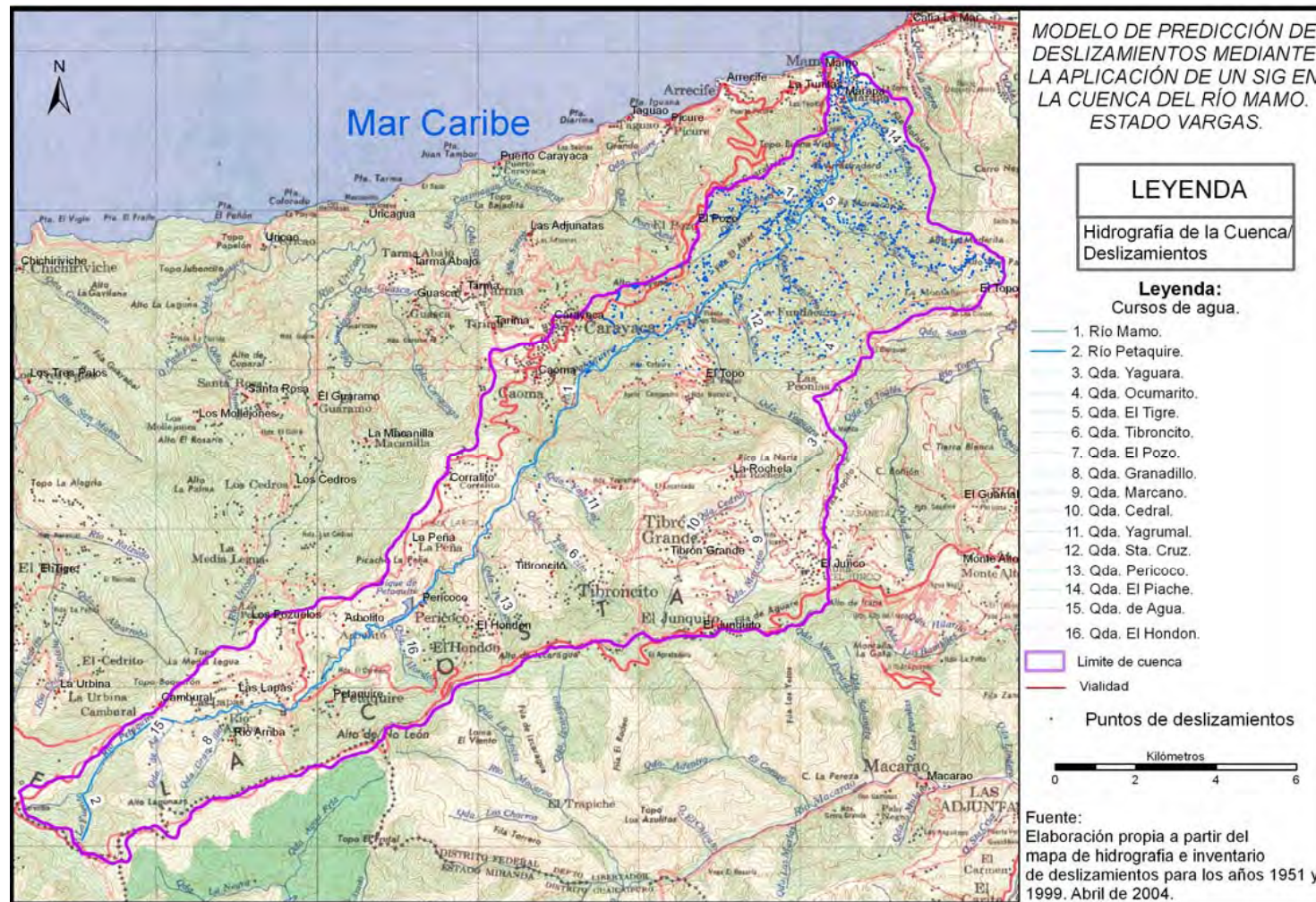


Figura 15. Hidrografía de la Cuenca del Río Mamo y distribución de deslizamientos. Fuente: Elaboración propia a partir de Mapa de Hidrografía, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración: 2014.

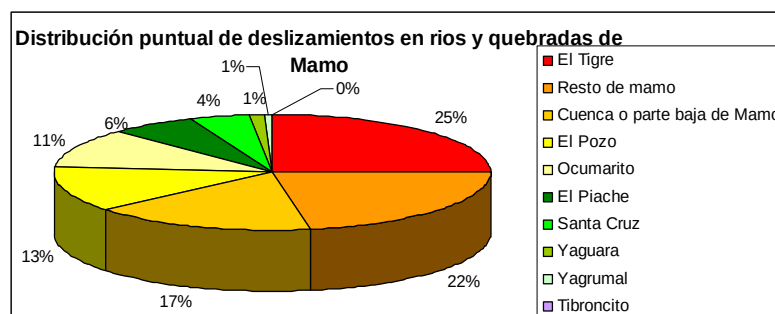


Gráfico 2. Distribución puntual de los deslizamientos de acuerdo a la hidrografía de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

6.3. GEOMORFOLOGÍA

Para lograr la unificación de la información y posteriormente esta pueda contribuir en la fase de análisis de la investigación, se presenta la caracterización de tipo físico-natural, a partir de las unidades geomorfológicas existente en el área en estudio.

En función de la escala de trabajo, se obtuvieron las unidades geomorfológicas, con base en la clasificación taxonómica por tipo de relieve que realizó ZINCK en 1974. Según este autor los tipos de relieves, son el eslabón intermedio entre tipos de paisajes y formas del terreno. Estas unidades pueden visualizarse entre una escala de trabajo comprendida desde 1:100.000 a 1:25.000.

Pero debido a la gran cantidad de polígonos generados y para fines prácticos de explicación de la información, se analizará las unidades por tipo de paisaje, siendo estas las siguientes: montaña, y el valle coluvio-aluvial. Tomando en consideración que por cada una de estas unidades se detalló el tipo de relieve hallado en el área en estudio, en la descripción geomorfológica se detalla este aspecto y el resultado se observa en el mapa de geomorfología. (Ver Tabla 6 y Figura 16)

Tabla 6.
Clasificación de Unidades Geomorfológicas

TIPO DE ESTRUCTURA GEOLÓGICA	PROVINCIA FISIOGRAFICA	REGIÓN NATURAL	TIPO DE PAISAJE	TIPO DE RELIEVE	FORMAS DE TERRENO	SUPERFICIE	
						Km ²	%
Sistema montañoso del Caribe	Cordillera de la Costa	Serranía del Litoral Central	Montaña de ablación (139 Km ²)	• Topos	No es visible, en la escala de trabajo empleada.	0,6	0,4
				• Laderas cóncavas		88,0	60,9
				• Laderas convexas		50,8	35,1
				• Laderas Lineales		0	0
			Valle coluvio-aluvial (5,2 Km ²)	• Valles incisos	Bancos de arenas y gravas	5,2	3,6

Elaboración propia en base a Mapa de Geomorfología. **Fuente:** Elaboración propia con base en la “Definición del Ambiente Geomorfológico con fines de descripción de Suelos”. Alfred Zinck, 1974.

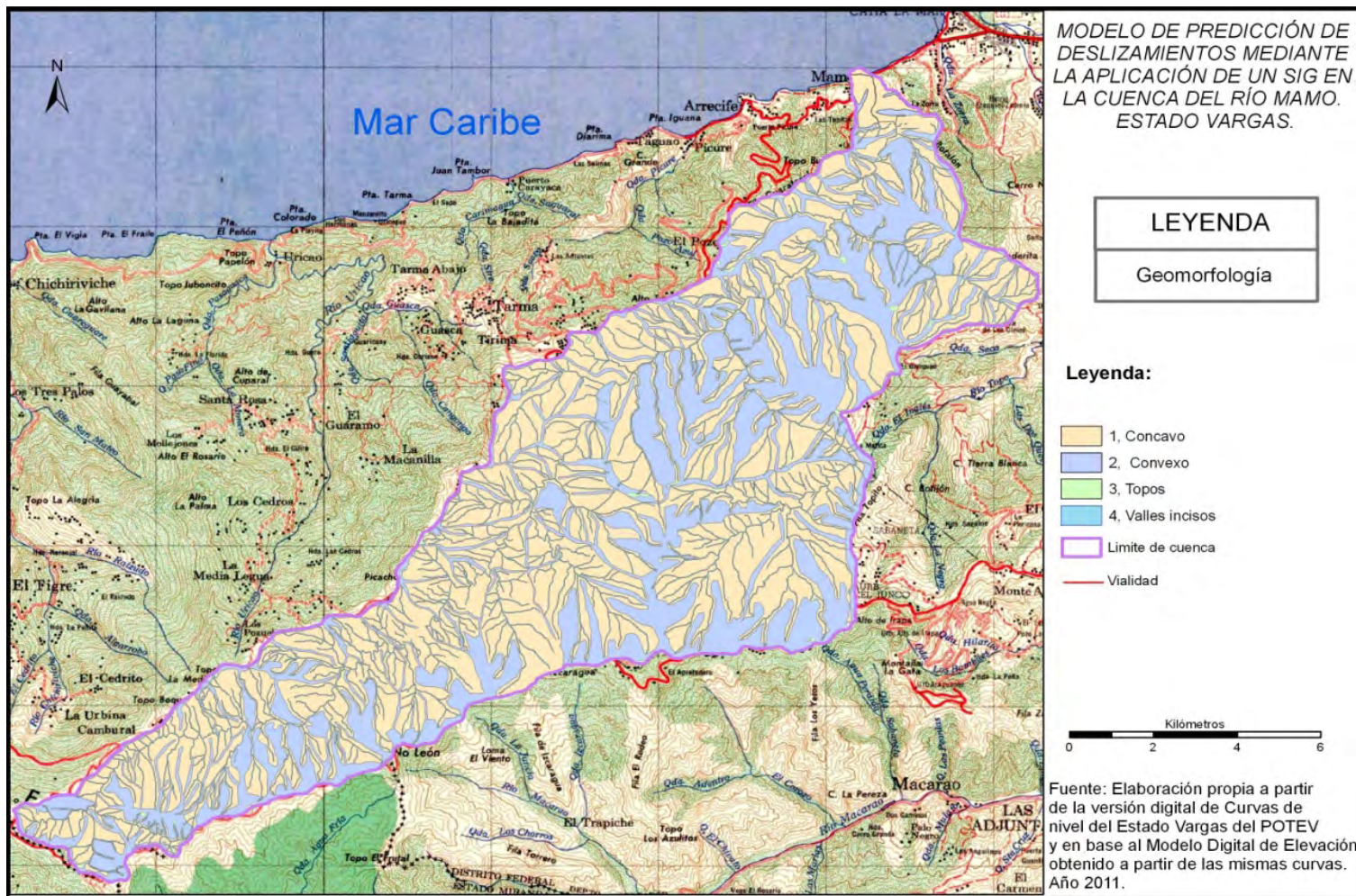


Figura 16. Mapa de Geomorfología. **Fuente:** Elaboración propia con base en la “Definición del Ambiente Geomorfológico con fines de descripción de Suelos”. Alfred Zinck, 1974.

6.3.1. Características de la unidad de montaña

La montaña ocupa una superficie de 139,4 Km², lo que representa 96% de la superficie del área en estudio. Presenta altitudes que se encuentran desde los 0 metros a nivel del mar, en la base de la montaña justamente en los acantilados litorales, hasta los 2.360 m.s.n.m. en la parte suroeste de la cuenca cerca del límite entre los estados Aragua y Miranda, significando que existe una gran amplitud de altimetría, con una topografía y una desnivelación interna abrupta; lo que hace que esta unidad sea de altura relativa alta, con respecto a las otras. Para observar mejor esto ver la Figura 17 (Modelo Digital del Terreno – MDT).

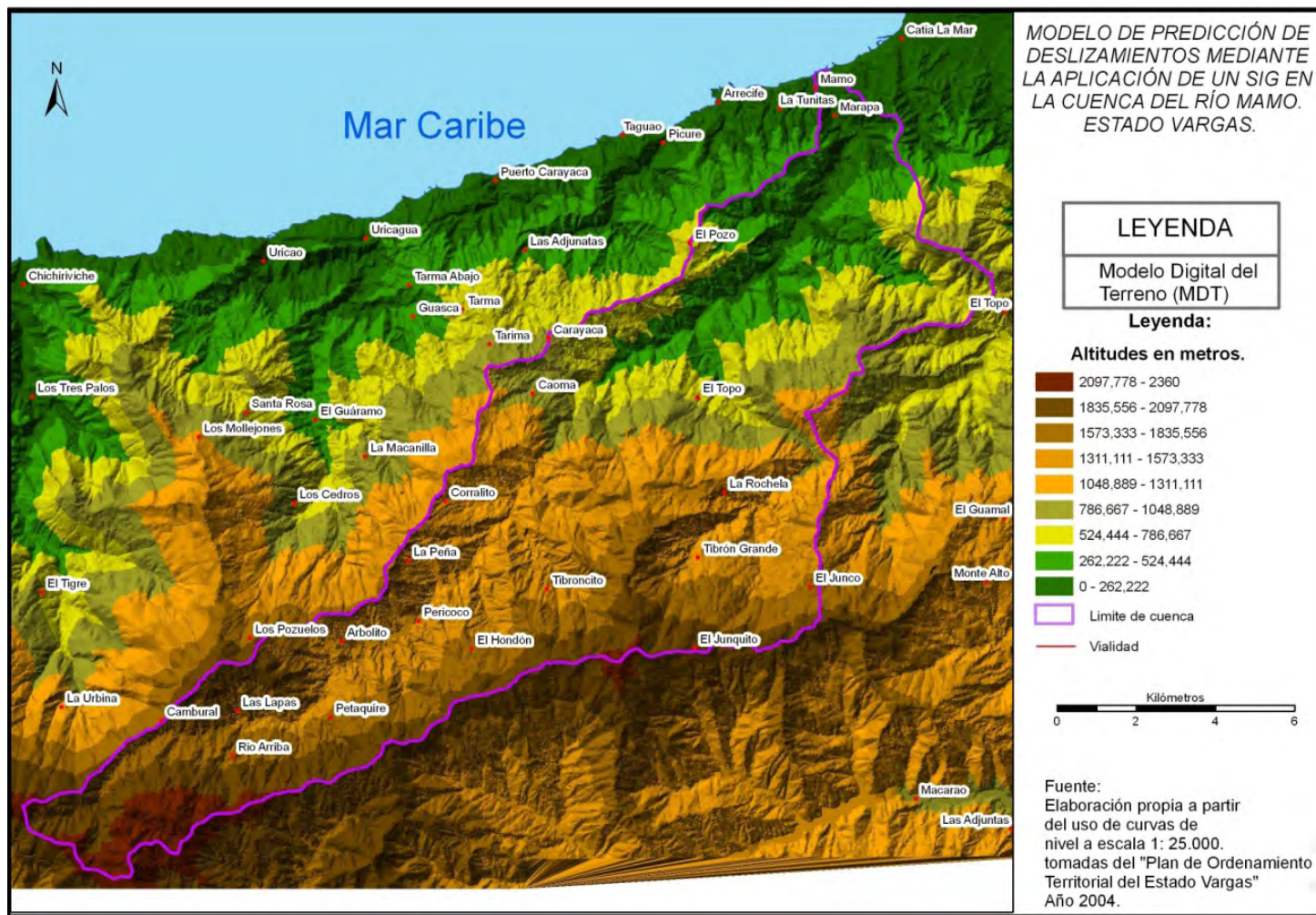


Figura 17. Mapa de Modelo Digital del Terreno (MDT). **Fuente:** Elaboración propia mediante el uso de curvas de nivel a escala 1: 25.000 tomadas del "Plan de Ordenamiento Territorial del Estado Vargas" Año 2004.

La montaña presenta los mayores valores de pendiente, lo que es característico de estos tipos de topografía. Además es la unidad que tiene la mayor diversidad de rangos. El 36% de la unidad tiene rangos comprendidos entre 11,6 y 22,1°, seguidamente el 35% presenta pendientes entre 22,2 y 33,01° (Ver Tabla 7 y Gráfico 3), ver Figura 18.

Tabla 7.
Valores de Pendiente de la Montaña.

RANGOS DE PENDIENTE (Grados)	SUPERFICIE	
	KM ²	%
0 – 11,5	19,3	13,35
11,6 – 22,1	52,0	35,95
22,2 – 33,01	50,0	34,58
33,02 – 64	23,2	16,08
Totales:	144,6	99,95

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

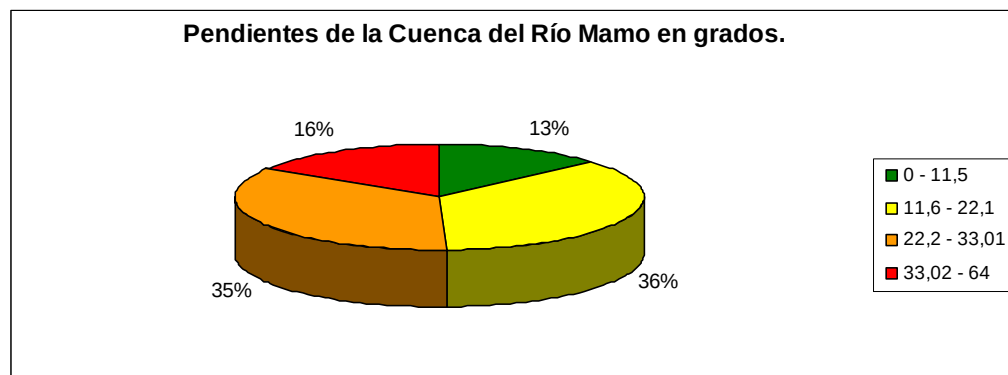


Gráfico 3. Distribución de la pendiente en grados para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

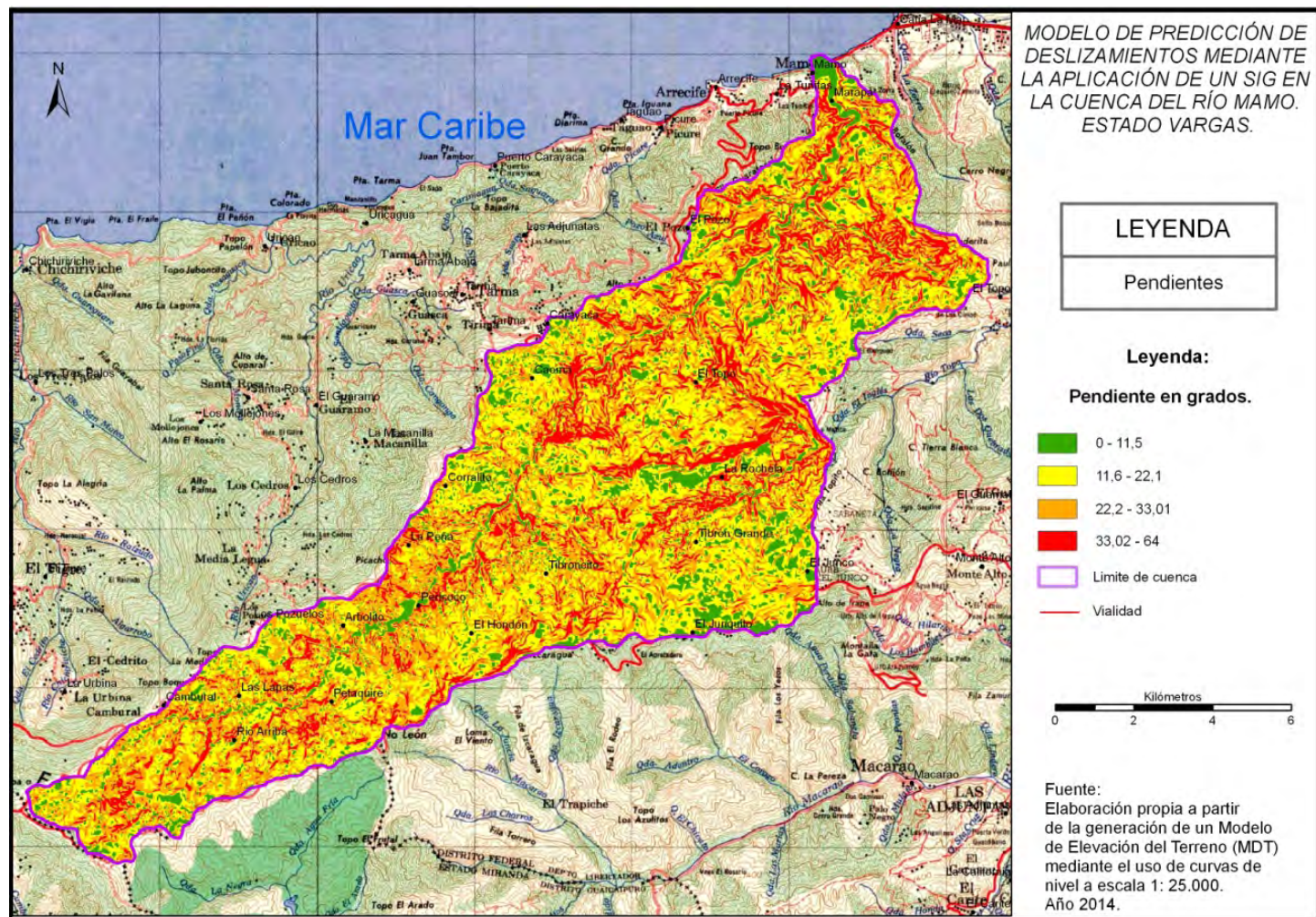


Figura 18. Mapa de Pendiente en grados. **Fuente:** Elaboración propia a partir de la generación de un Modelo de Elevación del Terreno (MDT) mediante el uso de curvas de nivel a escala 1: 25.000. Tomadas del "Plan de Ordenamiento Territorial del Estado Vargas" Año 2004. Elaboración: año 2011.

Los tipos de relieves que se encuentran dentro del área de estudio son los siguientes: topos; laderas cóncavas, laderas convexas y canales incisos. (Ver Figura 16). Los topos ocupan una superficie de 0,6 Km². Este tipo de relieve son los lugares más elevados que presentan las filas y sus estribaciones, poseen un relieve cónico que suele ser generalmente agudo, con pendiente muy alta. Su extensión generalmente es reducida, por tratarse de lugares muy puntuales dentro de las filas que las contienen. En el Gráfico 4 se puede ver de manera mas detallada la distribución de los tipos de relieve para la cuenca del Río Mamo.

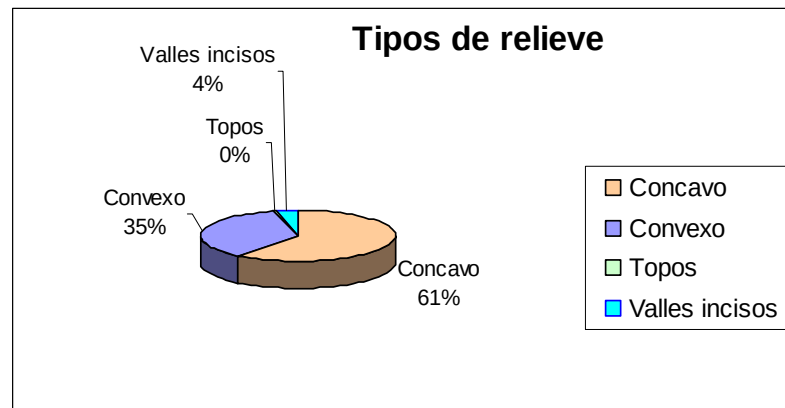


Gráfico 4. Tipos de relieve para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

Las laderas cóncavas representan el 60,9% del área en estudio, ocupando una superficie de 88,0 km². Son unidades de relieve que se encuentran conformadas por desnivelaciones en forma predominantemente hundidas, las cuales se originaron por la excavación del terreno durante la ocurrencia de procesos de remoción en masa, bien sea activos ó estabilizados parcialmente (paleoformas), tales como las cicatrices de despegue. Estas geoformas constituyen en la actualidad las zonas de captación o de confluencia del escurrimiento laminar, coincidentes con las nacientes de los cursos de agua y están generalmente ocupadas por vegetación boscosa. Desde el punto de vista geodinámico externo, las vertientes cóncavas se comportan como áreas de alta inestabilidad, ya que su conformación obedece a la ocurrencia de movimientos en

masa (laminares, rotacionales y/o de flujo) locales que son activados por agentes hídricos y de gravedad.

Las laderas convexas ocupan 35,1% de la superficie total del área en estudio, lo que es igual a 50,8 km². Estas se definen como declives, que a diferencia de los anteriores, exponen un perfil predominantemente combado hacia el exterior de mayor pendiente topográfica. Dificultando la concentración del escurrimiento superficial, el cual es drenado hacia las laderas vecinas y promoviendo el desarrollo pedogenético. Es por esta razón, que en este tipo de relieve, se desarrolla una cubierta vegetal de porte bajo, donde dominan las gramíneas. Aunque los valores de pendiente en estas unidades suelen ser altos, los movimientos en masa son poco frecuentes por su excelente condición de drenaje externo en comparación con las unidades anteriores.

En las vertientes también se encuentran los canales o valles incisos de los cuerpos de agua, los cuales ocupan el 3,6% del área de estudio, lo que equivale a 5,2 km². Estas se definen, como las entalladuras producidas por la erosión concentrada de los interfluvios, que escurren en las zonas de confluencia de las vertientes contrapuestas. En general, poseen una pendiente longitudinal alta y son las vías de transporte del material clástico que se derivan de las diferentes vertientes que la suplen, tanto de sedimentos como de su gasto líquido en temporada lluviosa. Todos estos canales confluyen sobre unidades depositacionales de mayor jerarquía, como los valles.

Al relacionar los tipos de relieve de la geomorfología con las superficies de deslizamientos, se tiene que la mayoría de estos 57,6 % han ocurrido en zonas cóncavas (ver Figura 19 y Gráfico 5), luego le siguen en importancia los deslizamientos o movimientos en masa en zonas convexas con un 38,8%, los deslizamientos en valles incisos apenas cubren el 4% de estas zonas y apenas un 0,01% de deslizamientos en topos de montaña.

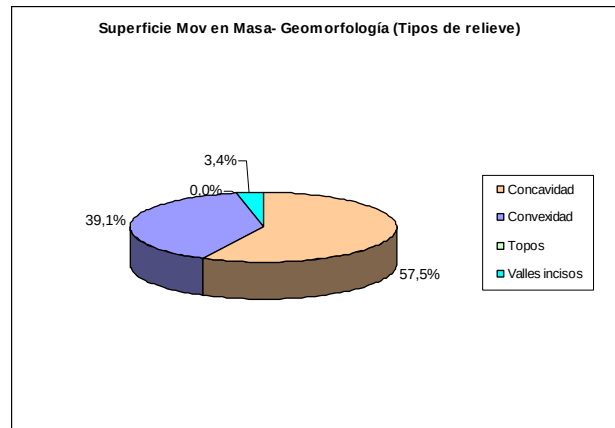


Gráfico 5. Distribución de deslizamientos y tipos de relieve para la cuenca del Río Mamo.
Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

Ahora al relacionar la superficie de los deslizamientos con las pendientes de la cuenca; se tiene que el 35% de ellos ocurren en zonas que tienen pendientes que van de 22,2 a 33,01 grados, un 34% se distribuyen en zonas de pendientes que van de 11,6 a 22,1 grados. Es decir que el 69% de las superficies de deslizamientos se concentran en zonas de pendientes que van de 11,6 a 33,01 grados. Un 20% de los deslizamientos ocurren en zonas de pendientes entre 33,02 y 64 grados y la menor proporción, un 11% ocurren en zonas de pendientes que van de 0 a 11,5 grados. Ver Figura 20 y Gráfico 6.

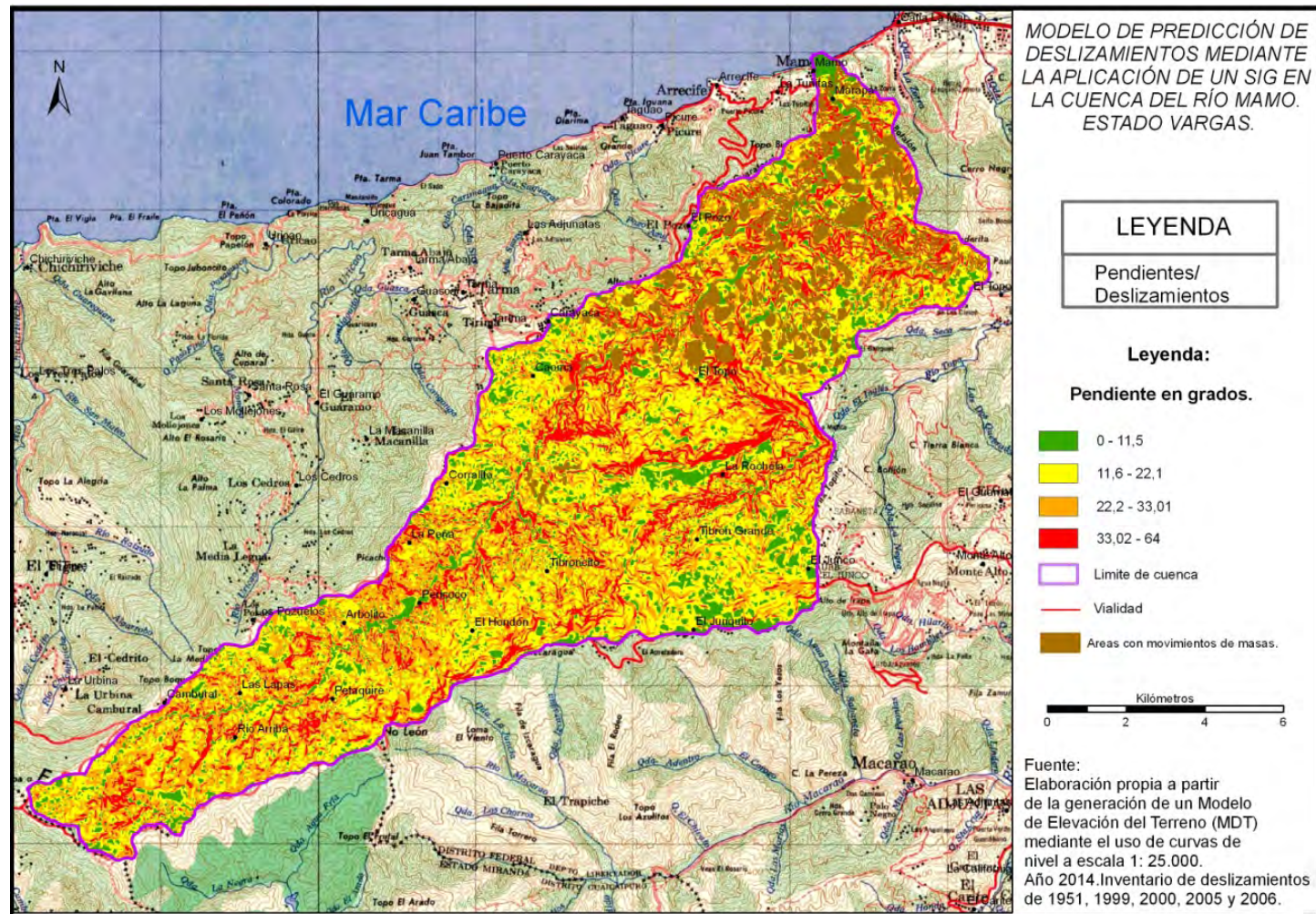


Figura 20. Mapa de superficie de deslizamientos de acuerdo a la pendiente en grados. **Fuente:** Elaboración propia a partir Mapa de Pendientes en grados, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración 2014.

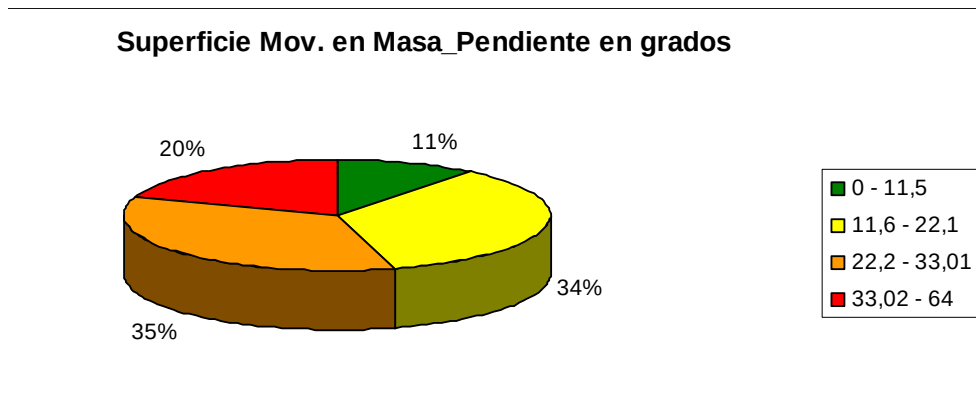


Gráfico 6. Distribución de deslizamientos y tipos de pendientes en grados para la cuenca del Río Mamo. Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

6.4. GEOLOGÍA

A pesar de que ya se explico en detalle la geología de la zona de estudio en el Capitulo II, es bueno mostrar en este punto la relación entre la distribución de los deslizamientos y la litología en consonancia con lo presentado en este capitulo. La mayoría de los deslizamientos se ubican entre los mármoles y anfibolitas del Mármol de Antimano 69,19%, el 20,84% se ubican donde están los esquistos grafitosos y epidocita del Esquisto de Tacagua, un 5,50% se ubican donde hay esquistos cuarzo albiticos muscovíticos o clorita del Esquisto Las Brisas, y un 3,73% se ubican donde hay serpentinitas. Ver Figura 21 y Gráfico 7.

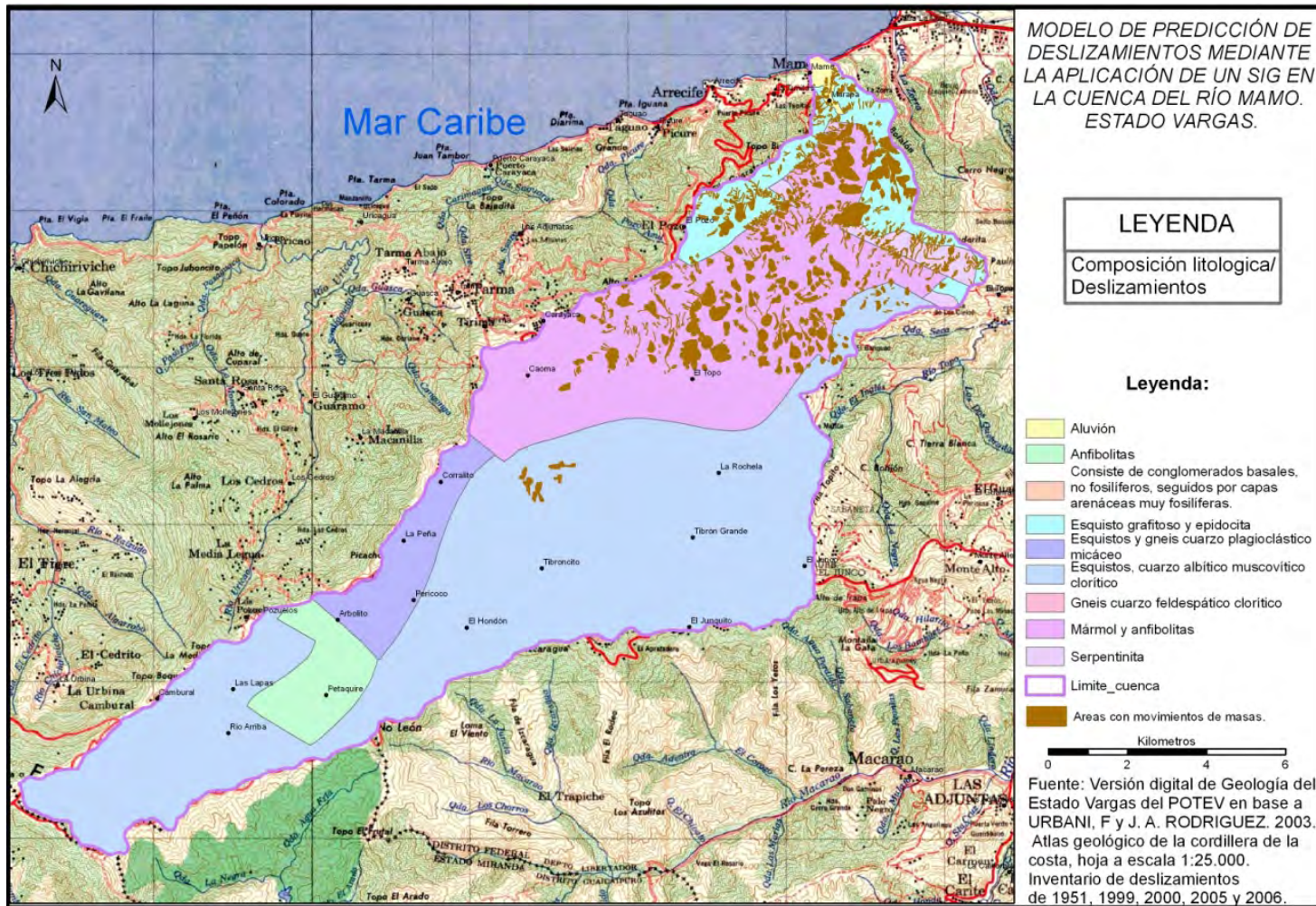


Figura 21. Mapa de distribución de deslizamientos de acuerdo a la litología. **Fuente:** Mapa de Composición Litológica de la Cuenca del Río Mamo, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración 2014.

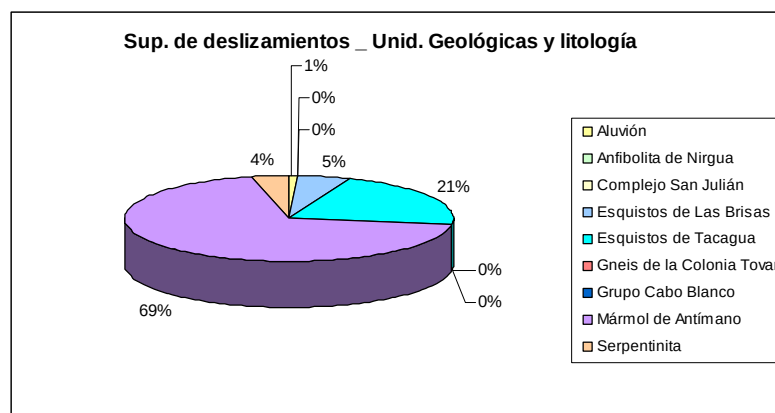


Gráfico 7. Distribución de deslizamientos en Unidades Geológicas y litología para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

6.5. USO DE LA TIERRA

En cuanto al uso de la tierra, puede apreciarse en el Gráfico 8, que predomina el bosque no intervenido con 51,5 km² de superficie (un 35% de toda el área de estudio) principalmente en la parte centro oriental de la cuenca y bordes de la parte alta hacia el sur (límite con el Parque Nacional Macarao), 29,5 km² son de matorrales (20,3%), 24,2 km² son de pastizales (16,7%), la actividad agrícola se desarrolla en una superficie de 18,1 km² (12,5%) y los usos urbanos abarcan 12,9 km² (8,9%). El resto de los otros usos son pocos significativos ya que no llegan ni a un 6% del área de la cuenca (Ver uso de la tierra, Figura 22).

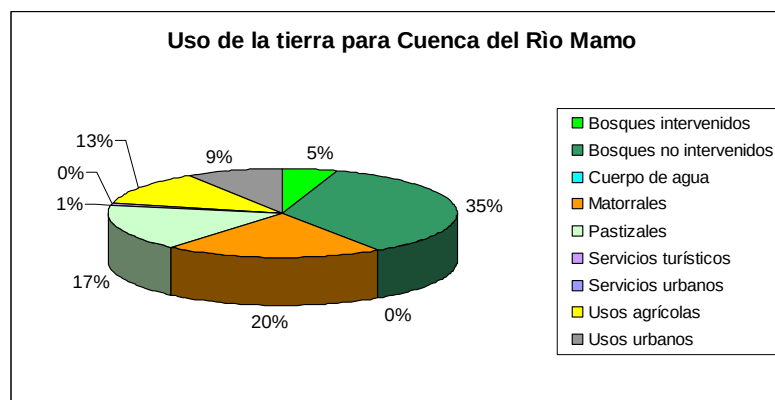


Gráfico 8. Usos de la Tierra para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

Dentro del análisis del uso de la tierra, se tiene que la cuenca está bastante intervenida por el hombre en su parte oeste desde Carayaca hasta Corralito donde predomina la actividad agrícola y pecuaria en menor medida; en la parte centro sur que va de Petaquire, el Hondón, Tibroncito y Tibrón Grande donde predomina la agricultura y algunas actividades de tipo urbana y turística y en la parte norte o baja de la cuenca donde hay unos desarrollos urbanos poco controlados como Mamo y Marapa. También cabe destacar que muchos de los pastizales y matorrales de la parte oeste, de la cuenca media y alta muchas veces tienen su origen asociado a la actividad antrópica.

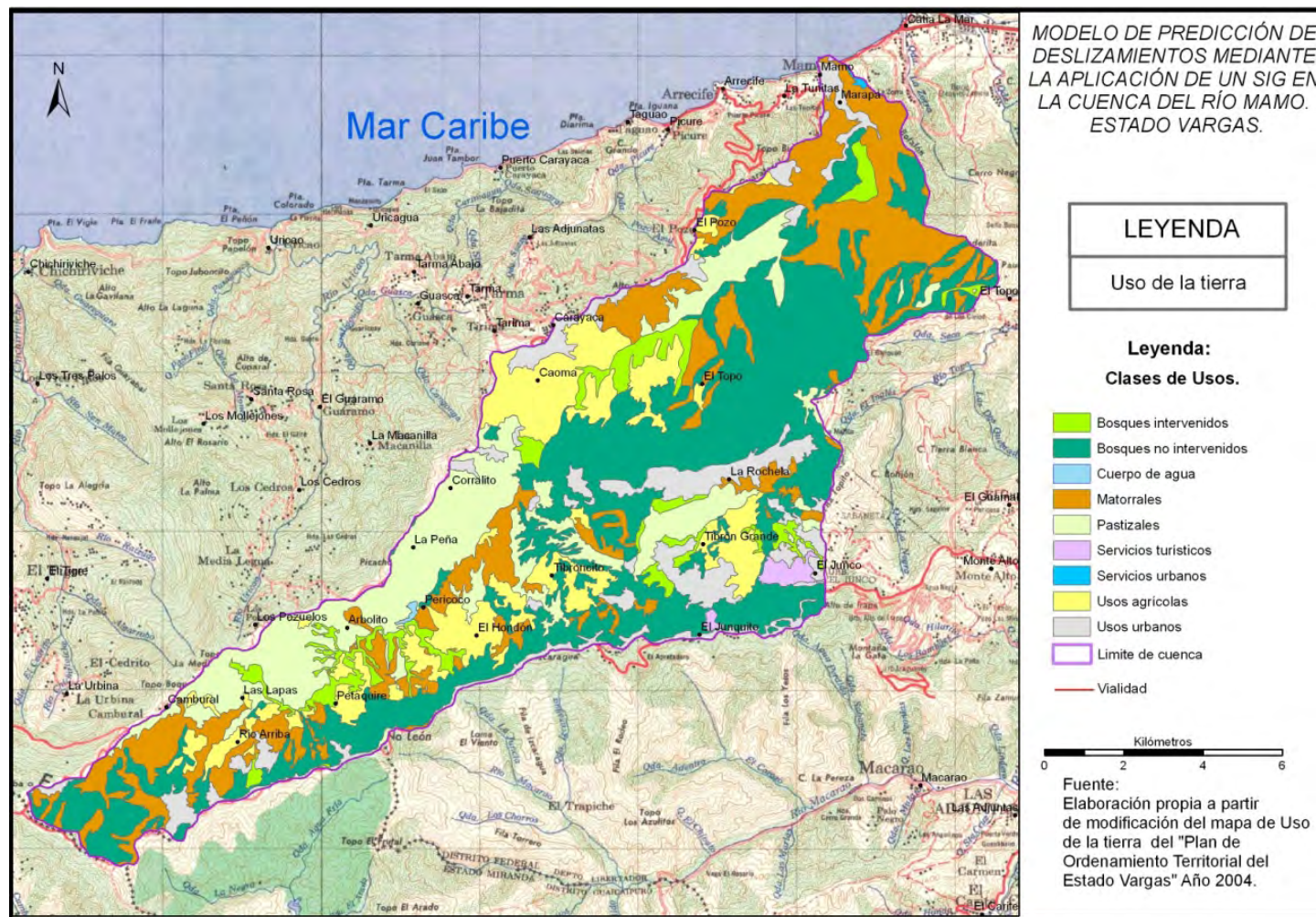


Figura 22. Uso de la Tierra. Fuente: elaboración propia en base a Mapa de Uso de la Tierra del POTEV (COTEV. 2004) y Actualizado con imagen Ikonos de 2005 y trabajo de campo 2011 y 2013. Elaboración: año 2014.

En cuanto al análisis de la distribución de las superficies de deslizamientos y los usos de la tierra para la cuenca, se tiene que; de una superficie total de 8,74 km² de deslizamientos encontrados dentro la cuenca, el 42,67% (3,73 km²) se localizan en el uso clasificado como “bosques no intervenidos”, le sigue muy de cerca con un 38% (3,32 km²) aquellos que caen en el uso de “matorral”. Por lo tanto más del 80 % de los deslizamientos caen en estos 2 usos. El resto de los otros usos son pocos significativos en la distribución de estos deslizamientos. Ver Gráfico 9 y Figura 23.

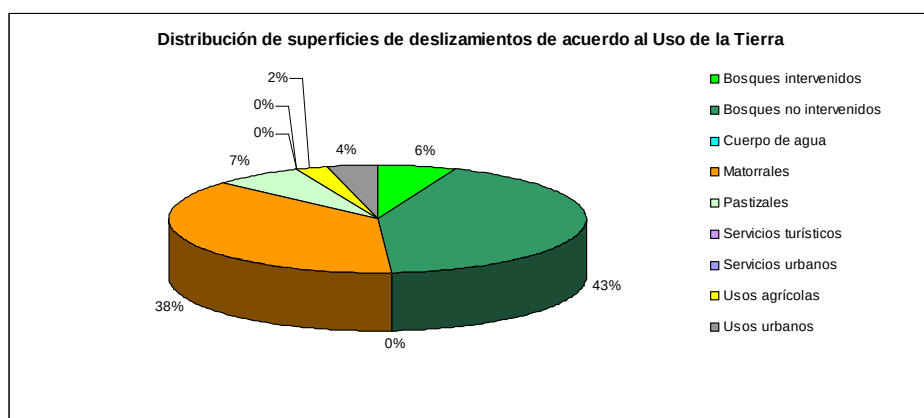


Gráfico 9. Distribución de superficies de deslizamientos con respecto a usos de la tierra para la cuenca del Río Mamo. Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

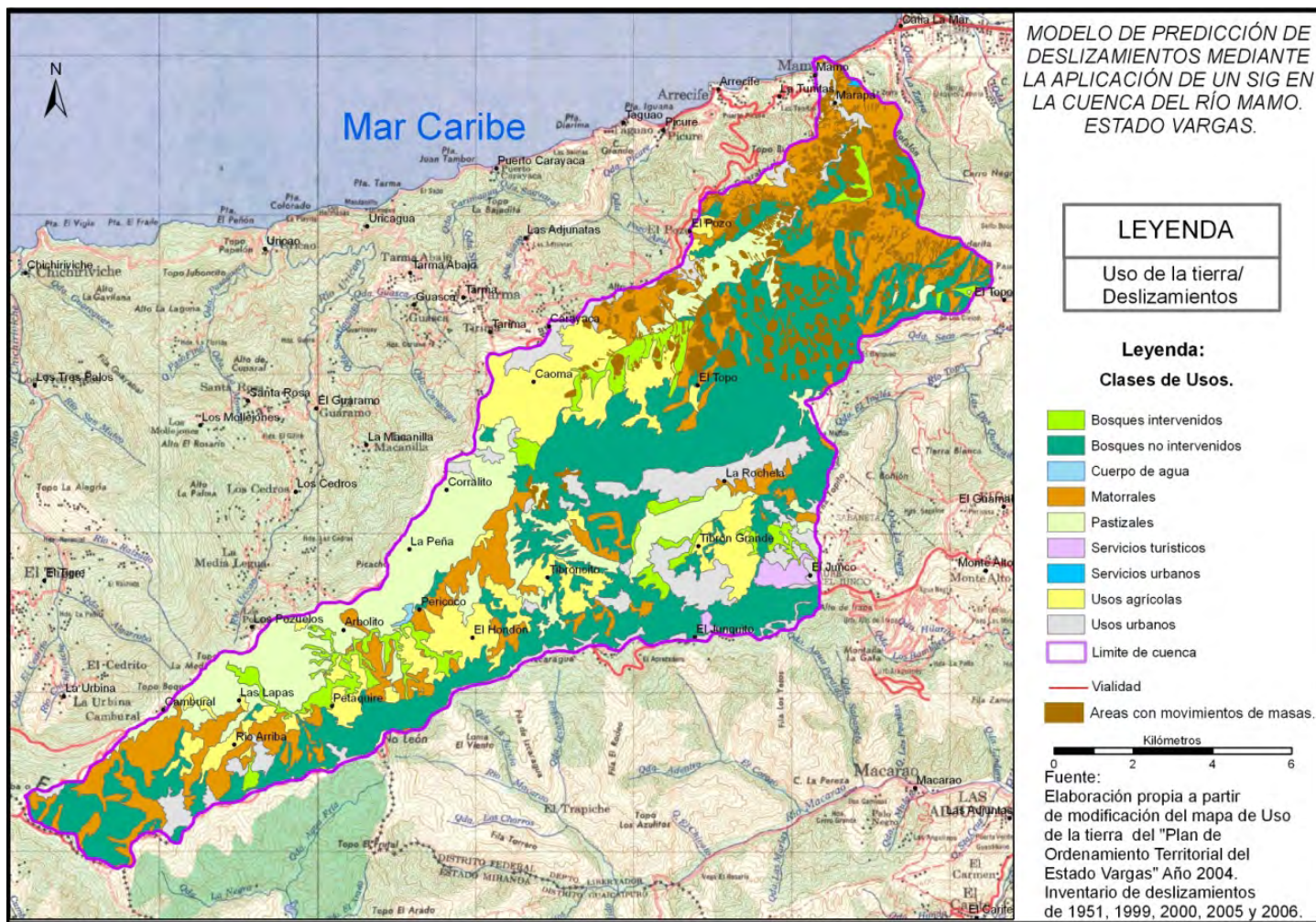


Figura 23. Distribución de superficies de deslizamiento de acuerdo al uso de la tierra. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Uso de la tierra, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración 2014.

6.6. COBERTURA VEGETAL

En cuanto a la cobertura vegetal, puede apreciarse en el Gráfico 10, que predomina ligeramente la vegetación de bosque con 54,1 km² de superficie (37% de la cuenca), 47,4 km² (32,8%) son de matorrales, 19,8 km² (13,7%) son de cultivos y 15,2 km² (10,5%) corresponden a herbazales. (Ver cobertura vegetal o Figura 24).

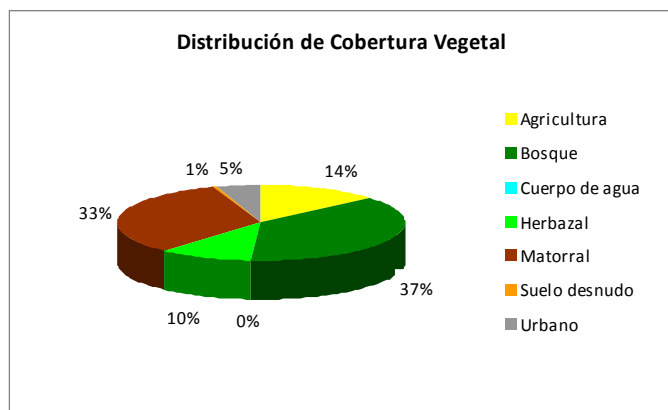


Gráfico 10. Cobertura Vegetal para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

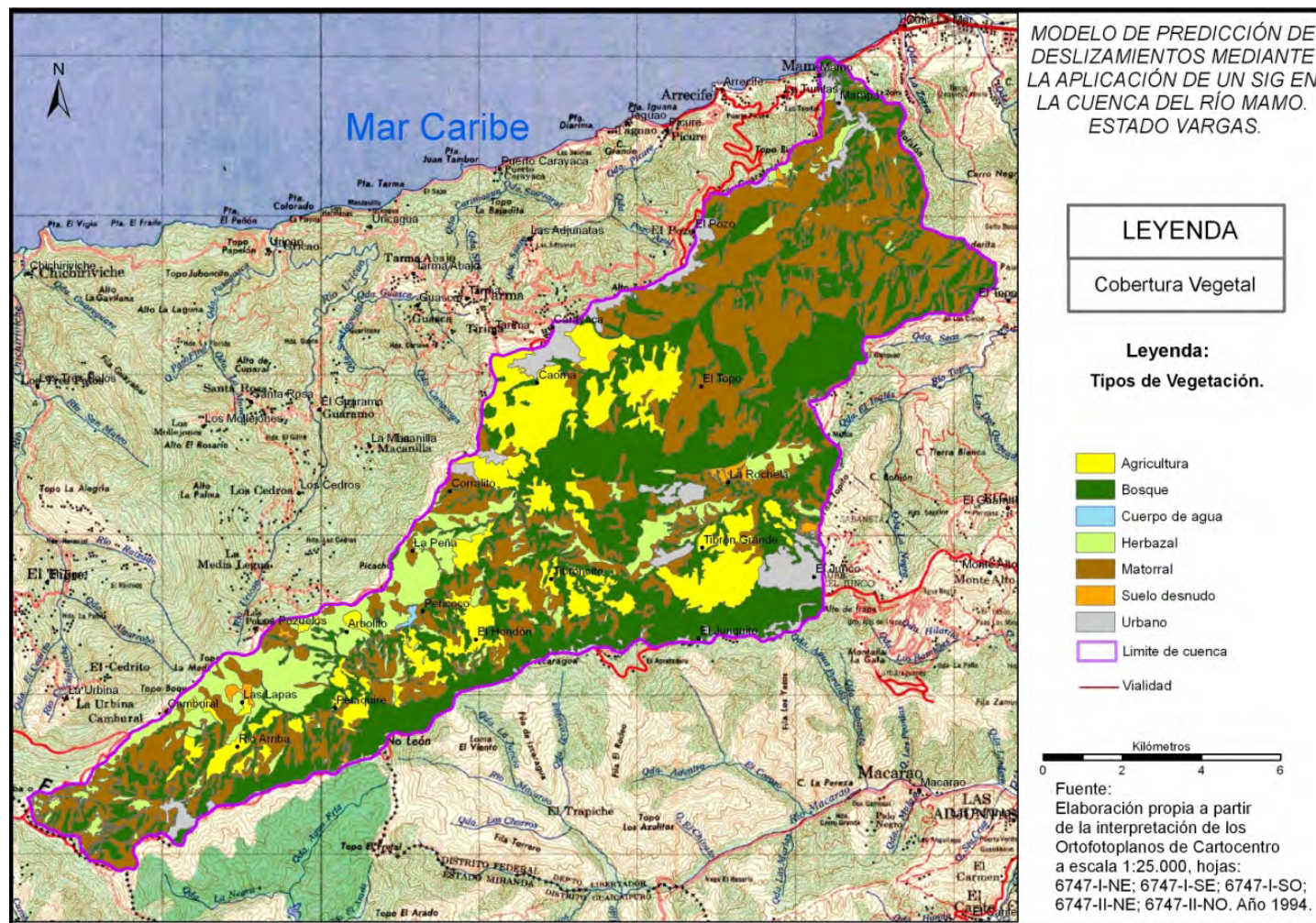


Figura 24. Mapa de Cobertura Vegetal. Fuente: Elaboración propia a partir de la interpretación de los Ortofotoplanos de Cartocentro a Escala 1:25.000. Hojas: 6747 - I- NE, 6747 - I- SO, 6747 - I- SE, 6747 - II - NE, 6747 - II – NO. Año 1994, imagen Ikonos del año 2005 y chequeo de campo 2011 y 2013.

Las características de la cobertura vegetal de la unidad son particulares. Principalmente por factores como la topografía, la precipitación y el clima. Encontrándose la vegetación de tipo boscosa en gran parte de la cuenca de manera fragmentada, sobretodo como bosques de galería y en laderas poco intervenidas por la actividad humana en las partes media y alta de la cuenca. Mucha de la vegetación de matorral en la cuenca alta (centro y sur de la misma) es originada por la intervención antrópica, en la parte baja de la cuenca también hay matorral, pero parte de su origen mas que darse por intervención antrópica es por la escasez de precipitaciones que solo permiten que allí crezca un tipo de vegetación de un porte bajo a medio como lo son los cujisales y cardonales.

En cuanto al análisis de la distribución de las superficies de deslizamientos y la cobertura vegetal para la cuenca, se tiene que; casi la mitad de todos los deslizamientos que se han dado en la cuenca se han producido en la zona de “matorral”, es decir, 4,2 km² (48,02%), luego le siguen los deslizamientos que caen en la zona de “bosque”, 3,68 km² (42,10%). Entre estos 2 tipos de cobertura vegetal se concentran más del 90 % de los deslizamientos habidos en la cuenca, algo parecido a lo ocurrido a la distribución de los deslizamientos para el uso de la tierra, solo que aquí la mayoría de ellos cae en la categoría de “matorral”. Ver Gráfico 11 y Figura 25.

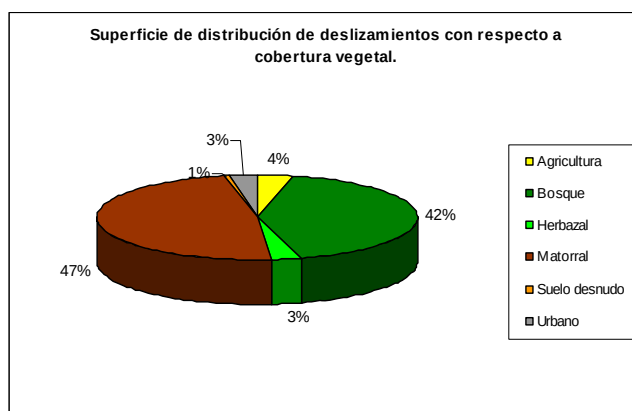


Gráfico 11. Distribución de superficies de deslizamientos con respecto a la cobertura vegetal para la cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

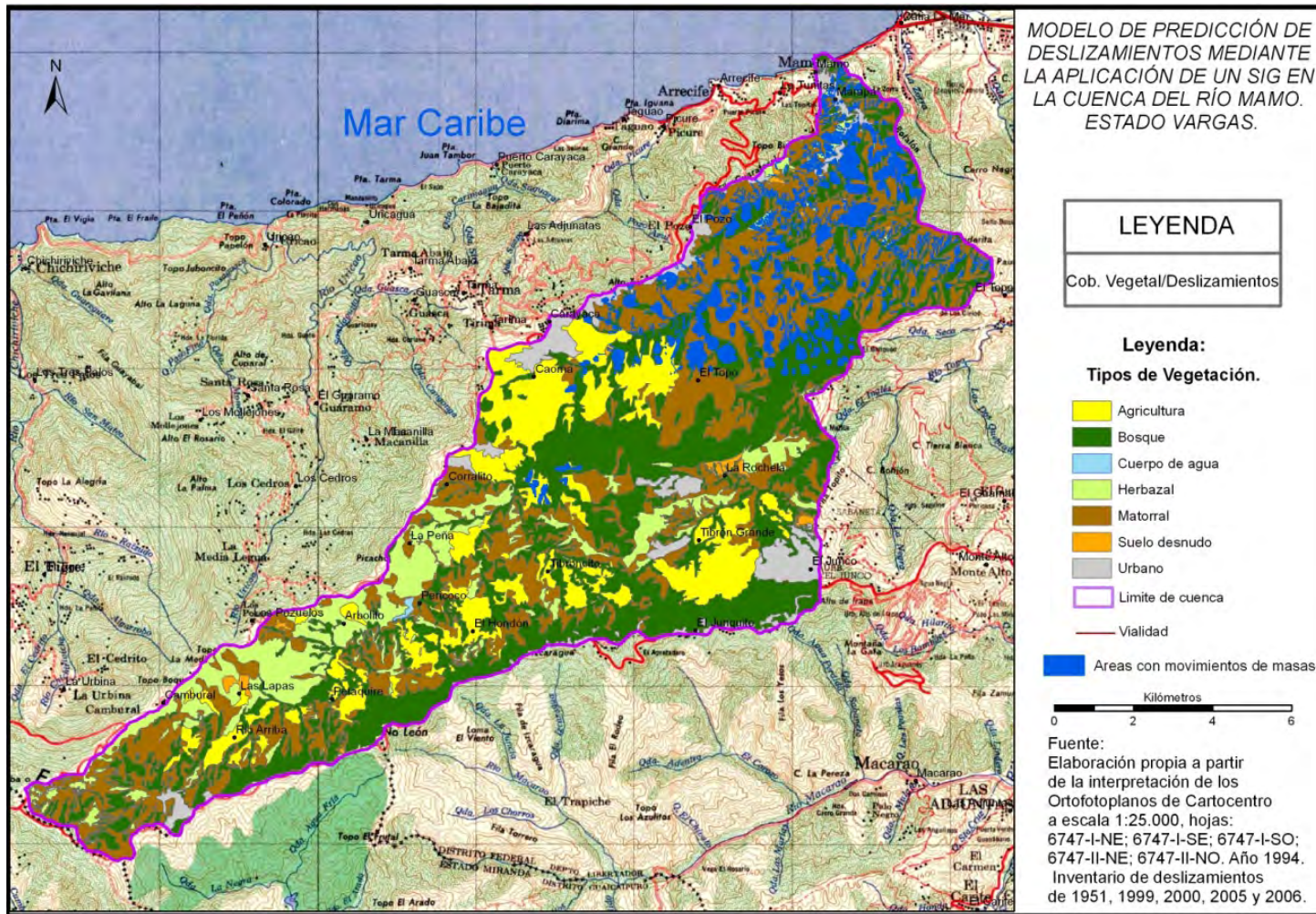


Figura 25. Distribución de superficies de deslizamiento de acuerdo a la cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa de Cobertura vegetal, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración: 2014.

CAPÍTULO VII

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se explica cómo se genera el mapa de susceptibilidad a deslizamientos partiendo de la construcción de una base de datos de distribución espacial de deslizamientos o movimientos en masa, con el uso de técnicas de SIG (se usó ArcGis 9.3). En segundo lugar, se estableció la relación cuantitativa entre esos deslizamientos y cada uno de los “factores de ocurrencia” como lo define Cereceda (2006) o “factores afectantes” como propuso H.X Lan (Lan *et al.* (2004), a través del Modelo de Factor de Certeza (F.C.). Para este estudio, los factores seleccionados que podrían contribuir a la ocurrencia de un deslizamiento son: geomorfología (tipo de relieve), pendiente (en grados), litología, cobertura vegetal y uso de la tierra (siguiendo el procedimiento que se describe en las figuras 7 y 7.1 del Capítulo V).

Y en tercer lugar se van a ir sumando de dos en dos esos “factores de ocurrencia” a los que ya se le había calculado el F.C. de manera individual mediante el empleo del SIG ArcGis. El producto de la suma de los 2 primeros factores de ocurrencia se normaliza en una escala del 1 al 6 (la misma del Factor de Certeza), luego se suman los 3 primeros factores de ocurrencia y el producto obtenido se vuelve a normalizar en la misma escala del 1 al 6 del F.C., se suman los 4 factores de ocurrencia, se normalizan los valores o rangos del producto en la escala del 1 al 6 del F.C. y finalmente se suman todas las 5 capas de los factores de ocurrencia, se normalizan los rangos o categorías de ese producto en la escala del F.C. (1 a 6) y finalmente este mapa es el de **Susceptibilidad a deslizamientos** de la cuenca. El ir sumando secuencialmente los factores de ocurrencia e irlos normalizando en una escala de 1 a 6 sirve para generar gráficos (Cada producto de la suma de las capas se le superpone el mapa de deslizamientos para correlacionarlos) que indique cuanta influencia o peso puede tener ese factor de ocurrencia que se suma o agrega en el momento sobre el mapa final de susceptibilidad

En cuanto a la base de datos de deslizamientos, tal y como se hizo referencia en el Capítulo V, se cuantificaron en la cuenca alrededor de 1117 deslizamientos, los

cuales ocupan una superficie total de 8,74 Km² (873,55 hectáreas) que equivalen a un 6,04% de la cuenca del Río Mamo. De los 1117 deslizamientos, hay 374 que son del año 1951 y 743 de 1999. Los movimientos en masa o deslizamientos fueron divididos en cuatro (4) categorías para poder utilizarlos con el programa SINMAP. En la cuenca, estos cuatro (4) tipos de movimientos en masa son:

1) Deslizamientos (“movimiento de una masa de roca, debris o tierra, pendiente abajo” (van Westen, 2005)). Los deslizamientos de Mamo son del tipo de deslizamientos peliculares o superficiales y representan el 88,8% de los movimientos en masa de la cuenca.

2) Aludes torrenciales de ladera, conocidos también como flujos de detritos o debris flow. Otro nombre que se le da es flujos torrenciales de ladera. En Venezuela y Colombia se le dice flujos torrenciales a los debris flow. Los flujos de detritos se refieren a una mezcla de agua y sedimentos compuestos por finos, arena, grava, cantos rodados y peñones, incluyendo restos vegetales como ramas y troncos de árboles, pudiendo incluir también a objetos como carros, restos de casas, y otros materiales antropogénicos. Los flujos de detritos tienen una consistencia similar a la del concreto húmedo y pueden desplazarse a velocidades cercanas a los 20 m/s, por lo que tienen una gran poder de destrucción (López, 2005). Representan el 12,51% de los movimientos en masa de la cuenca.

3) Golpes de cuchara. (Cicatriz parecida a una pala de cuchara que aparece cuando la masa del suelo y las formaciones superficiales se sobresaturan con agua de tal manera que sobrepasan el límite de liquidez y escurren en forma de lodo sobre la ladera. (IGAC, 2009)). Solo representan el 2,05% de los movimientos en masa de la cuenca.

4) Debris slide (hay quienes los llaman deslizamientos traslacionales o también deslizamientos de derrubios). “Se puede definir como un movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de deslizamiento planar (o recta). Se originan en zonas que presentan superficies de discontinuidad, de niveles poco competentes; también en bloques tabulares o paquetes de estratos dentro de estructuras conformes de estratificación o esquistosidad; sobre capas

poco competentes o niveles de alteración; sobre planos de fallas o sistemas de diaclasas conformes (a favor de la pendiente)” esto de acuerdo a lo leído en el trabajo “Inestabilidad de Laderas. Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración” (Proyecto MET- ALARN, 2005). Solo representan el 2,51% de los movimientos en masa de la cuenca. Ver Figura 26.

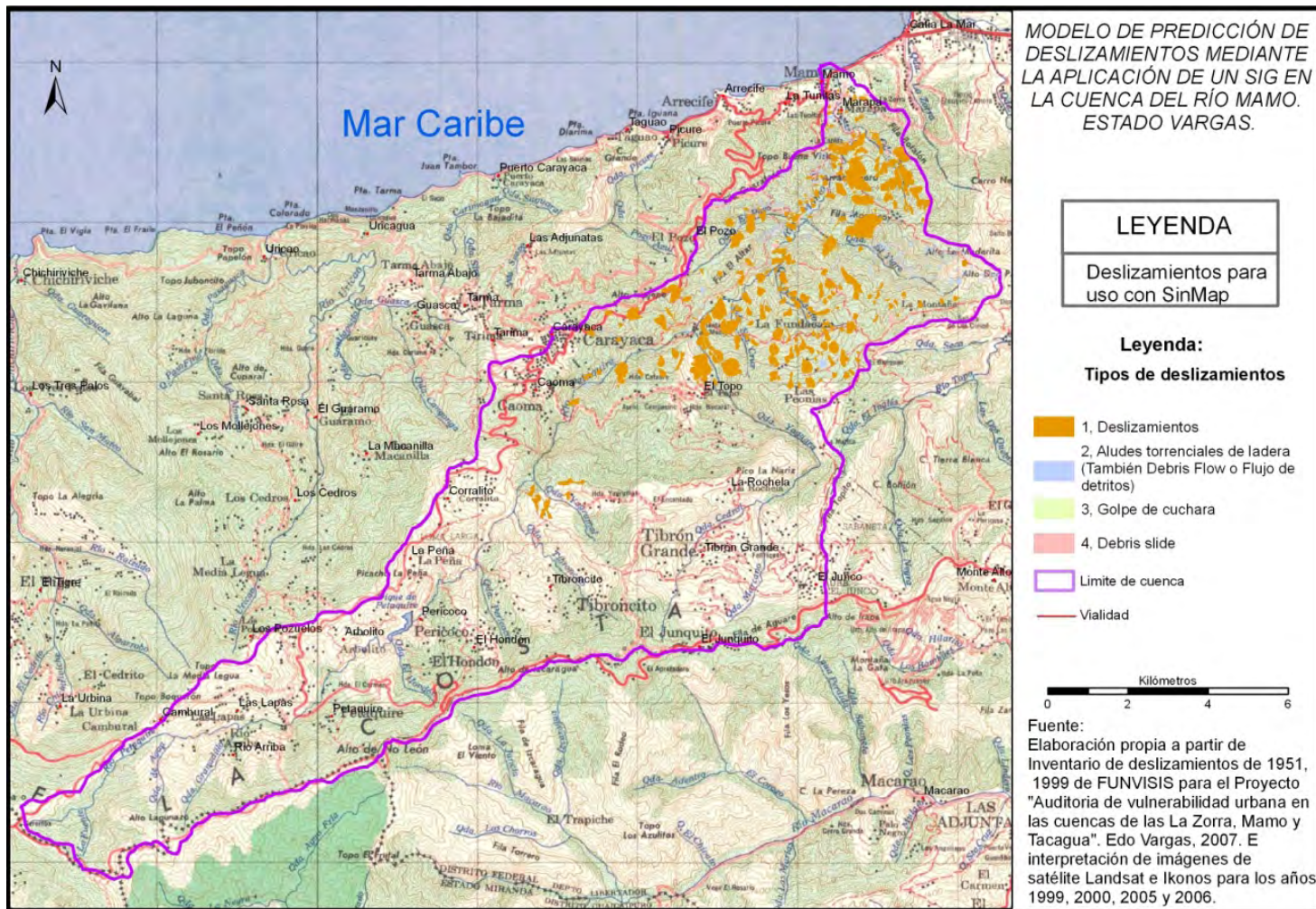


Figura 26. Distribución simplificada de deslizamientos para su uso con SINMAP. **Fuente:** Elaboración propia a partir del Mapa de distribución de deslizamientos, Información bibliográfica, interpretación de imágenes de satélite y chequeo de campo. Fecha de elaboración: 2014.

7.1. GENERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD

Para generar el mapa de susceptibilidad primero se calculó el Factor de Certeza (F.C.) para cada uno de los factores de ocurrencia (Geología, geomorfología, pendiente, vegetación y uso de la tierra), para ello se determinó la superficie de las áreas de deslizamientos de cada categoría o clase de los “factores de ocurrencia” o condicionantes, por ejemplo:

7.1.1. Factor de Certeza para la geomorfología. Para el caso de la geomorfología (tipos de relieve) se calcularon las superficies de deslizamientos que hay en las categorías o clases: Concavidad, Convexidad, Topos y Valles Incisos. Ver Tabla 8.

Tabla 8. Superficies de deslizamientos con respecto a categorías de geomorfología.

Categoría de Relieve	Área (Km2) de categorías Relieve	Área de deslizamientos por Categoría (Km2)	% de deslizamientos con respecto a superficie de cada categoría de relieve	% de deslizamientos con respecto a superficie total de la cuenca.
Concavidad	88,0	5,0	5,7	3,5
Convexidad	50,8	3,4	6,7	2,4
Topos	0,6	0,0	0,0	0,0
Valles incisos	5,2	0,3	5,8	0,2
	144,6	8,70	18,1	6,0

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

Después de esto se aplica la formula del Factor de Certeza que es una FF – Favourability Funtion en ingles (Binaghi et al, 1998) ó Función de Favorabilidad como la citan algunos autores en español (Bonachea, 2006).

El Factor de Certeza (F.C.) según Cereceda (2006) se calcula de la siguiente manera

$$F.C. = \frac{PPa - PPs}{PPa * (1 - PPs)} \quad \text{Si: } PPa \text{ mayor o igual a } PPs$$

$$F.C. = \frac{PPa - PPs}{PPs * (1 - PPa)} \quad \text{Si: PPa menor a PPs}$$

Donde:

PPa: Superficie probable de deslizamientos por cada factor de ocurrencia (es decir, cuantos km² o hectáreas de deslizamientos hay por cada tipo de litología, por tipo de pendiente, de vegetación, etc.).

PPs: número probable de superficie de deslizamientos en el área total de estudio.

Y, la probabilidad:

$$Ppa = \frac{\text{Área de deslizamiento por cada clase del factor de ocurrencia}}{\text{Área de cada clase de factor de ocurrencia}}$$

$$Pps = \frac{\text{Área total de deslizamientos por cada factor de ocurrencia}}{\text{Área total de la zona de estudio}}$$

En este caso el PPa para la categoría o clase “Concavidad”, el área de deslizamiento es de 5,0 km² que se dividió entre el área de la categoría correspondiente, es decir; relieves cóncavos cuya superficie es de 88,0 km², resultando un PPa de 0,057 para ésta categoría “Concavidad”

El PPs sería, el área total de los deslizamientos de cada factor de ocurrencia, es decir 8,70 km² entre el área total de la zona de estudio o cuenca que es 144,6 km², lo que da un valor de 0,060.

Como la primera categoría, es decir la “Concavidad” el PPa da 0,057 y es menor que el valor de PPs, se dice que PPa < PPs y se aplica la formula: $PPa - PPs / PPs (1 - PPa)$ para obtener el Factor de Certeza de esa clase o categoría.

El Factor de Certeza da en este caso un valor de -0,05. Al ver la “Tabla 3 del Factor de Certeza” (recuérdese que es la misma mostrada en el Capítulo V), la Clase de peligro de esta categoría corresponde a “Mediana Estabilidad”. El resto de las categorías se calcularon siguiendo el mismo procedimiento.

Tal y como se explicó en el Capítulo V (punto 5.4.1), el rango de valores del F.C. oscila entre (- 1,1); donde los valores que se aproximan a -1, indican que existe menor probabilidad en la ocurrencia de los deslizamientos; para los que se acercan a 0 se incrementa la incertidumbre en la ocurrencia y, cuando se aproximan a 1 se asume que aumenta la probabilidad de la ocurrencia de un deslizamiento. La Tabla 3 muestra la clasificación de los peligros o en función al F.C. (Ver el Capítulo V)

Al final la Tabla del F.C. de los deslizamientos para el Factor de Ocurrencia “Geomorfología” queda de la siguiente manera. Ver Tabla 9.

Tabla 9. Factor de Certeza para la Geomorfología (Tipos de relieve):

Categoría de Relieve	Área (Km2) de categorías Relieve	Área de deslizamientos por Categoría (Km2)	% de deslizamientos con respecto a superficie de cada categoría de relieve	% de deslizamientos con respecto a superficie total de la cuenca.	PPa	Factor de certeza	Clase de susceptibilidad
Concavidad	88,0	5,0	5,7	3,5	0,057	-0,05	Mediana Estabilidad
Convexidad	50,8	3,4	6,7	2,4	0,067	0,11	Baja inestabilidad
Topos	0,6	0,0	0,0	0,0	0,000	-1,00	Alta estabilidad
Valles incisos	5,2	0,3	5,8	0,2	0,058	-0,04	Incertidumbre
	144,6	8,70	18,1	6,0	PPs = 0,060		

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

En el Gráfico 12 se puede observar como es la distribución del F.C. para cada categoría de tipo de relieve. La categoría de topo es la mas estable con valor -1, es la que tiene menos probabilidad de deslizamientos (recordemos que se vio en el Capítulo VI que la superficie de deslizamientos en topos de montaña apenas era el 0,01%), es decir; prácticamente no se ve afectada por estos fenómenos de movimientos en masa. En este mismo orden de ideas, se observa que la categoría de “Concavidad” (Mediana estabilidad en este caso) a pesar de que concentra la mayor cantidad de superficie de deslizamientos como se vio en el capítulo anterior (Gráfico 5), tiene menor probabilidad de deslizamientos que la categoría de “Convexidad” (Baja inestabilidad), tal vez esto se deba a que el F.C. es un calculo de probabilidad que tiene que ver con la densidad de deslizamientos por cada categoría que tienen los factores causales. En la Tabla 9 se ve que el “Porcentaje (%) de deslizamientos con

respecto a superficie de cada categoría de relieve” es de 6,7% para la “Convexidad”, contra un 5,7% de la “Concavidad”. Los “Valles incisos”, cuyo porcentaje de superficie de deslizamientos en el capítulo VI era de casi un 4% (También una baja ocurrencia de deslizamientos) aquí tiene una densidad apenas un poco mayor que la de la “Concavidad” con un 5,8% por lo que su F.C. es mas cercano a 0 y se califica como incertidumbre (ver Tabla 9). Por lo tanto, es probable que haya mayor cantidad o superficie afectada por deslizamientos para la categoría de “Convexidad” que para la categoría de “Concavidad” de acuerdo al F.C.

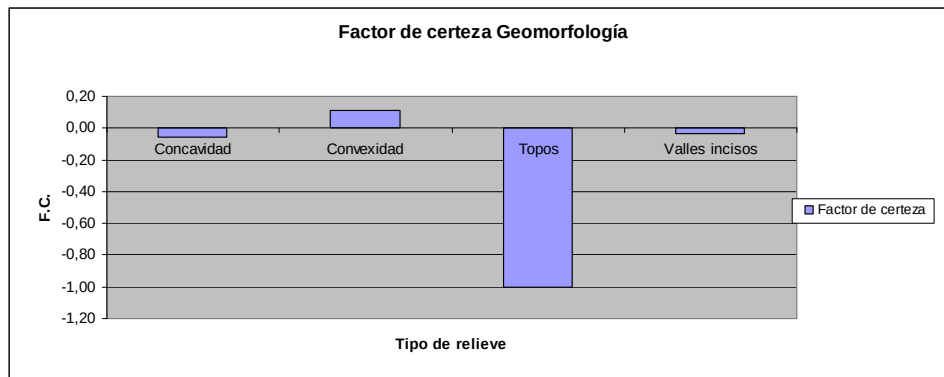


Gráfico 12. Distribución del F.C. para las categorías de Geomorfología.

Fuente: Elaboración propia, en base a cálculos propios.

En la Figura 27 se puede observar como es la distribución geográfica de esos niveles de F.C. para la geomorfología, en la cual predominan los polígonos de “Mediana estabilidad” que ocupa el 61% de la cuenca.

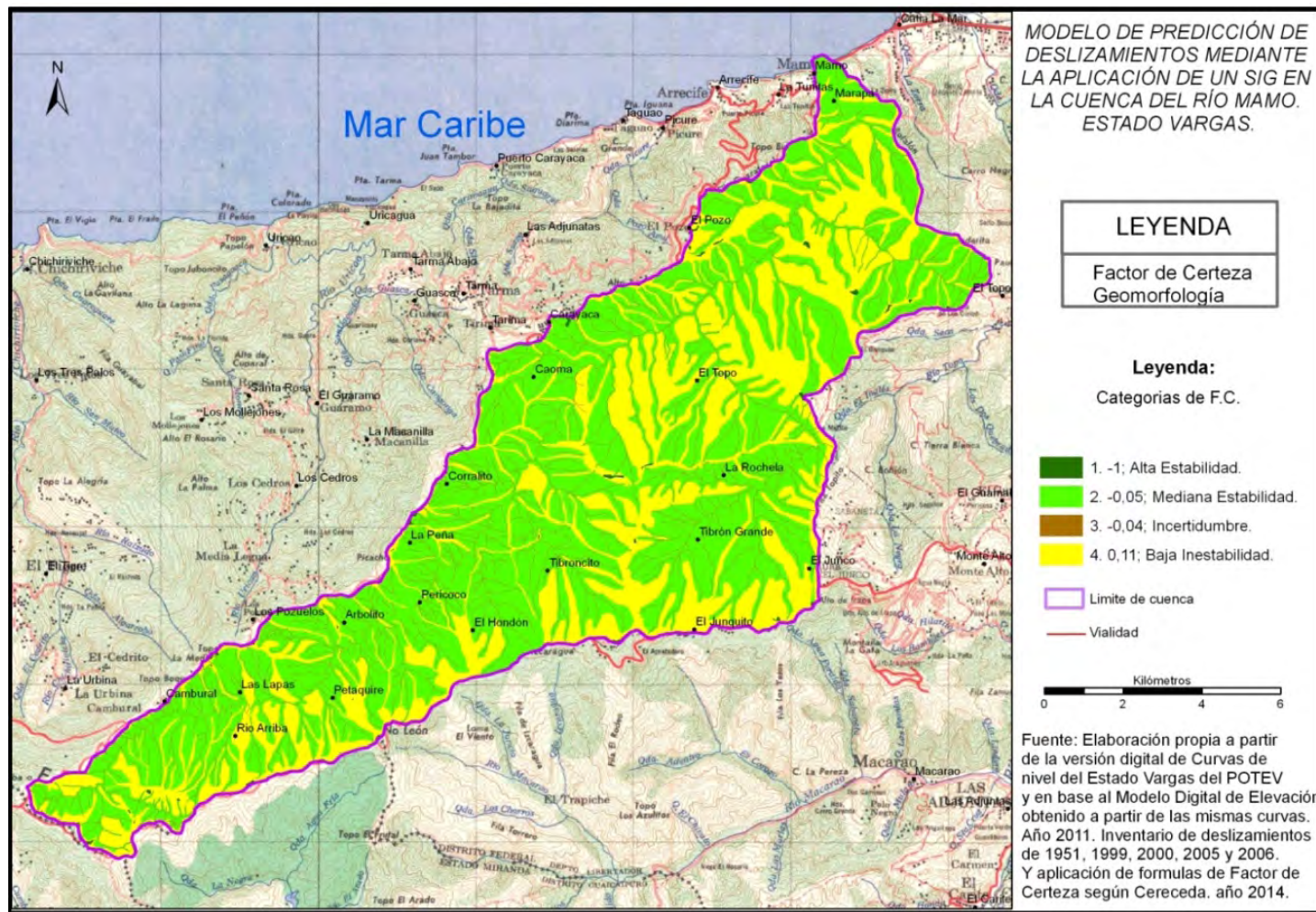


Figura 27. Factor de Certeza para la Geomorfología de la cuenca. **Fuente:** Elaboración propia a partir del “Mapa de Geomorfología” de la cuenca del Río Mamo y del calculo de Factor de Certeza a cada categoría del mismo. Año 2014.

7.1.2. Factor de certeza para la pendiente (en grados). Para este caso, se calcularon las superficies de deslizamientos que hay en la categoría o clase de 0 a 11,5 °, de 11,6 a 22,1°, de 22,2 a 33,01° y de 33,02 a 64°. Ver Tabla 10:

Tabla 10. Superficies de deslizamientos con respecto a categorías de Pendiente en grados:

Tipo de Pendiente.	Área (Km2)categorías pendiente	Área de deslizamientos por Categorías de pendiente (Km2)	% de deslizamientos con respecto a superficie de cada categoría de pendiente	% de deslizamientos con respecto a superficie total de la cuenca.
0 - 11,5	19,3	0,95	4,92	0,66
11,6 - 22,1	52,0	3,02	5,81	2,09
22,2 - 33,01	50,0	3,04	6,08	2,10
33,02 - 64	23,2	1,72	7,41	1,19
	144,6	8,73	24,22	6,04

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

Después de esto se aplica la formula del F.C. Al final la Tabla (ver Tabla 11) del Factor de Certeza de los movimientos en masa para el Factor de Ocurrencia “Pendiente” nos queda de la siguiente manera:

Tabla 11. Factor de Certeza para las categorías de Pendiente en grados:

Tipo de Pendiente.	Área (Km2)categorías pendiente	Área mov en masa por Categoría (Km2)	% con respecto a categoría de pendiente cuenca	% del total de cuenca	PPa	Factor de certeza	Clase de susceptibilidad
0 - 11,5	19,3	0,95	4,92	0,66	0,049	-0,193	Mediana Estabilidad
11,6 - 22,1	52,0	3,02	5,81	2,09	0,058	-0,035	Incertidumbre
22,2 - 33,01	50,0	3,04	6,08	2,10	0,061	0,017	Incertidumbre
33,02 – 64	23,2	1,72	7,41	1,19	0,074	0,201	Baja Inestabilidad
	144,6	8,73	24,22	6,04	PPs = 0,060		

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

En el Gráfico 13 se puede observar como es la distribución de este F.C. para cada categoría de pendiente. La categoría 1 (de 0 a 11,5 grados) es la más estable, en este caso de Mediana estabilidad con valor -0,193, es la que tiene menos exposición a deslizamientos y, por lo tanto, menos probabilidad de deslizamientos. En el caso de las categorías 2 y 3, (que entre las dos concentran el 70,5% de las superficies de

deslizamientos de la cuenca) la probabilidad de que ocurran deslizamientos es de incertidumbre ya que el valor de F.C. es cercano a 0 (ver Gráfico 13), mientras que la cuarta y última categoría es la que tiene las mayores probabilidades de ocurrencia de deslizamientos con respecto a las otras (Baja inestabilidad), en la Tabla 11 se observa que la densidad de deslizamientos o superficie de deslizamientos por cada categoría es mayor (7,41%) con respecto a las otras categorías.

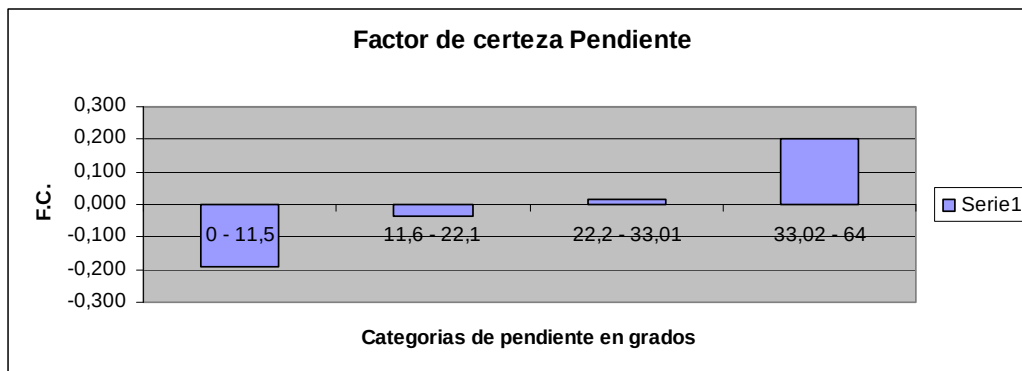


Gráfico 13. Distribución del F.C. para las categorías de Pendientes en grados.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

En la Figura 28 se puede observar como es la distribución geográfica de esos niveles de F.C. para la pendiente, en la misma predominan los polígonos catalogados como de “Incertidumbre” (70,5%) y seguidamente, en orden de importancia están los polígonos de “baja inestabilidad” (16 %).

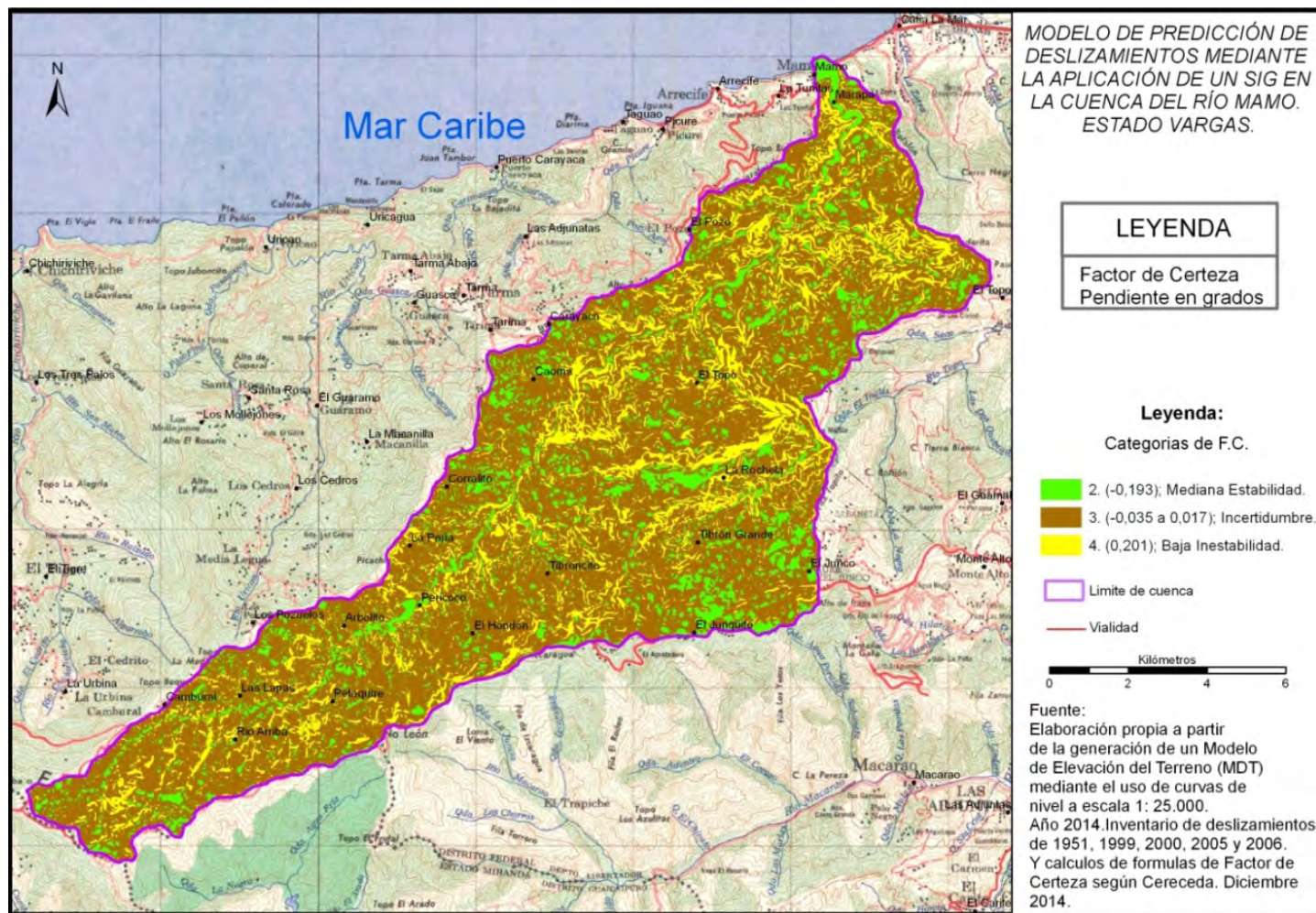


Figura 28. Factor de Certeza para la Pendiente en grados. **Fuente:** Elaboración propia a partir del “Mapa de Pendiente en grados” de la cuenca del Río Mamo y del calculo de Factor de Certeza a cada categoría del mismo. Año 2014.

7.1.3. Factor de certeza para la Geología. En este caso, se calcularon las superficies de deslizamientos que hay en las distintas categorías de unidades geológicas y su F.C., lo que se pueden ver Tabla 12:

Tabla 12. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de geología (unidades):

Tipo de unidad.	Área (Km2)categorías unidades geológicas	Área mov en masa por Categoría (Km2)	% con respecto a categoría de unidad geológica cuenca	% del total de cuenca	PPa	Factor de certeza	Clase de susceptibilidad
Aluvión	0,65	0,07	10,74	0,05	0,108	0,473	Mediana inestabilidad
Anfibolita de Nirgua	6,09	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Complejo San Julián	7,25	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Esquistos de Las Brisas	77,46	0,48	0,62	0,33	0,006	-0,905	Alta Estabilidad
Esquistos de Tacagua	9,94	1,82	18,88	1,26	0,183	0,715	Mediana Inestabilidad
Gneis de la Colonia Tovar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Grupo Cabo Blanco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Mármol de Antimano	40,66	6,03	14,82	4,17	0,148	0,633	Mediana Inestabilidad
Serpentinita	2,15	0,32	12,80	0,22	0,127	0,561	Mediana Inestabilidad
	144,55	8,72	57,15	6,03	PPs = 0,060		

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

La mayoría de la unidades geológicas presentan alta estabilidad (su valor es de -1), 5 de las 9 categorías son de alta estabilidad, ver Tabla 12 y Gráfico 14, eso en cuanto a distribución geográfica equivale a un poco mas de la mitad de la cuenca (exactamente el 62,82%), ver Figura 29. El Esquisto de Tacagua y el Mármol de Antimano por tener las mayores densidades de deslizamientos poseen una mediana inestabilidad (casi el 35% de la cuenca).

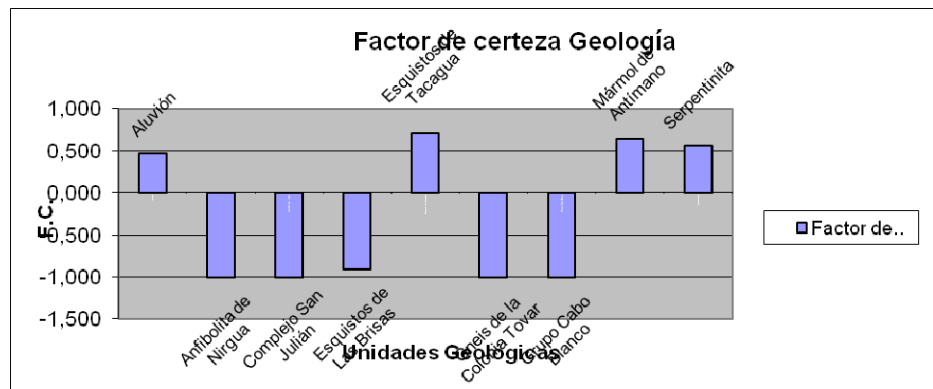


Gráfico 14. Distribución del F.C. para las categorías de geología.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

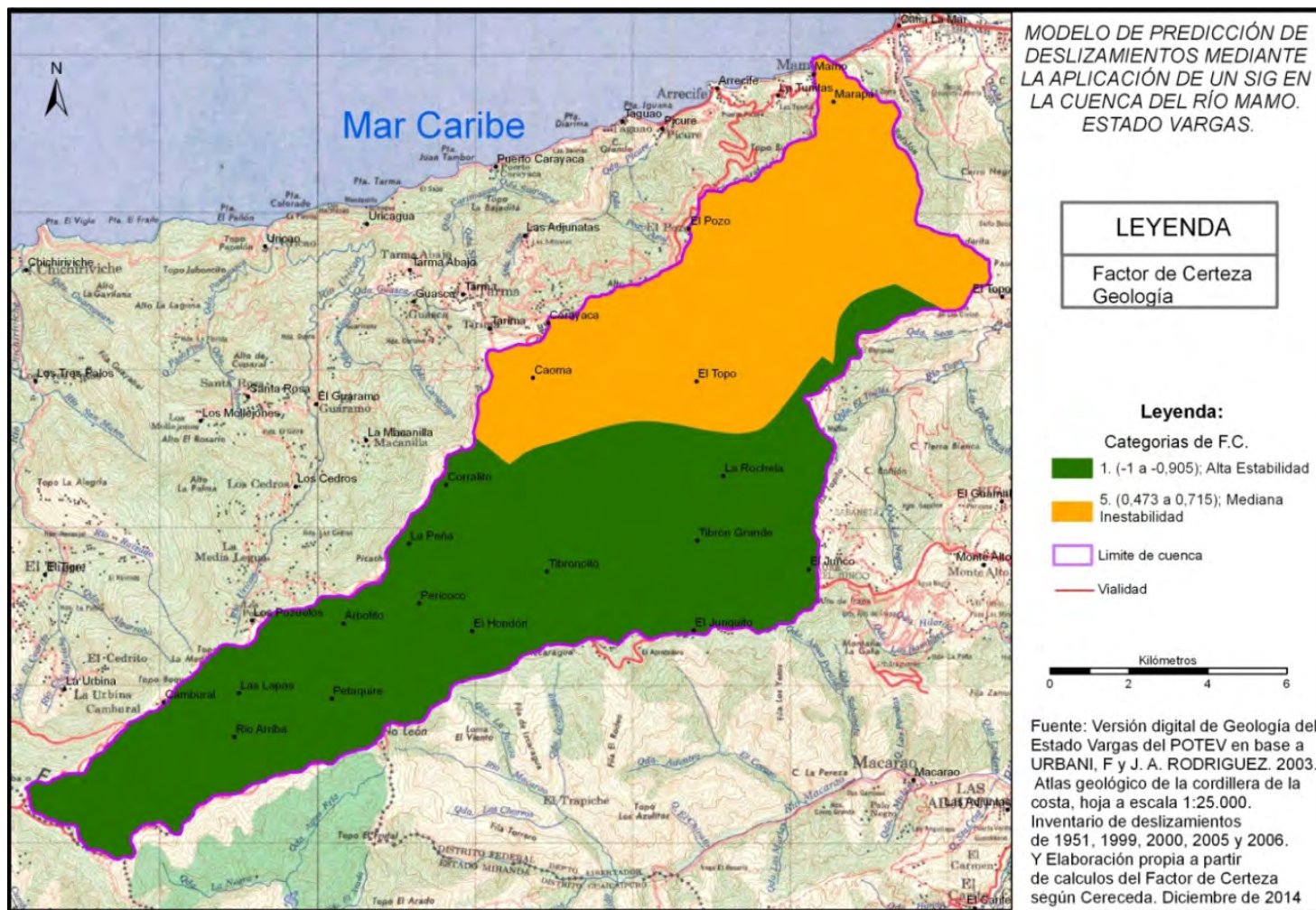


Figura 29. Factor de certeza para la geología de la cuenca. **Fuente:** Elaboración propia a partir del “Mapa de Composición Geológica” de la cuenca del Río Mamo y del calculo de Factor de Certeza a cada categoría del mismo. Año 2014.

7.1.4. Factor de certeza para el Uso de la Tierra. Siguiendo la metodología descrita, se procedió al cálculo de las superficies de deslizamientos que hay en las distintas categorías de uso de la tierra y su F.C., lo que se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de uso de la tierra:

Tipo de uso	Área (Km2) categorías de uso	Área mov en masa por Categoría (Km2)	% con respecto a categoría de uso cuenca	% del total de cuenca	PPa	Factor de certeza	Clase de susceptibilidad
Bosques intervenidos	7,44	0,53	7,12	0,37	0,071	0,165	Baja Inestabilidad
Bosques no intervenidos	51,51	3,73	7,24	2,58	0,072	0,177	Baja Inestabilidad
Cuerpo de agua	0,11	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Matorrales	29,47	3,32	11,27	2,29	0,113	0,499	Mediana inestabilidad
Pastizales	24,22	0,6	2,48	0,41	0,025	-0,598	Alta Estabilidad
Servicios turísticos	0,96	0,00	0,00	0,00	0,000	-1,000	Alta Estabilidad
Servicios urbanos	0,07	0,01	14,29	0,01	0,143	0,617	Mediana inestabilidad
Usos agrícolas	18,12	0,21	1,16	0,14	0,012	-0,810	Alta Estabilidad
Usos urbanos	12,94	0,34	2,63	0,23	0,026	-0,582	Alta Estabilidad
	144,84	8,74	46,2	6,03	PPs = 0,060		

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

De 9 categorías de uso, 5 poseen un F.C. que tienden hacia la estabilidad, es decir, que tienen una menor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (cuerpos de agua, pastizales, servicios turístico, usos agrícolas y usos urbanos), ver Tabla 13 y Gráfico 15. Estos a pesar de su cantidad, apenas representan un 39% de la superficie de la cuenca, mientras que las otras 4 categorías representan el 61% (bosques intervenidos, bosques no intervenidos, matorrales y servicios urbanos). Las 5 categorías más estables son las que tienen menos densidad de deslizamientos (ver Tabla 13, cuarta columna), mientras que las 4 más inestables tienen mayor densidad de deslizamientos.

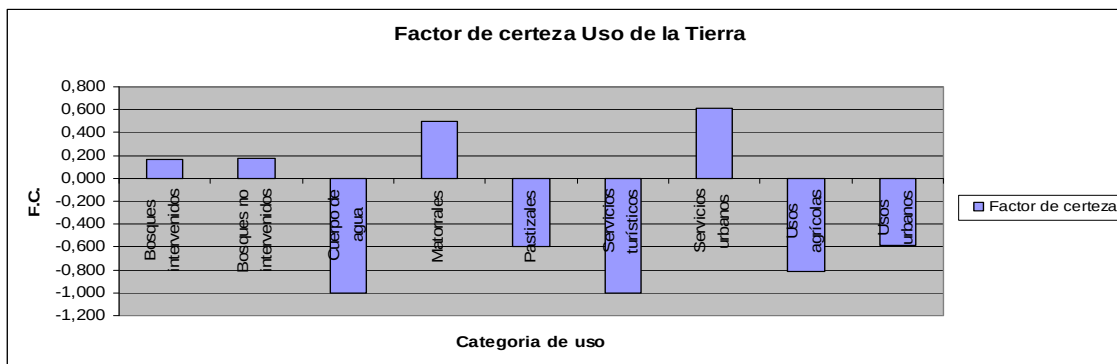


Gráfico 15. Distribución del F.C. para las categorías de uso de la tierra.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

En cuanto a la distribución espacial del F.C. para los usos de la tierra (ver Figura 30) predominan los polígonos de baja inestabilidad (lo que es bosque no intervenido (36%) y bosque intervenido (5%) que es casi un 41% de la cuenca, siguen los polígonos de alta estabilidad (cuerpos de agua, pastizales, servicios turísticos, usos agrícolas y urbanos) con un 39% y finalmente, siguen los de mediana inestabilidad (que son matorrales y servicios urbanos) con un 20% de la cuenca.

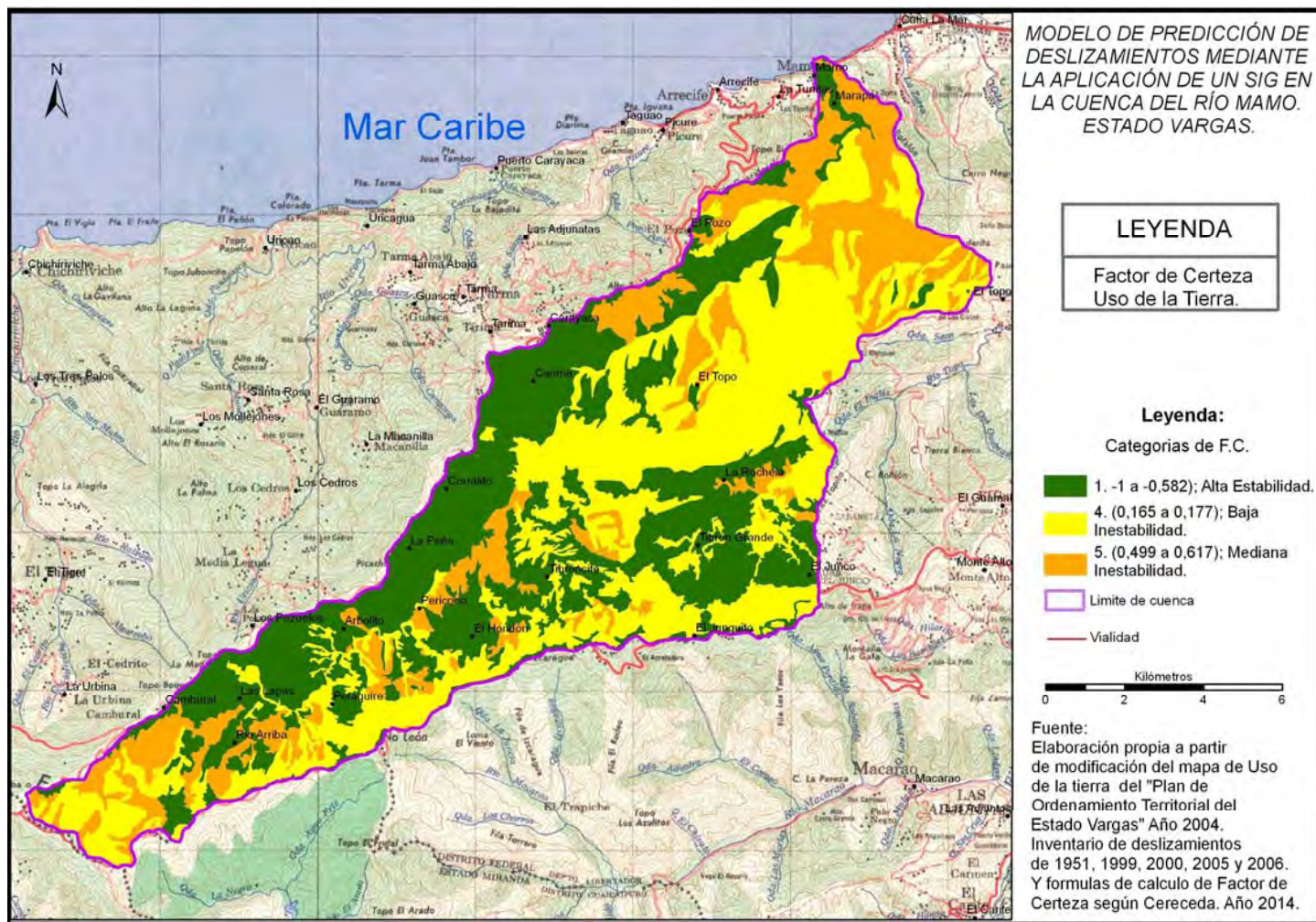


Figura 30. Factor de certeza para el uso de la tierra. Fuente: Elaboración propia a partir del “Mapa de Uso de la tierra” de la cuenca del Río Mamo y del calculo de Factor de Certeza a cada categoría del mismo. Año 2014.

7.1.5. Factor de certeza para la Cobertura vegetal. Para este caso, se calcularon las superficies de deslizamientos que hay en las distintas categorías de cobertura vegetal y su F.C., lo que se puede ver la Tabla 14.

Tabla 14. Superficies de deslizamientos y Factor de Certeza con respecto a categorías de cobertura vegetal:

Tipo de cobertura vegetal	Área (Km2) cobertura vegetal	Área mov. en masa por Categoría (Km2)	% con respecto a categoría de cobertura vegetal cuenca	% del total de cuenca	PPa	Factor de certeza	Clase de susceptibilidad
Agricultura	19,8	0,31	1,57	0,21	0,016	-0,745	Alta Estabilidad
Bosque	54,1	3,68	6,80	2,54	0,068	0,125	Baja Inestabilidad
Cuerpo de agua	0,1	0,00	0,00	0,00	0,000	-1	Alta Estabilidad
Herbazal	15,2	0,26	1,71	0,18	0,017	-0,729	Alta Estabilidad
Matorral	47,4	4,2	8,86	2,90	0,089	0,347	Mediana Inestabilidad
Suelo desnudo	0,9	0,05	5,56	0,03	0,056	-0,071	Mediana Estabilidad
Urbano	7,1	0,24	3,38	0,17	0,034	-0,449	Mediana Estabilidad
	144,6	8,74	27,87	6,04	PPs = 0,060		

Fuente: Elaboración propia en base a cálculos propios.

Como se vio en los “Factores condicionantes y detonantes” del Capítulo VI la cobertura de matorral y bosque son las que poseen mayores superficies de deslizamientos y por lo tanto, como se puede apreciar en la Tabla 14 y el Gráfico 16 son las de mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (mediana inestabilidad para el matorral y baja inestabilidad para el bosque). En cuanto a su distribución en el espacio, estas 2 categorías en conjunto ocupan un poco más del 70% de la cuenca (ver Figura 31). A pesar de que tres de las 7 categorías tienen una alta estabilidad (ver Tabla 14 y Gráfico 16), si vemos la distribución espacial de los polígonos nos damos cuenta de que no representan más del 24% de la cuenca (ver Figura 31).

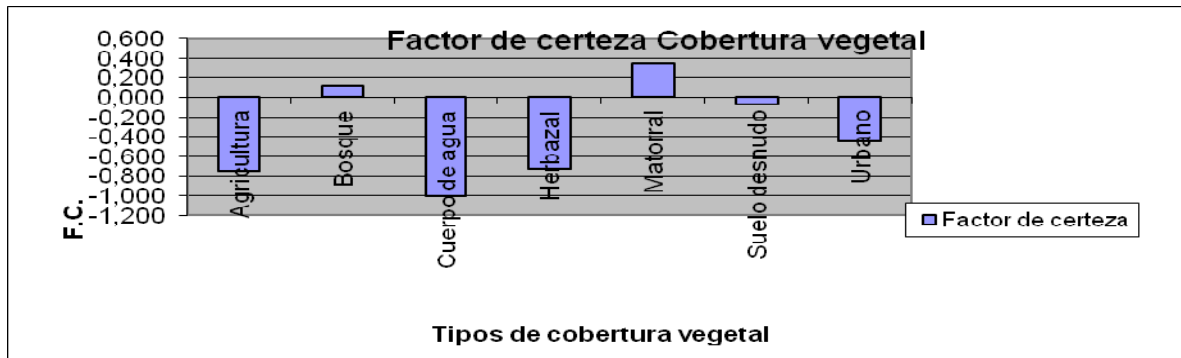


Gráfico 16. Distribución del F.C. para las categorías de cobertura vegetal.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

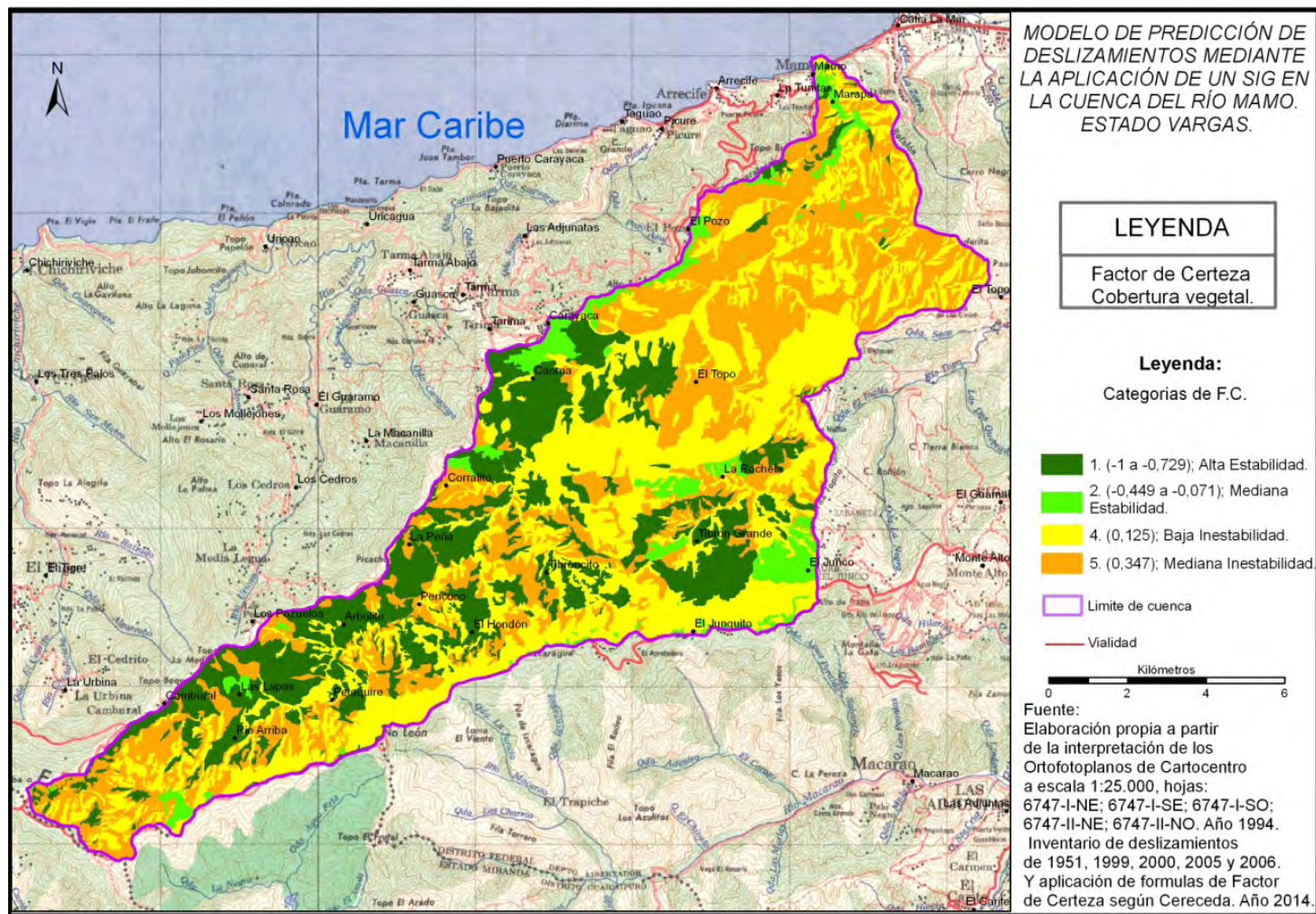


Figura 31. Factor de certeza para la cobertura vegetal. Fuente: Elaboración propia a partir del “Mapa de Cobertura vegetal” de la cuenca del Río Mamo y del calculo de Factor de Certeza a cada categoría del mismo. Año 2014.

7.2. CATEGORÍAS (ÍNDICES) DE SUSCEPTIBILIDAD PARA LA CUENCA

En esta etapa de la investigación a cada capa de los “Factores de ocurrencia” se les agrego una columna llamada “Grado_F_C” donde a cada categoría se le dio un valor que va de 1 a 6, lo que significa que los valores: 1. alta estabilidad, 2. mediana estabilidad, 3. incertidumbre, 4. baja inestabilidad, 5. Mediana inestabilidad y 6. Alta inestabilidad (ver Tabla 3 de Factor de Certeza en el Capítulo V), **en este caso solo se alcanzo hasta la quinta (5) categoría, ya que ningún “factor” tuvo la calificación de seis (6), o sea, alta inestabilidad.** Posteriormente, se transformaron todas las capas de “factores de ocurrencia” que estaban en formato vectorial a formato raster para poder sumarlas de dos en dos y así poder obtener un mapa final de susceptibilidad. Por ejemplo: se sumaron los raster de geomorfología y geología (con el empleo del comando “Spatial Analyst” de ArcGis) y luego se seleccionó la opción de algebra o calculo de mapas (“Raster Calculator”). En este paso, primero se elige la “layer” o capa en formato raster llamada “geomorfo”, luego el signo “+” y a continuación la otra capa en formato raster llamada “Geologia”, hecho esto se procedió a seleccionar la opción “Evaluate” para hacer el calculo de suma o adición de las 2 capas rasters mencionadas. El producto resultante (lo denomine “geolo_geomorf.grid”), al mismo se le reclasifico, es decir; se hizo la “normalización” en escala del 1 al 6 (en realidad del 1 al 5) del F.C. luego de promediar los intervalos o categorías que dio la suma. En el caso siguiente sume la geomorfología, la geología y el uso con los mismos comandos de ArcGis y se normalizo en escala del 1 al 5 del F.C. luego de promediar los intervalos o categorías que dio la suma y lo llame “Geo_geom_uso. Posteriormente, se sumaron 4 factores (geomorfología, geología, uso y cobertura vegetal), se normalizaron esos valores en una escala de 1 a 5. y, posteriormente se sumaron los 5 factores (geomorfología, geología, uso, cobertura vegetal y pendiente), se normalizaron esos valores en la escala de 1 a 5 de F.C. para obtener finalmente el mapa de susceptibilidad de la cuenca (ver Figura 32). En este caso, predomina la categoría de “Incertidumbre” con un 47% de la superficie de la cuenca, luego le sigue en importancia “Baja

inestabilidad” con un 29%, “Mediana estabilidad” con un 23% y “Mediana inestabilidad” con un 1%, prácticamente no hay “Alta estabilidad” ya que esta categoría no llega ni al 1%. **Se puede decir que hay menores probabilidades de ocurrencia de deslizamientos en la cuenca, ya que el 70% de las categorías (47% de “Incertidumbre” + mas 23% de “Mediana estabilidad”) están en el rango de valores que van de 0 a -1 y, tienden a ser mas estables.** Ver Gráfico 17.

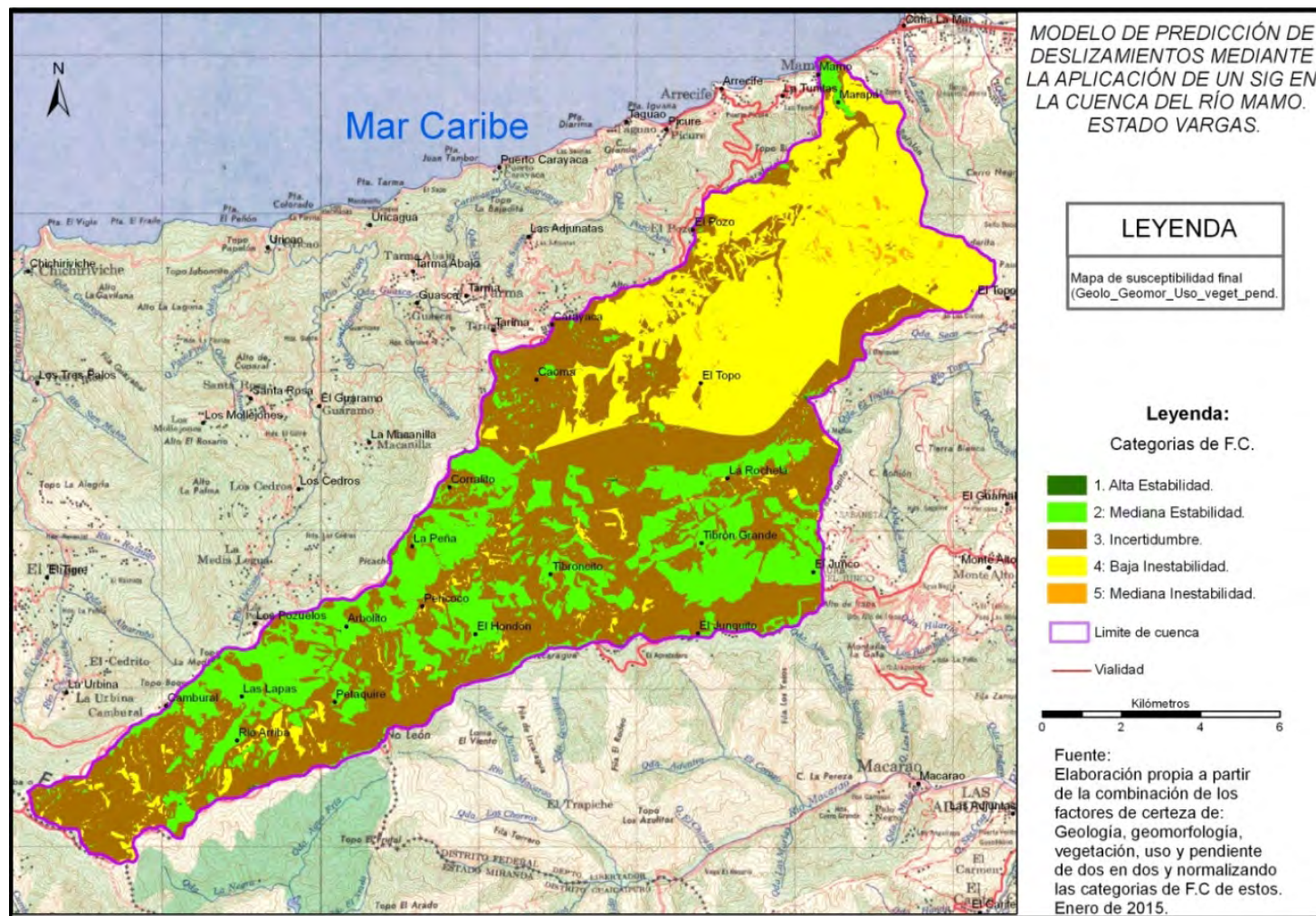


Figura 32. Mapa de susceptibilidad final de la cuenca. Fuente: Elaboración propia a partir de la combinación de los F.C. de geología, geomorfología, cobertura vegetal, uso y pendiente de dos en dos y normalizando las categorías de F.C. de estos. Enero de 2015.

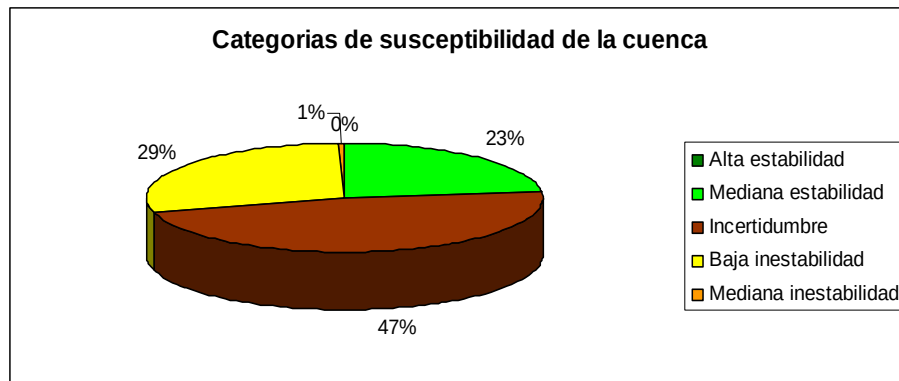


Gráfico 17. Categorías de Susceptibilidad para la Cuenca del Río Mamo.

Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

Para saber cuales son los principales factores de ocurrencia cuyos valores incidieron mas en la generación del mapa de susceptibilidad, se utilizo un mapa de deslizamientos de la cuenca (que se mencionó al principio de este capítulo) el cual se superpuso con cada una de las capas combinadas de los valores reclasificados de F.C. (estas ultimas volvieron a pasarse de formato raster a formato vectorial para hacer la superposición). Aquellos factores de ocurrencia que muestran una relación estrecha con los deslizamientos ocurridos en la cuenca, es lo que en este caso se le llamaría “factores significativos”.

Como se observa en el Gráfico 18 (a), la primera combinación de capas y su superposición con los deslizamientos de la cuenca muestra que las categorías de F.C. que agrupan a la mayoría de los deslizamientos ocurridos en la cuenca son de “Baja inestabilidad” y “Mediana inestabilidad”. Al sumar una capa mas como el uso de la tierra se observa que aumenta un poco mas la cantidad de deslizamientos ocurridos para la categoría de “Baja inestabilidad”, pero se reduce para “Mediana inestabilidad” y “Mediana estabilidad” y aumenta la “Incertidumbre” (ver Gráfico 18 (b)), al parecer el uso no es factor determinante en el aumento de la inestabilidad, pero si en generar incertidumbre. Al agregar la capa de cobertura vegetal (ver Gráfico 18 (c)) se reduce un poco la concentración de deslizamientos en la categoría de “Baja inestabilidad” y de “Incertidumbre”, pero tiende a aumentar de manera considerable la concentración de ellos en la categoría de “Mediana inestabilidad”. En este caso pareciera que la

cobertura vegetal fuese un factor determinante que contribuye a aumentar la inestabilidad de la cuenca a niveles parecidos a los de geología y geomorfología. Cuando se agrega la ultima capa que es la pendiente en grados (ver Gráfico 18 (d)) aumenta la concentración de deslizamientos de manera bastante significativa para la categoría de “Baja inestabilidad” y también para la “Incertidumbre”, pero cae drásticamente para la categoría de “Mediana inestabilidad” e incluso aumenta un poco para la categoría de “Mediana inestabilidad”, en este ultimo caso la pendiente tampoco parece ser un factor determinante en la susceptibilidad de deslizamientos ya que reduce un tanto la inestabilidad de manera general. En resumen los factores significativos en la susceptibilidad de la cuenca son la geología, geomorfología y cobertura vegetal.

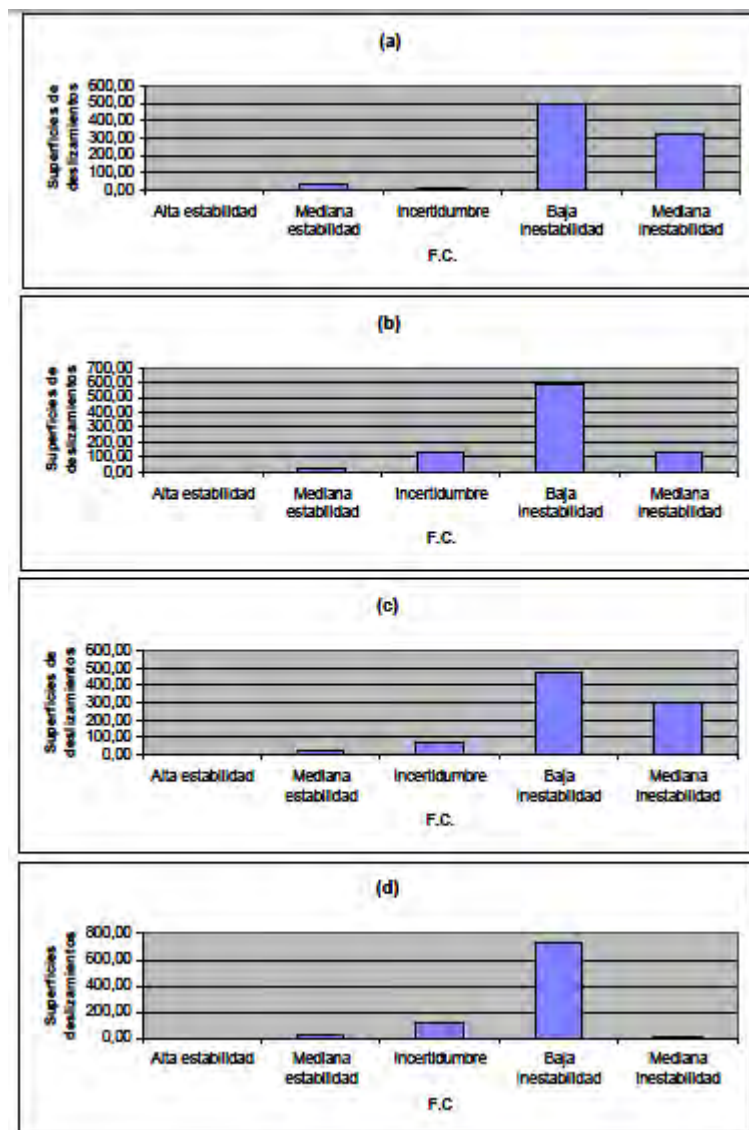


Gráfico 18. Factores significativos en la susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca del Río Mamo. (a) superposición de deslizamientos con 2 capas combinadas (Geología y geomorfología). (b) superposición de deslizamientos con 3 capas combinadas (Geología, geomorfología y uso). (c) superposición de deslizamientos con 4 capas combinadas (Geología, geomorfología, uso y cob. vegetal). (d) superposición de deslizamientos con 5 capas combinadas (Geología, geomorfología, uso, cob. Vegetal y pendiente).

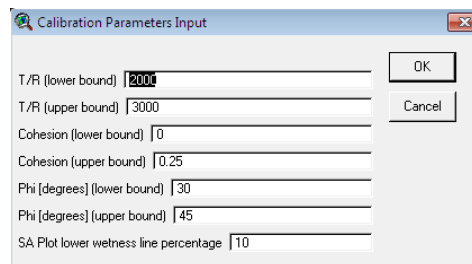
Fuente: Elaboración propia, en base a cálculos propios.

7.3. MODELO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Como ya se menciona en el Capítulo V, el Modelo de estabilidad de taludes se utiliza para calibrar el mapa de susceptibilidad. Se basa principalmente en el concepto

de Factor de seguridad (FS). Para este trabajo, el Factor de seguridad se calcula de manera automática mediante el modelo SINMAP (Stability Index MAPing), el cual es un software estadístico-matemático para ArcGis y ArcView, que trabaja con el FS para poder conocer el grado de estabilidad de laderas. En este caso se corrió el Modelo SINMAP, el cual integra la computación y el mapeo del índice de estabilidad de taludes a partir de información geográfica, principalmente información de elevación digital (ver Figura 17) del Capítulo VI) obtenida de las curvas de nivel del área, “se basa en el Modelo de Estabilidad Infinita de Taludes” (Cereceda, 2006).

Una vez obtenido el Modelo Digital del Terreno (MDT) con las curvas de nivel del área de estudio se procedió a hacer una “calibración simple de la región” (Make Single Calibration Region Theme), luego el programa pide que se haga una “calibración de parámetros de entrada” (Calibration Parameters Input), estos son dados por defecto y se dejan igual (ver Figura 33). Es importante señalar que los valores 2000 (T/R_lower bound) y 3000 (T/R_upper bound) corresponderían a una precipitación real para la cuenca de entre 50 y 30 mm/día (Lan *et al.* (2004).



Parameter	Value
T/R (lower bound)	2000
T/R (upper bound)	3000
Cohesion (lower bound)	0
Cohesion (upper bound)	0.25
Phi [degrees] (lower bound)	30
Phi [degrees] (upper bound)	45
SA Plot lower wetness line percentage	10

Figura 33. Calibración de parámetros de entrada de SINMAP. Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

Después de esto se seleccionaron los “puntos de deslizamiento del área de estudio” (Select Landslide Point Theme) los cuales se observan en la Figura 26. En principio se obtuvo un mapa de 6 categorías, el cual se redujo de 6 a 4 categorías porque así lo exige el programa. A partir del MDT y los puntos de deslizamientos el programa genera de manera automática en el procesamiento de la malla del MDT: rellenado de espacios vacíos u hondos del modelo digital de elevación del terreno (pit-filled DEM, ver Figura 34), dirección de flujo (Flow Direction, ver Figura 35), pendiente (slope, ver Figura 36) y área de captación (Contributing Area, ver Figura 37).

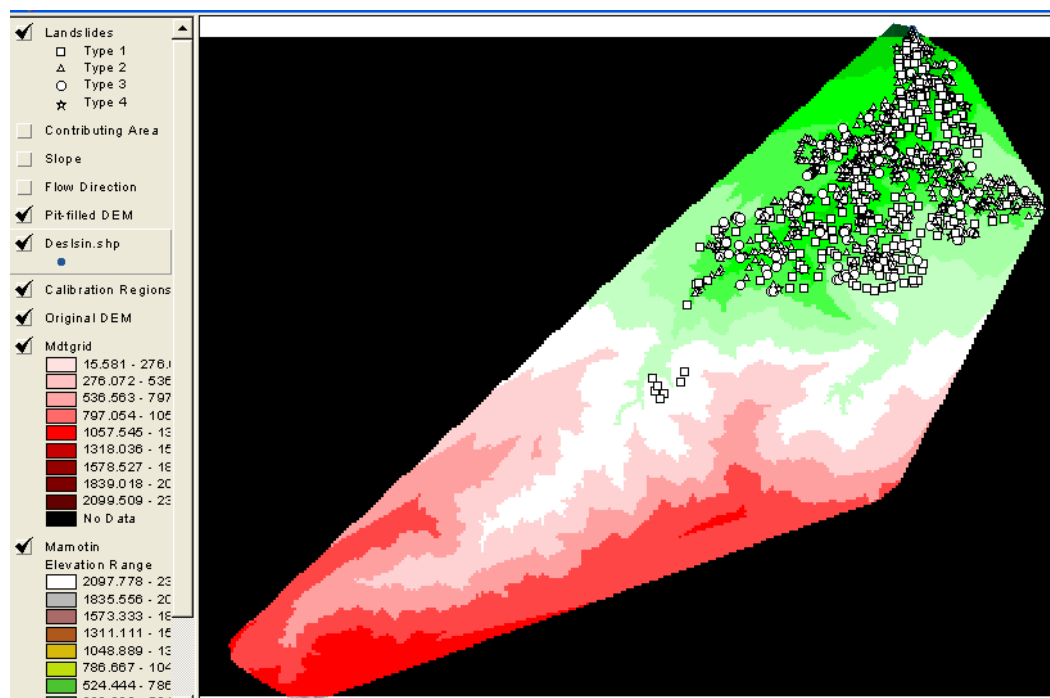


Figura 34. Rellenado de espacios vacíos del MDT (pit-filled DEM). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

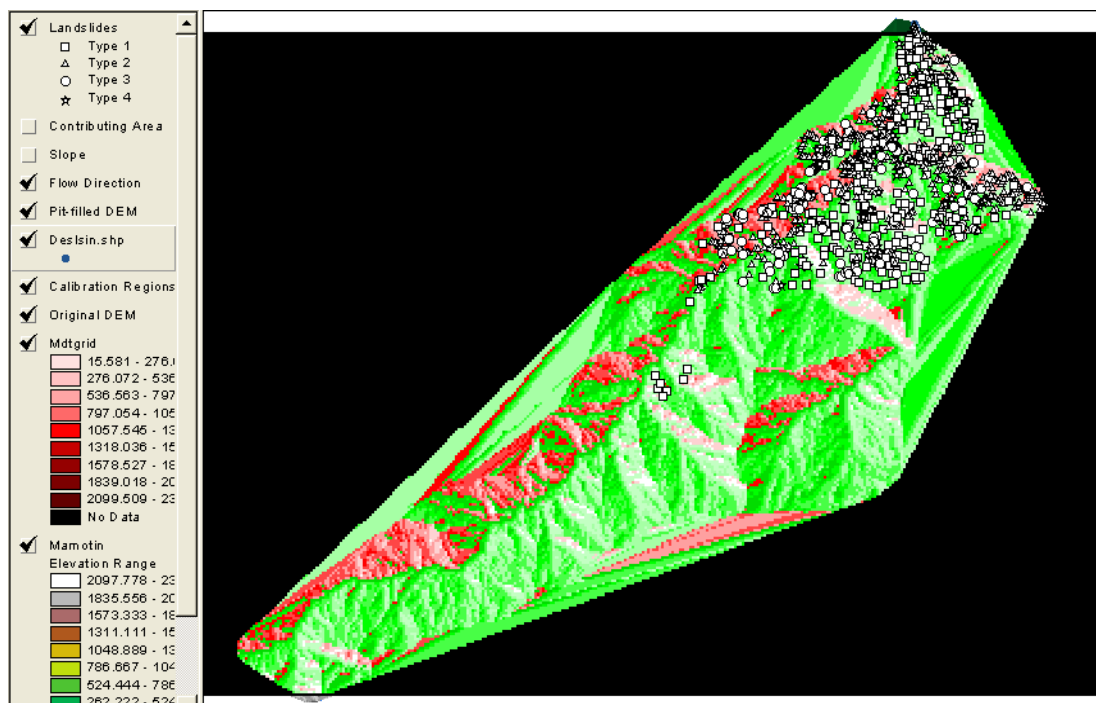


Figura 35. Dirección de flujo (Flow Direction). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

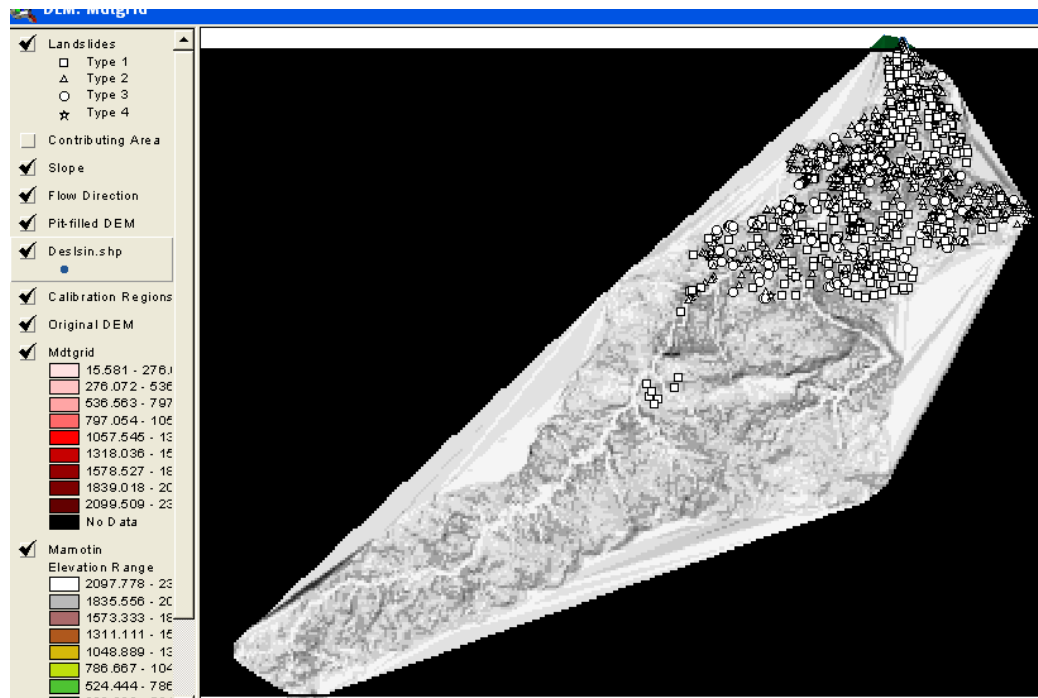


Figura 36. Pendiente (slope). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

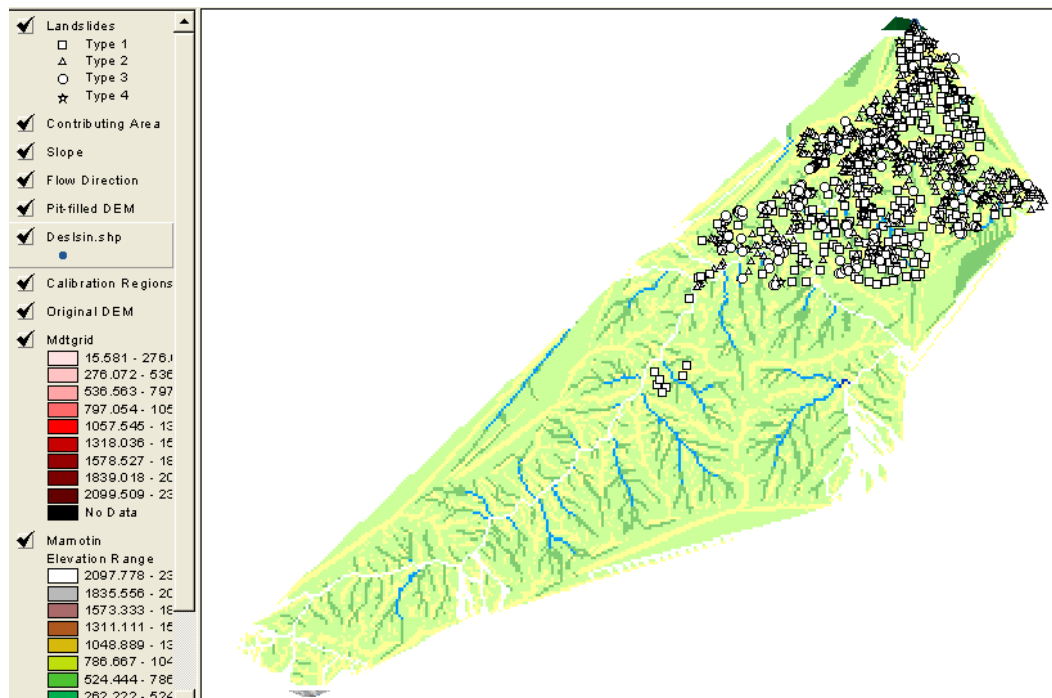


Figura 37. Area de captación (Contributing Area). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

Estas capa generadas son utilizadas por el programa para hacer el “Análisis de estabilidad” (Stability Analysis). Al correr el “Análisis de estabilidad” se genera de manera directa el mapa de “Índices de estabilidad de taludes” (Stability Index) y el mapa de “Saturación” (Saturation). Ver Figuras 38 y 39.

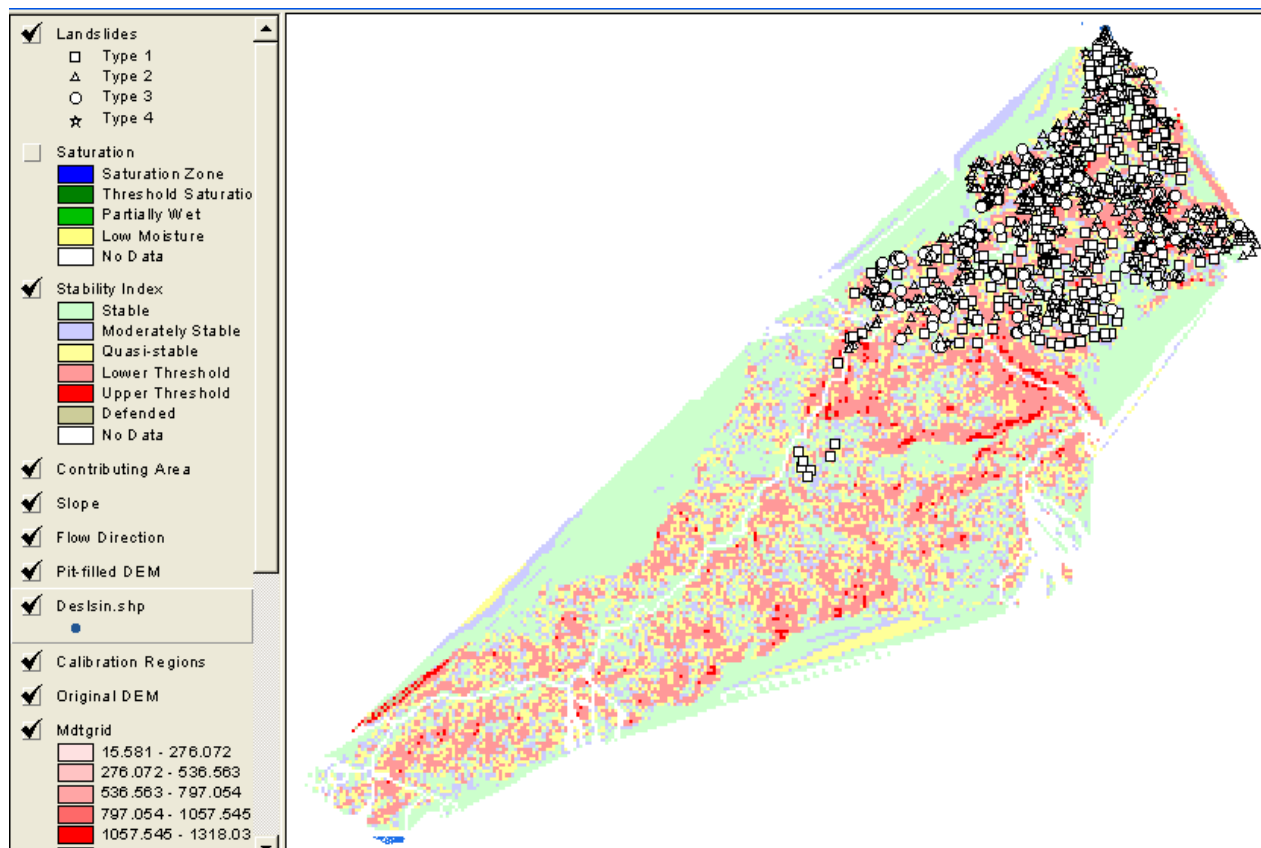


Figura 38. Índices de estabilidad de taludes” (Stability Index). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

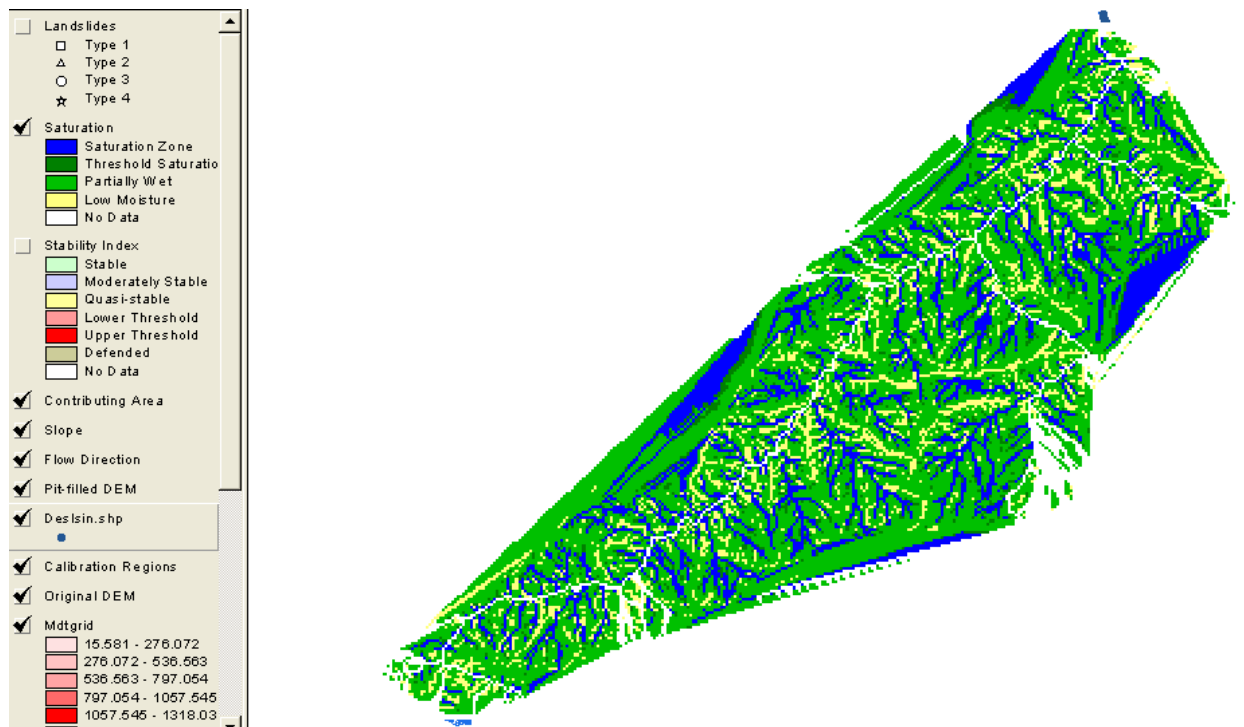
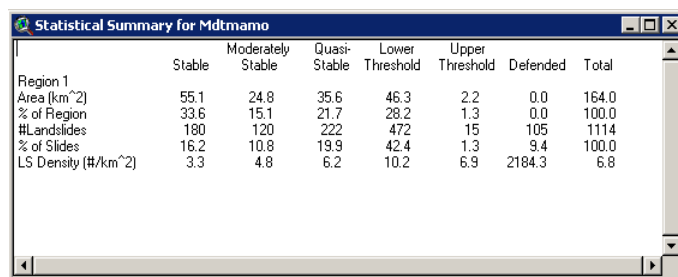


Figura 39. Saturación de humedad del suelo (Saturation). Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

El programa SINMAP también genera un cuadro estadístico donde se ve cuales son los índices de estabilidad obtenidos para la cuenca (“Stable”_Estable, “Moderately Stable”_Moderadamente estable, “Quasi Stable”_Nominalmente estable, “Lower Threshold”_ Umbral inferior de inestabilidad, “Upper Threshold”_ Umbral superior de inestabilidad y “Defended”_Inestable), la superficie que ocupan (Area (Km²)), el porcentaje que ocupan de la cuenca (% of Region), la cantidad de deslizamientos por cada categoría o índice (# Landslides), el porcentaje de deslizamientos por cada categoría (% Slides) y la densidad de deslizamientos por kilómetro cuadrado (LS Density (# / Km²). Ver Figura 40.



	Stable	Moderately Stable	Quasi-Stable	Lower Threshold	Upper Threshold	Defended	Total
Region 1							
Area (km ²)	55.1	24.8	35.6	46.3	2.2	0.0	164.0
% of Region	33.6	15.1	21.7	28.2	1.3	0.0	100.0
#Landslides	180	120	222	472	15	105	1114
% of Slides	16.2	10.8	19.9	42.4	1.3	9.4	100.0
LS Density (#/km ²)	3.3	4.8	6.2	10.2	6.9	2184.3	6.8

Figura 40. Cuadro estadístico de índices de estabilidad. Fuente: Elaboración propia a partir del Modulo de SINMAP para ArcView. Agosto de 2014.

Este mapa de “Índices de estabilidad de taludes” (Stability Index) generado en SINMAP se ajusto un poco para poder presentarlo en este trabajo (ver Figura 41), la categoría que predomina es la de “Lower Threshold” (Umbral inferior de inestabilidad) que abarca el 36% de la cuenca (ver Gráfico 19), luego sigue en importancia la categoría de Quasi Stable (Nominalmente estable) abarcando un 24% de la cuenca, en tercer lugar la categoría de “Stable” (estable) con un 23% como ya se menciono, en cuarto lugar Moderately Stable (Moderadamente estable) con un 16% y finalmente la categoría de Upper Threshold (Umbral superior de inestabilidad) con apenas un 1%. Ver Gráfico 19.

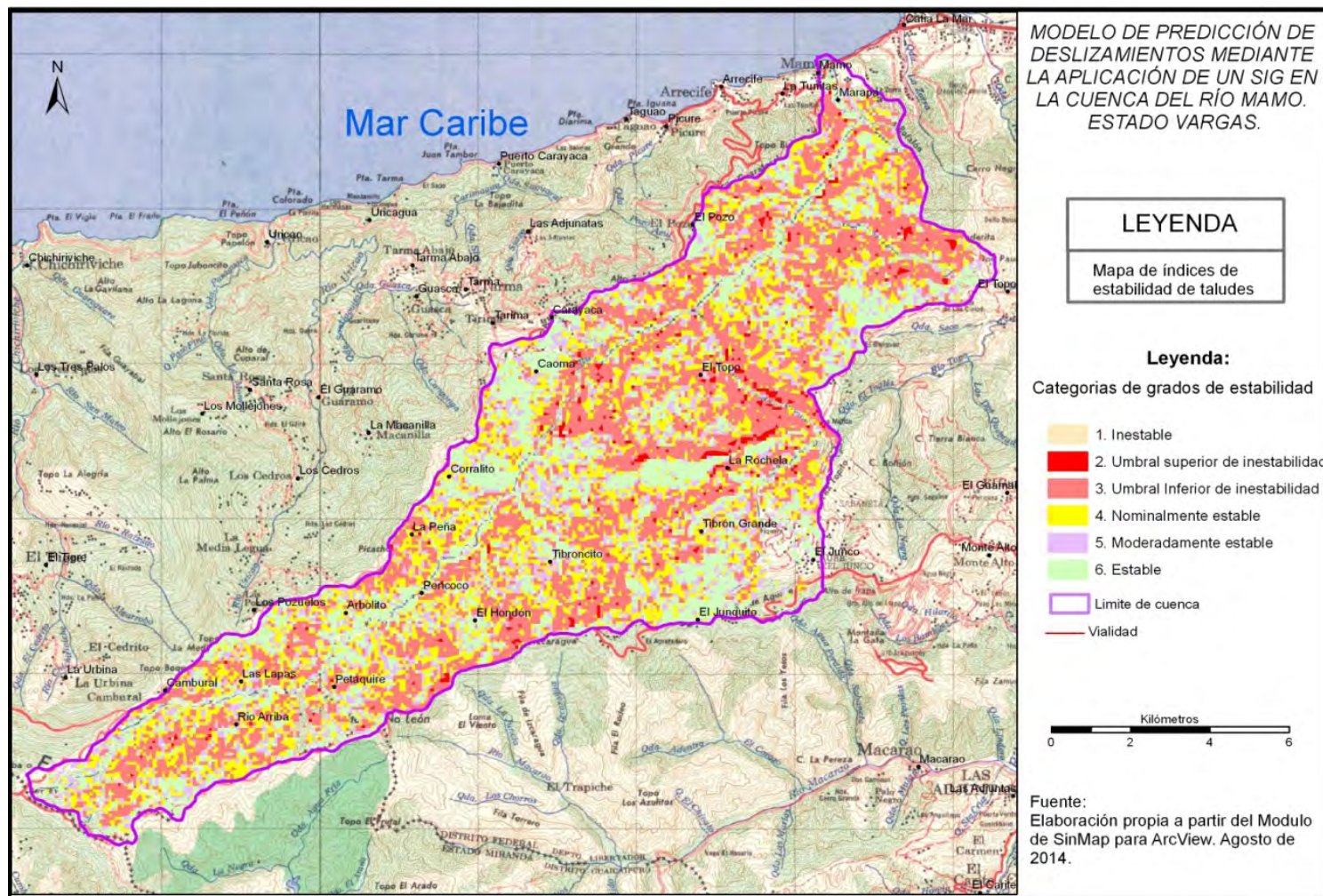


Figura 41. Mapa de índices de estabilidad de taludes. Fuente: Elaboración propia a partir del uso del Modulo SINMAP para el programa ArcView. Agosto de 2014.

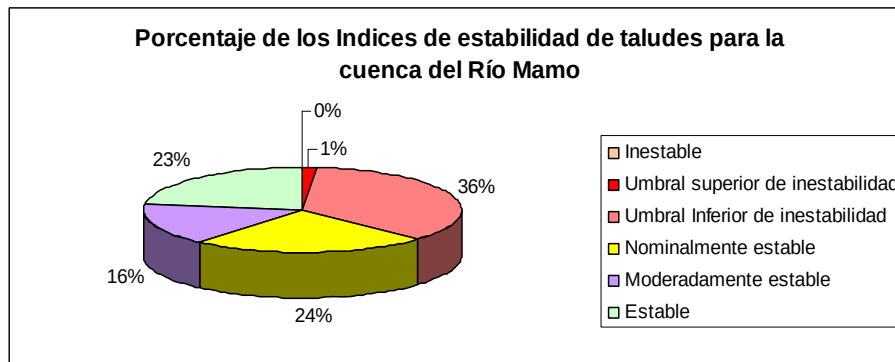


Gráfico 19. Porcentaje de los índices de estabilidad de taludes para la Cuenca del Río Mamo.
Fuente: Elaboración propia, con base a cálculos propios.

Finalizando con el Modelo de Estabilidad de Taludes para la cuenca del Río Mamo, **se puede decir que el 63% de la cuenca tiende a ser “estable”**, ya que un 24% es “Nominalmente estable” (“Baja estabilidad” según sus rangos de valor IS que se ajustan a la Tabla 4 del Capítulo V), el 23% es “Estable” (“Alta estabilidad” según sus rangos de valor IS que se ajustan a la Tabla 4 del Capítulo V) y un 16% que es “Moderadamente estable” (“Estabilidad media” según sus rangos de valor IS que se ajustan a la Tabla 4 del Capítulo V). El resto de las categorías que tienden a la inestabilidad solo suman un 37% de la superficie de la cuenca, lo que coincide de alguna manera con el mapa de susceptibilidad de la cuenca, donde el 70% de las categorías tienden a ser “estables”, o dicho de otra manera, el riesgo a deslizamientos es bajo.

7.4. VALIDACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD

Como se menciono anteriormente las categorías de estabilidad para el Mapa de Susceptibilidad abarcan un 70% de la cuenca, mientras que para el Modelo de Estabilidad de Taludes las mismas categorías abarcan un 63%. Las diferencias son que el Modelo de Estabilidad de Taludes posee mas de un 20% de áreas que son estables, mientras que el Mapa de susceptibilidad no llega al 1% de áreas estables, de hecho al tratar de superponer los mapas se observa que la mayoría de las zonas del primero que son estables coinciden en gran medida con las categorías de incertidumbre y en menor medida con la de mediana estabilidad del segundo. Donde

si hay bastante coincidencia es entre la categoría de “Umbral inferior de inestabilidad” del Modelo de estabilidad de taludes y la categoría de “Baja inestabilidad” en el Mapa de susceptibilidad sobre todo en la parte media baja de la cuenca.

7.5. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS

Como también ya se dijo anteriormente la predicción de deslizamientos se logra mediante la combinación de la susceptibilidad de deslizamientos derivada de cálculos de Factor de Certeza más la estimación del grado de estabilidad de taludes con SINMAP para calibrar la susceptibilidad de la cuenca y un fenómeno temporal excepcional como precipitaciones máximas. El Modelo de estabilidad de taludes nos ha servido para calibrar el mapa de susceptibilidad, por eso es que se hace la comparación de los 2 modelos.

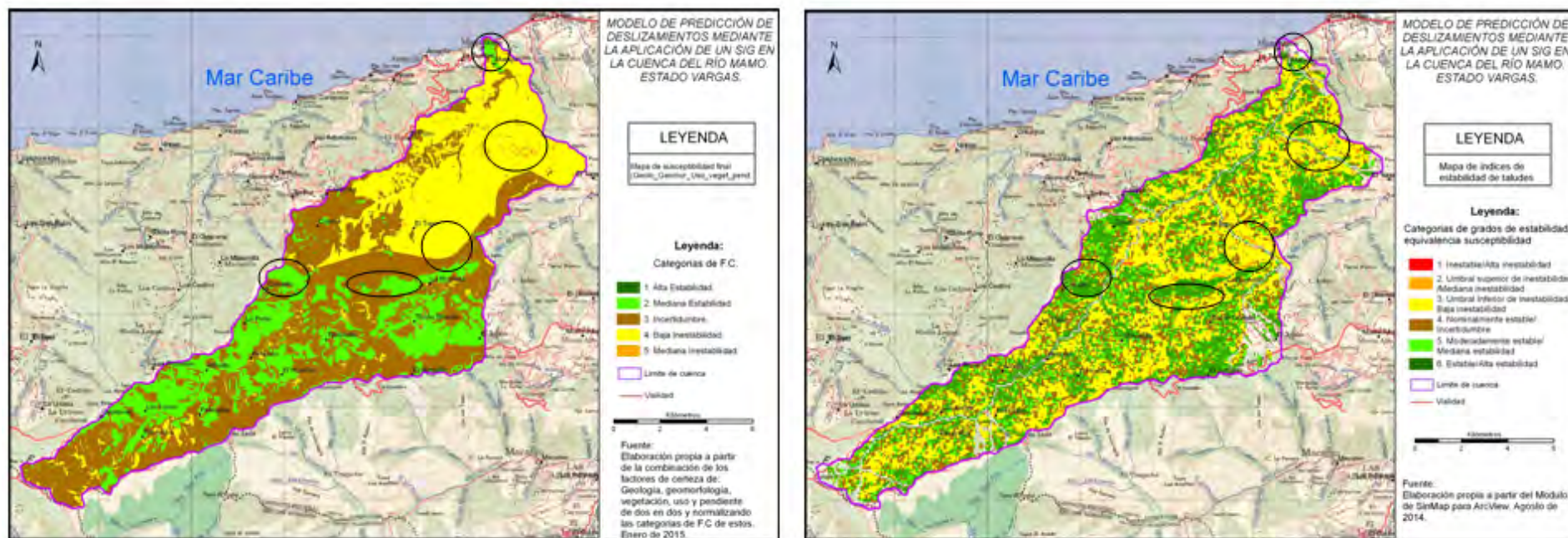
Al analizar los dos modelos vemos que el Modelo de Susceptibilidad a Deslizamiento basado en el factor de certeza (F.C.) trabaja con valores que van desde -1 (alta estabilidad) hasta 1 (Alta inestabilidad), sus rangos o categorías se pueden observar en la Tabla 3; en cambio el Modelo de Estabilidad de laderas o taludes trabaja con valores o índices de estabilidad (IS) que van desde 0 (alta inestabilidad) hasta $>1,5$ (alta estabilidad), sus rangos o categorías se pueden observar en la Tabla 4. Esta es una gran diferencia que hay entre ellos.

Otra diferencia es que el Modelo de Susceptibilidad se obtiene de la suma de factores de ocurrencia que pueden ser claves en generar deslizamientos valiéndose de un método probabilístico llamado F.C. que relaciona estos factores con los inventarios de deslizamientos ya ocurridos en una cuenca, mientras que el Modelo de estabilidad de Taludes se obtiene a partir de un MDT y otros parámetros como inventario de deslizamientos ocurridos en una cuenca y valores conocidos de precipitación y humedad que se cargan a un programa llamado SINMAP que calcula un Factor de Seguridad para establecer unos Índices de Estabilidad (IS). Siguiendo con las diferencias, el mapa del Modelo de estabilidad de taludes al generarse a partir del MDT le da mayor peso a la pendiente en el caso de las categorías que presentan

un “Umbral superior de inestabilidad” son zonas de mayor pendiente y aquellas que son “Estables” se caracterizan por tener una baja pendiente, por eso es que se localizan alrededor de los ríos y quebradas de la cuenca (ver Figura N° 41), en el Mapa de Susceptibilidad tuvieron mayor peso para las áreas de mayor inestabilidad (“Mediana inestabilidad” en este caso) las capas de geología (Mármol y anfibolitas de la Unidad geológica “Mármol de Antímano”) y la vegetación (Matorral), ver Figura 32.

En cuanto a coincidencias ninguno de los dos mapas prácticamente tiene zonas de “Alta inestabilidad” (Modelo de Susceptibilidad) o “Inestabilidad” (Modelo de Estabilidad de Taludes).

Donde si hay bastante coincidencia es entre la categoría de “Umbral inferior de inestabilidad” del Modelo de Estabilidad de Taludes y la categoría de “Baja inestabilidad” en el Mapa de Susceptibilidad sobre todo en la parte media baja de la cuenca (ver Figura 42, donde se ve encerrado en círculos esas coincidencias, este caso en los 2 mapas se ve en color amarillo). Hay otras pequeñas coincidencias en los rangos de “Moderadamente estable” y “Estable” del Modelo de Estabilidad de Taludes con las categorías de “Alta estabilidad” y “Mediana estabilidad” del modelo de susceptibilidad (ver Figura 42, donde se ve encerrado en círculos esas coincidencias, este caso en los 2 mapas se ve entre color verde oscuro y verde claro). En fin, se puede decir que las mayores coincidencias están en la parte media a media baja de la cuenca que es donde se han dado lugar los deslizamientos ocurridos entre 1951 y 1999. Al final parecieran complementarse.



○ Coincidencias o similitudes entre los 2 mapas.

Figura 42. Coincidencia o similitudes entre Mapa de Susceptibilidad y Mapa de Índices de Estabilidad de Taludes de la Cuenca del Río Mamo. Fuente: Elaboración propia a partir de los Mapas de Susceptibilidad e Índices de Estabilidad de Taludes (este ultimo se modifico los colores de la leyenda para hacerlo comparable con los de las categorías de Factor de Certeza: El rojo es “Inestable” y es equivalente a Alta inestabilidad; El naranja es “Umbral superior de inestabilidad” y equivale a Mediana inestabilidad; El amarillo es “Umbral inferior de inestabilidad” y equivale a Baja inestabilidad; el marrón es “Nominalmente estable” y equivale a Incertidumbre; El verde claro es “Moderadamente estable” y equivale a Mediana estabilidad; Y el verde oscuro es “Estable” y equivale a Alta estabilidad). Abril de 2015.

Cuando relacionamos los resultados del Modelo de Susceptibilidad con algunos deslizamientos vistos en campo se confirma de alguna manera el peso que tienen algunas categorías de los factores de ocurrencia utilizadas en el cálculo del Factor de Certeza en la aparición de esos deslizamientos. Se tomaron a manera de ejemplo 4 deslizamientos identificados en campo y se los ubicó en el mapa de susceptibilidad para ver que tan inestable es el terreno donde aparecieron (incluso también se los ubico en el mapa generado a partir del Modelo de Estabilidad de taludes). En la Figura 43, la imagen del deslizamiento identificado como (a) se encuentra ubicado en la categoría de “Incertidumbre”, se caracteriza por encontrarse en una zona de categoría convexa en cuanto a la geomorfología, en cuanto a la geología este punto pertenece a la unidad geológica Mármol de Antimano (la litología es de mármoles y anfibolitas), tanto la cobertura vegetal como el tipo de uso son agrícolas y sus rangos de pendiente van de 22,2 - 33,01 grados. El deslizamiento de la imagen identificada como (b) se encuentra ubicado en la categoría de “Baja inestabilidad” se caracteriza por encontrarse en una zona de categoría cóncava en cuanto a la geomorfología, en cuanto a la Geología este punto pertenece a la unidad geológica Esquistos de Tacagua (la litología es de

Esquisto grafitoso y epidocita), tanto la cobertura vegetal como el tipo de uso son de matorral y sus rangos de pendiente van de 33,02 - 64 grados. El deslizamiento de la imagen identificada como (c) se encuentra ubicado en la categoría de “Baja inestabilidad” se caracteriza por encontrarse en una zona de categoría cóncava en cuanto a la geomorfología, en cuanto a la geología este punto pertenece a la unidad geológica Esquistos de Tacagua (la litología es de Esquisto grafitoso y epidocita), tanto la cobertura vegetal como el tipo de uso son de matorral y sus rangos de pendiente van de 22,02 – 33,01 grados. El deslizamiento de la imagen identificada como (d) se encuentra ubicado en la categoría de “Baja inestabilidad” se caracteriza por encontrarse en una zona de categoría cóncava en cuanto a la geomorfología, en cuanto a la geología este punto pertenece a la unidad geológica Mármol de Antimano (la litología es de mármoles y anfibolitas), tanto la cobertura vegetal como el tipo de uso son de bosque (bosque no intervenido) y sus rangos de pendiente van de 33,02 -

64 grados (ver Figura 43). 3 De los 4 deslizamientos están en zonas de baja inestabilidad y tuvieron su origen en que combinan mas de 2 elementos de peligrosidad de los factores significativos como geología (Mármol de Antimano), geomorfología (concavidad) y cobertura vegetal (matorral) y algunas veces la pendiente mas alta (de 33,02 a 64 grados) que si es un factor de peso en el Modelo de estabilidad de taludes.

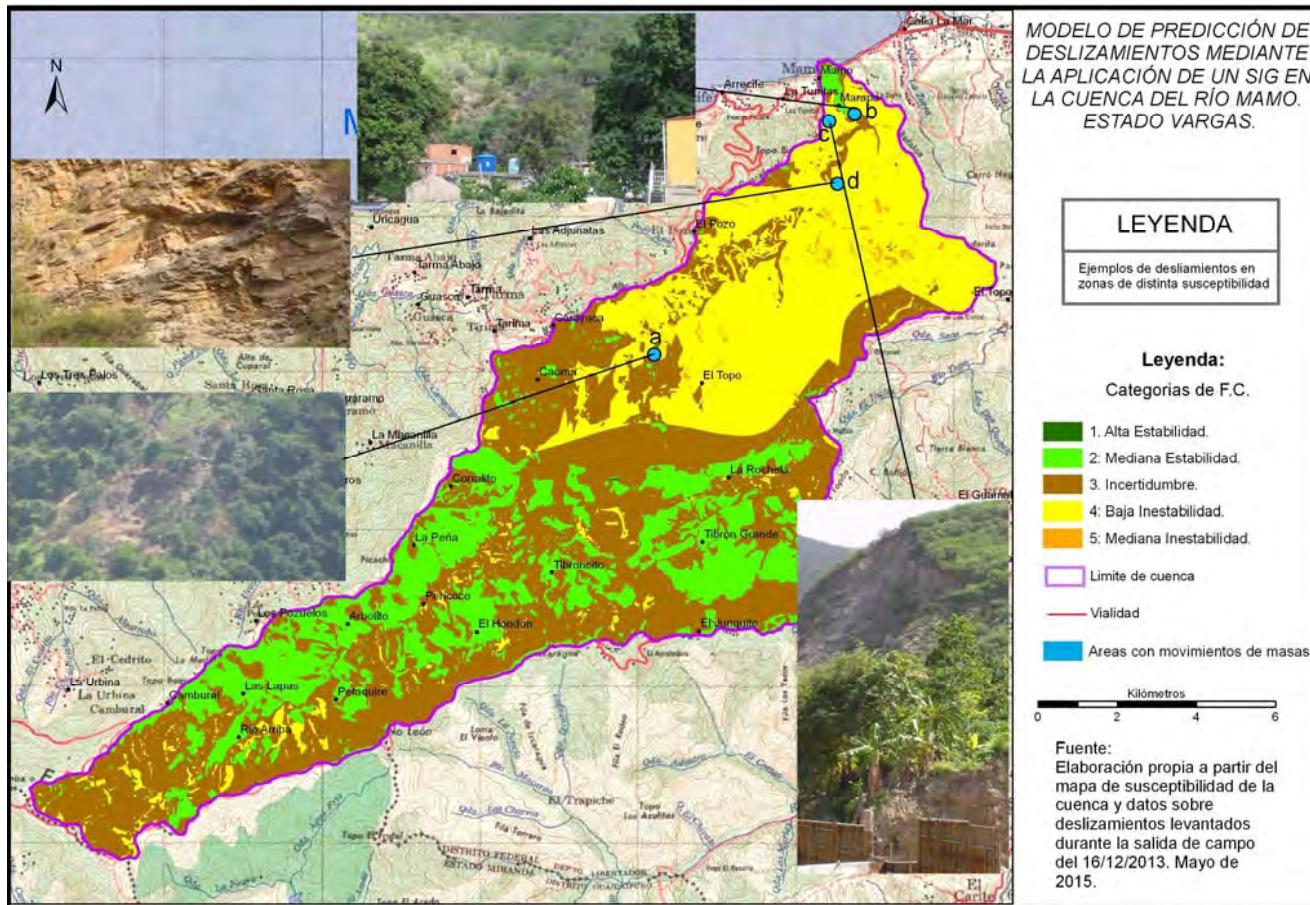


Figura 43. Ejemplos de deslizamientos en zonas de distinta susceptibilidad a deslizamientos en la Cuenca del Río Mamo.

(a) Ejemplo de deslizamiento en zona de Incertidumbre según la Susceptibilidad o zona nominalmente estable según el Modelo de estabilidad de taludes. (b) Ejemplo de deslizamiento en zona de baja inestabilidad según la Susceptibilidad o zona de umbral inferior de inestabilidad según el Modelo de estabilidad de taludes. (c) Ejemplo de deslizamiento en zona de baja inestabilidad según la Susceptibilidad o zona de umbral inferior de inestabilidad según el Modelo de estabilidad de taludes. (d) Ejemplo de deslizamiento en zona de baja inestabilidad según la Susceptibilidad o zona de umbral superior de inestabilidad según el Modelo de estabilidad de taludes. **Fuente:** Elaboración propia, en base a información levantada en campo el 16/12/2013.

7.6.- MAPA DE PREDICCIÓN DE DESLIZAMIENTOS

En cuanto a los escenarios predictivos hay un detalle que desde el punto de vista de la aplicación de la metodología se habían trabajado los factores de ocurrencia como elementos fijos o estáticos sin ningún problema. De hecho el mapa de susceptibilidad generado sale de la combinación de esos factores condicionantes o de ocurrencia a los que ya se les había calculado su relación cuantitativa con eventos de deslizamientos ocurridos anteriormente en la cuenca, es decir, el Factor de Certeza (F.C.). Pero en el caso de un elemento temporal como la lluvia que es un factor detonante ó desencadenante, la diferenciación espacial de la lluvia en la cuenca no se puede obtener porque no tenemos una localización de estaciones meteorológicas de toda la cuenca para tener esa discriminación espacial. Sin embargo en un estudio del Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) de la UCV donde tratan los umbrales de precipitación para varios eventos ocurridos en Venezuela (Courtell, 2008) de acuerdo a la experiencia japonesa para dar la condición crítica en la falla de taludes, señalan que en la estación de Mamo durante el mes de diciembre de 1999 la precipitación fue de unos 530 mm en apenas 15 días sabiendo que el comportamiento de la precipitación anual en Mamo es de apenas 324 mm (Venezuela- S I N A I H M E, 2007). Fue una precipitación muy por encima de lo normal para esa estación hidrometeorológica. Si esto fue así en Mamo que esta en la cuenca baja para el río del mismo nombre, la precipitación en la cuenca alta tuvo que ser mayor, no obstante sobre ese escenario de lluvias de Mamo y conociendo que por lógica de la influencia orográfica en cuencas altas tuvo que haberse registrado precipitaciones mayores, el efecto de la precipitación es acumulativo, porque al estar lloviendo en la parte alta de la cuenca, por escurrimiento al final se va a ir sobresaturando la parte baja y precisamente uno de los resultados que dio el mapa de susceptibilidad donde se aplico el método del Factor de Certeza es que las zonas de mayores inestabilidades de la cuenca (rangos de baja inestabilidad y mediana inestabilidad) se dan en la parte baja o cuenca baja que es donde esta la concentración de los deslizamientos ocurridos entre

1951 y 1999, el Modelo de Estabilidad de taludes también coincide que en esta parte de la cuenca se concentrarían áreas de significativa inestabilidad.

CAPÍTULO VIII

8. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede decir que con esta investigación se cumplieron los objetivos específicos tales como: “Caracterizar ambientalmente la cuenca del río Mamo para la jerarquización de las variables determinantes en la activación de deslizamientos” (lo que se hace en el Capítulo VI) y “Elaborar la zonificación de la cuenca del río Mamo según los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa” (en los resultados del Capítulo VII se concluye que solo alrededor de un 30% de los terrenos de la cuenca expresan una propensión a sufrir algún tipo de deslizamiento).

Como tal el modelo de predicción no se obtuvo. El comportamiento y la diferenciación espacial de la lluvia en la cuenca no se pudieron obtener porque no se tiene una localización de estaciones meteorológicas de toda la cuenca de los años 1951 y 1999 para tener esa discriminación espacial.

El mapa de susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos en la cuenca del Río Mamo indica que los factores de más peso que controlan los deslizamientos son la geología, geomorfología y cobertura vegetal.

Para la geomorfología (tipos de relieve) de la cuenca predominan las geoformas de concavidades (60,9%), la misma categoría también es predominante en cuanto a la distribución de los deslizamientos que históricamente han caído dentro de la cuenca (57,5%).

En cuanto a la geología, el 54,7% de la cuenca esta ocupada por la formación “Esquisto de Las Brisas” (Esquistos, cuarzo albitico muscovítico clorítico), pero el 69,19% de los deslizamientos que han ocurrido en la cuenca se han dado en la formación “Mármol de Antimano” (Mármol y anfibolitas).

La cobertura vegetal que es la otra variable de peso en la susceptibilidad de deslizamientos en la cuenca, a pesar de que tiene un ligero predominio de la categoría de “Bosque” (37,4%), la categoría que recoge o concentra la mayoría de los deslizamientos que han ocurrido en la cuenca es el “Matorral” (48,02%)

En cuanto al mapa de susceptibilidad generado para el área de estudio, se puede decir que hay menores probabilidades de ocurrencia de deslizamientos en la cuenca, ya que el 70% de las categorías (47% de “Incertidumbre” + mas 23% de “Mediana estabilidad”) están en el rango de valores que van de 0 a -1, y tienden a ser mas estables.

Con respecto al Modelo de Estabilidad de Taludes para la cuenca del Río Mamo, se puede decir que el 63% de la cuenca tiende a ser “estable”, ya que un 24% es “Nominalmente estable” (“Baja estabilidad” según sus rangos de valor de índices de estabilidad (Index Stability o IS), el 23% es “Estable” (“Alta estabilidad” según el IS) y un 16% que es “Moderadamente estable” (“Estabilidad media” según el IS).

Limitaciones:

La aplicación del modelo SINMAP esta limitado a deslizamientos superficiales, es decir donde la inestabilidad no implica grandes profundidades; debido a que la formulación de la ecuación de este modelo fue elaborada para profundidades no mayores al nivel freático, de hecho los deslizamientos que hay en la cuenca son de poca profundidad.

El Modelo de Estabilidad de Taludes generado a partir del software SINMAP permitió calibrar y validar el Mapa de Susceptibilidad de deslizamientos generado a partir del Modelo de Factor de Certeza (F.C.), ya que los dos modelos tienen en común que trabajan con las áreas o puntos donde ocurrieron los deslizamientos registrados históricamente para la cuenca, del resto son diferentes ya que el Modelo de estabilidad de Taludes se obtiene a partir de un MDT y otros parámetros como

inventario de deslizamientos ocurridos en una cuenca y valores conocidos de precipitación y humedad que se cargan al programa SINMAP que calcula un Factor de Seguridad para establecer unos Índices de Estabilidad (IS). De haberse tenido información precisa de los parámetros de humedad, precipitación y suelos para la cuenca discriminados por años se podría haber obtenido algo mas fidedigno en cuanto a estabilidad de taludes para la cuenca (se pudo haber calculado la estabilidad de taludes para el año 51 y 99 con datos de esas épocas para calibrarlo) y también haberlo utilizado jugando con los rangos de precipitación para predecir deslizamientos futuros, sobre todo para determinar áreas con alta posibilidad de ocurrencia de deslizamientos ocultos o zonas de iniciación potencial de deslizamientos.

La aplicación del SINMAP necesita de un estudio hidrológico previo para realizar el cálculo de la precipitación efectiva (q : precipitación efectiva = precipitación real-evaporación-infiltración).

Recomendaciones:

Es recomendable siempre contar con imágenes de satélite o fotografías aéreas multi-temporales de la zona estudiada, a fin de facilitar el inventario de deslizamientos, debido a que el mismo es indispensable para aplicar el modelo de Factor Certeza y así obtener el mapa de susceptibilidad.

Para los futuros trabajos relacionados con el modelado susceptibilidad y el predictivo, deberán ser considerados algunos aspectos como: Aplicar el FC la obtener la susceptibilidad solo a la parte baja de la cuenca que es la que concentra los deslizamientos y muestra recurrencia de algunos de ellos que se dieron originalmente en 1951 y se repitieron luego en 1999, o se dieron en 1999 y se repitieron en 2005 e incluso en el 2013 (según lo recopilado de manera bibliográfica y de la información levantada en salidas de campo hechas el 20/07/2011 y 16/12/2013); La elección del modelo de predicción (probar aparte de los probabilísticos, también los de lógica difusa y el enfoque de razonamiento probatorio, por ejemplo); se podrían probar otros factores causales (como distancia a la falla principal, orientación de talud, etc.).

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizabal, E. y Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. *Dyna rev. fac. nac. Minas*, vol 73 (149): 1 - 13.
- Arreaza, C. (1978). Geología de una zona en la carretera El Junquito – río mamo, Distrito Federal. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- Audemard, F. y Audemard, F.A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics*, 345: 299– 327.
- Autoridad Única de Área para el Estado Vargas (AUAEV). (2.000). Informe a la Presidencia de la República, Caracas, Venezuela.
- Avé Lallemant, H. (1997). Transpression, displacement partitioning, and exhumation in the Caribbean/South American plate boundary zone. *Tectonics*, 16: 272-289.
- Becerra, E. y Díaz, N. (2005). Propuesta metodológica para la zonificación de áreas susceptibles ante la ocurrencia de deslizamientos. Quebrada Tacagua, Estado Vargas. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F. Y Rampini, A. (1998). Slope Instability Zonation: a Comparison Between Certainty Factor and Fuzzy Dempster–Shafer Approaches. *Natural Hazards*, (17): 77–97.
- Bonachea, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos debidos a procesos geomorfológicos. Trabajo especial de grado doctoral. Inédito. Universidad de Cantabria, España. Disponible: <http://www.tesisenxarxa.net/handle/10803/10610> [Consulta: 2008, Julio 24]
- Cartaya, S., Méndez, W. y Pacheco, H. (2006). Modelo de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa a través de un Sistema de Información Geográfica. *Interciencia*, vol. 31 (009): 638-646.
- Cereceda, I. (2006). Uso de los SIG en el análisis de susceptibilidad y predicción de deslizamientos. Compendio de trabajos de investigación CNDG – Biblioteca Instituto Geofísico del Perú, V. 7: 191 – 202.
- Chi, K., Lee, K. y Park, N. (2002). Landslide Stability Analisis and Prediction Modeling with Landslide Ocurrentes on KOMPSAT EOC Imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 18 (1): 1 - 12.
- Comisión Estatal de Ordenación Territorial de Vargas – COTEV (2004). Plan de ordenación del territorio del estado Vargas (POTEV). Documento técnico. Volumen 2.
- Courtel, F. (2008). Cap. 9. Umbrales de precipitación. Trabajo no publicado. Universidad Central de Venezuela. Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF), Caracas.

- Delgado, J (2007). Auditoria de vulnerabilidad urbana en las cuencas de La Zorra, Mamo y Tacagua. Edo Vargas. Informe de avance Nro. 3. Trabajo no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Delgado, J (2007). La vulnerabilidad humana: del paradigma de la resistencia al paradigma de la resiliencia. Trabajo especial de grado doctorado. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- Entrena, M. (2005). Propuesta metodológica para el análisis de la susceptibilidad a la amenaza por deslizamiento a través de herramientas geomáticas. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2009). Glosario. Obtenida el 20 de enero de 2015, de <http://www.igac.gov.co/wps/portal/igac/raiz/iniciohome/Glosario>
- Lan, H., Zhou, C., Wang, L., Zhang, H. y Li, R. (2004). Landslide Hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Engineering Geology*, (76): 109 – 128.
- López, J. (2005). Estrategias de mitigación y control de inundaciones y aludes torrenciales en el Estado Vargas y en el Valle de Caracas: situación actual y perspectivas futuras. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. [Revista en línea]. Disponible: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0798-40652005000400006&script=sci_arttext [Consulta: 2015, Enero 24]
- Microsoft Encarta®. (2007). Diccionario DRAE. © 1993-2006 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- Montiel, C., Gouveia, E. y Montes, E. (2007). Influencia de la intervención antrópica en la ocurrencia de procesos de ladera. Microcuenca de la Quebrada Ramos, flanco norandino venezolano. *Terra*. XXIII (34): 35-69.
- Nadim, F., Kjekstad, O., Domaas, U., Rafat, F. y Peduzzi, P. (2006). Global Landslides Risk Case Study. Chapter 2. *Social Science*, (6): 21 – 45. Disponible: <http://siteresources.worldbank.org/INTDISMGMT/Resources/0821363328.pdf?f=resourceurlname=0821363328.pdf>) [Consulta : 2009, Agosto 12].
- Namuwaya, S. (2006). Predictive Modelling of Rainfall Induced Landslides in a Tropical Environment. A case of Ang Khang and Wang Chin Districts in Northern Thailand. Trabajo especial de grado maestría. Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra (ITC), Países Bajos (Holanda).
- Pack, R., Tarboton, D. y Goodwin, C (2005), SINMAP 2. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, Users's Manual Version for ArcGis 9.x and Higher. Consultado el 02 de Julio de 2010, Utah State University, página Web de SINMAP 2.0: <http://hydrology.usu.edu/sinmap2/>
- Pérez, L. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica y la Teledetección Espacial en el análisis de la información geológica de la región Todasana-Cabo Codera-Capaya, Cordillera de la Costa. Trabajo especial de grado maestría. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.

- Pindel, J. y Kennan, L. (2001). Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. Disponible:
<http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/paper/pindel.pdf> [Consulta : 2007, Enero 15]
- Proyecto MET- ALARN. (2005). Inestabilidad de Laderas. Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración. Proyecto: Metodologías para el análisis y manejo de los riesgos naturales (MET- ALARN). Obtenida el 20 de septiembre de 2008, de
http://www.crid.or.cr/crid/idrc/documentos/MA1/guia_analisis_deslizamiento_s.pdf
- Roa, J. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana, 48 (2):
- Salazar, L. (2007). Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfico - ILWIS -, utilizando el método Mora & Varhrson, 1991. Costa Rica. Disponible:
<http://hercules.cedex.es/hidraulica/PROHIMET/Br07/Comunicaciones/Salazar.pdf> [Consulta : 2009, Enero 12]
- Schubert, C. y Vivas, L. (1993) El cuaternario de la Cordillera de Mérida. Andes Venezolanos. Mérida: Universidad de Los Andes/ Fundación Polar.
- Singer, A., Rojas, C. y Lugo, M. (1983). Inventario Nacional de Riesgos Geológicos. (Estado preliminar) Departamento de Ciencias de la Tierra. Funvisis, serie técnica. 126 p.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga – Colombia. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos / Ingeniería de Suelos Ltda. 550 p. Disponible:
<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101.pdf> [Consulta: 2009, Diciembre 15]
- University of Maryland (2009). Earth Science Data Interface (ESDI) at the Global Land Cover Facility. Consulta el 10 de octubre de 2008, pagina de la Universidad de Maryland, página de Imágenes LANDSAT: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- Urbani, F. y Rodríguez, J. (2003). Atlas geológico de la cordillera de la costa, Venezuela. Coedición FUNVISIS y UCV, iii + 146 p. (146 mapas a escala 1:25.000).
- Van Westen, C. (2005). Introducción a los deslizamientos. Tipos y causas. Presentación en power point elaborada por International Institute for Geo-Information Science Earth Observation (ITC) de Holanda. Disponible:
<http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/04%20Amenaza%20por%20Deslizamientos/Uso%20de%20Sensores%20Remotos%20deslizamientos.pdf> [Consulta: 2008, noviembre 28]
- Venezuela. Dirección de Cartografía Nacional. (1971) Los Teques. Hoja 6747. Caracas 41 x 60. Escala: 1:100.000. Mapa topográfico.

- Venezuela. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. (2007). Datos mensuales de precipitación (mm), Estación Mamo-Escuela Naval. Trabajo no publicado, Dirección de Hidrología y Meteorología. Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica - S I N A I H M E, Caracas.
- Venezuela. Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional. (1995). Cartocentro. Hojas 6747 - I- NE, 6747 - I- SO, 6747 - I - SE, 6747 - II - NE, 6747 - II – NO. Caracas. Escala: 1:25.000. Ortofotoplanos Mapa topográfico.
- Zambrano, A. (1970). Estudio fisiográfico regional de la cuenca del Río Tuy. Bol. Geol., 11(21): 3-206.
- Zamora, J. (2007). Actualización del mapa geotécnico y aplicación de una metodología de susceptibilidad a deslizamientos en el Distrito Metropolitano de Caracas. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela (UCV), Caracas.
- Zinck, A. (1974). Definición del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos. MOP, DGRH. Caracas-Venezuela.

FE DE ERRATAS

Se hace constar que se han detectado las siguientes erratas u omisiones en la tesis de maestría de la UCV titulada: Modelo de Susceptibilidad de deslizamientos mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la cuenca del Río Mamo, Estado Vargas, que proceden a subsanarse a continuación:

Paginas 4, 8, 10, 12, 38, 42, 44, 46, 48, 51, 56, 58, 61, 63, 65, 68, 70, 72, 78, 83, 86, 89, 92, 95, 98, 108, 112 y 115 cuyos títulos de mapa dicen: “Modelo de Predicción de deslizamientos mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la cuenca del Río Mamo, Estado Vargas”, debiendo decir “Modelo de Susceptibilidad de deslizamientos mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) en la cuenca del Río Mamo, Estado Vargas”.