



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE: INGENIERO GEOGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTOR: CHAMORRO MOYA ARMANDO RAFAEL

**TEMA: ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD ENTRE MÉTODOS DE
PREDICCIÓN A DESLIZAMIENTOS: MORA-VAHRSON, LÓGICA FUZZY
E INDECI, PARA DETERMINAR CUÁL ES EL QUE MEJOR
REPRESENTA LA REALIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO
CRISTAL, PROVINCIA DE BOLÍVAR.**

DIRECTOR: ING. PADILLA OSWALDO

CODIRECTOR: ING. CRUZ MARIO

SANGOLQUÍ, OCTUBRE DE 2014

CERTIFICACIÓN

Ing. Oswaldo Padilla A.

Ing. Mario Cruz D.

Certifican:

Que el trabajo titulado “**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD ENTRE MÉTODOS DE PREDICCIÓN A DESLIZAMIENTOS: MORA-VAHRSON, LÓGICA FUZZY E INDECI, PARA DETERMINAR CUÁL ES EL QUE MEJOR REPRESENTA LA REALIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL, PROVINCIA DE BOLÍVAR**”, realizado por el Sr. ARMANDO RAFAEL CHAMORRO MOYA, ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Ing. Wilson Jácome, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf).

Sangolquí, Octubre de 2014

Ing. Oswaldo Padilla A.
DIRECTOR

Ing. Mario Cruz D.
CODIRECTOR

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Armando Rafael Chamorro Moya

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD ENTRE MÉTODOS DE PREDICCIÓN A DESLIZAMIENTOS: MORA-VAHRSON, LÓGICA FUZZY E INDECI, PARA DETERMINAR CUÁL ES EL QUE MEJOR REPRESENTA LA REALIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL, PROVINCIA DE BOLÍVAR**”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Octubre de 2012

Armando Rafael Chamorro Moya

AUTORIZACIÓN

Armando Rafael Chamorro Moya

Autorizo a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo **“ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD ENTRE MÉTODOS DE PREDICCIÓN A DESLIZAMIENTOS: MORA-VAHRSON, LÓGICA FUZZY E INDECI, PARA DETERMINAR CUÁL ES EL QUE MEJOR REPRESENTA LA REALIDAD DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL, PROVINCIA DE BOLÍVAR”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre de 2012

Armando Rafael Chamorro Moya

RESUMEN

Mediante la implementación de los sistemas de información geográfica se ha facilitado el modelamiento de eventos de origen natural como inundaciones, fenómenos meteorológicos, deslizamientos, entre otros; esto permitió la creación de varias metodologías con sus propios algoritmos de aplicación, sin embargo, muchas de estas metodologías fueron creadas para áreas de estudio con sus características específicas haciendo que los resultados de su aplicación en otras zonas no sean muy confiables. Es por esto que se genera la necesidad de realizar un análisis de confiabilidad de la aplicación de los modelos, en este caso de susceptibilidad a deslizamientos, para determinar cuál modelo es el que mejor representa las características físico geográficas del área de interés. Razón por la cual, el presente estudio muestra la investigación y aplicación de los modelos Mora-Vahrson, Lógica Fuzzy e INDECI en la microcuenca del río Cristal, donde se analizan los resultados mediante el ajuste de los modelos para obtener el modelo que mejor represente la realidad de la microcuenca del río Cristal y un mapa de susceptibilidad a ocurrencia de deslizamientos. También se pretende analizar cuál de las metodologías estudiadas presenta mejor capacidad de adaptación y representación de la realidad del Ecuador.

Palabras clave: Modelamiento espacial, deslizamiento, lógica difusa, Mora & Vahrson

SUMMARY

Through the implementation of geographic information systems, the modeling of natural events such as floods, weather events, landslides, etc, has been facilitated. This allowed the creation of several methodologies with their own application algorithms. However, many of these methodologies were created to study areas with specific characteristics, making the results of its application in other areas unreliable. Therefore the need for a reliability analysis of the application of the models, in this case of landslide susceptibility, to determine which model represents the physical geographic characteristics of the area of interest in a best way. In this context, this study shows the research and application of the Mora-Vahrson, Fuzzy Logic and INDECI models in the Crystal River watershed, where the results are analyzed by adjusting the models to obtain the model that best represents the reality of the Crystal river watershed and a susceptibility to landslide occurrence map. Also, it's aim of this investigation to analyze which of the studied methodologies has better adaptability and representation for the reality of Ecuador.

Keywords: Spatial modeling, landslides, fuzzy logic, Mora & Vahrson

DEDICATORIA

Se lo dedico a mi padre y madre, por su apoyo, aguante y guía lo largo
de la vida. Los amo.

A mis hermanas que son la cosa más linda que tengo en la vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por todo el aguante y apoyo para culminar con este proyecto hasta el final.

Al Ing. Oswaldo Padilla por los conocimientos y el apoyo brindado a lo largo de todo el proyecto.

Al Ing. Mario Cruz por los conocimientos y críticas impartidas con el objetivo de enseñar y tener un trabajo de calidad.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.7 METAS.....	6
1.8 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
CAPITULO II.....	7
2.1 MOVIMIENTOS EN MASA.....	7
2.1.1 <i>Introducción</i>	7
2.1.2 <i>Partes de un Deslizamiento</i>	8
2.1.3 <i>Tipos de Movimientos en Masa</i>	9
2.2 SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	27
2.2.1 <i>Mapa de susceptibilidad</i>	28
2.2.2 <i>Evaluación de la Susceptibilidad</i>	29
2.2.3 <i>Factores Condicionantes y Desencadenantes</i>	30
2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	32
2.3.1 <i>Modelo de Datos Espacial</i>	34
2.3.2 <i>Análisis Espaciales</i>	34
2.3.3 <i>El diseño de modelos espaciales en SIG</i>	36
2.4 LÓGICA DIFUSA.....	38
2.4.1 <i>Variable Lingüística</i>	39
2.4.2 <i>Conjunto Difuso</i>	39
2.4.3 <i>Función de Pertenencia a usar (Padilla, 2007)</i>	40
2.4.4 <i>Casos lógica Fuzzy</i>	46
2.5 MÉTODO MORA & VAHRSON.....	48
2.5.1 <i>Estimación del índice de susceptibilidad</i>	49
2.5.2 <i>Incorporación del factor de disparo</i>	54
2.5.3 <i>Determinación del Grado de Amenaza de Deslizamientos</i>	56
2.6 DEFINICIÓN DEL MODELO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS (INDECI, PERÚ).....	57
2.6.1 <i>Factores Analizados</i>	57
2.6.2 <i>Metodología y Matrices de Ponderación entre Variables</i>	60
2.6.3 <i>Limitaciones del Modelamiento</i>	63
2.7 ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS.....	64
CAPITULO III.....	69
3.1 INTRODUCCIÓN.....	69

3.2 INFORMACIÓN Y DATOS	70
3.2.1 <i>Recopilación de información</i>	70
3.2.2 <i>Interpretación de Fotografías Aéreas</i>	71
3.3 ANÁLISIS DE LÓGICA FUZZY.....	73
3.3.1 <i>Generación de datos y Estudio de variables según casos de lógica Fuzzy</i>	73
3.3.2 <i>Modelos cartográficos</i>	85
3.3.3 <i>Determinación del Algoritmo</i>	90
3.3.4 <i>Desarrollo del proceso SIG</i>	96
3.4 ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE MORA & VAHRSON.....	102
3.4.1 <i>Estimación del índice de susceptibilidad</i>	103
3.4.2 <i>Incorporación del factor de disparo</i>	110
3.4.3 <i>Modelos Cartográficos</i>	115
3.5 ANÁLISIS DEL MODELO INDECI.....	118
3.5.1 <i>Aplicación del Modelo INDECI</i>	118
3.5.2 <i>Aplicación del Modelo INDECI Modificado</i>	123
3.5.3 <i>Obtención de modelos cartográficos</i>	130
3.6 AJUSTE DE LOS MODELOS CARTOGRÁFICOS.....	133
CAPITULO IV	135
4.1 ANÁLISIS DE LOS MODELOS OBTENIDOS.....	135
4.1.1 <i>Análisis de Susceptibilidad mediante Observación en Campo</i> ...	135
4.1.2 <i>Modelo 1 (Fuzzy Original)</i>	140
4.1.3 <i>Modelo 2 (Fuzzy 5 percentil)</i>	145
4.1.4 <i>Modelo 3 (Fuzzy 10 percentil)</i>	150
4.1.5 <i>Modelo 4 (Mora & Vahrson - Sismicidad)</i>	155
4.1.6 <i>Modelo 5 (Mora & Vahrson - Lluvias)</i>	158
4.1.7 <i>Modelo 6 (Mora & Vahrson)</i>	161
4.1.8 <i>Modelo 7 (INDECI)</i>	165
4.1.9 <i>Modelo 8 (INDECI - Modificado)</i>	168
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS APLICADAS.....	172
4.3 CONCLUSIONES.....	184
4.4 RECOMENDACIONES	187
4.5 BIBLIOGRAFÍA.....	187

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 TIPOS DE MOVIMIENTOS EN MASA (GEMMA, 2007)	10
TABLA 2 ESCALA DE VELOCIDADES SEGÚN CRUDEN Y VARNES (1996).....	11
TABLA 3 CRITERIOS PARA DETERMINAR EL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESGLIZAMIENTOS (KANUNGO, 1993).....	29
TABLA 4 CASOS LÓGICA FUZZY	47
TABLA 5 CALIFICACIÓN ORIGINAL DEL FACTOR RELIEVE RELATIVO (MORA & VAHRSON., 1992).....	50
TABLA 6 CLASES DE PENDIENTES (VAN ZUIDAM, 1986) Y VALORACIÓN DEL PARÁMETRO DE LA PENDIENTE (PP) (MORA & VAHRSON., 2002)	51
TABLA 7 CALIFICACIÓN ORIGINAL DE DIFERENTES LITOLOGÍAS Y SU SUSCEPTIBILIDAD LITOLÓGICA (MORA & VAHRSON, 1992)	52
TABLA 8 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA (MORA ET AL., 1992).....	53
TABLA 9 VALORACIÓN DEL PARÁMETRO HUMEDAD DEL SUELO (PP) (MORA ET AL., 1992)	54
TABLA 10 VALORACIÓN DEL PARÁMETRO DE DISPARO POR SISMICIDAD D _s (MORA & VAHRSON, 1992).....	55
TABLA 11 DEL VALORACIÓN ORIGINAL FACTOR INTENSIDAD DE LA PRECIPITACIÓN D _{LL} (MORA & VAHRSON, 1992)	56
TABLA 12 CLASIFICACIÓN DE LOS GRADOS DE AMENAZA DE DESGLIZAMIENTOS (MORA & VAHRSON, 1992).....	56
TABLA 13 TABLA DE PONDERACIÓN DE PENDIENTES.....	58
TABLA 14 TABLA DE PONDERACIÓN DEL PARÁMETRO GEOLÓGICO.....	58
TABLA 15 TABLA DE RECLASIFICACIÓN DE CLASES DE SUELOS	59
TABLA 16 PONDERACIÓN DEL MAPA DE ISOYETAS.....	60
TABLA 17 MATRIZ TEXTURA, PENDIENTE (S1)	61
TABLA 18 MATRIZ S1 POR GEOLOGÍA (S2).....	62
TABLA 19 CLASIFICACIÓN DE LOS GRADOS DE SUSCEPTIBILIDAD S1 POR GEOLOGÍA	62
TABLA 20 MATRIZ S2 POR ISOYETAS	62
TABLA 21 PONDERACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESGLIZAMIENTOS	63
TABLA 22 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS METODOLOGÍAS	64
TABLA 23 DENSIDAD DE DESGLIZAMIENTOS Y VALORACIÓN PARA CADA FORMACIÓN	75
TABLA 24 VALORACIÓN POR LA MATRIZ AHP SAATY	78
TABLA 25 PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24 HORAS.....	80
TABLA 26 PERTENENCIA DE LA VARIABLE A CADA FUNCIÓN DE LÓGICA FUZZY	85
TABLA 27 MATRIZ AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS) SAATY	94
TABLA 28 MATRIZ DE PESOS SAATY	94
TABLA 29 EVAPOTRANSPIRACIÓN MENSUAL (CM) PARA LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS	106
TABLA 30 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA.....	106

TABLA 31 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0131	107
TABLA 32 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0132	107
TABLA 33 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0386	108
TABLA 34 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0468	108
TABLA 35 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0582	109
TABLA 36 VALORES ASIGNADOS A LOS PROMEDIOS MENSUALES DE LLUVIA DE LA ESTACIÓN M0805	109
TABLA 37 VALORACIÓN DEL PARÁMETRO DE HUMEDAD DEL SUELO PARA LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL	110
TABLA 38 SISMOS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL	111
TABLA 39 EQUIVALENCIAS ENTRE ESCALA DE RITCHER VS MKS.....	112
TABLA 40 VALORACIÓN DEL PARÁMETRO DE DISPARO POR SISMICIDAD	113
TABLA 41 VALORACIÓN DEL FACTOR LLUVIA PARA EL ÁREA DE ESTUDIO	115
TABLA 42 TABLA DE PONDERACIÓN DE PENDIENTES MODIFICADO	124
TABLA 43 TABLA DE RECLASIFICACIÓN DE CLASES DE SUELOS	125
TABLA 44 PONDERACIÓN DEL MAPA DE ISOYETAS MODIFICADO	127
TABLA 45 MATRIZ TEXTURA, PENDIENTE (S1) MODIFICADO	128
TABLA 46 MATRIZ S1, GEOLOGÍA (S2) MODIFICADO	129
TABLA 47 MATRIZ S2, ISOYETAS MODIFICADO	130
TABLA 48 ESTADÍSTICAS DE LOS MODELOS	134
TABLA 49 AJUSTE DE LOS MODELOS	134
TABLA 50 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 1	143
TABLA 51 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 1	143
TABLA 52 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 2	146
TABLA 53 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 2	149
TABLA 54 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 3	151
TABLA 55 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 3	154
TABLA 56 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 4	156
TABLA 57 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 4	156
TABLA 58 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 5	159
TABLA 59 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 5.....	159
TABLA 60 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 6	162
TABLA 61 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 6	164
TABLA 62 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 7	166
TABLA 63 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 7	166
TABLA 64 VALORES ESTADÍSTICOS DEL MODELO 8	169
TABLA 65 DISPERSIÓN DE PUNTOS PARA EL MODELO 8	171

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ELEMENTOS DE UN DESLIZAMIENTO	9
FIGURA 2 ESQUEMA DE LA CAÍDA DE ROCAS.....	12
FIGURA 3 ESQUEMA DEL VUELCO EN BLOQUE	13
FIGURA 4 ESQUEMA DEL VUELCO POR FLEXIÓN	13
FIGURA 5 ESQUEMA DEL VUELCO DEL MACIZO ROCOSO	14
FIGURA 6 ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL	15
FIGURA 7 ESQUEMA DE UN DESLIZAMIENTO ROTACIONAL	16
FIGURA 8 ESQUEMA DE PROPAGACIÓN LATERAL LENTA.....	17
FIGURA 9 ESQUEMA DE PROPAGACIÓN LATERAL RÁPIDA	17
FIGURA 10 CONO DE DETRITOS, QUEBRADA QUSICAS, LIMA, PERÚ.....	18
FIGURA 11 ESQUEMA DE FLUJOS CANALIZADOS Y NO CANALIZADOS	19
FIGURA 12 FLUJO DE DETRITOS EN EL VALLE DEL RÍO ACONCAGUA, SECTOR PUNTILLA DEL VIENTO, CHILE, 1980.....	20
FIGURA 13 FLUJOS DE LODO, CARRETERA A MENDOZA, GUARDIA VIEJA, CHILE, 1987	21
FIGURA 14 FLUJOS DE TIERRA, ECUADOR	22
FIGURA 15 FLUJOS DE TIERRA EN CYPRESS ROAD, WEST VANCOUVER, CANADÁ, 2005	23
FIGURA 16 AVALANCHA DE DETRITOS EN GALIPÁN, ESTADO VARGAS, VENEZUELA, 1999	24
FIGURA 17 AVALANCHA DE DETRITOS DE TIGRE DORMIDO, MENDOZA, ARGENTINA	25
FIGURA 18 ESQUEMAS DE REPTACIÓN Y SOLIFLUXIÓN	26
FIGURA 19 ESQUEMAS DE REPTACIÓN Y SOLIFLUXIÓN	27
FIGURA 20 ESQUEMAS SOBRE ANÁLISIS ESPACIALES	35
FIGURA 21 SIGNIFICADOR LINGÜÍSTICO (ÁNGULO DE BUZAMIENTO).....	39
FIGURA 22 FUNCIÓN SENO CUADRADO	41
FIGURA 23 PUNTOS IMPORTANTES DEL MODELO.	42
FIGURA 24 PROBABILIDAD CRECIENTE	42
FIGURA 25 PUNTOS DE INTERÉS DE LA FUNCIÓN DE PERTENENCIA	44
FIGURA 26 PROBABILIDAD TOTAL CON MÁS DE DOS VARIABLES.....	46
FIGURA 27 FOTOINTERPRETACIÓN DE FOTO AÉREA	71
FIGURA 28 MAPA DE DESLIZAMIENTOS.....	72
FIGURA 29 VARIABLE PENDIENTES	74
FIGURA 30 VARIABLE DUREZA DE LA ROCA	76
FIGURA 31 VARIABLE COBERTURA VEGETAL	79
FIGURA 32 VARIABLE PRECIPITACIÓN	80
FIGURA 33 VARIABLE DISTANCIA A VÍAS DE COMUNICACIÓN	81
FIGURA 34 VARIABLE DISTANCIA RÍOS	83
FIGURA 35 VARIABLE DISTANCIA A FALLAS GEOLÓGICAS.....	84
FIGURA 36 MODELO CARTOGRÁFICO GENERAL – LÓGICA FUZZY	86

FIGURA 37 MODELO CARTOGRÁFICO 1: VALORES DE VARIABLES ORIGINALES	87
FIGURA 38 MODELO CARTOGRÁFICO 2: PERCENTIL FUZZY AL 5% Y 95%.....	88
FIGURA 39 MODELO CARTOGRÁFICO 3: PERCENTIL FUZZY AL 90% Y 10%.....	89
FIGURA 40 COMPARACIÓN DE MODELOS POR ALGORITMO.....	96
FIGURA 41 MAPA DEL PARÁMETRO PENDIENTE (PP)	104
FIGURA 42 MAPA DEL PARÁMETRO LITOLÓGICO (PL)	105
FIGURA 43 MAPA DEL PARÁMETRO DE HUMEDAD DEL SUELO (PH).....	110
FIGURA 44 PARÁMETRO DE DISPARO DE SISMICIDAD	113
FIGURA 45 MAPA DEL PARÁMETRO DE DISPARO POR LLUVIA	115
FIGURA 46 MODELO GENERAL DE OBTENCIÓN DE VARIABLES – MORA VAHRSON	116
FIGURA 47 MODELO 4 SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS POR SISMICIDAD...	117
FIGURA 48 MODELO 5 SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS POR INTENSIDAD DE LLUVIAS.....	117
FIGURA 49 MODELO 6 DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS	118
FIGURA 50 MAPA DE PENDIENTES - INDECI.....	119
FIGURA 51 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD GEOLÓGICA – INDECI	119
FIGURA 52 MAPA DE TEXTURA DE SUELOS - INDECI.....	120
FIGURA 53 MAPA DE PONDERACIÓN DE ISOYETAS - INDECI.....	121
FIGURA 54 VALORACIÓN MATRIZ S1	121
FIGURA 55 VALORACIÓN MATRIZ S2	122
FIGURA 56 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS.....	123
FIGURA 57 MAPA DE PENDIENTES – INDECI MODIFICADO	124
FIGURA 58 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD GEOLÓGICA – INDECI MODIFICADO	125
FIGURA 59 MAPA DE TEXTURA DE SUELOS – INDECI MODIFICADO.....	126
FIGURA 60 MAPA DE PONDERACIÓN DE ISOYETAS – INDECI MODIFICADO	127
FIGURA 61 VALORACIÓN MATRIZ S1 – INDECI MODIFICADO	128
FIGURA 62 VALORACIÓN MATRIZ S2 – INDECI MODIFICADO	129
FIGURA 63 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS – INDECI MODIFICADO	130
FIGURA 64 MODELO GENERAL VALORACIÓN DE VARIABLES - INDECI.....	131
FIGURA 65 MODELO 7 SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS - INDECI	132
FIGURA 66 MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL.....	136
FIGURA 67 CAUCE DEL RÍO CRISTAL, MONTALVO	136
FIGURA 68 LADERAS CUENCA MEDIA, BALSAPAMBA.....	137
FIGURA 69 DESLIZAMIENTO CUENCA MEDIA	137
FIGURA 70 CUENCA ALTA DEL RÍO CRISTAL	138
FIGURA 71 DESLIZAMIENTOS VÍA GUARANDA – BABAHOYO, CUENCA ALTA.....	139
FIGURA 72 DESLIZAMIENTOS CUENCA ALTA	139
FIGURA 73 MODELO 1 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUANTITATIVO) ..	141
FIGURA 74 MODELO 1 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUALITATIVO)	142
FIGURA 75 MODELO 2 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUANTITATIVO) ..	147
FIGURA 76 MODELO 2 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUALITATIVO)	148

FIGURA 77 MODELO 3 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUANTITATIVO) ..	152
FIGURA 78 MODELO 3 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS (CUALITATIVO)	153
FIGURA 79 MODELO 4 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	157
FIGURA 80 MODELO 5 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	160
FIGURA 81 MODELO 6 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	163
FIGURA 82 MODELO 7 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	167
FIGURA 83 MODELO 8 DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS.....	170
FIGURA 84 SECTORES A ANALIZAR DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CRISTAL.....	172
FIGURA 85 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 1	174
FIGURA 86 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 2	175
FIGURA 87 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 3.....	177
FIGURA 88 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 4.....	178
FIGURA 89 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 5.....	180
FIGURA 90 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 6.....	181
FIGURA 91 ANÁLISIS DE RESULTADOS SECTOR 7	183

GLOSARIO

Aliasing: Efecto escalera que se produce en las imágenes digitales.

Amenaza: Se trata del fenómeno natural en análisis, caracterizado por una probabilidad de recurrencia y magnitud de manifestación determinada, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios, y el ambiente. También se usa el término peligrosidad (hazard en inglés) como sinónimo.

Vulnerabilidad: Es el grado de daños que las personas u objetos pueden sufrir al manifestarse un movimiento en masa. Es un valor muy difícil de obtener ya que intervienen multitud de variables, desde económicas, hasta sociales y políticas. Como es inviable la obtención de todas y cada una de las variables que influyen la vulnerabilidad, autores como Handmer y Grunfest (2001) proponen basarse en los parámetros de edad, género, estatus económico y densidad de población. La vulnerabilidad es un factor propio del elemento expuesto a ser susceptible y sufrir un daño del cual puede encontrar dificultades en recuperarse posteriormente.

Exposición: La exposición está relacionada directamente con la vulnerabilidad. Es la ubicación sobre el terreno de los elementos y determina la condición de un elemento a ser afectado por la amenaza. Si un elemento está fuera del alcance de la amenaza, la exposición de éste y en consecuencia el riesgo, será nulo a dicha amenaza.

Riesgo: Es la probabilidad de que la amenaza produzca daños en un lugar concreto y durante un período de tiempo definido. El riesgo puede ser expresado como la relación $R = A \times V$

Susceptibilidad: Es la facilidad o propensión de que se produzca un proceso geológico en una zona concreta.

Factores condicionantes: Los factores condicionantes son aquellos intrínsecos del sistema, que caracterizan de una manera propia el área sobre los que una amenaza puede actuar. Estos son los que en mayor medida determinarán la evolución de un cierto fenómeno que vaya a suceder sobre el terreno.

Factores desencadenantes: Los factores desencadenantes son aquellos parámetros externos al sistema, que producen la generación del fenómeno. Estos factores actúan como detonante de la amenaza. En el caso de los movimientos de ladera se consideran los sismos y las lluvias como principales detonadores

Periodo de retorno: Tiempo medio que debe transcurrir para que se repita con igual intensidad.

Predicción: Anunciar con fundamento científico antes de que se suceda un proceso, su localización geográfica, el momento y el desarrollo.

Previsión: Estadística de la probabilidad de producirse un proceso en sus distintos grados de intensidad. Permite anunciar los efectos que tendrá un determinado riesgos y las consecuencias frente a cada intensidad.

Prevención: Es la respuesta donde se adoptara una serie de medidas para disminuir al mínimo los daños.

Percentil: Es una medida de posición no central que nos dice cómo está posicionado un valor respecto al total de una muestra.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos son eventos que ocurren con frecuencia cada año en el país y estos aumentan considerablemente en temporadas lluviosas, estos pueden interrumpir las vías de comunicación, destruir bienes e infraestructura, represar ríos, aumentar el arrastre de sedimentos en la cuenca baja y ayudar a la generación de inundaciones e inclusive cobrar vidas humanas. Es importante prevenir estos eventos para evitar pérdidas, por lo que se han desarrollado distintas medidas preventivas entre las que se encuentran la elaboración de modelos que determinen la susceptibilidad del terreno a sufrir deslizamientos.

Las estrategias encaminadas a la mitigación de los efectos por causa de catástrofes de origen natural conllevan una serie de actuaciones, preventivas y correctivas, que abarcan medidas tanto estructurales como no estructurales. Como en otros ámbitos encaminados a la reducción de daños de cualquier tipo, las medidas de naturaleza preventiva y no estructural son en general las más adecuadas y menos costosas. Entre dichas medidas se encuentra la elaboración de modelos de susceptibilidad, amenaza y riesgo, que constituyen herramientas básicas para una política de ordenación del territorio que incluya la mitigación de riesgos naturales así como el desarrollo

de una legislación encaminada a hacer frente a los peligros naturales, como la existente en algunos países (Bonachea, 2006).

Actualmente los Sistemas de Información Geográfica permiten el análisis de la susceptibilidad a la rotura por deslizamiento así como la elaboración de mapas de susceptibilidad a la rotura por deslizamiento y la elaboración de mapas de susceptibilidad y de peligrosidad de manera sistemática, rápida y eficiente. Ello ha ampliado considerablemente la posibilidad de tratar con grandes bases de datos y realizar cálculos para la estimación de la susceptibilidad que eran viables en grandes áreas. En este sentido, la posibilidad de regionalizar los análisis de susceptibilidad se ha visto enormemente facilitada con el uso del SIG (Santacana, 2001).

Los mapas de susceptibilidad intentan identificar áreas que en combinación con varios factores puedan presentar deslizamientos, existen varias metodologías para evaluar la susceptibilidad del terreno entre las que se tiene el método determinístico y modelos numéricos; el primero involucra ensayos de los materiales en laboratorio y en el sitio, se lo usa para determinar la estabilidad de una ladera y no se recomienda su uso para grandes áreas debido a que es costoso; el segundo método se usa para áreas más extensas, los datos de entrada son más generales y se enfoca en determinar la variabilidad espacial de la estabilidad de las laderas (Ramirez, 2006).

Para este estudio se utilizan métodos numéricos con indicadores geomorfológicos entre los que se encuentran el método de Mora-Vhanson, de implementación de lógica Fuzzy y el modelo propuesto por el Instituto de Defensa Civil de Perú (INDECI), los que serán evaluados y comparados para

determinar cuál de estos es el que mejor se adapta a las características físico-geográficas de la microcuenca del río cristal.

1.2 ANTECEDENTES

La microcuenca del río Cristal presenta suelos de origen volcánico del Cuaternario, poco consolidados, también se ubica en una zona de alta sismicidad ya que se encuentra cerca de fallas geológicas activas como Pallatanga y del río Chimbo, la microcuenca se encuentra en la zona de amenaza sísmica: Zona IV de Muy Alta Intensidad Sísmica; el clima es del tipo Tropical, Megatérmico Húmedo, lo que significa que la lluvia media anual en esta zona es del orden de 1500 – 2200 mm/año con una humedad relativa anual del 90%, las fuertes precipitaciones en la cuenca alta ocasionan torrentes o aluviones que ponen en riesgo a la infraestructura de la cuenca baja del río Cristal (Bósquez, Paredes, & Vinueza, 2009). Todos estos escenarios naturales hacen que la mayor parte de la zona presente una alta vulnerabilidad ante las amenazas de origen natural, entre las que destaca su susceptibilidad a los movimientos en masa.

En Ecuador las cifras en cuanto a muertes por evento catastrófico natural son concluyentes, los deslizamientos es el desastre natural que más vidas humanas ha cobrado, durante el siglo pasado se registraron más de 23000 muertes por encima de los demás desastres entre los que se encuentra las inundaciones con más de 11000 víctimas. En los últimos 12 años la tendencia sigue de igual manera, ya que se registran 235 muertes que

representan el 73% de muertes por desastres naturales seguido por las inundaciones con 80 muertes (Toulkeridis, 2013).

Existen varios modelos para predecir áreas susceptibles a deslizamientos, sin embargo, en Ecuador es difícil aplicar métodos extranjeros por la variedad de micro climas existentes ocasionados por la presencia de la cordillera de los Andes, por este motivo es importante determinar cuál es el modelo que más se ajusta a la realidad entre los métodos de Lógica Fuzzy, Mora-Vahrson y el propuesto por el INDECI-Perú; y así poder aplicarlo en zonas similares a la micro Cuenca del Río Cristal.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Es necesario realizar la comparación de los resultados de la aplicación de los modelos Mora-Vahrson, Lógica Fuzzy e INDECI para poder determinar cuál de estas metodologías es la que mejor se adapta a las características de la microcuenca del río Cristal, con la finalidad de obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos que pueda apoyar como una herramienta de prevención y a su vez ayudar en estudios y proyectos que se quieran realizar en la microcuenca.

Se eligió la microcuenca del río Cristal debido a la importancia de sus actividades económicas, especialmente la agrícola, y los poblados que se desarrollan en la zona. La microcuenca del río Cristal debido a su ubicación geográfica presenta un gran potencial turístico, siendo una de sus principales infraestructuras turísticas el parque acuático construido por el GAD provincial, éste se encuentra a un costado del cauce del río Cristal; sus

tierras pueden producir una gran variedad de productos, siendo los cultivos de maíz, banano, naranja, caña de azúcar, plátano y cacao los principales (IEE). Todas estas ventajas territoriales se ven expuestas a amenazas derivadas de eventos naturales, ya que se encuentra en una zona de alta pluviosidad, su relieve en la cuenca alta está dominado por pendientes fuertes, los suelos son de origen volcánico poco consolidados, que sumado al deterioro por el mal manejo de la cuenca hidrográfica, donde existe la deforestación en las cuencas altas de los ríos, que acelera los procesos erosivos y movimientos en masa, lo cual se traduce en el aumento de los sedimentos en suspensión y una mayor colmatación en los cauces, potenciando las inundaciones en la zona baja de la microcuenca.

1.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De los métodos para determinar áreas susceptibles de deslizamientos: Lógica Fuzzy, Mora-Vahrson e INDECI; es necesario conocer cuál es el que mejor se comporta ajustándose a las condiciones físico-geográficas de la microcuenca del Río Cristal.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Determinar el grado de certeza de los métodos de predicción a deslizamientos: Mora-Vahrson, lógica Fuzzy e INDECI, ejecutando el modelamiento y análisis de los resultados obtenidos para determinar cuál es el que mejor representa la realidad de la microcuenca del Río Cristal, para obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilación y análisis de la información existente.
- Identificar deslizamientos activos y potenciales mediante técnicas de visualización 3D y posterior comprobación en campo.
- Generar los modelos utilizando Mora-Vahrson, Lógica Fuzzy e INDECI
- Análisis y comparación de los resultados obtenidos.

1.7 METAS

- Entregar y estructurar una base de datos gráfica y alfanumérica, escala 1:25000.
- 1 Mapa de deslizamientos escala 1:25000.
- 8 Mapas de deslizamientos escala 1:25000, usando Mora-Vahrson, lógica Fuzzy e INDECI.
- Un modelo de susceptibilidad de deslizamientos que mejor se ajuste a las características físico-geográficas de la microcuenca del Río Cristal

1.8 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

El área de estudio presenta limitaciones en lo que refiere a existencia y disponibilidad de información meteorológica, las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio poseen datos incompletos en sus registros, por este motivo, se procede a implementar técnicas para la estimación de datos faltantes con la finalidad de poder ejecutar los modelos a analizar.

CAPITULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Movimientos en Masa

El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Algunos movimientos en masa, como la reptación de suelos, son lentos, a veces imperceptibles y difusos, en tanto que otros, como algunos deslizamientos pueden desarrollar velocidades altas y pueden definirse con límites claros, determinados por superficies de rotura (Crozier & Glade, 1999).

2.1.1 Introducción

Los procesos de inestabilidad son el producto de la geomorfología local, hidrología y condiciones geológicas. La modificación de estas condiciones por procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas activan movimientos lentos, generalmente imperceptibles debido a que las propiedades mecánicas del material decrecen gradualmente. Posteriormente, factores como precipitación y sismicidad detonan dichos movimientos lentos en rápidos movimientos en masa (Soeters & VanWesten, 1996).

2.1.2 Partes de un Deslizamiento

- 1) Escarpe principal: Una superficie de fuerte pendiente sobre terreno no perturbado alrededor de la periferia del deslizamiento, causado por movimiento de material de deslizamiento fuera del terreno no perturbado. La proyección de la superficie de escarpa debajo del material desplazado viene a ser la superficie de la ruptura.
- 2) Escarpe secundario: Una superficie de pendiente fuerte sobre el material desplazado producida por movimientos diferenciales al interior de la masa deslizante.
- 3) Cabeza: La parte superior del material de deslizamiento a lo largo del contacto entre el material desplazado y la escarpa principal.
- 4) Puntera: El punto más lejano de la margen desde la cima del deslizamiento.
- 5) Pie: La porción del material desplazado que queda pendiente abajo del margen de la superficie de ruptura.
- 6) Cuerpo: Aquella parte del material desplazado suprayacente a la superficie de ruptura entre la escarpa principal y el pie y la base de la superficie de ruptura.
- 7) Flanco: El costado de un deslizamiento de tierras.
- 8) Corona: El material que aún permanece en su lugar, prácticamente no desplazado y adyacente a las partes más altas de la escarpa principal.
- 9) Superficie de ruptura principal: La pendiente que existía antes que ocurra el movimiento que se está considerando. Si ésta es la superficie de un deslizamiento anterior, el hecho debe ser anotado.

10) Superficie de ruptura secundaria: Es la superficie que separa el material desplazado del material estable pero no se reconoce que hubiera sido una superficie que falló.

11) Material desplazado: El material que se ha desplazado de su posición original sobre la pendiente. Puede estar en estado deforme o no deforme

12) Zona de agotamiento: El área dentro de la cual el material desplazado queda debajo de la superficie original del terreno.

13) Zona de acumulación: El área dentro de la cual el material desplazado queda encima de la superficie original del terreno.

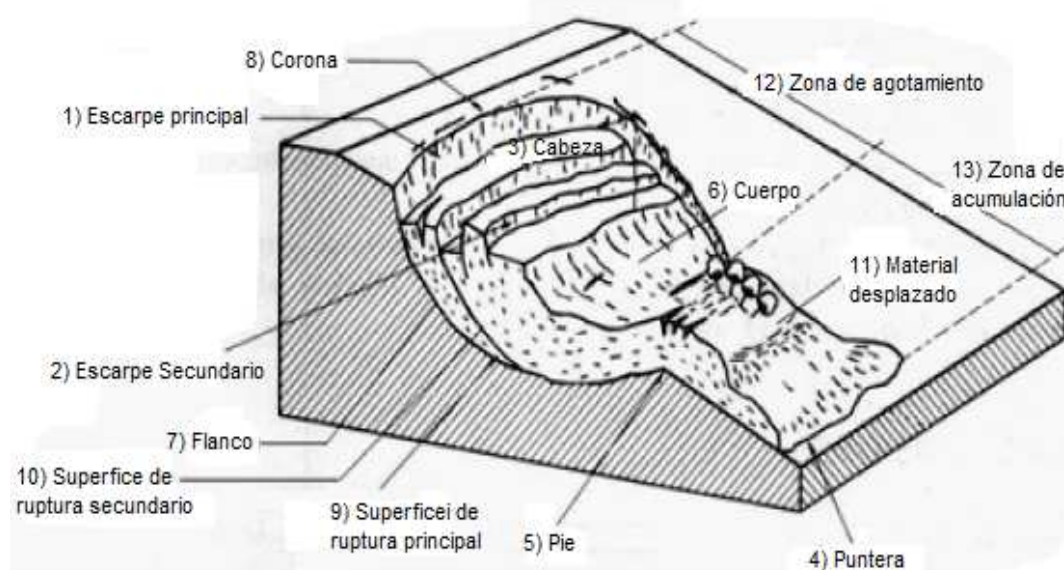


Figura 1 Elementos de un Deslizamiento

Fuente: (Cruden & Varnes, 1996)

2.1.3 Tipos de Movimientos en Masa

Varnes (1958 y 1978) emplea como criterio principal en la clasificación, el tipo de movimiento y en segundo lugar, el tipo de material. Así, divide los movimientos en masa en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos,

propagaciones y flujos. Además, divide los materiales en dos clases: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierra. De esta manera, presenta definiciones para varias posibles combinaciones de tipo de movimiento y material.

Tabla 1 Tipos de movimientos en masa (GEMMA, 2007)

Tipo	Subtipo
Caída	Caída de roca (detritos o suelo)
Volcamiento	Volcamiento de roca (bloque) Volcamiento flexural de roca o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña Deslizamiento rotacional
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos Flujo de lodo Flujo de tierra Flujo de turba Avalancha de detritos Avalancha de rocas Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Para cada tipo de movimiento en masa se describe el rango de velocidades, parámetro importante ya que ésta se relaciona con la

intensidad de aquellos y la amenaza que pueden significar. En la Tabla 2 se menciona la relación del intervalo de velocidades típicas con la escala de velocidades propuesta por Cruden y Varnes (1996).

Tabla 2 Escala de velocidades según Cruden y Varnes (1996)

Clases de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad Típica
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5 m/s
6	Muy rápido	5×10^1	3 m/min
5	Rápido	5×10^{-1}	1,8 m/h
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes
3	Lenta	5×10^{-5}	1,6 m/año
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año
1	Extremadamente lenta		

2.1.3.1 Caída

La caída es un tipo de movimiento en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca, o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996), es decir con velocidades mayores a 5×10^1 mm/s.

El estudio de casos históricos ha mostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s.

Una característica importante de las caídas es que el movimiento no es masivo ni del tipo flujo. Existe interacción mecánica entre fragmentos individuales y su trayectoria, pero no entre los fragmentos en movimiento.



Figura 2 Esquema de la caída de rocas
Fuente: (GEMMA, 2007)

2.1.3.2 Volcamiento

Se denomina así a un tipo de movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).

- Volcamiento en Bloque: involucra roca relativamente competente, donde el fallamiento ocurre por pérdida de estabilidad y rotación de uno o varios bloques a partir de un punto en su base, semejante al vuelco de libros en un estante (GEMMA, 2007).

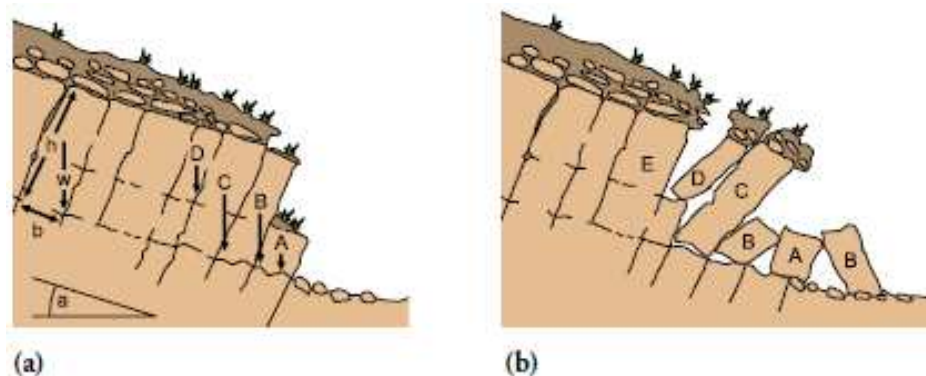


Figura 3 Esquema del vuelco en bloque
Fuente: De Freitas y waters, 1973 en GEMMA, 2007

- Volcamiento Flexural: involucra roca más frágil y densamente diaclasada; el fallamiento ocurre por el doblamiento de columnas de rocas delgadas. Los movimientos en este caso pueden ser lentos y graduales(GEMMA, 2007).

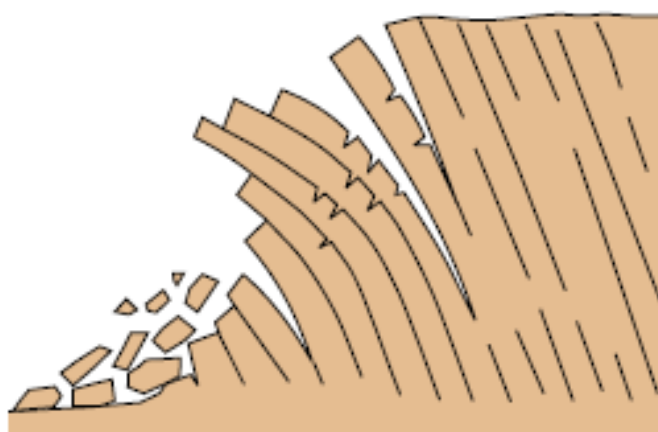


Figura 4 Esquema del vuelco por flexión
Fuente: Corominas y Yagué, 1997 en GEMMA, 2007

- Vuelco Flexural del Macizo Rocos: es un movimiento de una ladera a gran escala el cual involucra deformación flexural gradual de estratos

densamente diaclasados, con buzamientos altos, usualmente en rocas metamórficas como esquistos o filitas(Nichol, Hungr, & Evans, 2002)

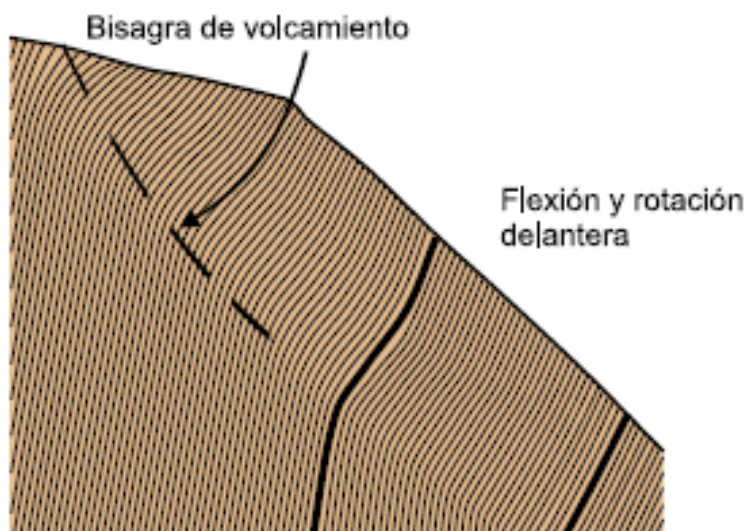


Figura 5 Esquema del vuelco del macizo rocoso
Fuente: Nichol et al., 2002 en GEMMA, 2007

2.1.3.3 Deslizamiento

Es un movimiento ladera abajo de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla, o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante (GEMMA, 2007).

Según Varnes (1978), se clasifican los deslizamientos, según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material, en traslacionales y rotacionales.

- **Deslizamiento Traslacional:** Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de

discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden & Varnes, Landslide types and processes, 1996).

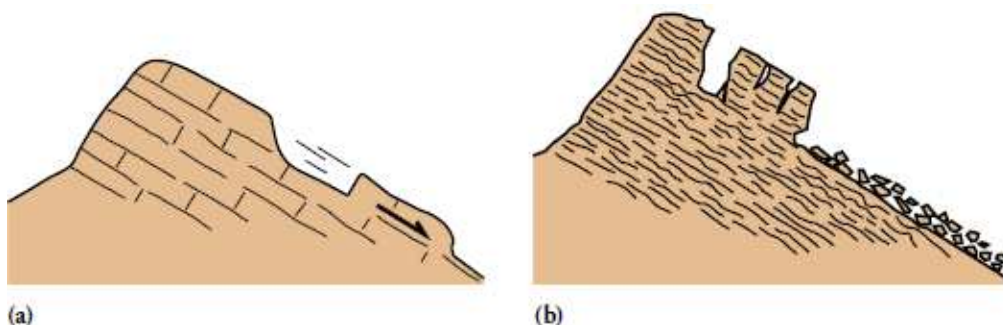


Figura 6 Esquema de un deslizamiento traslacional
Fuente: Corominas y Yagué, 1997 en GEMMA, 2007

- Deslizamiento Rotacional: Es un tipo de deslizamiento en el cual la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava. Los movimientos en masa rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal. La deformación interna de la masa desplazada es usualmente muy poca (GEMMA, 2007).



Figura 7 Esquema de un deslizamiento rotacional
Fuente: GEMMA, 2007

2.1.3.4 Propagación Lateral

La propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo (GEMMA, 2007).

- Propagación Lateral Lenta: el estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas; el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques y así el movimiento de éstos es extremadamente lento.

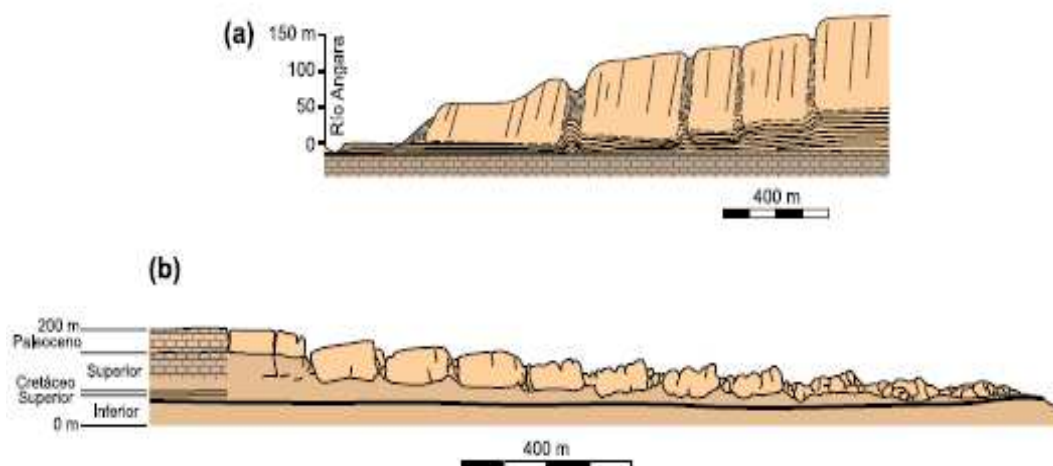


Figura 8 Esquema de propagación lateral lenta
Fuente: Varnes, 1978 en GEMMA, 2007

- Propagación Lateral por Licuación (rápida): usualmente inducidas por terremotos, son extremadamente rápidas y peligrosas.

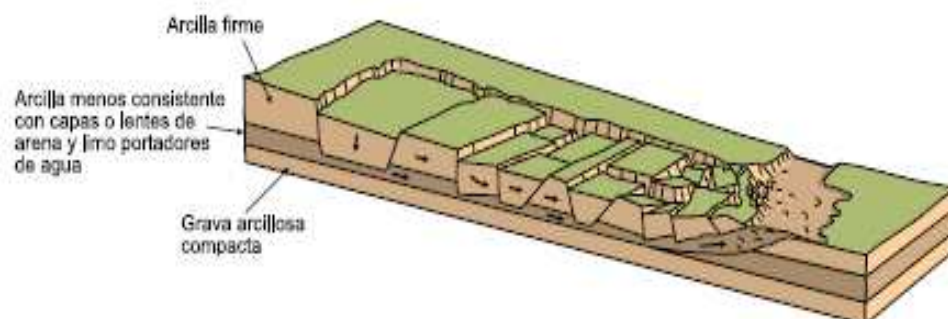


Figura 9 Esquema de propagación lateral rápida
Fuente: Varnes, 1978 en GEMMA, 2007

2.1.3.5 Flujo

Es un tipo de movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978).

- **Flujo Seco:** El término flujo trae naturalmente a la mente la idea de contenido de agua, y de hecho para la mayoría de los movimientos de este tipo se requiere cierto contenido de agua. Sin embargo, ocurren con alguna frecuencia pequeños flujos secos de material granular y se ha registrado un número considerable de flujos grandes y catastróficos en materiales secos(Varnes, 1978).



Figura 10 Cono de detritos, quebrada Qusicas, Lima, Perú
Fuente: Núñez S., en GEMMA, 2007

- **Flujo de Detritos:** Es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material

saturado en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos. Sus depósitos tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de u, trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales. Los flujos de detritos desarrollan pulsos usualmente con acumulación de bloques en el frente de onda. Como resultado del desarrollo de pulsos, los caudales pico de los flujos de detritos pueden exceder en varios niveles de magnitud a los caudales pico de inundaciones grandes. Esta característica hace que los flujos de detritos tengan un alto potencial destructivo(GEMMA, 2007).

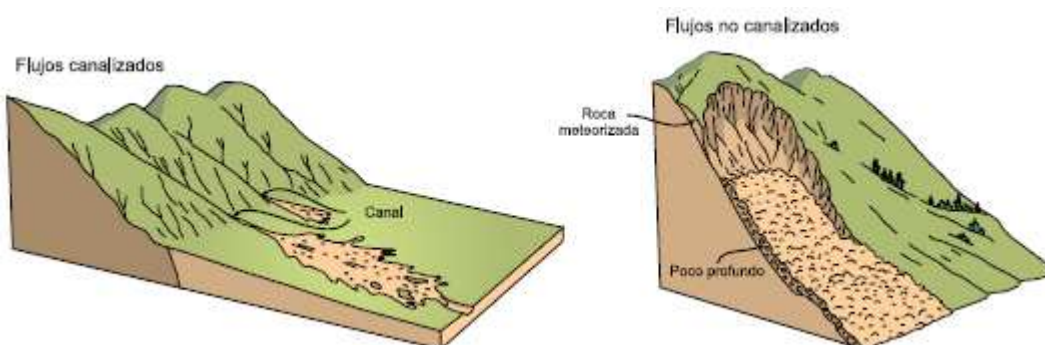


Figura 11 Esquema de flujos canalizados y no canalizados
Fuente: Cruden y Varnes, 1996 en GEMMA, 2007

- Crecida de Detritos: Flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal, usualmente también llamados flujos híper-concentrados (Hungry, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). Es difícil distinguir entre un flujo de detritos y una crecida de detritos con base en la concentración de sedimentos, por lo que deben diferenciarse según el caudal pico observado o potencial. Las crecidas de detritos se caracterizan por caudales pico 2

ó 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación(GEMMA, 2007).

Los depósitos de crecidas de detritos están compuestos comúnmente por mezclas de arena gruesa y grava pobremente estratificada. Se diferencian de los depósitos de flujos de detritos en que las gravas que los forman presentan una textura uniformemente gradada sin matriz en todo el depósito, e imbricación de clastos y bloques (Pierson, 2005).



Figura 12 Flujo de detritos en el valle del río Aconcagua, sector Puntilla del Viento, Chile, 1980
Fuente: Hauser, 2002 en GEMMA, 2007

- Flujo de Lodo: Flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad mayor al 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También se distingue de los deslizamientos por flujo de arcilla, en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el

movimiento, mientras que el deslizamiento por flujo ocurre por licuación in situ, sin un incremento significativo del contenido de agua (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001).



Figura 13 Flujos de Lodo, Carretera a Mendoza, Guardia Vieja, Chile, 1987

Fuente: Hauser A., en GEMMA, 2007

- Flujo de Tierra: Es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). Los flujos de tierra desarrollan velocidades moderadas, con frecuencia de centímetros por año, sin embargo, pueden alcanzar valores hasta de metros por minuto (Hutchinson, 1988).



Figura 14 Flujos de Tierra, Ecuador
Fuente: DINAGE en GEMMA, 2007

- Deslizamiento por Flujo: Este es un término muy importante desde el punto de vista práctico, ya que los deslizamientos por flujo, por sus características de ocurrencia súbita, altas velocidades y grandes distancias de viaje, representan uno de los fenómenos más peligrosos. Por fortuna, su ocurrencia está limitada a ciertos materiales geológicos que son susceptibles de licuación durante su fallamiento (GEMMA, 2007).

Hungr et al. (2001) lo definen como flujo muy rápido o extremadamente rápido de una masa de suelo con estructura granular ordenada o desordenada. Ocurre en taludes de pendiente moderada e involucra un exceso de presión de poros o licuación del material en la zona donde se origina el movimiento en masa. De acuerdo con el tipo de material, puede denominarse más específicamente como: deslizamiento por flujo de arena, deslizamiento por flujo de limo, deslizamiento por flujo de detritos o deslizamiento por flujo de roca débil (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001).



Figura 15 Flujos de Tierra en Cypress Road, West Vancouver, Canadá, 2005

Fuente: Hungr O., en GEMMA, 2007

- **Avalancha de Detritos:** Flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápidos. Estos movimientos comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que al desplazarse sufre una considerable distorsión interna y toma la condición de flujo. Relacionado con la ausencia de canalización de estos movimientos, está el hecho de que presentan un menor grado de saturación que los flujos de detritos, y que no tienen un ordenamiento de la granulometría del material en sentido longitudinal, ni tampoco un frente de material grueso en la zona distal (Hungr, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). Las avalanchas, a diferencia de los deslizamientos, presentan un desarrollo más rápido de la rotura. Según el contenido de agua o por efecto de la pendiente, la totalidad de la masa puede licuarse, al menos en parte, fluir y depositarse mucho más allá del pie de la ladera (Varnes, 1978).



Figura 16 Avalancha de detritos en Galipán, Estado Vargas, Venezuela, 1999

Fuente: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar en GEMMA, 2007

- **Avalancha de Rocas:** Las avalanchas de rocas son flujos de gran longitud extremadamente rápidos, de roca fracturada, que resultan de deslizamientos de roca de magnitud considerable (Hungry, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). Pueden ser extremadamente móviles y su movilidad parece que crece con el volumen. Sus depósitos están usualmente cubiertos por bloques grandes, aun cuando se puede encontrar bajo la superficie del depósito material fino derivado parcialmente de roca fragmentada e incorporada en la trayectoria. Algunos depósitos de avalanchas pueden alcanzar volúmenes del orden de kilómetros cúbicos y pueden desplazarse a grandes distancias; con frecuencia son confundidos con depósitos morrénicos. Las avalanchas de rocas pueden ser muy peligrosas, pero afortunadamente no son muy frecuentes incluso en zonas de alta montaña (GEMMA, 2007).



Figura 17 Avalancha de detritos de Tigre Dormido, Mendoza, Argentina
Fuente: IGRM-SEGEMAR en GEMMA, 2007

2.1.3.6 Reptación

La reptación se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo (GEMMA, 2007).

Dentro de este movimiento se incluyen la soliflucción y la geliflucción, este último término reservado para ambientes periglaciales. Ambos procesos son causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 metros de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo (GEMMA, 2007).

La reptación de suelos y la soliflucción son importantes en la contribución a la formación de delgadas capas de suelo coluvial a lo largo de laderas de alta pendiente. Estas capas pueden ser subsecuentemente la fuente de

deslizamientos de detritos superficiales y de avalanchas de detritos (GEMMA, 2007).

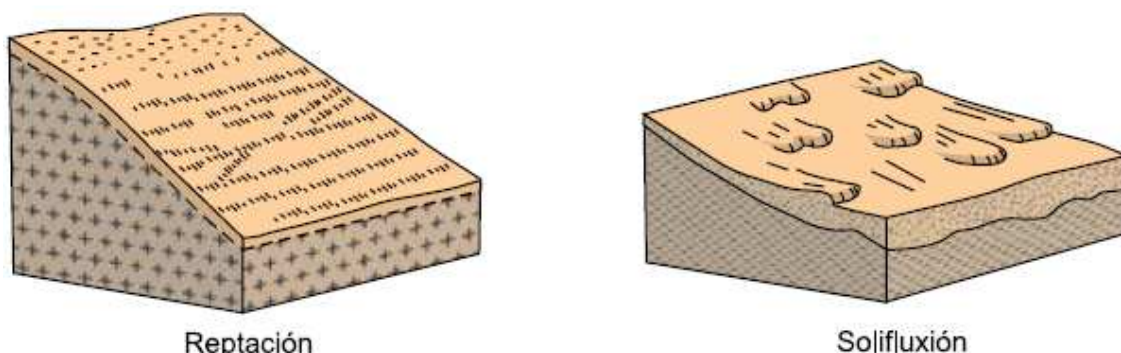


Figura18 Esquemas de reptación y solifluxión
Fuente: Corominas y Yagué, 1997 en GEMMA, 2007

2.1.3.7 Deformaciones gravitacionales profundas

Hay una variedad de procesos que podrían describirse como deformaciones de laderas (Hutchinson, 1988) o deformaciones gravitacionales profundas. Estos tipos presentan rasgos de deformación, pero sin el desarrollo de una superficie de ruptura definida y usualmente con muy baja magnitud de velocidad y desplazamiento (GEMMA, 2007).

Algunas deformaciones de laderas deben ser consideradas como precursoras de deslizamientos en gran escala. Las mediciones de velocidades de este tipo de movimiento están en el rango de 10^{-8} a 10^{-9} mm/s, extremadamente lentas (GEMMA, 2007).

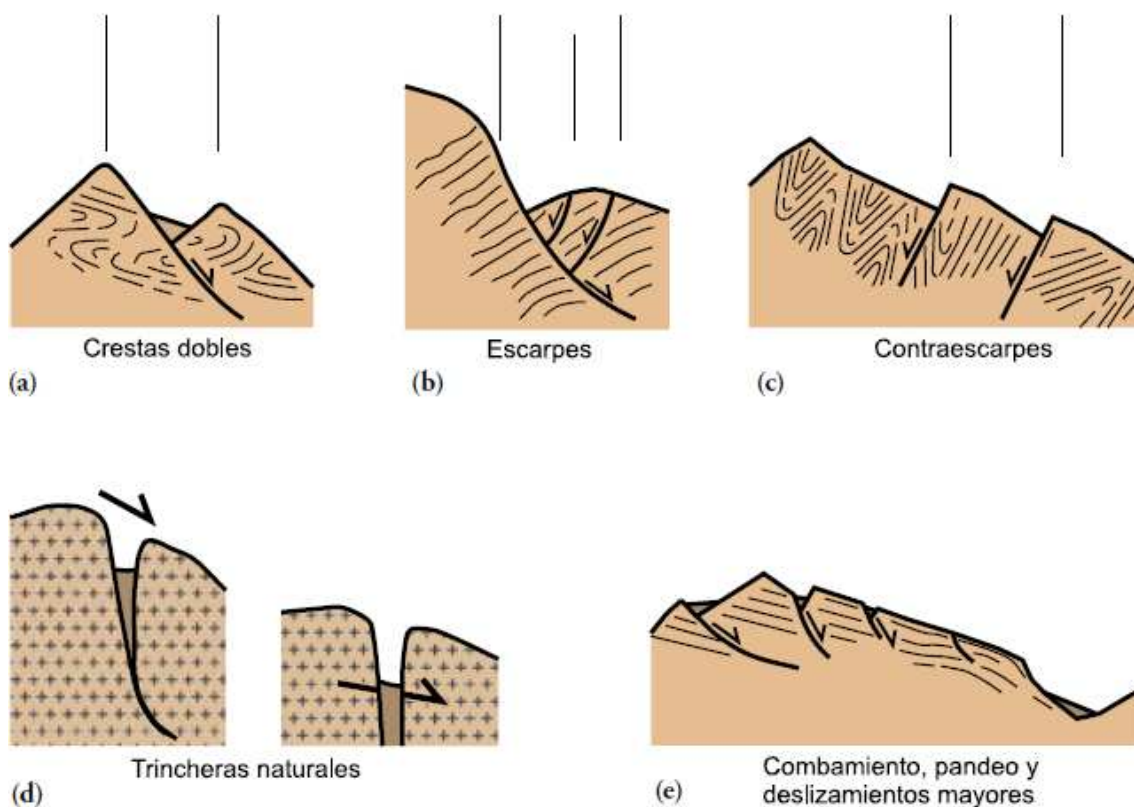


Figura19 Esquemas de reptación y solifluxión

Fuente: Agliardi et al., 2001 en GEMMA, 2007

2.2 Susceptibilidad a Deslizamientos

La susceptibilidad generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de los factores condicionantes o intrínsecos propios de la roca o suelo. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad (INDECI/Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011).

La susceptibilidad de movimientos de masa en Laderas por deslizamientos se puede evaluar de dos formas diferentes:

- a) **Sistema de la experiencia:** Se utiliza la observación directa de la mayor cantidad de deslizamientos ocurridos en el área estudiada y se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.

- b) **Sistema teórico:** Se mapea el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores.

2.2.1 Mapa de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad es un mapa en el cual se zonifica las unidades de roca o suelo que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores que pueden producir movimientos en masa y el mapa de inventario de movimiento en masa (INDECI/Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011).

No existe un procedimiento estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad a los movimientos en masa y existe mucha libertad en la determinación de los pasos a seguir.

En áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos se pueden identificar las áreas de acuerdo a su topografía. Si se posee un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad, y se puede combinar formación geológica y topografía para identificar áreas diferentes dentro de la misma formación.

Combinando mapas de pendientes y de geología dentro de un sistema de información geográfica se pueden lograr resultados interesantes.

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad se tienen en cuenta generalmente tres elementos:

- 1) Inventario de movimientos en masa ocurridos en el pasado.

- 2) Topografía y mapa de pendientes
- 3) Características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del terreno

Tabla 3 Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos (Kanungo, 1993)

Grado de Susceptibilidad	Criterio
Muy Alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos

Fuente: INDECI, 2011

2.2.2 Evaluación de la Susceptibilidad

Existen tres principios que orientan la evaluación del peligro por movimientos en masa en laderas por deslizamientos (Varnes, 1978):

Primero. Los movimientos en masa en laderas futuros probablemente ocurrirán bajo las mismas condiciones geomorfológicas y geológicas, en que se han producido en el pasado y se están produciendo en la actualidad.

Segundo. Las condiciones y procesos subyacentes que causan los deslizamientos pueden ser comprendidos por los investigadores.

Tercero. Se puede determinar el valor relativo de las condiciones y procesos que contribuyen a la ocurrencia de los movimientos en masa en

laderas, con lo cual se asigna a cada condición una medida que refleje su contribución en la ocurrencia del fenómeno.

2.2.3 Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los factores que influyen en los movimiento en masa se pueden dividir en dos tipos: Permanentes y Variables (Sharpe, 1938).

Los factores permanentes son las características de un terreno que permanecen sin variación o cambian muy poco solo después de períodos largos de tiempo, como por ejemplo, las pendientes y el tipo de roca.

Dichos factores, cambiantes en tiempo e intensidad, son agrupados en: variables (Factores Condicionantes) cuasi-estáticas, las cuales contribuyen a la susceptibilidad, como geología, pendientes y aspecto de las laderas; y variables (Factores Desencadenantes) dinámicas como precipitación y sismos, las cuales tienden a detonar los movimiento en masa en áreas con determinada susceptibilidad (Dai y Lei, 2001).

A fin de interpretar la probabilidad de futuros movimientos en masa, se requiere comprender las condiciones y procesos que controlan los movimientos en masa en el área de estudio. Existen tres factores físicos que se deben tomar en cuenta: anteriores movimiento en masa de la zona, la calidad de las pendientes y el tipo de roca; que son el mínimo de los componentes necesarios para evaluar el peligro de movimiento en masa (Manual OEA/DDRMA, 1993), se puede añadir el factor hidrológico para reconocer el importante rol que tienen frecuentemente en la ocurrencia de movimientos en masa, la información sobre la capa freática y sus

fluctuaciones raramente se encuentran disponibles por lo que se pueden usar medidas indirectas que pueden ser cartografiadas para mostrar la influencia de la hidrología del área tal como la vegetación, la orientación de las pendientes, o zonas de precipitación.

2.2.3.1 Factores Condicionantes

Factores propios del fenómeno o intrínsecos, de acción estática o pasiva, que representa debilidades inherentes en rocas y suelos en las laderas.

a) Geológicos:

- **Litológicos.-** La litología interviene en la naturaleza y composición físico-química de las rocas, por cambios de su capacidad portante de acuerdo al tipo de características de la roca como; dureza, fragilidad, adherencia, consolidación, compactación, meteorización.
- **Estratigrafía.-** Disposición de las rocas (orientación y ángulo de inclinación), espesor y composición de los estratos, lo que determina el grado de estabilidad o inestabilidad.
- **Comportamiento Geodinámico.-** Compresibilidad, cohesión, deformabilidad, entre otros.

b) Geomorfológicas:

- Geometría de taludes, topografía irregular, pendientes pronunciadas.
- La cercanía a fallas o fisuras progresivas.
- Hidrogeológico cambios de la presión hidrostática, que pueden ser a la vez factores desencadenante por efecto de lluvias.

2.2.3.2 Factores Desencadenantes

Factores que tienen una acción activa en la remoción en masas en laderas, que originan la inestabilidad.

a) Fenómenos de origen natural

Precipitaciones pluviales, filtración de aguas pluviales, variación de temperatura, acciones erosiva de los vientos, acción de la gravedad, sismos, cambios de la presión hidrostática por acciones hidrometeorológicas.

b) Fenómenos Tecnológicos o Inducidos por el ser humano

Deforestación, corte de talud, socavaciones, explotaciones mineras, usos inadecuado de riegos, asentamientos humanos en terrenos de capacidad portante baja o ubicados en laderas inestables.

c) Meteorización Física

Son de dos tipos: los que dependen de la naturaleza de la roca y sus propiedades y los que dependen de las condiciones externas como el clima, humedad, vegetales, animales.

d) Meteorización Química

Descomposición de algunas rocas por efecto de los factores externo como infiltraciones de lluvias, acción eólica, entre otros.

2.3 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información: mapas interactivos, datos geográficos,

modelos de geoprocésamiento, modelos de datos, metadatos (ESRI España, 2014).

La correcta implementación de un SIG debe considerar todos y cada uno de sus elementos fundamentales, entendiéndose como tales: el software, hardware, los datos, métodos y el personal calificado (Maguire, 1991). Además, la representación digital del mundo real supone conceptualizar el espacio, lo cual se realiza a través de los modelos de datos.

Los SIG con asiduidad se nutren de datos que tienen su origen en fuentes muy diversas. En muchas ocasiones los datos se obtienen indirectamente, habiendo sido elaborados por otros grupos de trabajo. En estas condiciones la información puede ser utilizada inmediatamente, o casi de inmediato, ya que lo habitual es que los datos previamente necesiten una conversión de formato o una transformación del sistema de referencia. En otros casos el trabajo se centra en un área de estudio de la que no se dispone de información, haciéndose indispensables funciones para la introducción de datos en el sistema. Con la intención de superar estas limitaciones la mayor parte del software SIG incluye funciones de digitalización, verificación de datos, rasterización y georreferenciación (Clarke, 1997).

Con respecto al software, los programas SIG recogen un considerable número de funciones orientadas al análisis espacial, ya que es uno de sus puntos fuertes y distintivos. Entre ellas se incluyen la superposición de mapas, el análisis de proximidad, el cálculo de áreas, perímetros y volúmenes, el análisis de rutas, la elaboración de estadísticas y mapas

algebraicos, entre otros. (Chrisman, 1997; Burrough y McDonnell, 1998; Bernhardsen, 1999).

2.3.1 Modelo de Datos Espacial

El modelo de datos espacial en un SIG puede ser raster o vectorial. Las bases de datos de tipo raster están compuestas por una retícula regular en la que cada celda tiene asignado un valor discreto a modo de atributo (Chrisman, 1997). En el modelo vectorial las entidades se definen por pares de coordenadas que configuran puntos, líneas o límites de polígonos para regiones con un mismo valor temático (Jones, 1997). Por supuesto cada modelo presenta sus propias ventajas e inconvenientes. Las bases de datos raster se caracterizan por ser muy simples y los cálculos sobre ellas bastante sencillos; sin embargo las vectoriales poseen complejas estructuras que requieren sofisticados algoritmos para el análisis (Burrough y McDonell, 1998). No obstante, los datos vectoriales pueden ser almacenados compactamente y visualizados con gran precisión, a diferencia de lo que ocurre en el formato raster. Asimismo, estas representaciones muestran el característico efecto aliasing como consecuencia de la forma rectangular de las celdas que componen la retícula (Morad & Triviño Pérez, 2001).

2.3.2 Análisis Espaciales

Incluye las funciones que realicen cálculos sobre las entidades gráficas. Va desde operaciones sencillas como longitud de una línea, perímetros,

áreas y volúmenes, hasta análisis de redes de conducción, intersección de polígonos y análisis de modelos digitales del terreno.

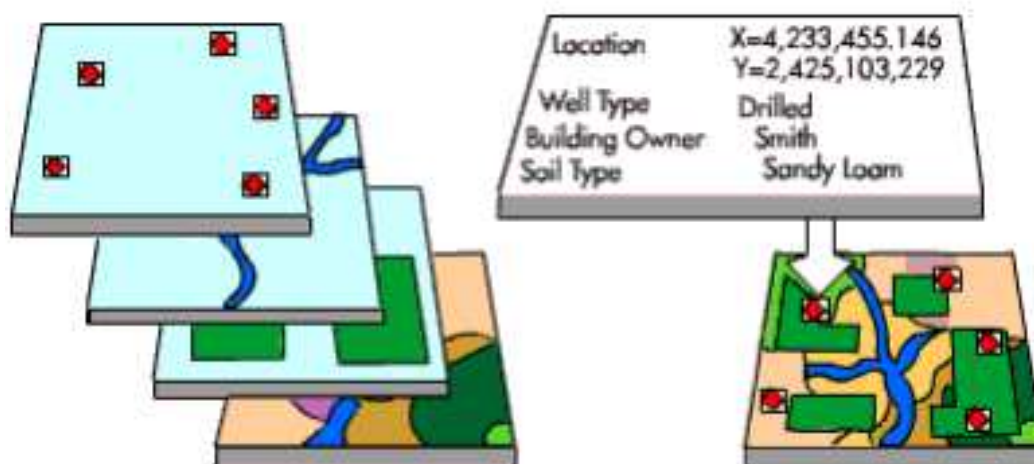


Figura 20 Esquemas sobre análisis espaciales

Fuente: Carmona et al., 1999

Los diferentes tipos de análisis que un SIG debe realizar son:

- **Contigüidad:** Encontrar áreas en una región determinada.
- **Coincidencia:** Análisis de superposición de puntos, líneas, polígonos y áreas.
- **Conectividad:** Análisis sobre entidades gráficas que representen redes de conducción, tales como:
 - **Enrutamiento:** Como se mueve el elemento conducido a lo largo de la red.
 - **Radio de acción:** Alcance del movimiento del elemento dentro de la red.
 - **Geocodificación de direcciones:** Acople de información de direcciones a las entidades gráficas.

- **Análisis digital del terreno:** Análisis de la información de superficie para el modelamiento de fenómenos geográficos continuos. Con los modelos digitales de terreno (DTM: la representación de una superficie por medio de coordenadas X, Y, Z) que son la información básica para el análisis de superficies.
- **Operación sobre mapas:** Uso de expresiones lógicas y matemáticas para el análisis y modelamiento de atributos geográficos. Estas operaciones son soportadas de acuerdo con el formato de los datos (raster o vectorial)
- **Geometría de coordenadas:** Operaciones geométricas para el manejo de coordenadas terrestres por medio de operadores lógicos y aritméticos. Algunas de esas operaciones son: proyecciones terrestres de los mapas, transformaciones geométricas (rotación, traslación, cambios de escala), precisión de coordenadas, corrección de errores.

2.3.3 El diseño de modelos espaciales en SIG

En el diseño de modelos espaciales con SIG, se pretende representar fenómenos del mundo real como entidades espaciales, estas son puntos, líneas, polígonos, superficies o redes; cada una de ellas debe ser georeferenciada para mostrar la ubicación donde ocurre el fenómeno. Los fenómenos que no se puedan representar por algún tipo de entidad espacial no podrán ser tomados en cuenta dentro del modelo espacial. Es necesario que los modelos espaciales expresen la topología de las entidades espaciales, y las relaciones entre sus atributos (Maskrey, 1998).

El modelo espacial no puede llevarse a cabo autónomamente y sin referencia al desarrollo de teorías y marcos conceptuales. Cualquier modelo espacial se nutre implícita o explícitamente de una u otra teoría. Las limitaciones de un modelo espacial para representar un fenómeno, normalmente, reflejan las limitaciones de los modelos conceptuales subyacentes (Maskrey, 1998).

Para representar un escenario de un fenómeno en un modelo espacial, también hay que enfrentar el problema de la escala. En un escenario de un fenómeno determinado, intervienen procesos sociales y naturales que operan a escalas diferentes y con poca correlación espacial y temporal. Cambios globales en el clima o en la economía regional pueden tener una enorme incidencia en los procesos, operando en un escenario local, a pesar de que las escalas espaciales y temporales son radicalmente diferentes (Maskrey, 1998).

En contextos donde el fenómeno tiene una alta escala fractal, el diseño de modelos capaces de representar los escenarios, a nivel local, significa abordar una gran complejidad y heterogeneidad en las variables que intervienen y, por consiguiente, una gran incertidumbre en el peso e importancia que tenga cada variable. Por lo tanto, las aplicaciones que pretendan analizar un fenómeno, a un alto nivel de resolución, requieren de modelos espaciales más complejos que aplicaciones cuyo análisis se realizan a baja resolución (Maskrey, 1998).

En los modelos espaciales, la complejidad se refiere no sólo al número de variables que hay que modelarse sino, también, a las relaciones entre variables. La definición de las operaciones espaciales necesarias para

combinar una gran variedad de variables presenta problemas no sólo de complejidad, sino también de incertidumbre, ya que el modelo mostrará diferentes niveles de sensibilidad frente a cambio en las diferentes variables (Maskrey, 1998).

2.4 Lógica Difusa

La lógica difusa se fundamenta en la calificación de parámetros a través de variables lingüísticas, estas constituyen una herramienta para modelar los procedimientos de razonamiento del ser humano. Razonamiento que por ser de carácter cualitativo, involucra siempre un nivel de incertidumbre, el cual se refleja en los resultados del proceso de evaluación de los diferentes fenómenos donde se apliquen los sistemas dinámicos basados en la lógica difusa (Portilla, 2001).

Un ser humano para expresar la temperatura utiliza los términos: “está haciendo frío o está haciendo calor”, en este caso se podría decir que las variables lingüísticas: frío y calor, califican razonablemente el estado de la temperatura ambiental y a ellas se las relaciona con rangos o intervalos de valores numéricos, que en promedio y en forma lógica las representa: temperaturas entre 0 y 5°C (mucho frío), entre 6 y 10°C (frío), entre 11 y 25°C (fresco) y mayor a 26°C (calor). Con estas calificaciones lingüísticas se desarrolla el proceso de evaluación y posteriormente se lleva la valoración lingüística a rangos numéricos, cuyos límites determinan el nivel de incertidumbre del resultado (Portilla, 1999).

2.4.1 Variable Lingüística

“Es una cuádrupla, en la que el primer elemento corresponde al nombre de la variable (Ej.: Angulo de Buzamiento); el segundo, al universo de discurso o rango en el cual toma los valores la variable; el tercero, representa el conjunto de términos lingüísticos constituidos por los calificativos de la variable; y el cuarto, es el significador que representa la distribución de los conjuntos difusos de los términos lingüísticos en el rango del universo de discurso de la variable $\{\beta, B, T_\beta, S_\beta\}$. Dónde: β = Angulo de Buzamiento, $B = [0, 90]$, $T_\beta = \{\text{Alto, Medio, Bajo}\}$, y el significador correspondería a lo expresado en la Figura 21” (Portilla, 2001).

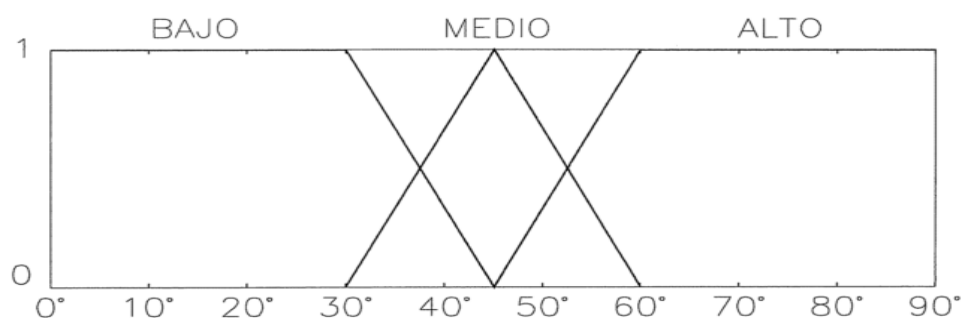


Figura 21 Significador Lingüístico (Angulo de Buzamiento)
Fuente: Geología Colombiana No. 26. Portilla Modesto

2.4.2 Conjunto Difuso

Es una colección de objetos o elementos cuya pertenencia al conjunto, de acuerdo a sus características o propiedades, está dada por una función que representa un grado de pertenencia, de tal elemento al conjunto. A diferencia de la teoría clásica de conjuntos, donde el elemento pertenece o no pertenece, es verdadero o es falso y toma el valor de 0 o de 1, la teoría

de conjuntos difusos concibe estas situaciones como los valores extremos que puede tomar la variable o elemento valorado. La función de pertenencia o "función característica", representada por μ_F se denota de la siguiente manera:

$$\mu_F: U \rightarrow [0,1]$$

Donde $\mu_F(u)$ es el grado en que el elemento u pertenece al conjunto universal U (ejemplo: $\mu_F(u) = 0.25$, indica que el elemento u pertenece en un 25% a U y en un 75% u no pertenece a U . en otras palabras, que existe un 25% de probabilidades de hallar a u en U y un 75% de no hallarlo (Portilla, 1999).

2.4.3 Función de Pertenencia a usar (Padilla, 2007)

La metodología difusa se basa en el análisis y selección del caso particular de la variable que interactúa con el fenómeno o evento. Para esto analizaremos tres posibles escenarios o casos, a los cuales se pueden ajustar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, según el evento del cual se esté estudiando y su correspondiente variable.

Se usara la curva del seno cuadrado, para obtener una curva donde el rango sea de $[0, 1, 0]$, y no obtener valores negativos, como sería el caso de tomar la curva seno no cuadrática. El eje x se convierte en la probabilidad y el ángulo de la función, que se lo llamará α , estará en función de la variable del evento.

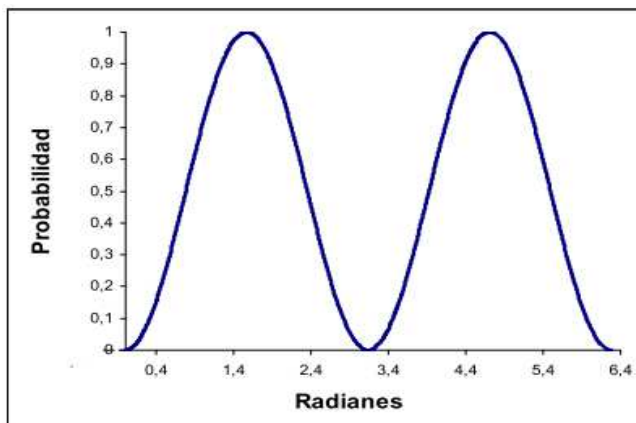


Figura 22 Función Seno Cuadrado

Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo

Es así que la probabilidad se define de la siguiente forma:

$$P = f(\sin \alpha)[1]$$

Dónde:

P = probabilidad de ocurrencia del evento o fenómeno

α = variable en función del evento o fenómeno

Mínima P = 0 o 0%

Máxima P = 1 o 100%

Para obtener una curva donde el rango sea de [0, 1,0], usamos la función cuadrada del seno.

$$P = \sin^2 \alpha [2]$$

Puntos importantes en la función:

Estas funciones están controladas por cuatro puntos situados de la siguiente forma (Figura 23):

Punto A: Punto de valor mínimo en la variable a modelar

Punto B y C: Rango de valores donde se encuentran la mayor cantidad de datos de la variable

Punto D: Punto de valor máximo en la variable.

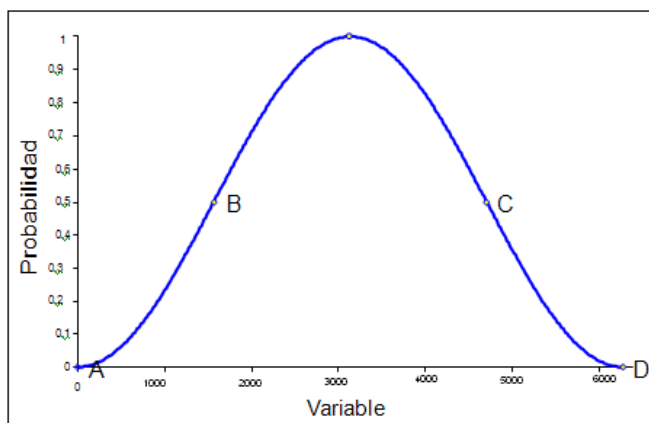


Figura 23 Puntos importantes del modelo.

Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo

Puntos de inflexión de la curva: estos puntos pueden ser tomados como un caso particular para situar los puntos B y C de las variables (Figura 23). Se tienen tres casos de los que se va a tomar como ejemplo el de la curva simétrica (Figura 24).

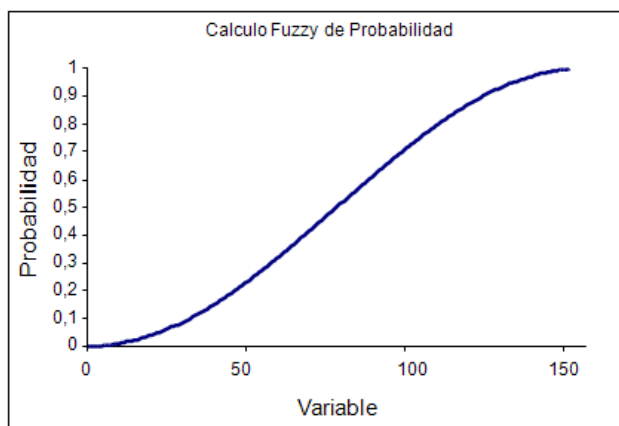


Figura 24 Probabilidad Creciente

Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo

$$P = \sin^2 \alpha$$

$$P' = 2 * \sin \alpha * \cos \alpha$$

$$P'' = 2 * \sin \alpha * -\sin \alpha + 2 * \cos \alpha * \cos \alpha$$

$$P'' = 2(\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)$$

$$\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0$$

$$1 - \sin^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 0$$

$$1 - 2 * \sin^2 \alpha = 0$$

$$\sin^2 \alpha = 1/2$$

$$\alpha_1 = \pi/4$$

$$\alpha_2 = 3\pi/4$$

Finalmente:

- $P_1(A; 0) \rightarrow$ Punto de valor mínimo en la variable a modelar
- $P_2(B; \pi/4) \rightarrow$ Punto de inicio de la zona en la que existe mayor cantidad de datos de la variable
- $P_3(C; 3\pi/4) \rightarrow$ Punto de fin de la zona en la que existe mayor cantidad de datos de la variable
- $P_4(D; \pi) \rightarrow$ Punto de valor mínimo en la variable a modelar
- $P_5(E; \pi/2) \rightarrow$ Punto de valor máximo en la variable, siendo $E = \frac{B+C}{2}$

Zonas Bajo la curva

De la ecuación general de la recta se tiene:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad [3]$$

El eje x será la variable y el eje y será α

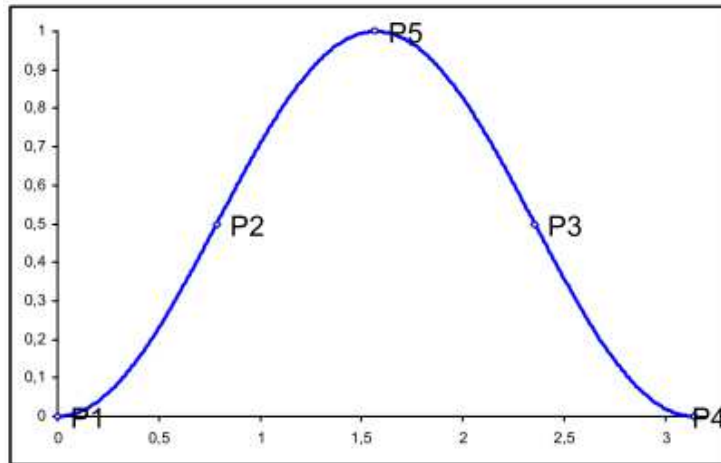


Figura 25 Puntos de interés de la función de pertenencia
Fuente: Revista Geoespacial No. 4. Padilla Oswaldo

Zona I (P₁P₂)

Pertenece a la sección en la que existe menor cantidad de datos, en el principio de la función:

$$P_1(A, 0)$$

$$P_2(B, \pi/4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \times \frac{(V - A)}{(B - A)} [4]$$

Zona Ila (P₂, P₅)

Pertenece a la sección en la que existe mayor cantidad de datos, en el principio de la función:

$$P_2(B, \pi/4)$$

$$P_5\left(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{2}(V - B)}{(C - B)} [5]$$

Zona IIb (P₅, P₃)

Pertenece a la sección en la que existe menor cantidad de datos, en el final de la función:

$$P_5\left(\frac{B+C}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

$$P_3(C, 3\pi/4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{\frac{\pi}{4}(2V - B - C)}{(C - B)} [6]$$

Zona III (P₃, P₄)

$$P_3(A, 3\pi/4)$$

$$P_4(D, \pi)$$

$$\alpha = 3\frac{\pi}{4} + \frac{\frac{\pi}{4}(V - C)}{(D - C)} [7]$$

Como se puede pensar existen diversas aplicaciones, como puede ser el modelamiento de fenómenos espaciales como la ubicación de especies u ocurrencia de un determinado fenómeno; en sensores remotos se aplica para la clasificación de imágenes en la obtención de una o varios elementos, como puede ser un tipo de vegetación, una clase de suelo específico, entre otros. En cualquiera de estas situaciones o ejemplos existen más de dos variables que se encuentran involucradas al elemento a obtenerse, es así que la probabilidad de localizar o modelar este elemento corresponde al producto de todas esas variables.

$$\frac{(PV1 + PV2 + \dots + PVN)}{n} = Pt$$

Figura 26 Probabilidad total con más de dos variables

Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo

$$Pt = (PV1 + PV2 + PV3 + \dots + PVN) / n$$

Dónde:

Pt: es la probabilidad total de obtención de un fenómeno (clasificación de una imagen)

PV₁...PV_N: son las probabilidades individuales, obtenidas mediante la metodología de operadores difusos propuesta, de cada variable.

n: número total de variables.

2.4.4 Casos lógica Fuzzy

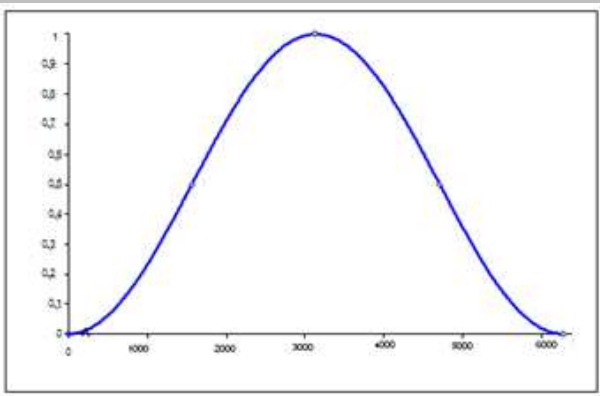
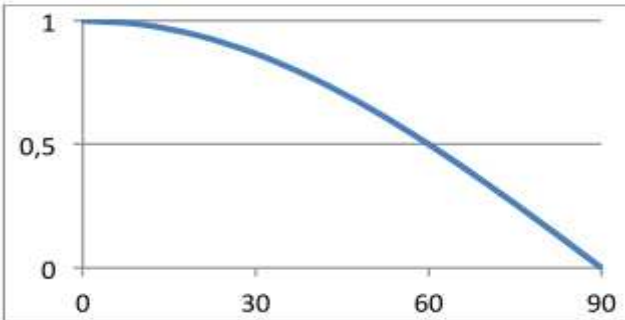
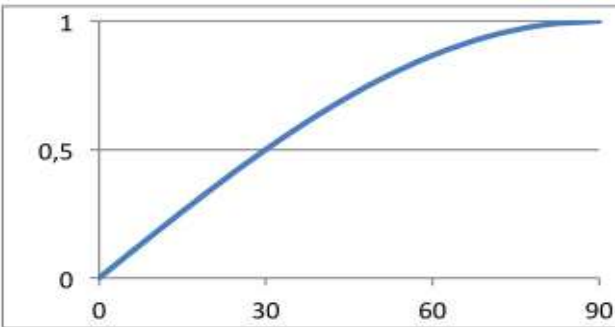
La lógica Fuzzy es una gama intermedia, o posibles respuestas entre el sí y el no, de forma cualitativa. Es decir, que aplicando la Lógica Fuzzy son valores numéricos probables entre el 0 y el 1, de forma cuantitativa. Para la lógica Fuzzy las funciones que se aplican son el Seno y el Coseno ya que, el rango en el que se trabaja es entre 0 y 1 (Andocilla, 2012).

Los casos de lógica Fuzzy en los cuales ya se ha trabajado son 3, basándose en conceptos anteriores.

- En el primer caso, el rango a ser utilizado en el análisis es de [0,1], y no obtener valores negativos, como sería el caso de tomar la curva seno no cuadrática.

- En el segundo, los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es inversamente proporcional al evento analizado.
- En el tercer, los casos a encontrar, son aquellos donde la probabilidad de ocurrencia, es directamente proporcional al evento analizado.

Tabla 4 Casos Lógica Fuzzy
CASOS FUZZY **RANGO** **FUNCIÓN**

CASOS FUZZY	RANGO	FUNCIÓN
<p>Caso 1</p> 	0 a π	SENO
<p>Caso 2</p> 	0 - $\pi/2$	COSENO
<p>Caso 3</p> 	0 - $\pi/2$	SENO

Fuente: Revista Geoespacial No 4. Padilla Oswaldo

2.5 Método Mora & Vahrson

Esta metodología se aplica mediante la combinación de parámetros, estos se obtienen de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacial. Dichos parámetros reflejan los factores que conducen a la inestabilidad de la ladera, tales como litología, humedad del suelo y el grado de pendiente de la ladera; con estos parámetros se determina un grado de susceptibilidad por elementos pasivos. A partir de estas condiciones, factores morfodinámicos desestabilizan las laderas que presentan cierto grado de susceptibilidad por factores pasivos, en esta metodología se utiliza la sismicidad y las lluvias intensas como elementos activos o factores de disparo que perturban el equilibrio de los materiales de la ladera.

El grado de susceptibilidad a movimientos en masa es el producto de los elementos pasivos y de la acción de los factores de disparo:

$$S = P * D \quad [8]$$

Dónde:

S: Grado de susceptibilidad a deslizamientos

P: Valor producto de la combinación de los parámetros pasivos

D: Valor del factor de disparo de los parámetros activos

Los elementos pasivos se componen de los siguientes parámetros:

$$P = P_l * P_h * P_p \quad [9]$$

Dónde:

P_l : Valor del parámetro de susceptibilidad litológica

P_h : Valor del parámetro de humedad del terreno

P_p : Valor del parámetro pendiente

El factor de disparo se compone de los siguientes parámetros:

$$D = D_s + D_{ll} [10]$$

Dónde:

D_s : Valor del parámetro de disparo por sismicidad

D_{ll} : Valor del parámetro de disparo por lluvia

Sustituyendo los parámetros, la ecuación completa se expresa de la siguiente manera:

$$S = (P_l * P_h * P_p) * (D_s + D_{ll}) [11]$$

2.5.1 Estimación del índice de susceptibilidad

Son las variables intrínsecas presentes que generan la susceptibilidad permanente del terreno a sufrir deslizamientos, entre las que encontramos parámetros como el relieve, humedad del suelo y la litología.

2.5.1.1 Evaluación del Parámetro Pendiente (P_p)

Este parámetro se define como la mayor diferencia de elevación en el área de cada pixel por Km².

$$Rr = Dhmax / A$$

Dónde:

Rr: Índice de relieve relativo (M/Km²)

Dhmax: Máxima diferencia de elevación por unidad de área (m)

A: Área (km²)

Mora y Vahrson (1994), señalan que algunas correlaciones indican un crecimiento exponencial de la susceptibilidad a deslizamientos, hasta que alcanzan valores muy altos ($Rr > 800 \text{ m/Km}^2$), luego de los cuales se estima que las elevadas pendientes corresponden con la presencia de rocas, lo cual reduce significativamente la posibilidad de que se presente un deslizamiento, contrario a lo que ocurrirá para valores bajos de este parámetro.

En la Tabla 5 se presenta la clasificación original del parámetro de relieve relativo, donde, por medio de una distribución normal, se obtiene la calificación de la influencia del relieve y su peso relativo dentro de la zonificación.

Tabla 5 Calificación original del factor relieve relativo (Mora & Vahrson., 1992)

Relieve Relativo (m/km ²)	Calificativo	Valor del Parámetro
0 – 75	Muy Bajo	0
75 – 175	Bajo	1
175 – 300	Moderado	2
300 – 500	Mediano	3
500 – 800	Alto	4
> 800	Muy Alto	5

Para la calificación de este parámetro se utiliza las clases de pendiente de Van Zuidam (1986), como lo muestra la **Tabla 6**, con las cuales se describen los procesos característicos y las condiciones del terreno. La clasificación corresponde a pesos relativos que van desde 0, para pendientes extremadamente bajas (0 – 2%), hasta el valor máximo de 6, que corresponde a pendientes extremadamente fuertes (> 140%).

Tabla 6 Clases de pendientes (van Zuidam, 1986) y valoración del parámetro de la pendiente (P_p) (Mora & Vahrson., 2002)

Clases de Pendientes		Condiciones del Terreno	Valor de P _p	Valoración
[°]	[%]			
0 – 2	0 – 2	Planicie, sin denudación apreciable	0	Extremadamente baja
2 – 4	2 – 7	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1	Muy baja
4 – 8	7 – 15	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2	Baja
8 – 16	15 – 30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo	3	Moderada
16 – 35	30 – 70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos	4	Fuerte
35 – 55	70 – 140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible	5	Muy fuerte
> 55	> 140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada	6	Extremadamente fuerte

2.5.1.2 Parámetro de Susceptibilidad Litológica (P_l)

Los tipos de suelos y rocas juegan un papel preponderante en el comportamiento dinámico de las laderas (Mora & Vahrson., 1992). La composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, los

espesores y grado de meteorización, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, la posición y variación de los niveles freáticos, entre otros., influyen claramente en la estabilidad o inestabilidad de las laderas (Mora & Vahrson., 1992).

Para evaluar este parámetro, en la Tabla 7. Se presenta la calificación original del factor litológico dada por Mora y Vahrson, donde se valora la susceptibilidad a la inestabilidad de laderas.

Tabla 7 Calificación original de diferentes litologías y su susceptibilidad Litológica (Mora & Vahrson, 1992)

Litología	Calificación	Factor P_1
Aluvión compacto permeable, calizas permeables, rocas intrusivas ligeramente fisuradas, basaltos, ignimbritas, andesitas; bajo grado de meteorización, niveles freáticos bajos, poco fisuradas y altas resistencia al corte	Baja	1
Alto grado de meteorización de las litologías mencionadas anteriormente y de rocas sedimentarias masivas, baja resistencia al corte y fracturas de cizalla	Moderada	2
Rocas sedimentarias, intrusivas metamórficas y volcánicas considerablemente meteorizadas; suelos regolítico arenosos compactos, fracturación considerable y nivel freático fluctuante.	Media	3
Meteorización considerable, alteración hidrotermal de cualquier clase de rocas; rocas fuertemente fracturadas y con fisuras llenas de arcilla; suelos piroclásticos y fluvio lacustres pobremente compactados; niveles freáticos poco profundos.	Alta	4
Rocas extremadamente alteradas; suelos residuales, coluviales y aluviales con baja resistencia cortante, niveles freáticos poco profundos.	Muy Alta	5

2.5.1.3 Parámetro Humedad del Terreno (P_h)

Para determinar la humedad del suelo se emplea balances hídricos estimativos, donde se utiliza la precipitación media mensual. Debe determinarse el valor de la evapotranspiración promedio mensual en la zona

de estudio, y es este valor el que marca los límites en las clases, así tenemos que, califica con 0 a una precipitación mensual menor a la evapotranspiración promedio, califica con 1 cuando la lluvia se encuentra entre una y dos veces la evapotranspiración promedio y calificar con 2 cuando la lluvia mensual supera dos veces la evapotranspiración promedio mensual.

Mora y Vahrson (1994), asumen una evapotranspiración potencial de 125 mm/mes, por lo tanto, precipitaciones mensuales inferiores a 125 mm no conducen a un aumento de la humedad del terreno, mientras que una precipitación entre 125 y 250 mm si la incrementa, y precipitaciones mensuales superiores a 250 mm conducen a una humedad del suelo muy alta; la valoración de los promedios mensuales de precipitación se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia (Mora et al., 1992)

Precipitación promedio (mm/mes)	Valor asignado
< 125	0
125 - 250	1
> 250	2

Realizada la calificación del promedio mensual de precipitación a cada mes en una estación, se procede con la suma de los doce valores obteniendo un valor entre 0 y 24, este valor acumulado se lo vuelve a calificar según la Tabla 9.

Tabla 9 Valoración del parámetro humedad del suelo (Pp) (Mora et al., 1992)

Suma de valores asignados a cada mes	Calificativo	Valor P_h
0 – 4	Muy Bajo	1
5 – 9	Bajo	2
10 – 14	Medio	3
15 – 19	Alto	4
20 – 24	Muy Alto	5

2.5.2 Incorporación del factor de disparo

El factor de disparo considera las variables que al presentarse provocan la presencia de fenómenos de remoción en masa. La metodología Mora & Vahrson considera como factores de disparo a la precipitación y a la actividad sísmica.

2.5.2.1 Parámetro de disparo por sismicidad (D_s)

Según Mora y Vahrson (1999) un potencial generador de deslizamientos es la actividad sísmica, ésta relaciona la escala de intensidades Mercalli Modificada y los índices de influencia de la sismicidad, definiendo 12 clases para situación específica. Se recomiendan utilizar las intensidades bajo la forma de mapas de máximos históricos, corregidos, de la intensidad relativa, a un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 10 Valoración del parámetro de disparo por sismicidad Ds (Mora & Vahrson, 1992)

Intensidad Mercalli Modificada	Aceleración pico (%g) (Trifunac & Brady, 1975)	Valoración del Parámetro Ds
I	0.3 – 0.6	1
II	0.6 – 1.1	2
III	1.1 – 2.2	3
IV	2.2 – 4.5	4
V	4.5 – 8.9	5
VI	8.9 – 17.7	6
VII	17.7 – 35.4	7
VIII	35.4 – 70.5	8
IX	70.5 – 140.8	9
X	140.8 – 280.8	10
XI	280.8 – 560.4	11
XII	> 560.4	12

2.5.2.2 Parámetro de disparo por lluvia (D_{ll})

Mora y Vahrson establecen que los deslizamientos de tipo flujo regolítico (esto es deslizamientos más bien superficiales), son detonados por lluvias de duración corta y alta intensidad (tipo convectivo); a la vez que los deslizamientos más profundos de tipo traslacional, son detonados por lluvias con duración muy larga e intensidad mucho menor que en el primer caso (tipo orográfico, temporales). Para cubrir ambos tipos de fenómenos se utiliza un índice basado en la determinación del máximo valor diario de lluvia en 100 años y series de tiempo de 10 años o más (Ramirez, 2006).

Tabla 11 del Valoración original factor intensidad de la precipitación D_{II} (Mora & Vahrson, 1992)

Lluvias máximas diarias anuales (mm) n > 10 años Tr = 100 años	Lluvias máximas diarias anuales (mm) n < 10 años promedio	Calificativo	Valor del Parámetro D_{II}
< 100	< 50	Muy bajo	1
100 – 200	50 – 90	Bajo	2
201 – 300	91 – 130	Medio	3
301 – 400	131 – 175	Alto	4
> 400	> 175	Muy alto	5

2.5.3 Determinación del Grado de Amenaza de Deslizamientos

El resultado de la combinación de todos los factores no se establece en una escala única de valores del indicador, pues éstos deben ajustarse a las condiciones de cada área estudiada. No obstante, se sugiere dividir el rango de valores obtenidos, para cada área de estudio, en cinco clases de susceptibilidad y asignar los calificativos que se presentan en la Tabla 12. El calificativo de susceptibilidad es una representación cualitativa de los diferentes niveles de amenaza y no una amenaza propiamente dicha (Barrantes Castillo, Barrantes Sotela, & Núñez Roman, 2011).

Tabla 12 Clasificación de los grados de amenaza de deslizamientos (Mora & Vahrson, 1992)

Potencial generador de deslizamientos	Clase	Grado de amenaza
0 – 6	I	Muy bajo
6 – 32	II	Bajo
32 – 162	III	Moderado
162 – 512	IV	Mediano
513 – 1250	V	Alto
> 1250	VI	Muy alto

2.6 Definición del Modelo de Susceptibilidad a Deslizamientos (INDECI, Perú)

Para representar la interacción de las diferentes variables seleccionadas (pendientes, suelos, geología e isoyetas), se usó la ecuación, según el siguiente algoritmo:

$$Sm = \textit{capa pendientes} \times \textit{capa suelos} \times \textit{capa geología} \times \textit{capa isoyetas}$$

En donde Sm es la susceptibilidad a movimientos en masa. Las capas de cada variable se obtienen a partir de clasificar los valores iniciales de las mismas. El modelo que se obtiene a partir de este algoritmo es reclasificado en rangos de importancia, asignándole a cada rango una valoración desde nula o muy baja hasta muy alta susceptibilidad, para obtener el modelo final. El método usado para este modelamiento es de tipo heurístico.

2.6.1 Factores Analizados

Los factores analizados para la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos son:

Pendientes

La precisión y las limitaciones del modelo de pendientes se desprenden de la cartografía base, y de las condiciones inherentes a la metodología utilizada para su clasificación, en donde los rangos oscilan entre 0 a 50 y son categorizados en cuatro niveles (1 – 4).

Tabla 13 Tabla de ponderación de Pendientes

Nivel	Pendiente
Muy Bajo	<12°
Bajo	12° - 25°
Medio	25° - 50°
Alto	> 50°

Fuente: INDECI, 2011

Geología

Para la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa mediante el factor geológico, se consideró la litología, edad, estructura y grado de meteorización como parámetros fundamentales

Tabla 14 Tabla de ponderación del parámetro geológico

Grado	Descripción Geológica
Bajo	Formaciones volcánicas recientes y cuaternarias Medio
Medio	Rocas volcánicas antiguas, intrusivas y sedimentarias
Alto	Rocas metamórficas e intrusivas muy meteorizadas
Muy Alto	Rocas calcáreas , rocas arcillosas

Fuente: Cuadro modificado del Programa de regularización y administración de tierras rurales. Metodología de valoración de tierras rurales. Convenio

Prat-SIGARO 2006

Clases de Suelos

El parámetro del suelo escogido para la reclasificación es la textura, tomando como base, las diferentes clases texturales del suelo que se encuentran cartografiadas y digitalizadas a escala 1:25.000, se las reclasificó en tres clases homogéneas a la susceptibilidad a deslizamientos, siendo

Tabla 15 Tabla de Reclasificación de Clases de Suelos

Código Textura	Textura	
	Descripción	Reclasificación
11	Arenoso (fina, media, gruesa)	Gruesa
12	Arenoso franco	
21	Franco arenoso (fino a grueso)	
22	Franco limoso	Media
31	Franco	
32	Limoso	
33	Franco arcilloso (<35% de arcilla)	
34	Franco arcillo arenoso	
35	Franco arenoso limoso	Fina
41	Franco arcilloso (>35% de arcilla)	
42	Arcilloso	
43	Arcilloso arenoso	
44	Arcillo limoso	
51	Arcillo (>60%)	

Fuente: Programa de regularización y administración de tierras rurales.

Metodología de valoración de tierras rurales. Convenio Prat-SIGAGRO 2006.

Precipitación

Debido principalmente a la disponibilidad de información, se utilizara las zonas de precipitación media anual (mapa de Isoyetas). Este es un factor detonante de los movimientos en masa razón por la cual se lo considera una variable dinámica (Dai y Lei, 2001); una zona con mayor grado de precipitación es más propensa a los movimientos en masa que otra que no posee mucha precipitación, por consiguiente el mapa de isoyetas que muestra el promedio de precipitaciones, servirá para el desarrollo del mapa de susceptibilidad en movimientos en masa.

La ponderación de la capa de Isoyetas se la realizará de acuerdo a lo establecido en la **Tabla 16**.

Tabla 16 Ponderación del Mapa de Isoyetas

Grado	Rango (mm)
--------------	-------------------

Bajo	< 1000
-------------	--------

Medio	1000 – 1500
--------------	-------------

Alto	> 1500
-------------	--------

Fuente: INDECI, 2011

2.6.2 Metodología y Matrices de Ponderación entre Variables

La metodología adoptada es del tipo heurística, para el análisis de susceptibilidad por movimientos de masa en laderas desde esta perspectiva, un territorio se zonifica con base en las apreciaciones y aportes de investigadores con experiencia y conocimiento del tema.

Específicamente se usó la técnica de combinación cualitativa de mapas para lo cual se generaron diferentes capas. El estudio de estos fenómenos se ha realizado con un análisis espacial con ponderación, en el cual son manipuladas las capas de las variables utilizadas, a estas se adhiere un campo que muestra la ponderación asignada a este factor, según su influencia para que sea más susceptible al fenómeno de movimientos en masa en laderas un determinado espacio geográfico que otro.

Las ponderaciones de cada variable fueron asignadas en consenso por técnicos especializados con experiencia en el tratamiento de cada una de las variables; en algunos casos estos valores son probados una y otra vez hasta obtener una ecuación que refleje la realidad.

Una vez determinadas las ponderaciones, se procede al cruzamiento de los mapas y al análisis espacial de los resultados con la ayuda de una matriz de ponderaciones, a este nuevo mapa se lo vuelve a cruzar con otra variable y nuevamente es analizado por medio de una matriz, este proceso es repetitivo y abierto a la incorporación de nuevas variables.

Cada mapa fue dividido en áreas con similar susceptibilidad, en donde se asignó un peso indicativo de su grado de importancia, estas áreas homogéneas parten de características biogeoestructurales (suelo, pendiente, geología e isoyetas) en donde sus combinaciones específicas dan como resultado los diferentes grados de susceptibilidad de los posibles deslizamientos.

Este método evalúa el peligro relativo a derrumbes y deslizamientos de tierras por lo que es necesario identificar las áreas geográficas que podrían ser afectadas por estos movimientos en masa y evaluar las probabilidades de ocurrencia en un período de tiempo determinado.

El peligro de deslizamientos y derrumbes es presentado como la susceptibilidad a deslizamientos que identifican las áreas con diferentes potenciales para el desarrollo de estos eventos, y no implica un período de tiempo durante el cual podrían ocurrir estos eventos.

Prosiguiendo con la explicación de la metodología se presentan en forma ordenada las matrices.

Tabla 17 Matriz Textura, Pendiente (S1)

TEXTURA	PENDIENTE			
	0 - 12	12 - 25	25 - 50	> 50
FINA	1	1	2	2
MEDIA	1	3	3	3
GRUESA	2	3	3	4

Tabla 18 Matriz S1 por Geología (S2)

CLASE S1	GEOLOGÍA		
	BAJA	MEDIA	ALTA
1	1	2	2
2	2	2	2
3	3	3	3
4	3	4	4

Tabla 19 Clasificación de los grados de susceptibilidad S1 por Geología

S2	
CLASE	DESCRIPCIÓN
1	Baja
2	Media
3	Alta
4	Muy Alta

Tabla 20 Matriz S2 por Isoyetas

CLASE S2	ISOYETAS		
	BAJA	MEDIA	ALTA
1	1	1	2
2	2	2	3
3	3	3	3
4	3	4	4

Finalmente se realiza la combinación por medio de matrices expuestas anteriormente, de los factores: pendientes, texturas, geología e isoyetas; utilizando una herramienta S.I.G., a partir de la cual se generó la cartografía de Zonas Susceptibles a Deslizamientos 1:25.000. En estos mapas se delimitaron cuatro zonas de susceptibilidad a movimientos en masa siendo estos: Sin, Baja, Media, Alta y Muy Alta, según el siguiente cuadro.

Tabla 21 Ponderación del mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos

CLASE	DESCRIPCIÓN
0	Sin
1	Baja
2	Media
3	Alta
4	Muy Alta

2.6.3 Limitaciones del Modelamiento

Este modelo final de susceptibilidad implica incertidumbres y limitaciones y que deben ser tomadas en cuenta al interpretar los resultados.

Estas limitaciones son:

- Una aproximación heurística implica que la valoración de cada variable debe ser ajustada a las condiciones específicas de cada región.
- En algunos de los modelos de las variables no están representadas todas las clases de susceptibilidad. Esto se debe, principalmente, al grado de detalle de los datos de entrada; en trabajos posteriores la valoración de las variables puede ser ajustada o mejorada quizás con el requisito de información más detallada.
- La escala de trabajo escogida, implica un nivel de semidetalle. En los modelos, las áreas de cada clase o rango representan tendencias regionales, en las cuales se generalizó y jerarquizó la influencia de cada variable a la ocurrencia de movimientos de masa. A esta escala el modelo final no da cuenta del tipo de movimiento de masa, sus dimensiones o daños esperados.

2.7 Análisis de las Metodologías

Para determinar que metodología es la que se adapta a las condiciones físico geográficas de la microcuenca del río Cristal es necesario llevar a cabo el estudio de las características de cada una de ellas; con el objeto de realizar el análisis de las ventajas y desventajas que posee cada metodología para su aplicación en nuestro medio. En la **Tabla 22** se muestra la comparación de las características principales de lógica Fuzzy, Mora & Vahrson e INDECI que servirá como base para la posterior comparación entre cada uno de ellos.

Tabla 22 Características Técnicas de las Metodologías

	Lógica Fuzzy	Mora & Vahrson	INDECI
Número de Variables	7	5	4
Tipo de Variables	Continuas	Discretas	Discretas
Método de Interpolación	IDW	Polígonos de Thiessen	IDW
Relación entre Variables	$F(x) = y$	Multiplicación y Adición	Multiplicación
Flexibilidad	Se puede añadir o quitar variables	Ninguna	Se puede añadir o quitar variables
Tipo de Resultados	Cuantitativos	Cualitativos	Cualitativos
Escala de Trabajo	Todas	Pequeñas Medianas	Pequeñas
País de Origen	Ecuador	Costa Rica	Perú

Lógica Fuzzy trabaja con variables continuas para representar de manera más cercana a la realidad los cambios que se presentan en la

naturaleza, además permite trabajar con el número de variables que sean necesarios para intentar representar los fenómenos a modelar.

Para modelar la probabilidad a deslizamientos se considera un total de 7 variables entre las que se consideran parámetros geomorfológicos, geológicos, meteorológicos, biofísicos y antrópicos; de esta manera, se consideran todas las variables que de alguna manera influyen en la inestabilidad del terreno y provocan deslizamientos.

Para los datos meteorológicos de intensidad de lluvia en 24 horas el método de interpolación usado es el IDW (Inverse Distance Weight), este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

Para estimar la probabilidad a la ocurrencia de deslizamientos se usa la expresión definida por $y = F(x)$, donde $F(x)$ es el algoritmo en el que se define la relación y ponderación de las variables que intervienen. Los resultados que se obtienen con esta metodología son cuantitativos expresados en porcentajes de probabilidad, esto es importante ya que en un punto de interés específico se puede obtener la probabilidad estimada específicamente para ese punto, además de que se puede aplicar una reclasificación agrupándolos en rangos de valores para representarlos de forma cualitativa. Una gran ventaja que presenta esta metodología es que se la puede aplicar en cualquier escala, debido a que se obtuvieron buenos resultados en trabajos realizados en diferentes áreas del Ecuador elaborados por Avilés y Hermosa en 2009, Andocilla en 2012 y el presente estudio.

La metodología Mora & Vahrson fue desarrollada en Costa Rica, se basa en la combinación cualitativa de mapas utilizando indicadores morfodinámicos. Esta consiste en la combinación de factores intrínsecos de susceptibilidad entre las que considera a la pendiente, litología y la humedad del suelo, y factores de disparo como la intensidad sísmica y pluviométrica.

Las variables que usa son de tipo discretas ya que sus valores o atributos son agrupados y calificados en términos de susceptibilidad a deslizamientos, en el caso de los factores intrínsecos, y de favorabilidad en el caso de los factores de disparo, dando un mayor puntaje para las condiciones de mayor susceptibilidad y favorabilidad. En las variables humedad de suelo e intensidad de lluvias que se basan en datos climáticos se usa como método de interpolación a los polígonos de Thiessen, que se trata de los métodos más simples donde cualquier ubicación dentro de un polígono de Thiessen está más cerca de su punto asociado que de cualquier otra entidad de entrada de puntos.

La forma en la que Mora & Vahrson combinan los valores se basa en la multiplicación y adición que representa de forma empírica la interacción de los procesos analizados. Esta metodología no tiene la facilidad de añadir o sustituir variables, sin embargo, se deben analizar detalladamente en función del área de estudio en la que se está aplicando. Los resultados que se obtienen con esta metodología son agrupados en seis clases de probabilidad que les da la característica de ser cualitativos, además muestran condiciones de amenaza relativa al comparar áreas adyacentes unas con otras y no la amenaza absoluta. La metodología Mora & Vahrson representa de forma más confiable la realidad de Centroamérica que es una zona de

alta sismicidad y con alta intensidad de lluvias a escalas intermedias y regionales.

El modelo INDECI fue propuesto por el Instituto Nacional de Defensa Civil de Perú en su "Manual para la Estimación del Riesgo ante Movimientos en Masa en Laderas", el número de parámetros o factores con los que trabaja son cuatro pero tiene la libertad de aumentar el número en función de la disponibilidad de la información. Las variables son discretas ya que son reclasificadas según su influencia, para que sea más susceptible a deslizamientos.

Para relacionar las variables y obtener el mapa de probabilidad, usa la multiplicación o intersección y los resultados son cualitativos indicando los diferentes grados de probabilidad de posibles deslizamientos. La escala de trabajo con la que trabaja esta metodología es 1:50000 o más pequeñas a nivel regional.

Semejanzas

- Las metodologías de Lógica Fuzzy e INDECI presentan flexibilidad para aumentar o sustituir variables.
- INDECI y Mora & Vahrson trabajan con datos discretos o discontinuos.
- El método de Interpolación que usan las metodologías de lógica Fuzzy e INDECI es el IDW.
- INDECI y Mora & Vahrson relacionan las variables usando la adición y multiplicación en sus algoritmos.
- El tipo de resultados que presentan las metodologías de INDECI y Mora & Vahrson son cualitativas

- Mora & Vahrson e INDECI obtienen mejores resultados cuando son empleadas en estudios a escala regional.

Diferencias

- Lógica Fuzzy trabaja con datos continuos en sus variables a diferencia de las otras metodologías que trabajan con datos discontinuos.
- Mora & Vahrson trabaja con el método de interpolación basado en los polígonos de Thiessen, mientras que las otras metodologías utilizan el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW).
- Lógica Fuzzy relaciona sus variables mediante una $F(x)$ que estará en función de las necesidades del fenómeno a representar, al contrario de las otras metodologías que usan la adición y multiplicación como alternativa.
- Mora & Vahrson trabaja solo con cinco variables, tres de susceptibilidad y dos de disparo, por otra parte las otras dos metodologías admiten el aumento o disminución de sus variables.
- Los resultados obtenidos con lógica Fuzzy son de tipo cuantitativo, mientras que las otras metodologías presentan datos cualitativos.
- La metodología de lógica Fuzzy se la puede aplicar en cualquier escala de trabajos y presentará resultados confiables; mientras que las otras metodologías funcionan bien a escalas pequeñas.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE DESARROLLO

3.1 Introducción

Para representar los fenómenos de remoción en masa, es necesario estudiar las distintas variables que intervienen en este fenómeno y la ocurrencia de estas en la zona de estudio, el presente trabajo propone tres metodologías distintas, las cuales analizarán distintas variables presentes en este fenómeno, estas metodologías corresponden a la Lógica Fuzzy, Mora & Vahrson y el modelo INDECI.

La primera técnica se basa en lógica difusa, esta se fundamenta en la combinación de métodos matemáticos que permitan la elaboración de modelos que representen el fenómeno de remoción en masa (Padilla, 2007).

La metodología Mora & Vahrson fue desarrollada en el año de 1994 en Costa Rica con el fin de clasificar la susceptibilidad a deslizamientos en determinada zona, utilizando parámetros morfodinámicos propios del terreno (Segura, Badilla, & Obando, 2011).

El modelo INDECI analiza la susceptibilidad a deslizamientos desde una perspectiva heurística, usando la técnica de combinación cualitativa de mapas, las ponderaciones de cada variable fueron realizadas mediante consenso de técnicos especializados y con experiencia en el tratamiento con cada una de las variables (INDECI/Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011).

3.2 Información y datos

Para implementar las metodologías propuestas, se precisó recopilar y analizar la información existente de la zona de estudio, resultó necesario la organización de la información para facilitar una posterior actualización de esta; finalmente se generó nuevos datos, necesarios para el análisis de los distintos parámetros que intervienen.

3.2.1 Recopilación de información

La información recopilada en diferentes instituciones fue:

- Fotografías aéreas
FUENTE: SIGTIERRAS
- Cartografía base digital
FUENTE: IGM (Instituto Geográfico Militar)
- Información temática: Cobertura Vegetal, Geología, Geopedología, Geomorfología.
FUENTE: IEE (Instituto Espacial Ecuatoriano)
- Modelo Digital del Terreno (MDT)
FUENTE: IEE (Instituto Espacial Ecuatoriano)
- Datos de estaciones meteorológicas obtenidas de los anuarios meteorológicos
FUENTE: INAMHI
- Datos sismológicos obtenidos de los informes anuales del Instituto Geofísico
FUENTE: IGEPN (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional)

Toda la información geográfica recopilada se encontró en el sistema de coordenadas “Universal Transversal de Mercator” con proyección de coordenadas WGS84 UTM Zona 17 Sur

3.2.2 Interpretación de Fotografías Aéreas

Para obtener el mapa con el inventario de deslizamientos se analizó las fotografías aéreas, mediante técnicas de fotointerpretación y ciertos conocimientos acerca de procesos geomorfológicos, formaciones vegetales y uso del suelo del área de trabajo, se identificaron varios deslizamientos activos y paleo deslizamientos; en la **Figura 27** se muestra un ejemplo de una fotografía aérea fotointerpretada.

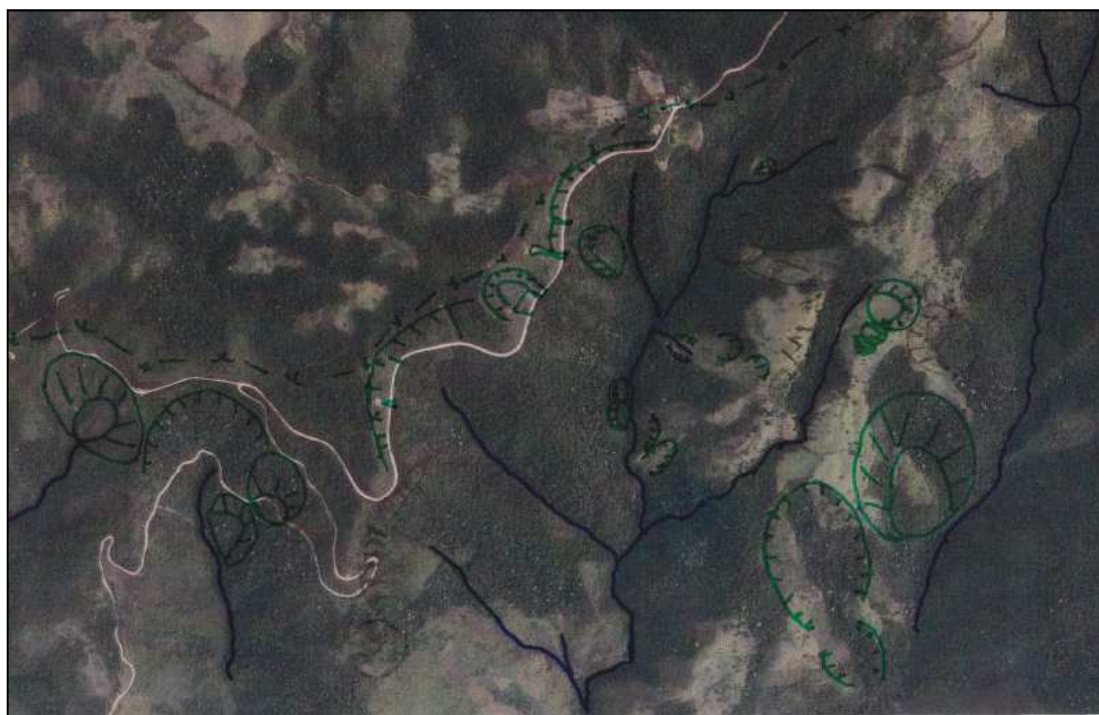


Figura 27 Fotointerpretación de Foto Aérea

3.3 Análisis de Lógica Fuzzy

3.3.1 Generación de datos y Estudio de variables según casos de lógica Fuzzy

El análisis y la obtención de datos se realizaron de acuerdo a la existencia y disponibilidad de información perteneciente al área de estudio. Para el análisis se tomaron en cuenta variables que se consideran intervienen directamente en la susceptibilidad del terreno a presentar deslizamientos, para lo que se tomó en cuenta criterios técnicos, eventos históricos y disponibilidad de información del área de estudio.

- **Pendiente**

La inclinación del terreno se considera como un factor condicionante para la presencia de deslizamientos. Es necesario valorar las condiciones topográficas del terreno, por medio de la creación de un mapa de pendientes del área de estudio, con valores continuos en porcentaje.

Caso Lógica Fuzzy

Esta variable posee una gran influencia con los movimientos en masa, debido a que mientras aumenta la pendiente en laderas esta la hace más susceptible a estos fenómenos, por lo que esta relación es directamente proporcional, ajustándose con la curva del caso 3 de la lógica Fuzzy.

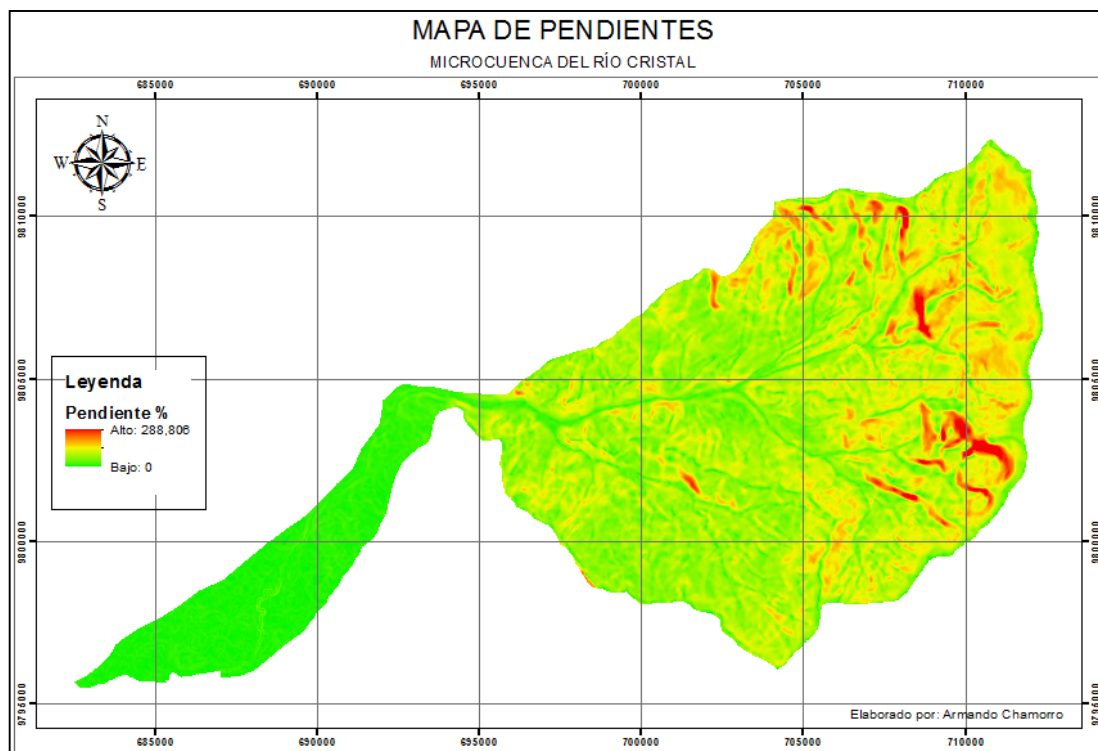


Figura 29 Variable Pendientes

▪ Geología

La meteorización produce alteraciones en la roca o el sedimento original de la ladera, cambiando su resistencia y permeabilidad. Los procesos químicos, mineralógicos y texturales que se producen destruyen el empaquetamiento de los materiales, disgregan el conjunto y generan una pérdida de la cohesión, lo que genera una disminución de la resistencia de la roca (Corominas, 2006). En esta investigación se propone la evaluación de este parámetro mediante un enfoque estadístico, a partir de la correspondencia entre las unidades litoestratigráficas y los deslizamientos determinados por fotointerpretación. Se llevó a cabo una sobreposición espacial (intersección) entre las capas de inventario de deslizamientos y de geología, de la que se obtuvo la densidad de deslizamientos y la valoración para cada unidad litológica como lo indica la Tabla 23.

Tabla 23 Densidad de deslizamientos y valoración para cada formación

Unidad	Área km ²	Número de deslizamientos	Densidad de deslizamientos	Pesos
Abanico aluvial antiguo	1,970	0	0	0
Abanico aluvial medio	1,869	0	0	0
Abanico aluvial reciente	4,836	0	0	0
Areniscas volcánicas, areniscas, lutitas	10,414	9	0,864	0,433
Brechas, microbrechas	10,480	14	1,336	0,669
Caliza	0,292	0	0	0
Deposito aluvial	20,724	0	0	0
Intrusiva	58,918	44	0,747	0,374
Rocas volcánicas, tobas, lavas, andesíticas	61,106	54	0,884	0,443
Volcánicas (lavas, brechas, areniscas, volcánicas)	6,054	2	0,330	0,165
volcánicos, lavas	8,012	16	1,997	1
Volcano sedimentarias (areniscas, limos, metamórficas)	14,257	10	0,701	0,351

Caso Lógica Fuzzy

La unidad litoestratigráficas que tiene mayor densidad de deslizamientos posee una menor resistencia en su roca y aumenta su susceptibilidad a presentar deslizamientos, ajustándose al caso 3 de la lógica Fuzzy.

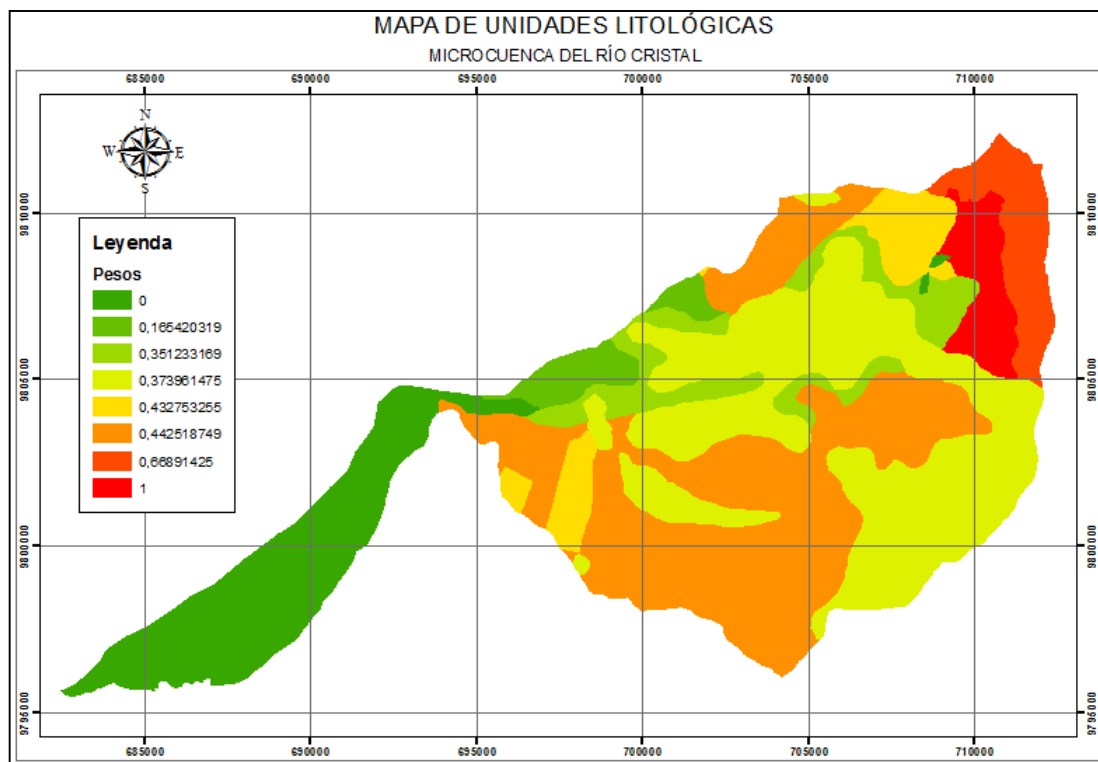


Figura 30 Variable Unidades Litológicas

▪ Cobertura Vegetal

La cobertura vegetal ayuda a proteger la tierra frente a los movimientos en masa, debido en parte, a la cohesión que dan al suelo las raíces de los árboles. Las raíces finas, entre 1 y 20 mm de diámetro, interaccionan con el suelo formando un material compuesto en el que las raíces fibrosa, con relativamente alta resistencia a la tracción, refuerzan una matriz de menor resistencia. Además, la fuerza del suelo aumenta por la adherencia de las partículas del suelo a las raíces. Las raíces pueden hacer significativas contribuciones a la cohesión del suelo, incluso con pequeña densidad de raíces y en materiales con poca resistencia al esfuerzo cortante. Las gramíneas, las leguminosas y los pequeños arbustos pueden reforzar el suelo hasta profundidades de 0,75 a 1 m, mientras que los árboles elevan la resistencia del suelo a profundidades de 3 m o superiores. La importancia

del efecto depende, sobre todo, del ángulo con que las raíces de los árboles cortan al plano potencial de deslizamiento, siendo máxima para los ángulos rectos, y si el esfuerzo ejercido sobre la ladera es suficiente para activar totalmente el esfuerzo resistente de las raíces. El efecto es limitado cuando las raíces se rompen a causa de insuficiente unión con el suelo, como puede suceder en materiales pedregosos, o cuando el suelo se somete a esfuerzos de compresión en lugar de tracción, como puede ocurrir en la parte baja de las laderas, donde las raíces se rompen por formar bucles (Lianes, 2008).

En la Tabla 24 se observa la ponderación de la cobertura vegetal donde utilizó el Análisis Jerárquico de Saaty, basado en comparaciones por pares de los criterios que parte de una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar.

Caso Lógica Fuzzy

La presencia de vegetación da estabilidad al terreno, dependiendo de las especies esta es mayor o menor, entonces, mientras más densa sea la cobertura vegetal menor será la probabilidad a movimientos en masa, el comportamiento de esta variable respecto a la variable dependiente es inversamente proporcional.

Tabla 24 Valoración por la Matriz AHP SAATY

	BOSQUE NATIVO	VEGETACION ARBUSTIVA	MOSAICO AGROPECUARIO	VEGETACION HERBACEA	PASTIZAL	CULTIVO	ERIAL	INFRAEST ANTROPICA	Pesos
BOSQUE NATIVO	1	2	3	4	5	6	8	9	0,372
VEGETACION ARBUSTIVA	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	4,5	0,186
MOSAICO AGROPECUARIO	0,333	0,667	1	1,333	1,667	2	2,667	3	0,124
VEGETACION HERBACEA	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	2	2,25	0,093
PASTIZAL	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,6	1,8	0,075
CULTIVO	0,167	0,333	0,5	0,667	0,833	1	1,333	1,5	0,062
ERIAL	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	1	1,125	0,047
INFRAEST ANTROPICA	0,111	0,222	0,333	0,444	0,556	0,667	0,889	1	0,041

Cociente de consistencia (CR) = 0

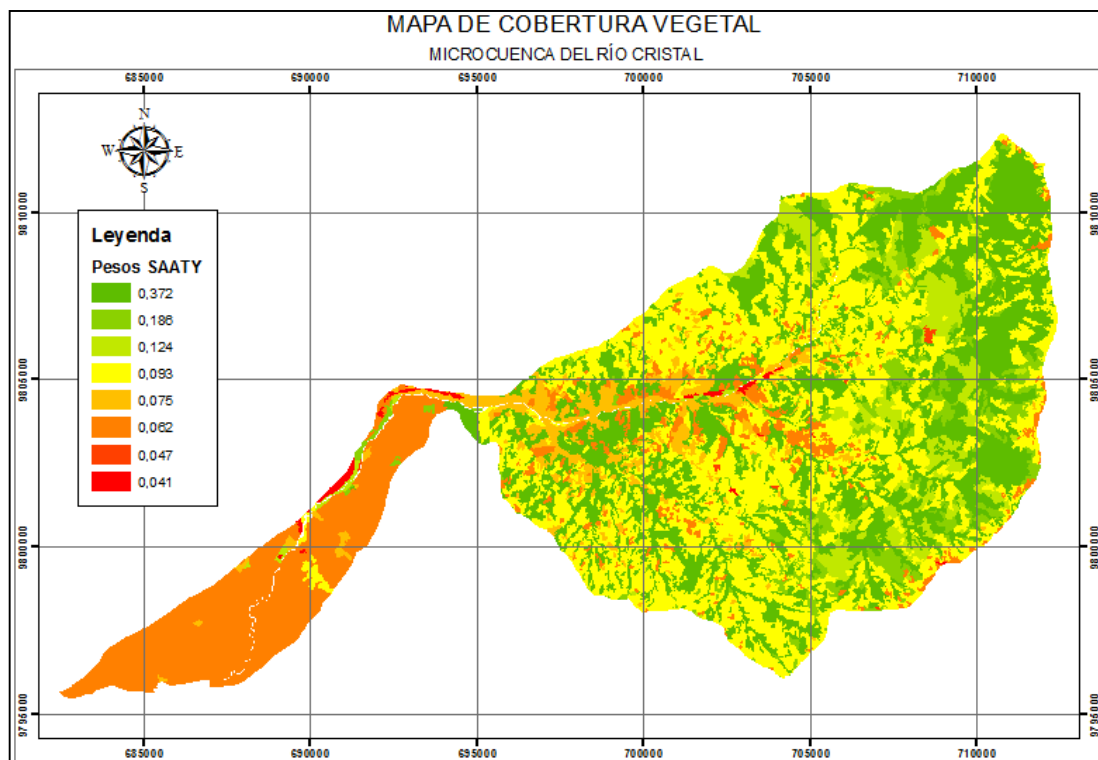


Figura 31 Variable Cobertura Vegetal

- **Precipitación**

La precipitación es un factor que se considera influye considerablemente en la estabilidad de los taludes, debido a que en épocas de lluvias intensas el suelo se satura de agua y en ocasiones supera su capacidad de campo, esto provoca un aumento en las fuerzas que provocan los deslizamientos haciendo más inestable al terreno. Para el análisis de esta variable se consideraron las precipitaciones máximas en 24 horas registradas para un periodo de años disponible en las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio.

Tabla 25 Precipitaciones Máximas en 24 horas

Estación	Precipitación Máxima en 24 horas
M0131	87,9
M0132	111,1
M0386	660
M0468	229
M0585	44
M0805	224,5

Caso Lógica Fuzzy

La precipitación se considera como un agente disparador de los fenómenos de remoción en masa, mientras mayor sea la precipitación en un área provoca que la estabilidad en las laderas disminuya, provocando que los movimientos en masa sean más frecuentes. Esta es una relación directamente proporcional, ajustándose con la curva del caso 3 de la lógica Fuzzy.

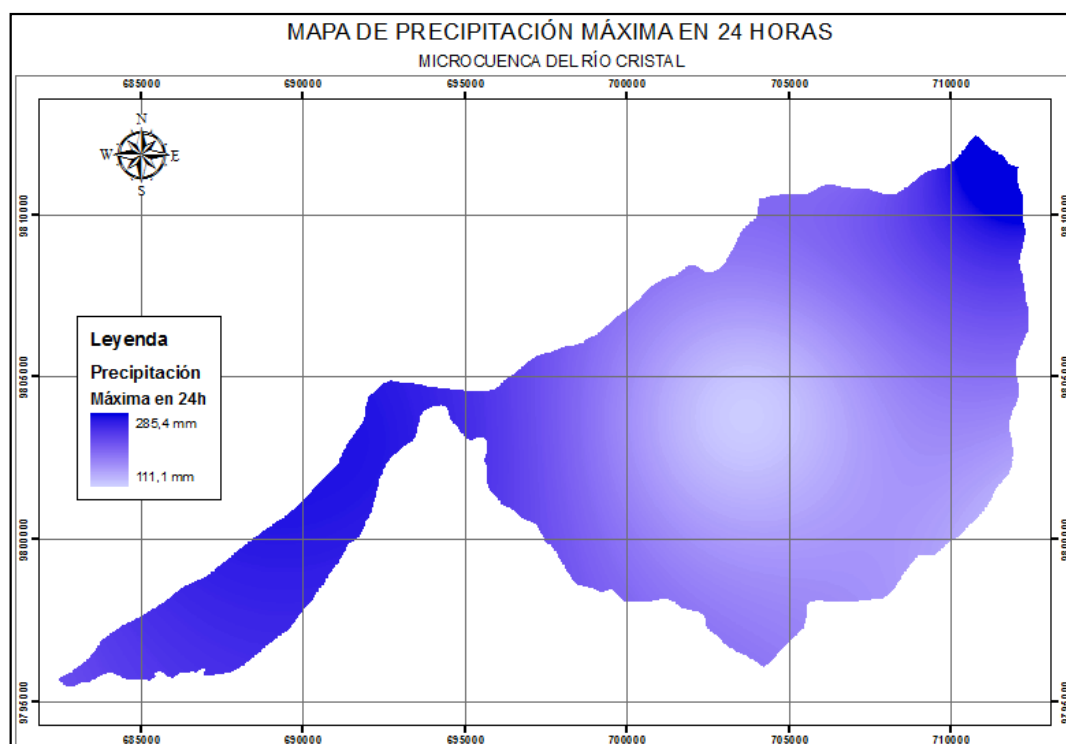


Figura 32 Variable Precipitación

▪ Distancia a Vías de Comunicación

La construcción de infraestructura vial tiene muchos impactos a lo largo de su trazado, entre los cuales se encuentra que afecta directamente en la estabilidad natural que poseen las laderas, provocando que derrumbes y deslizamientos sean más frecuentes en medida que las pendientes se encuentren más cerca de las vías.

Caso Lógica Fuzzy

En las vías es donde resultan más evidente la presencia de deslizamientos, desde la etapa de su construcción y durante su funcionamiento los movimientos en masa son frecuentes, al aumentar la distancia con las vías la probabilidad de ocurrencia disminuye, siendo esta una relación inversamente proporcional, ajustándose con la curva del caso 2 de la lógica Fuzzy.

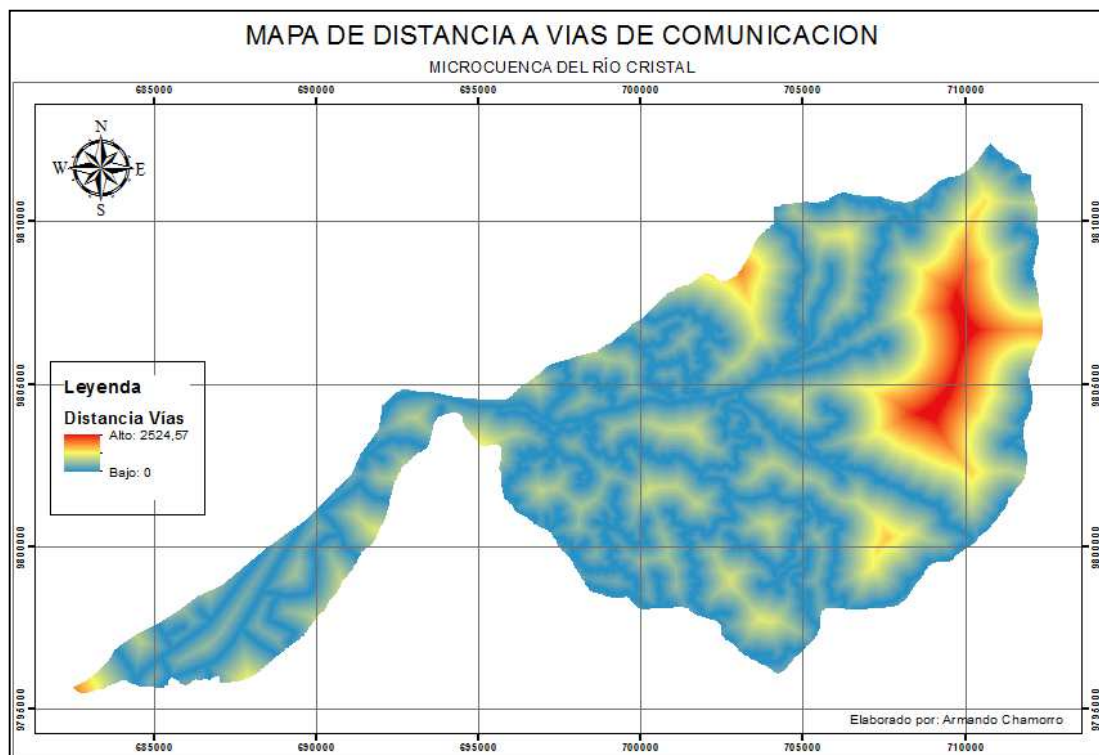


Figura 33 Variable Distancia a Vías de Comunicación

- **Distancia a Recursos Hídricos**

La presencia de redes hídricas implica que durante un largo periodo de tiempo la corriente de agua fue abriéndose camino a lo largo de la roca más débil por donde le resulta más fácil fluir, este proceso largo fue creando valles en forma de V por donde pasa la corriente de agua ya sean ríos, esteros y quebradas, por el transcurso de años este proceso continúa su proceso de erosión y socavando la roca cada vez más profundo y creando pendientes fuertes que suponen mayor susceptibilidad de las zonas que están más cerca a sufrir deslizamientos.

Caso Lógica Fuzzy

Las corrientes de agua con el paso de tiempo van erosionando la roca por donde se abren paso, esta actividad provoca inestabilidad del terreno, los terrenos que se encuentran cercanos a ríos son más susceptibles a movimientos en masa, la relación entre estas variables es inversamente proporcional.

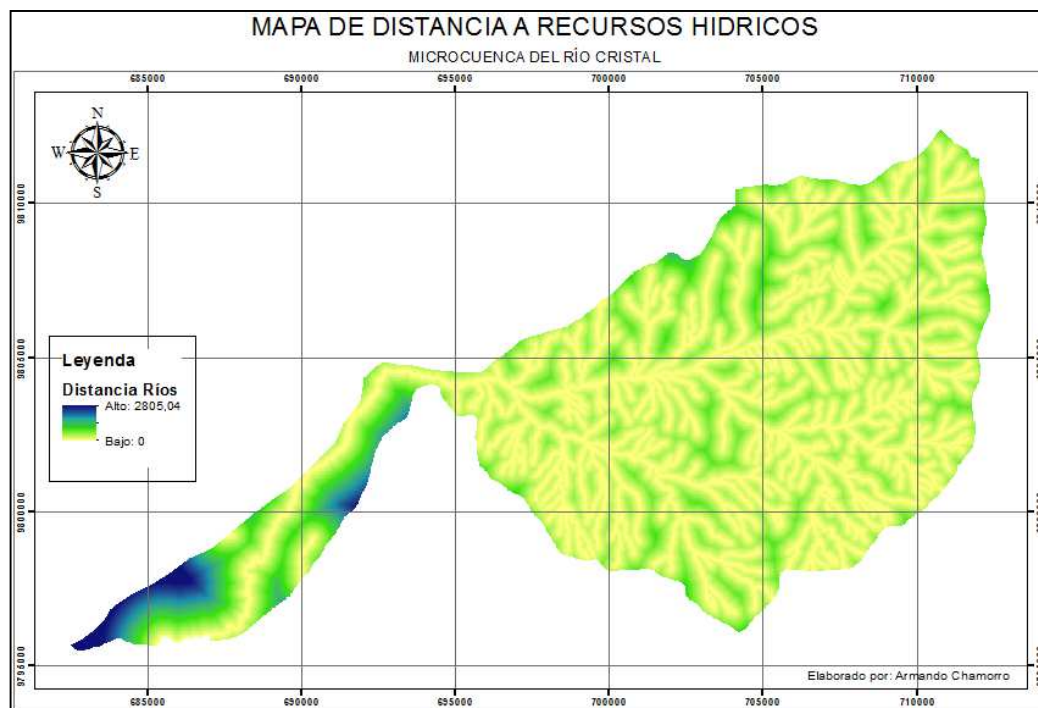


Figura 34 Variable Distancia Ríos

- **Distancia a Fallas Geológicas**

Una falla es una discontinuidad que se forma por fractura en las rocas superficiales de la Tierra cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. La zona de ruptura tiene una superficie generalmente bien definida denominada plano de falla y su formación va acompañada de un deslizamiento de las rocas tangencial a este plano. Este movimiento entre masas rocosas puede tener desplazamiento pequeños e imperceptibles durante largos periodos de tiempo, sin embargo, también puede presentar actividad repentina y brusca que puede producir terremotos y grandes movimientos en masa.

Caso Lógica Fuzzy

La presencia de fallas indica el movimiento de bloques de rocas en distintas direcciones y sentido, esta interacción entre bloques puede provocar sismos y movimientos de masa, mientras aumenta la distancia a fallas, la influencia de estas disminuye, siendo inversamente proporcionales, ajustándose con la curva del caso 2 de la lógica Fuzzy.

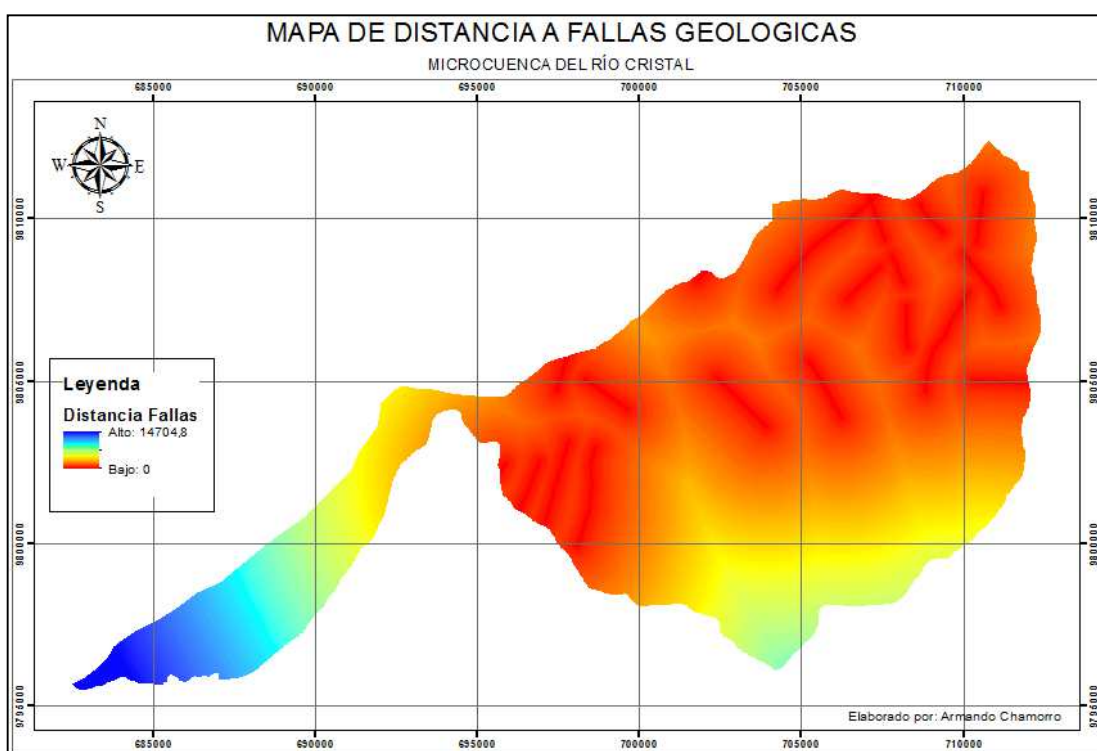
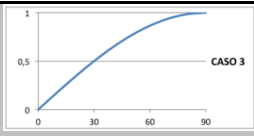
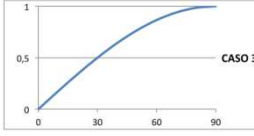
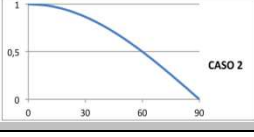
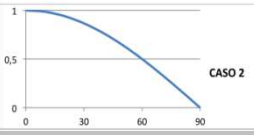
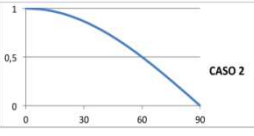
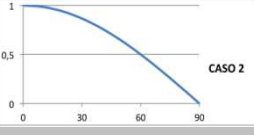
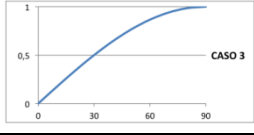


Figura 35 Variable Distancia a Fallas Geológicas

En la Tabla 26 se resume el análisis de pertenencia de cada una de las variables a cada función de Lógica Fuzzy, donde, se indica el caso de Lógica Fuzzy a la que pertenece, la función que se aplica a cada variable y el rango en el que se encuentra.

Tabla 26 Pertenencia de la variable a cada función de Lógica Fuzzy

Variable	Función	Rango	Caso Fuzzy
Pendientes	Seno	$0 - \pi/2$	
Precp_max	Seno	$0 - \pi/2$	
Dist_vias	Coseno	$0 - \pi/2$	
Continua...			
Dist_hidrica	Coseno	$0 - \pi/2$	
Dist_fallas	Coseno	$0 - \pi/2$	
Influencia_vegetal	Coseno	$0 - \pi/2$	
Dureza_roca	Seno	$0 - \pi/2$	

3.3.2 Modelos cartográficos

Mediante técnicas de modelamiento y análisis de Lógica Fuzzy, se presentará varios modelos de probabilidades de deslizamientos, que serán:

- Modelo Cartográfico 1: Valores de variables originales dados por el programa.
- Modelo Cartográfico 2: Percentil. Fuzzy al 95% y 5%.
- Modelo Cartográfico 3: Percentil. Fuzzy al 90% y 10%.

MODELO CARTOGRAFICO GENERAL: VARIABLES FUZZY

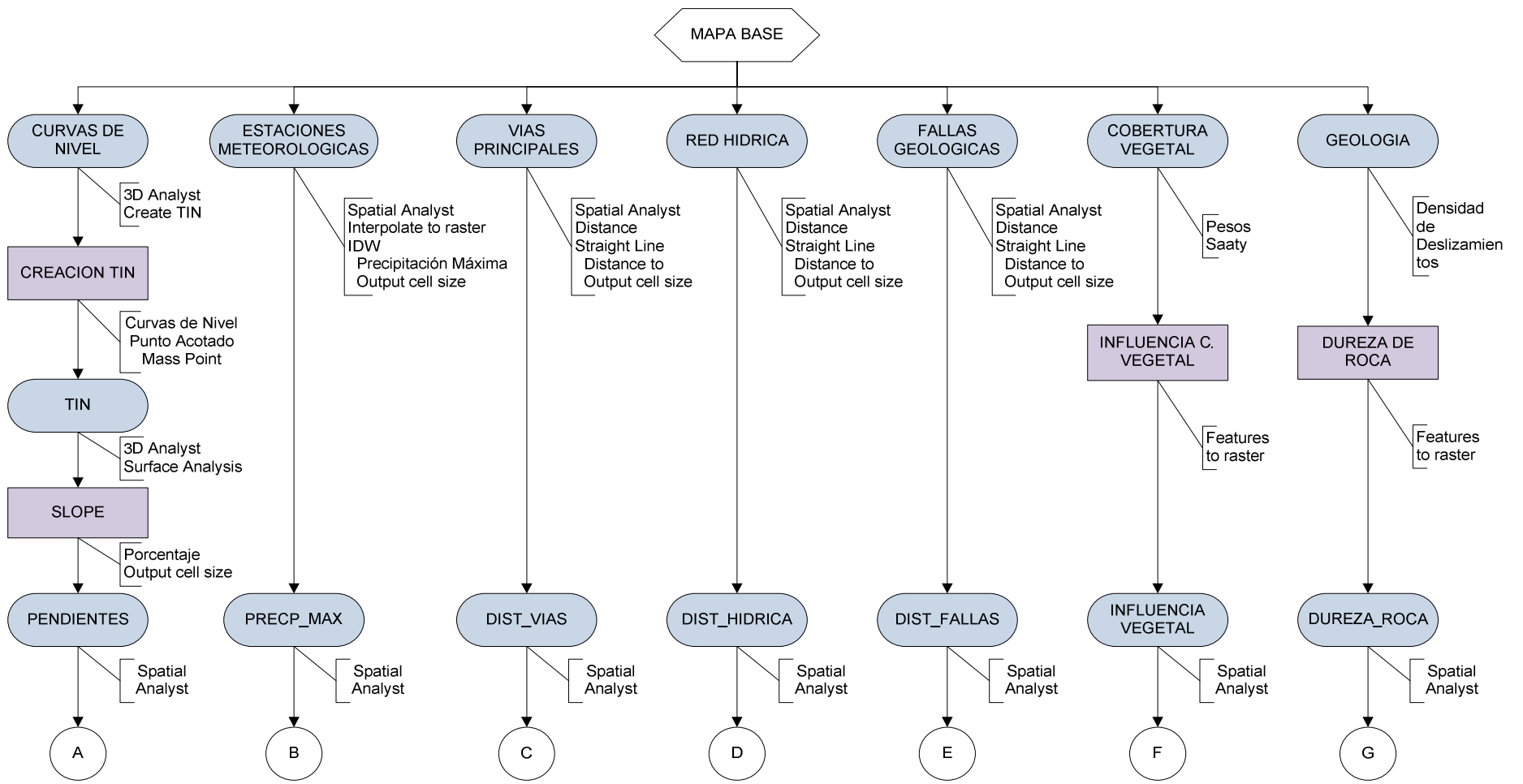


Figura 36 Modelo Cartográfico General – Lógica Fuzzy

MODELO CARTOGRAFICO 1 FUZZY ORIGINAL

$$Y=0.374*Pend_Prob+ 0.304*Geologia_Prob+ 0.124*Vias_Prob+ 0.099*Vegetal_Prob+ 0.045*Hidrica_Prob+ 0.031*Prec_Prob+ 0.023*Fallas_Prob$$



Figura 37 Modelo Cartográfico 1: Valores de variables originales
MODELO CARTOGRAFICO 2 FUZZY 5 PERCENTIL

$$Y=0.374*Pend_Prob+ 0.304*Geología_Prob+ 0.124*Vias_Prob+ 0.099*Vegetal_Prob+ 0.045*Hidrica_Prob+ 0.031*Prec_Prob+ 0.023*Fallas_Prob$$



Figura 38 Modelo Cartográfico 2: Percentil. Fuzzy al 5% y 95%.

MODELO CARTOGRAFICO 3 FUZZY 10 PERCENTIL

$$Y=0.374*Pend_Prob+ 0.304*Geologia_Prob+ 0.124*Vias_Prob+ 0.099*Vegetal_Prob+ 0.045*Hidrica_Prob+ 0.031*Prec_Prob+ 0.023*Fallas_Prob$$



Figura 39 Modelo Cartográfico 3: Percentil. Fuzzy al 90% y 10%.

3.3.3 Determinación del Algoritmo

Los modelos basados en lógica difusa tienen como característica fundamental que cada una de las variables escogidas representan factores que afectan a la estabilidad de las laderas potenciando la presencia de deslizamientos, se calculan las probabilidades de cada una después de analizar a que caso de lógica Fuzzy pertenecen y posteriormente se aplica un algoritmo que es el que permite la obtención final del modelo. En estudios anteriores la expresión usada corresponde a la suma de las probabilidades de cada variable dividido para el número total de ellas, obteniendo la siguiente expresión:

$$Y = (Pend_{Prob} + Prec_{Prob} + Vias_{Prob} + Hidrica_{Prob} + Fallas_{Prob} + Vegetal_{Prob} + Geología_{Prob}) / 7$$

Debido a que este algoritmo fue creado para representar las probabilidades de deslizamientos en laderas, es decir en relieve montañoso, presenta el inconveniente que su capacidad de representar la realidad en un relieve de llanura es muy limitada, ya que algunas de las variables no se comportan de igual forma en pendiente plana que en pendientes pronunciadas.

El área de estudio tiene la principal característica que posee los relieves de llanura y montañoso, es por esto que para este estudio se realiza la ponderación de las variables mediante el método de jerarquías analíticas de SAATY, con la finalidad de mejorar su capacidad de representar la realidad del área de estudio y obtener mejores resultados especialmente en la

cuenca baja del río Cristal. La matriz empleada para la ponderación de las variables se indica en la Tabla 27. Para la comparación por pares se usó el siguiente criterio descrito a continuación de mayor a menor importancia de las variables en su influencia a producir deslizamientos.

- **Pendiente**

Se considera que la variable pendiente tiene mayor influencia en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos debido a que el 83% de los deslizamientos fotointerpretados se ubican en terrenos con pendientes superiores a 15° o 30%, que se las considera como pendientes fuertes, además, la pendiente es un condicionante del comportamiento de las demás variables, es decir que no se comportan de la misma manera en un terreno con pendientes que en un terreno plano. Por ejemplo, una vía en una ladera puede desestabilizarla y hacerla susceptible a deslizamientos mientras que en el llano la vía no tiene laderas que desestabilizar; en un relieve montañoso la intensidad satura el suelo de agua y aumenta las fuerzas que producen deslizamientos, mientras que en la planicie esta saturación puede provocar inundaciones; también, la densidad de vegetación ayuda a la cohesión del suelo, en el caso de los pastizales sus raíces fibrosas ayudan a la cohesión del suelo y su resistencia a la tracción siendo su efecto máximo cuando las raíces se encuentran en ángulo recto respecto al plano, esto sucede normalmente en el llano, y el efecto es menor cuando el suelo es sometido a esfuerzos de compresión como ocurre en las laderas.

- **Geología**

Se considera esta variable de gran importancia en el modelamiento de la probabilidad a ocurrencia de deslizamientos, debido a que la estabilidad de las laderas se encuentra asociado principalmente las características como: la naturaleza de los materiales involucrados, como se formó el talud y de su historia geológica.

- **Distancia a Vías de Comunicación**

Para la implementación de infraestructura vial en un relieve montañoso implica que el trazado sea por las laderas de las montañas, realizando cortes que desestabilizan el equilibrio de los taludes, es por esto que se considera la presencia de una vía como un agente disparador de deslizamientos. Además, para este estudio se registra que el 22% de los deslizamientos fotointerpretados se encuentra a menos de 50m de las vías y el 35% a menos de 100m, es decir que estos deslizamientos están relacionados o fueron provocados por la presencia de alguna vía.

- **Cobertura Vegetal**

La vegetación cumple importante como estabilizador de laderas, desde la perspectiva de refuerzo a través de su sistema radicular, modificación del contenido de humedad del suelo y apuntalamiento. Dependiendo del tipo de vegetación la estabilización de las laderas puede ser mayor o menor, en un área con presencia de bosque los árboles y sus raíces largas y fuertes ayudan al anclaje del suelo; la presencia de vegetación arbustiva y herbácea

con sus raíces fibrosas presentan relativamente alta resistencia a la tracción, además, la fuerza del suelo aumenta por la adherencia de las partículas del suelo a las raíces.

- **Distancia a Recursos Hídricos**

Analizando los deslizamientos fotointerpretados en la microcuenca del río Cristal, se tiene que el 13% ocurrieron a menos de 50m de un río o quebrada, es decir, que se encuentran directamente relacionados a la cercanía con los recursos hídricos. Mientras que en el 87% de deslizamientos están relacionados además con la presencia de otros factores.

- **Precipitación**

La cuenca alta y media se caracterizan por ser una zona de poca intensidad de lluvias, es así que se tiene que el 91% de deslizamientos fotointerpretados ocurrieron en zonas donde la precipitación máxima en 24 horas es de 100 – 200mm. Sin embargo es necesario considerar a esta variable ya que se considera a la intensidad de lluvias como un agente disparador de deslizamientos.

- **Distancia a Fallas Geológicas**

Se considera a esta variable como la de menor importancia debido a que para este trabajo se registra que apenas el 13% de los deslizamientos fotointerpretados se encuentran ubicados a menos de 200m de las fallas

existentes en el área de estudio. Sin embargo, no se puede desestimar la incidencia de este factor en futuros deslizamientos.

Tabla 27 Matriz AHP (Analytical Hierarchy Process) SAATY

	Pend	Geolog	Vías	Veget	Hídrica	Precipit	Fallas
Pend	1	2	5	6	8	9	9
Geolog	0.5	1	5	6	8	9	9
Vías	0.2	0.2	1	3	4	5	5
Veget	0.167	0.167	0.333	1	4	5	6
Hídrica	0.125	0.125	0.25	0.25	1	2	3
Precipit	0.111	0.111	0.2	0.2	0.5	1	2
Fallas	0.111	0.111	0.2	0.167	0.333	0.5	1

En la Tabla 28 se muestra la matriz normalizada y los pesos calculados para cada una de las variables.

Tabla 28 Matriz de Pesos SAATY

	Pend	Geolog	Vías	Veget	Hídrica	Precipit	Fallas	Pesos
Pend	0.452	0.539	0.417	0.361	0.310	0.286	0.257	0.374
Geolog	0.226	0.269	0.417	0.361	0.310	0.286	0.257	0.304
Vías	0.090	0.054	0.083	0.181	0.155	0.159	0.143	0.124
Veget	0.075	0.045	0.028	0.060	0.155	0.159	0.171	0.099
Hídrica	0.056	0.034	0.021	0.015	0.039	0.063	0.086	0.045
Precipit	0.050	0.030	0.017	0.012	0.019	0.032	0.057	0.031
Fallas	0.050	0.030	0.017	0.010	0.013	0.016	0.029	0.023

Cociente de consistencia (CR) = 0.06

Para determinar la consistencia de las opiniones utilizadas en la matriz de comparación por pares se usa el cociente de consistencia (CR), donde, si se obtiene un valor inferior a 0.1 es considerado aceptable; para los casos en que el valor de CR sea mayor a 0.1, la valoración deberá ser reconsiderada. El valor de CR que se obtuvo es 0.06 por lo que se considera

que las valoraciones aplicadas en las variables y los pesos obtenidos son consistentes.

Logrados los pesos o ponderaciones es preciso estimar la probabilidad del área de estudio a presentar deslizamientos. A los efectos de alcanzar este parámetro se recurre a una sumatoria lineal ponderada de los productos entre las probabilidades de cada variable y la ponderación que le corresponde, para cada una de las áreas, esto se resume en la siguiente expresión:

$$Y = 0.374 * Pend_{Prob} + 0.304 * Geología_{Prob} + 0.124 * Vias_{Prob} + 0.099 * Vegetal_{Prob} + 0.045 * Hidrica_{Prob} + 0.031 * Prec_{Prob} + 0.023 * Fallas_{Prob}$$

En la Figura 40 se puede observar la diferencia de los resultados obtenidos con ambos algoritmos, aquí se aprecia principalmente la disminución de los valores en la cuenca baja donde con el algoritmo original se predecían probabilidades de 22% hasta 60% a probabilidades que oscilan del 13% al 30%. En la llanura se esperan probabilidades muy bajas a presentar deslizamientos debido a que no existen laderas o cambios bruscos de pendiente que puedan ser susceptibles a deslizamientos, sin embargo en las terrazas de los ríos se pueden producir pequeños deslizamientos y se pueden presentar otros tipos de movimiento en masa como lo son los hundimientos es por esto que se aceptan probabilidades hasta el 30%.

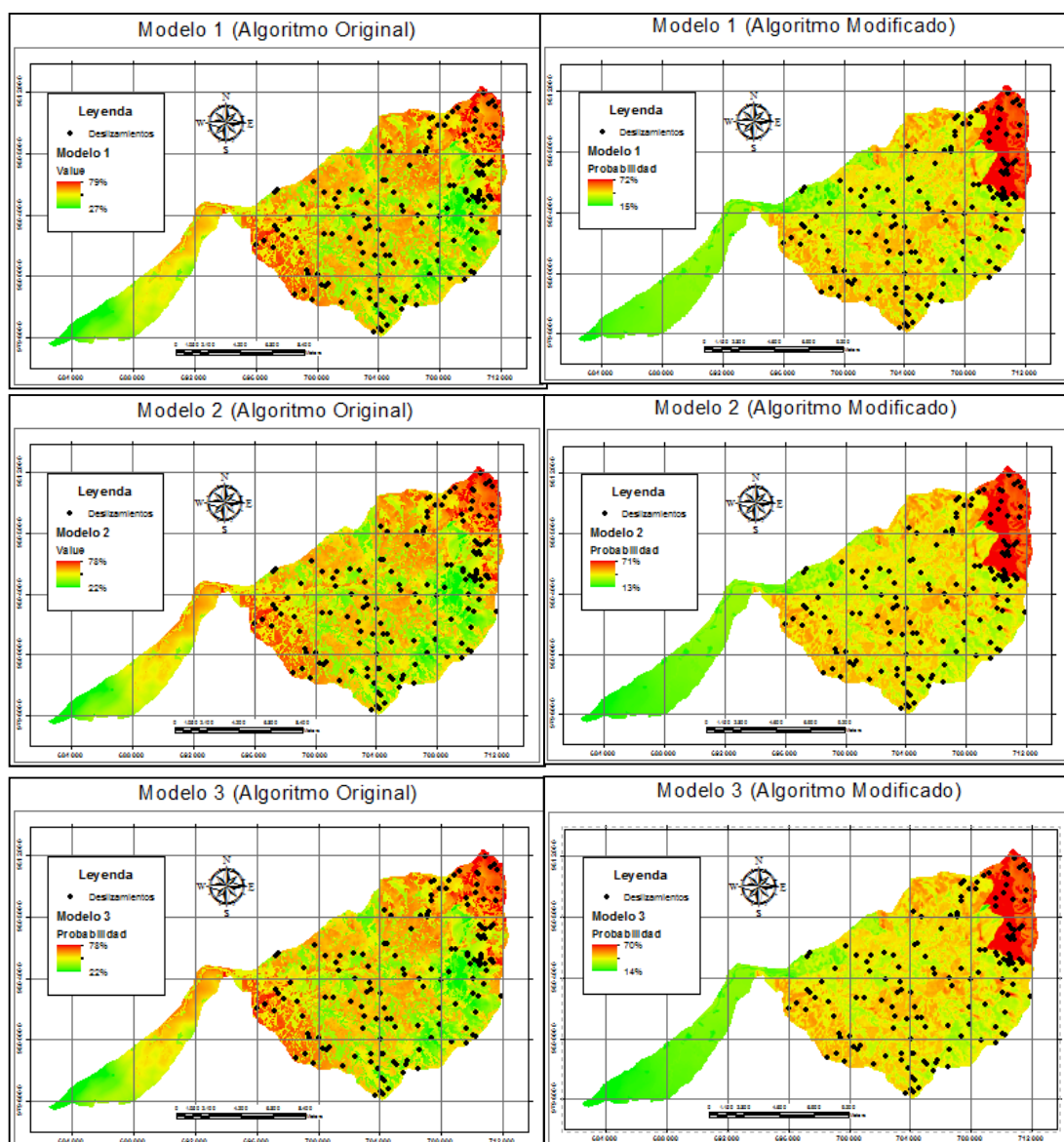


Figura 40 Comparación de modelos por algoritmo

3.3.4 Desarrollo del proceso SIG

Los modelos de susceptibilidad a deslizamientos se los realizó en un sistema de información geográfica (SIG), el software utilizado fue ArcGis 9.3, donde se realizaron las operaciones de análisis de cada una de las variables a intervenir y posteriormente las operaciones algebraicas. Para obtener los

modelos de susceptibilidad es necesario describir las fórmulas de forma que éstas puedan ser usadas en un software SIG.

- **MODELO 1: Modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos 1**

Obtenidas todas las variables que se van a utilizar en los modelos, se procede a normalizar los valores originales de las variables que sean necesarias, esto significa obtener valores que van de 0 a 1, para lo que se utilizará la siguiente ecuación:

$$N = \frac{V - Vm}{VM - Vm}$$

Dónde:

N= Normalización

V = Variable Original

Vm = Valor Mínimo

VM = Valor Máximo

Con los valores normalizados se procede a una conversión de estos a radianes, lo cual dependerá del rango en el que se ubican cada variable según el caso al que pertenecen.

En los casos 2 y 3, el rango es de 0 a $\pi/2$, por lo que para la conversión a radianes se utiliza el valor correspondiente a $\pi/2$. Se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = N * \frac{\pi}{2}$$

Dónde:

R = Radianes

Con los valores de las variables convertidos en radianes se calcula la probabilidad, para lo cual se analiza a que caso de lógica Fuzzy pertenecen y se aplica su función según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Caso 2: } P = \cos^2(R)$$

$$\text{Caso 3: } P = \sin^2(R)$$

Dónde:

P = Probabilidad.

Para la obtención del Modelo 1, se aplica el método de jerarquías analíticas de Saaty en la ponderación de variables (ver Tabla 28), con la finalidad de determinar la importancia relativa de cada una de las variables que intervienen en el modelo.

Las constantes obtenidas nos permiten aplicar la expresión que, finalmente, nos proporcionará la probabilidad de que se produzcan deslizamientos en el área de estudio. La expresión final queda definida del siguiente modo:

$$Y = 0.374 * Pend_{Prob} + 0.304 * Geología_{Prob} + 0.124 * Vias_{Prob} + 0.099 * Vegetal_{Prob} + 0.045 * Hidrica_{Prob} + 0.031 * Prec_{Prob} + 0.023 * Fallas_{Prob}$$

Dónde:

Y = Probabilidad del Modelo 1.

- **MODELO 2: Modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos 2**

En este modelo, para el proceso de normalización se utilizan de igual manera los valores máximos y mínimos de cada variable, además, al número total de la muestra de deslizamientos fotointerpretados se les aplica el cinco percentil, obteniéndose los valores más cercanos y lejanos:

Valor más cercano = 0.05

Valor más lejano = 0.95

Los valores más cercano y más lejanos junto a los valores máximo y mínimo obtenidos para cada variable se los reemplaza en la ecuación de la recta, para la normalización de las variables según el caso de lógica Fuzzy al que pertenecen:

Caso 2:

P1 (V_m ; 0.05)

P2 (V_M ; 0.95)

$$Pp = 0.05 + \left(\frac{0.9}{VM - Vm} \right) * (V - Vm)$$

Caso 3:

P1 (V_m ; 0.95)

P2 (V_M ; 0.05)

$$Pp = 0.95 - \left(\frac{0.9}{VM - Vm} \right) * (V - Vm)$$

Dónde:

Pp = pre probabilidad (valor de normalización)

V = Variable original

VM = valor Máximo

Vm = Valor Mínimo

Normalizadas las variables se procede a la transformación de los valores a radianes, se aplica el \cos^2 y por último se utiliza la ecuación que nos dará como resultado el modelo final, así tenemos:

$$Y = 0.374 * Pend_{Prob} + 0.304 * Geología_{Prob} + 0.124 * Vias_{Prob} + 0.099 * Vegetal_{Prob} + 0.045 * Hidrica_{Prob} + 0.031 * Prec_{Prob} + 0.023 * Fallas_{Prob}$$

Dónde:

Y = Probabilidad del Modelo 2.

- **MODELO 3: Modelo de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos 3**

Este modelo es similar al modelo 2, con la diferencia de que en este modelo a la muestra total de deslizamientos se le va a aplicar el diez percentil a cada una de las variables que intervienen. Obteniendo así el valor más cercano y el más lejano que son:

Valor más cercano = 0.1

Valor más lejano = 0.9

Estos valores se los aplica en la ecuación de la recta, donde se pretende llevar los valores de cada variable a valores que irán entre 0 y 1. La aplicación de la ecuación de la recta es la obtención de la normalización en este modelo.

$$y - y_1 = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} * (x - x_1)$$

Reemplazando los valores máximos y mínimos de cada variable, y los valores más cercanos y más lejanos en la ecuación de la recta según el caso de lógica Fuzzy al que pertenecen, tenemos que:

Caso 2:

P1 (Vm;0.1)

P2 (VM; 0.9)

$$Pp = 0.1 + \left(\frac{0.8}{VM - Vm} \right) * (V - Vm)$$

Caso 3:

P1 (Vm; 0.9)

P2 (VM; 0.1)

$$Pp = 0.9 - \left(\frac{0.8}{VM - Vm} \right) * (V - Vm)$$

Dónde:

P_p = pre probabilidad (valor de normalización)

V = Variable original

VM = valor Máximo

V_m = Valor Mínimo

Los valores de pre probabilidad corresponden a la normalización de las variables, obtenidos estos valores se procede con la transformación a radianes y la obtención de las probabilidades de cada una de las variables aplicando el \cos^2 , en proceso similar al anterior modelo.

Posteriormente se obtiene el modelo aplicando la siguiente expresión:

$$Y = 0.374 * Pend_{Prob} + 0.304 * Geología_{Prob} + 0.124 * Vias_{Prob} + 0.099 * Vegetal_{Prob} + 0.045 * Hidrica_{Prob} + 0.031 * Prec_{Prob} + 0.023 * Fallas_{Prob}$$

Dónde:

Y = Probabilidad del Modelo 3.

3.4 Análisis de metodología de Mora & Vahrson

Esta metodología fue desarrollada con el objetivo de hacer una clasificación en una zona determinada de su susceptibilidad a sufrir deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos del terreno. Estos indicadores los clasificamos como los factores de susceptibilidad o pasivos, que incluye el relieve relativo, la litología y la humedad del suelo y, los factores de disparo o factores externos que incluye a la sismicidad y la intensidad de precipitación.

3.4.1 Estimación del índice de susceptibilidad

Son las variables intrínsecas presentes que generan la susceptibilidad permanente del terreno a sufrir deslizamientos, entre las que encontramos parámetros como el relieve, humedad del suelo y la litología.

3.4.1.1 Evaluación del Parámetro Pendiente (P_p)

Este parámetro se clasifica con respecto a los valores de inclinación del terreno; por lo tanto, de acuerdo al método Mora-Vahrson (Mora y Vahrson, 1994), se utilizará el mapa de pendientes del área de estudio, con valores en grados o porcentaje, para identificar rangos y asignar valores.

El mapa de pendientes se lo obtuvo con base en un modelo digital del terreno (MDT), a partir de curvas de nivel 1:25000, con un intervalo de curvas cada 10 m.

Para la clasificación de pendientes se usa la establecida por Van Zuidam (1986), como muestra la **Tabla 6**. Esta clasificación comprende pesos relativos que van desde 0 a 6, valorando las pendientes desde extremadamente bajas a extremadamente fuertes.

En la Figura 41 se presenta el resultado de la clasificación de las pendientes, donde se puede apreciar que según la clasificación aplicada, la mayor parte del área de la microcuenca del río Cristal se encuentra dominado por pendientes que van desde moderadas a muy fuertes.

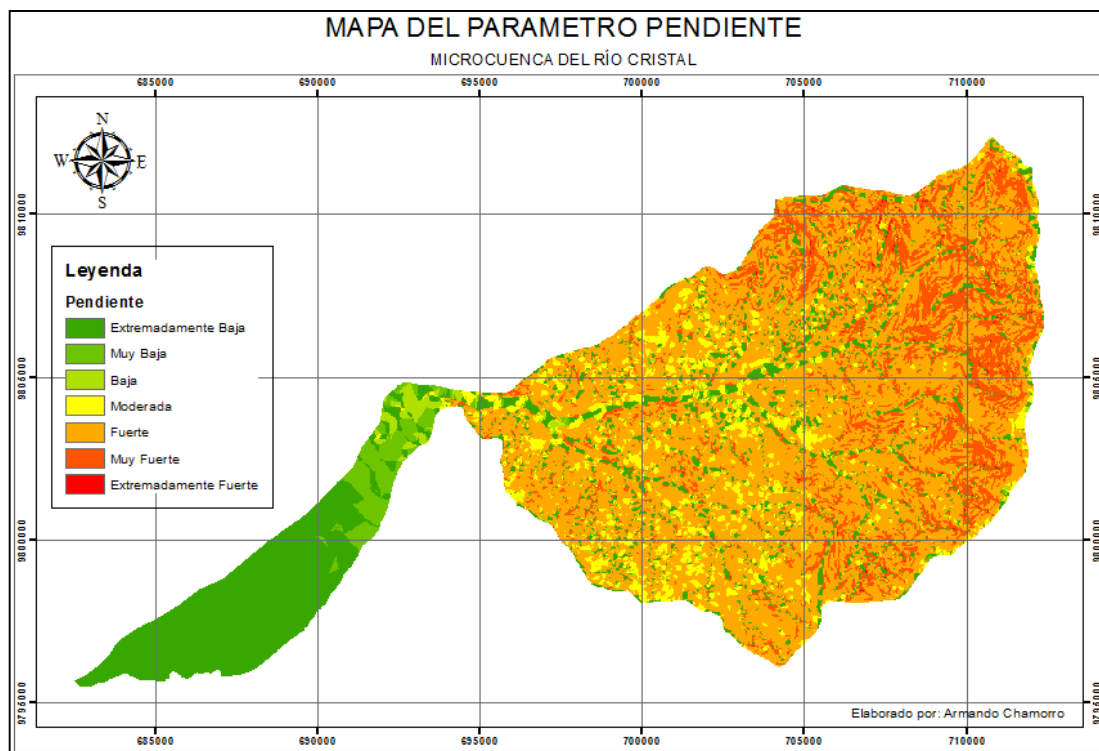


Figura 41 Mapa del Parámetro Pendiente (P_p)

3.4.1.2 Parámetro de Susceptibilidad Litológica (P_l)

En el estudio de la litología de la microcuenca del río Cristal inicia con la identificación de las unidades litológicas que caracterizan el área de estudio, en donde encontramos 10 diferentes tipos de formaciones litológicas. Posteriormente se procede con la comparación de las formaciones encontradas con las características de clasificación que establece la metodología Mora y Vahrson, en donde se le asigna un valor numérico como lo indica la **Tabla 7**. En la Figura 42 se muestra el resultado de la valoración para el Parámetro de Susceptibilidad Litológica.

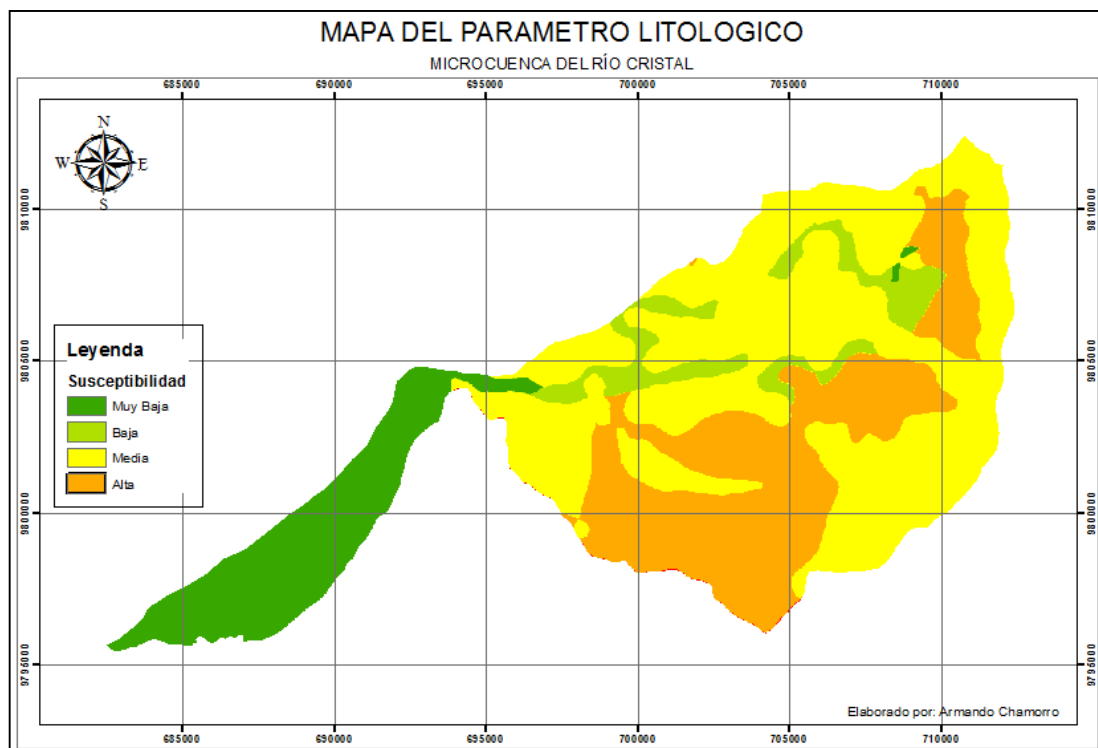


Figura 42 Mapa del Parámetro Litológico (P_1)

3.4.1.3 Parámetro Humedad del Terreno (P_h)

En la valoración de este parámetro se tomará en cuenta la información de precipitación mensual media de las estaciones meteorológicas que el INAHMI tiene distribuidas en la zona, con esta información se hará un balance hídrico simplificado, como lo establece la metodología Mora-Vahrson.

El objetivo de la metodología Mora-Vahrson es que los parámetros se ajusten a la realidad de cada área de estudio, por lo que propone calcular la evapotranspiración mensual promedio del área de estudio (ver Tabla 29) y con este valor fijar los rangos para la valoración de la precipitación media mensual; de esta manera se califica con cero una lluvia mensual cuando ésta es menor a la evapotranspiración promedio, calificarla con 1 cuando se

encuentra entre una y dos veces la evapotranspiración promedio mensual y calificarla con 2 cuando es mayor de dos veces la evapotranspiración promedio mensual.

Tabla 29 Evapotranspiración Mensual (cm) para las Estaciones Meteorológicas

	M0132	M0468 M0805	M0131 M0386 M0582
Enero	7.91	13.09	5.27
Febrero	8.1	13.76	5.43
Marzo	8.28	14.06	5.51
Abril	8.15	13.13	5.57
Mayo	7.88	12.26	5.53
Junio	7.48	10.86	5.2
Julio	7.27	9.21	4.91
Agosto	7.31	9.77	4.93
Septiembre	7.52	10.65	5.06
Octubre	7.62	10.7	5.19
Noviembre	7.81	11.64	5.32
Diciembre	7.83	12.45	5.32
ETP media (cm)	7.8	11.8	5.3

Tabla 30 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia

Precipitación promedio (mm)			Valor asignado
M0132	M0468 M0805	M0131 M0386 M0582	
< 78	< 118	< 53	0
78 - 156	118 - 236	53 - 106	1
> 156	> 236	> 106	2

A los promedios mensuales se les dan valores entre 0 y 2 como lo indica la Tabla 30, después se realiza la suma con los nuevos valores asignados

para los 12 meses del año, con esto se obtiene un valor que puede ir de 0 a 24 unidades.

Tabla 31 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0131

M0131	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	171,83	2
FEBRERO	209,24	2
MARZO	238,92	2
ABRIL	213,04	2
MAYO	80,91	1
JUNIO	23,85	0
JULIO	13,36	0
AGOSTO	11,52	0
SEPTIEMBRE	27,84	0
OCTUBRE	37,12	0
NOVIEMBRE	49,98	0
DICIEMBRE	115,90	2
Suma de Valores		11

Tabla 32 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0132

M0132	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	229,56	2
FEBRERO	305,94	2
MARZO	303,47	2
ABRIL	264,54	2
MAYO	70,37	0
JUNIO	26,74	0
JULIO	26,10	0
AGOSTO	11,88	0
SEPTIEMBRE	18,42	0
OCTUBRE	40,65	0
NOVIEMBRE	56,32	0
DICIEMBRE	139,61	1
Suma de Valores		9

Tabla 33 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0386

M0386	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	94,30	1
FEBRERO	98,18	1
MARZO	130,88	2
ABRIL	121,72	2
MAYO	79,29	1
JUNIO	8,56	0
JULIO	7,99	0
AGOSTO	2,92	0
SEPTIEMBRE	5,95	0
OCTUBRE	40,34	0
NOVIEMBRE	17,49	0
DICIEMBRE	51,10	0
Suma de Valores		7

Tabla 34 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0468

M0468	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	317,80	2
FEBRERO	546,45	2
MARZO	549,23	2
ABRIL	491,25	2
MAYO	188,85	1
JUNIO	44,83	0
JULIO	28,20	0
AGOSTO	40,21	0
SEPTIEMBRE	28,45	0
OCTUBRE	50,58	0
NOVIEMBRE	37,38	0
DICIEMBRE	85,39	0
Suma de Valores		9

Tabla 35 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0582

M0582	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	76,94	1
FEBRERO	139,91	2
MARZO	151,11	2
ABRIL	115,72	2
MAYO	82,52	1
JUNIO	32,75	0
JULIO	12,8	0
AGOSTO	20,76	0
SEPTIEMBRE	45,4	0
OCTUBRE	34,12	0
NOVIEMBRE	20,83	0
DICIEMBRE	34,98	0
Suma de Valores		8

Tabla 36 Valores asignados a los promedios mensuales de lluvia de la estación M0805

M0805	Precipitación Media	Valor Asignado
ENERO	377,00	2
FEBRERO	530,99	2
MARZO	428,74	2
ABRIL	400,46	2
MAYO	120,61	1
JUNIO	60,99	0
JULIO	47,68	0
AGOSTO	26,42	0
SEPTIEMBRE	49,33	0
OCTUBRE	48,94	0
NOVIEMBRE	35,59	0
DICIEMBRE	143,07	1
Suma de Valores		10

Calculados la suma de valores asignados para cada estación se procede con la valoración del parámetro de humedad del suelo como lo indica la Tabla 9 y en la **Tabla 37** se muestra la valoración del parámetro de humedad

del suelo para la microcuenca del río Cristal, posteriormente mediante polígonos de Thiessen se calcula el área de influencia de cada estación en la zona de estudio como lo muestra la Figura 43.

Tabla 37 Valoración del parámetro de humedad del suelo para la microcuenca del río Cristal

Estación	Suma de Valores	Valor P_h	Calificativo
M0131	11	3	Medio
M0132	9	2	Bajo
M0386	7	2	Bajo
M0468	9	2	Bajo
M0582	8	2	Bajo
M0805	10	3	Medio

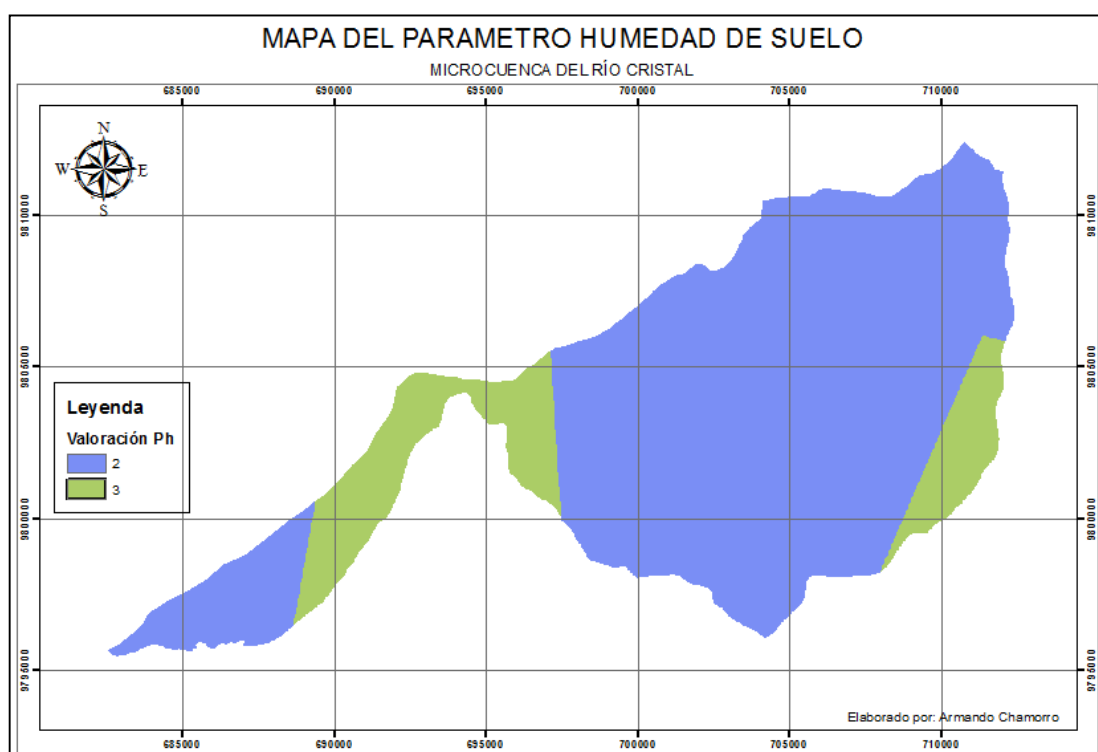


Figura 43 Mapa del Parámetro de Humedad del Suelo (Ph)

3.4.2 Incorporación del factor de disparo

El factor de disparo considera a las variables que al presentarse a la provocan la presencia de fenómenos de remoción en masa. La metodología

Mora & Vahrson considera como factores de disparo a la precipitación y a la actividad sísmica.

3.4.2.1 Parámetro de disparo por sismicidad (D_s)

Mora y Vahrson (1992) considera a la actividad sísmica como un agente disparador de deslizamientos. Para evaluar este parámetro se obtuvieron los eventos sismológicos que se presentaron en la región y fueron registrados por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional los cuales se presentan en la **Tabla 38**.

Tabla 38 Sismos en la microcuenca del Río Cristal

Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud
05/05/1990	-1,72	-79,14	11,80	4,30
23/11/1990	-1,75	-79,17	3,30	4,40
29/03/1991	-1,79	-79,48	1,70	5,40
10/06/1992	-1,68	-79,42	5,80	4,40
28/06/1994	-1,72	-79,51	0,10	4,20
25/09/1995	-1,85	-79,30	7,60	4,50
16/12/1995	-1,76	-79,25	2,30	4,00
02/03/1996	-1,61	-79,08	4,80	4,10
07/10/1996	-1,93	-79,24	9,90	4,10
29/07/2001	-1,65	-79,23	0,00	4,20
12/01/2002	-1,75	-79,17	2,50	4,00
30/09/2002	-1,70	-79,22	2,90	4,30
17/12/2005	-1,97	-79,19	4,90	4,30
17/12/2005	-1,94	-79,15	3,80	4,10

Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional

Se puede apreciar que el evento sísmico de mayor magnitud que se presentó en el área es de 5,4 en la escala de Richter, en términos de intensidad de Mercalli Modificada corresponde a V y sus efectos son que se pueden sentir desde el exterior y producen daños materiales menores. Para realizar las equivalencias entre la escala de magnitudes de Richter y la de Intensidades de Mercalli Modificada se presenta a continuación la **Tabla 39**

Tabla 39 Equivalencias entre escala de Richter vs MKS.

Magnitud Escala de Richter	Intensidad Escala de MKS	Efectos producidos
< 3.4	I	Imperceptibles. Sólo los detectan los sismógrafos.
3.5 a 4.2	II y III	Pueden llegar a percibirse en el interior de los edificios. Los objetos colgados se balancean. Producen vibraciones como las del paso de un camión pequeño.
4.3 a 4.8	IV	Se perciben en el interior de los edificios e incluso en el exterior. Los automóviles se mueven ligeramente. Las ventanas, la vajilla y las puertas vibran.
4.9 a 5.4	V	Se perciben en el exterior. Se rompen ventanas y vajilla. Las puertas golpean, las ventanas se rompen. Los relojes de péndulo cambian de ritmo. Algunos objetos pequeños pueden moverse.
5.5 a 6.1	VI y VII	Los perciben todas las personas. Algunos edificios pueden sufrir importantes daños. La vajilla y la cristalería así como las ventanas se hacen añicos. Los cuadros se caen y los libros saltan de los estantes. Los muebles se mueven o se caen. Los árboles y arbustos se balancean ostensiblemente.
6.2 a 6.9	VIII y IX	Pánico general. Destrucción de construcciones de mediana y de baja calidad. Daños generales en los cimientos y en las armazones de los edificios. Graves daños en represas y rotura de tuberías subterráneas. Grietas visibles en el suelo.
7.0 a 7.3	X	Se destruye la mayoría de los edificios de mediana calidad, incluso algunos de construcción sólida y hasta puentes de madera. Daños graves en represas. Grandes desprendimientos. Se desborda el agua de los ríos, canales, lagos, entre otros. Los rieles se deforman.
7.4 a 7.9	XI	La mayoría de los edificios se destruye. Los rieles se retuercen. Las tuberías subterráneas quedan inutilizadas.
> 8.0	XII	Destrucción casi total. Se desplazan grandes masas de rocas. Algunos objetos son arrojados al aire. Grandes grietas en el suelo y en el subsuelo.

Fuente: Portal Planeta SEDNA – Argentina

Para la calificación de este factor se realizó según lo propone la metodología Mora-Vahrson en la Tabla 10, los resultados de la valoración se presentan en la **Tabla 40** y en la **Figura 44** se muestra el mapa con los resultados de la valoración de parámetro de sismicidad.

Tabla 40 Valoración del Parámetro de Disparo por Sismicidad

Magnitud	MKS	Valor Ds
4,30	IV	3
4,40	IV	3
5,40	V	4
4,40	IV	3
4,20	III	2
4,50	IV	3
4,00	III	2
4,10	III	2
4,10	III	2
4,20	III	2
4,00	III	2
4,30	IV	3
4,30	IV	3
4,10	III	2

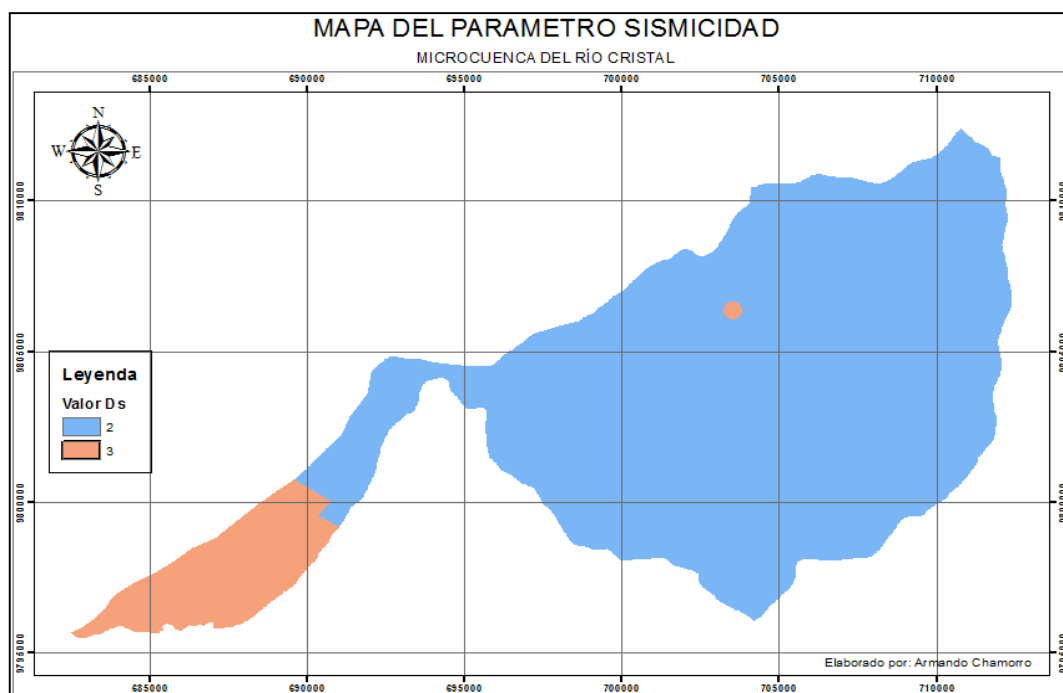


Figura 44 Parámetro de Disparo de Sismicidad

3.4.2.2 Parámetro de disparo por lluvia (D_{II})

Mora y Vahrson (1984) asumen que los deslizamientos que involucran depósitos superficiales son comúnmente producidos por precipitaciones de tipo convectivo de corta duración pero de gran intensidad.

Para evaluar este parámetro primero se determinó para todas las estaciones meteorológicas distribuidas en la microcuenca del río Cristal la serie de valores de precipitación máximos diarios anuales, se analizó si existen valores fuera de la serie mediante el método de Grubbs, que determina los valores atípicos de una serie de datos, y se los elimino.

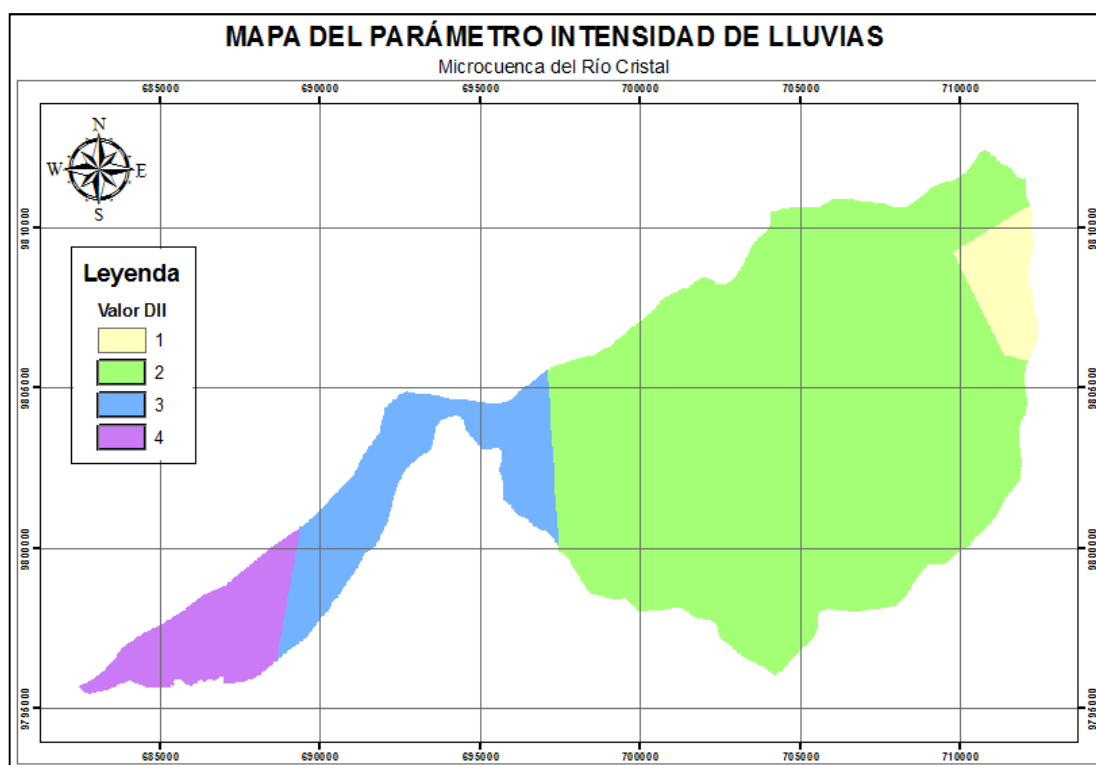
Según el número de datos disponibles en cada estación, para registros menores a 10 años se calculó el promedio aritmético, para estaciones con registros superiores a los 10 años se realizó el cálculo de la precipitación máxima para un periodo de retorno (T) de 100 años, para lo que se utilizó el método de Gumbel.

La calificación de este parámetro se realizó asignando el valor del factor de intensidad de la precipitación según lo propuesto en la metodología Mora-Vahrson (Mora & Vahrson., 1994) en la **Tabla 11**, luego se calcula el área de influencia de las estaciones mediante la implementación de los polígonos de Thiessen y se asigna el valor de intensidad de lluvia que corresponde a cada estación.

Los resultados de la valoración del factor de disparo por lluvia, para las áreas de influencia correspondiente a cada una de las estaciones meteorológicas, se presentan en la **Tabla 41** y **Figura 45**.

Tabla 41 Valoración del factor lluvia para el área de estudio

Estación	Lluvia Máxima T=100 años (mm) n > 10 años	Lluvia Máxima Promedio (mm) n < 10 años	Valor D _{LL}	Calificativo
M0131	103,99	-	2	Muy Alto
M0132	176,52	-	2	Bajo
M0386	149,86	-	2	Bajo
M0468	315,91	-	4	Muy Alto
M0582	60,52	-	1	Muy Bajo
M0805	-	94,99	3	Medio



3.4.3 Modelos Cartográficos

Aplicando la metodología Mora – Vahrson se obtuvieron los siguientes modelos de susceptibilidad a deslizamientos:

- Modelo 4 Susceptibilidad a Deslizamientos por Sismicidad
- Modelo 5 Susceptibilidad a Deslizamientos por Intensidad de Lluvias
- Modelo 6 Susceptibilidad a Deslizamientos

MODELO CARTOGRAFICO GENERAL: VARIABLES MORA-VAHRSON

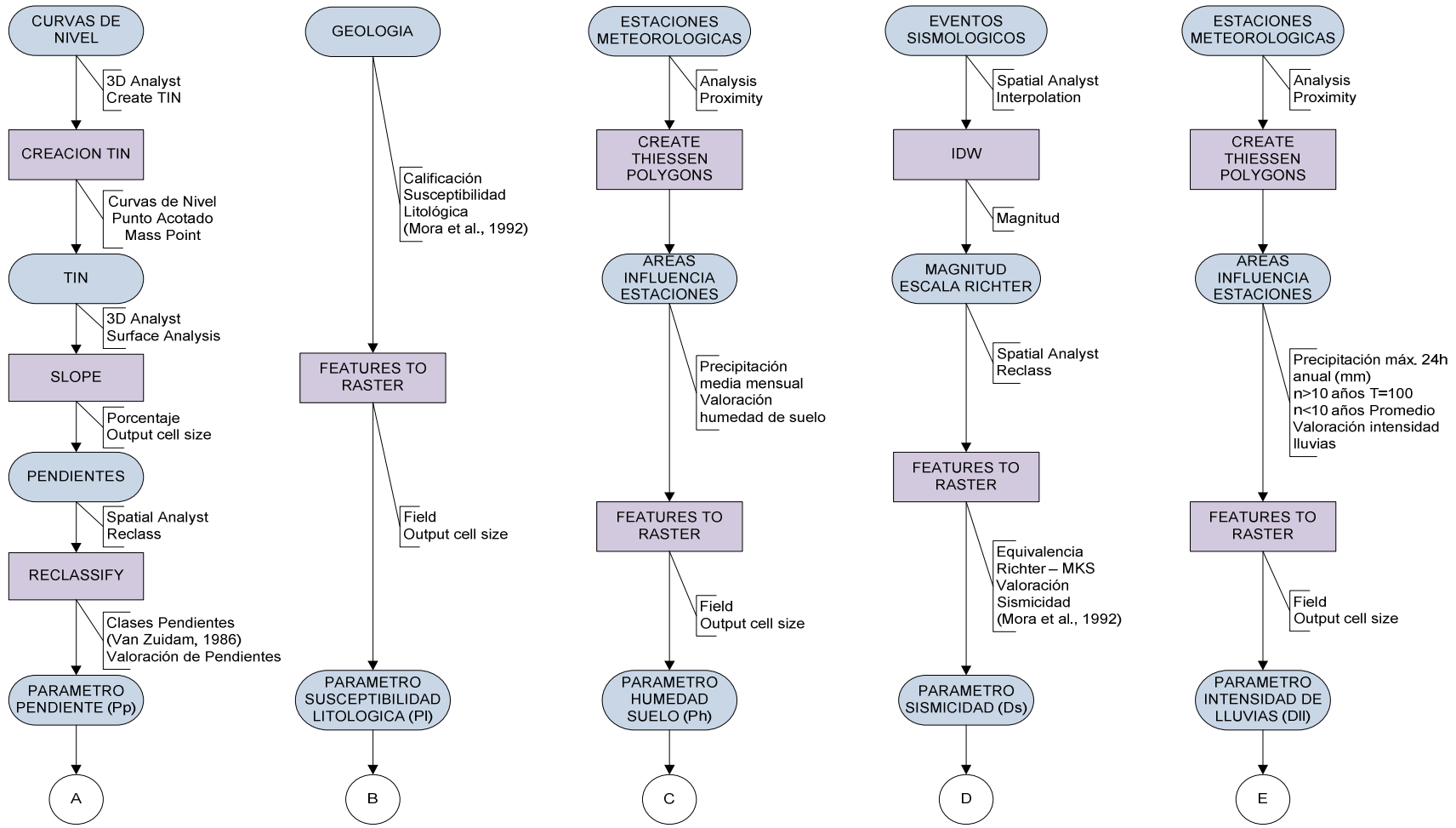


Figura 46 Modelo General de Obtención de Variables – Mora Vahrson

MODELO CARTOGRAFICO 4 MORA-VAHRSON (SISMICIDAD)

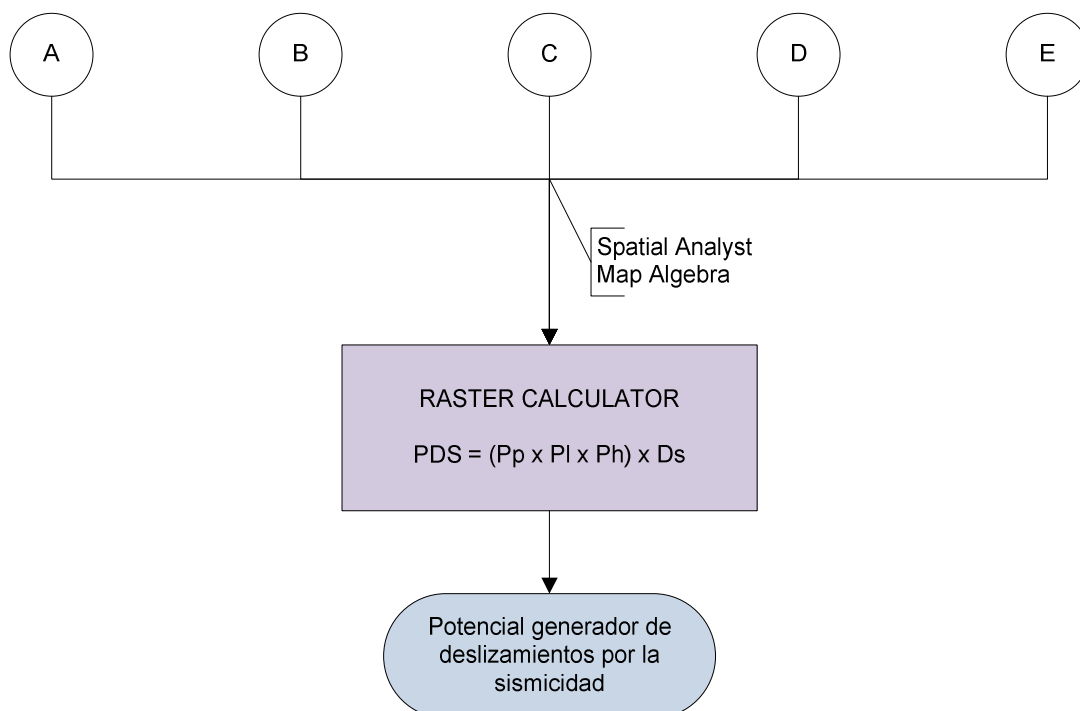


Figura 47 Modelo 4 Susceptibilidad a Deslizamientos por Sismicidad

MODELO CARTOGRAFICO 5 MORA-VAHRSON (INTENSIDAD DE LLUVIAS)

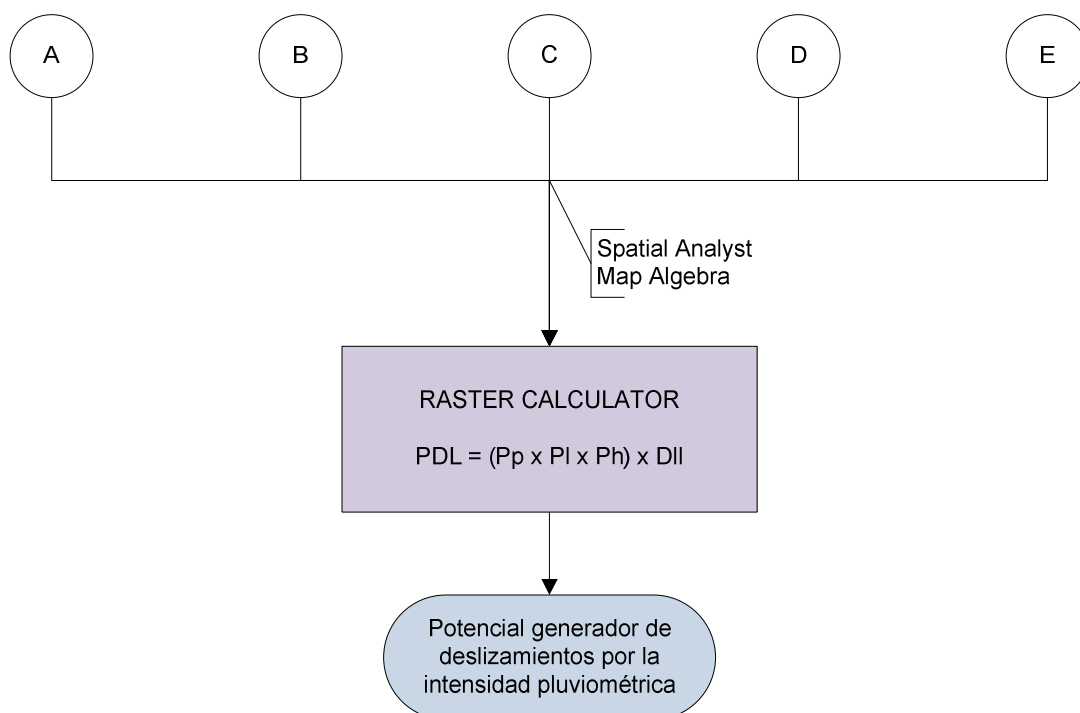


Figura 48 Modelo 5 Susceptibilidad a Deslizamientos por Intensidad de Lluvias

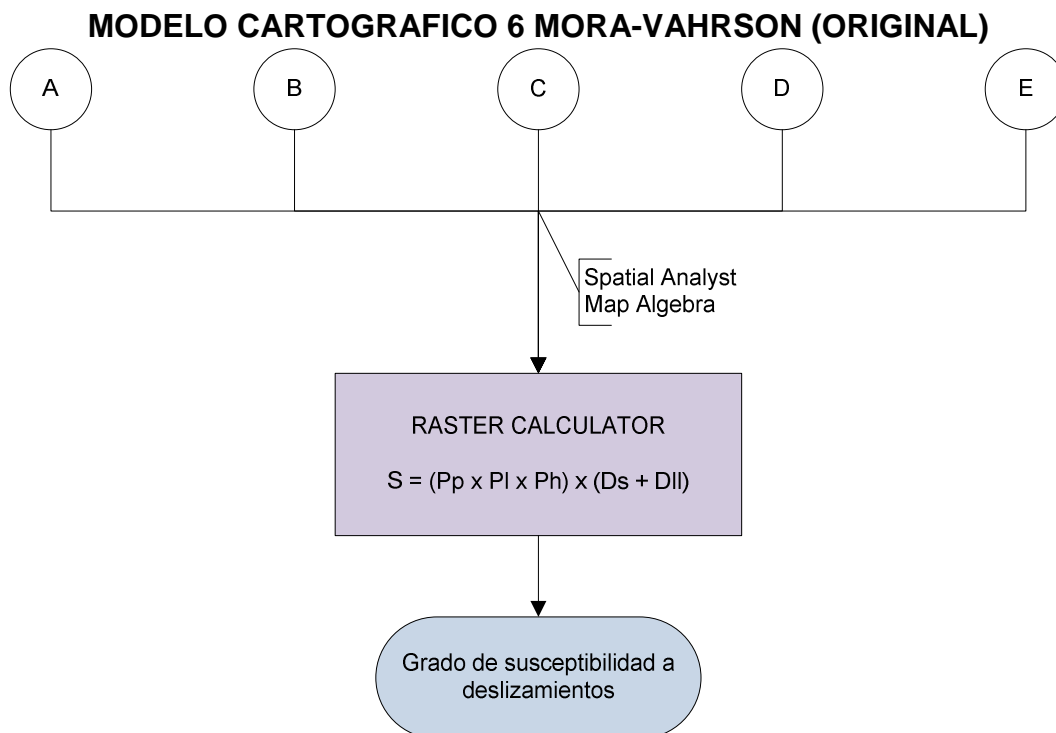


Figura 49 Modelo 6de Susceptibilidad a Deslizamientos

3.5 Análisis del Modelo INDECI

El modelo propuesto por el Instituto de Defensa Civil de Perú es del tipo heurístico, este usa cuatro variables para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, cada una de las variables es clasificada de sus valores iniciales en rangos donde se les otorga una calificación que puede ir de muy baja hasta muy alta susceptibilidad.

3.5.1 Aplicación del Modelo INDECI

- **Pendientes**

Esta variable se la califica de acuerdo con lo que establece la metodología de INDECI en la Tabla 13, donde se clasifica a las pendientes en cuatro rangos describiéndolos como pendientes muy bajas hasta altas.

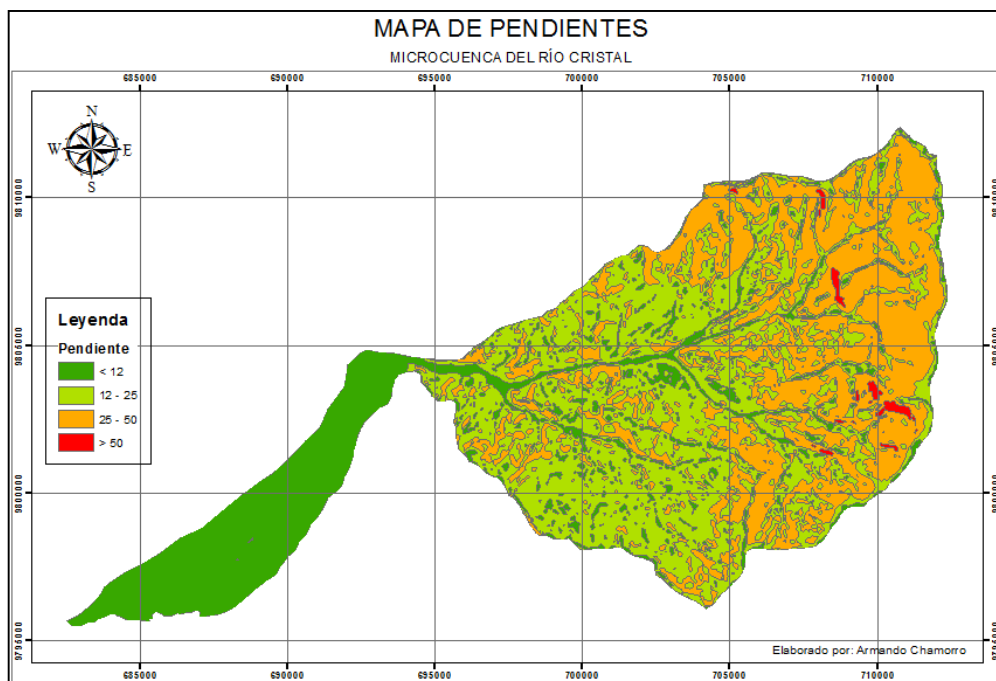


Figura 50 Mapa de Pendientes - INDECI

- **Geología**

Para la calificación de esta variable se tiene en cuenta el tipo de litología presente en el área de estudio y se lo clasifica en grados de susceptibilidad establecidos en la **Tabla 14**.

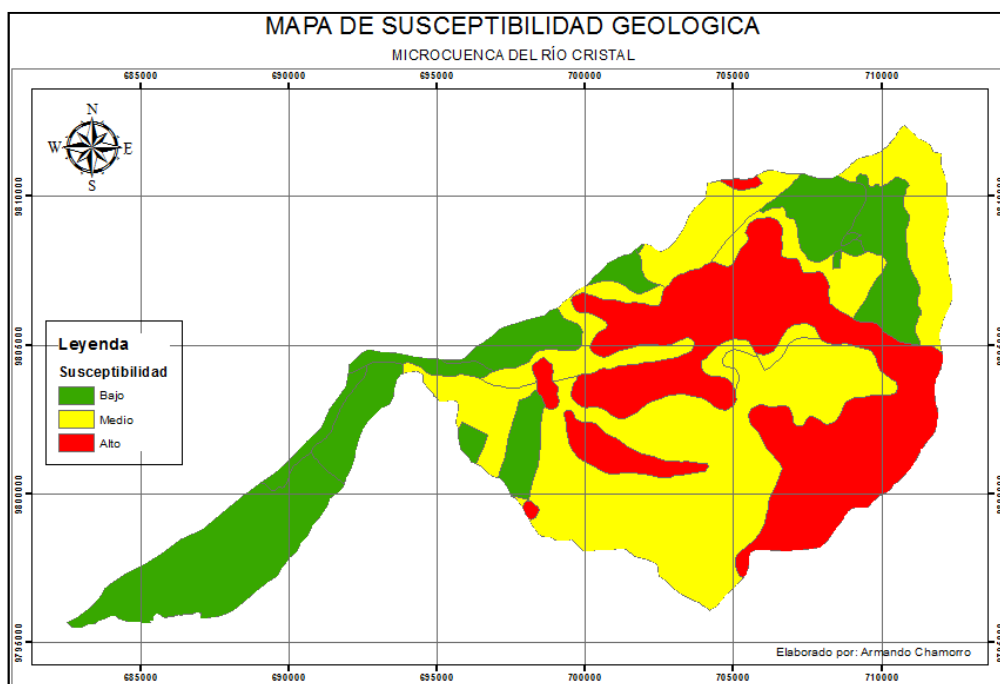


Figura 51 Mapa de Susceptibilidad Geológica – INDECI

- **Clases de Suelos (Textura)**

Esta variable tiene en cuenta la composición (arcilla, arena, limo) de los suelos y los reclasifica en 3 grupos dependiendo del tamaño de las partículas de suelo, así tenemos que los dividen en finas, medias y gruesas como lo indica la **Tabla 15**.

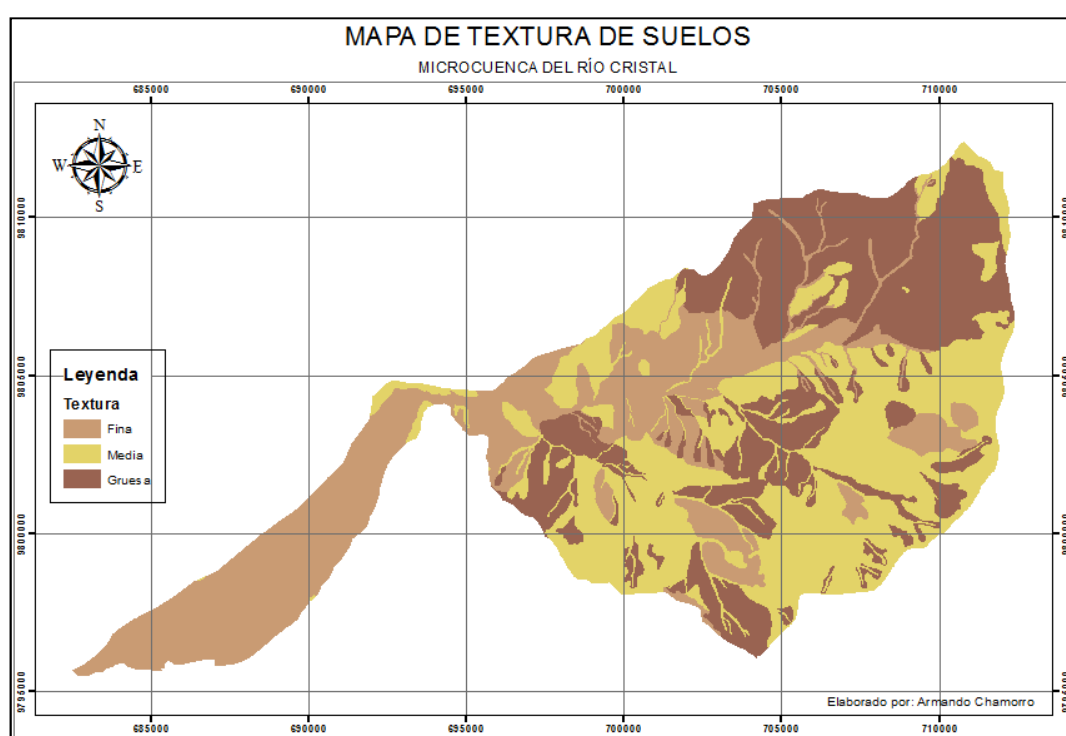


Figura 52 Mapa de Textura de Suelos - INDECI

- **Precipitación (Isoyetas)**

Se considera a la precipitación como un factor que afecta a la estabilidad de las pendientes, es por esto que se considera que una zona con mayor precipitación es más propensa a sufrir deslizamientos que una con poca precipitación. Para la valoración del parámetro se usa la precipitación media anual y se crea el mapa de isoyetas cuyos rangos y valoración están dados por la **Tabla 16**.

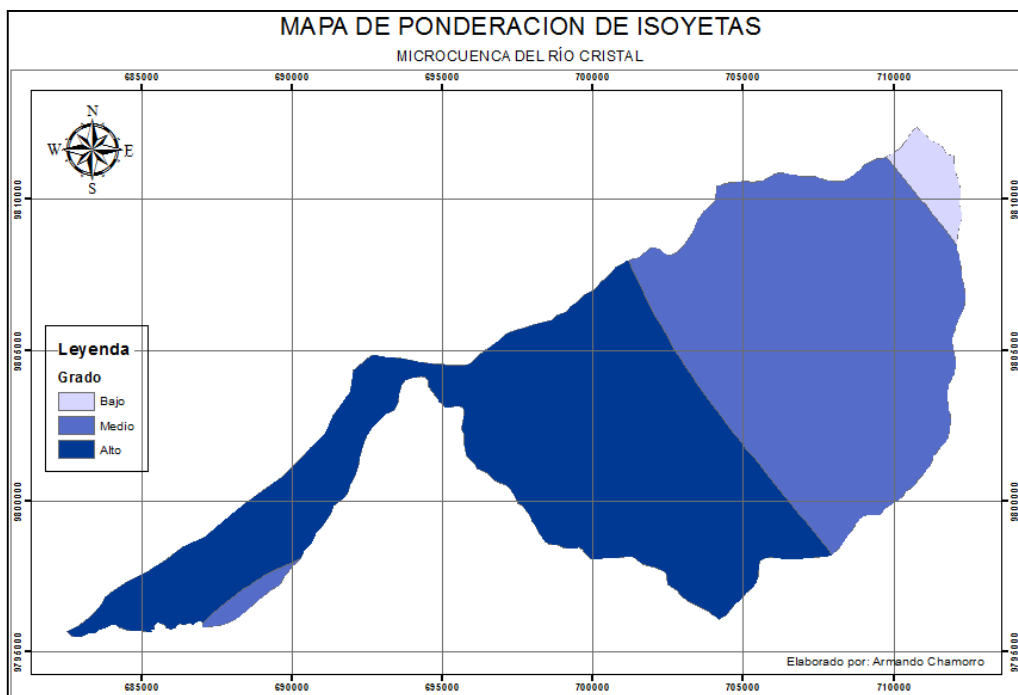


Figura 53 Mapa de Ponderación de Isoyetas - INDECI

3.5.1.1 Matrices de Ponderación entre Variables

La Figura 54 es el resultado de aplicar la matriz S1 de cruce entre las variables de pendientes y la textura del suelo como lo indica la Tabla 17.

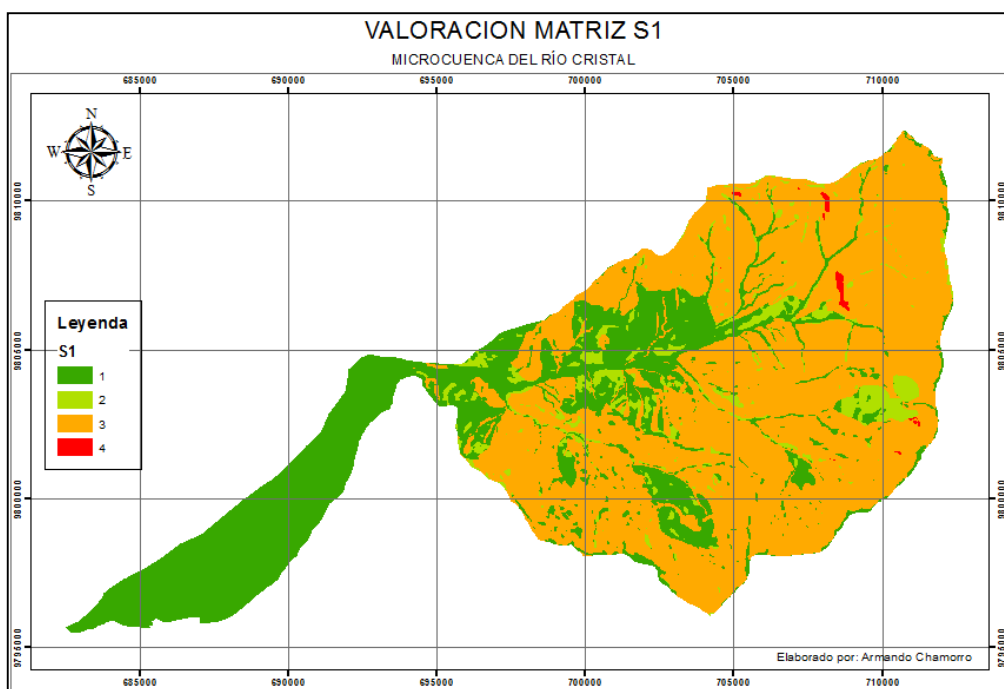


Figura 54 Valoración Matriz S1

Alcanzado el resultado de la matriz S1, se procede a un nuevo cruce que incluye los resultados de la valoración de esta matriz con la variable de geología, aplicando una nueva matriz S2 de ponderación como lo indica la **Tabla 18** y se lo muestra en la **Figura 55**.

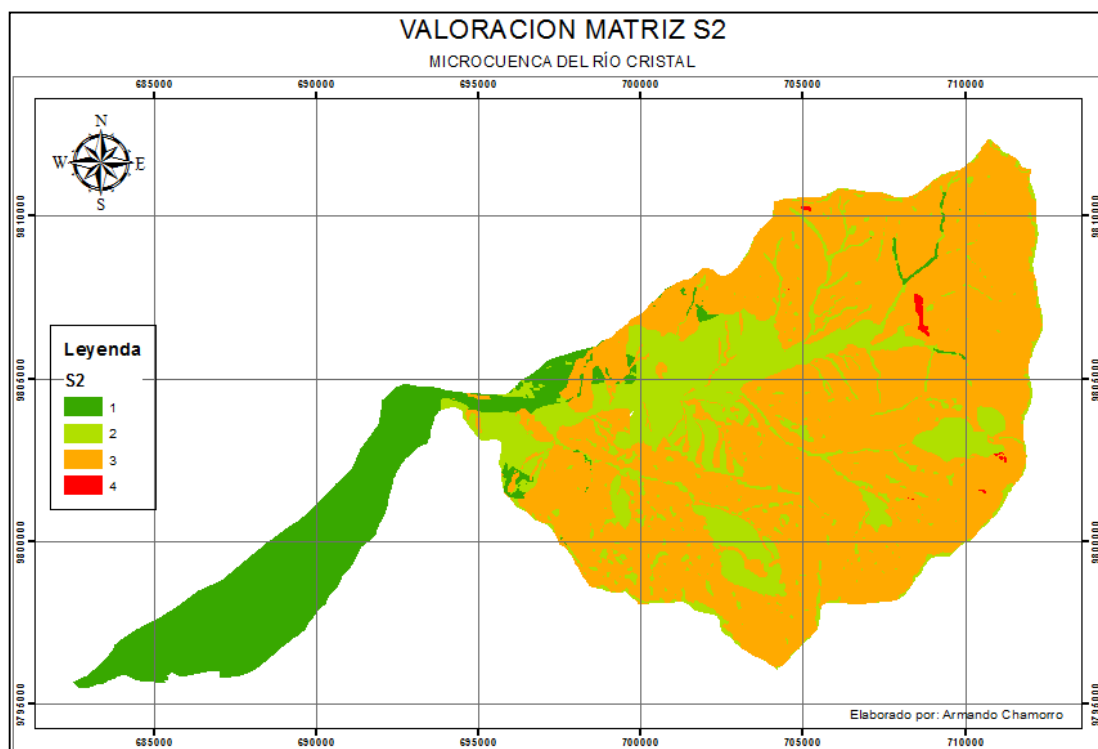


Figura 55 Valoración Matriz S2

Por último se continúa con una última intersección que involucra el resultado de la valoración de la matriz S2 con la ponderación del mapa de Isoyetas según la **Tabla 20**, obteniéndose como resultado final el mapa de Susceptibilidad a deslizamientos que valora la susceptibilidad del terreno en valores de baja, media, alta y muy alta a sufrir deslizamientos como se observa en la **Figura 56**.

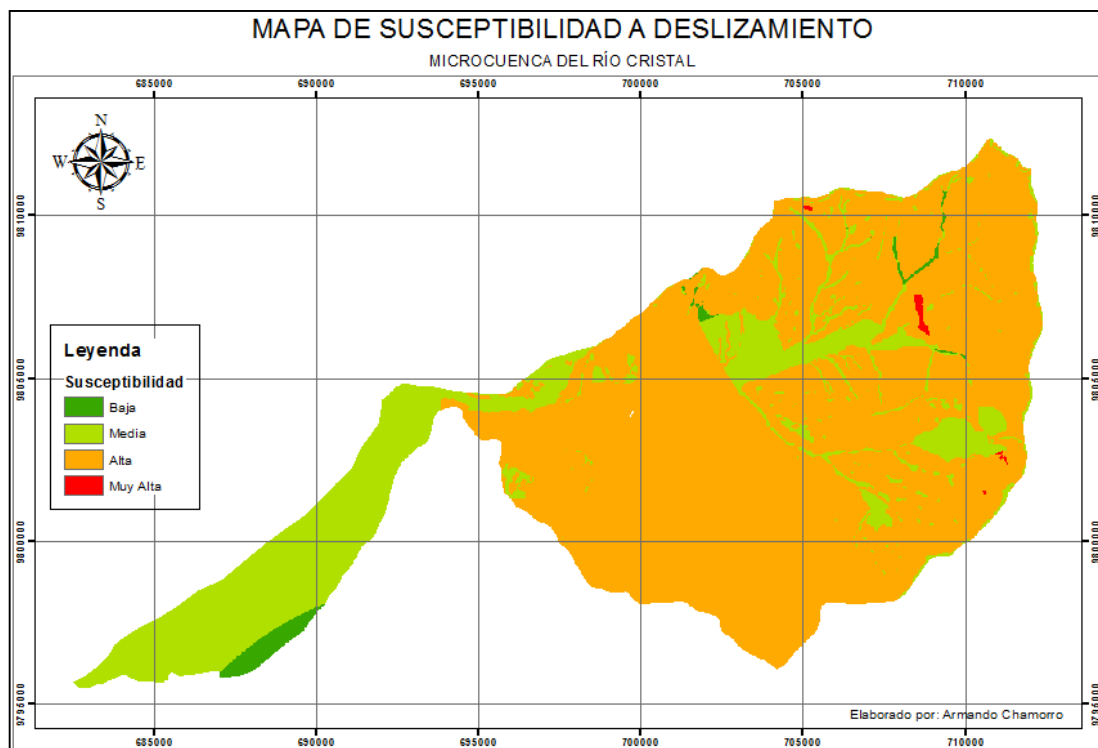


Figura 56 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos

3.5.2 Aplicación del Modelo INDECI Modificado

El modelo original INDECI arroja como resultado 4 niveles de probabilidad y en sus variables trabaja con tres y cuatro clases. Para este estudio se necesita trabajar con un nivel de detalle superior, por lo que se van a reconsiderar la clasificación de las variables llevándolas a cinco niveles de susceptibilidad siendo estas muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

- **Pendientes**

Para la calificación de esta variable se adaptó la calificación original propuesta por el INDECI, creando cinco clases de susceptibilidad que van de muy bajo a muy alto como se muestra en la **Tabla 42**.

Tabla 42 Tabla de ponderación de Pendientes Modificado

Nivel	Pendiente
Muy Bajo	<12°
Bajo	12° - 24°
Medio	24° - 36°
Alto	36° - 50°
Muy Alto	> 50°

Fuente: Modificado de INDECI, 2011

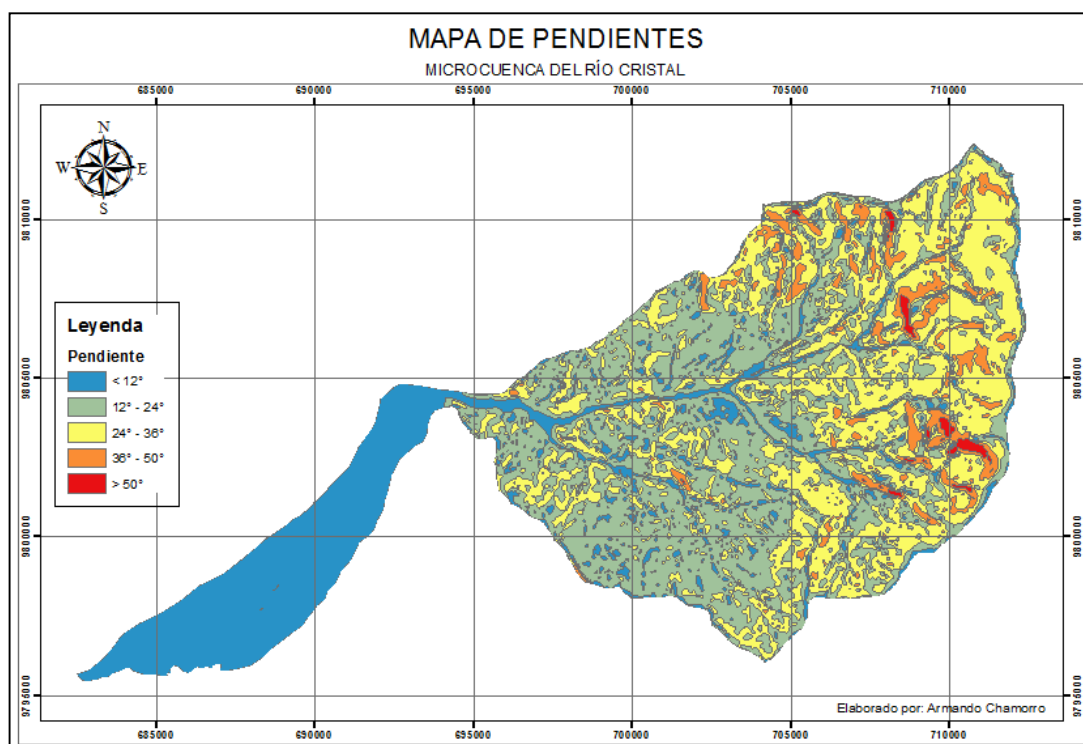


Figura 57 Mapa de Pendientes – INDECI Modificado

- **Geología**

Para la calificación de esta variable se toma en cuenta la calificación que establece Mora & Vahrson en la Tabla 7, debido a que este considera 5 niveles de susceptibilidad y en este estudio se va a aplicar la metodología de INDECI con un nivel más detallado.

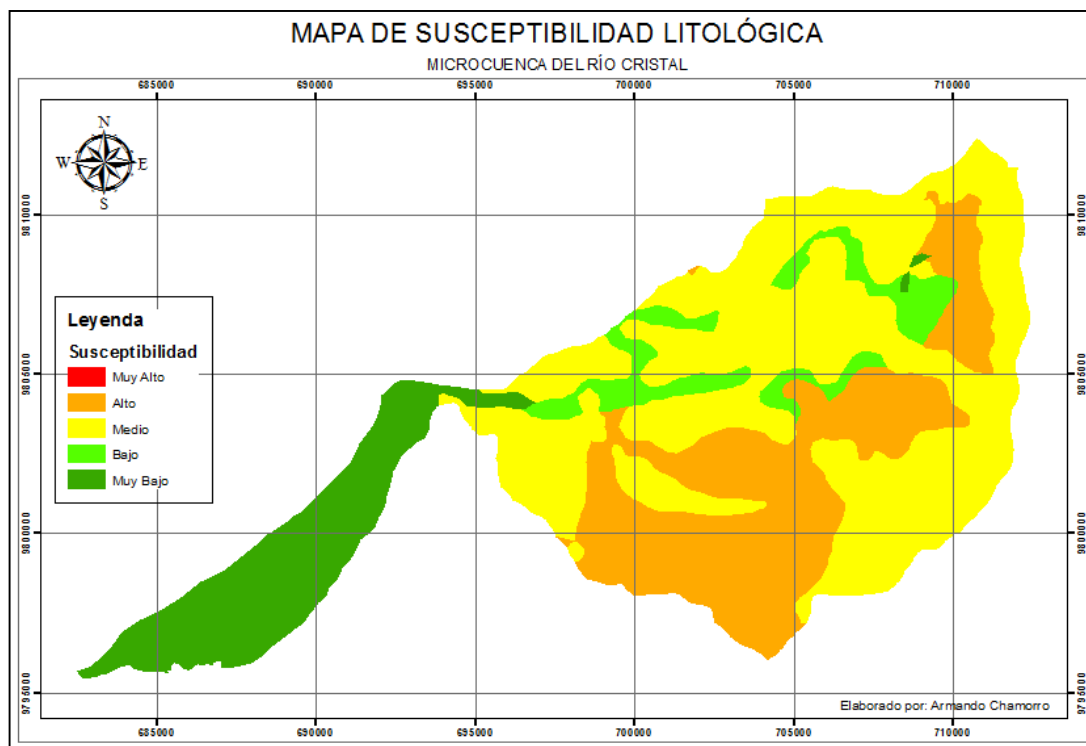


Figura 58 Mapa de Susceptibilidad Geológica – INDECI Modificado

- **Clases de Suelos (Textura)**

Esta variable tiene en cuenta la composición (arcilla, arena, limo) de los suelos y los reclasifica en 5 grupos dependiendo del tamaño de las partículas de suelo, así tenemos que los dividen en finas, moderadamente finas, medias, moderadamente gruesas y gruesas como lo indica la **Tabla 43**.

Tabla 43 Tabla de Reclasificación de Clases de Suelos

Textura	
Descripción	Reclasificación
Arenoso (fina, media, gruesa)	Gruesa
Arenoso franco	Moderadamente Gruesa
Franco arenoso (fino a grueso)	Moderadamente Gruesa
	Continúa...

Franco limoso	
Franco	Media
Limoso	
Franco arcilloso (<35% de arcilla)	Moderadamente Fina
Franco arcillo arenoso	
Franco arenoso limoso	
Franco arcilloso (>35% de Arcilloso)	
Arcilloso arenoso	Fina
Arcillo limoso	
Arcillo (>60%)	

Fuente: Modificado del Programa de regularización y administración de tierras rurales. Metodología de valoración de tierras rurales. Convenio Prati-SIGAGRO 2006.

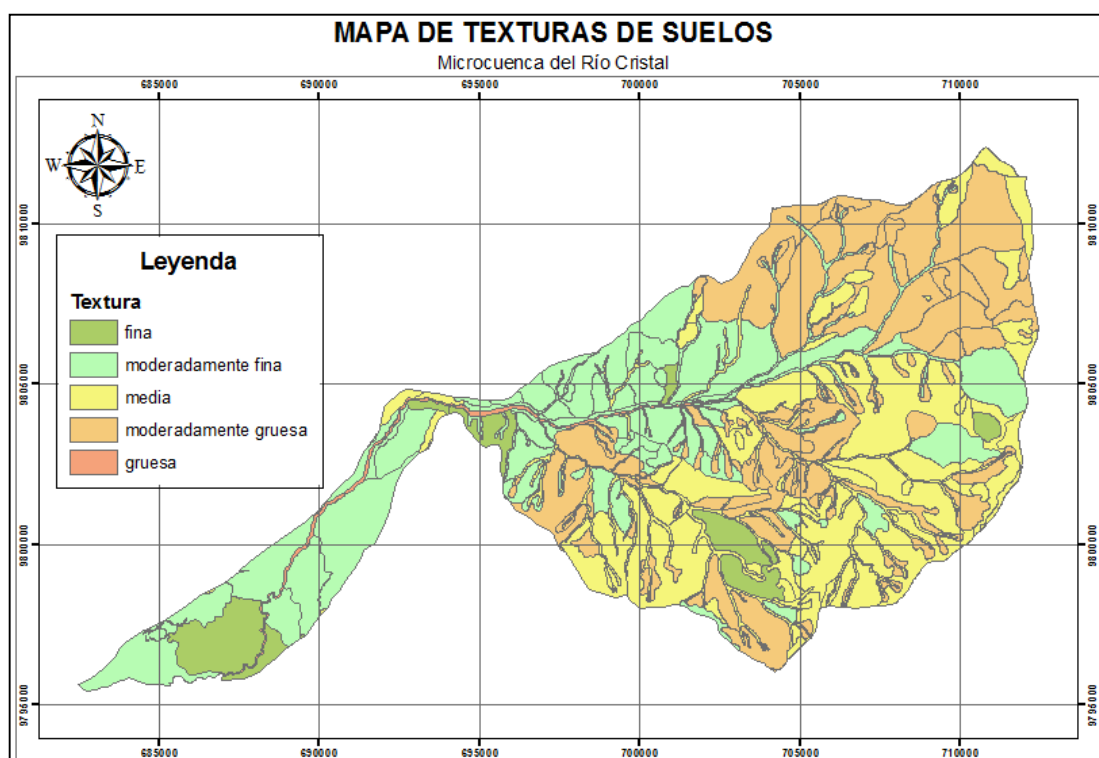


Figura 59 Mapa de Textura de Suelos – INDECI Modificado

- **Precipitación (Isoyetas)**

Para la valoración de este parámetro se reclasificó los valores originales de la metodología, con la finalidad de obtener más detalle en los resultados. La reclasificación de los valores de la precipitación media anual se la indica en la **Tabla 44** donde se adoptaron 5 clases.

Tabla 44 Ponderación del Mapa de Isoyetas Modificado

Grado	Rango (mm)
Muy Bajo	< 1000
Bajo	1000 – 1150
Medio	1150 – 1300
Alto	1300 – 1500
Muy Alto	> 1500

Fuente: modificado de INDECI, 2011

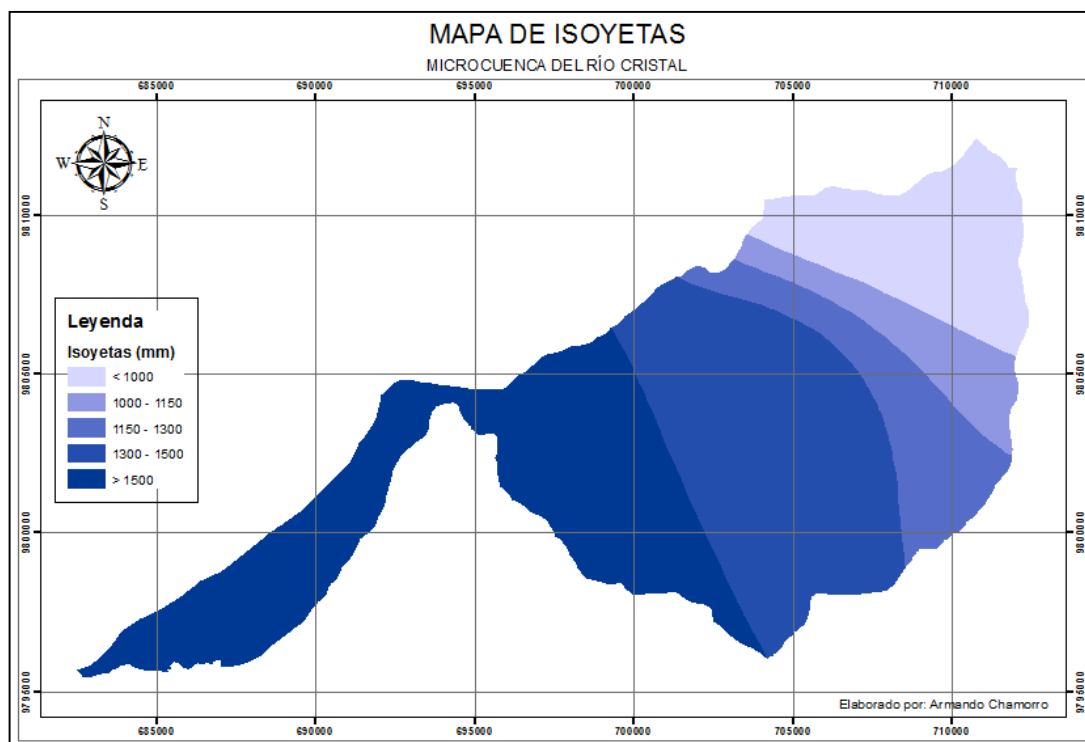


Figura 60 Mapa de Ponderación de Isoyetas – INDECI Modificado

3.5.2.1 Matrices de Ponderación entre Variables

Para realizar el cruce espacial entre las variables textura del suelo y pendiente se aplica la **Tabla 45** que se la obtuvo modificando la original propuesta por la metodología y los resultados se indican en la **Figura 61**.

Tabla 45 Matriz Textura, Pendiente (S1) Modificado

TEXTURA	PENDIENTE				
	< 12°	12° - 24°	24° - 36°	36° - 50°	> 50°
Fina	1	2	2	2	2
Moderadamente Fina	1	2	3	3	3
Media	1	2	3	3	4
Moderadamente Gruesa	2	3	4	4	4
Gruesa	2	3	4	4	5

Fuente: Modificado de INDECI, 2011

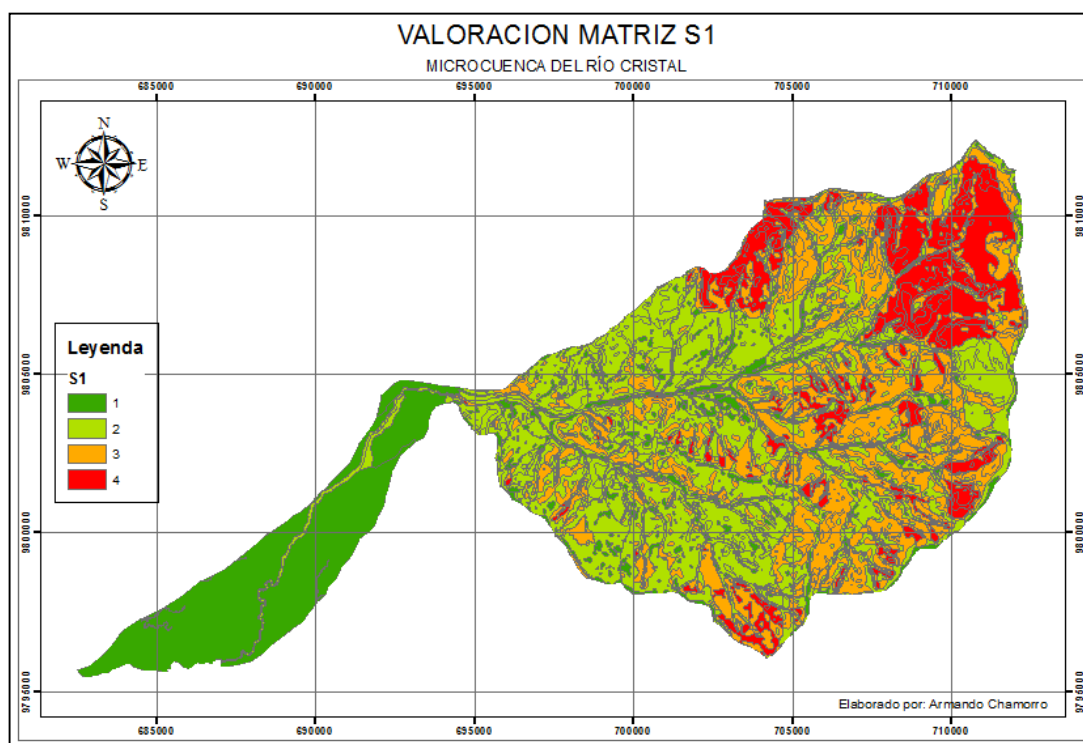


Figura 61 Valoración Matriz S1 – INDECI Modificado

Con los resultados de la valoración de la matriz S1, se procede a la intersección con la variable geología a cuyos productos se efectuarán las

ponderaciones establecidas en la **Tabla 46 Matriz S1, Geología (S2)** y se lo muestra gráficamente en la **Figura 62**.

Tabla 46 Matriz S1, Geología (S2) Modificado

CLASE S1	GEOLOGÍA				
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
1	1	1	2	2	2
2	1	2	2	3	3
3	2	3	3	3	4
4	3	3	4	4	5
5	3	4	4	5	5

Fuente: Modificado de INDECI, 2011

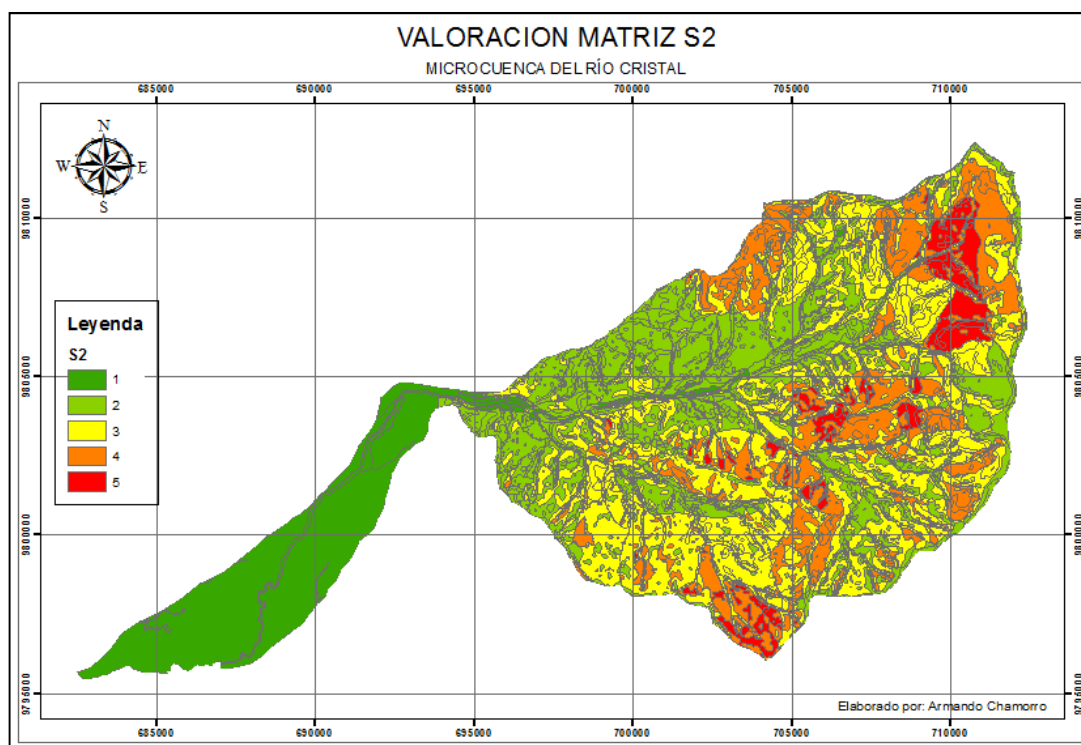


Figura 62 Valoración Matriz S2 – INDECI Modificado

Para finalizar con el proceso se cruza la variable isoyetas con los resultados de la ponderación de la matriz S2, este dará como resultado el mapa final de susceptibilidad que se lo muestra en la **Figura 63**, que es el

resultado de la ponderación efectuada en la **Tabla 47** la cual es una modificación de la ponderación original de la metodología INDECI.

Tabla 47 Matriz S2, Isoyetas Modificado

CLASE S2	ISOYETAS				
	< 1000	1000 - 1150	1150 - 1300	1300-1500	> 1500
1	1	1	1	2	2
2	1	2	2	2	3
3	3	3	3	4	4
4	3	4	4	5	5
5	4	4	4	5	5

Fuente: Modificado de INDECI, 2011

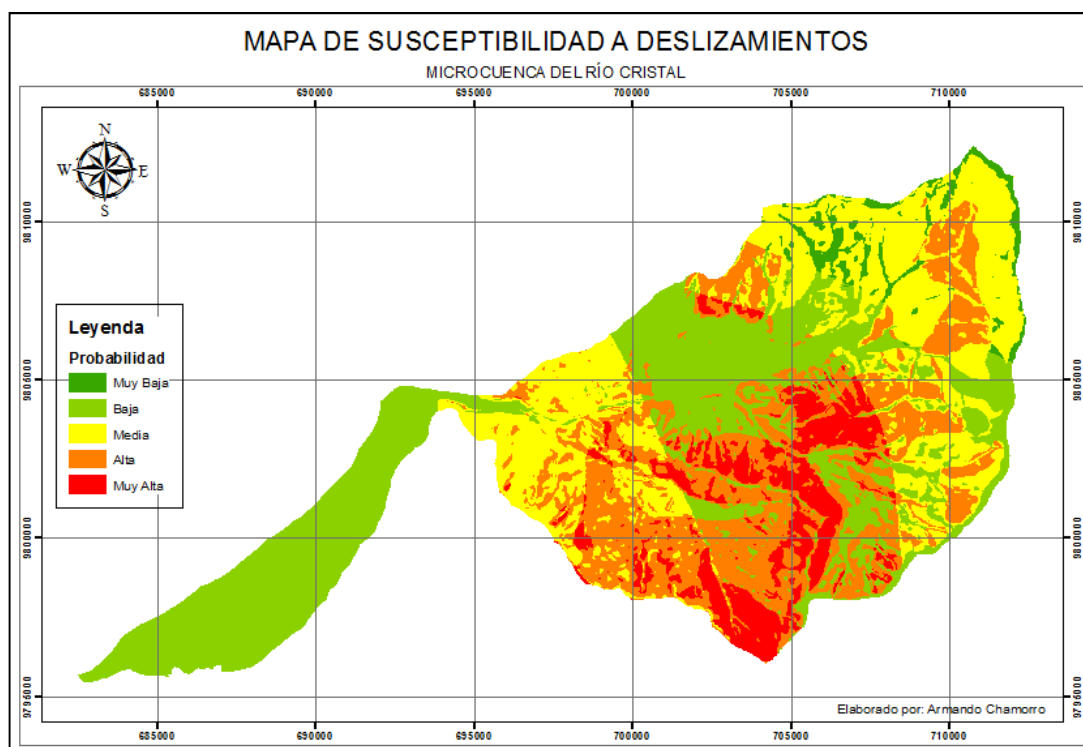


Figura 63 Mapa de Susceptibilidad a Deslizamientos – INDECI Modificado

3.5.3 Obtención de modelos cartográficos

Al aplicar la metodología propuesta por el INDECI - Perú se obtuvo un modelo de susceptibilidad a deslizamientos:

MODELO CARTOGRAFICO GENERAL: VARIABLES INDECI

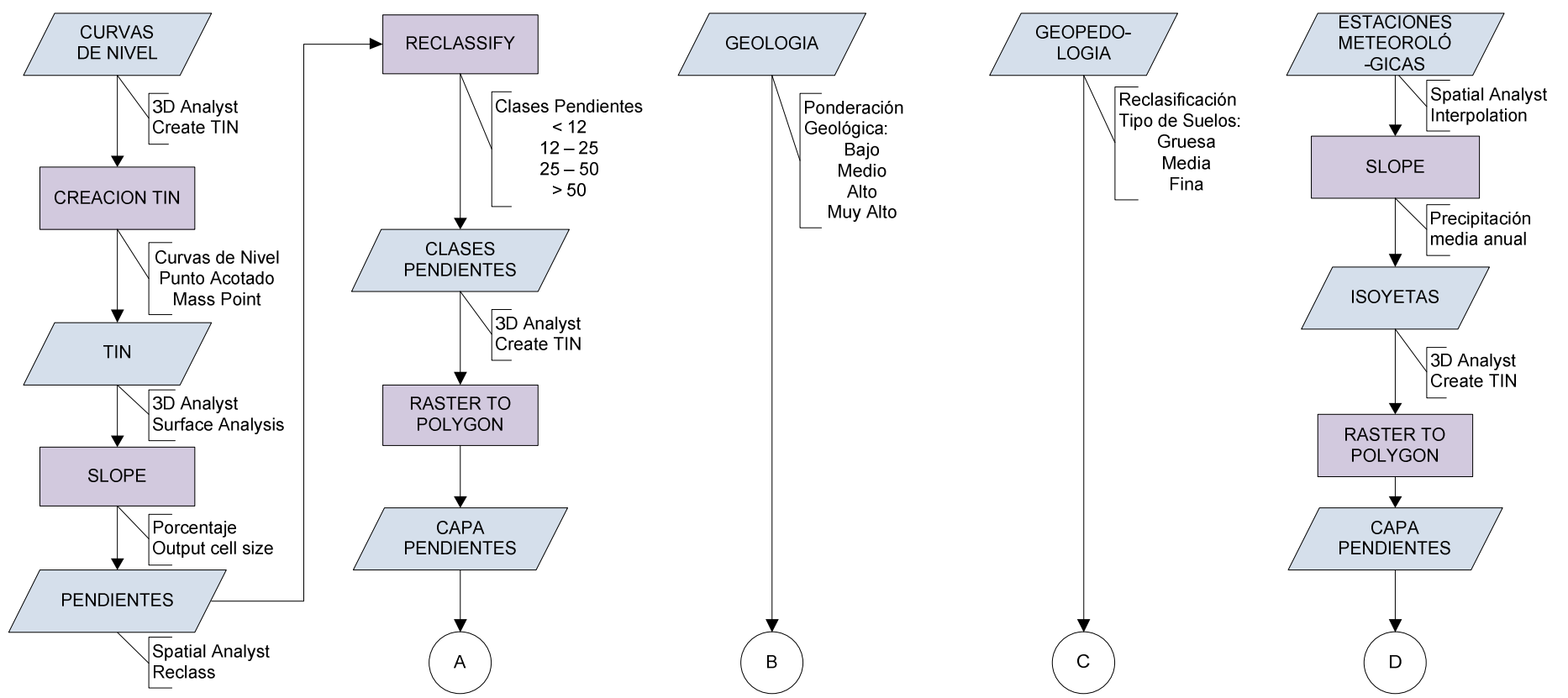


Figura 64 Modelo General Valoración de Variables - INDECI

MODELO CARTOGRAFICO 7 INDECI

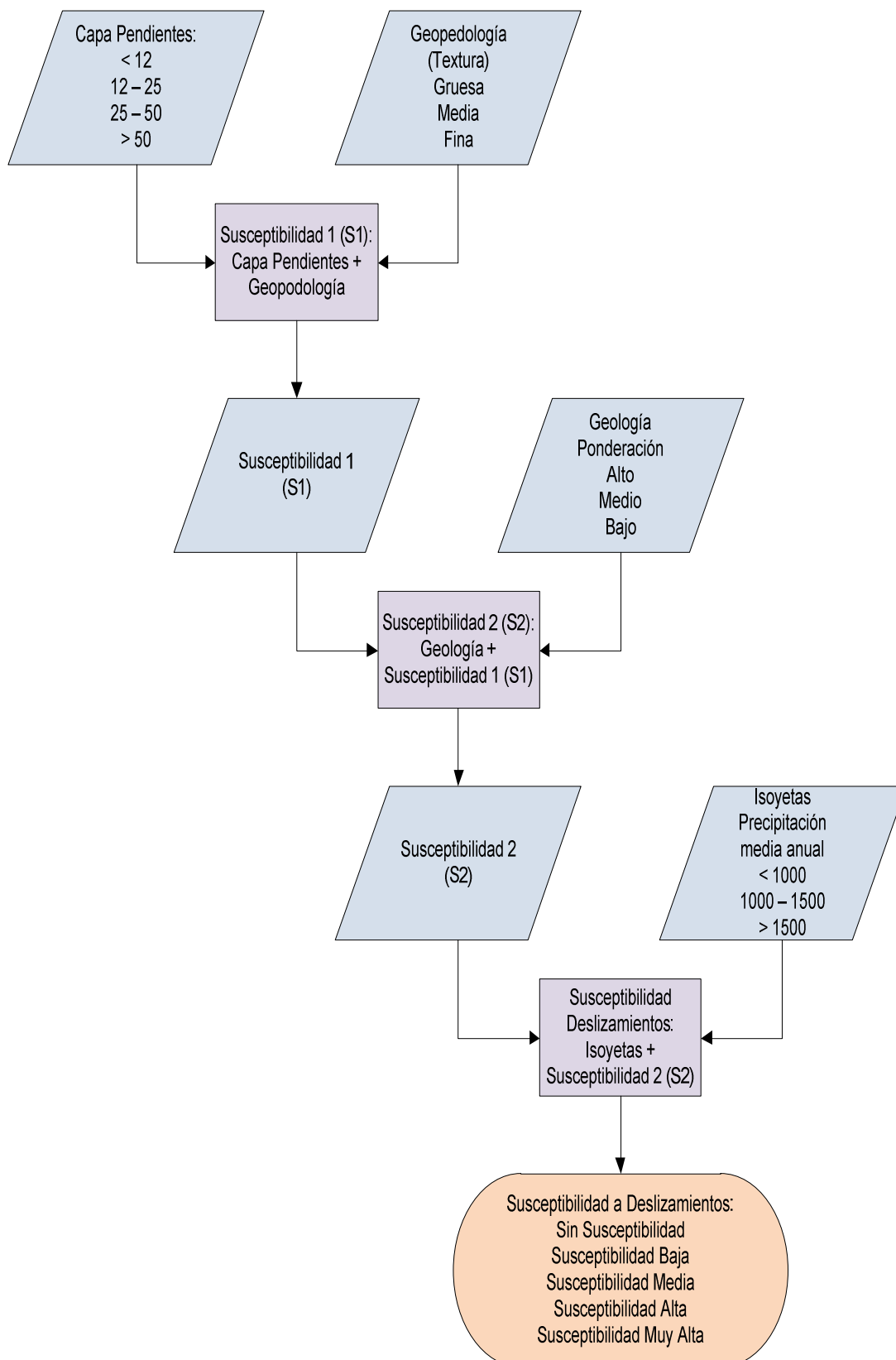


Figura 65 Modelo 7 Susceptibilidad a Deslizamientos - INDECI

3.6 Ajuste de los Modelos Cartográficos

Para realizar el ajuste de los modelos se utilizan los puntos de muestreo de deslizamientos, los que representan que en el lugar donde se encuentran ubicadas existe el 100% de probabilidad de la presencia de deslizamientos; con estos puntos se obtiene el valor calculado en los distintos modelos aplicados y se calcula la desviación estándar, que es un conjunto de datos o una medida de dispersión, que nos indica cuanto pueden alejarse los valores respecto al promedio (media), por lo tanto es útil para buscar la probabilidad de que un evento ocurra. El ajuste realizado se basan en la siguiente fórmula (Andocilla, 2012):

$$N = \text{Valor medido} - \text{Valor calculado}$$

$$N = 1 - Y$$

Dónde:

N = ajuste

Valor medido = 1 o valor de los puntos de muestra

Valor calculado = cálculo de la desviación estándar de los promedios de probabilidades (Y) de los diferentes modelos.

Con este ajuste se puede determinar la efectividad con la que los modelos representan la realidad del área de estudio, ya que compara los puntos donde se tiene la certeza de que existió un deslizamiento con el valor que predicen los diferentes modelos, obteniendo así su grado de acierto para cada uno de ellos.

Se obtuvo las siguientes desviaciones estándar de los modelos aplicados:

Tabla 48 Estadísticas de los modelos

Modelos Predictivos								
	Modelo 1 Fuzzy Original	Modelo 2 Fuzzy 5 percentil	Modelo 3 Fuzzy 10 percentil	Modelo 4 Mora- Vahrson Sismicidad	Modelo 5 Mora- Vahrson Lluvias	Modelo 6 Mora- Vahrson	Modelo 7 INDECI	Modelo 8 INDECI Modificad o
Valor Máx.	0,6791	0,6802	0,6658	-	-	-	-	-
Valor Min	0,2964	0,3073	0,3054	-	-	-	-	-
Promedio	0,4245	0,4272	0,4198	0,6152	0,6353	0,6197	0,7299	0,6631
Desv. Estándar	0,0854	0,0822	0,0791	0,0886	0,0708	0,0846	0,0683	0,2001

El mejor modelo está definido por el menor valor de acuerdo al ajuste realizado:

Tabla 49 Ajuste de los modelos

Modelos Predictivos								
	Modelo 1 Fuzzy Original	Modelo 2 Fuzzy 5 percentil	Modelo 3 Fuzzy 10 percentil	Modelo 4 Mora- Vahrson Sismicidad	Modelo 5 Mora- Vahrson Lluvias	Modelo 6 Mora- Vahrson	Modelo 7 INDECI	Modelo 8 INDECI Modificad o
Ajuste	0,9146	0,9178	0,9209	0,9114	0,9292	0,9154	0,9317	0,7998

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 Análisis de los Modelos Obtenidos

Aplicando los diferentes métodos se obtuvo un total de ocho modelos de probabilidad, con la finalidad de facilitar el análisis los modelos se representaran de forma cualitativa, usando una escala de colores que va del verde al rojo, según la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos (Verde oscuro: muy baja probabilidad, verde claro: baja probabilidad, amarillo: probabilidad moderada, naranja: probabilidad media, rojo claro: alta probabilidad, rojo oscuro: muy alta probabilidad).

Para realizar el análisis de la confiabilidad de los modelos se realizó una salida de campo para definir la realidad de la susceptibilidad del área de estudio a sufrir deslizamientos y poder definir de manera más objetiva qué modelo se ajusta a la realidad de la microcuenca del río Cristal.

4.1.1 Análisis de Susceptibilidad mediante Observación en Campo

Al realizar la visita de campo a la microcuenca del río Cristal para la observación y comprobación de su susceptibilidad a sufrir deslizamientos, se determinó que en la cuenca baja donde se desarrollan las ciudades de Montalvo y Pisagua donde el relieve es de llanura y no pueden existir deslizamientos, la textura del suelo es arcilloso bien consolidado, también se observa que el río Cristal arrastra una gran cantidad de detritos y los

deposita en sus orillas, se considera que en este sector existe una baja probabilidad de que se produzcan deslizamientos.



Figura 66 Microcuenca del río Cristal

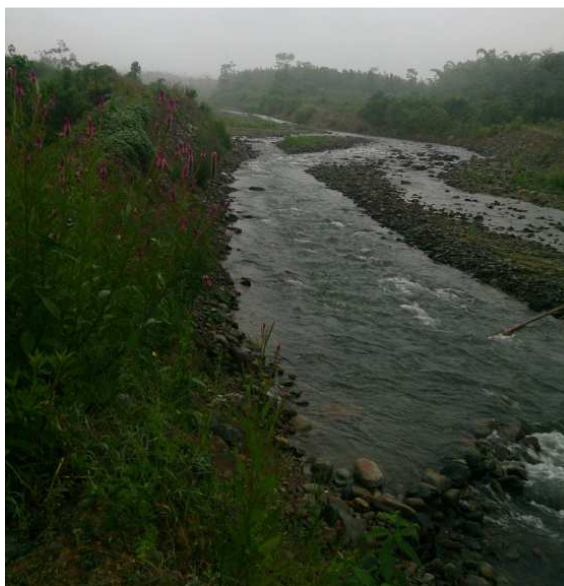


Figura 67 Cauce del río Cristal, Montalvo
Fuente: García, 2014

Continuando hacia la cordillera se encuentra la cuenca media donde se encuentra el poblado de Balsapamba, el paisaje empieza a mostrar la presencia de relieve montañoso, la vegetación existente en el lugar es de bosque nativo, pastizales y misceláneos de cultivos de cacao, plátano, naranja y vegetación nativa, las pendientes son más pronunciadas

superando los 15°. En el norte de la cuenca media la presencia de la vegetación le da una equilibrada estabilidad en las laderas registrándose pocos deslizamientos, por este motivo se estima que la probabilidad a deslizamientos en esta zona es moderada.

En el sur de la cuenca media de igual manera superan los 15° de pendiente, aquí los suelos tienen una mayor variedad siendo estos arcillosos, francos y arenosos; la vegetación que predomina son los pastizales y bosque nativo; de esta manera se estima que la probabilidad es media y alta.



Figura 68 Laderas Cuenca Media, Balsapamba



Figura 69 Deslizamiento Cuenca Media



Figura 70 Cuenca Alta del Río Cristal

Ascendiendo hacia la cordillera occidental está la cuenca alta del río Cristal, en esta se encuentra un aumento de infraestructura vial de primer, segundo y tercer orden; las pendientes son muy fuertes, mayores a 15° y en algunos sectores superan los 35° ; también, aumenta la presencia de quebradas y ríos. La vegetación en la zona corresponde a pastizales, cultivos de maíz, plátano y banano, también matorrales y vegetación herbácea alterada y bosque nativo muy alterado; los suelos están erosionados y sus texturas son medianamente gruesas, las laderas son mucho más inestables y se observan una mayor cantidad de deslizamientos en las quebradas, también se concentran los deslizamientos en las vías, especialmente al sur de la cuenca alta por donde pasa el trazado de la vía Guaranda – Babahoyo. Al norte de la cuenca alta principalmente se observan deslizamientos localizados en las laderas cerca de las vías.

Se estima que la probabilidad en la cuenca Alta del río Cristal, al norte está en el intervalo de moderada y alta, mientras que al sur está entre media y alta.



Figura 71 Deslizamientos vía Guaranda – Babahoyo, Cuenca Alta



Figura 72 Deslizamientos Cuenca Alta

4.1.2 Modelo 1 (Fuzzy Original)

En este modelo se toman los valores originales determinados en el proceso de obtención de datos para normalizarlos y llevarlos a valores que van de 0 a 1, para posteriormente definir las probabilidades de cada variable que se usarán en el modelo.

El mapa de probabilidad de deslizamientos se muestra en la Figura 73 y Figura 74, la información de esta última figura se usará para el análisis de este estudio.

En la cuenca baja desde los caseríos La Ernestina hasta El Limón se encuentra una probabilidad baja de deslizamientos representada en color verde claro, en tonalidad amarillo la probabilidad moderada se ubica muy dispersa en la cuenca media y alta siendo el área más representativa donde se encuentran los caseríos La Variante, Chaupiyacu y Las Peñas. La probabilidad media se nota con más amplitud en varios sectores de la cuenca alta y media representada en tonalidad naranja que abarca al norte del río Cristal el poblado de Balsapamba y los caseríos de Chiriacu, Juana de Oro y Las Juntas; al sur del río Cristal los poblados de Cristal y San Vicente, los caseríos de San Cristóbal, El Salto y Alungoto; también al sur de la cuenca en el sector del caserío El Vergel. En tonalidad rojo se presenta la probabilidad alta y se la localiza al sur de la microcuenca, especialmente en los alrededores de las vías que comunican a los caseríos de Muñapamba, La Florida, La Alegría, Mirador, El Chontal, Matapalo, Como Cruz, Quiebracha, El Tingo, Muña, Los Pogyos, Huilloloma, Guarumal, entre otros. Por último se observa una probabilidad muy alta en el vértice noreste de la microcuenca.

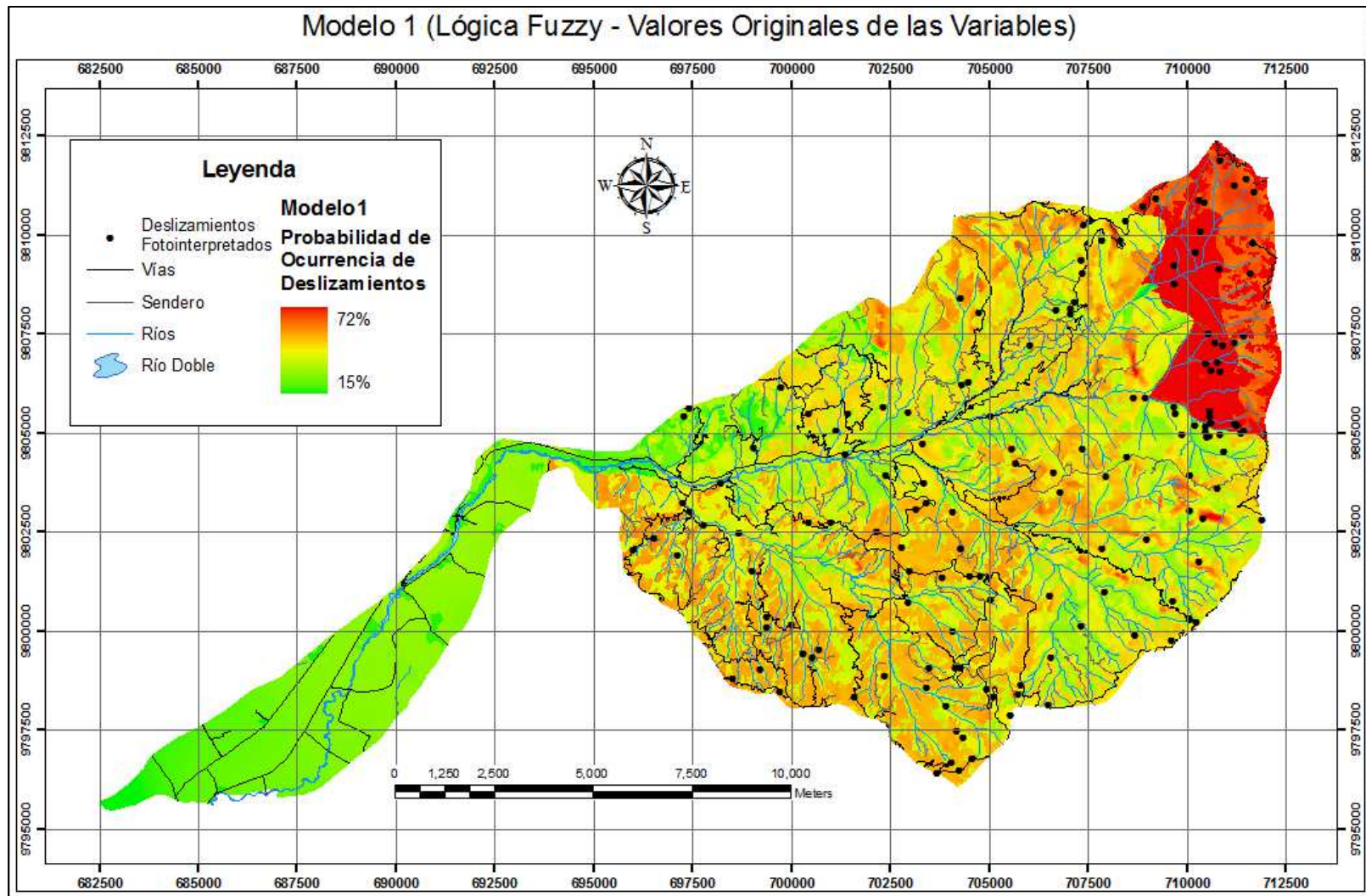


Figura 73 Modelo 1 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cuantitativo)

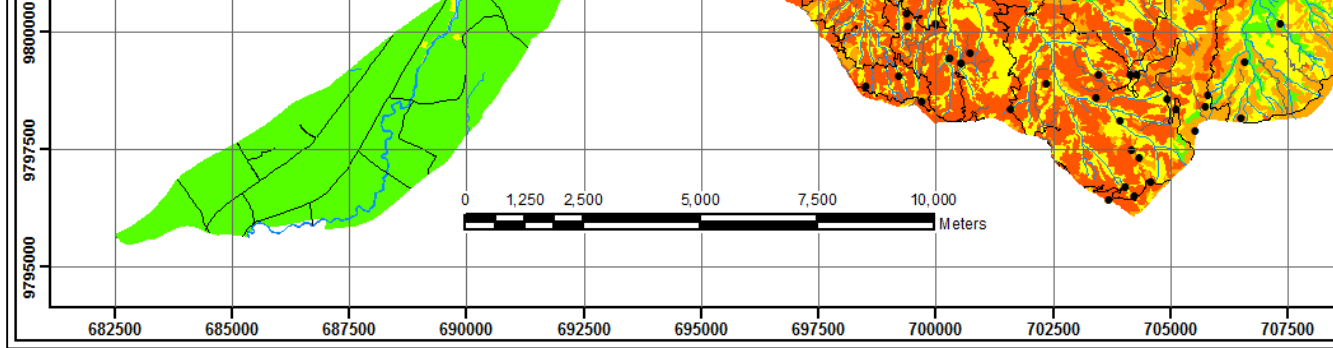


Figura 74 Modelo 1 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cualitativo)

Tabla 50 Valores Estadísticos del Modelo 1

Modelo 1	
Fuzzy Original	
Valor Máx.	0,6791
Valor Min	0,2964
Promedio	0,4245
Desv. Estándar	0,0854
Ajuste	0,9146

Al comparar el modelo 1 con los puntos de muestreo de deslizamientos, se obtuvo los resultados que se muestran en la **Tabla 50**, aquí se observa que el ajuste del modelo es de 0,9146, con una desviación estándar de 0,0854 y la media de 0,4245, lo que nos indica que la homogeneidad de los datos es aceptable; el valor máximo de predicción es de 0,6791 en uno de sus puntos muestreados y su valor mínimo es de 0,2964 en uno de los puntos cayendo en una zona de susceptibilidad media.

Tabla 51 Dispersión de Puntos para el Modelo 1

Modelo 1	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	1	1%
Moderado	31	21%
Medio	49	33%
Alto	41	28%
Muy Alto	27	18%
Total	149	100%

Analizando la frecuencia en la **Tabla 51** con la que los puntos de muestreo de deslizamientos caen en las diferentes clases, se puede ver que para este modelo los puntos de muestreo se agrupan principalmente en tres clases de probabilidades las cuales son: moderado, medio y alto con el 21%,

33% y 28% respectivamente; la probabilidad muy alta agrupa el 18% de los puntos muestreados.

4.1.2.1 Validación entre el Modelo 1 y la Realidad

La cuenca baja se caracteriza por tener un relieve de llanura donde no se pueden producir deslizamientos y su probabilidad es muy baja a que ocurran estos fenómenos, en el modelo se presenta una probabilidad baja acercándose a la realidad.

En la cuenca alta siguiendo el cauce del río Cristal se ubican algunos deslizamientos que se hallan distanciados, determinándose que ese sector tiene una probabilidad moderada, el modelo calcula probabilidad moderada y media.

Al inicio de la cuenca media se registran pocos deslizamientos provocados por la existencia de infraestructura vial mas no por la estabilidad natural del suelo, determinándose una probabilidad que va de baja a moderada, sin embargo, el modelo calcula probabilidad moderada, media y alta.

En el trazado de la vía Babahoyo-Guaranda y en las vías que la conectan con poblados cercanos se registran una gran cantidad de deslizamientos con una probabilidad alta provocados por la presencia de éstas y por suelos erosionados, mientras que el modelo calcula probabilidad moderada, media y alta.

Al este en la cumbre de la microcuenca se registran una cantidad considerable de deslizamientos y a distancia muy corta, lo que permite

deducir que el área es muy inestable, de esta manera se calcula que la probabilidad es alta en este sector, comparando con el modelo este arroja probabilidad media y alta al noreste, y moderada a media al sureste.

En términos generales a excepción de algunos casos particulares, el modelo representa bastante bien la realidad del área de estudio teniendo resultados confiables.

4.1.3 Modelo 2 (Fuzzy 5 percentil)

En el modelo 2 se aplica el 5 percentil en la normalización de las variables definidas en un rango de 0.05 a 0.95, luego se calcula la probabilidad para cada una de ellas y se aplica el algoritmo que dará como resultado el mapa que se presenta en la Figura 75 y **Figura 76**, donde se analiza a esta última por tener valores cualitativos.

En tonalidad verde claro se tiene la probabilidad baja, se encuentra dispersa en algunas áreas de la microcuenca pero principalmente en la cuenca baja desde los caseríos de la Ernestina hasta Las Peñas.

La probabilidad moderada en tonalidad amarilla se encuentra distribuida en pequeñas áreas por toda la cuenca media y alta, teniendo como sector más consolidado entre los caseríos Las peñas, La Saiba y La Variante.

En tonalidad naranja la probabilidad media se extiende por el norte, sur y este de la microcuenca, siendo en el norte el sector donde más consolidado se encuentra en los poblados de Balsapamba, Cristal, San Vicente y los caseríos de Chiriacu, Juana de Oro, Santa Lucía, Tamboloma, Las Juntas, San Cristóbal y El Salto.

La probabilidad alta en tonalidad roja se ubica en pequeños sectores al norte, al sur donde se encuentran los caseríos de Chilcaloma, Angas, Huilloloma, Guarumal y Muña; siguiendo al suroeste Muñapamba, La Florida, La Alegría, Cañotal, El Chontal, Matapalo, Como Cruz, Quiebracha y El Tingo.

Finalmente en tonalidad rojo oscuro se representa la probabilidad muy alta que se encuentra al noreste de la microcuenca.

Tabla 52 Valores Estadísticos del Modelo 2

Modelo 2	
Fuzzy 5 percentil	
Valor Máx	0,6802
Valor Min	0,3073
Promedio	0,4272
Desv. Estándar	0,0822
Ajuste	0,9178

En la **Tabla 52**, se observa los resultados de comparar el modelo 2 con los puntos de muestreo, obteniéndose un valor máximo calculado de 68% y un valor mínimo de 31% de probabilidad, es decir, que los puntos de la muestra se encuentran en zonas donde el modelo predijo una probabilidad de moderada a muy alta.

Se tiene una desviación estándar de 0,0822 respecto a la media de 0,42724, mostrando que los datos de la muestras son muy homogéneos y el valor de ajuste es de 0,9178.

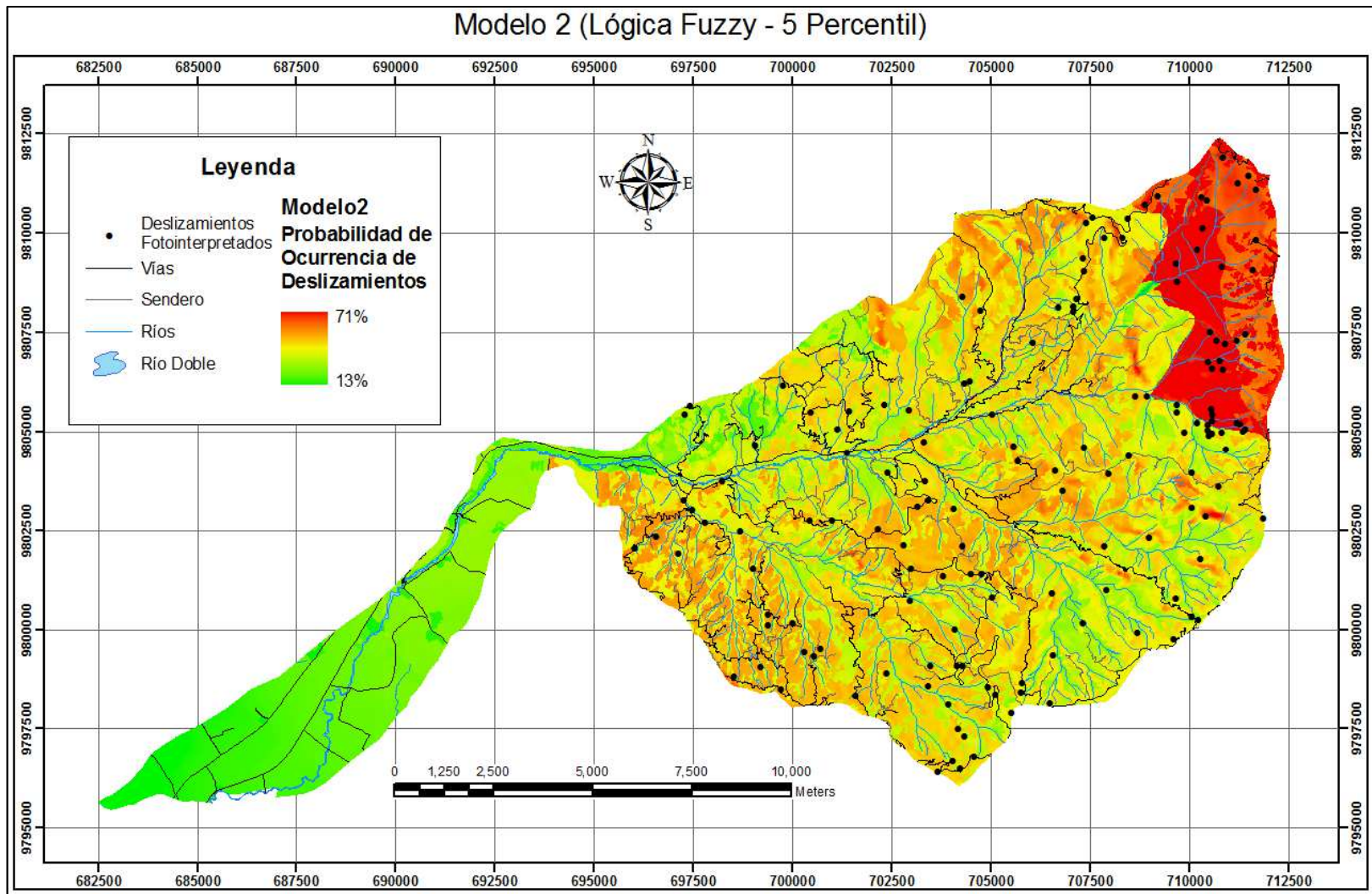


Figura 75 Modelo 2 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cuantitativo)

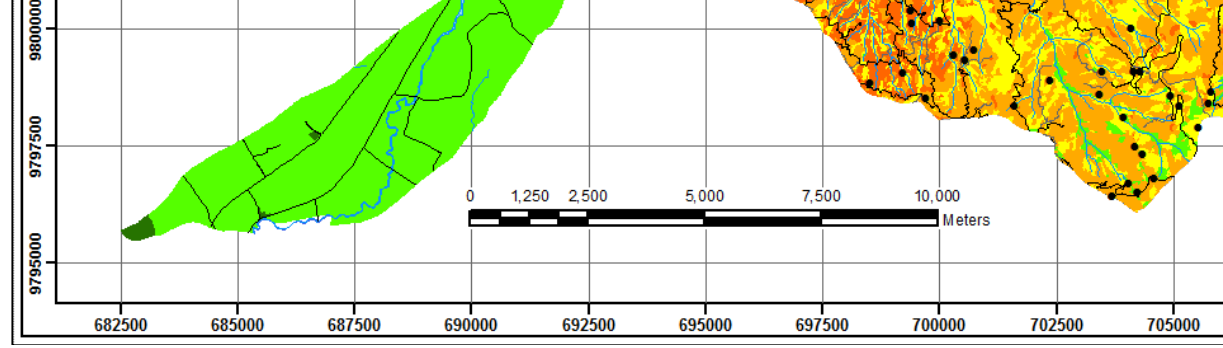


Figura 76 Modelo 2 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cuali

Tabla 53 Dispersión de Puntos para el Modelo 2

Modelo 2	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	4	3%
Moderado	35	23%
Medio	62	42%
Alto	24	16%
Muy Alto	24	16%
Total	149	100%

En la **Tabla 53**, se observa que la mayor cantidad de puntos caen en la probabilidad media con un 42% seguido de una probabilidad moderada con el 23%, las probabilidades alta y muy alta tienen el 16% cada una, un 3% del total de deslizamientos muestreados caen en probabilidad baja.

4.1.3.1 Validación entre el Modelo 2 y la Realidad

El modelo calcula probabilidad baja en el sector de llanura costanera de la microcuenca, cuando por las características del sector la probabilidad debería ser muy baja; en la cuenca media los pocos deslizamientos que se registran y la presencia de vegetación indican que la probabilidad en este sector va de baja a moderada; sin embargo, el modelo calcula probabilidad moderada, media y alta.

Al este de la microcuenca el modelo coincide con la realidad ya que se registran varios deslizamientos muy seguidos indicando que este sector posee una probabilidad alta. En el resto de la microcuenca los deslizamientos están principalmente asociados a la infraestructura vial, la intensidad de lluvias es baja, las pendientes son fuertes por lo que se induce

que la probabilidad va de moderada a alta coincidiendo con las estimaciones del modelo.

El modelo 2 representa de forma aceptable la realidad del terreno obteniéndose resultados confiables.

4.1.4 Modelo 3 (Fuzzy 10 percentil)

En este modelo al normalizar las variables se aplicó el 10 percentil definiéndoles entre los valores de 0,1 a 0,9 para calcular las probabilidades de las variables y aplicar la ecuación que dará como resultado el modelo 3, que se lo puede observar en la Figura 77 y **Figura 78**.

La probabilidad baja representada en tonalidad verde claro se encuentra en el sector de los poblados Montalvo y Pisagua, entre los caseríos La Ernestina, El Limón y Las Peñas que corresponden a la cuenca baja; en amarillo se simboliza la probabilidad moderada dispersa en gran parte de la cuenca alta y media siendo el sector con mayor presencia donde se ubican los caseríos de Las Peñas, Chaupiyacu, La Saiba y La Variante.

La probabilidad media está situada en la mayoría del área con tonalidad naranja, consolidándose al norte de la microcuenca donde están los poblados de Balsapamba, Cristal y San Vicente, en los caseríos Chiriacu, Juana de Oro, Santa Lucía, Tamboloma, Las Juntas, San Cristóbal y El Salto; al sur, en los caseríos de Muña, El Vergel, El Tingo, Quiebracha, Los Pogyos y Guapoloma.

En tonalidad rojo claro está la probabilidad alta que se la encuentra principalmente en pequeñas áreas al norte y este de la microcuenca, y con

mayor presencia al suroeste donde están los caseríos de Muñapamba, La Florida, Cañotal, La Alegría, El Chontal, Matapalo y Como Cruz.

La probabilidad muy alta en tonalidad rojo oscuro, se encuentra al noreste de la microcuenca.

Tabla 54 Valores Estadísticos del Modelo 3

Modelo 3	
Fuzzy 10 percentil	
Valor Máx	0,6658
Valor Min	0,3054
Promedio	0,4198
Desv. Estándar	0,0791
Ajuste	0,9209

En la **Tabla 54** se indican los resultados del modelo 3, en donde se tiene que la desviación estándar es de 0,0791 indicando que la dispersión de datos es muy buena respecto a la media de 0,4198; el valor máximo y mínimo que se predijo con los puntos de muestreo fue del 67% y 31% respectivamente, y el ajuste del modelo es de 0,9209.

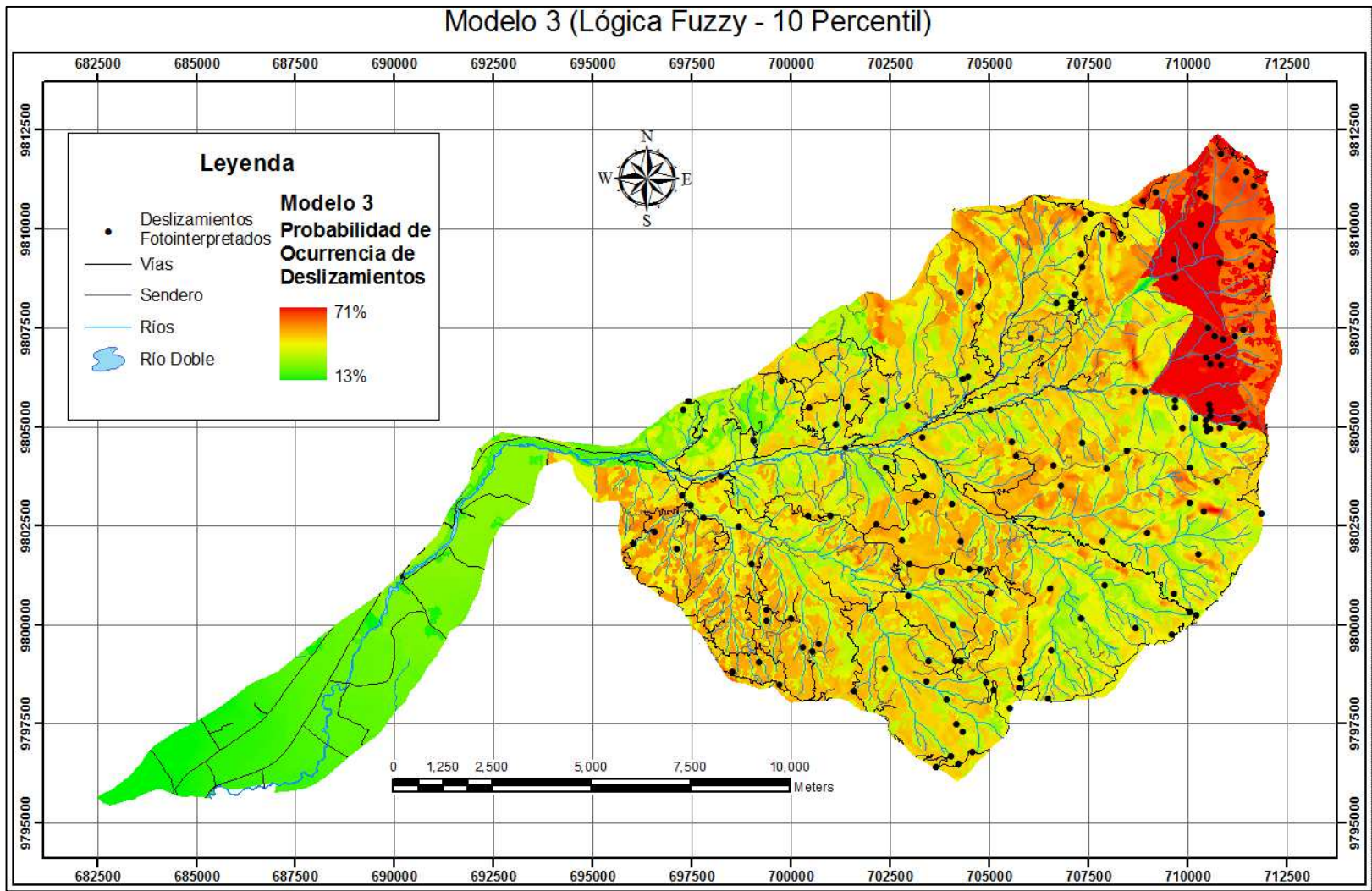


Figura 77 Modelo 3 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cuantitativo)

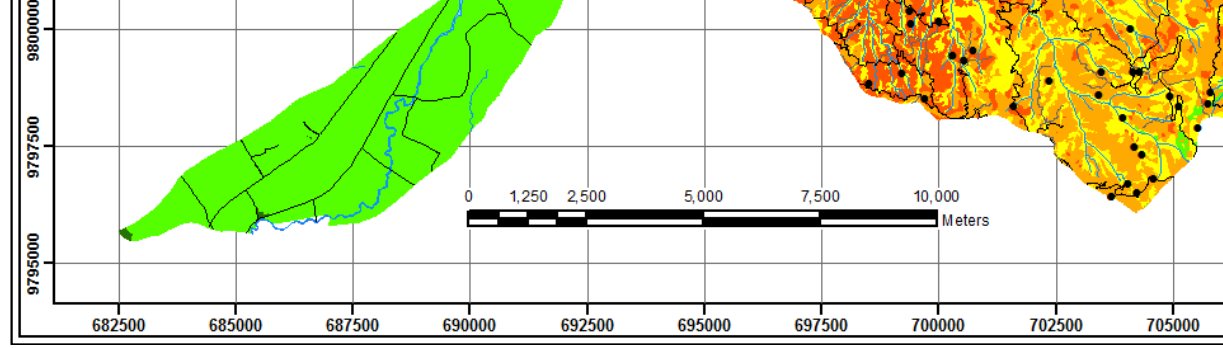


Figura 78 Modelo 3 de Ocurrencia de Deslizamientos (Cualit

Tabla 55 Dispersión de Puntos para el Modelo 3

Modelo 3	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	-	-
Moderado	32	21%
Medio	61	41%
Alto	32	21%
Muy Alto	24	16%
Total	149	100%

En el modelo 3, se observa que los puntos de deslizamientos caen en cuatro tipos de clases como indica la **Tabla 55**, siendo la probabilidad media la que mayor porcentaje de puntos agrupa con el 41%, seguido de las probabilidades moderada y alta cada uno con el 21% de puntos. La probabilidad muy alta posee el 16% del total de deslizamientos muestreados.

4.1.4.1 Validación entre el Modelo 3 y la Realidad

Similar a los modelos anteriores el modelo 3 calcula probabilidad baja a deslizamientos en la llanura cuando en la realidad debería ser muy baja, en la cuenca media las probabilidades que calcula van de moderada a alta, en la realidad debería estar entre moderada y media debido a los pocos deslizamientos que se encuentran en el sector.

Al norte, el modelo calcula en su mayoría probabilidad media acertando con lo que ocurre en el área de estudio donde se registran algunos deslizamientos muy dispersos, de igual manera al este de la microcuenca se hallan varios deslizamientos concentrados en una pequeña área, el modelo calcula probabilidad alta coincidiendo con lo estimado en campo.

Al sur de la microcuenca observamos que la probabilidad alta se encuentra en la vía Babahoyo-Guaranda y en sus vías que comunican a los caseríos cercanos, el resto de área lo calcula con probabilidad moderada y media teniendo bastante congruencia con la realidad del área de estudio.

4.1.5 Modelo 4 (Mora & Vahrson - Sismicidad)

El método de Mora & Vahrson brinda la posibilidad de evaluar el nivel de amenaza en función de cada factor de disparo, en el modelo 4 se analiza la probabilidad en función del factor de sismicidad, al obtener el mapa de probabilidad en la Figura 79 se observa que en la cuenca baja entre los caseríos La Ernestina y El Limón existe una probabilidad baja con tonalidad verde claro.

Con tonalidad amarillo se representa la probabilidad moderada y se la ubica principalmente en toda la franja norte de la microcuenca, donde están los caseríos de Las Peñas, La Saiba, Chaupiyacu, La Variante, Chiriacu, Juana de Oro y Tamboloma, en los poblados Balsapamba, Cristal y San Vicente; al sur este de la cuenca media en el sector de los caseríos La Plancha, Muñapamba, Mirador, Cañotal y Copalillo.

La probabilidad media en tonalidad naranja es la que está presente en la mayor parte del territorio de la microcuenca ocupando el sur, este, sureste y al centro de la cuenca alta; los caseríos que se encuentran involucrados son Las Juntas, Santa Lucía, San Cristóbal, El Salto y Chilcaloma al este; en el centro Alungoto, Angas, Huilloloma, Guarumal, Muña, El Chontal y El Vergel;

al sur Matapalo, Como Cruz, Quiebracha, El Tingo y Los Pogyos; y al sureste Ramos Pamba y Guapoloma.

Existen áreas con probabilidad alta pero son muy pequeñas por lo que no se consideran representativas.

Tabla 56 Valores Estadísticos del Modelo 4

Modelo 4	
Mora-Vahrson Sismicidad	
Promedio	0,6152
Desv. Estándar	0,0886
Ajuste	0,9114

El ajuste obtenido para el modelo 4 es de 0,9114 como lo indica la **Tabla 56**, también se puede analizar que su media es de 0,6152 y la desviación estándar respecto a esta es de 0,0886 indicando que los datos están muy bien agrupados.

Tabla 57 Dispersión de Puntos para el Modelo 4

Modelo 4	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	4	3%
Moderado	39	26%
Medio	105	70%
Alto	1	1%
Muy Alto	-	-
Total	149	100%

En este modelo la mayoría de puntos de deslizamientos están sobre la probabilidad media teniendo el 70% del total, con 26% de los puntos se encuentra la probabilidad moderada, las probabilidades con la menor cantidad de puntos son: baja con el 3% y alta con apenas el 1%.

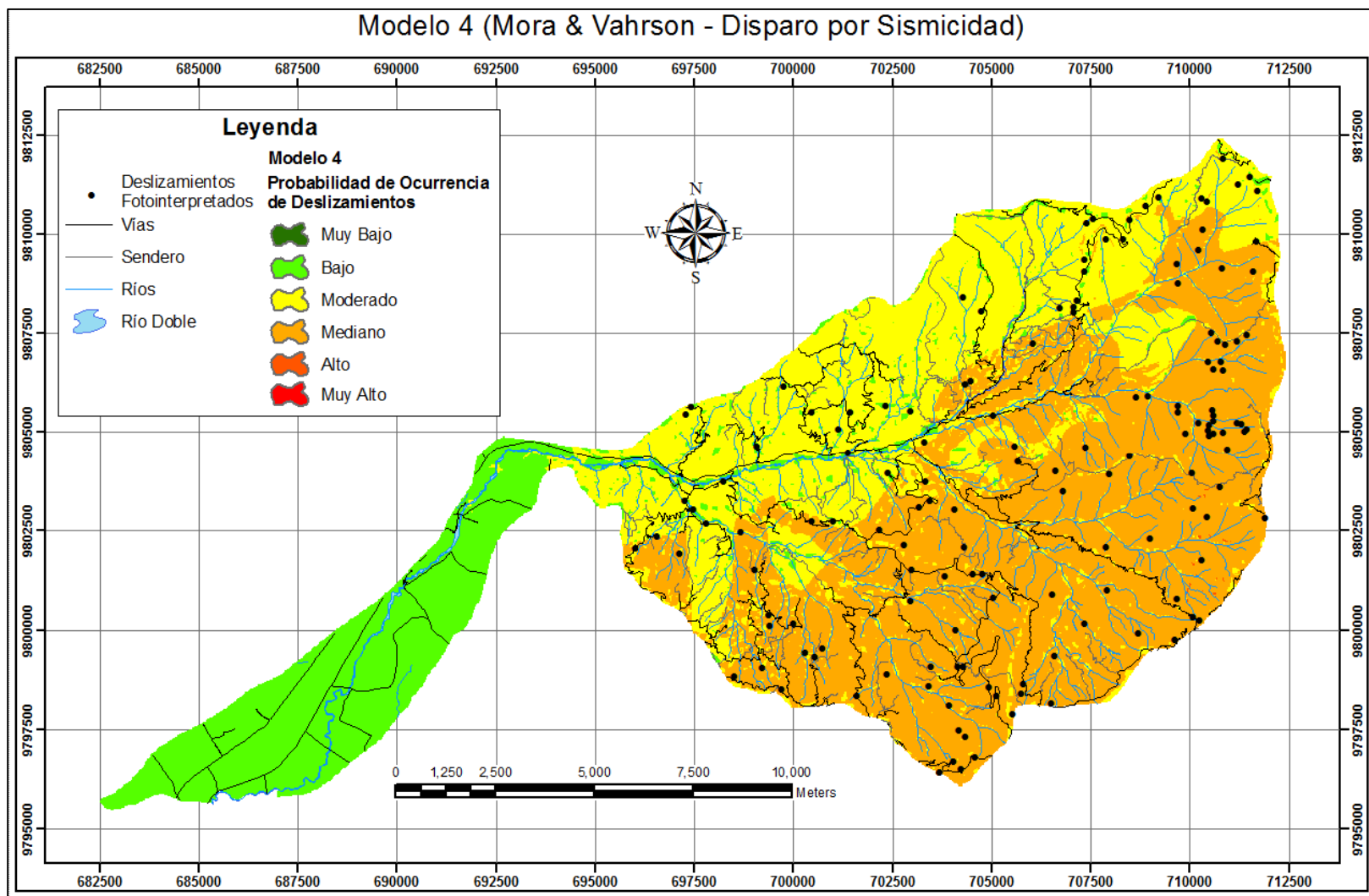


Figura 79 Modelo 4 de Ocurrencia de Deslizamientos

4.1.5.1 Validación entre el Modelo 4 y la Realidad

Este modelo calcula la probabilidad en función de la sismicidad del sector, en la cuenca baja el relieve es de llanura y presenta una probabilidad baja acorde a la realidad con una probabilidad muy baja. Al norte de la microcuenca donde la sismicidad es menor calcula una probabilidad moderada coincidiendo en buena forma con el área de estudio. Finalmente al sur y este el modelo arroja como probabilidad media, lo cual no refleja la realidad ya que al este se encuentran una buena cantidad de deslizamientos que le da a este sector una alta probabilidad; y también en las cercanías de las vías la probabilidad debería ser superior ya que cerca de éstas se encuentran presentes varios deslizamientos.

4.1.6 Modelo 5 (Mora & Vahrson - Lluvias)

En este modelo se analiza la probabilidad en función del parámetro de disparo de intensidad de lluvias, para calcular la influencia de este parámetro se utiliza el método de interpolación de polígonos de Thiessen el cual es uno de los métodos más simples que existen. En la Figura 80 se muestra el mapa de probabilidad que se obtuvo al aplicar el modelo, en verde claro está simbolizado la probabilidad baja y se encuentra en parte de la cuenca baja desde La Ernestina hasta Montalvo; a partir de Montalvo siguiendo el cauce del río Cristal ascendiendo a la cuenca alta, el modelo calcula una probabilidad moderada representada en tonalidad amarillo, ésta también se la encuentra en un pequeño sector al este de la microcuenca. En tonalidad naranja está la probabilidad media, ésta ocupa casi la totalidad de la cuenca alta involucrando a la mayoría de los caseríos que se desarrollan en el área

de estudio. Por último tenemos áreas muy pequeñas en tonalidad rojo que representa probabilidad alta, éstas se encuentran a inicios de la cuenca media y son muy poco representativas para la totalidad de la microcuenca.

Tabla 58 Valores Estadísticos del Modelo 5

Modelo 5 Mora-Vahrson Lluvias	
Promedio	0,6353
Desv. Estándar	0,0708
Ajuste	0,9292

El ajuste obtenido para el modelo 5 es de 0,9292 como lo indica la **Tabla 58**, también se puede analizar que su media es de 0,6353 y la desviación estándar respecto a esta es de 0,0708 indicando que los datos están muy bien agrupados.

Tabla 59 Dispersión de Puntos para el modelo 5

Modelo 5	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	1	1%
Moderado	27	18%
Medio	120	81%
Alto	1	1%
Muy Alto	-	-
Total	149	100%

Para el modelo 5 la mayor cantidad de puntos se encuentran en la probabilidad media con el 81% seguido de la moderada con el 18% como lo indica la **Tabla 59**, también se puede ver que las probabilidades baja y alta son las que menor cantidad de puntos poseen con el 1% cada una.

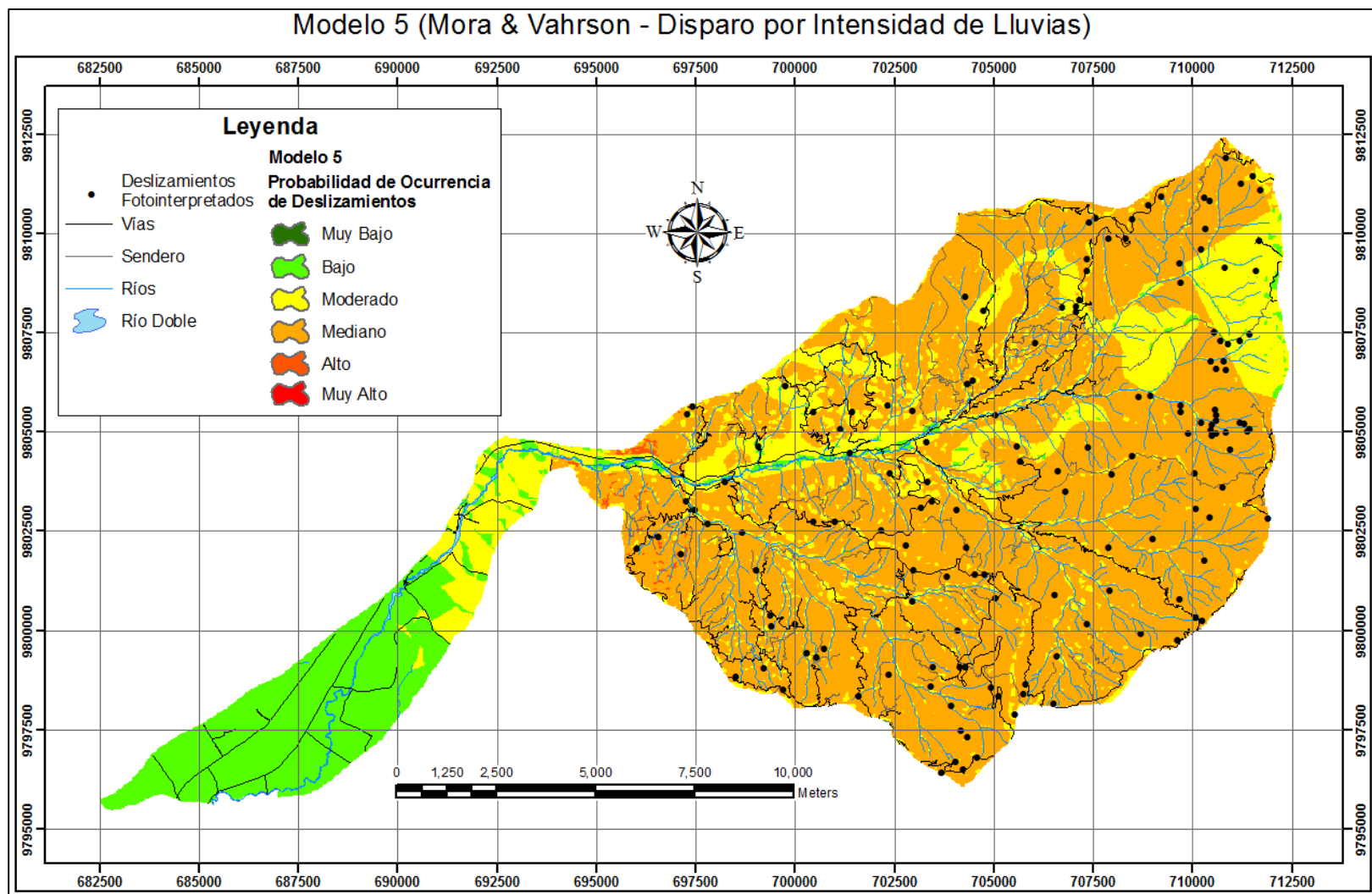


Figura 80 Modelo 5 de Ocurrencia de Deslizamientos

4.1.6.1 Validación entre el Modelo 5 y la Realidad

El modelo calcula las probabilidades en función del factor de disparo de intensidad de lluvias, este tiene una gran incongruencia en la cuenca baja, donde el modelo calcula probabilidades baja y media debido a que en esta zona la intensidad de lluvias es mucho más fuerte que en la cuenca alta, sin embargo, debido a la pendiente plana del sector ésta no influye en deslizamientos ya que no existen laderas que estén expuestas. Al norte del río Cristal la probabilidad es moderada teniendo mucha congruencia con el modelo por la presencia de pocos deslizamientos. El resto del área calcula con probabilidad media cuando hay sectores con un mayor número de deslizamientos, aumento de infraestructura vial, suelos erosionados que suponen que la probabilidad aumente a alta, y en otros casos donde los suelos son más estables ésta disminuya a moderada o baja.

4.1.7 Modelo 6 (Mora & Vahrson)

Este modelo solo realiza de acuerdo a la metodología original de Mora & Vahrson donde se consideran los dos factores de disparo (Sismicidad e Intensidad de Lluvias) en la obtención del mapa de probabilidad a deslizamientos. Los resultados de la determinación de la probabilidad se encuentran representados en la Figura 81.

En la cuenca baja se ubica la probabilidad baja y moderada, representada en tonalidad verde claro y amarillo respectivamente. La probabilidad moderada también se la encuentra al norte de la microcuenca, a lo largo del cauce del río Cristal y en parte del sector suroeste donde se

hallan los poblados de Balsapamba, Cristal, San Vicente y los caseríos de Las Peñas, La Saiba, Chaupiyacu, La Variante, Chiriacu, Juana de Oro, Tamboloma, La Plancha, Mirador, Cañotal y Copalillo. El resto del territorio de la microcuenca se encuentra de tonalidad naranja, esto indica que la probabilidad a deslizamientos es media, principalmente se encuentra al sur, este y oeste de la cuenca alta; los caseríos afectados son Las Juntas, Santa Lucía, San Cristóbal, El Salto y Chilcaloma al este; en el centro Alungoto, Angas, Huilloloma, Guarumal, Muña, El Chontal y El Vergel; al sur Matapalo, Como Cruz, Quiebracha, El Tingo y Los Pogyos; al oeste Muñapamba y La Florida; y al sureste Ramos Pamba y Guapoloma.

Por último la probabilidad alta se encuentra en sectores de muy poca área que no son representativos para el análisis.

Tabla 60 Valores Estadísticos del Modelo 6

Modelo 6	
Mora-Vahrson	
Promedio	0,6197
Desv. Estándar	0,0846
Ajuste	0,9154

En la **Tabla 60** se muestran los resultados del cruce de los puntos de muestreo con el modelo, donde el ajuste obtenido fue de 0,9154 con una desviación estándar de 0,0846 respecto a la media de 0,6197.

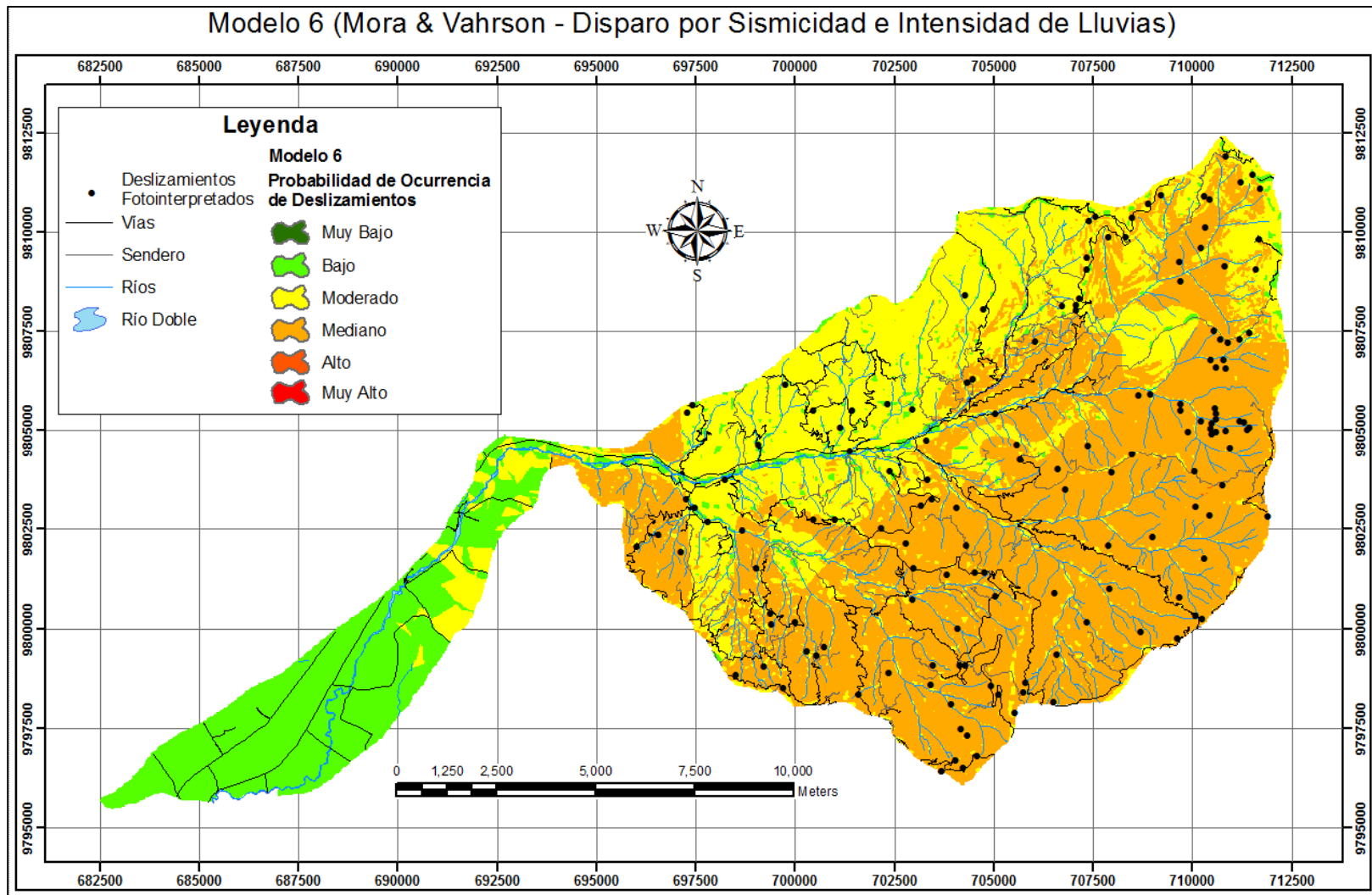


Figura 81 Modelo 6 de Ocurrencia de Deslizamientos

Tabla 61 Dispersión de Puntos para el Modelo 6

Modelo 6	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	-	-
Bajo	3	2%
Moderado	37	25%
Medio	108	72%
Alto	1	1%
Muy Alto	-	-
Total	149	100%

La frecuencia con la que caen los puntos de muestreo en cada clase se indica en la **Tabla 61** donde se observa que la probabilidad que mayor cantidad de puntos representa es la Media con el 72% seguido de la moderada con 25%, las probabilidades que menor cantidad de puntos coincidentes tienen son la baja y alta con el 2% y 1% respectivamente.

4.1.7.1 Validación entre el Modelo 6 y la Realidad

Este modelo calcula la probabilidad en función de los factores de disparo de sismicidad e intensidad de lluvias, éste presenta desaciertos en la cuenca baja ya que en este sector la probabilidad debe ser muy baja mientras que el modelo calcula baja y moderada. Ascendiendo a la cuenca alta al norte y al noreste de la microcuenca también se calcula probabilidad media, tiene mucho acierto pero sin embargo esta puede aumentar o disminuir en algunos sectores por sus características específicas. Al sur, al este y oeste el modelo predice probabilidad media, en la realidad esta fluctúa entre probabilidades que van de baja a alta, dependiendo de las características de algunos sectores donde existen varios deslizamientos y otros donde no se

registran muchos, también de las vías cercanas, presencia de vegetación o suelos erosionados.

El modelo no es confiable debido a que los resultados que se obtienen son muy generales y no representan del todo la realidad del área de estudio.

4.1.8 Modelo 7 (INDECI)

El modelo desarrollado por INDECI-Perú se basa en una metodología muy simple en donde se reclasifican los atributos de las variables a intervenir en valores de bajo, medio y alto; posteriormente se realiza la intersección entre dos de las variables obteniendo una matriz de ponderación en la que se les vuelve a reasignar en valores de bajo, medio y alto, el resultado se lo vuelve a intersecar con otra variable repitiendo este proceso sucesivamente hasta obtener el mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos que se obtuvo se lo muestra en la Figura 82 donde principalmente las probabilidades calculadas son medias y altas. La probabilidad media a deslizamientos se la encuentra principalmente en la cuenca baja desde La Ernestina hasta Las Peñas, y en algunos sectores de la cuenca alta en el sector de los caseríos de Chiriacu, Cristal, San Vicente y San Cristóbal, La probabilidad alta a deslizamientos ocupa la mayoría del área de la cuenca alta. Las probabilidades bajas y muy altas se encuentran en áreas muy pequeñas que no son representativas.

Tabla 62 Valores Estadísticos del Modelo 7

	Modelo 7 INDECI
Promedio	0,7299
Desv. Estándar	0,0683
Ajuste	0,9317

Analizando la Tabla 62, según el ajuste obtenido con este modelo es muy bueno con un valor de 0,9317 y una desviación estándar de 0,0683 que nos indica que la distribución de datos es bastante homogénea respecto al valor de la media 0,7299.

Tabla 63 Dispersión de Puntos para el Modelo 7

Modelo 7	# de Puntos	Porcentaje
Bajo	-	-
Medio	7	5%
Alto	142	95%
Muy Alto	-	-
Total	149	100%

En este modelo se aprecian una menor cantidad de clases y la probabilidad alta es la que posee la gran mayoría de coincidencia con los puntos de deslizamientos con el 95% como se puede observar en la **Tabla 63**, la probabilidad posee el 5% y el resto de clases no poseen ninguna coincidencia con los puntos muestreados.

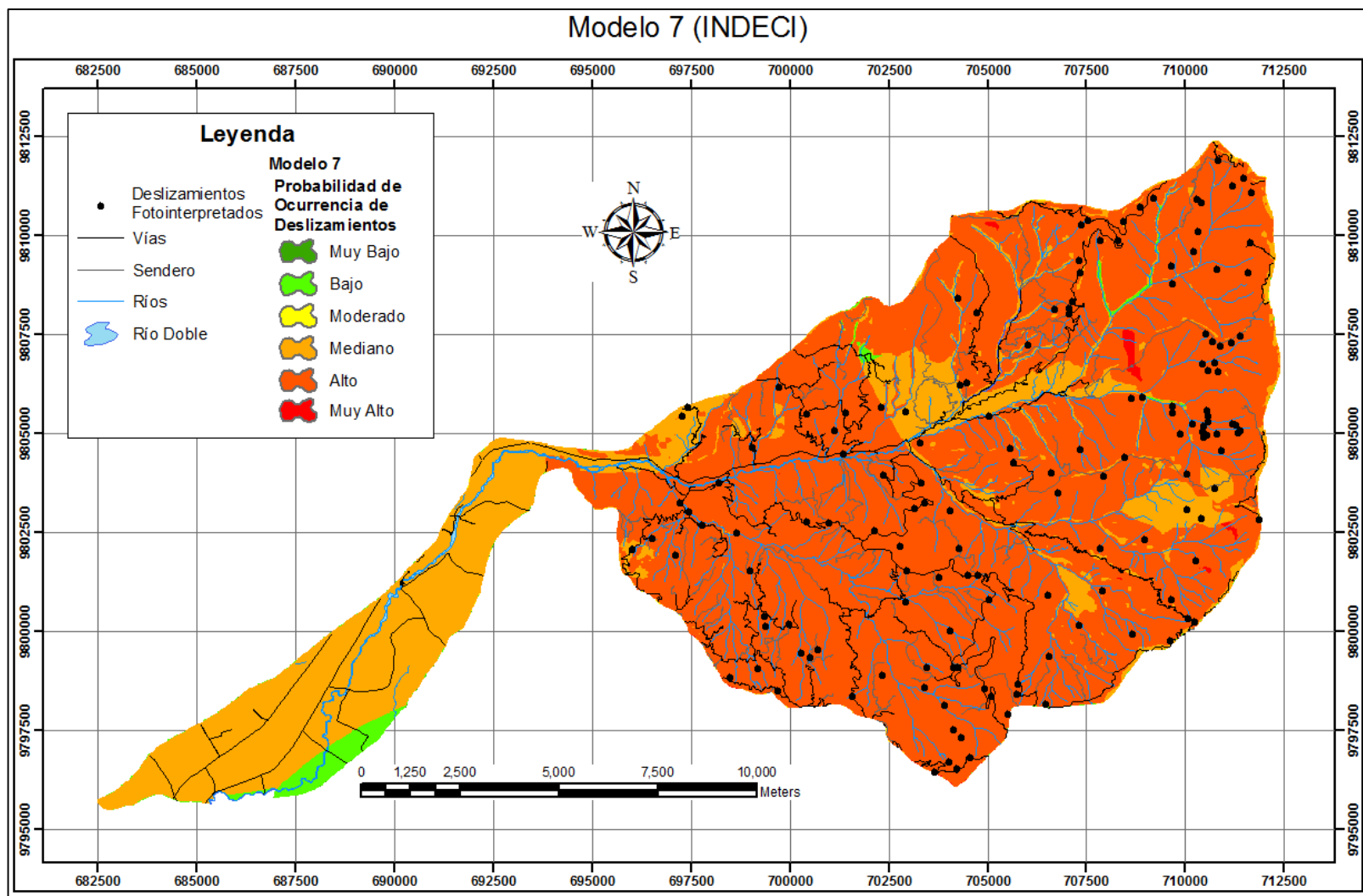


Figura 82 Modelo 7 de Ocurrencia de Deslizamientos

4.1.8.1 Validación entre el Modelo 7 y la Realidad

Este modelo es el que menor confiabilidad representa para el estudio, las probabilidades calculadas son muy equivocadas principalmente en la cuenca baja donde tiene un valor de media estando muy lejos de la realidad ya que en un relieve plano la probabilidad de que existan deslizamientos es muy baja, además en el resto del área de estudio calcula una probabilidad alta, cuando en toda la extensión de la microcuenca existen varios factores que disminuyen o aumentan la probabilidad.

4.1.9 Modelo 8 (INDECI - Modificado)

Este modelo se basa en la metodología original propuesta por el Instituto de Defensa Civil de Perú al cual se le modifico con el objetivo de obtener resultados con mayor nivel de detalle. En la **Figura 83** se observa los resultados obtenidos al aplicar el modelo donde se puede apreciar una gran dispersión de las probabilidades, en tonalidad verde oscuro se simboliza la probabilidad muy baja y esta se halla en los límites noreste de la microcuenca.

La probabilidad baja esta simbolizada con tonalidad verde claro y se encuentra en la cuenca baja donde se encuentran los poblados de Montalvo, Pisagua y los caseríos de La Ernestina y El Limón, también se halla en el centro norte de la cuenca en el sector de los poblados Balsapamba, Cristal, San Vicente y los caseríos La Variante, Chiriacu, Las Juntas, San Cristóbal, El Salto y Alungoto. En amarillo se representa la probabilidad media y esta se ubica en la cuenca media donde están los caseríos de La Saiba, Las

Peñas, Chaupiyacu, La Plancha, Muñapamba, Mirador, La Florida, Cañotal y El Vergel, también se encuentra en zonas al noreste en los sectores de los caseríos Santa Lucía, Tamboloma y al este de la microcuenca.

La probabilidad alta esta simbolizada con tonalidad naranja y se ubica en pequeñas zonas al este y norte de la cuenca, más consolidado está al suroeste en el sector donde se ubican los caseríos de Copalillo, El Chontal, Matapalo, Quiebracha, Muña y los Pogyos. Por último en tonalidad roja está la probabilidad muy alta que se encuentra principalmente al centro y sur de la cuenca alta los caseríos afectados son Chilcaloma, Angas, Huilloloma y El Tingo.

Tabla 64 Valores Estadísticos del Modelo 8

Modelo 8 INDECI Modificado	
Promedio	0,6631
Desv. Estándar	0,2001
Ajuste	0,7998

En la **Tabla 64**, se muestra el valor que se obtuvo de la desviación estándar el cual es muy alto con un valor de 0,2001 lo que significa que los valores están muy dispersos respecto a la media de 0,6631. El ajuste obtenido es de 0,7998 que no es muy bueno y se concluye que el modelo no es confiable.

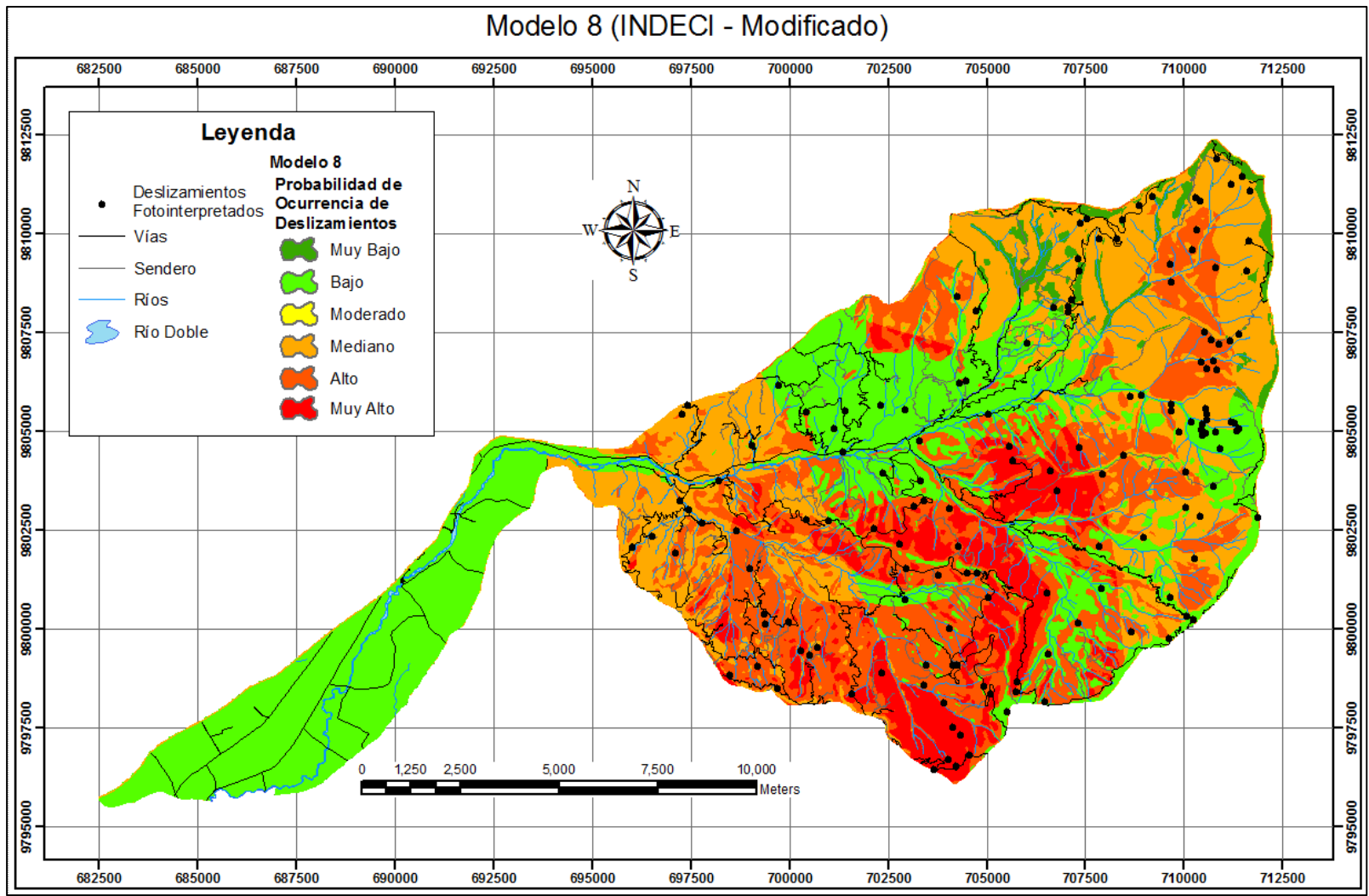


Figura 83 Modelo 8 de Ocurrencia de Deslizamientos

Tabla 65 Dispersión de Puntos para el Modelo 8

Modelo 8	# de Puntos	Porcentaje
Muy Bajo	3	2%
Bajo	31	21%
Medio	49	33%
Alto	48	32%
Muy Alto	18	12%
Total	149	100%

Analizando la dispersión de los puntos muestreados en las diferentes clases que se muestra en la **Tabla 65**, se observa que la mayoría de los puntos están en probabilidad media y alta con el 33% y 32% respectivamente, la probabilidad baja tiene un buen porcentaje de puntos 21%, lo contrario sucede con la probabilidad muy alta en la que se registra el 12% del total de puntos muestreados.

4.1.9.1 Validación entre el Modelo 8 y la Realidad

Al modificar el modelo INDECI se tiene una idea más clara de los resultados que se obtienen al aplicarlo, ya que al darle más clases se alcanza mayor detalle de los resultados que al analizarlos se puede deducir que el modelo no es confiable por varias inconsistencias, entre las que se puede destacar que en el norte de la microcuenca dónde se registran varios deslizamientos y el modelo predice probabilidad baja cuando esta zona tiene probabilidad media, de igual manera al este se hallan varios deslizamientos juntos lo que implica que es un área inestable y posee una alta probabilidad a presentar deslizamientos y el modelo calcula probabilidad baja.

Otra inconsistencia importante se encuentra en el centro sur de la cuenca alta, el modelo calcula probabilidades altas a pesar de que en esta zona se registran deslizamientos distanciados y algunos aislados lo que supone que la probabilidad del sector debería ser media.

4.2 Análisis de los Resultados de las Metodologías Aplicadas

Para determinar qué modelo tiene la mejor representación de la realidad, se realizó los análisis comparativos de los resultados en zonas específicas, de las características propias de cada sector, indicadores morfodinámicos y su probabilidad estimada comparada con la probabilidad calculada en cada modelo.

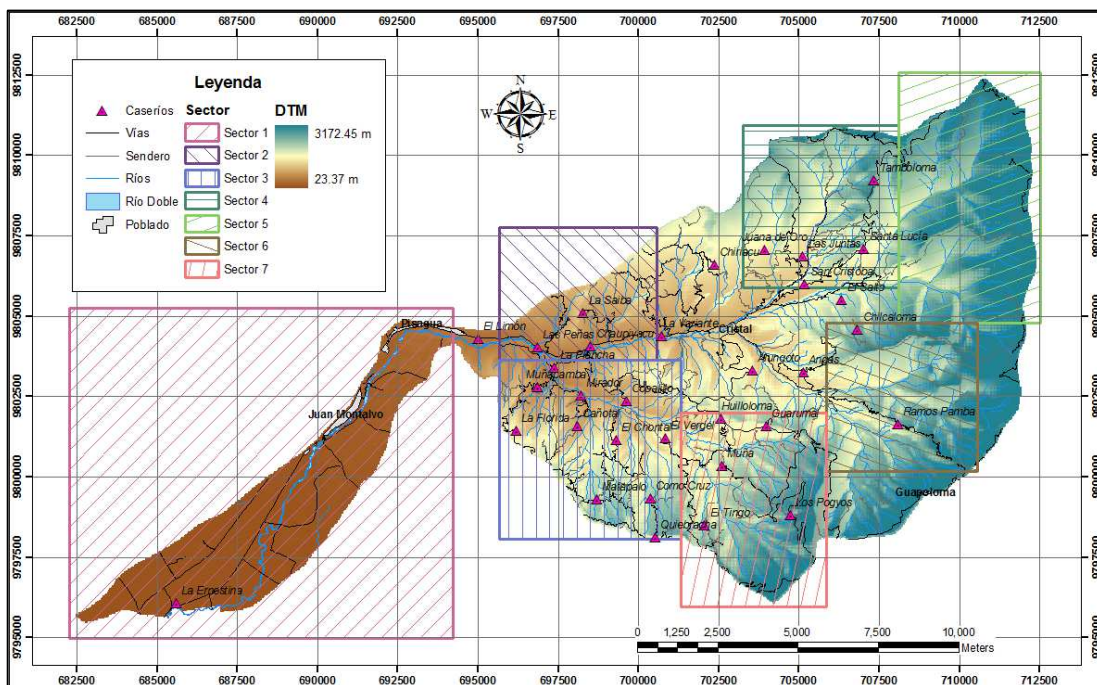


Figura 84 Sectores a Analizar de la microcuenca del río Cristal

En la **Figura 84** están los sectores que se van a analizar en la comparación de los resultados de los modelos, estos sectores fueron elegidos de acuerdo a la similitud y diferencias de los resultados de los modelos obtenidos con cada metodología. A continuación se da una breve descripción de la ubicación de cada sector.

Sector 1: Cuenca Baja

Sector 2: Norte de la Cuenca Media

Sector 3: Sur de la Cuenca Media

Sector 4: Norte de la Cuenca Alta

Sector 5: Noreste de la Cuenca Alta

Sector 6: Sureste de la Cuenca Alta

Sector 7: Sur de la Cuenca Alta

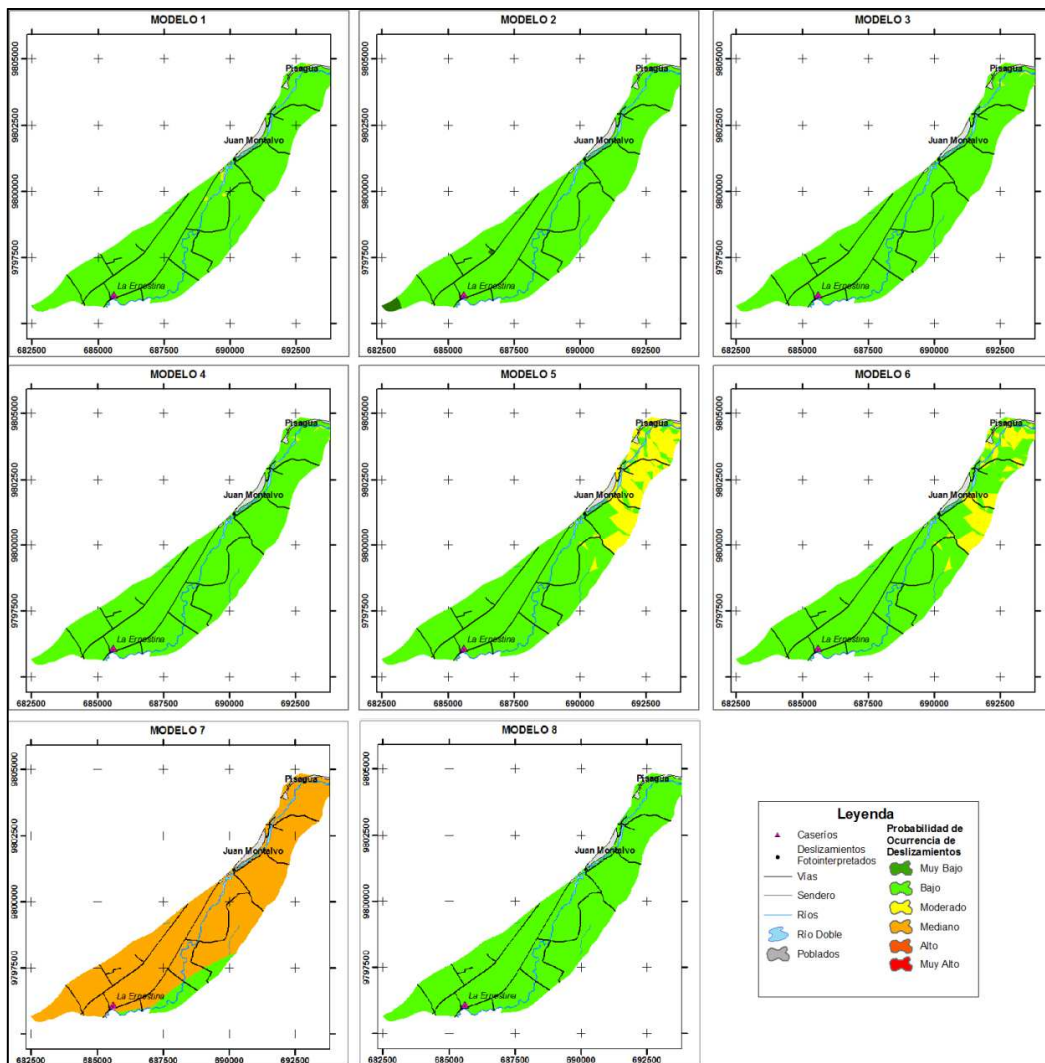


Figura 85 Análisis de Resultados Sector 1

La cuenca baja del río Cristal se caracteriza por ser un área con pendientes bajas y suelos muy consolidados, dónde se considera que la probabilidad de que ocurran deslizamientos es baja.

En la **Figura 85** se muestran los resultados de la probabilidad calculada por los diferentes modelos, donde, los modelos 1, 2 y 3 de lógica Fuzzy, el modelo 4 de Mora & Vahrson y el modelo 8 de INDECi coinciden al calcular una probabilidad baja por las características de ser un terreno plano y la dureza de la roca y la buena compactación de los suelos.

Los modelos 5 y 6 de Mora & Vahrson calculan al sureste probabilidad baja y al noroeste moderada debido principalmente a la incorporación del factor de intensidad de lluvias que tiene valores altos en la transición entre cuenca baja y media.

El modelo 7 de INDECI calcula probabilidad media por los valores altos de precipitación media anual.

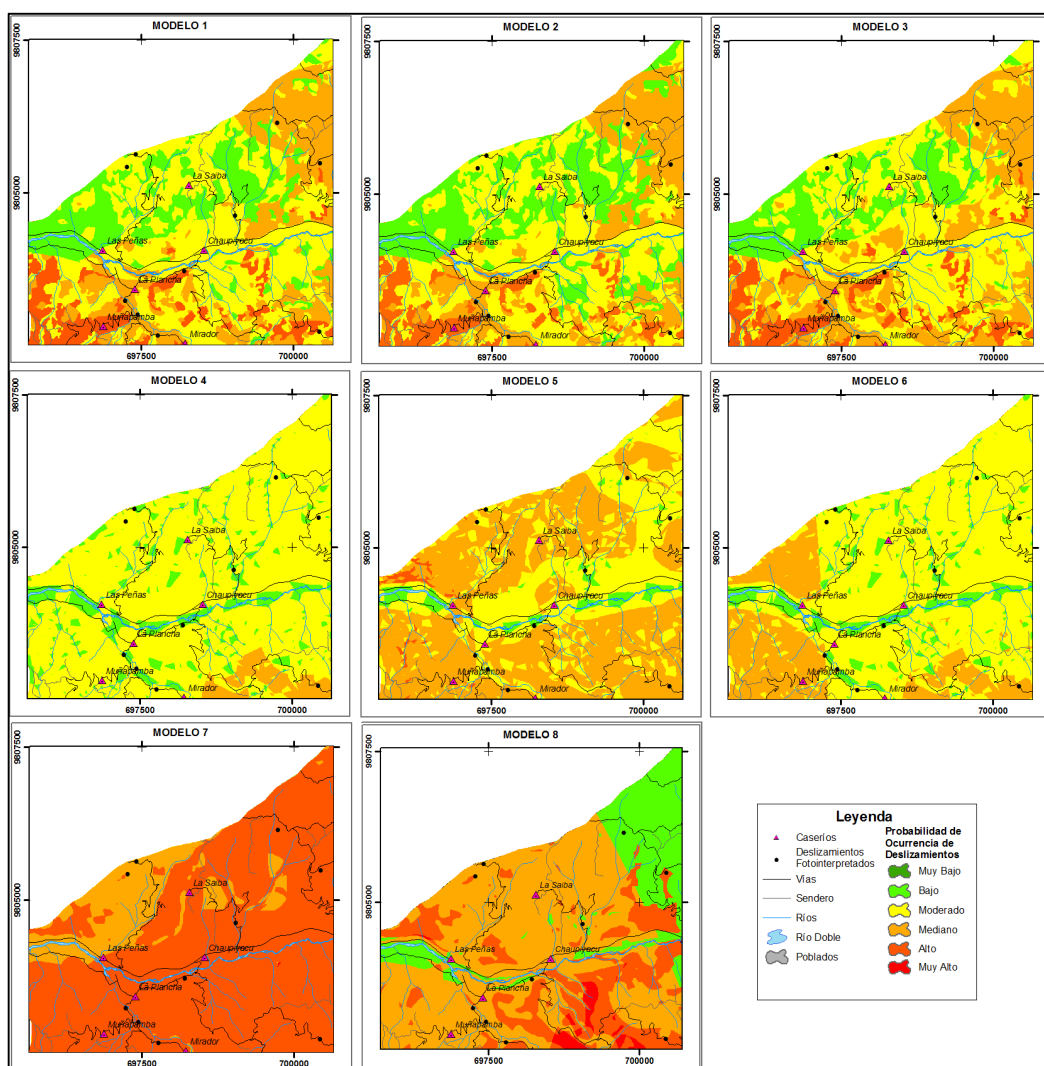


Figura 86 Análisis de Resultados Sector 2

En la cuenca media en el sector del caserío La Saiba se caracteriza por ser una zona con una buena cohesión en sus suelos arcillosos, existe la

presencia bosques húmedos, pastizales y cultivos, además, se registran muy pocos deslizamientos; sin embargo, también tiene pendientes fuertes superiores al 30%, por estos motivos se considera que la probabilidad en este sector es moderada.

Los modelos 1, 2 y 3 de lógica Fuzzy coinciden con lo estimado calculando probabilidades moderadas y bajas, debido a la poca presencia infraestructura vial en el sector, la dureza de la roca, buena compactación del suelo y considerable concentración de bosque nativo.

Los modelos 4 y 6 de Mora & Vahrson también coinciden debido a la baja intensidad sísmica.

El modelo 5 de Mora & Vahrson y el 8 de INDECI calculan probabilidad media, y el 7 de INDECI media y alta debido a los valores altos de pendientes y el aumento humedad de suelo, intensidad de lluvias y precipitación media anual.

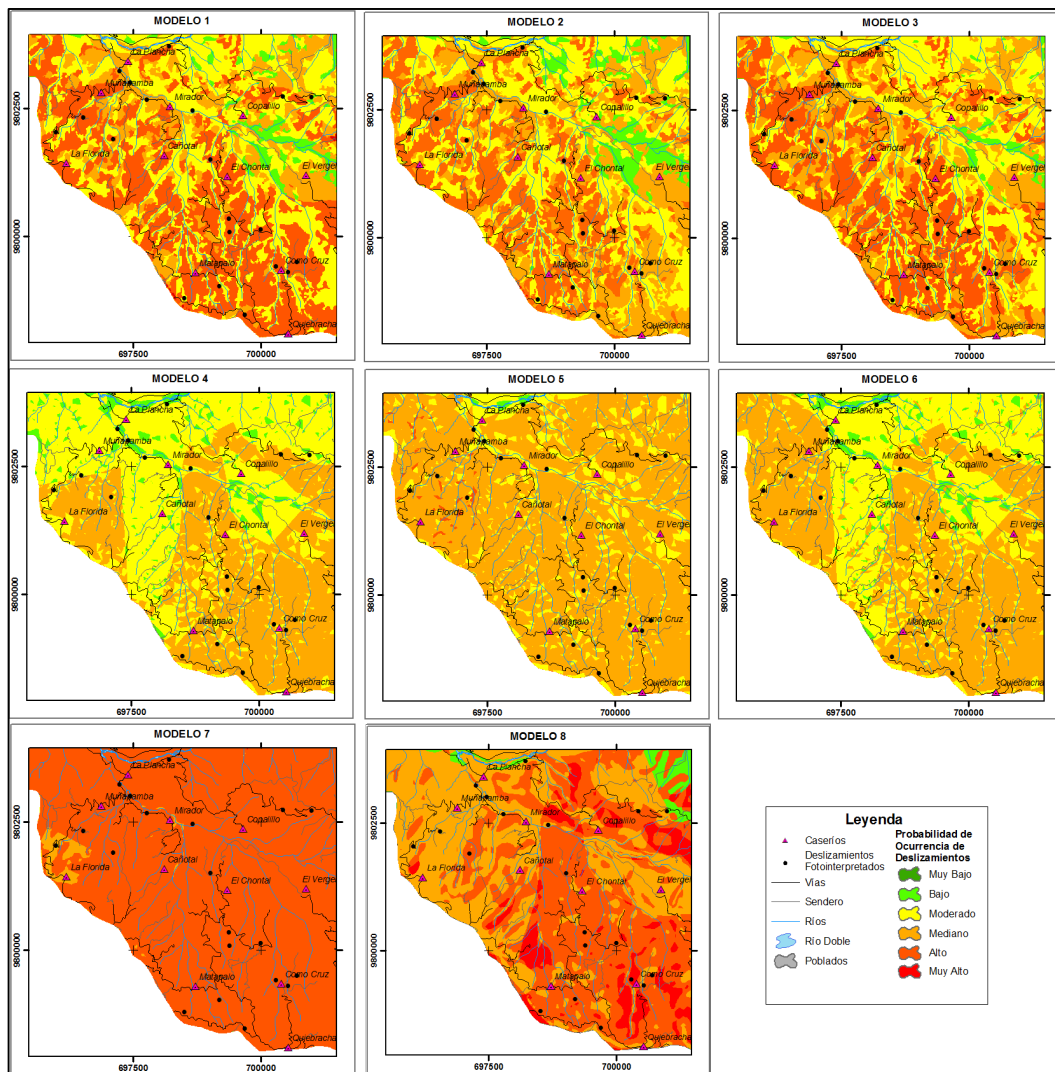


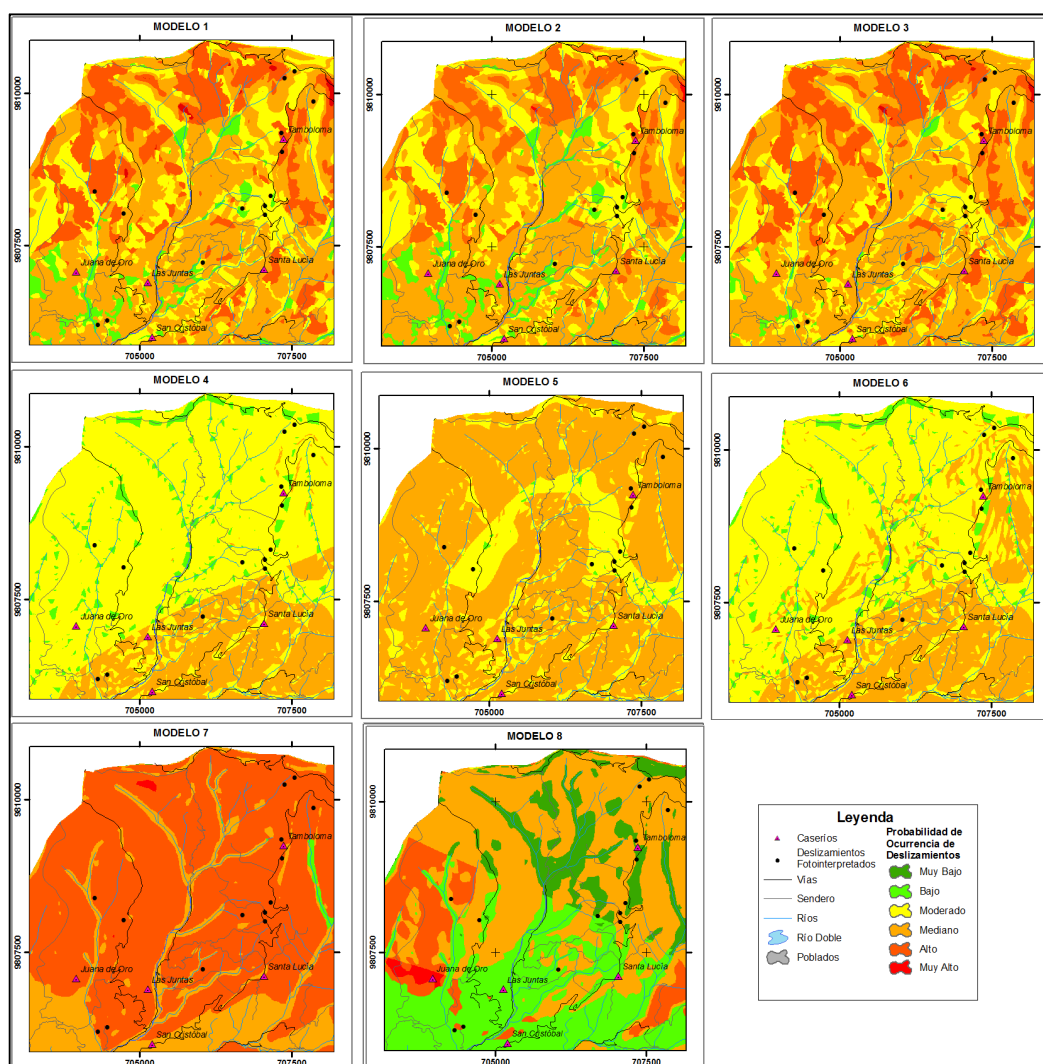
Figura 87 Análisis de Resultados Sector 3

El sur de la cuenca media se caracteriza por tener pendientes superiores al 30%, los suelos son arcillosos, francos y arenosos con una compactación moderada, y la vegetación que predomina son los pastizales y bosque húmedo alterado; por estas circunstancias se estima que la probabilidad que presenta este sector es media y alta.

Los modelos 1, 2 y 3 de lógica Fuzzy calculan probabilidad moderada y media en las áreas con bosque y alta dónde se encuentran pastizales, adicionalmente por el aumento de la concentración de vías y quebradas en una zona con pendientes mayores a 15°.

En Mora & Vahrson, los modelos 4 y 6 calculan probabilidad moderada y media, y el 5 calcula media todo el sector, estos valores calculados se ven afectados por las bajas intensidades en los factores de disparo que considera.

En los modelos INDECI el 7 calcula toda el área alta y el 8 media y alta, estos valores se obtienen principalmente a la alta precipitación media anual que poseen los sectores de la cuenca media y baja.



El norte de la cuenca alta en el sector de los caseríos Tamboloma, Santa Lucía, Las Juntas y Juana de Oro predominan las pendientes fuertes superiores a 30%, presenta rocas intrusivas y volcánicas con suelos francos y arenosos; prevalecen los pastizales con áreas de bosque húmedo y matorrales. La mayoría de deslizamientos están asociados a inestabilidades provocadas por las vías, así se presume que la probabilidad en el sector es moderada y media.

Los modelos de lógica Fuzzy calculan principalmente probabilidades media y alta por la consideración de vías, quebradas y ríos, valores superiores al 30% en pendientes y la sustitución de la vegetación nativa por pastizales para ganadería.

Mora & Vahrson en los modelos 4 y 6 calculan moderada y en el 5 media, estos coinciden debido a la baja intensidad de lluvias y sísmica en la cuenca alta, sin embargo, no considera el factor antrópico como lo son la presencia de vías, que para esta sector la mayoría de deslizamientos están relacionadas con este factor.

INDECI calcula en el modelo 7 alta, este valor se dispara por las fuertes pendientes y una textura gruesa de los suelos que considera son muy susceptibles a deslizamientos; y en el 8 calcula media y baja, porque la litología del sector la considera de escasa susceptibilidad y también por la poca precipitación media anual.

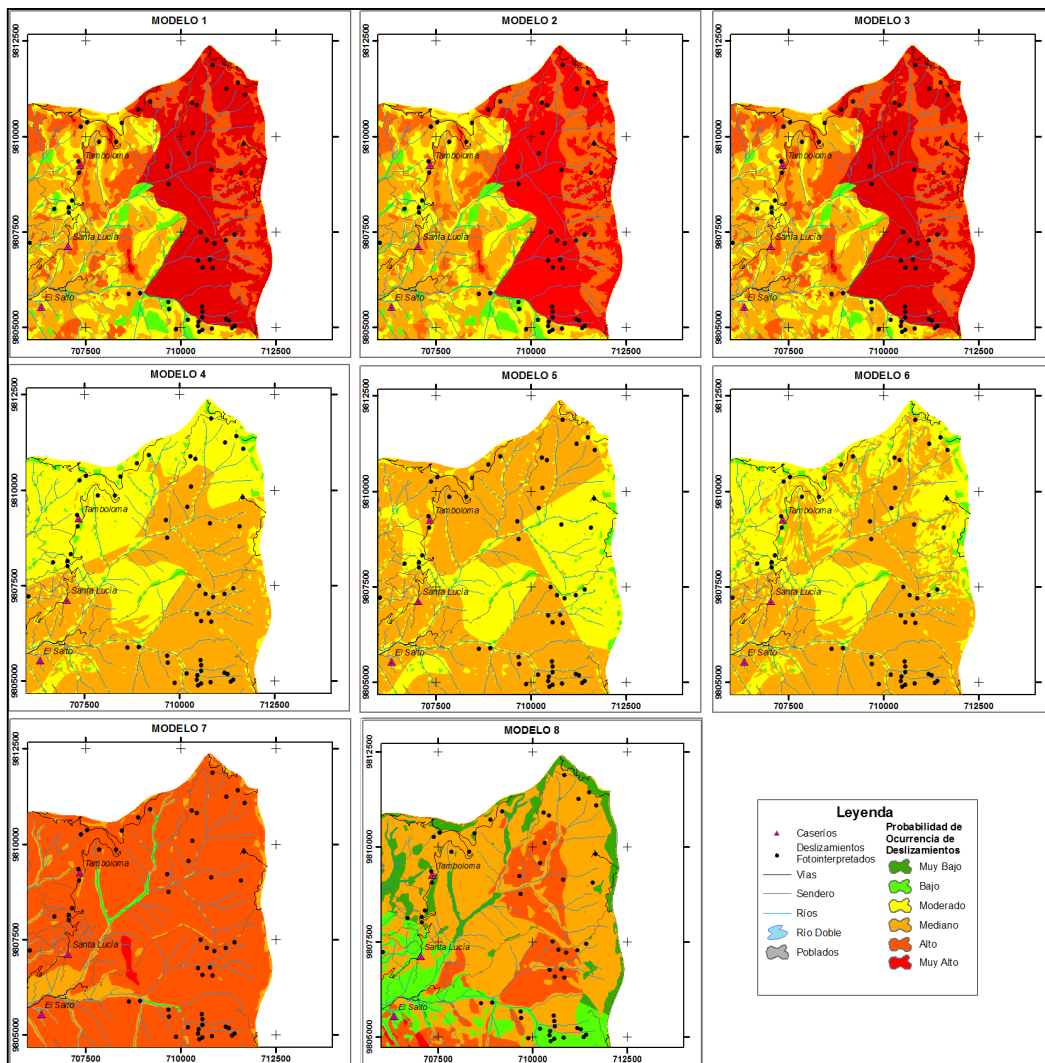


Figura 89 Análisis de Resultados Sector 5

Al noreste de la cuenca alta se estima probabilidad alta debido a que las pendientes superan el 30% y en algunos sectores el 70%, los suelos son francos moderadamente consolidados, prevalece el bosque húmedo que se encuentra muy alterado y pastizales. También es importante destacar que los deslizamientos fotointerpretados en esta zona corresponden a inestabilidades propias del sector, ya que la presencia de vías es escasa.

Lógica Fuzzy en sus modelos calcula probabilidad alta y muy alta, debido a que en este sector las intensidades de lluvias y la presencia de fallas

geológicas aumentan, pendientes superiores al 70% y a la poca compactación de los suelos.

Los modelos de Mora & Vahrson calculan probabilidad moderada y media, debido a los valores bajos de humedad del suelo, intensidad sísmica y de lluvias.

La metodología INDECI en su modelo 7 calcula probabilidad alta, y en el 8 alta y media, ya que en estos modelos considera la textura gruesa de los suelos (arenosos) y la litología muy susceptibles a deslizamientos.

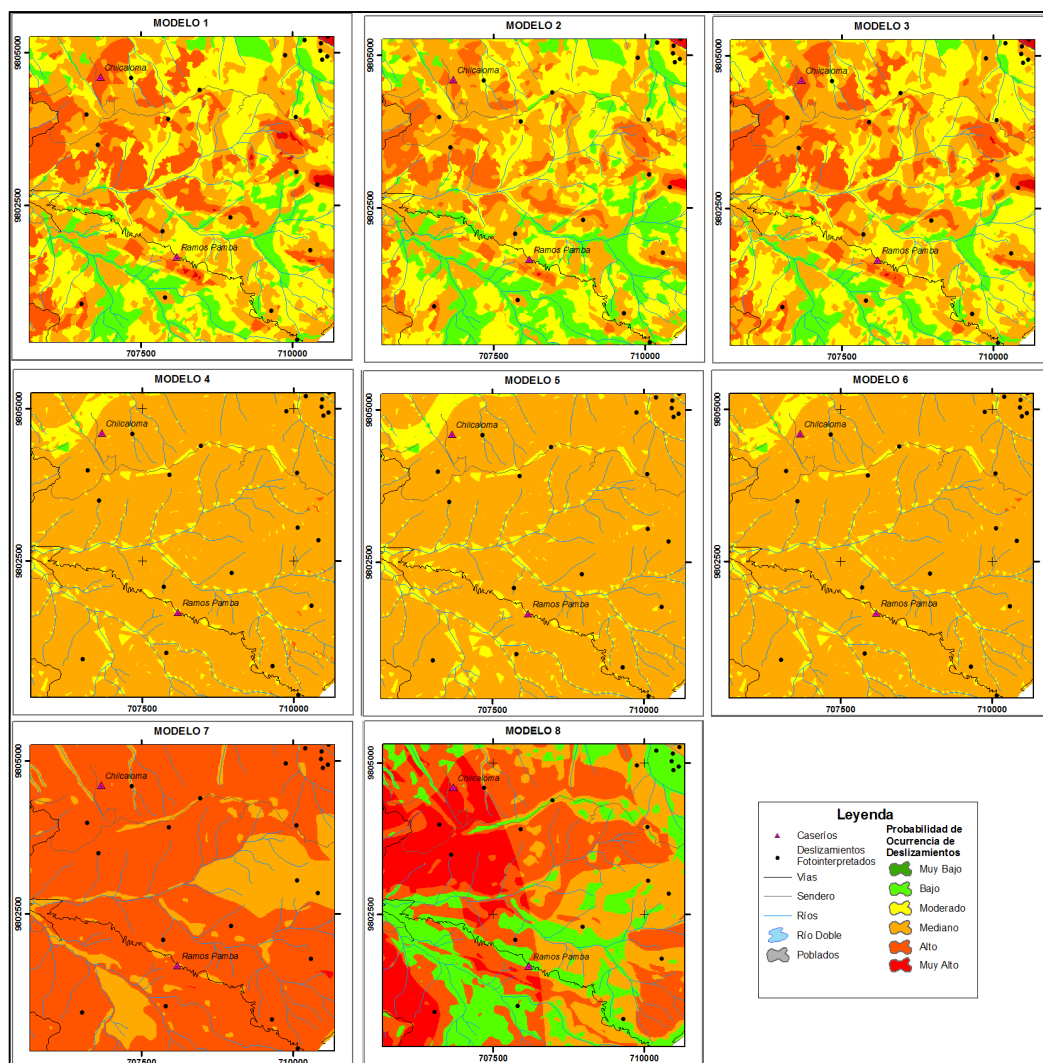


Figura 90 Análisis de Resultados Sector 6

En el sureste de la cuenca alta existe bosque húmedo, matorrales y vegetación herbácea en la mayor parte de su área, los suelos son francos medianamente consolidados y el tipo de roca es volcánica e intrusiva, el terreno supera el 30% y en ciertas áreas el 70% de pendiente, además, los deslizamientos fotointerpretados se encuentran dispersos por todo el sector; estas condiciones permiten estimar que la probabilidad es media y alta.

Lógica Fuzzy en los modelos 1, 2 y 3 calculan probabilidad moderada, media y alta; estos valores son producto de las pendientes fuertes, la susceptibilidad litológica y los suelos moderadamente compactos.

Los modelos de Mora & Vahrson calculan media; esto se da por los valores bajos de la humedad del suelo y de las intensidades de lluvias y sísmica, a pesar de que las pendientes son muy fuertes y hay susceptibilidad litológica a sufrir deslizamientos.

INDECI en el modelo 7 calcula alta y media y en el 8 baja, media, alta y muy alta probabilidad; estos valores son el resultado del aumento de la precipitación media anual, textura media de los suelos y pendientes mayores a 25°.

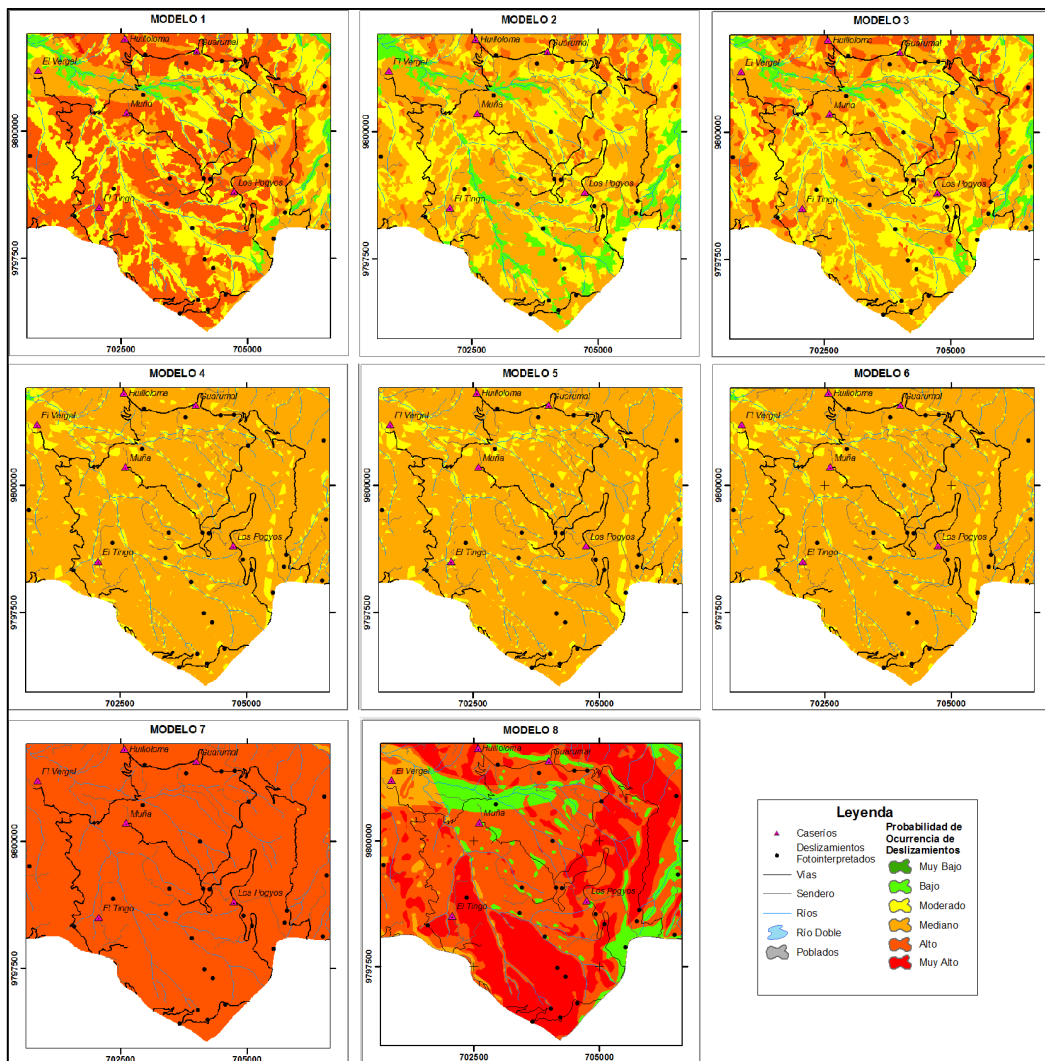


Figura 91 Análisis de Resultados Sector 7

Al sur de la cuenca alta el bosque húmedo ha ido cediendo por el cultivo de pastizales, las pendientes del sector superan el 30% y los suelos son francos y franco arenosos, los deslizamientos fotointerpretados se encuentran dispersos y la mayoría fueron provocados por los cortes de las vías; la probabilidad que se estima en este sector es media y alta.

Lógica Fuzzy en el modelo 1 calcula probabilidad moderada y alta, en los modelos 2 y 3 calcula moderada y media; son valores derivados del aumento de la red vial, a la susceptibilidad litológica y que en el sector predominan los pastizales que brindan una moderada cohesión del suelo.

Los modelos Mora & Vahrson calculan probabilidad media; estos valores son generalizados principalmente por valores bajos de la humedad del suelo, intensidad de lluvias y sísmica, a pesar de valor altos en pendientes y susceptibilidad geológica.

Los modelos INDECI, el 7 calcula probabilidad alta y el 8 calcula alta y muy alta; debido al aumento de la precipitación media anual y a la existencia de suelos arenosos y francos, a los que considera de alta y media susceptibilidad.

4.3 Conclusiones

- Para poder determinar cuál es el modelo que mejor representa la realidad de un área de estudio es necesario analizar el ajuste de los modelos, los valores estadísticos de dispersión en cada clase y la lógica de los resultados gráficamente.
- Lógica Fuzzy tiene como ventaja que considera variables como factores antrópicos y el tipo de cobertura vegetal; esto no sucede con Mora Vahrson e INDECI que usan sólo indicadores morfodinámicos.
- Mora – Vahrson presenta mejores resultados en áreas de estudio que tienen como característica alta intensidad sísmica y de lluvias, requisitos que la microcuenca del río Cristal no cumple ya que en la zona la intensidad sísmica es baja, registrándose sismos máximos de 4.1 en la escala de Richter, e intensidades de lluvias que son inferiores a los 200 mm en 24 horas.

- El modelo de lógica Fuzzy es el que mejor se adapta a las condiciones físico - geográficas de la microcuenca del río Cristal ya que la gran mayoría de los deslizamientos fotointerpretados se encuentran ubicados en zonas de probabilidad moderada a muy alta.
- El modelo que mejor representa la realidad de la microcuenca del río Cristal es el Modelo 3 de Ocurrencia a deslizamientos aplicando lógica Fuzzy al 10 percentil, con un ajuste del 0,9209 y con el 79% puntos de deslizamientos muestreados coincidentes con probabilidades de medio a muy alto.
- La realidad de la información en cuanto a datos meteorológicos en varios sectores del Ecuador es insuficiente, ya que los registros de series de datos de las estaciones se encuentran incompletos, además, hay otras estaciones que presentan ausencia de información por diferentes motivos; esta realidad dificulta la aplicación de algunos modelos como el de Mora & Vahrson, ya que 2 de sus parámetros importantes se basan en estos datos obligando a implementar técnicas de rellenado de datos, lo que implica que los resultados obtenidos sean imprecisos y por ende menos confiables.
- La metodología desarrollada por INDECI - Perú es un método muy simple que se basa en la reclasificación de variables con calificaciones de bajo, medio y alto para posteriormente realizar una intersección entre dos variables generando una matriz de ponderación donde se asignan una nueva clasificación con valores de bajo, medio y alto, al resultado se lo vuelve a cruzar con la siguiente variable repitiendo este proceso sucesivamente hasta conseguir un mapa de susceptibilidad; esta

metodología no es muy confiable ya que usa variables discontinuas y los resultados que arroja son muy limitados y subjetivos.

- La metodología de lógica Fuzzy es muy útil para determinar zonas susceptibles a amenazas por deslizamientos ya que implica una menor inversión en recursos de dinero y tiempo; debido a que las variables que utiliza son relativamente fáciles de conseguir y de procesar.
- Para estudios a cualquier escala (Grande, mediana y pequeña) la metodología basada en lógica Fuzzy es la que presenta resultados más confiables en todas sus variaciones.
- Las metodologías Mora & Vahrson e INDECI, tienen mejores resultados en trabajos a escalas regionales, debido al número y la discontinuidad de las variables con las que trabaja.
- La metodología que presenta resultados más confiables en todas sus variaciones es la de aplicación de lógica Fuzzy.
- La metodología basada en lógica Fuzzy tiene mucho por desarrollar, en este estudio se implementó una modificación en el algoritmo, donde, se permite discriminar las variables dándoles ponderaciones según su importancia o nivel de incidencia en el fenómeno estudiado. Así, también se puede considerar el incremento o disminución de variables, y la adaptación de la expresión matemática que permita obtener resultados más específicos en función del fenómeno estudiado.
- Obtener el mapa de probabilidad de deslizamientos ayuda a la previsión de áreas vulnerables a esta amenaza de origen natural, de esta manera ayudar a elaborar planes de prevención y mitigación de desastres por la amenaza de deslizamientos.

4.4 Recomendaciones

- La metodología de Mora & Vahrson fue desarrollada para la realidad de centro América, debido a los resultados poco confiables obtenidos en el presente estudio no se recomienda la aplicación de esta metodología.
- Se recomienda la aplicación de la metodología de lógica Fuzzy para la determinación de áreas susceptibles a deslizamientos debido a la fácil obtención y procesamiento de las variables, ya que los resultados obtenidos con esta metodología en el presente estudio son muy satisfactorios.
- No se recomienda la aplicación del método desarrollado por INDECI debido a su metodología simple y subjetiva.
- Se recomienda elaborar planes de protección en la microcuenca del río Cristal especialmente en la cuenca alta y proteger los cauces de los ríos para evitar deslizamientos que puedan producir un mayor arrastre y acumulamiento de detritos, que puede derivar en un potenciamiento de la amenaza por inundaciones.

4.5 Bibliografía

Andocilla, L. (2012). *Implementacion Del Algoritmo De Logica Fuzzy Aplicado A La Determinacion Del Grado De Susceptibilidad A Deslizamientos En El Area Monjas – Ferroviaria – La Magdalena –*

Itchimbia Del Distrito Metropolitano De Quito. Escuela Politécnica Del Ejército.

Barrantes Castillo, G., Barrantes Sotela, O., & Núñez Roman, O. (2011).

Efectividad de la Metodología Mora-Vahrson Modificada en el Caso de los Deslizamientos Provocados por el Terremoto de Cinchona , Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 47, 141–162.

Bonachea, J. (2006). *Desarrollo, Aplicación Y Validación De Procedimientos*

Y Modelos Para La Evaluación De Amenazas, Vulnerabilidad Y Riesgo Debidos A Procesos Geomorfológicos. Universidad De Cantabria.

Crozier, M. J., & Glade, T. (1999). *Frequency and magnitude of landsliding:*

Fundamental research issues, en *Memorias. International Conference on Geomorphology*, (pp. 141-155). Bologna.

Cruden, D. M. (1991). *A Simple definition of a landslide*. *Bulletin of the*

International Association of Engineering Geology, v. 43 , 27-29.

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. In K.

Turner, & R. L. Schuster, *Landslides investigation and mitigation* (pp. 36-75). Washington D. C: National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247.

ESRI España. (2014). *¿Qué es un SIG? | Formación*. Retrieved July 08,

2014, from <http://www.esri.es/es/formacion/formacion-esri-espana/que-es-un-sig/>

- GEMMA, G. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional*, 4(0717-3733), 432.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M., & Hutchinson, J. N. (2001). *Review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7 , 22–238.
- Hutchinson, J. N. (1988). *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Memorias, 5th International Conference on Landslides*, (pp. 3–35). Lausanne.
- Lianes, E. (2008). *ESTUDIO DEL FACTOR VEGETACIÓN “C” DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDAS DE SUELO REVISADA “RUSLE” EN LA CUENCA DEL RÍO BIRRÍS (COSTA RICA) TRABAJO. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.*
- Maskrey, A. (1998). *Navegando entre brumas: La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgos en américa latina.* (A. Maskrey, Ed.) (p. 344).
- Morad, M., & Triviño Pérez, A. (2001). *Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas : una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación. Boletín de La A.G.E.*, 31, 23–46.
- Nichol, S., Hungr, O., & Evans, S. G. (2002). *Large scale brittle and ductile toppling of rock slopes. Canadian Geotechnical Journal*, v. 39 , 773–788.

- Padilla, O. (2007). *FUNDAMENTO TEÓRICO PARA MODELIZACION DE VARIABLES AMBIENTALES MEDIANTE OPERADORES DIFUSOS*. *Revista Geoespacial*, 4.
- Pierson, T. C. (2005). *Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow*. In M. Jakob, & O. Hungr, *Debris flow hazard and related phenomena* (pp. 159–202). Chichester: Springer-Praxis.
- Portilla, M. E. (1999). *Evaluación de la Amenaza por Deslizamiento en Málaga, Santander, Aplicando la Metodología de los Conjuntos Difusos: Un Tema de Geología*. *Geología Colombiana*, (24), 159–176. Retrieved from <http://digital.unal.edu.co/index.php/geocol/article/viewFile/31523/31545>
- Portilla, M. E. (2001). *Aplicación de los sistemas de lógica difusa en la evaluación de la susceptibilidad de fenómenos de remoción en masa* (Geología Colombiana No. 26, 2001).pdf. *Geología Colombiana*, (26), 189–205.
- Ramirez, M. (2006). *LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN DE MASA Y SU APLICACIÓN A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL: Ejemplo Provincia de Tungurahua*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.
- Santacana, N. (2001). *Análisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Superficiales y Grandes Deslizamientos*

mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregat. Universidad Politécnica de Catalunya.

Soeters, R., & VanWesten, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides investigation and mitigation* (pp. 129–177). Washington D. C: National Academy Press, Transportation Research Board Special.

Toulkeridis, T. (2013, Noviembre 13). *Víctimas por desastres naturales.* (A. Chamorro, Interviewer)

Varnes, D. J. (1978). *Slope movements types and process.* In R. L. Schuster, & R. J. Krizek, *Landslides analysis and control* (pp. 9-33). Washington DC: National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 176.